

平成 25 年度
斜面安定性における転動挙動衝撃試験

平成 26 年 3 月

公益財団法人 鉄道総合技術研究所

本報告書は、公益財団法人 鉄道総合技術研究所が独立行政法人 原子力安全基盤機構からの委託により実施した平成 25 年度 斜面安定性における転動挙動衝撃試験の成果をとりまとめたものです。

本報告書の複製、転載、引用等には、独立行政法人 原子力安全基盤機構の承認が必要です。

目次

1. まえがき	1
2. 実施内容の概要	3
2. 1 全体計画	
2. 2 本試験の実施内容	
3. 計測計画(計測センサおよび画像解析システム)	5
3. 1 計測センサ	
3. 2 画像解析システム	
4. 試験模型製作と試験装置(安全対策設備含む)の製作および設置	8
4. 1 大型流路模型の製作と設置	
4. 2 岩塊および土砂模型の製作	
4. 3 衝撃荷重を計測するための鉛直壁模型の製作と設置	
5. 計測センサの選定と設置	51
5. 1 反力壁への衝撃荷重を計測するためのセンサの選定と設置	
5. 1. 1 センサの選定	
5. 1. 2 センサの設置	
5. 1. 3 荷重計校正試験	
5. 1. 4 振り子試験	
5. 2 反力壁の変位を計測するためのレーザー変位計	
5. 3 反力壁の加速度を計測するための加速度計	
6. 画像解析システムの選定と設置	194
6. 1 画像解析システムの選定と購入	
6. 2 岩塊の挙動を計測するための画像解析システムの設置	
6. 3 土砂の挙動を計測するための画像解析システムの設置	

7. 地盤材料の要素試験と各試験データの取得	200
7. 1 三軸圧縮試験および三軸圧縮繰返し試験	
7. 2 岩塊の跳ね返り係数計測試験	
7. 3 岩塊の摩擦係数を計測するための一面せん断試験	
8. 土砂の流動試験および岩塊の転動試験と各試験データの取得	262
8. 1 岩塊および土砂の転動, 流動試験	
8. 2 データの取得	
8. 3 データの分析	
9. 転動・流動実験の画像解析結果と荷重計測結果	275
9. 1 画像解析 (壁無ケース)	
9. 2 画像解析 (壁有ケース)	
9. 3 荷重計測結果	
10. 土砂の流動試験および岩塊の転動試験の検証解析	1183
10. 1 検証解析の概要	
10. 2 個別要素法による検証解析	
10. 3 粒子法(MPM)による検証解析	
11. 技術資料作成	1473
11. 1 斜面安定・変形解析ツールの構築	
11. 2 FEM解析による斜面の応答の評価	
11. 3 すべり線の探索・安定計算	
11. 4 ニューマーク法によるすべり土塊の変形解析	
11. 5 まとめと考察	
12. まとめ	1643

1. まえがき

平成 18 年 9 月に原子力発電所の耐震設計審査指針が改訂され、地震随件事象として津波と斜面安定性に対する安全性評価が要求事項として規定された。斜面安定性を検討する上でのシナリオは、原子炉建屋周辺斜面が地震に伴い不安定化し、斜面崩壊により岩塊が滑落し、原子炉建屋に衝突し、建屋・機器に損傷を与えるというものである（図 1.1）。原子力発電所の安全性を確保するためには、斜面の崩壊によって施設の安全機能に重大な影響を及ぼさないことを確認する必要がある。そのためには、斜面崩壊の発生可能性と崩壊領域を合理的に評価することが重要となる。岩盤斜面の地震時崩壊発生およびその崩壊領域については、従来から力のつり合いに基づくすべり安全率評価から推測されてきた。しかしながら、その手法の適用性についてはこれまで過去の被災事例を対象とした定性的な検討が多く、定量的な検討が可能となる岩盤斜面の動的な崩壊を再現した模型実験が実施された事例は少ない。また、岩盤斜面の崩壊には不連続面や弱層の存在が大きく関与するため、その影響を適切に評価する必要がある。岩盤斜面の地震時安定性の評価手法の検討・高度化を行うためには、現象を再現した模型実験によるメカニズムの解明と模型実験により得られた結果を検証可能な数値解析による検討が重要となる。最終的には、実規模の原子力プラントのモデル斜面に対して設計計算式または数値解析手法を用いることにより、斜面の安全性の評価を実施することが重要である。

これまで岩盤斜面の崩壊メカニズムの解明と応答特性や変形特性の把握および対策工の設計法高度化のため、地盤材料の要素実験とサイズの異なる斜面模型を用いた振動台実験、遠心载荷試験や数値解析を実施してきた。平成 24 年度には、(公財)鉄道総合技術研究所の中型振動台および(株)大林組技術研究所所有の大型遠心力载荷試験装置を用いて加振試験を実施することで、対策工の地震時挙動に関して検討した。また、これまで縮小規模の模型に関する実験で蓄積してきた知見が、実規模の応力状態における斜面模型にも適用しうることかを検証した。これまでの実験的検討結果と解析的検討結果から、原子炉建屋周辺斜面の安定性評価手法が示されるとともに、アースアンカーによる対策が行なわれた斜面の設計手法を構築するための基礎データが得られた。

しかしながら、残余のリスク評価の観点に立った時、斜面全体が崩壊しない場合でも、部分的に岩塊が斜面から転げ落ち(岩塊の転動)、原子力施設に衝突する場合や、想定をはるかに超える地震動が作用し斜面が崩壊した場合の原子力施設へのリスクについては、未検討であった。岩塊および土砂の転動、流動挙動が原子力施設に及ぼす影響を評価するためには、土砂および岩塊の転動、流動距離の評価、土砂および岩塊が原子力施設に衝突した際の衝撃荷重の評価が必要である。そこで、本件では、土砂および岩塊の転動、流動挙動と鉛直壁に衝突した際の衝撃荷重を、大型の岩塊、土砂模型を用いた転動、流動実験により把握する。さらに、それらの挙動に対し個別要素法または粒子法で再現解析を実施し、上記の目的を満たす解析手法の有効性の明確化を行うことを目的とする。

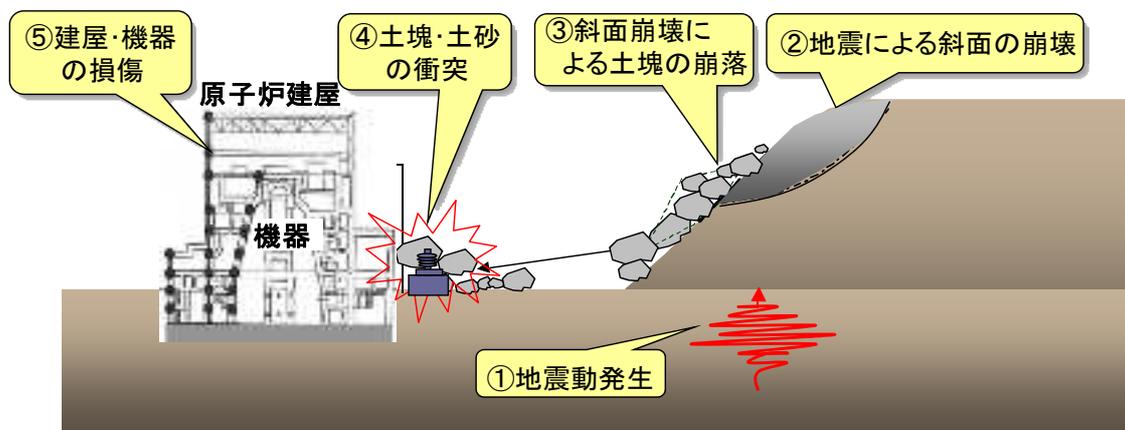


図 1.1 原子炉建屋周辺斜面の想定シナリオ

2. 実施内容の概要

2. 1 全体計画

斜面安定性検討分科会は、地盤・構造物・機器機能限界検討会の一環であり、以下の4つの項目について検討を実施している。

- ① 現行の応力状態に基づいた判断基準に加え、変形・ひずみ等に基づいた損傷判断基準に関する検討
- ② 斜面が崩壊しても、プラント施設の機器類に重大な影響を与えないことを確認するための検討
- ③ 不連続体解析等を用いて、斜面崩壊及び岩塊転動距離を3次元で評価する手法の検討
- ④ 斜面崩壊の恐れがある場合の対策施工の検証方法の検討

上記検討により、原子力施設に係わる斜面の安定性に関する指針の作成を最終目的とする。本試験では、上記の項目のうち、②、③の内容について検討を行うものである。

2. 2 本試験の実施内容

本試験の実施内容は下記の通りである。

- ① 試験模型製作と試験装置（安全対策設備含む）の製作および設置
試験の目的に沿った岩塊および土砂を転動、流動させるための大型流路模型（流路距離約10m）、衝撃荷重を計測するための反力壁を製作する。その際、周囲の安全対策に配慮する。また、試験の目的に沿った岩塊および土砂模型の選定を行う。
- ② 計測センサの選定と設置
岩塊および土砂の転動、流動実験を行うための計測センサの選定と設置を行う。
- ③ 画像解析システムの選択と設置
土砂や岩塊の移動速度については、画像解析システムを使用して計測する。画像解析システムは、防水、屋外での使用、耐振性能に優れたカメラと屋外計測に適した計測システムからなり、側面および上方から撮影を行うことで三次元的に計測を行う。
- ④ 地盤材料の要素試験とデータ取得
転動、流動実験に用いる岩塊および土砂の変形強度特性を評価するための要素試験を実施する。要素試験は、土砂の物性を把握するための三軸圧縮試験、三軸圧縮繰返し試験と、岩塊および土砂の動摩擦係数を把握する一面せん断試験、岩塊の跳ね返り係数を把握する跳ね返り試験からなる。
- ⑤ 土塊の流動試験および岩塊の転動試験とデータ取得
①で製作した流路と反力壁と、②、③で選定した計測センサと画像解析システムを用いて岩塊および土砂の転動、流動実験を実施し、転動・流動挙動、衝撃荷重の計測を実施する。その際、後述する検証解析の妥当性を評価する指標である、土砂や岩塊の移動速度、回転角と、鉛直壁への衝突荷重を計測する。

⑥土塊の流動実験および岩塊の転動実験の検証解析

⑤で実施した転動、流動実験で捉えたデータに基づいた検証解析を実施し、岩塊および土砂の転動、流動挙動を評価する上での解析手法の適用性を検討する。解析手法としては、個別要素法（DEM）と粒子法（MPM）を用いる。

⑦技術資料作成

上記①から⑥の内容をとりまとめるとともに、斜面安定・変形解析ツールの高度化およびツールの検証を行い、技術資料を作成する。

3. 計測計画（計測センサおよび画像解析システム）

3. 1 計測センサ

計測センサとしては、衝撃荷重を計測するための荷重計と、反力壁の変位および加速度を計測する変位計と加速度計を用いるものとする。

荷重計については、岩塊が衝突した際の荷重を計測するための岩塊用荷重計、土砂が衝突した際の荷重を計測するための土砂用荷重計からなり、図 3.1.1 に示すように、反力壁前面に設置する。なお、荷重を計測する方向は、図 3.1.2 に示すように衝突方向、衝突直交方向、上下方向の三方向とする。

反力壁の変位および加速度を計測する変位計と加速度計については、図 3.1.1 に示すように、反力壁上面と背面に設置し、岩塊および土砂が衝突した際の反力壁の変位と加速度を計測する。

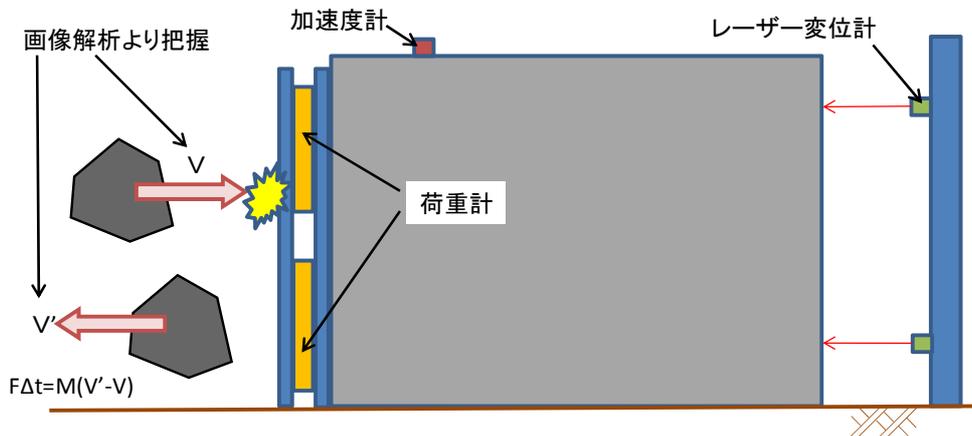


図 3.1.1 計測センサの設置計画図

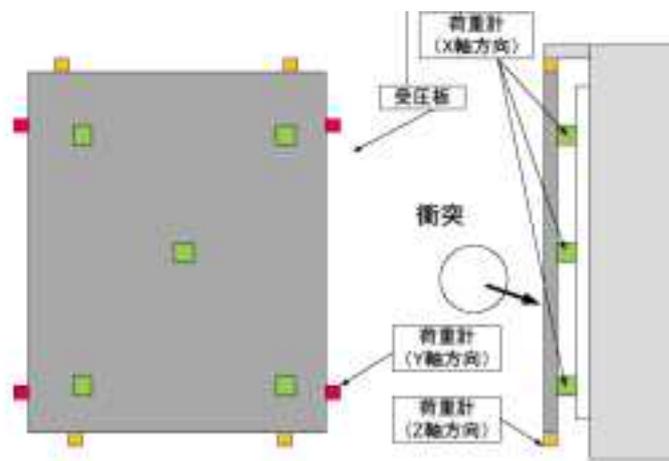


図 3.1.2 荷重計の計測方法

3. 2 画像解析システム

3. 2. 1 岩塊模型の挙動の計測

岩塊模型の挙動を3次元で計測できるように画像解析システムを用いた計測を行う。図3.2.1に示すように高解像度カメラを2台側面に、2台を上面に取付け計測する。岩塊の転動については以下の項目について計測する。計測は、岩塊に標点等を取り付け、標点の軌跡を画像で追跡する手法を用いる。また、標点を岩塊に多数取り付け、岩塊の回転挙動も計測する。

- ① 流路側面から見た岩塊の跳ね返り挙動 (図3.2.2①)
- ② 流路側面から見た岩塊の滑動挙動 (図3.2.2②)
- ③ 流路側面から見た岩塊の衝突挙動 (図3.2.2③)
- ④ 流路上面から見た岩塊の流下挙動 (図3.2.3④)
- ⑤ 流路上面から見た岩塊の拡散挙動 (図3.2.3⑤)

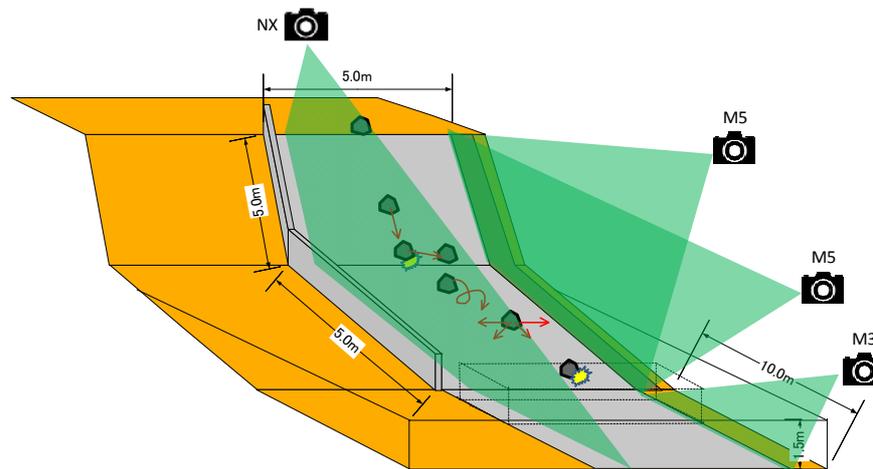


図 3. 2. 1 岩塊の転動実験におけるカメラ配置計画図

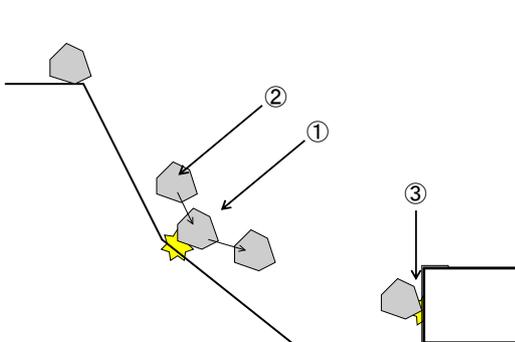


図 3. 2. 2 側面から見た図

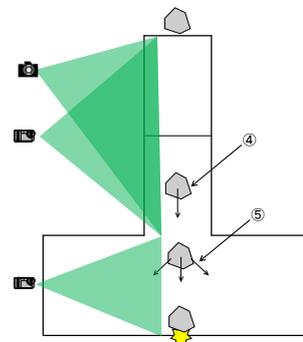


図 3. 2. 3 上面から見た図

3. 2. 2 土砂模型の挙動の計測

土砂模型の挙動を3次元で計測できるように画像解析システムを用いた計測を行う。図3.2.4に示すように高解像度カメラ2台を側面に、2台を上面に取付け計測する。土砂の流動については以下の項目について計測する。計測は、土砂に標点等を取り付け、標点の軌跡を画像で追跡する手法または、土砂の輪郭を追跡する手法を用いる。

- ① 流路側面から見た土塊の流下挙動 (図 3.2.5①)
- ② 流路側面から見た土塊の衝突挙動 (図 3.2.5②)
- ③ 流路上面から見た土塊の流下挙動 (図 3.2.6③)
- ④ 流路上面から見た土塊の拡散挙動 (図 3.2.6④)

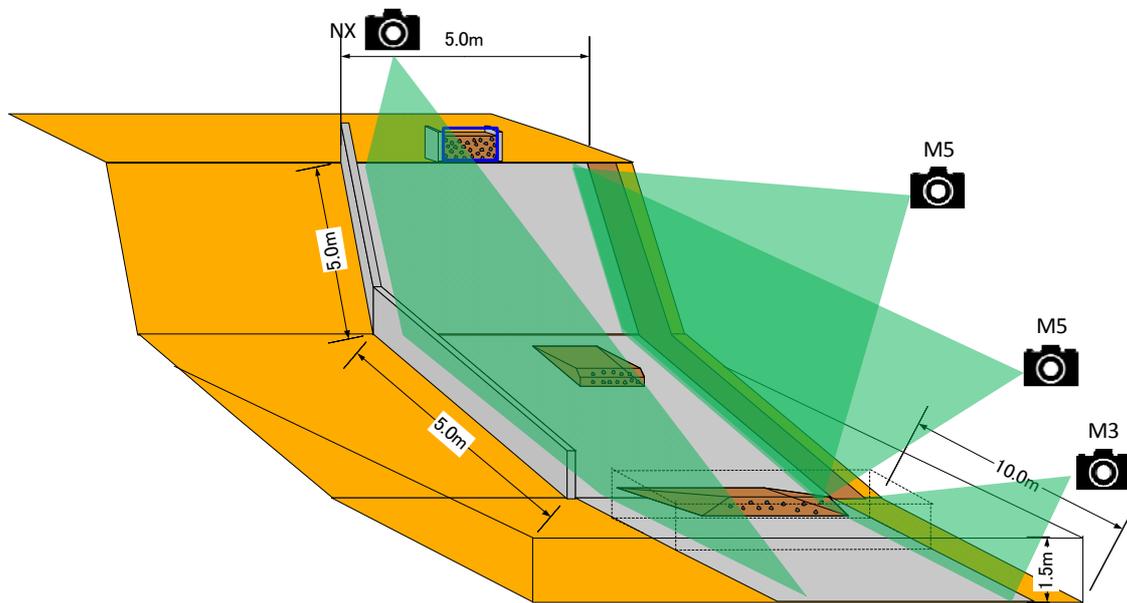


図 3.2.4 土砂流動試験におけるカメラ配置図

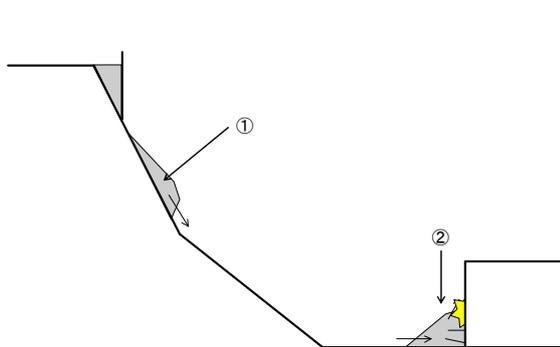


図 3.2.5 側面から見た図

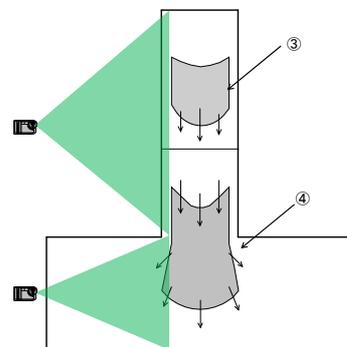


図 3.2.6 上面から見た図

4. 試験模型製作と試験装置（安全対策設備含む）の製作および設置

4. 1 大型流路模型の製作と設置

4. 1. 1 大型流路模型の計画

試験の目的に沿った岩塊および土砂を転動、流動させるための大型流路模型（流路距離約10m）の製作に向けて以下のように計画した。大型流路は、図4.1.1と図4.1.2に示す勾配（45度、30度）を有する斜路と最大幅約10.0mの平坦面から構成し、このようにすることで、岩塊が転動した際に勾配変化点において跳ね返りが発生するようにした。また、大型流路模型の平坦部の構築は、地面を深さ約1.5m程度掘削することで構築し、最大幅は7.5mとした。流路長は約10.0m（45度勾配部分5.0m、30度勾配部分5.0m）、流路幅は5.0mとした。

また、周囲の安全対策として、流路一側面に壁の設置、もう一側面にトレンチの掘削を行い、仮に岩塊または土砂が流路部分を大きくはずれた場合でも、遠方までその影響が広がらないように対策を講じた。また、岩塊が衝突した際の騒音対策についても、遮音シートで覆うなどして対策を講じた。なお、片面のみ壁を設置する理由は、側方からのカメラ撮影を行うことができるようにするためである。

平坦部については、掘削して構築することで、岩塊または土砂が掘削箇所以外に大きく飛散することを防止した。また、平坦部には後述する衝撃荷重を計測するための反力壁を設置する。反力壁の設置位置は流路端から1.5mとし、岩塊および土砂の転動、流動実験終了後は、大型流路模型、反力壁を撤去し元の状態に戻すものとした。

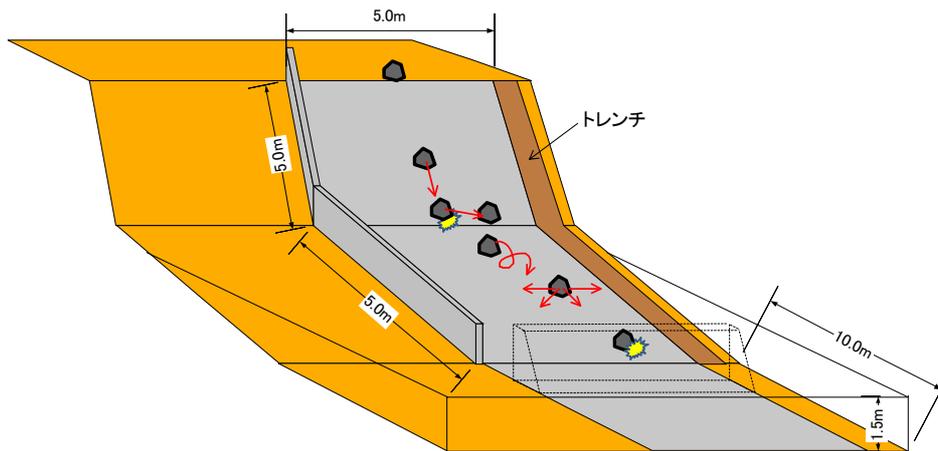


図4.1.1(a) 岩塊の転動実験に用いる流路の全体計画図

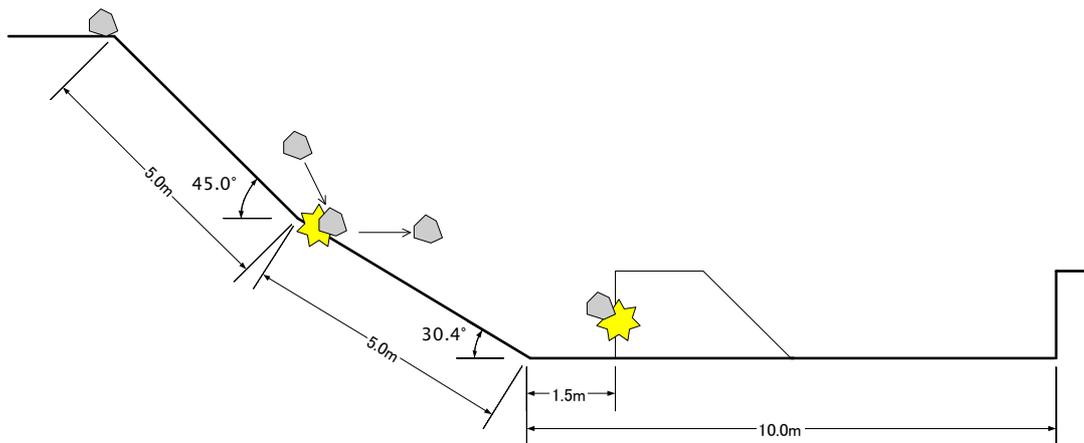


図 4. 1. 1 (b) 岩塊の転動実験に用いる流路の断面計画図

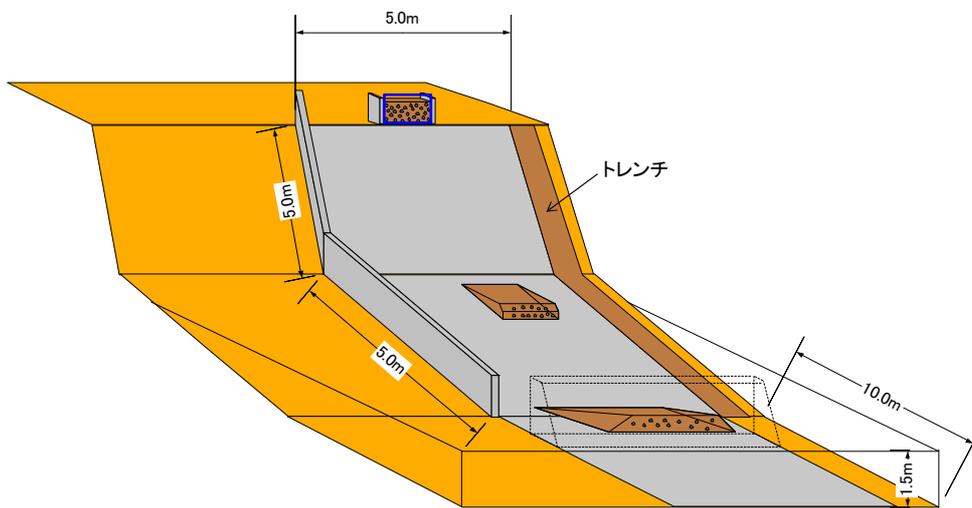


図 4. 1. 2 (a) 土砂の流動実験に用いる流路の全体計画図

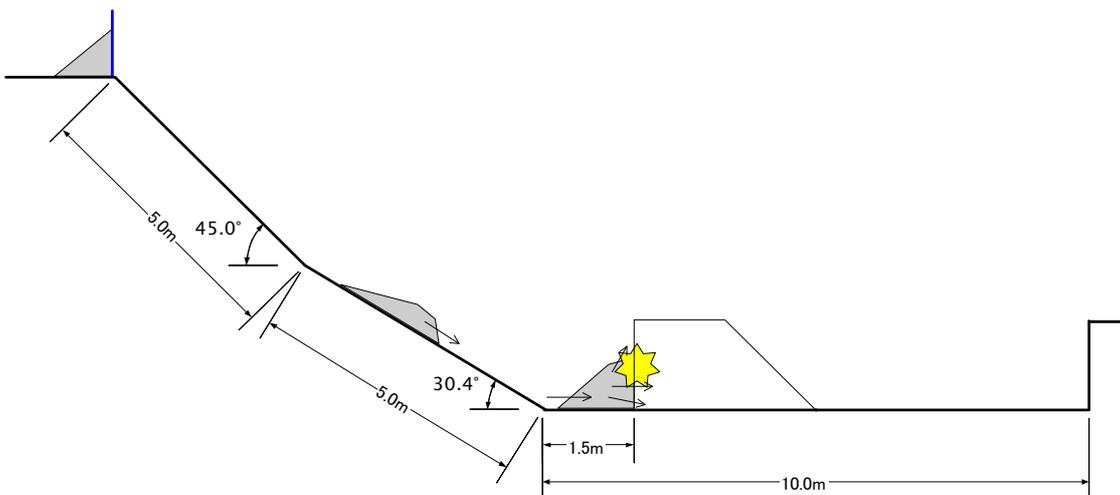


図 4. 1. 2 (b) 土砂の流動実験に用いる流路の断面計画図

流路底面については、図 4.1.3 に示すように、地表面に吹き付けコンクリートを施し、その上に P C 板を敷設した構成とした。

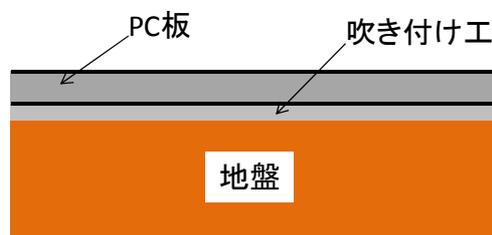


図 4.1.3 流路底面の構造

4. 1. 2 大型流路模型の製作

図 4.1.4 に大型流路模型の設計図を示す。大型流路模型は、公益財団法人鉄道総合技術研究所、盛土試験場に構築した。当該試験場には、補強土擁壁、鉄橋の実物大模型が構築されており、これらを利用して、画像解析カメラによる撮影を行うものとした。

(1) 平坦部の施工

はじめに、地面の掘削を行い、平坦部の施工を行った。写真 4.1.1 に、平坦部掘削工事の状況を示す。



(a) 掘削工事状況



(b) 平坦部掘削後

写真 4.1.1 平坦部掘削工事の状況

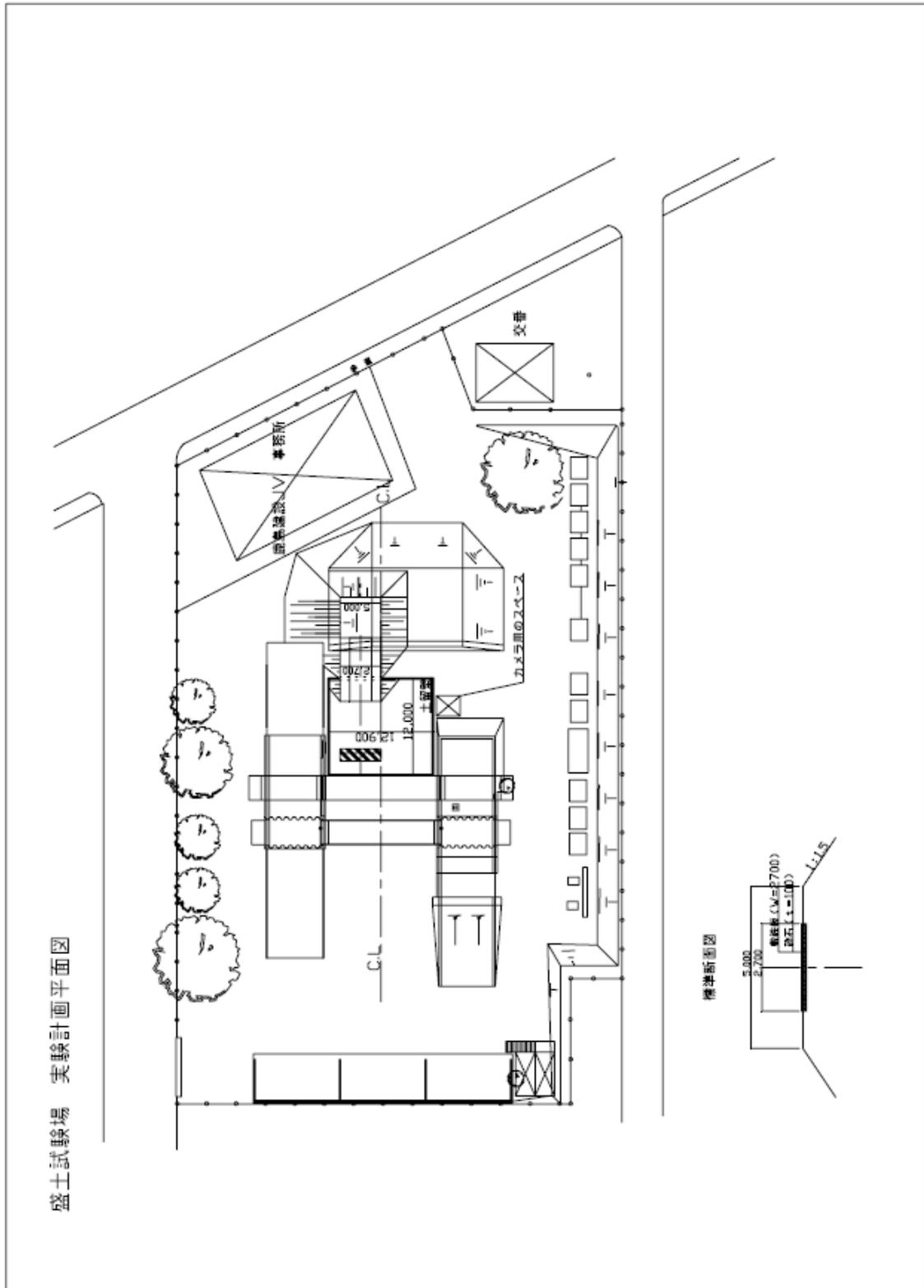


図 4.1.4(a) 大型流路模型の実験計画平面図

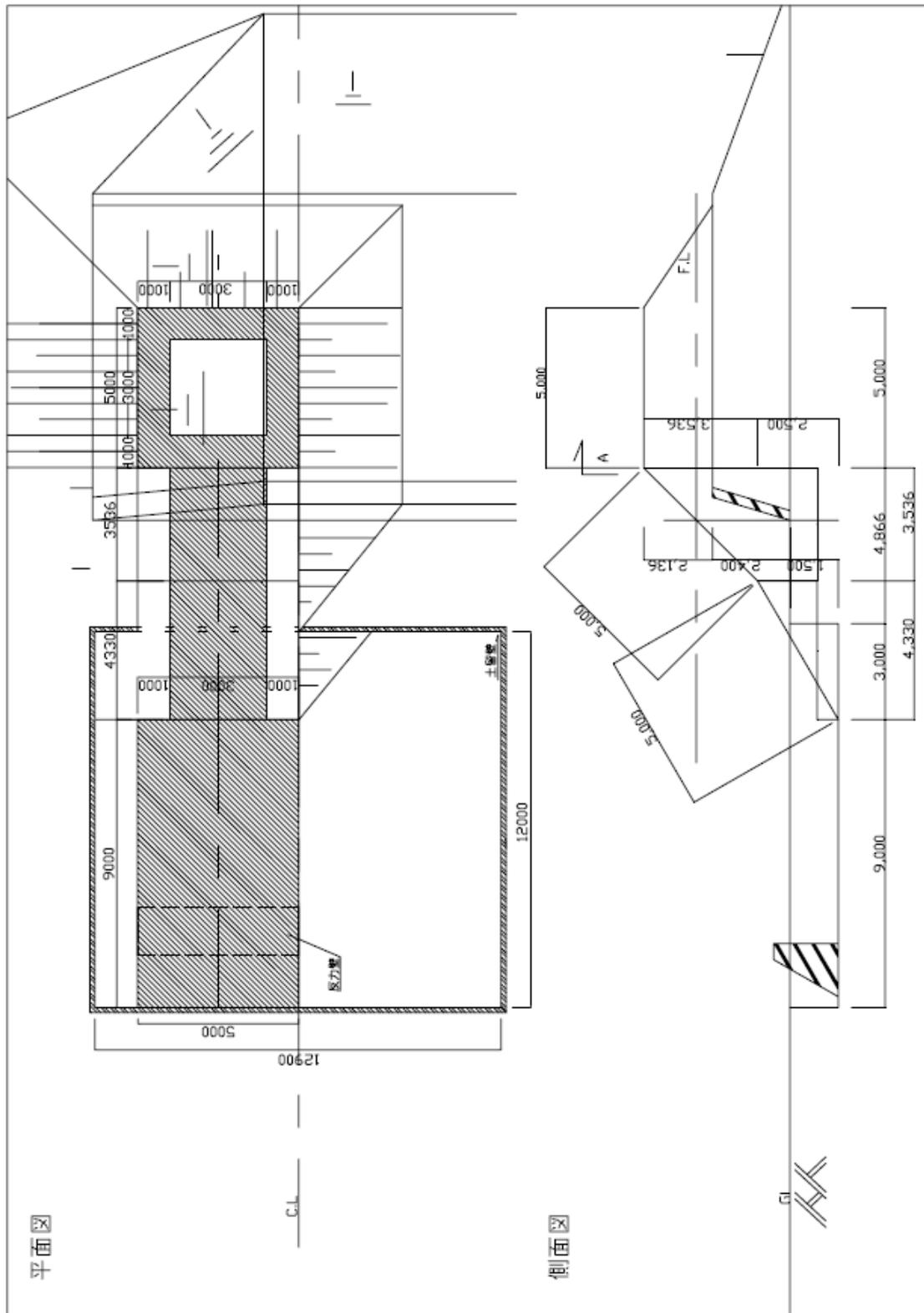


図 4. 1. 4(b) 大型流路模型の詳細平面図，側面図

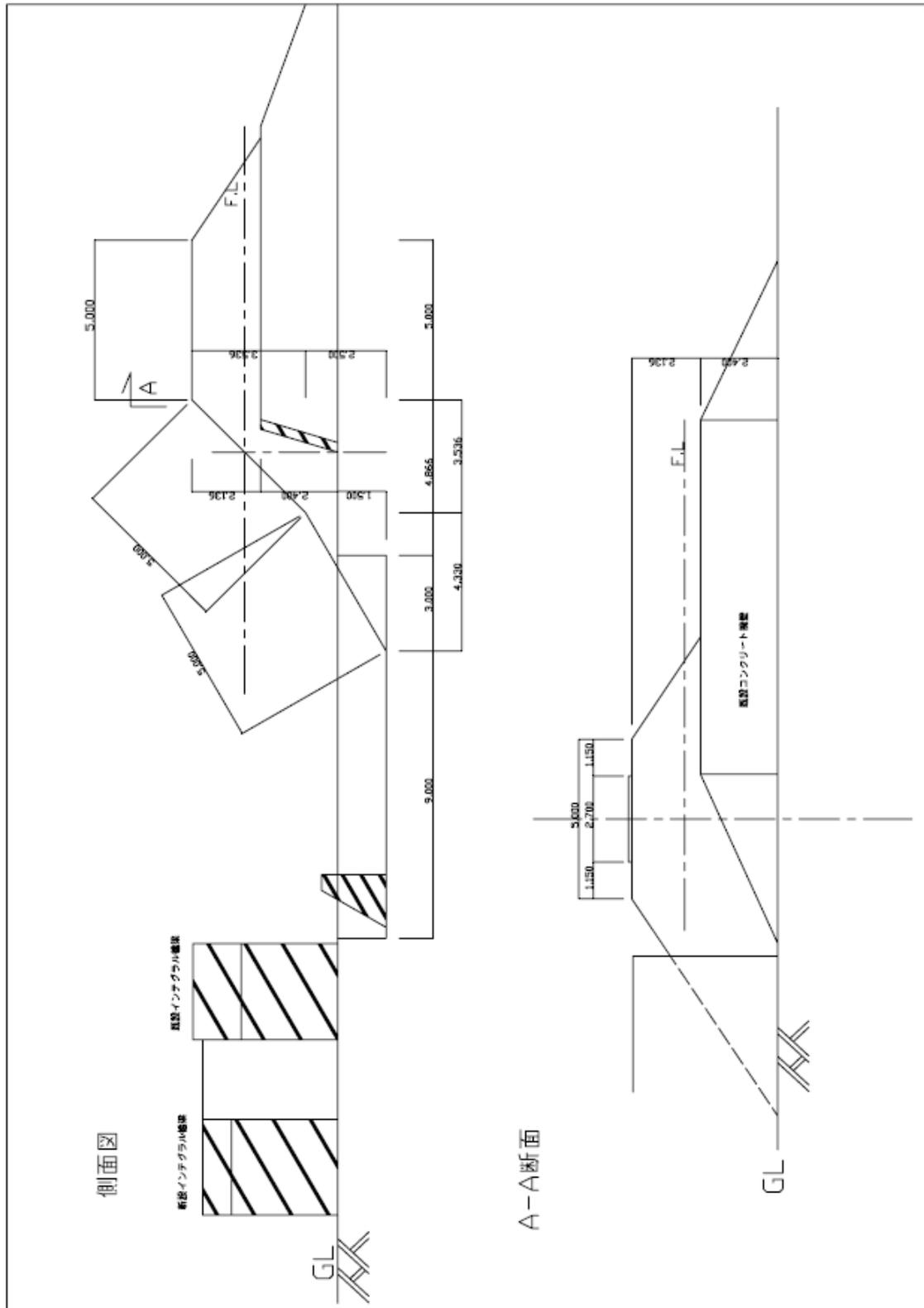


図 4.1.4(c) 大型流路模型の側面図，断面図

写真 4.1.2、4.1.3、4.1.4 に、平坦部掘削後に実施した出来型検査の様子を示す。平坦部の長さ、幅および深さに対し実施し、それぞれ計画の仕様を満たしていることを確認した。



写真 4.1.2 平坦部長さの検査状況



写真 4.1.3 平坦部幅の検査状況



写真 4.1.4 平坦部深さの検査状況

掘削後、平坦部底面にコンクリートを打設し、その上に PC 板を敷設した。写真 4.1.5 にコンクリート打設後と、PC 板敷設後の状況を示す。



(a) コンクリート打設状況



(b) PC 板敷設状況

写真 4.1.5 平坦部にコンクリートおよび PC 板を敷設した状況

(2) 流路部の施工

大型流路模型の流路部の構築は、45度勾配と30度勾配の二勾配を有する盛土を構築し、その盛土のり面に吹き付けコンクリート工を施した上で、複数のPC板を敷設することで構築した。吹き付けコンクリート工については、図4.1.5に示すように、PC板が地面から乖離しないよう、地表面にワイヤーメッシュをアンカーピンで留め、その上にコンクリートを吹き付ける、補強吹き付け工を用いて施工した。写真4.1.6に吹き付け工の様子を示す。

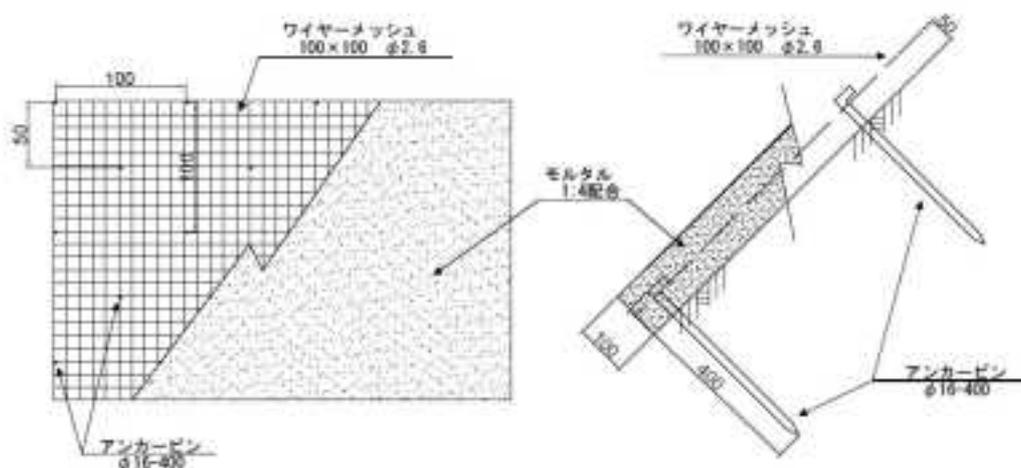


図 4.1.5 補強吹き付け工



(a) メッシュ取付後



(b) コンクリート吹き付け後

写真 4.1.6 流路部にコンクリートを吹き付けした状況

写真 4.1.7 に敷設に用いた PC 板と、PC 板を流路に敷設した状況を示す。PC 板は、長さ 1.0m、幅 2.5m のものであり、厚さは 10cm である。



(a) PC 板

(b) PC 板敷設後

写真 4.1.7 流路部にコンクリートを吹き付けした状況

また、写真 4.1.7(b)に示すように、流路部および平坦部の北側面にベニヤの壁を作成した。その際、画像解析で白黒は明確になるよう、白色の壁とした。また、安全対策として、南側面にトレンチを構築した。図 4.1.6 に流路模型の断面図を示す。勾配については、約 43 度と約 29 度の二勾配からなる。長さは、43 度部は 5.0m、29 度部は 5.77m となった。

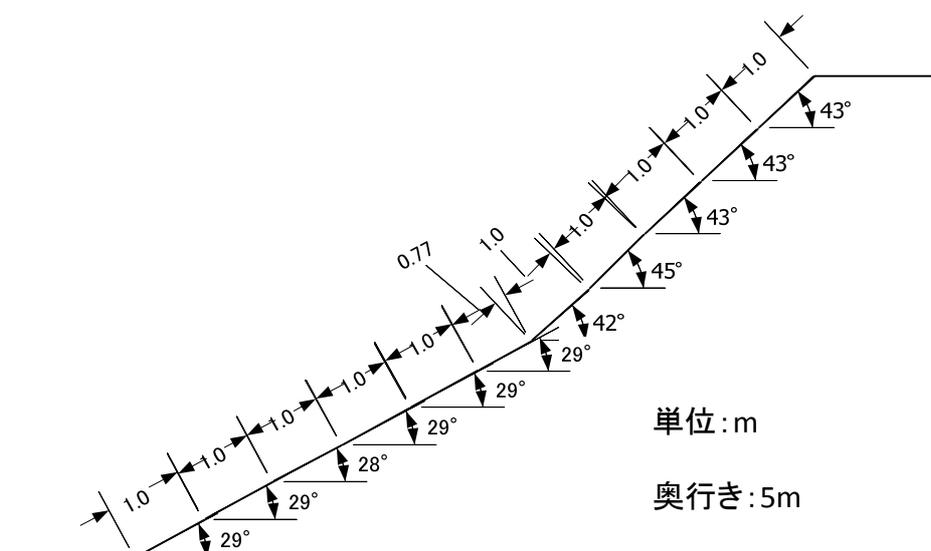


図 4.1.6 流路模型の断面図

4. 2 岩塊および土砂模型の製作

4. 2. 1 岩塊模型の製作

本試験の目的に沿った岩塊模型の製作を行った。岩塊模型については、図 4. 2. 1 に示すように 3 種類（球形、塊状、板状）の形状を有したものを採用した。岩塊の大きさについては、代表径 20cm, 40cm のものを製作するものとした。ただし、球形模型については、振り子試験および跳ね返り試験用に 50cm 径のものも製作するものとした。

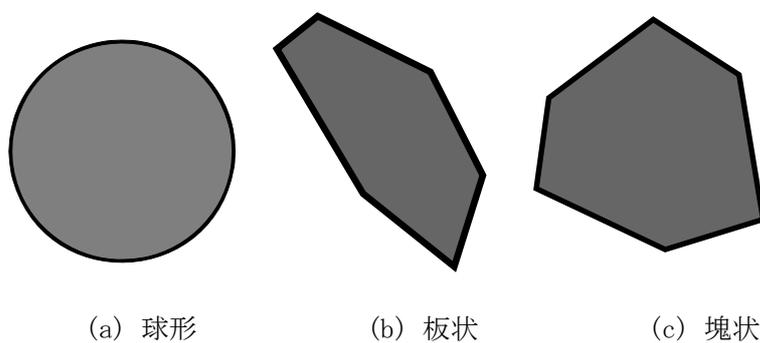


図 4. 2. 1 岩塊模型に用いる岩塊形状の概要

岩塊模型の製作は、岩塊模型用の型枠を製作し、型枠の中に高強度無収縮グラウト材に短繊維を混和させたものを用いて製作した。型枠用に用いた元の岩塊を写真 4.2.1～図 4.2.4 に示す。



(a) 撮影画像①



(b) 撮影画像②



(c) 撮影画像③



(d) 撮影画像④

写真 4.2.1 塊状岩塊 (20cm 径)



(a) 撮影画像①



(b) 撮影画像②



(c) 撮影画像③



(d) 撮影画像④

写真 4.2.2 塊状岩塊 (40cm 径)



(a) 撮影画像①



(b) 撮影画像②



(c) 撮影画像③

写真 4.2.3 板状岩塊 (20cm 径)



(a) 撮影画像①



(b) 撮影画像②



(c) 撮影画像③



(d) 撮影画像④

写真 4.2.4 板状岩塊 (40cm 径)

写真 4.2.5 に岩塊模型用の型枠を示す。



(a) 球形 (20, 40cm, 50cm 径)



(c) 塊状 (20cm 径)



(d) 塊状 (40cm 径)



(e) 板状 (20cm 径)



(f) 板状 (40cm 径)

写真 4.2.5 岩塊製作用型枠

写真 4.6.6～写真 4.6.8 に製作した岩塊模型を示す。なお，養生期間はグラウト材の特性に合わせて設定し，十分に強度が発揮する期間まで養生した。



(a) 球形 (50cm 径)



(b) 球形 (40cm 径)



(c) 球形 (20cm 径)

図 4.2.6 球形岩塊



(a) 塊状 (20cm 径)



(b) 塊状 (40cm 径)

图 4.2.7 塊状岩塊



(a) 板状 (20cm 径)



(b) 板状 (40cm 径)

图 4.2.8 板状岩塊

4. 2. 2 土砂模型の製作

土砂模型については、表 4.2.1 に示すように、平均粒径約 40mm 以上の粒度調整碎石 M40 の塊と、粒度調整碎石、山砂および水を混合した土砂により製作した。山砂は稲城産山砂とした。写真 4.2.9 に粒度調整碎石 M40 と、稲城産山砂の写真を示す。

表 4.2.1 土砂模型に用いる地盤材料

	地盤材料
碎石の塊	粒度調整碎石 M40
土砂 ^{※1}	粒度調整碎石 M40 と、山砂および水の混合物

※1 土砂の配合条件（重量比） … 粒度調整碎石：山砂：水=100：25：10



(a) 粒度調整碎石 M40



(b) 稲城産山砂

写真 4.2.9 粒度調整碎石と稲城産山砂

写真 4.2.10 に土砂模型の製作状況を示す。土砂模型については、ベルトコンベアを用いて、山砂と水と碎石を十分に攪拌することで作成した。写真 4.2.11 に製作した碎石模型と土砂模型を示す。



写真 4.2.10 土砂模型の製作状況



(a) 碎石模型



(b) 土砂模型



(c) 碎石模型積載時



(d) 土砂模型積載時

写真 4.2.11 碎石模型と土砂模型

土砂模型については、試験前毎にトラックに積載した時点で質量と体積の計測を行い、密度を計測した。また、土壌水分計により、土砂模型の含水比を計測した。表 4.2.2 に計測結果を示す。各試験においても、壁無ケースにおいては、碎石の密度は 1.85 g/cm^3 、含水比は 4.3~5.5%、土砂の密度は 1.64 g/cm^3 、含水比は 11.2~14.4%であった

表 4.2.2 土砂模型の体積、密度および含水比計測結果

試験ケース	試番	試験日	碎石・土砂 投入重量 (kg)	体積 (m^3)	密度 (g/cm^3)	含水比 (%)
碎石 (壁無)	1	12月6日	897	0.49	1.83	4.5
	2	12月6日	920	0.48	1.90	4.3
	3	12月6日	927	0.51	1.83	4.1
土砂 (壁無)	1	12月9日	1015	0.62	1.65	11.0
	2	12月9日	822	0.53	1.56	10.0
	3	12月12日	822	0.48	1.73	9.7
土砂+岩 塊 (壁無)	1	12月12日	825	0.49	1.67	13.3
	2	12月12日	822	0.48	1.73	11.8
碎石 (壁有)	1	1月21日	905	0.59	1.67	5.0
	2	1月22日	1504	0.94	1.61	5.9
土砂 (壁有)	1	1月22日	827	0.48	1.72	14.9
	2	1月23日	1624	1.01	1.61	13.8

4. 3 衝撃荷重を計測するための反力壁の製作と設置

4. 3. 1 反力壁の計画

岩塊および土砂が衝突した際の衝撃荷重を計測するための反力壁を製作する。衝突荷重は反力壁内に荷重計を埋め込むことにより計測する。RC板に重錘を所定の落下高さから落下させ、衝撃荷重を求めた既往の実験より、以下のヘルツの理論式が衝撃荷重算定に有効であることが示されている。

$$P_{uc} = n^{\frac{2}{5}} \left[\frac{5}{4} V_0^2 \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \right]^{\frac{3}{5}} \quad (1)$$

ここで、

$$n = \frac{4}{3\pi} \frac{1}{k_1 + k_2} \left[\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$k_i = \frac{1 - \nu_i^2}{\pi E_i} \quad (3)$$

ここでは、岩塊の弾性係数およびポアソン比を重錘と同じと仮定して、 $E_1=200\text{GPa}$ 、 $\nu_1=0.3$ とし、反力壁に関しては、コンクリートの圧縮強度を 30MPa とした時の、 $E_2=30\text{GPa}$ 、 $\nu_2=0.2$ として評価する。岩塊の曲率 R_1 は直径を 60mm として 0.226m 、反力壁の曲率 R_2 は無限大とする。岩塊の質量 m_1 は 300kg 、鉛直壁の質量 m_2 は完全固定として無限大とする。 V_0 は 10m/s とした。その際、大凡の値として 4.0MN 程度になる。実測値はその $1/4$ 程度と言われていることから、 1.0MN 程度の衝撃荷重が作用する可能性がある。一方、上記の場合での岩塊の大きさが半分程度の場合、衝撃荷重は 400kN と見積もられる。そこで、荷重計については $0.4 \sim 1.0\text{MN}$ 程度の荷重を計測できるものを選定することを基本とした。

図 4.3.1 に反力壁の概要図を示す。岩塊および土砂衝突面に土砂荷重計測用荷重計の受け板 ($0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$) 4 枚および岩塊荷重計測用荷重計の受け板 ($0.6\text{m} \times 0.6\text{m}$) 1 枚を設置できるものとし、水平および鉛直支持力を十分に確保できるように基礎構造を考慮し、約 1.0MN の水平荷重に対し変位量が微小になるように計画した。

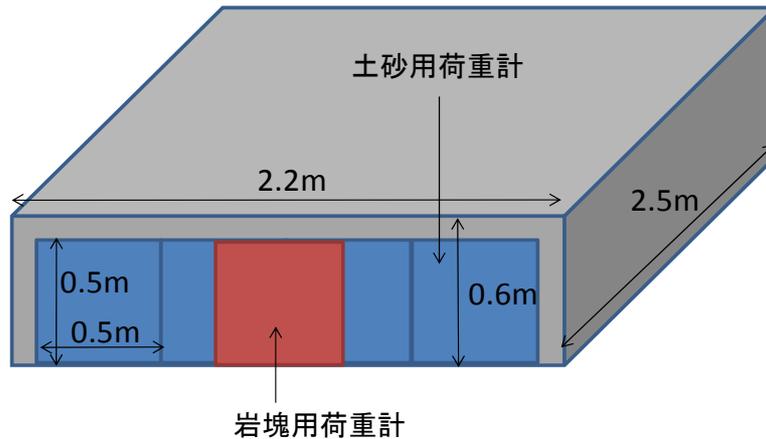


図 4.3.1 反力壁の概要図

4. 3. 2 反力壁の設計

本節では、反力壁の設計計算の詳細について示す。反力壁は、RC造とし、十分な支持力が得られるように、杭基礎構造とした。設計モデルは、骨組みモデルと用いるものとし、鉄道構造物等設計標準・同解説、コンクリート構造物編および基礎構造物編に準じるものとした。外力は、反力壁前面の天端に1.0MNの荷重が水平に作用した際を想定し、照査については、以下の項目について検討した。

- ① 反力壁の曲げに対する照査
- ② 反力壁のせん断に対する照査
- ③ 反力壁の杭体の照査
- ④ 反力壁の支持力の照査

詳細については、以下に示すが、照査結果として、上記の条件を満たすとともに、最大変位量は以下ようになった。

最大水平変位量：4.67 mm

最大沈下量：3.47 mm

想定される最大の荷重を作用した場合では、上記のように5.0mm未満の小さな変位になることから、十分に反力壁としても性能を有すと判断した。

(1) 設計条件

a) 使用材料

コンクリート	30N/mm^2
異型鉄筋	SD345 ($f_{syd}=345\text{N/mm}^2$)
H鋼	SS400 ($f_{syd}=235\text{N/mm}^2$)

b) 検討荷重

岩塊による衝突荷重	1200kN
-----------	--------

c) 地盤条件

盛土試験場の土質条件を以下に示す.

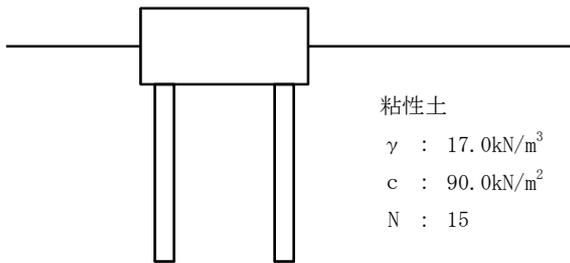


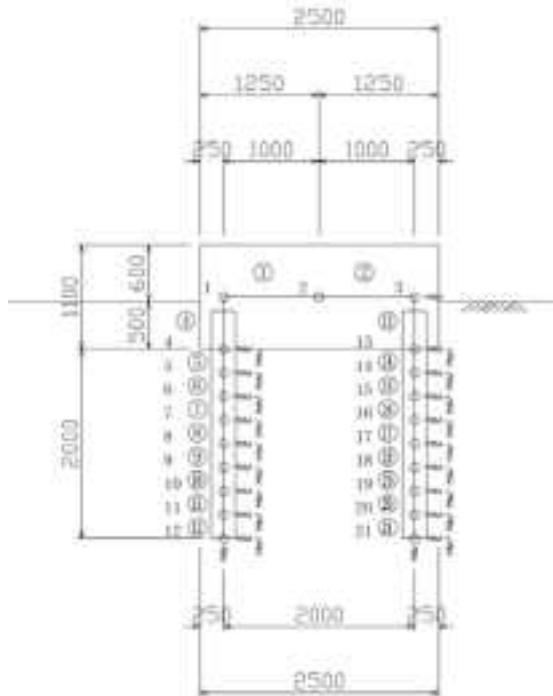
図4.3.2 土質条件

d) 設計方法

解析モデルは線形骨組みモデルとし、岩塊による衝突荷重を反力壁に静的に作用させ、その時の応答値に対して部材を降伏させない設計とした。
また、構造物全体系の変位が極力小さくなるように設計を行った。

(2) 解析モデル

図4.3.3に解析モデルを示す。



※1 数字は節点番号を示す。
※2 ○数字は要素番号を示す。

図4.3.3 解析モデル図

(3) 断面諸元

表4.3.1に断面諸元を示す。

表4.3.1 断面諸元

部材	要素番号	高さ・径	幅	面積	断面二次モーメント	ヤング率
		(m)	(m)	(m ²)	(m ⁴)	(kN/mm ²)
躯体①	1, 2	1.1	2.2	2.42	0.244	28
躯体②	3, 13	剛域		1000	1000	
杭	5~12 14~21	H-250*250*9*14		0.009143	0.000107	200

(4) 地盤ばねの計算

a) 杭先端の鉛直地盤反力係数の算定【基礎標準15.2.2.2】

杭先端の鉛直地盤反力係数は下式により算定した。

$$\begin{aligned}
 k_{tv} &= 7.0 \sigma_v \rho_{gk} E_d D^{-3/4} \\
 &= 7.0 \times \text{#####} \times 1.0 \times 35000 \times 0.25^{-3/4} \\
 &= \text{#DIV/0!} \text{ kN/m}^3
 \end{aligned}$$

ここに、

k_{tv} : 杭先端の鉛直地盤反力係数 (kN/m³)

σ_v : 杭先端の閉塞率 (= 0.2L/D ≤ 1.0)

$$\sigma_v = 0.2 \times \text{#####} / 0.25 = \text{#DIV/0!}$$

ρ_{gk} : 地盤反力係数に関する地盤反力係数 (= 1.0 【基礎標準 解説表15.2.2.2-3】)

E_d : 地盤の変形係数の設計用値【基礎標準 6.4 解説(3)(d)】

$$\begin{aligned}
 E_d &= (\rho_{gE} \cdot E_N / \gamma_{gE}) \\
 &= (1.0 \times 60000 / 1.7) \\
 &= 35294 \approx 35000 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

ここに、

ρ_{gE} : 地盤の変形係数に関する地盤修正係数 (= 1.0 【基礎標準 解説表6.4-4】)

E_N : 標準貫入試験から得たN値による変形係数の推定値 (kN/m²) (N値= 15)

$E_N = 4000N$ (粘性土)

$$= 60000 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

γ_{gE} : 地盤調査係数 (= 1.7)

D : 杭径(m) (= 0.25 m)

L : 支持層への換算根入れ深さ【解説図15.2.2.3-1】

中間層と支持層が不明確な場合

$$\begin{aligned}
 L &= \{5D (N_1 + N_2) / 2\} / N \\
 &= \{5 \times 0.25 \times (0 + 0) / 2\} / 0 = \text{#DIV/0!} \text{ m}
 \end{aligned}$$

b) 杭周面の鉛直せん断地盤反力係数の算定【基礎標準15.2.2.2】

杭周面の鉛直せん断地盤反力係数は下式により算定した。

$$\begin{aligned}
 k_{fv} &= 0.2 \rho_{gk} E_d \\
 &= 0.2 \times 1.0 \times 35000 \\
 &= 7000 \text{ kN/m}^3
 \end{aligned}$$

ここに、

k_{fv} : 杭周面の鉛直せん断地盤反力係数 (kN/m³)

ρ_{gk} : 地盤反力係数に関する地盤反力係数 (= 1.0 【基礎標準 解説表15.2.2.2-3】)

E_d : 地盤の変形係数の設計用値【基礎標準 6.4 解説(3)(d)】

$$\begin{aligned}
 E_d &= (\rho_{gE} \cdot E_N / \gamma_{gE}) \\
 &= (1.0 \times 60000 / 1.7) \\
 &= 35294 \approx 35000 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

ここに,

ρ_{gE} : 地盤の変形係数に関する地盤修正係数 (= 1.0 【基礎標準 解説表6.4-4】)

E_N : 標準貫入試験から得たN値による変形係数の推定値 (kN/m^2) (N値= 15)

$E_N = 4000\text{N}$ (粘性土)

$$= \sqrt{60000} \text{ kN/m}^2$$

γ_{gE} : 地盤調査係数 (= 1.7)

c) 単杭の水平地盤反力係数の算定【基礎標準15.2.2.2】

単杭の水平地盤反力係数は下式により算定した.

$$\begin{aligned} k_h &= 1.8 \rho_{gk} E_d D^{-3/4} \\ &= 1.8 \times \sqrt{1.0} \times \sqrt{35000} \times 0.25^{-3/4} \\ &= \sqrt{178191} \text{ kN/m}^3 \end{aligned}$$

ここに,

k_h : 単杭の水平地盤反力係数 (kN/m^3)

ρ_{gk} : 地盤反力係数に関する地盤反力係数 (= 1.0 【基礎標準 解説表15.2.2.2-3】)

E_d : 地盤の変形係数の設計用値【基礎標準 6.4 解説(3)(d)】

$$\begin{aligned} E_d &= (\rho_{gE} \cdot E_N / \gamma_{gE}) \\ &= (1.0 \times \sqrt{60000} / 1.7) \\ &= \sqrt{35294} \approx \sqrt{35000} \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

ここに,

ρ_{gE} : 地盤の変形係数に関する地盤修正係数 (= 1.0 【基礎標準 解説表6.4-4】)

E_N : 標準貫入試験から得たN値による変形係数の推定値 (kN/m^2) (N値= 15)

$E_N = 4000\text{N}$ (粘性土)

$$= \sqrt{60000} \text{ kN/m}^2$$

γ_{gE} : 地盤調査係数 (= 1.7)

D : 杭径(m) (= 0.25 m)

d) 群杭の水平地盤反力係数の補正【基礎標準15.2.2.2】

永久構造物ではないことから, 群杭の水平地盤反力係数の補正は考慮しないこととした.

e) 地盤ばねの算定【基礎標準15.2.2.2】

(1) 杭先端の鉛直地盤ばね定数

杭先端の鉛直地盤ばね定数は下式により算定した。

$$\begin{aligned} K_{tv} &= k_{tv}A_t \\ &= 7000 \times 0.0491 \\ &= 343700 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

ここに、

K_{tv} : 杭先端の鉛直地盤ばね定数 (kN/m)

k_{tv} : 杭先端の鉛直地盤反力係数 (kN/m³)

A_t : 杭先端の面積 (m²) (= $0.25 \times 0.25 \times \pi / 4 = 0.0491 \text{ m}^2$)

(2) 杭周面の鉛直せん断地盤ばね定数

杭周面の鉛直せん断地盤ばね定数は下式により算定した。

$$\begin{aligned} K_{fv} &= k_{fv}U\Delta l \\ &= 7000 \times 0.785 \times 2.00 \\ &= 10990 \text{ kN/m} \quad (\text{※入力値} = 5495 \text{ kN/m}^2) \\ &\quad \text{※ 電算入力の際は分布ばねの値を用いる} \end{aligned}$$

ここに、

K_{fv} : 杭周面の鉛直せん断地盤ばね定数 (kN/m)

k_{fv} : 杭周面の鉛直せん断地盤反力係数 (kN/m³)

Δl : 杭周面の鉛直せん断地盤ばね定数を算定する区間の長さ(m) (= 2.0 m)

U : 杭の周長 (m) (= $0.25 \times \pi = 0.785 \text{ m}$)

(3) 杭周面の水平地盤ばね定数

杭周面の水平地盤ばね定数は下式により算定した。

$$\begin{aligned} K_h &= k_h D \Delta l \\ &= 178191 \times 0.25 \times 2.00 \\ &= 89096 \text{ kN/m} \quad (\text{※入力値} = 44548 \text{ kN/m}^2) \\ &\quad \text{※ 電算入力の際は分布ばねの値を用いる} \end{aligned}$$

ここに、

K_h : 杭周面の水平地盤ばね定数 (kN/m)

k_h : 杭周面の水平地盤反力係数 (kN/m³)

D : 杭の載荷幅 (m) (= 0.25 m)

Δl : 杭周面の水平地盤ばね定数を算定する区間の長さ(m) (= 2.0 m)

f) 土中部壁体の前面ばね【基礎標準13.2.2.2】

土中部壁体の前面ばね定数は下式により算定した.

(1) 土中部壁体前面の水平地盤反力係数

土中部壁体前面の水平地盤反力係数は下式により算定した.

$$\begin{aligned} k_h &= 5.1 \rho_{gk} E_d B_h^{-3/4} \\ &= 5.1 \times 1.0 \times 35000 \times 1.05^{-3/4} \\ &= 172086 \text{ kN/m}^3 \end{aligned}$$

ここに,

k_h : 単杭の水平地盤反力係数 (kN/m³)

ρ_{gk} : 地盤反力係数に関する地盤反力係数 (= 1.0 【基礎標準 解説表15.2.2.2-3】)

E_d : 地盤の変形係数の設計用値【基礎標準 6.4 解説(3)(d)】

$$\begin{aligned} E_d &= (\rho_{gE} \cdot E_N / \gamma_{gE}) \\ &= (1.0 \times 60000 / 1.7) \\ &= 35294 \approx 35000 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

ここに,

ρ_{gE} : 地盤の変形係数に関する地盤修正係数 (= 1.0 【基礎標準 解説表6.4-4】)

E_N : 標準貫入試験から得たN値による変形係数の推定値 (kN/m²) (N値= 15)

$E_N = 4000\text{N}$ (粘性土)

$$= 60000 \text{ kN/m}^2$$

γ_{gE} : 地盤調査係数 (= 1.7)

B_h : 土中部壁体前面の換算幅 (m)

$$B_h = \sqrt{A_h} = 1.05 \text{ m}$$

ここに,

A_h : 土中部壁体前面の面積 (m²)

$$A_h = 0.50 \times 2.20 = 1.10 \text{ m}^2$$

(2) 土中部壁体前面の水平地盤ばね

土中部壁体前面の水平地盤ばね定数は下式により算定した.

$$\begin{aligned} K_h &= k_h A_h \\ &= 172086 \times 1.10 \\ &= 189295 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

ここに,

K_h : 土中部壁体前面の水平地盤ばね定数 (kN/m)

k_{tv} : 土中部壁体前面の水平地盤反力係数 (kN/m³)

A_t : 土中部壁体前面の面積 (m²) (= 1.10 m²)

(5) 荷重計算

a) 永久作用

壁体自重 $W1 = 24.50 \text{ kN/m}^3 \times 1.10 \text{ m} \times 2.20 \text{ m} = 59.29 \text{ kN/m}$

杭自重 (H-250*250*9*14) $W2 = 71.80 \text{ kg/m} \times 3 \text{ 本} = 2.11 \text{ kN/m}$

b) 偶発作用

衝突荷重 $P1 = 1200 \text{ kN}$

衝突荷重による曲げモーメント $M1 = 1200 \text{ kN} \times 0.55 \text{ m} = 660.00 \text{ kN}\cdot\text{m}$

c) 荷重状態図

図4.3.4に荷重状態図を示す.

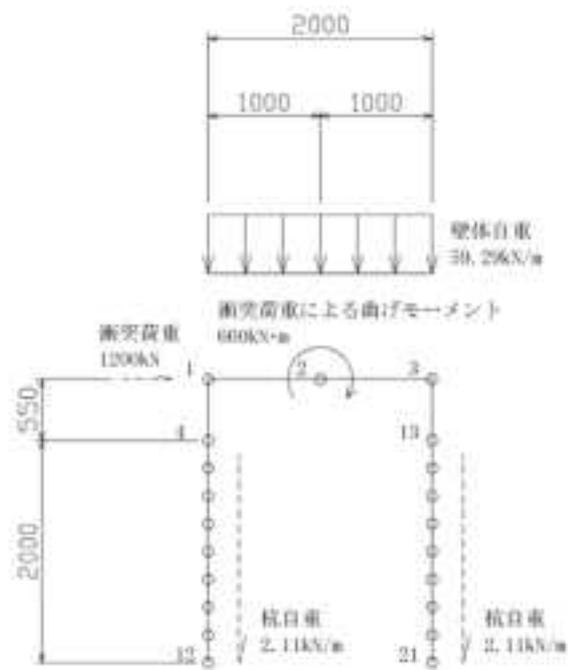


図4.3.4 荷重状態図

(6) 応答値算定

図4.3.5に岩塊が衝突した時の断面力および変位量を示す.

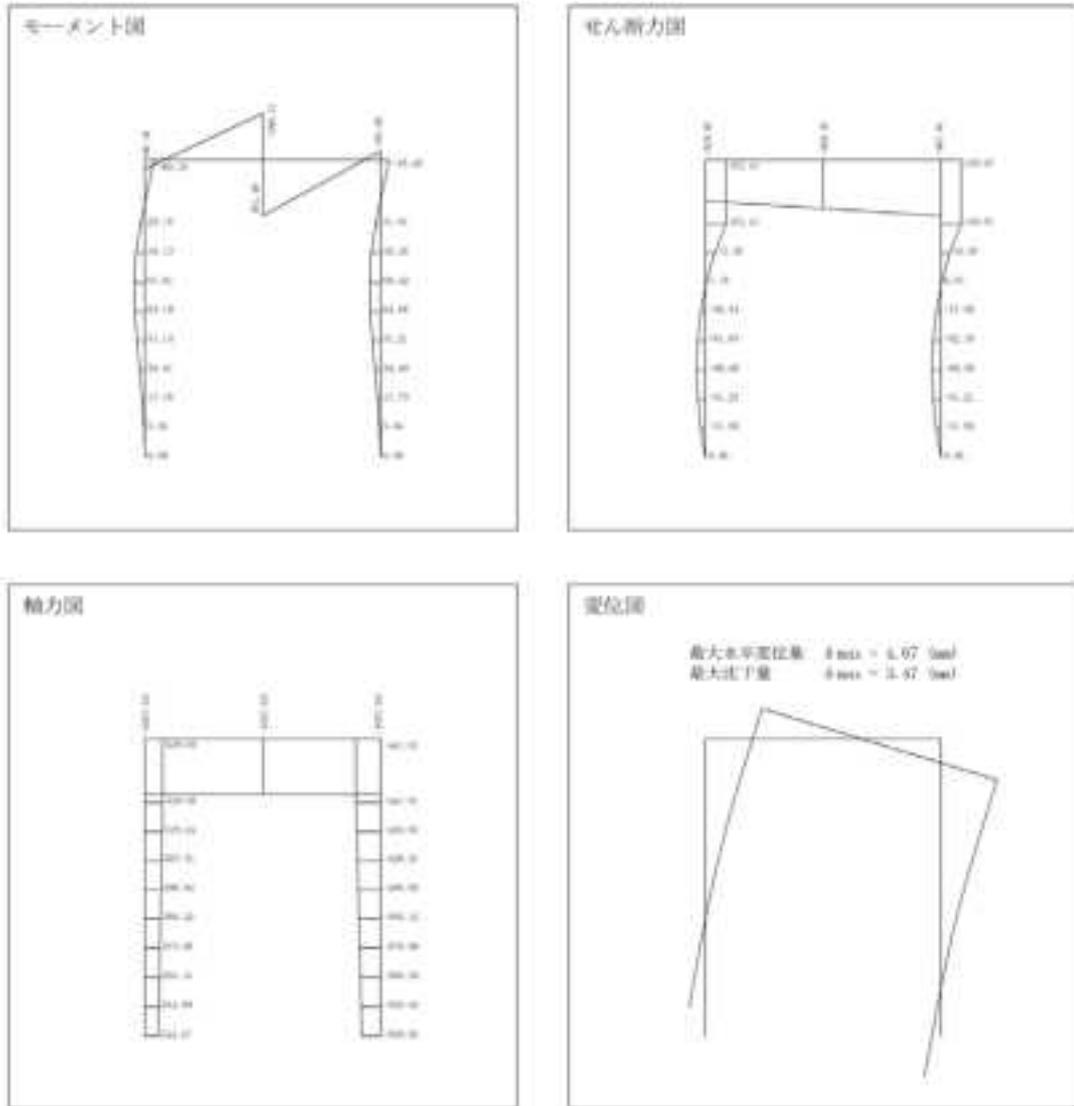


図4.3.5 断面力図

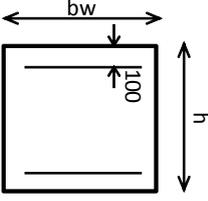
(7) 照査結果

a) 反力壁壁体の照査

(1) 曲げに対する照査

曲げに対する照査結果を表4.3.2に示す.

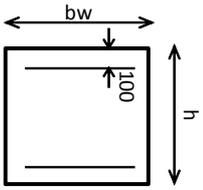
表4.3.2 照査結果

部材名称	反力壁
	要素番号①, ②
断面形状	矩形断面 
	コンクリート強度 30N/mm ² 鉄筋材質 SD345 軸方向鉄筋 D25-18本 (引張側・圧縮側 各9本) せん断補強鉄筋 D13-2組-ctc250
h (mm)	1100
bw(r)(mm)	2200
Ast (mm ²)	4053.6
dst (mm)	100
Asc (mm ²)	4053.6
dsc (mm)	100
fck (N/mm ²)	30
γ_c	1.3
fcd (N/mm ²)	23.1
fsyk (N/mm ²)	345
γ_s	1.0
fsyd (N/mm ²)	345
Md (kN·m)	361.5
N'd (kN)	0
ϵ'_{cu}	0.0004
ϵ_s	0.0017
x (mm)	173.5
My (kN·m)	1311.26
γ_b	1.0
Myd (kN·m)	1311.26
γ_i	1.0
$\gamma_i \cdot Md / Myd$	0.28
照査結果	OK

b) せん断に対する照査

せん断に対する照査結果を表4.3.3に示す.

表4.3.3 照査結果

部材名称	反力壁 要素番号①, ②
断面形状	矩形断面  コンクリート強度 30N/mm ² 鉄筋材質 SD345 軸方向鉄筋 D25-18本 (引張側・圧縮側 各9本) せん断補強鉄筋 D13-8本-ctc300
h (mm)	1100
bw (mm)	2200
Ast (mm ²)	4053.6
dst (mm)	100
Asc (mm ²)	4053.6
dsc (mm)	100
fck (N/mm ²)	30
γ_c	1.30
fcd (N/mm ²)	23.1
fsyk (N/mm ²)	345
γ_s	1.00
fsyd (N/mm ²)	345
Md (kN·m)	361.5
N'd (kN)	0
Vd (kN)	447.6
ε'_{cu}	0.0035
ε_s	0.0452
x (mm)	71.8
Mu (kN·m)	1434.4
Aw (mm ²)	506.8
fwyd (N/mm ²)	345
fbyd (N/mm ²)	345
θ_s (°)	90
ss (mm)	300
fvcd (N/mm ²)	0.569
β_d	1
ρ_c	0.00184
β_p	0.569
M0 (kN·m)	0
β_n	1
γ_{bc}	1.0
Vcd (kN)	712.83
γ_{bs}	1.0
Vsd (kN)	506.8
Vyd (kN)	1219.63
γ_i	1.0
$\gamma_i \cdot Vd / Vyd$	0.37
照査結果	OK

c) 杭体の照査

(1) 曲げに対する照査

使用材料 H-250*250*9*14 SS400

$$\begin{aligned} \text{曲げ耐力} \quad M_{ud} &= \sigma \cdot Z \times 3 \text{本} \\ &= 235 \text{ N/mm}^2 \times 860000 \text{ mm}^3 \times 3 \text{本} \\ &= 606300000 \text{ N}\cdot\text{mm} \\ &= 606.30 \text{ kN}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

$$\text{応答値} \quad M_d = 68.42 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\text{照査結果} \quad M_d/M_{ud} = 0.113 \quad \text{OK}$$

(2) せん断に対する照査

使用材料 H-250*250*9*14 SS400

$$\begin{aligned} \text{せん断耐力} \quad \tau_{ud} &= \sigma \cdot A \times 3 \text{本} \\ &= 135 \text{ N/mm}^2 \times 9143 \text{ mm}^2 \times 3 \text{本} \\ &= 3702915 \text{ N} \\ &= 3702.92 \text{ kN}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

$$\text{応答値} \quad \tau_d = 162.41 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\text{照査結果} \quad \tau_d/\tau_{ud} = 0.044 \quad \text{OK}$$

(3) 曲げモーメントとせん断を同時に受ける部材に対する照査

曲げモーメントとせん断を同時に受ける部材に対する照査は下式により行った。

$$(M_d/M_{ud})^2 + (\tau_d/\tau_{ud})^2 \leq 1.0$$

$$(M_d/M_{ud})^2 + (\tau_d/\tau_{ud})^2 = 0.113^2 + 0.044^2 = 0.015 \quad \text{OK}$$

d) 支持力の照査【基礎標準15.3.2.2】

(1) 杭の基準先端支持力度【基礎標準15.2.2.3】

杭の基準先端支持力度は下式により算出した。

$$q_{tk} = 11 (L/D) N \leq 16000 \quad (L/D \leq 5 \text{の範囲})$$

$$= 11 \times \# \times 15.0 = \# \text{ kN/m}^2$$

ここに、

q_{tk} : 基準先端支持力度 (kN/m²)
 N : 杭先端のN値 (N値= #)
 L : 支持層への換算根入れ深さ (#DIV/0! m)
 D : 杭の設計径 0.25 m
 $L/D = \#$

(2) 杭の基準周面支持力度【基礎標準15.2.2.3】

杭の基準周面支持力度は下式により算出した。

$$\gamma_{fk} = 6N \leq 120$$

$$= 6 \times \# \times 15.0 = \# \text{ kN/m}^2$$

ここに、

γ_{fk} : 基準周面支持力度 (kN/m²)
 N : 杭先端のN値 (N値= #)

(3) 杭の基準支持力【基礎標準15.2.2.3】【基礎標準15.3.2.2】

杭の基準支持力は基準先端支持力と基準周面支持力の総和として下式により算出した。

$$R_k = R_{tk} + \sum R_{fk}$$

$$= \# \text{DIV/0!} + \# \times 141.3 = \# \text{DIV/0!} \text{ kN}$$

$$R_{tk} = q_{tk} \times A_t$$

$$= \# \text{DIV/0!} \times \# \times 0.0491 = \# \text{DIV/0!} \text{ kN}$$

$$R_{fk} = \gamma_{fk} \times U \times \Delta l$$

$$= \# \times 90 \times \# \times 0.785 \times \# \times 2.00 = \# \times 141.3 \text{ kN}$$

ここに、

R_k : 押し込み側の基準支持力(kN)
 R_{tk} : 基準先端支持力(kN)
 R_{fk} : 各層での基準周面支持力(kN)
 q_{tk} : 基準先端支持力度(kN/m²)
 A_t : 杭先端の面積(m²) (= 0.25 × 0.25 / 4 × π = # m²)
 γ_{fk} : 各層での基準周面支持力度(kN/m²)
 U : 杭の周長(m) (= 0.25 × π = # m)
 Δl : 基準周面支持力を算定する区間の長さ(m) (= 2.00 m)

(4) 支持力に対する照査

支持力に対するは下式にて行った。

$$R_d/R_{vd} \leq 1.0 \quad \text{押し込み側}$$
$$R_d/R_{vd} = 447.61 \text{ kN} / \sqrt{\#DIV/0!} \text{ kN} = \sqrt{\#DIV/0!} \quad \text{#####}$$

$$R_d/R_{ud} \leq 1.0 \quad \text{引き抜き側}$$
$$329.03 \text{ kN} / \sqrt{546.68} \text{ kN} = 0.602 \quad \text{OK}$$

ここに、

$$R_{vd} = f_r \times R_k \quad \text{押し込み側}$$
$$= 1.2 \times \sqrt{\#DIV/0!} \times 3 \text{ (片側杭本数)} = \sqrt{\#DIV/0!} \text{ kN}$$
$$R_{ud} = f_r \times R_k + W_p \quad \text{引き抜き側}$$
$$= (1.2 \times \sqrt{141.3} + 12.67) \times 3 \text{ (片側杭本数)} = \sqrt{546.68} \text{ kN}$$

※一般に引き抜き側の R_k において、杭先端の引き抜き力は考慮しない。

f_r : 地盤抵抗係数【基礎標準 解説図15.3.2.2-1】 (≈ 1.2)

R_{vd} : 設計鉛直支持力 (kN)

R_{ud} : 設計引き抜き抵抗 (kN)

R_{tk} : 基準先端支持力 (kN)

W_p : 杭の有効自重 (kN) ($= 2.11 \text{ kN/m} \times 2.00 \text{ m} \times 3 \text{ 本} = \sqrt{12.67} \text{ kN}$)

図 4.3.6 と図 4.3.7 に反力壁の一般図と断面図を示す。また、図 4.3.8～図 4.3.10 に反力壁前面に取り付けるロードセルベースの図面を示す。ロードセルベースは鉄製とし、厚さを 100mm とした。

反力壁一般図 1/50
H25.12.16修正

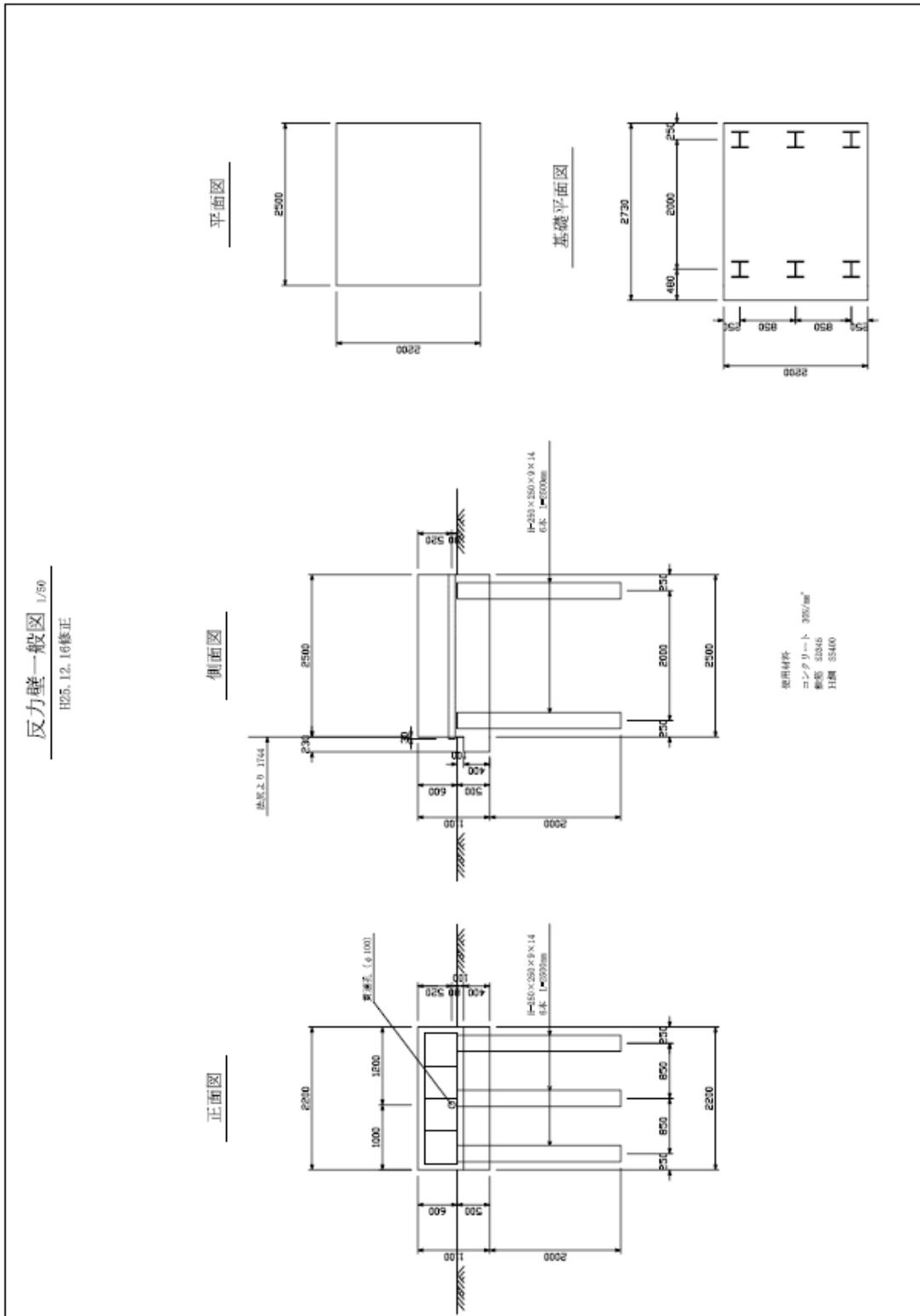


図 4.3.6 反力壁一般図

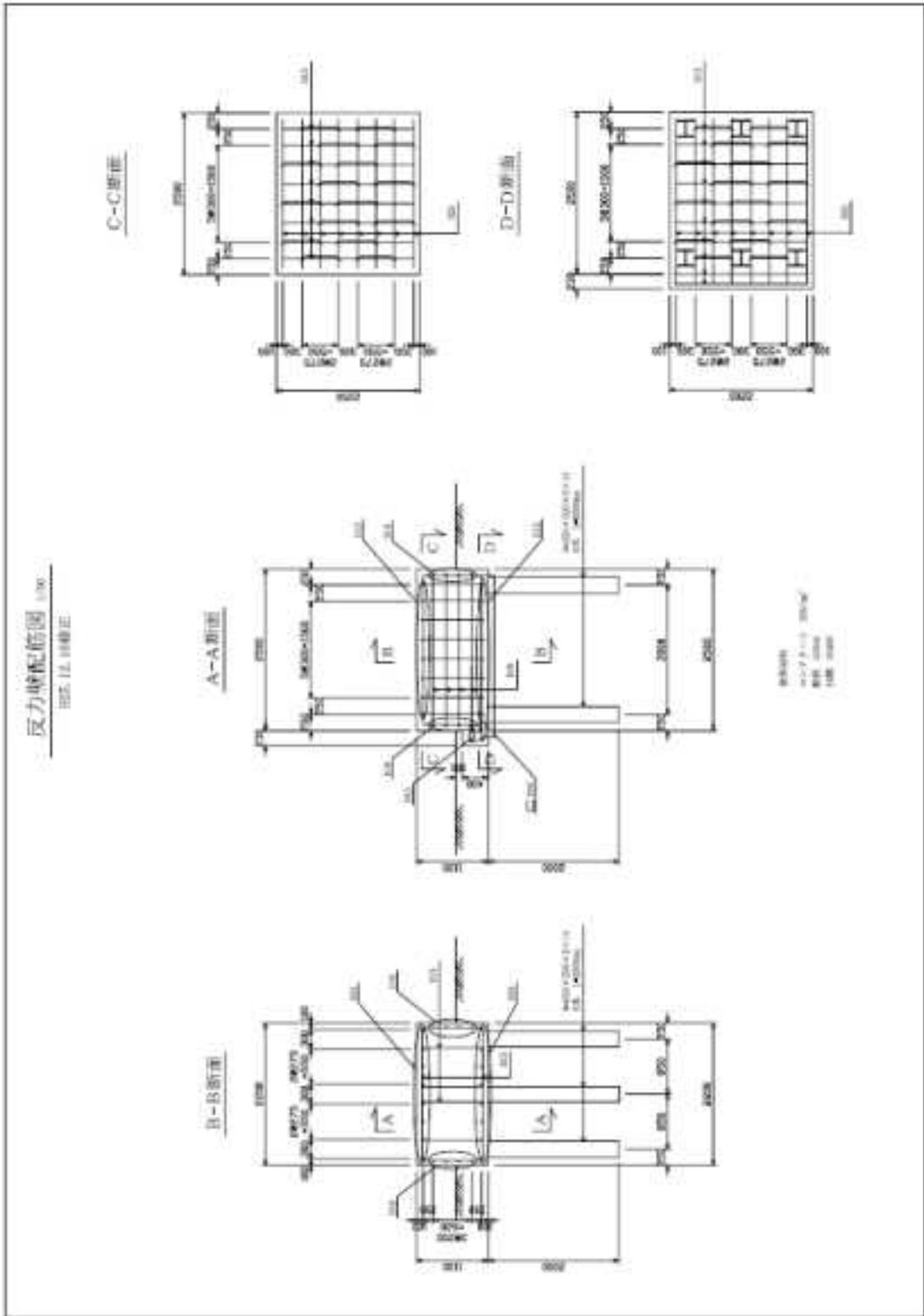


图 4.3.7 反力壁配筋图

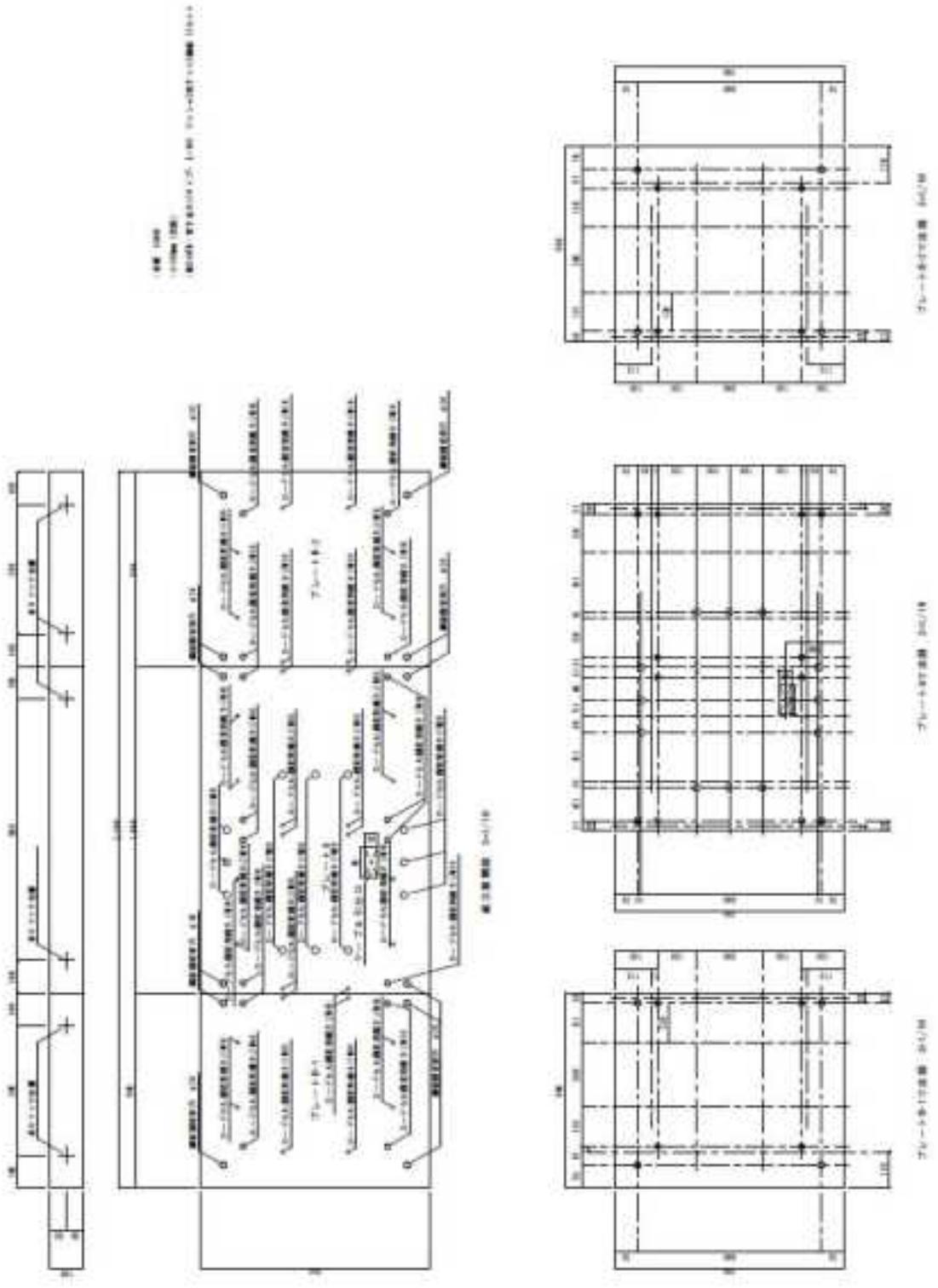


図 4.3.8 ロードセルベース図①

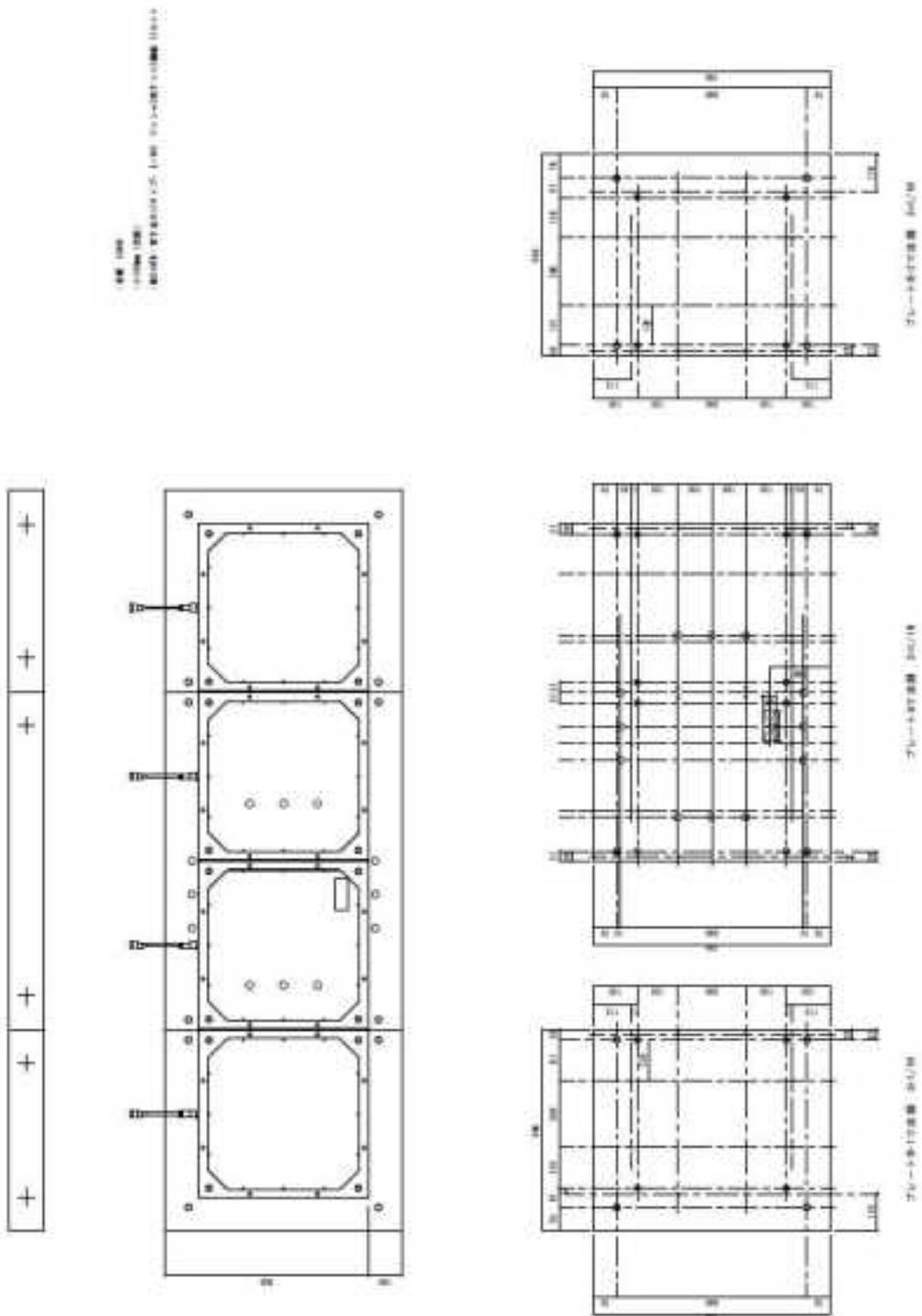


図 4.3.9 ロードセルベース図②

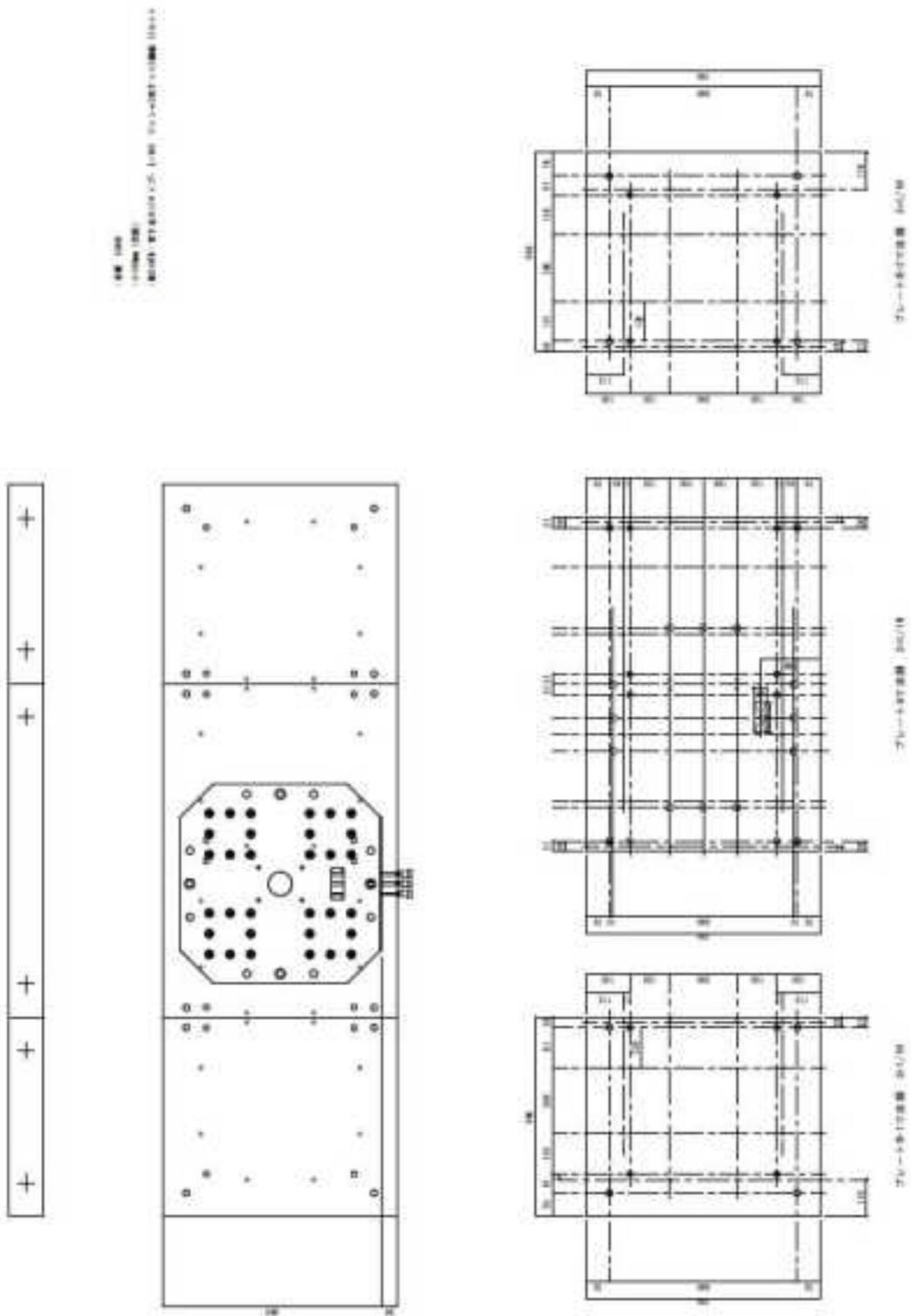


図 4.3.10 ロードセルベース図③

4. 3. 3 反力壁の製作

写真 4.3.1 に反力壁の配筋の状況を示す。コンクリート打設前に、鉄筋検査を念入りに行い、仕様通りの条件であることを確認した。



写真 4.3.1 反力壁の配筋の状況

写真 4.3.2 に施工に用いたコンクリートの性能確認試験の状況を示す。スランプ試験と空気量試験を満たし、性能およびワーカビリティに支障のないコンクリートであることを確認した。



(a)スランプ試験の状況

(b)空気量試験の状況

写真 4.3.2 コンクリートの性能確認試験の状況

なお、コンクリートの試験結果は以下のようなものである。

スランプ：14.5 cm

空気量：4.2 %

コンクリート温度：18 °C

フロー値：30.0 cm × 29.0 cm

塩化物含有量：0.04 kg/m³

写真 4.3.3 にコンクリートの打設の状況，写真 4.3.4 に反力完成時の状況を示す。



(a)打設中



(b)打設後

写真 4.3.3 コンクリート打設の状況



写真 4.3.4 反力壁完成時の状況

5. 計測センサの選定と設置

5. 1 反力壁への衝撃荷重を計測するためのセンサの選定と設置

5. 1. 1 センサの選定

(1) 岩塊用荷重計

反力壁への衝撃荷重については、荷重計により計測するものとした。荷重計の容量については、前述の検討より、岩塊に対しては、0.4~1.0MN の荷重を計測できるものを選定した。さらに、選定した荷重計を反力壁前面に設置し、反力壁前面に岩塊または土砂が衝突した場合でも荷重を計測できるようにするため、土砂用の荷重計については、容量が 20kN の小さいものとした。

岩塊用荷重計の性能として、以下の項目を条件とした。

- ① 衝突方向に加え、衝突直交方向と上下方向、計三方向の荷重を計測できる。
- ② 三方向の荷重計の干渉度はほとんどない。
- ③ 荷重計受け面のどの箇所に衝突しても、偏心の影響が小さい。
- ④ 衝突方向の荷重計容量は 1.0MN、その他の方向の荷重計容量は 0.4MN とする。
- ⑤ 固有振動数が 1.0kHz 程度あること。このとき、応答振動数は約 0.1kHz となる。

上記の条件を下に、荷重計の設計を行った。図 5.1.1 に荷重計の平面図と断面図を示す。

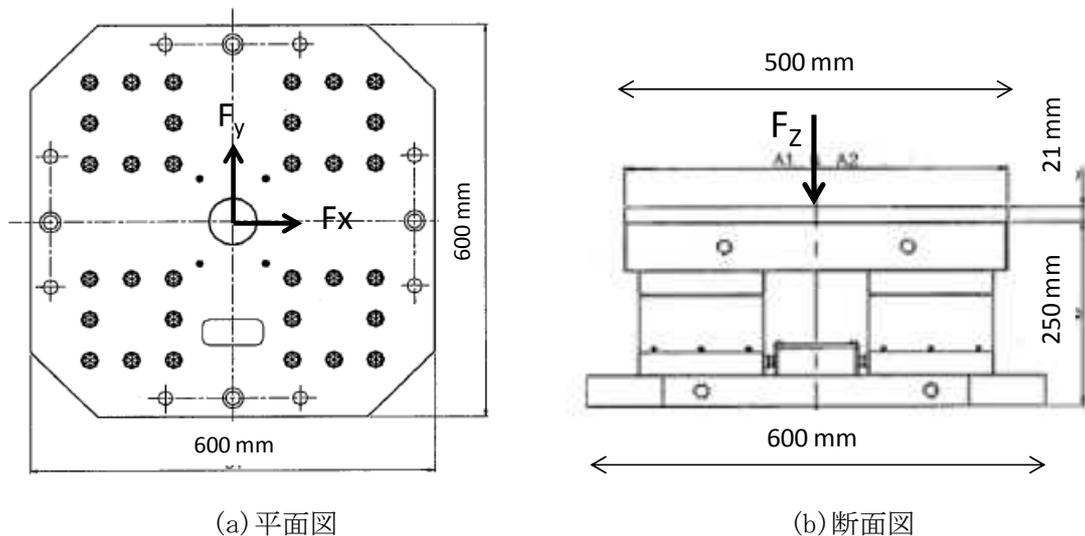


図 5.1.1 岩塊用荷重計の平面図，断面図

受け面の大きさは0.5m×0.5mとし、実験の試験では、岩塊が受け面に衝突するまで試験を繰り返した。

はじめに、荷重計の性能確認のため、室内試験を実施した。写真5.1.1に室内試験の様子を示す。衝突方向荷重に関する試験は、受け面全面を載荷するものと、偏心して載荷するものの二種類に対して1.0MNまで載荷する試験を実施し、荷重計の干渉度、偏心誤差について精度を確認した。衝突直交方向荷重、上下荷重に関する試験については、図5.1.2に示すように横方向に荷重計を設置した試験を実施し、それぞれ0.4MNまで載荷を行った。



(a) 全面載荷



(b) 偏心載荷

写真 5.1.1 岩塊用荷重計の室内試験の様子

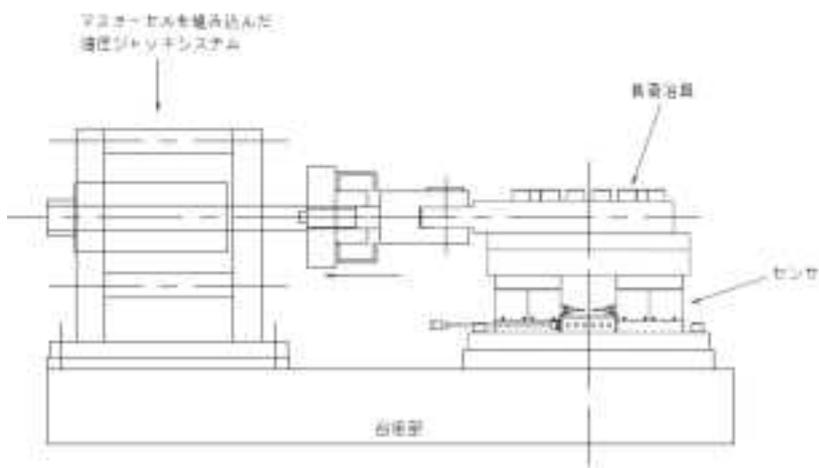


図 5.1.2 衝突直交方向，上下方向荷重の試験の様子

表 5.1.1 に試験結果を示す。各方向について、所定の荷重容量まで計測できることを確認した。また、荷重計間の干渉度は 1.92%以下で微小であること、偏心誤差についても、0.12%以下で微小であることを確認し、性能を満足するものであることを確認した。

表 5.1.1 室内試験結果

項目		
容量(kN)	X 方向	400
	Y 方向	400
	Z 方向	1000
偏心誤差 (%)	0.12 以下	
干渉度 (%)	1.92 以下	
質量(kg)	308	

図 5.1.3 に荷重計の FEM モデルによる固有値解析結果を示す。最小固有振動数は 914Hz であり、弱軸の x, y 方向であっても 1.0kHz 程度の固有振動数を有することを確認した。

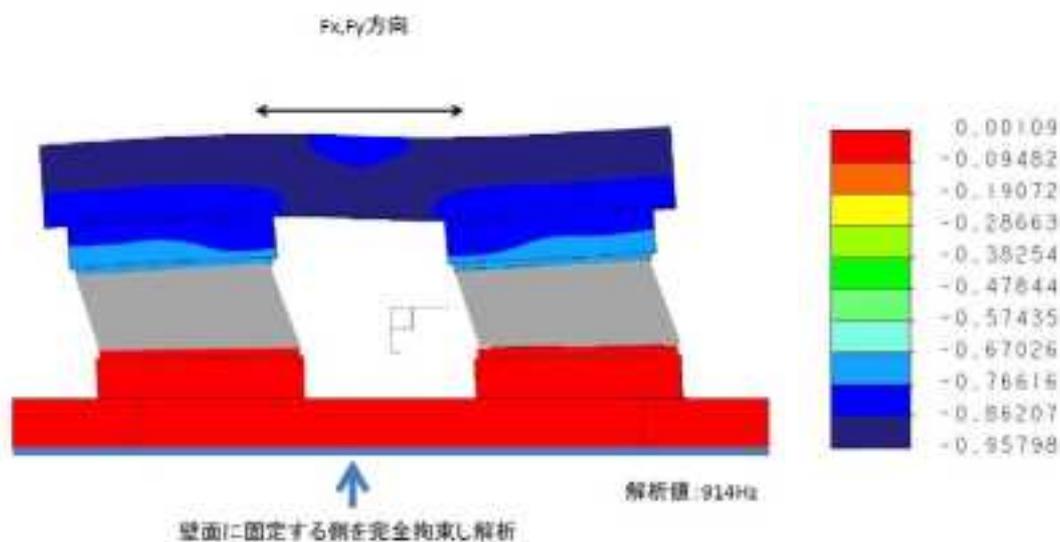


図 5.1.3 FEM モデルによる固有値解析結果

(2) 土砂用荷重計

土砂用荷重計の性能として、以下の項目を条件とした。

- ① 衝突方向、一方向の荷重を計測できる。
- ② 荷重計受け面のどの箇所に衝突しても、偏心の影響が小さい。
- ③ 衝突方向の荷重計容量は 20kN とする。

上記の条件を下に、荷重計の設計を行った。図 5.1.4 に荷重計の平面図と断面図を示す。

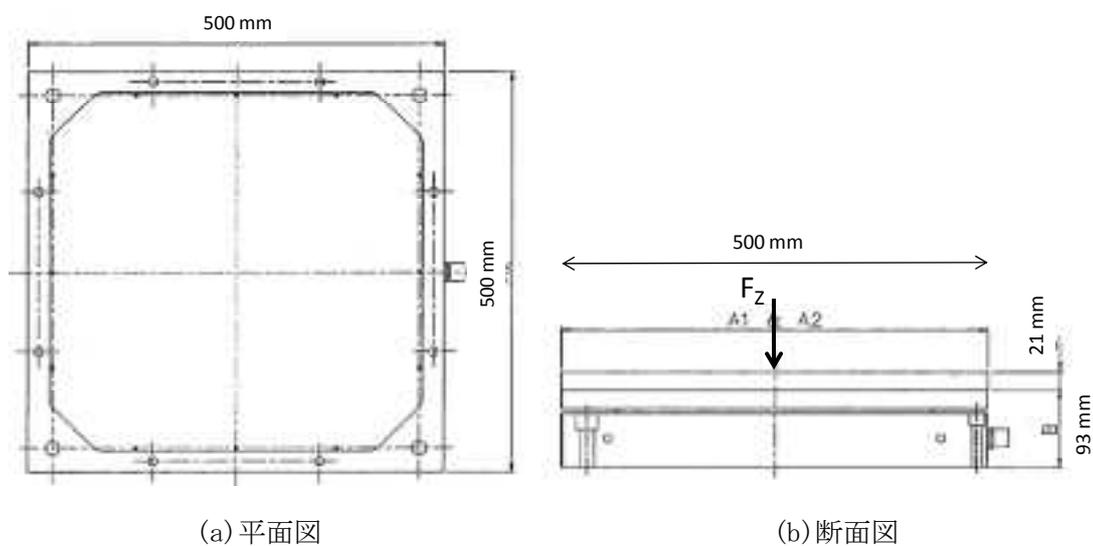


図 5.1.4 岩塊用荷重計の平面図，断面図

一荷重計の受け面の大きさは $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ とし、計 4 個製作して、 $0.5\text{m} \times 2.0\text{m}$ の領域の荷重を計測できるようにした。

はじめに、荷重計の性能確認のため、室内試験を実施した。写真 5.1.2 に室内試験の様子を示す。20kN まで載荷する試験を実施し精度を確認した。



写真 5.1.2 土砂用荷重計の室内試験の様子

表 5.1.2 に試験結果を示す。所定の荷重容量まで計測できることを確認した。

表 5.1.2 室内試験結果

項目		
容量(kN)	Z 方向	20
質量(kg)	48.5 (平均)	

5. 1. 2 センサの設置

前節で選定したセンサを反力壁前面に設置した。前述したロードセルベースをコンクリート製の反力壁に30mmの間隔を開けてアンカー接合し、30mmの隙間にコンクリートを詰めて、反力壁と一体化させた。写真5.1.3にロードセルベースを取り付けた状態を示す。



写真5.1.3 ロードセルベースを取り付けた様子

さらに、ロードセルベース前面に荷重計をネジ接合で取り付けた。写真5.1.4に荷重計設置後の様子を示す。なお、荷重計受け面には、超高振動数のパルス状の衝撃ノイズを除去するため、21mm厚のベニヤ板を取り付けた。



写真5.1.4 荷重計設置後の様子

5. 1. 3 荷重計校正試験

反力壁完成後に、荷重計の計測精度の検証のため、反力壁に対して静的水平載荷試験を行った。静的水平載荷試験には油圧ジャッキ（オックスジャッキ：RM-1020）を用いて静的荷重を作用させた。また、油圧ジャッキの反力を受けるための反力体を構築した。校正荷重の計測には校正用荷重計（東京測器：CLL-500KNA、最大容量：100kN）を用いた。写真 5.1.5 に試験の状況を示す。また、図 5.1.5 に岩塊用荷重計の試験概要図、図 5.1.6 に土砂用荷重計の試験概要図を示す。

試験は、各荷重計受け面を 9 分割し、それぞれ 2~3 回静的載荷した。岩塊用荷重計に対しては、校正用荷重計の最大容量の 100kN まで段階載荷をし、その後除荷した。土砂用荷重計に対しては、荷重計の最大容量 20kN まで段階載荷し、その後除荷した。



(a)岩塊用荷重計



(b)土砂用荷重計

写真 5.1.5 荷重計の校正試験状況

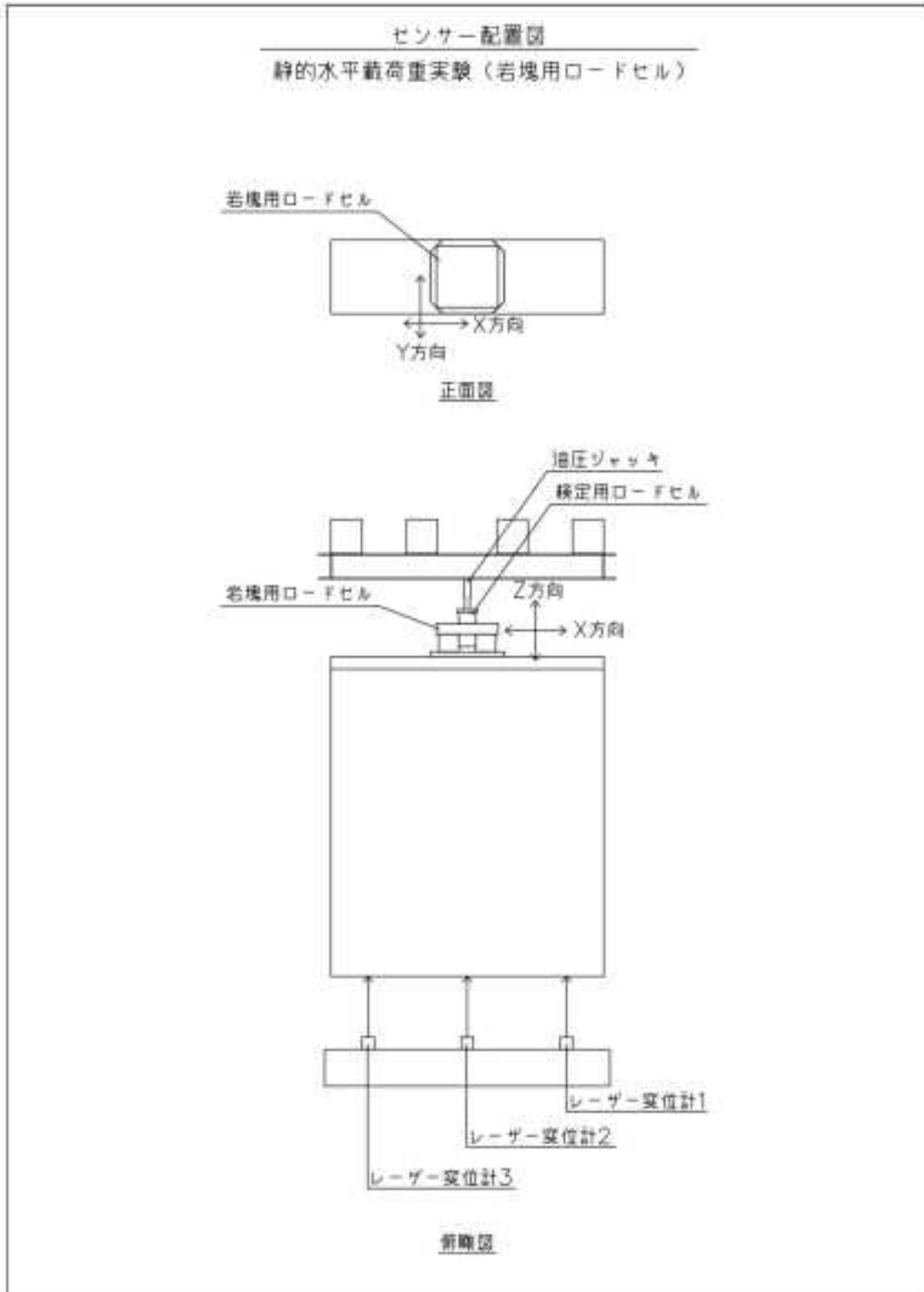


図 5.1.5 岩塊用荷重計校正作業概況図

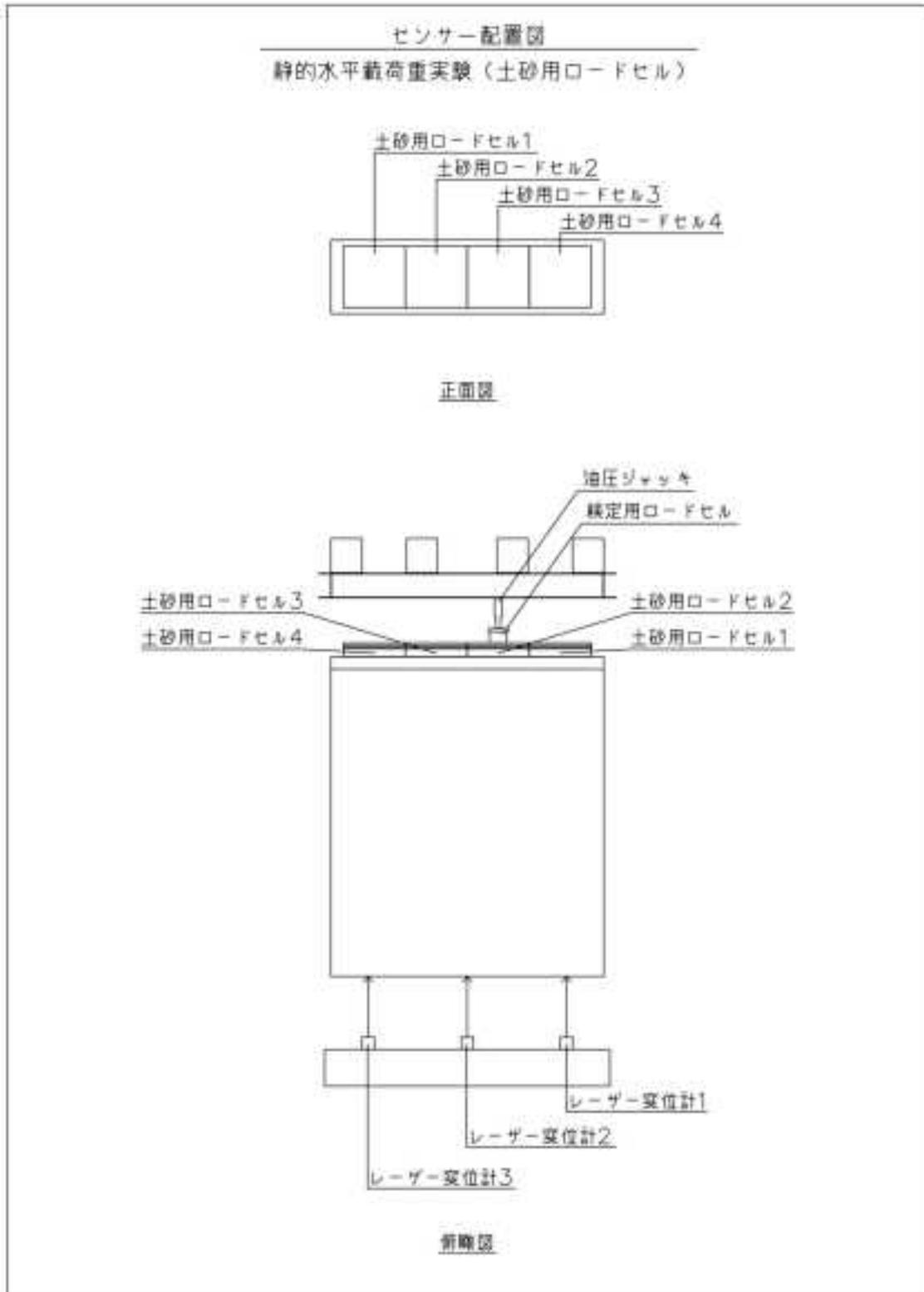


図 5.1.6 土砂用荷重計校正作業概況図

以下に岩塊用荷重計の校正試験結果を示す。

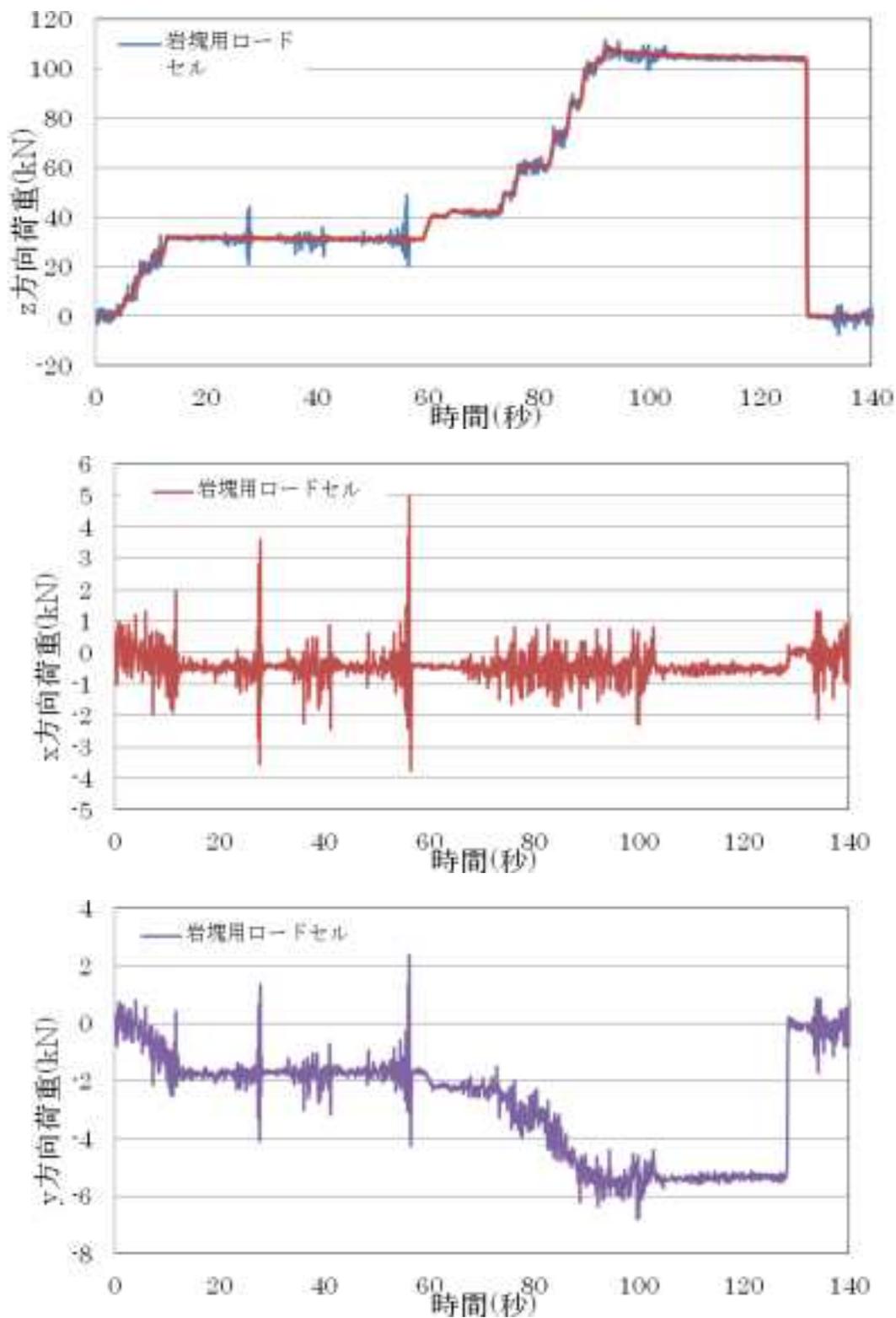


図 5.1.8 No.1 1回目校正試験結果

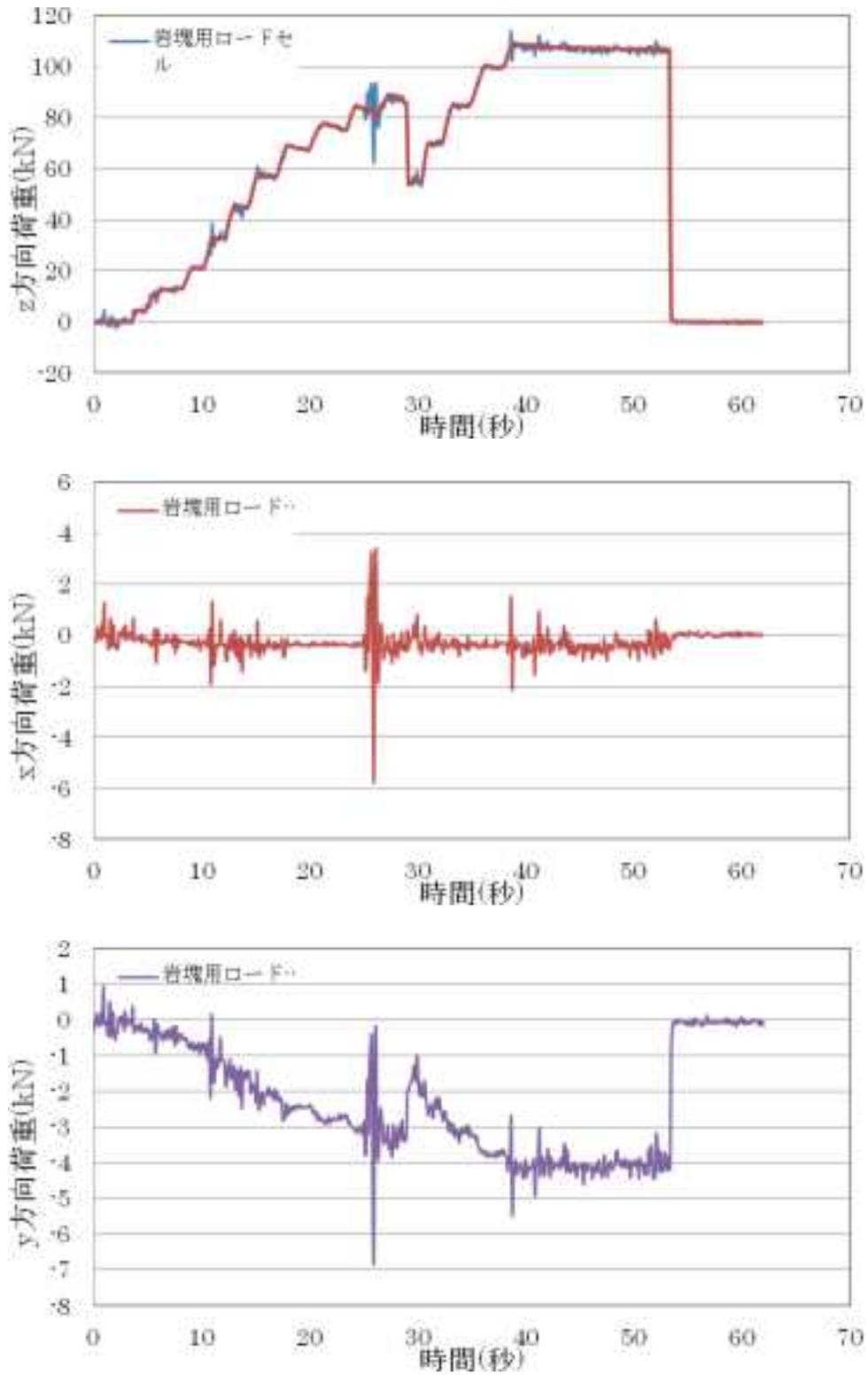


図 5.1.9 No.1 2回目校正試験結果

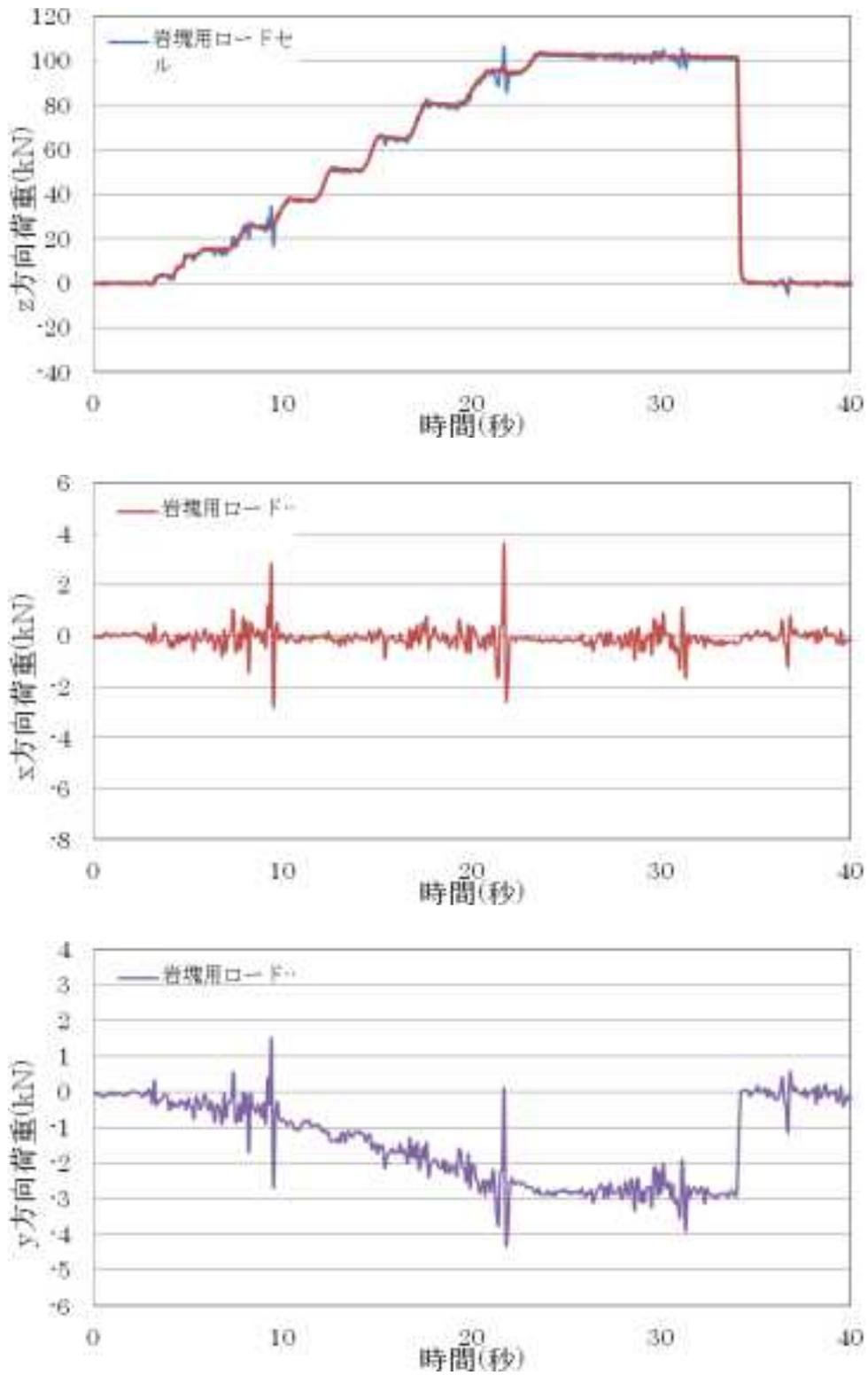


図 5.1.10 No.1 3回目校正試験結果

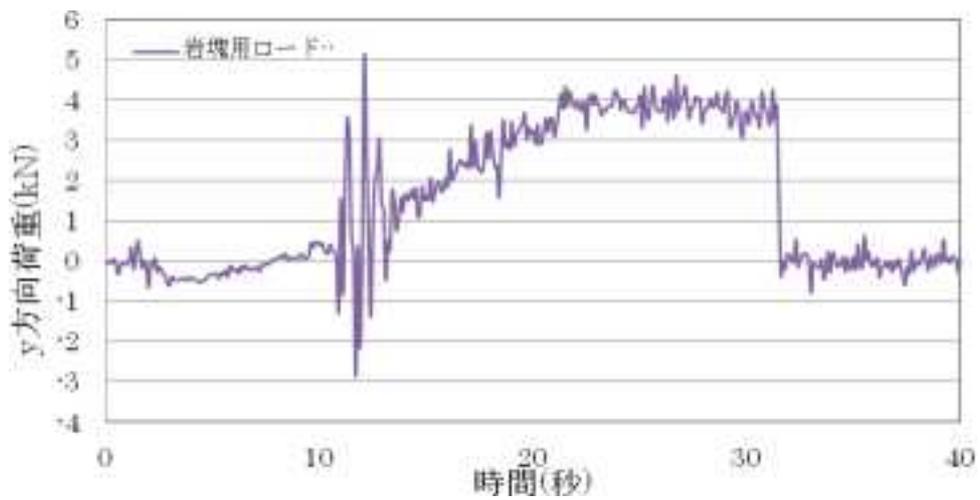
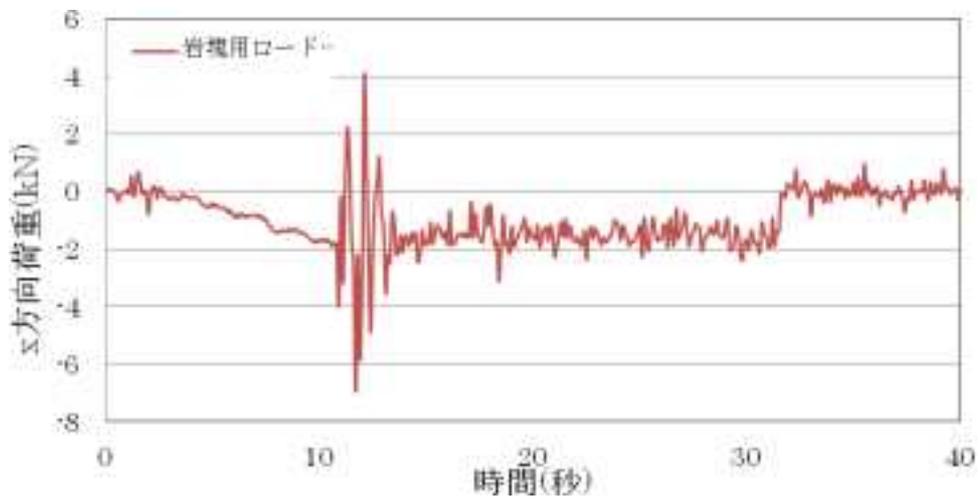
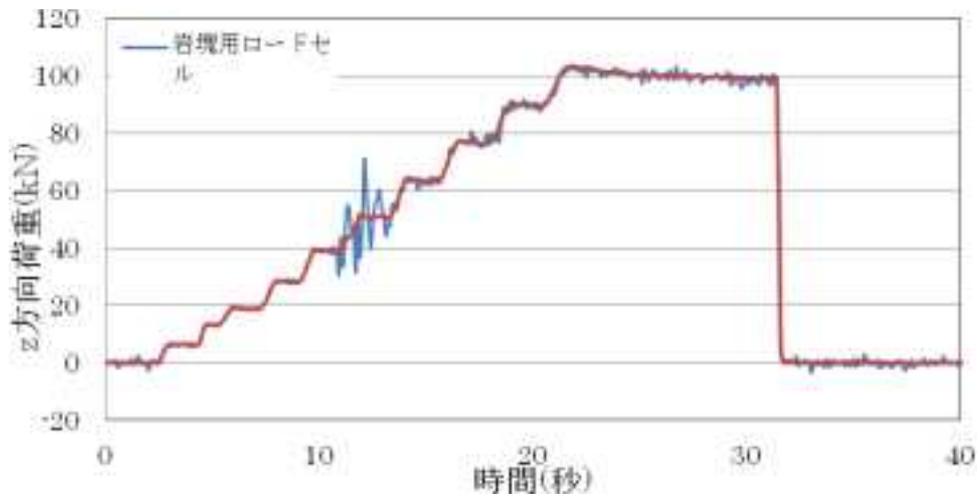


図 5.1.11 No.2 1回目校正試験結果

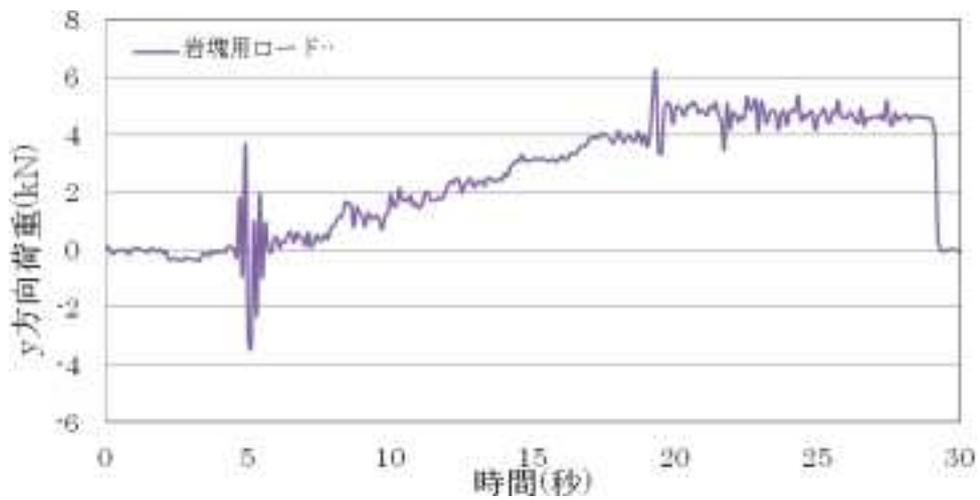
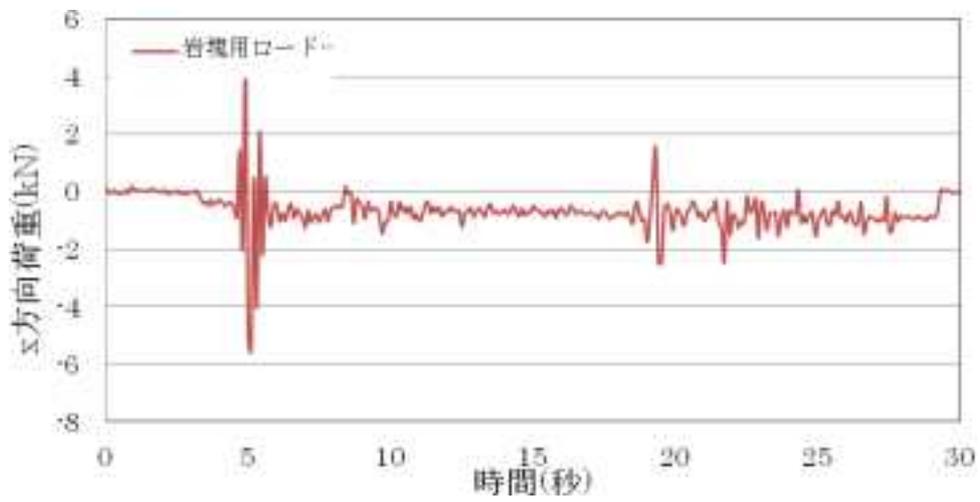
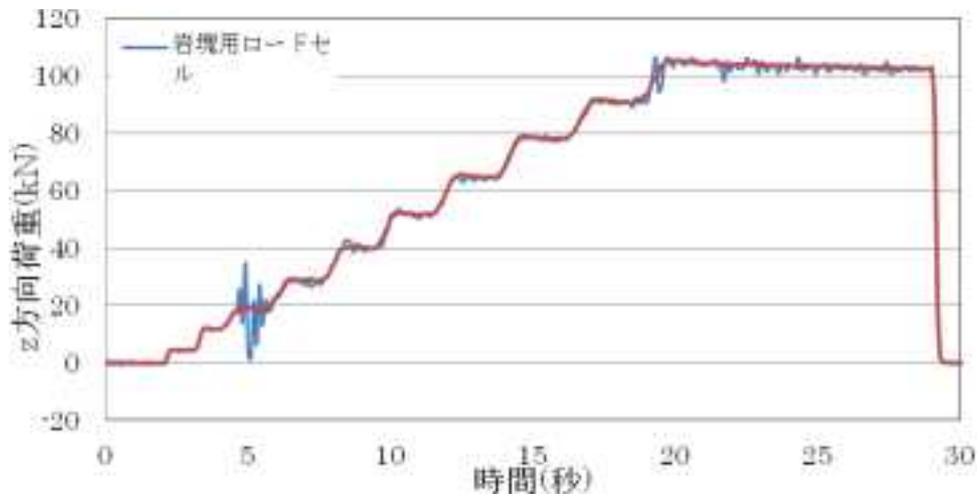


図 5.1.12 No.2 2回目校正試験結果

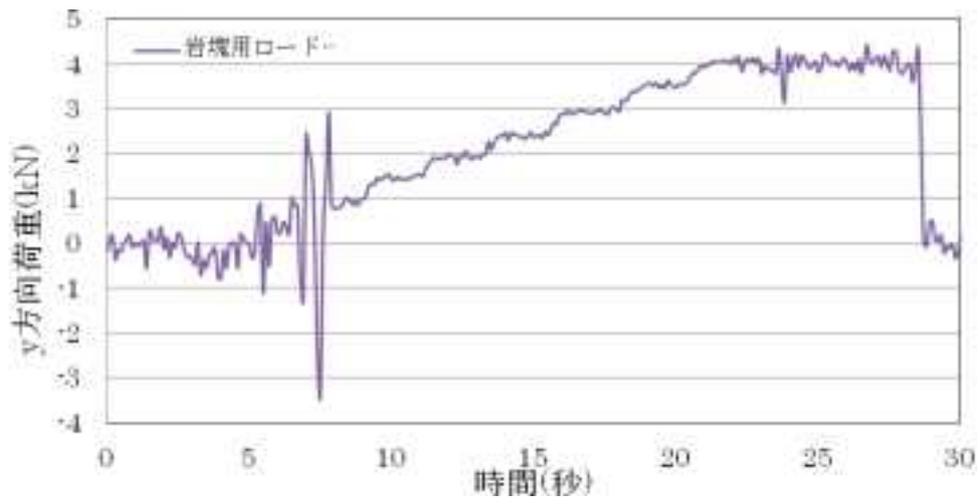
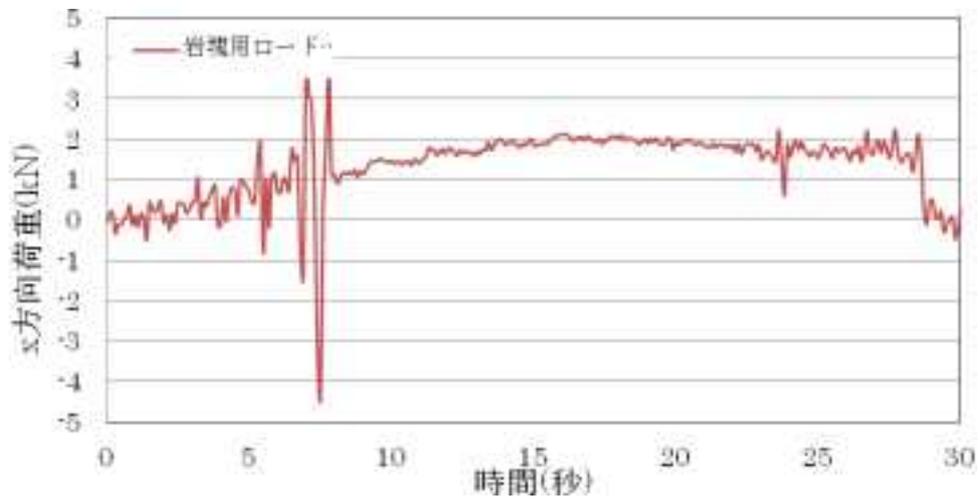
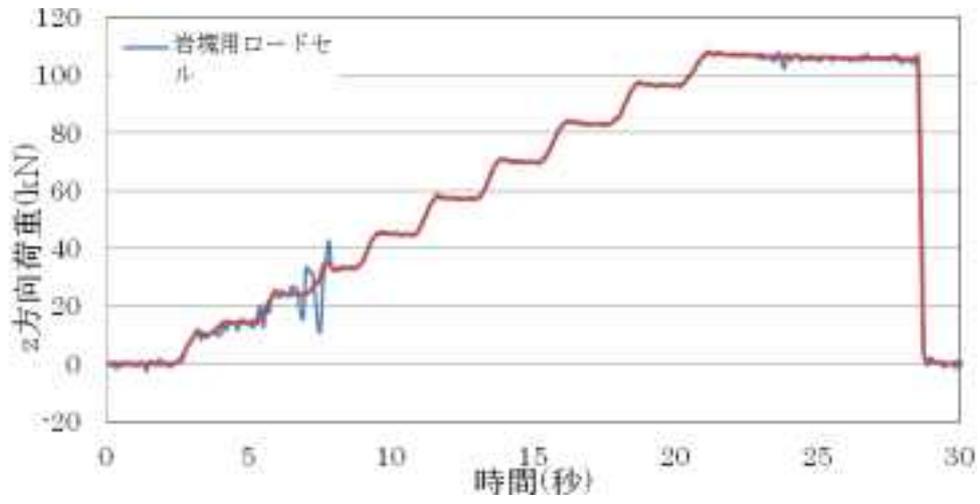


図 5.1.13 No.3 1回目校正試験結果

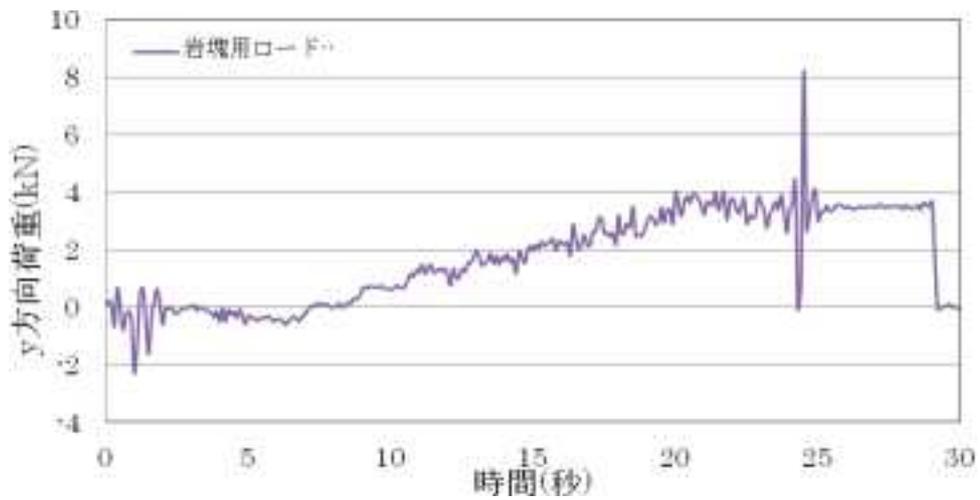
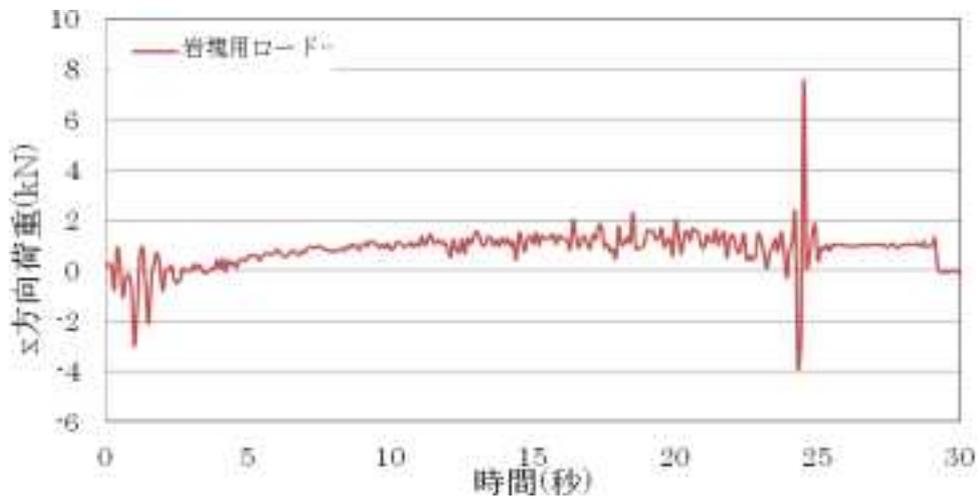
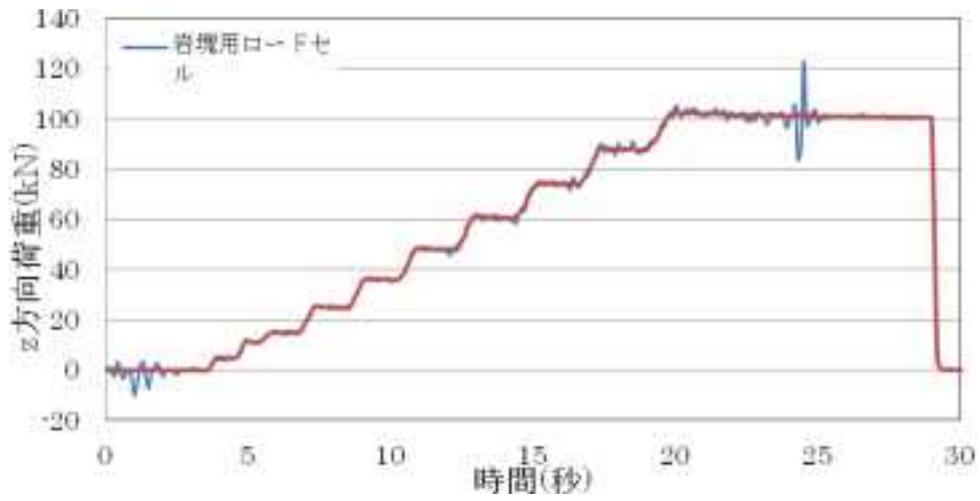


図 5.1.14 No.3 2回目校正試験結果

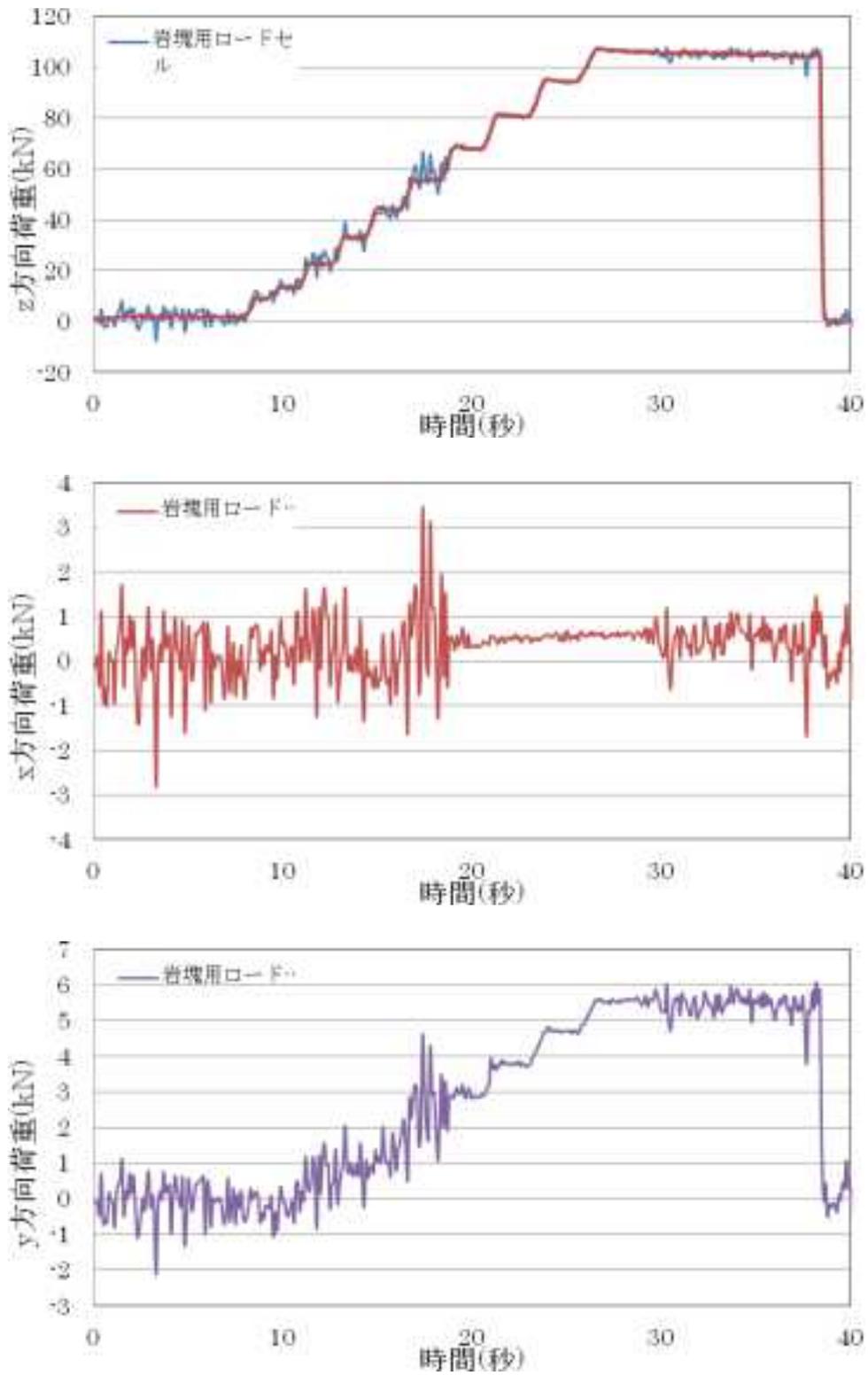


図 5.1.15 No.4 1回目校正試験結果

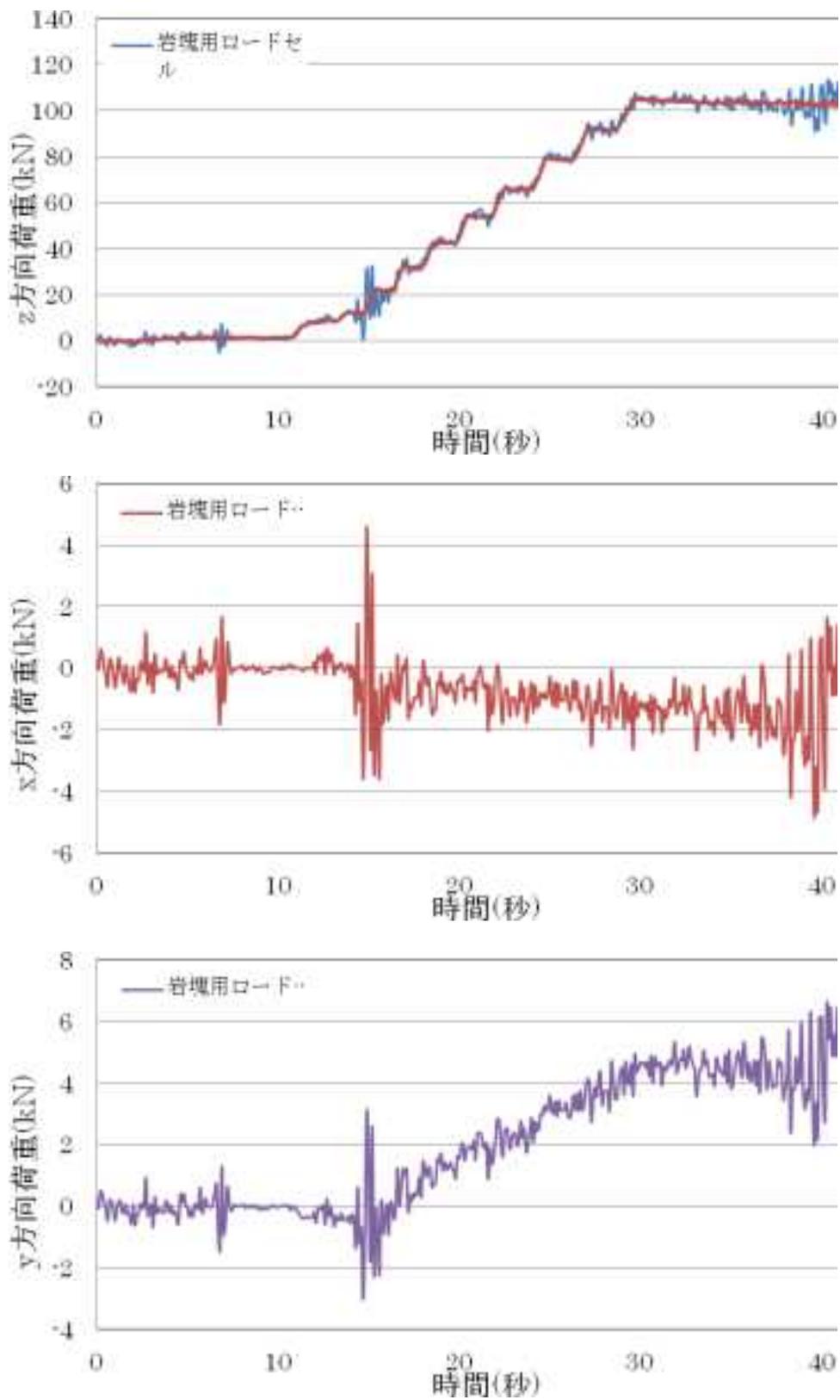


図 5.1.16 No.4 2回目校正試験結果

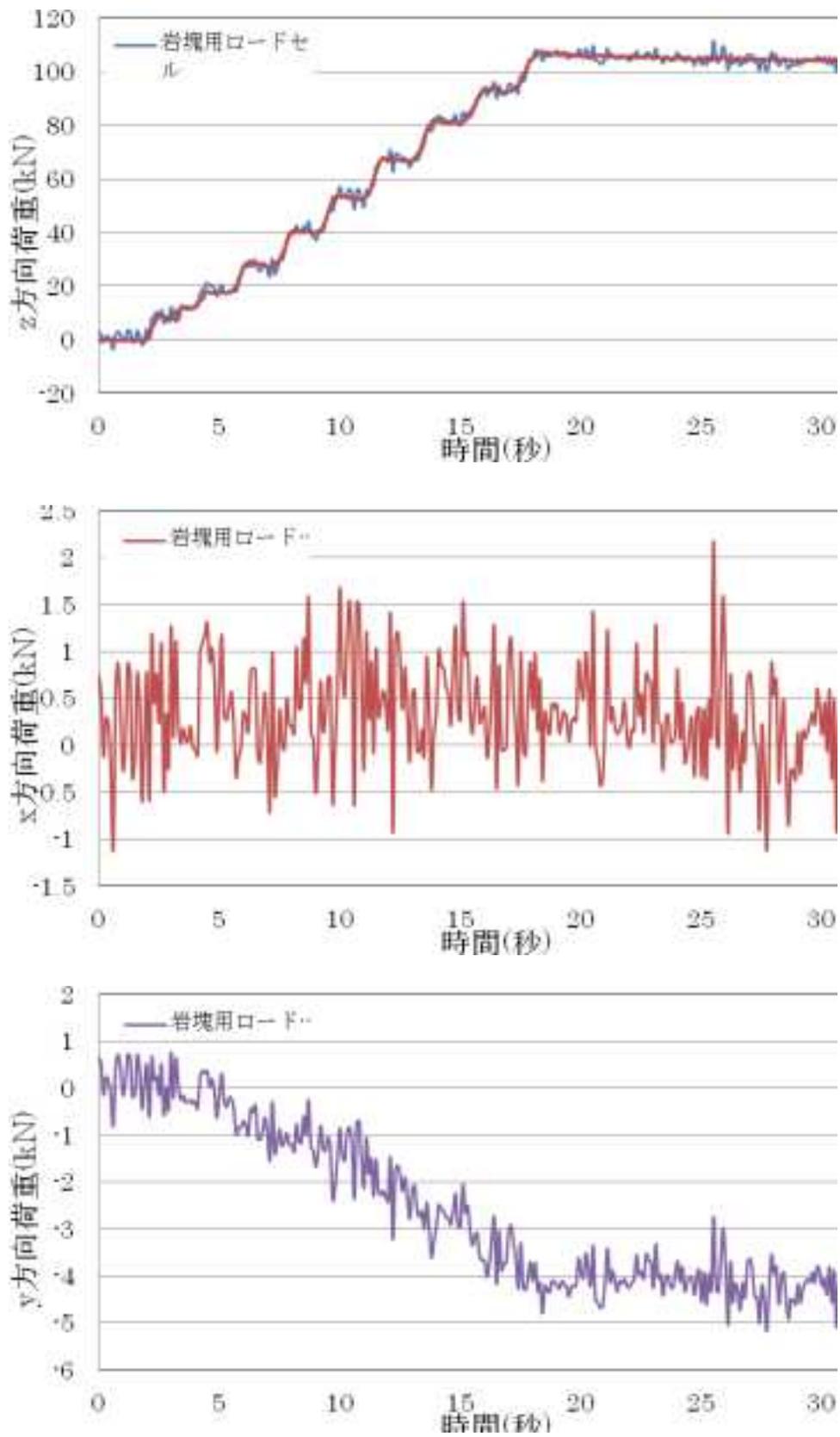


図 5.1.17 No.5 1回目校正試験結果

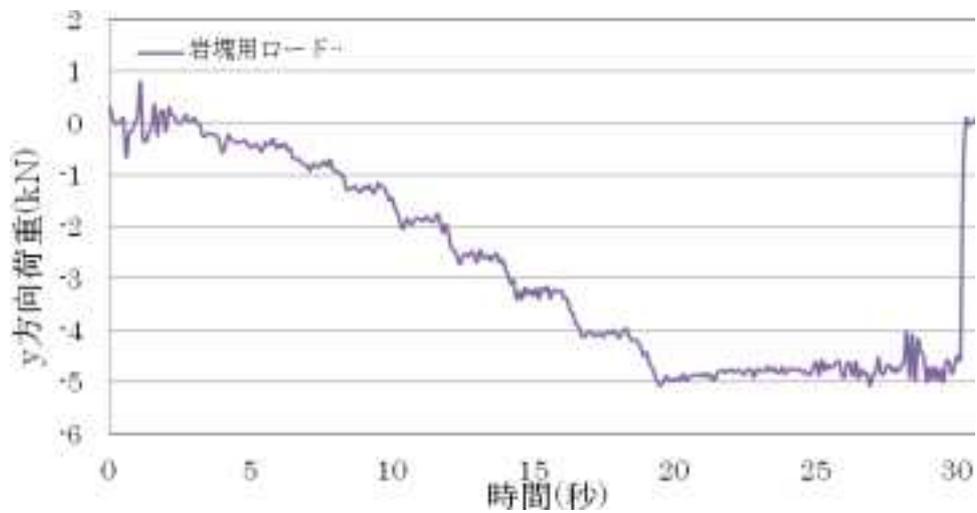
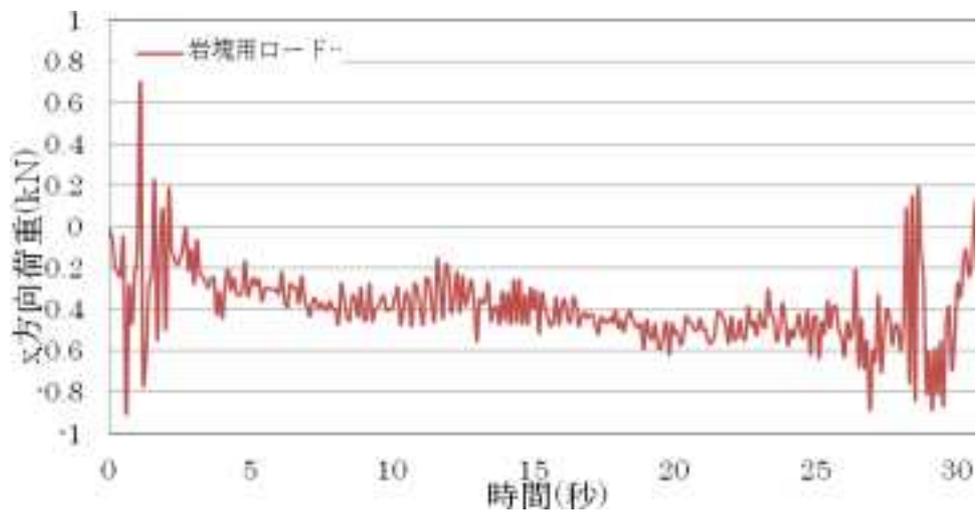
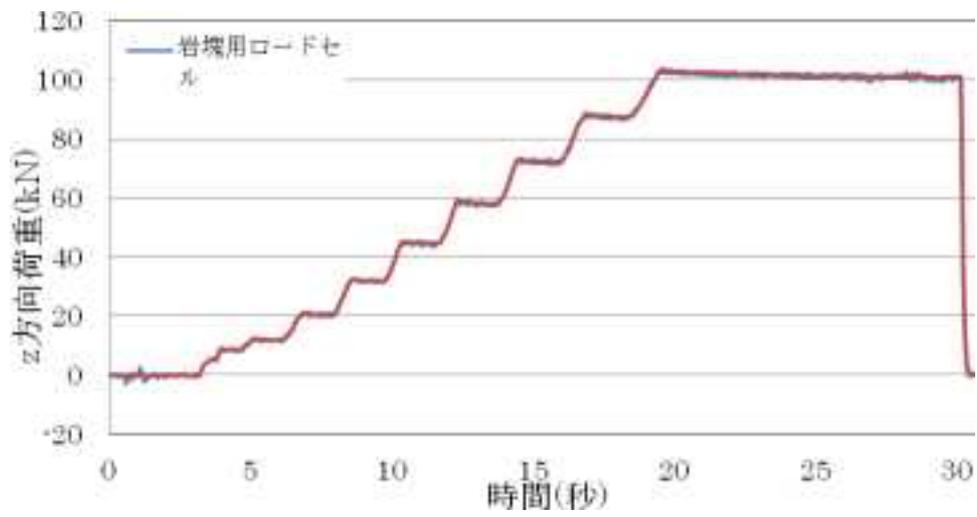


図 5.1.18 No.5 2回目校正試験結果

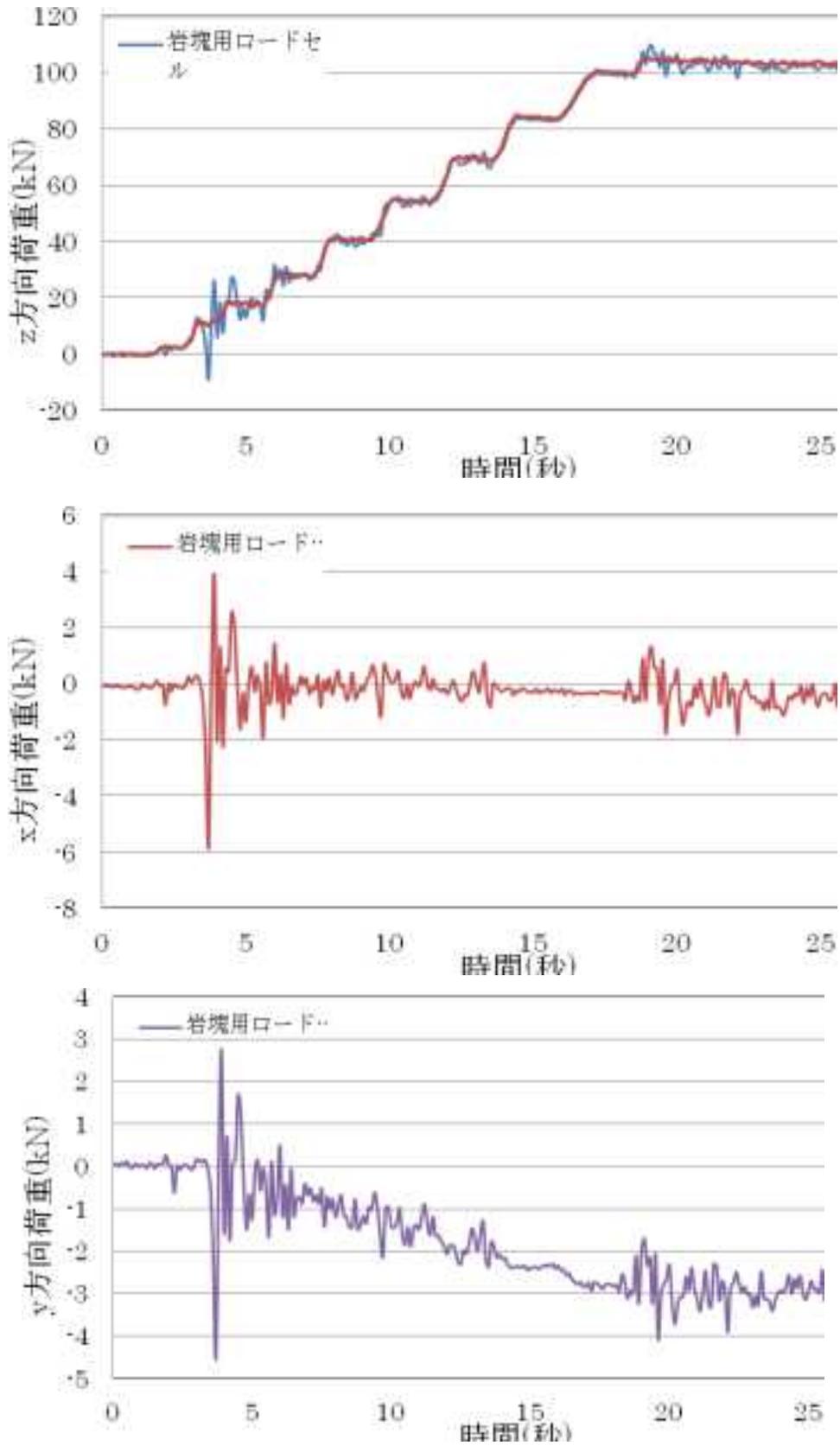


図 5.1.19 No.6 1回目校正試験結果

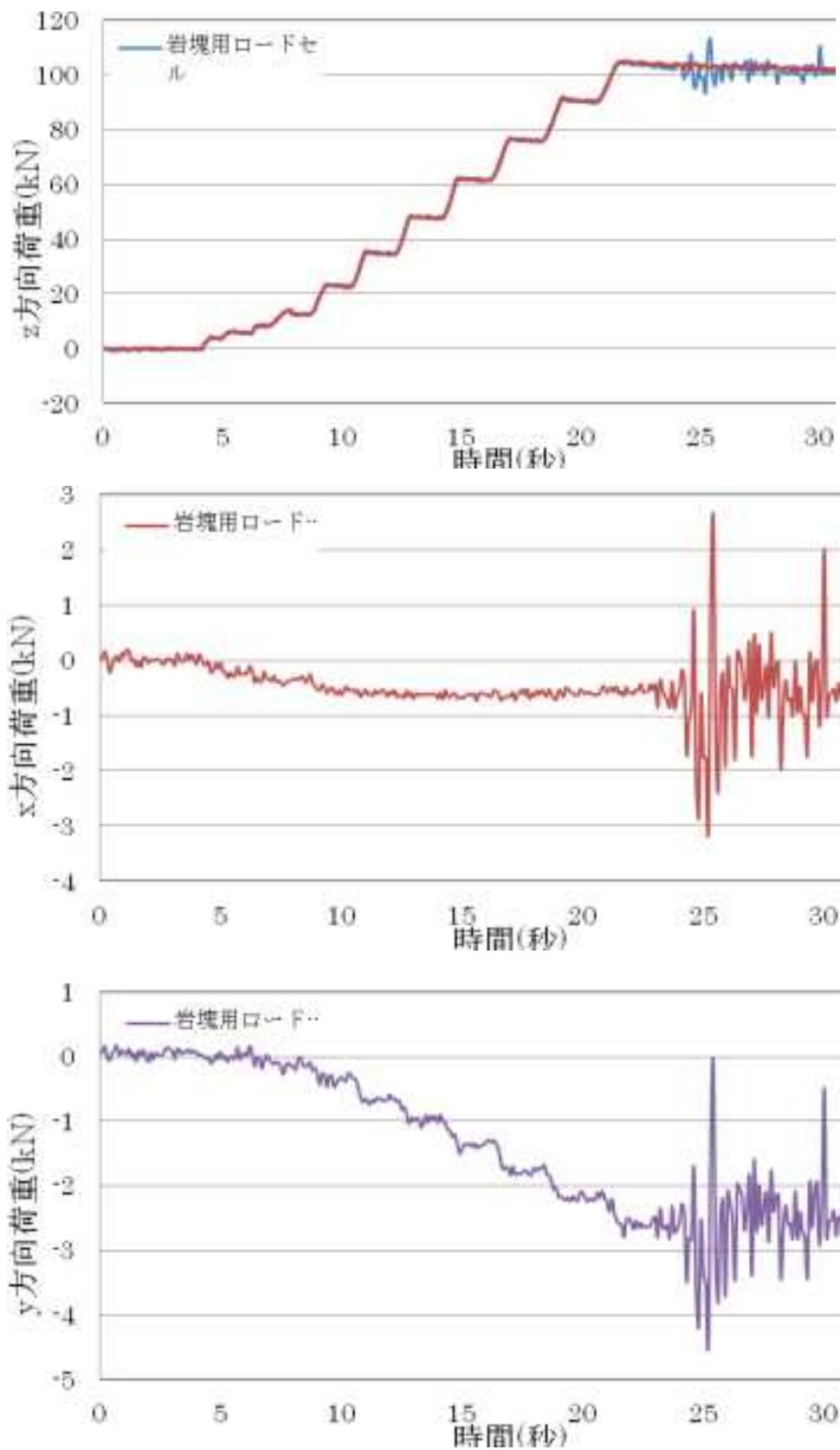


図 5.1.20 No.6 2回目校正試験結果

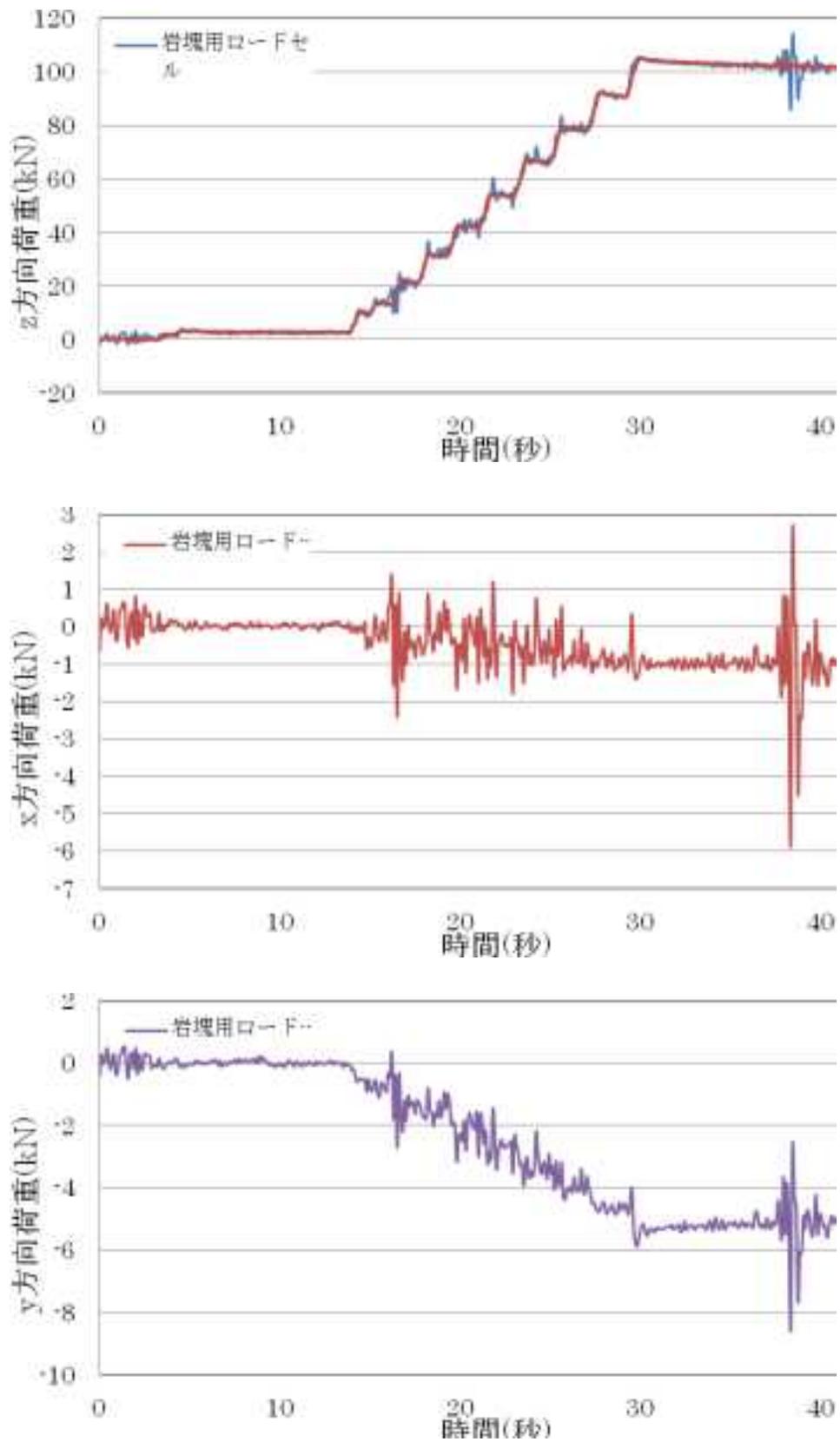


図 5.1.21 No.7 1回目校正試験結果

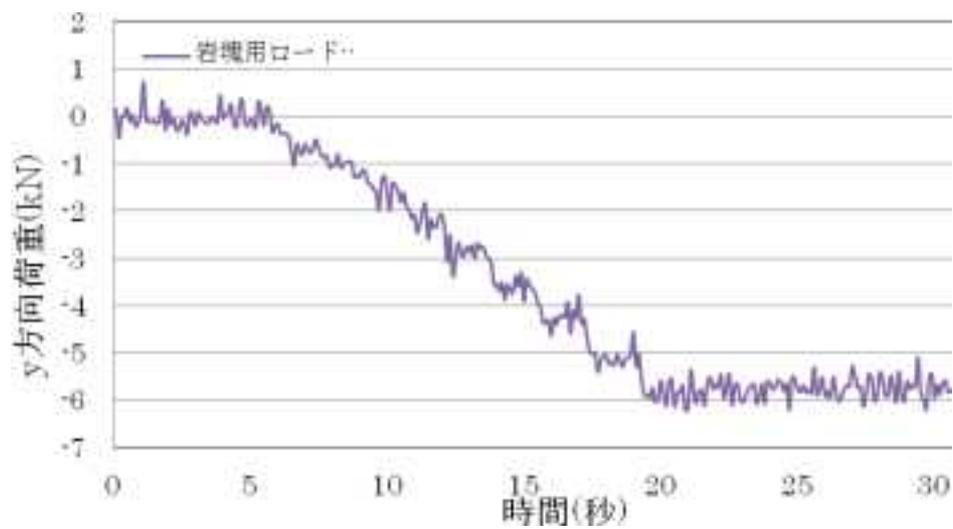
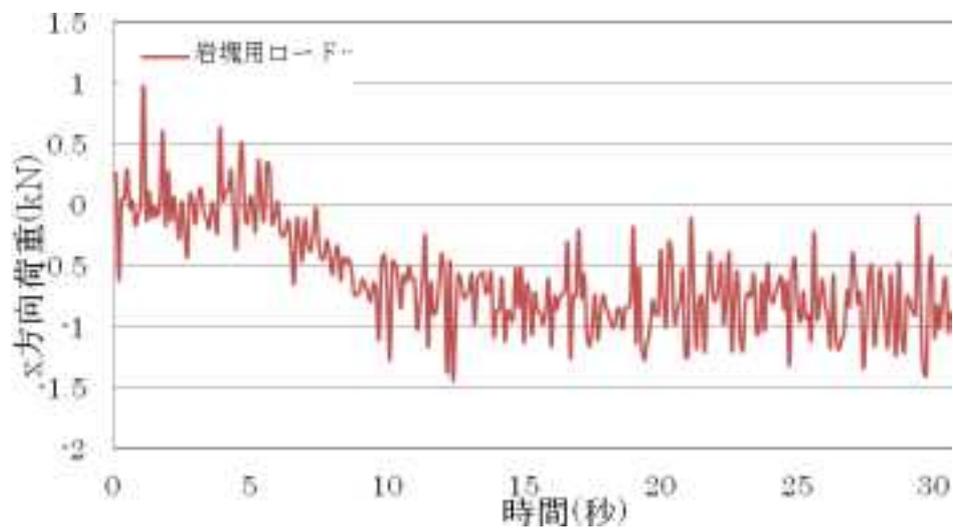
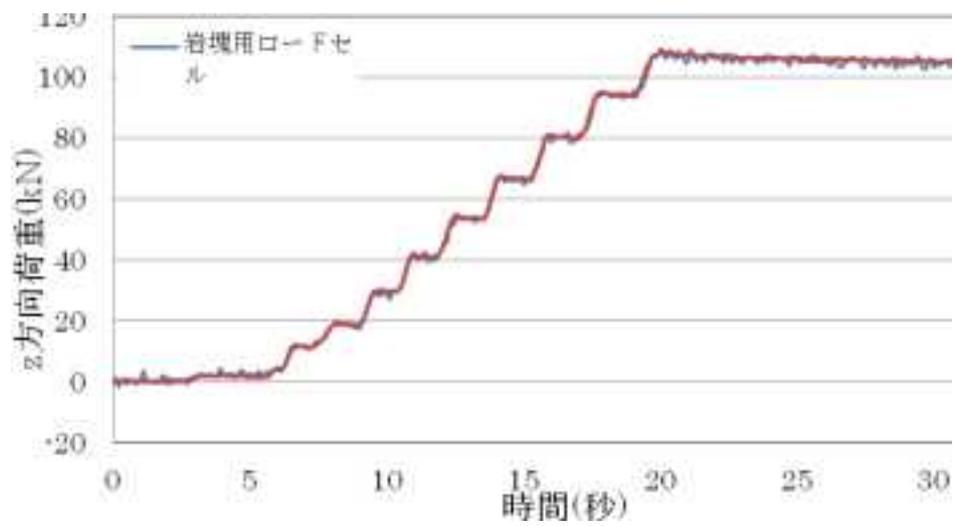


図 5.1.22 No.7 2回目校正試験結果

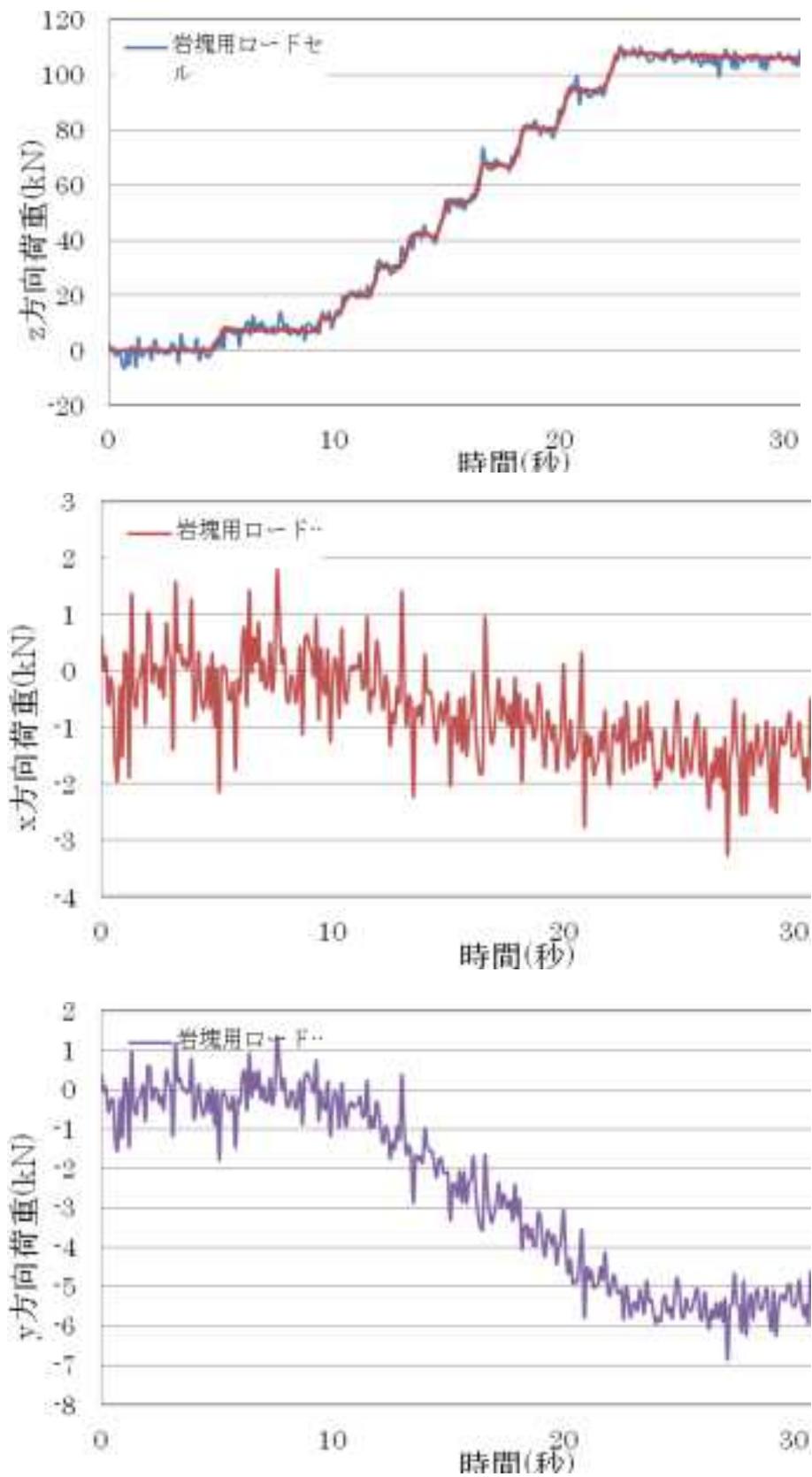


図 5.1.23 No.7 3回目校正試験結果

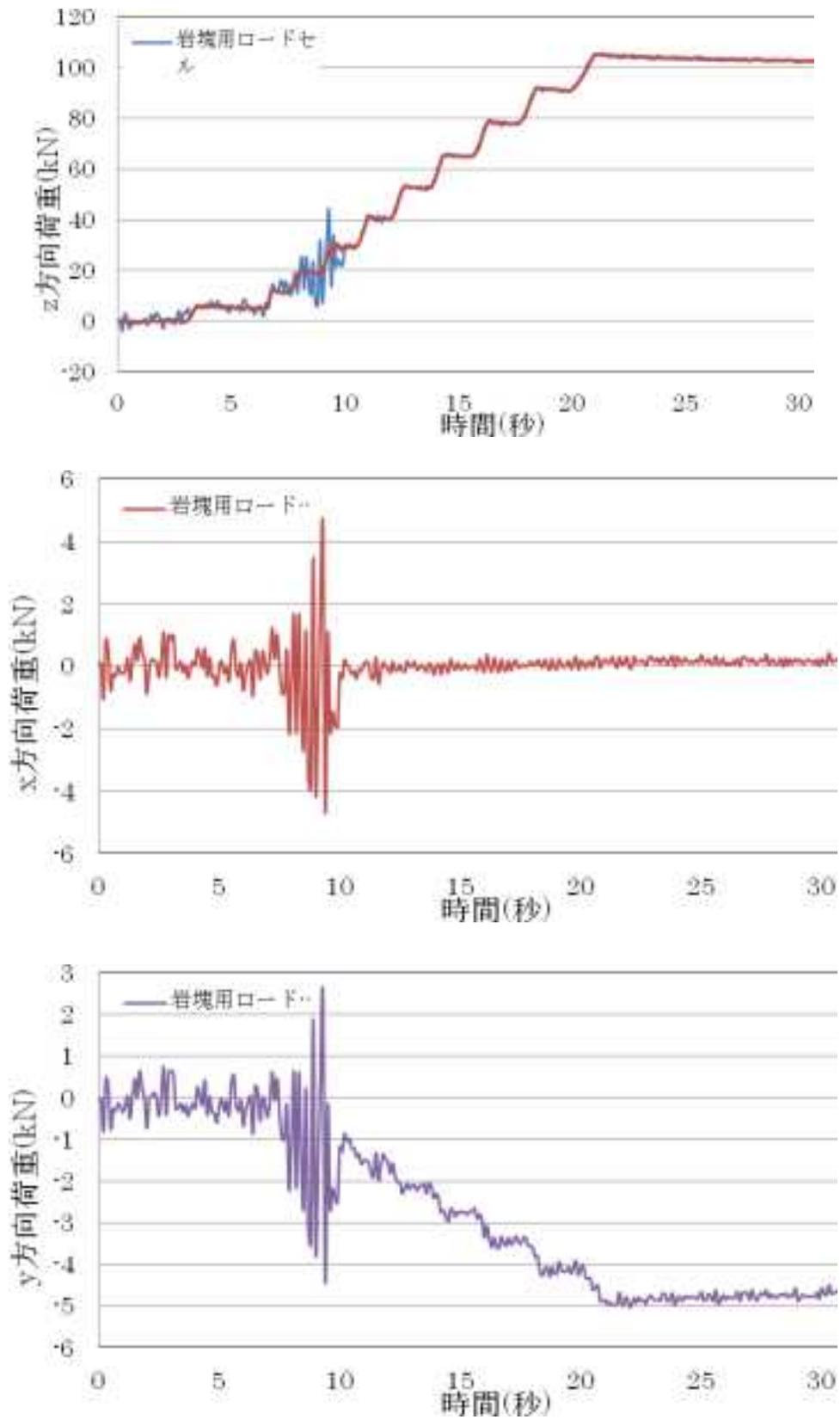


図 5.1.24 No.8 1回目校正試験結果

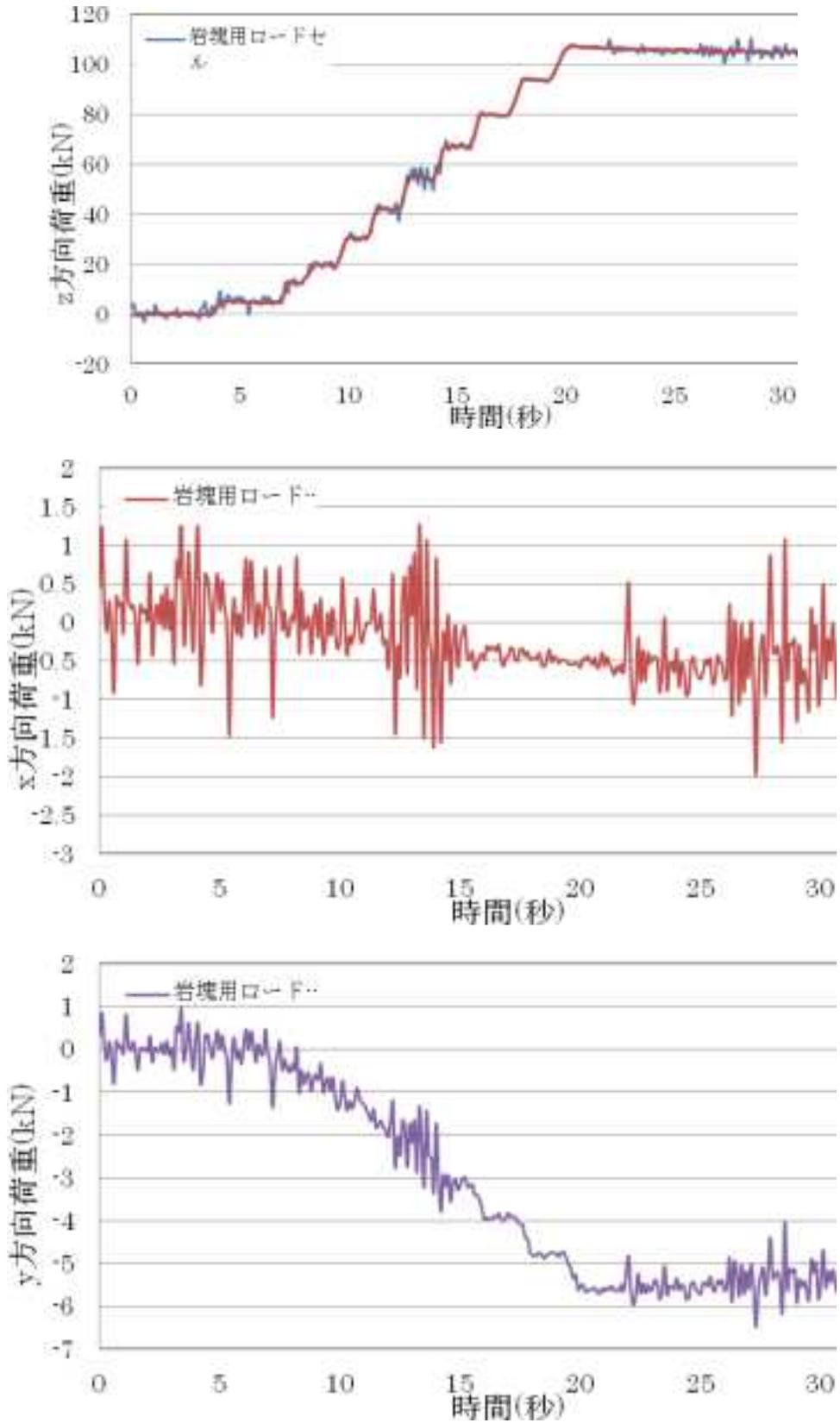


図 5.1.25 No.8 2回目校正試験結果

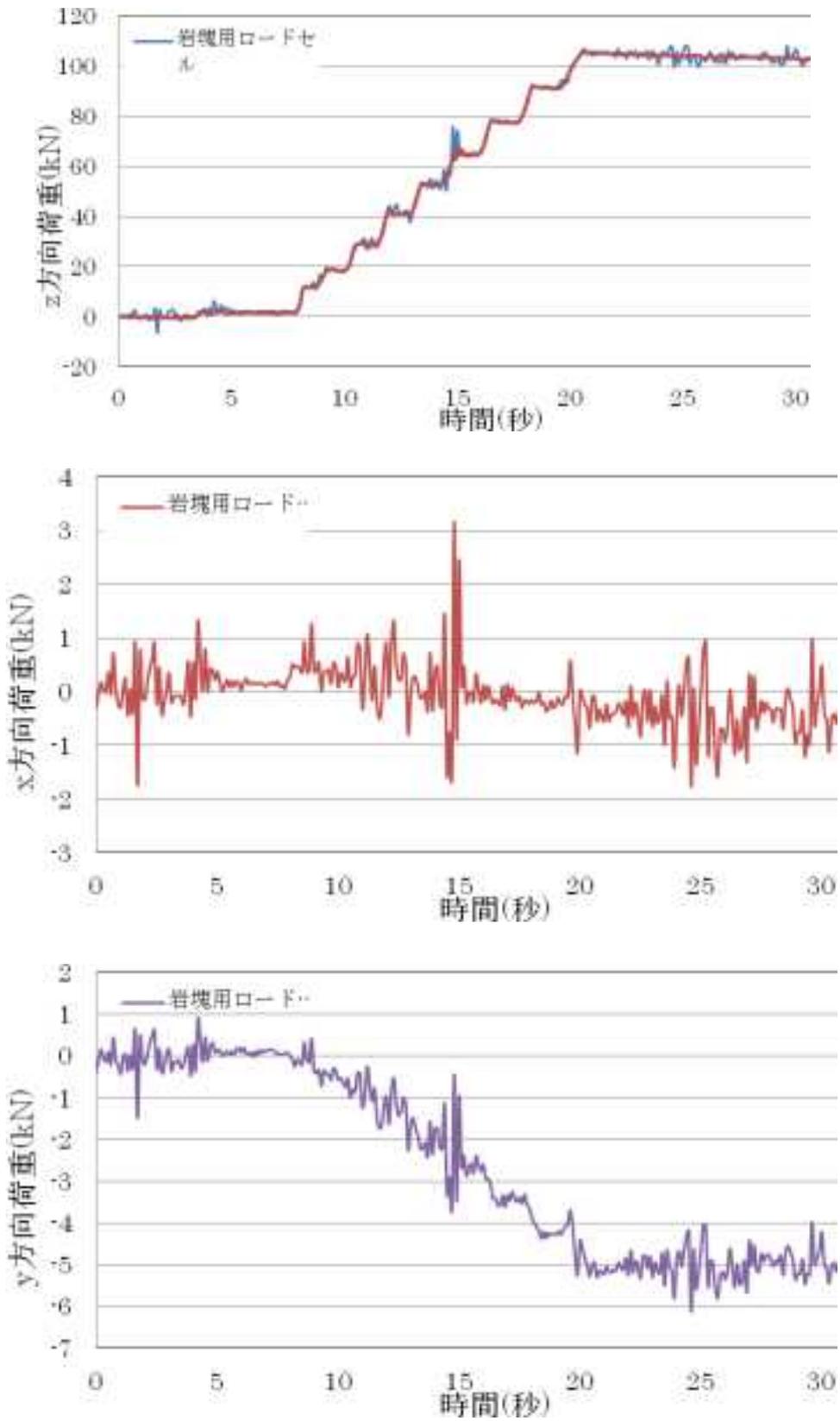


図 5.1.26 No.8 3回目校正試験結果

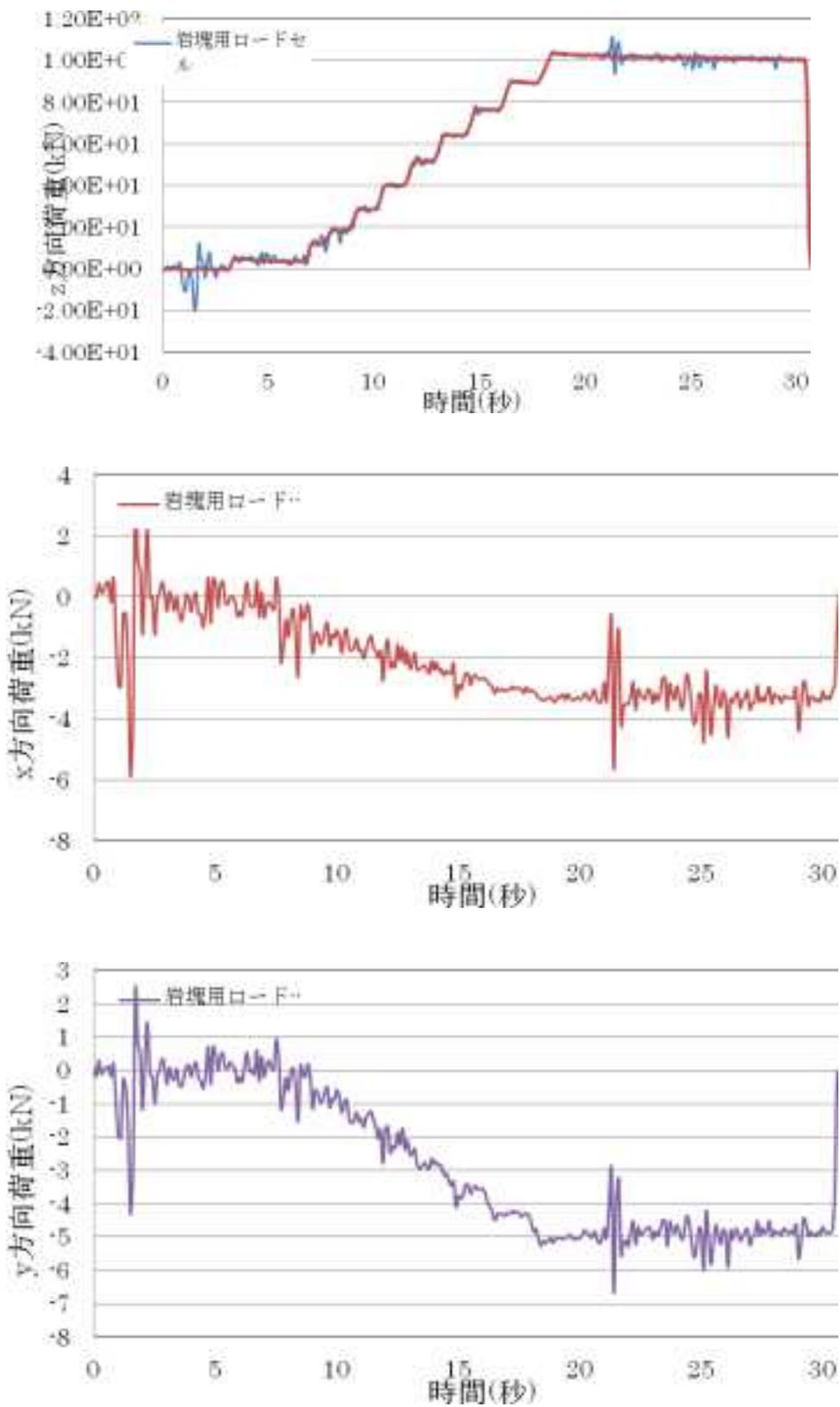


図 5.1.27 No.9 1回目校正試験結果

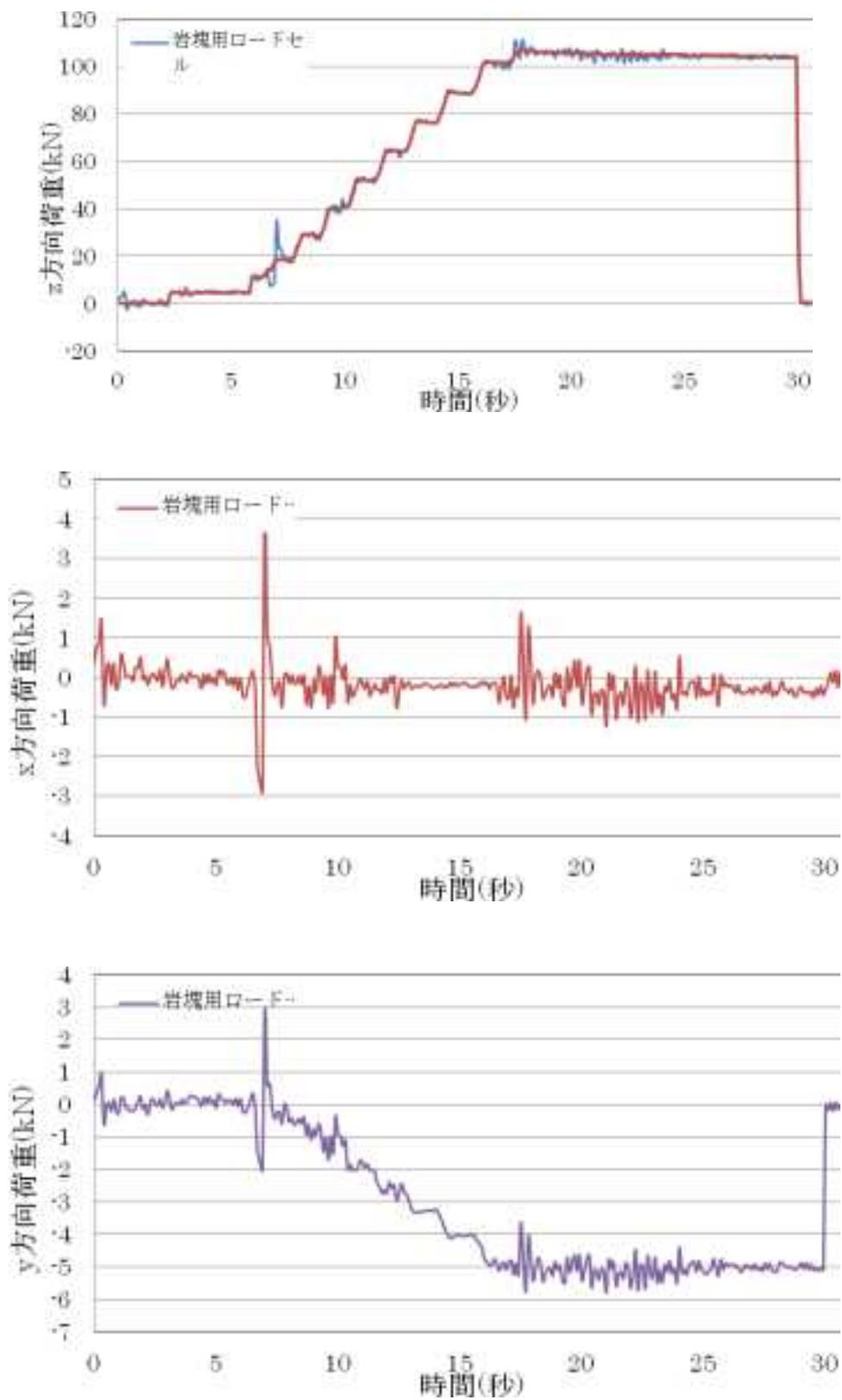


図 5.1.28 No.9 2回目校正試験結果

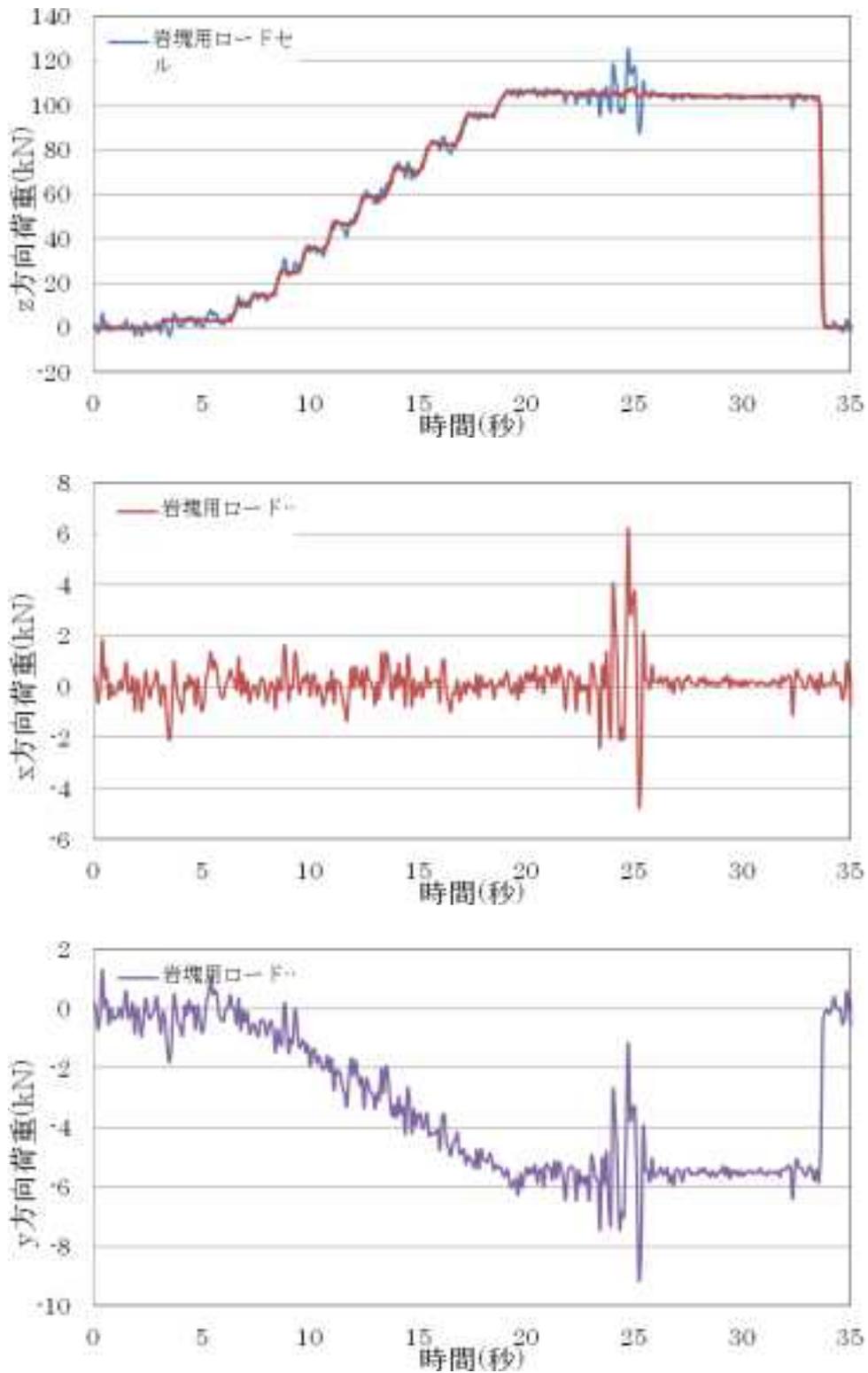
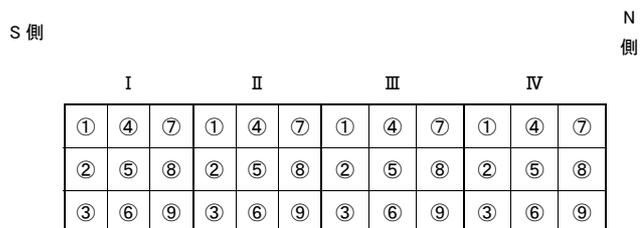


図 5.1.29 No.9 3回目校正試験結果

(2) 土砂用荷重計校正作業

図 5.1.30 に土砂用荷重計の校正作業実施位置と試験 No の対応を示す。計 36 箇所の位置に対し、3 回載荷試験を実施した。



※ローマ数字表記はロードセル番号を示す。

※○数字は載荷位置を示す。

試験 No.	載荷位置	試験 No.	載荷位置	試験 No.	載荷位置	試験 No.	載荷位置
1	I - ①	10	II - ①	19	III - ①	28	IV - ①
2	I - ②	11	II - ②	20	III - ②	29	IV - ②
3	I - ③	12	II - ③	21	III - ③	30	IV - ③
4	I - ④	13	II - ④	22	III - ④	31	IV - ④
5	I - ⑤	14	II - ⑤	23	III - ⑤	32	IV - ⑤
6	I - ⑥	15	II - ⑥	24	III - ⑥	33	IV - ⑥
7	I - ⑦	16	II - ⑦	25	III - ⑦	34	IV - ⑦
8	I - ⑧	17	II - ⑧	26	III - ⑧	35	IV - ⑧
9	I - ⑨	18	II - ⑨	27	III - ⑨	36	IV - ⑨

図 5.1.30 土砂用荷重計の試験 No.と載荷位置の対応

以下に土砂用荷重計の校正結果を示す。

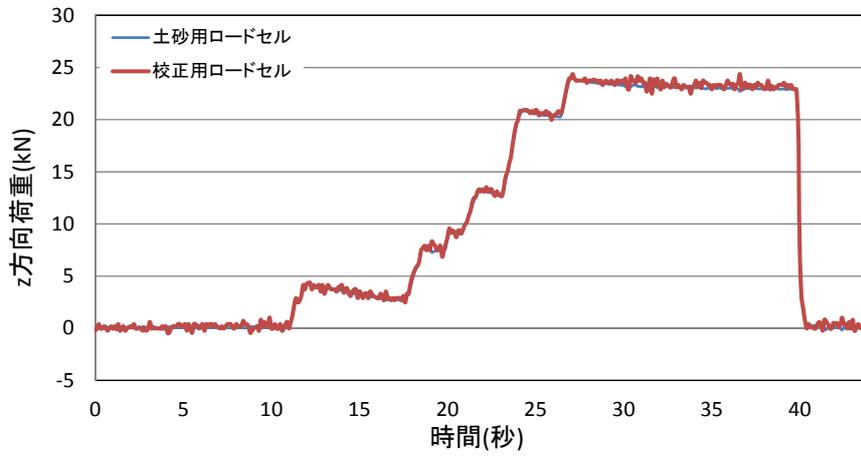


図 5.1.31 No.1 I-① 1回目校正試験結果

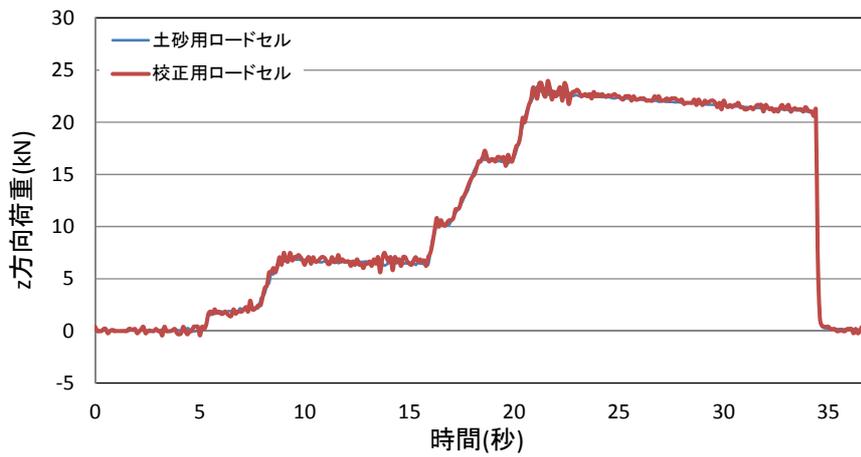


図 5.1.32 No.1 I-① 2回目校正試験結果

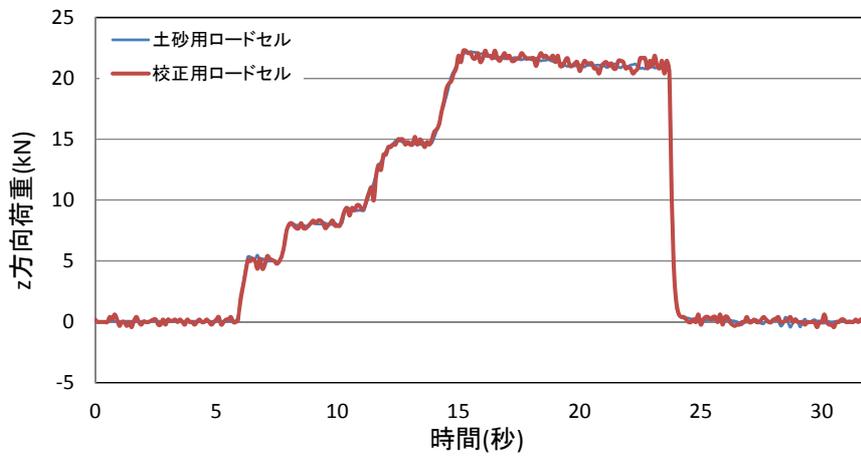


図 5.1.33 No.1 I-① 3回目校正試験結果

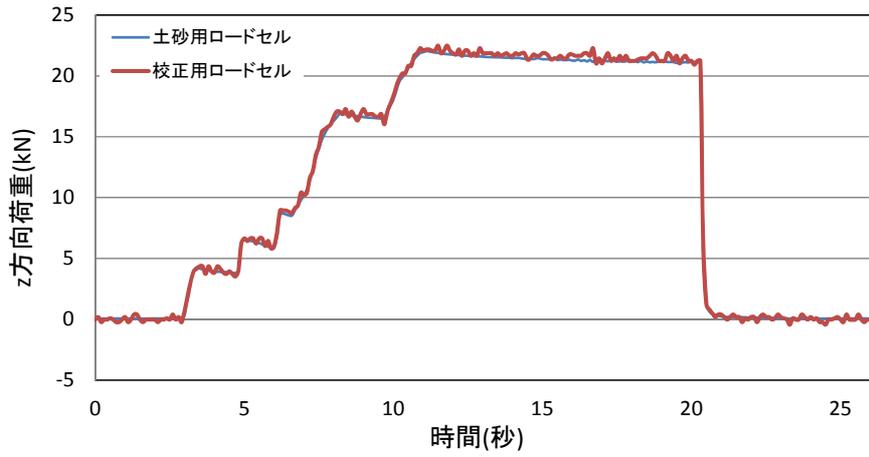


図 5.1.34 No.2 I-② 1回目校正試験結果

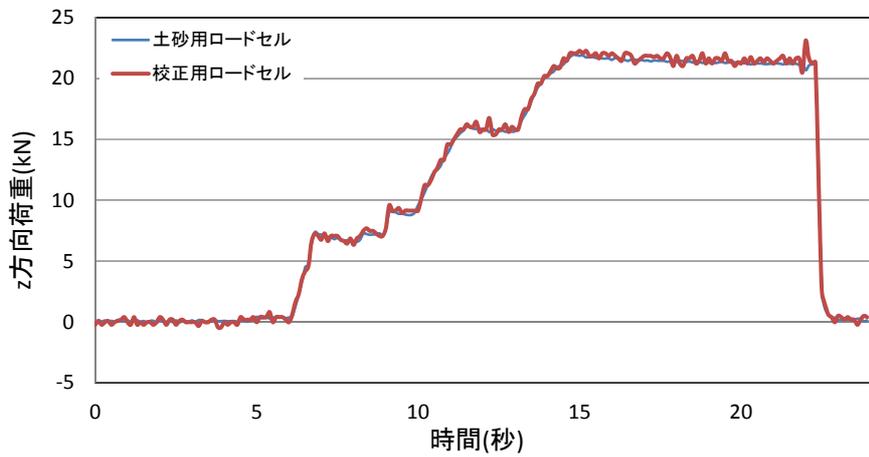


図 5.1.35 No.2 I-② 2回目校正試験結果

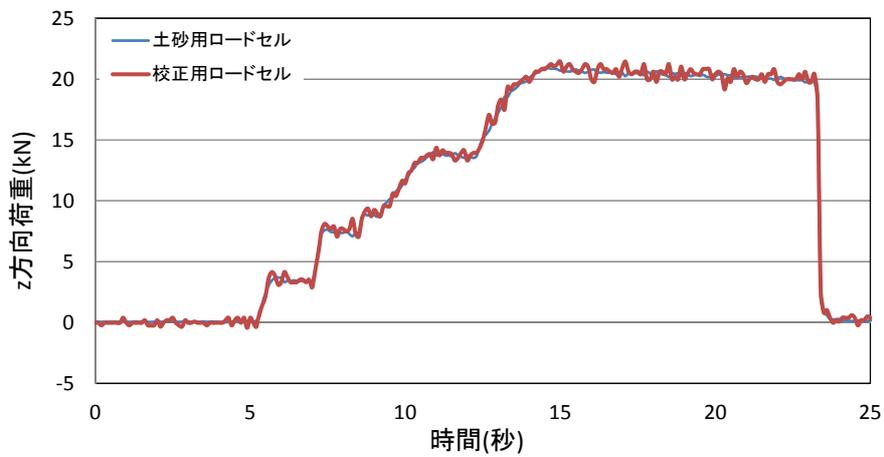


図 5.1.36 No.2 I-② 3回目校正試験結果

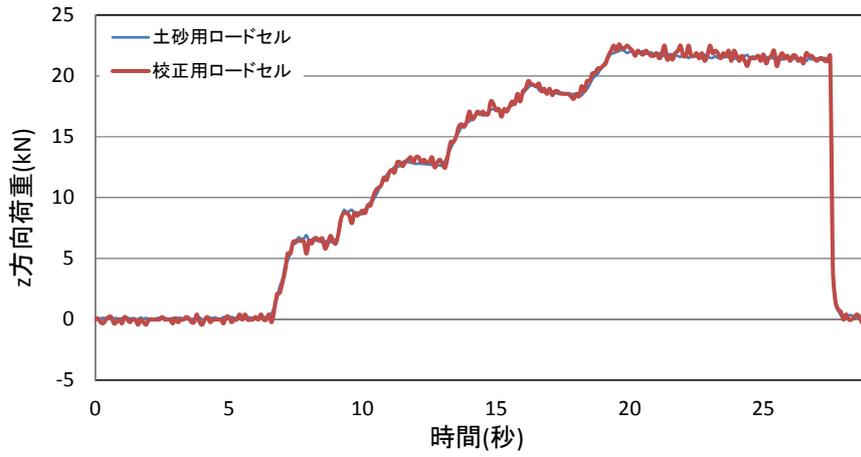


図 5.1.37 No.3 I-③ 1回目校正試験結果

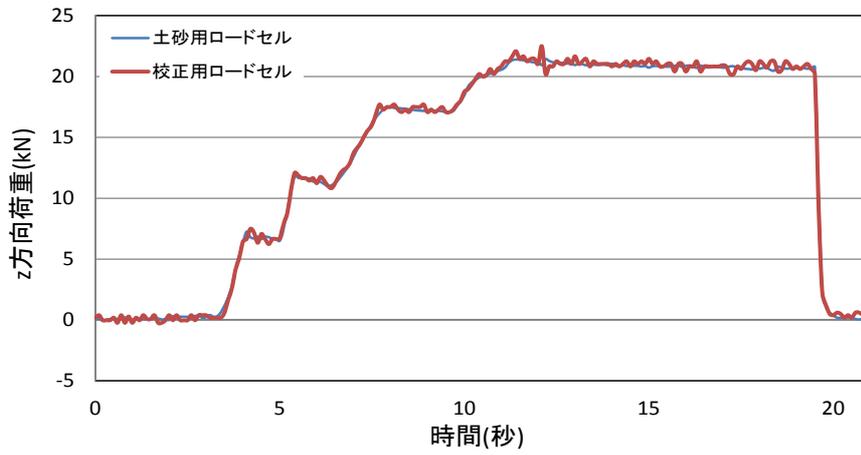


図 5.1.38 No.3 I-③ 2回目校正試験結果

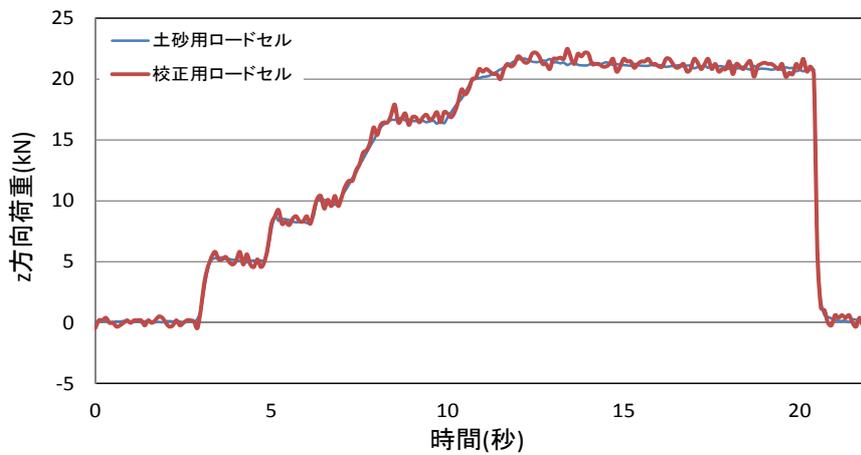


図 5.1.39 No.3 I-③ 3回目校正試験結果

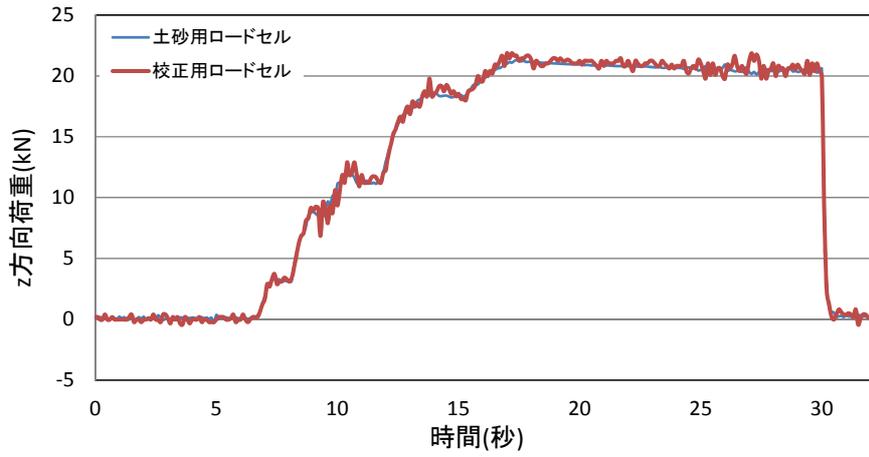


図 5.1.40 No.4 I-④ 1回目校正試験結果

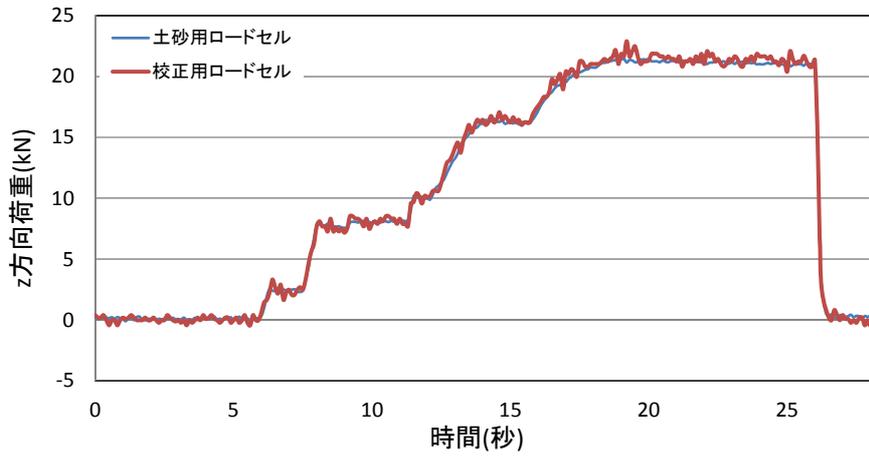


図 5.1.41 No.4 I-④ 2回目校正試験結果

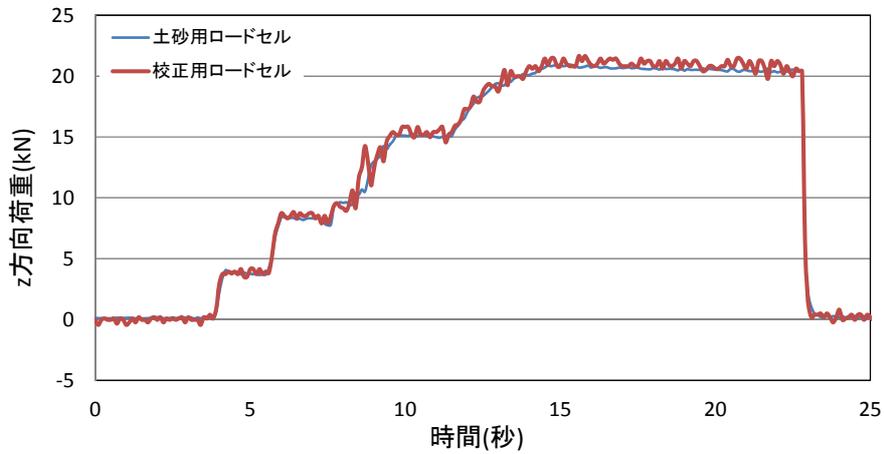


図 5.1.42 No.4 I-④ 3回目校正試験結果

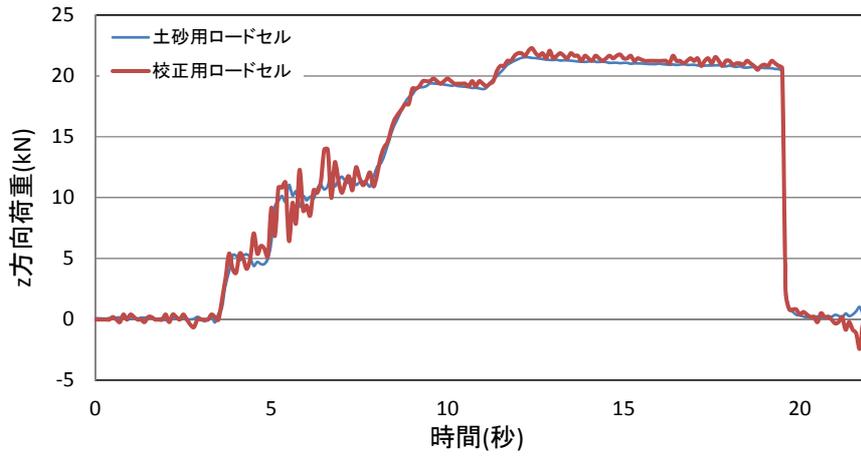


図 5.1.43 No.5 I-⑤ 1回目校正試験結果

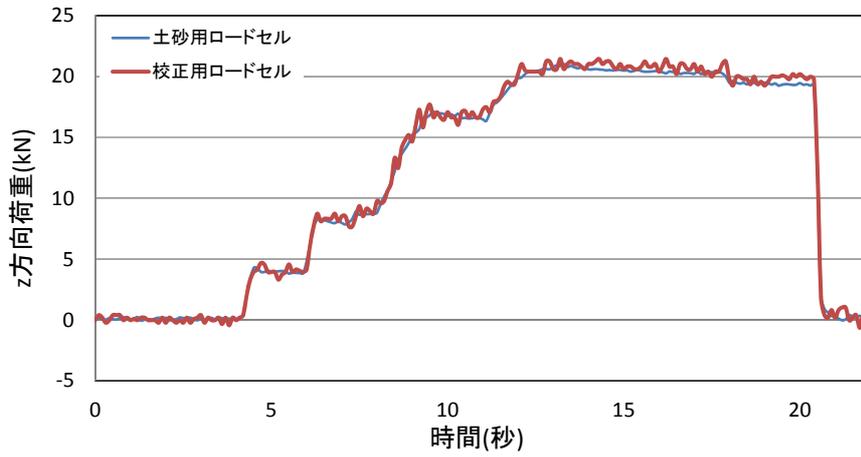


図 5.1.44 No.5 I-⑤ 2回目校正試験結果

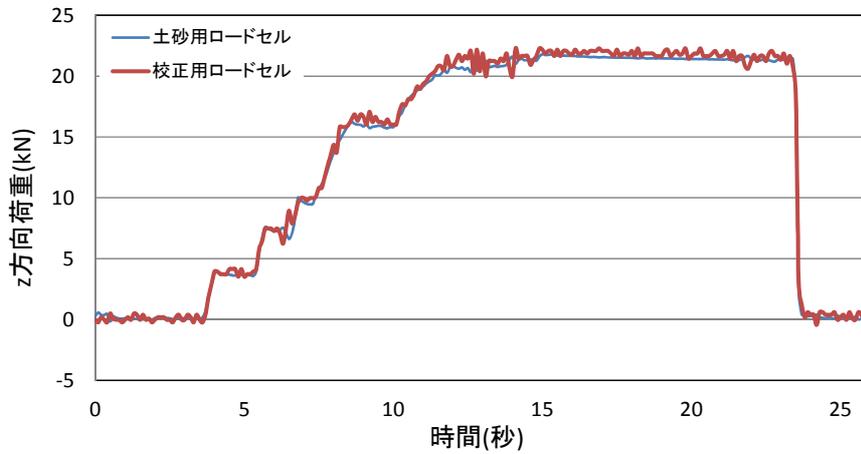


図 5.1.45 No.5 I-⑤ 3回目校正試験結果

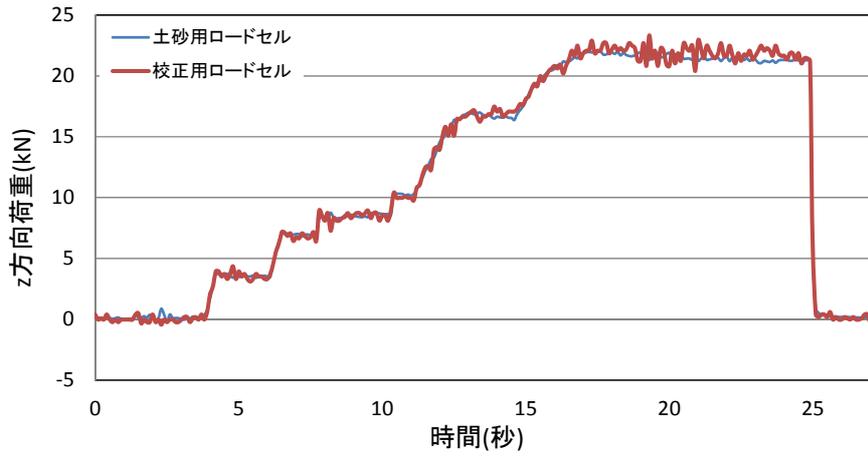


図 5.1.46 No.6 I-⑥ 1回目校正試験結果

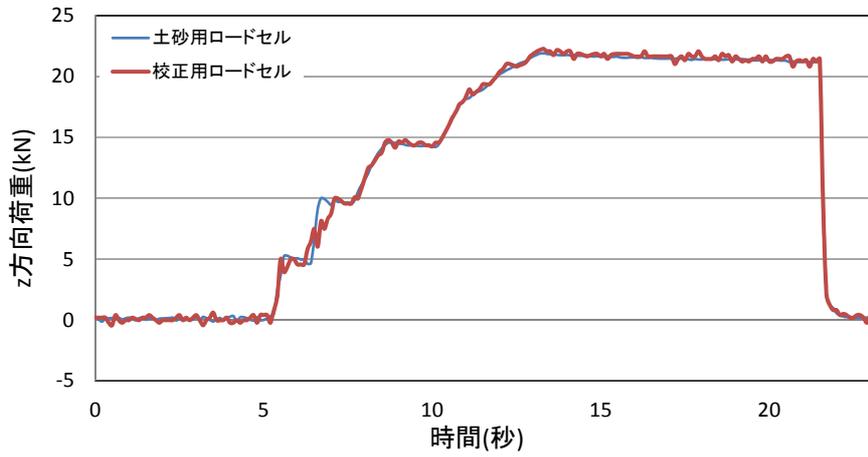


図 5.1.47 No.6 I-⑥ 2回目校正試験結果

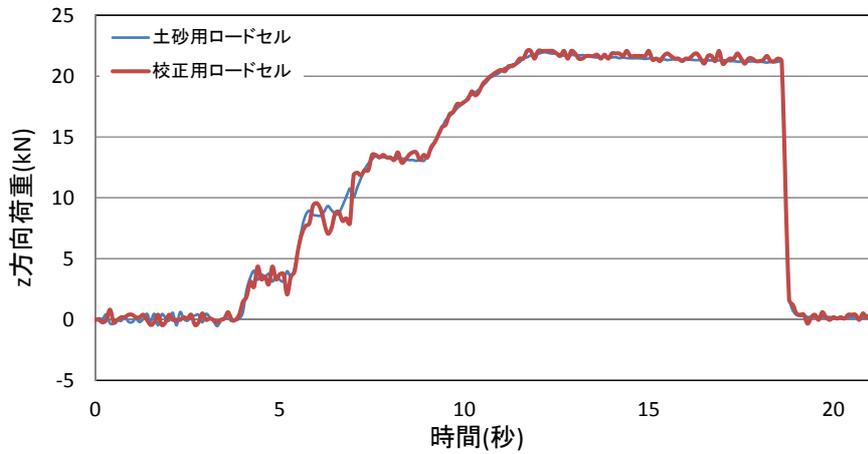


図 5.1.48 No.6 I-⑥ 3回目校正試験結果

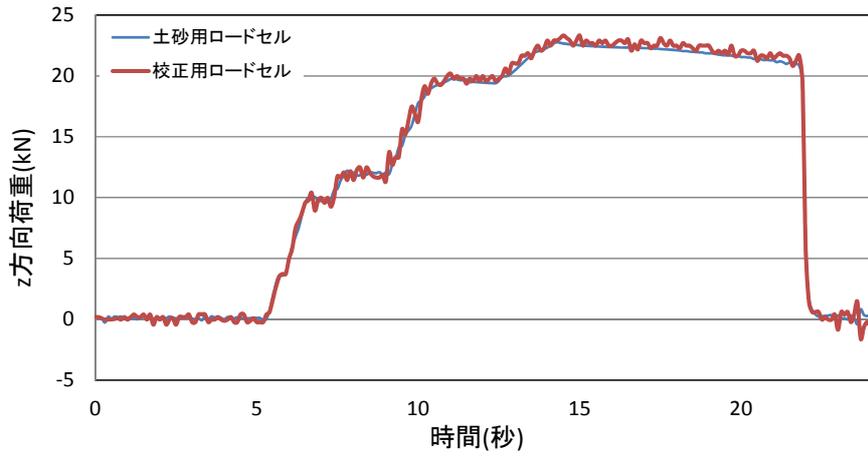


図 5.1.49 No.7 I-⑦ 1回目校正試験結果

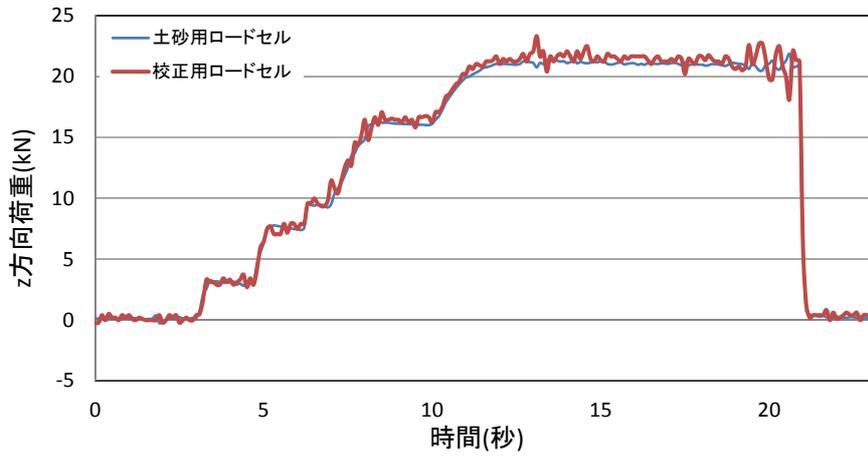


図 5.1.50 No.7 I-⑦ 2回目校正試験結果

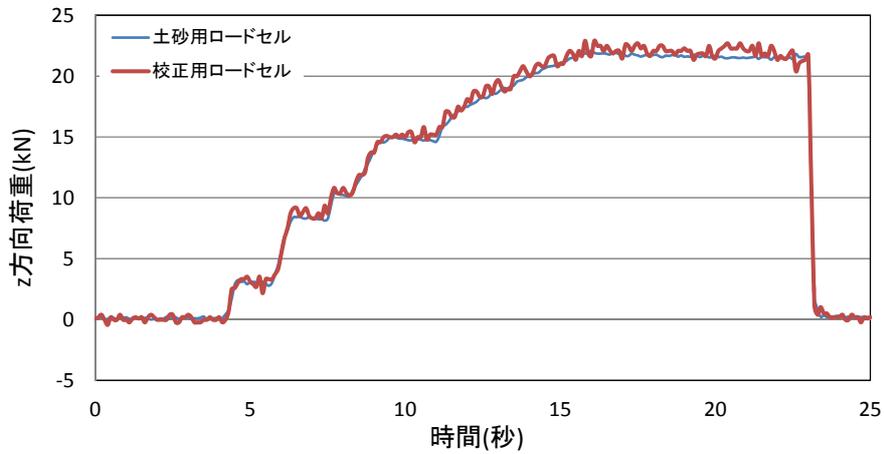


図 5.1.51 No.7 I-⑦ 3回目校正試験結果

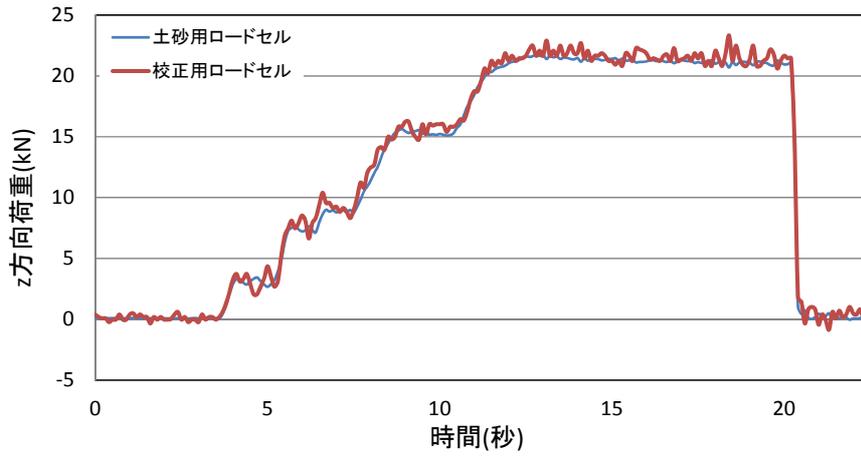


図 5.1.52 No.8 I-⑧ 1回目校正試験結果

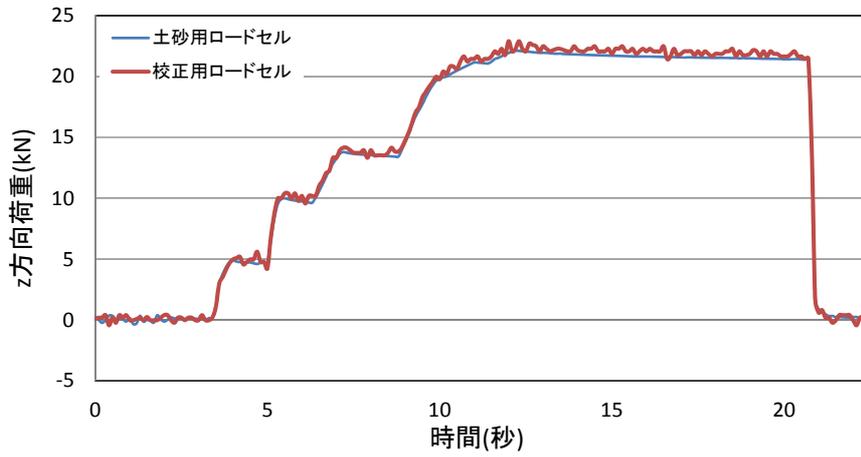


図 5.1.53 No.8 I-⑧ 2回目校正試験結果

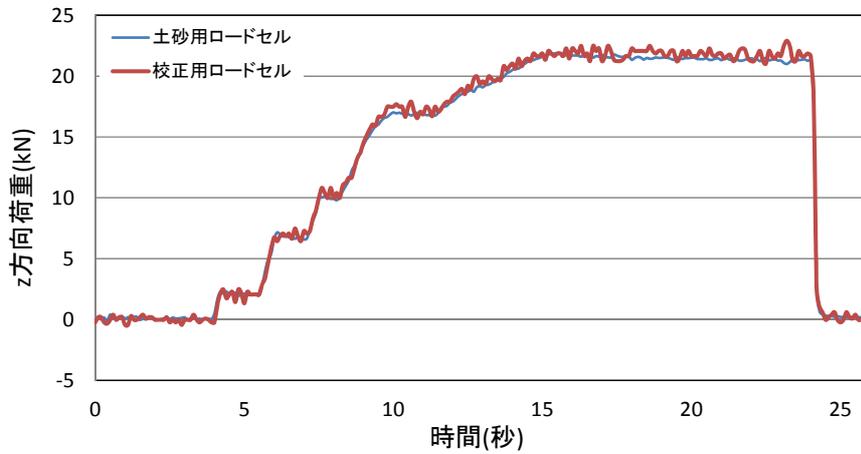


図 5.1.54 No.8 I-⑧ 3回目校正試験結果

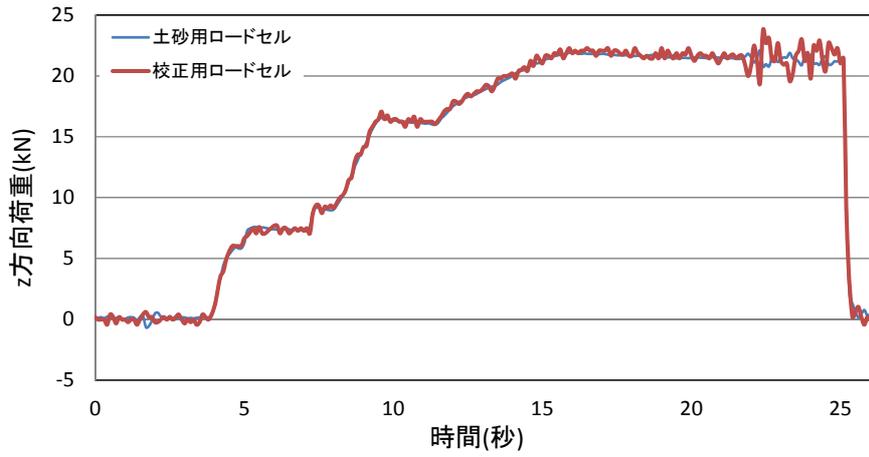


図 5.1.55 No.9 I-⑨ 1回目校正試験結果

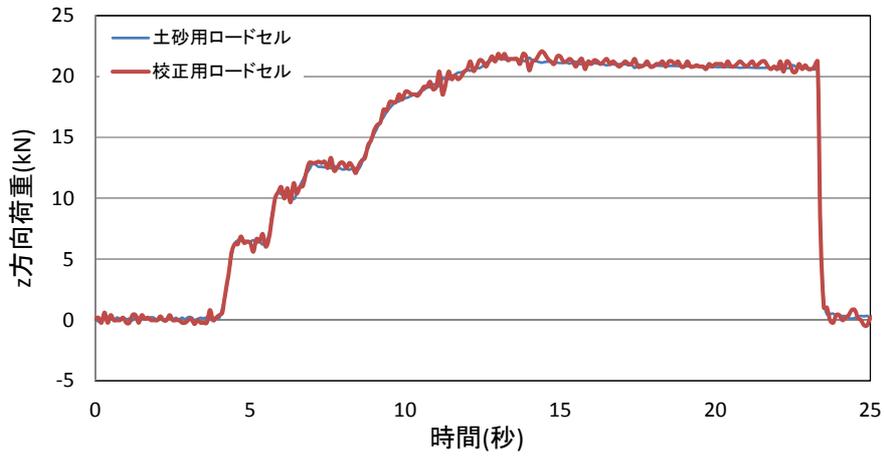


図 5.1.56 No.9 I-⑨ 2回目校正試験結果

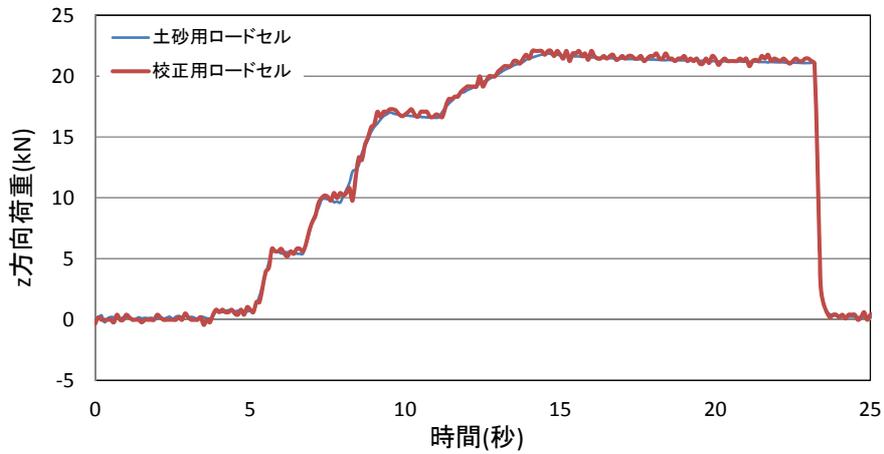


図 5.1.57 No.9 I-⑨ 3回目校正試験結果

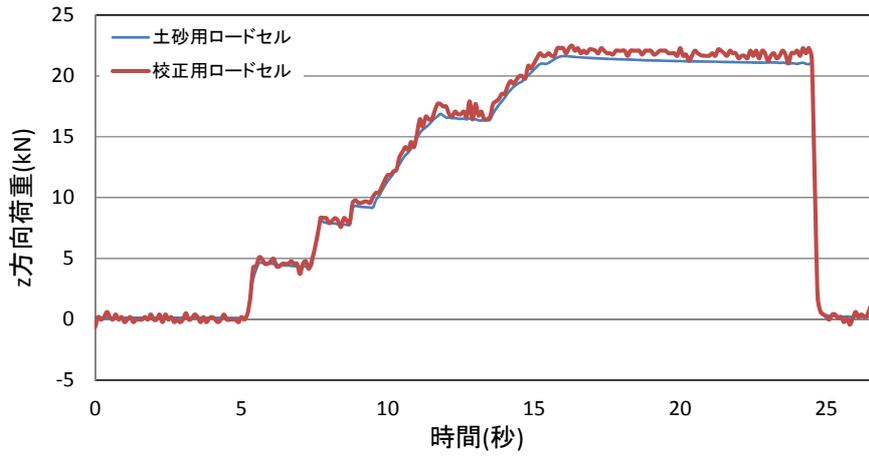


図 5.1.58 No.10 II-① 1回目校正試験結果

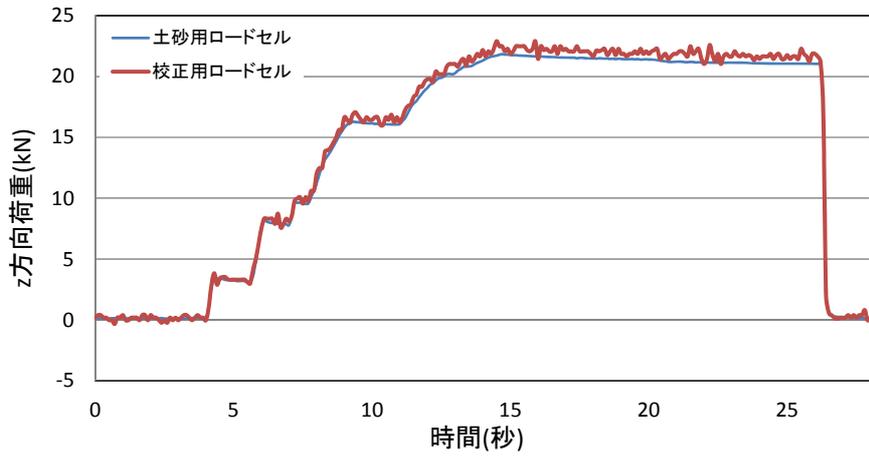


図 5.1.59 No.10 II-① 2回目校正試験結果



図 5.1.60 No.10 II-① 3回目校正試験結果

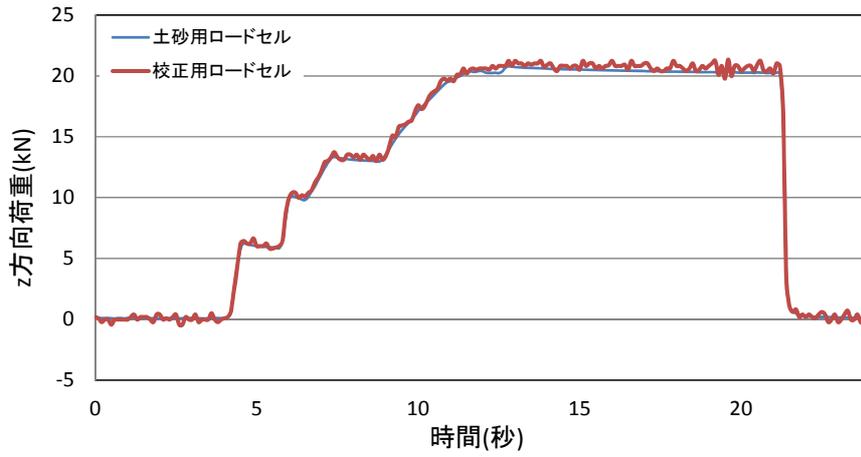


図 5.1.61 No.11 II-② 1回目校正試験結果

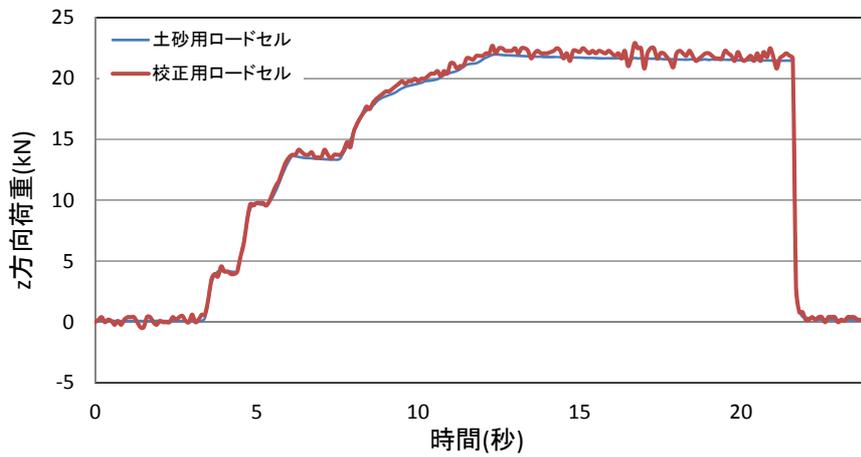


図 5.1.62 No.11 II-② 2回目校正試験結果

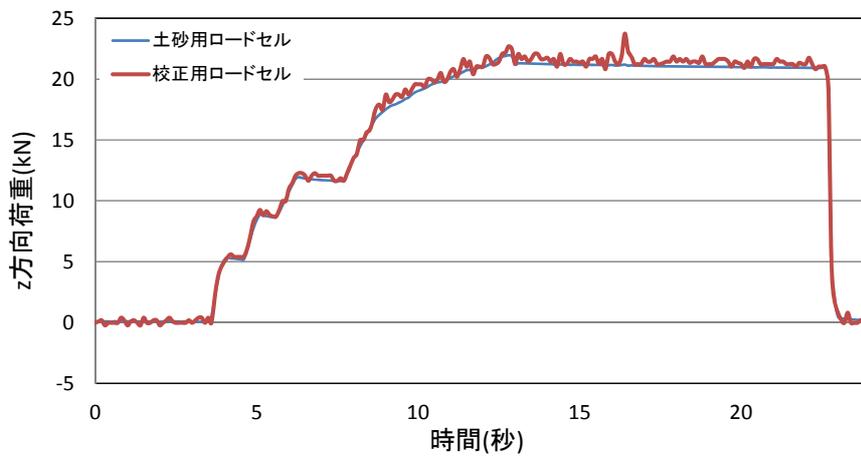


図 5.1.63 No.11 II-② 3回目校正試験結果

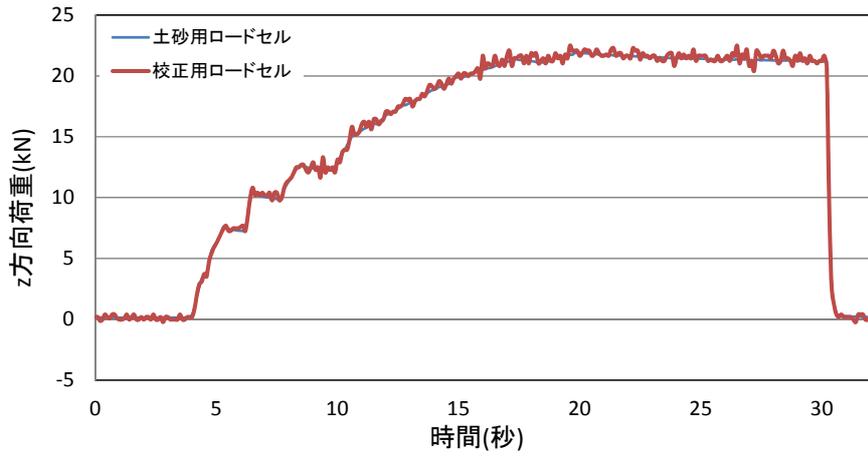


図 5.1.64 No.12 II-③ 1回目校正試験結果

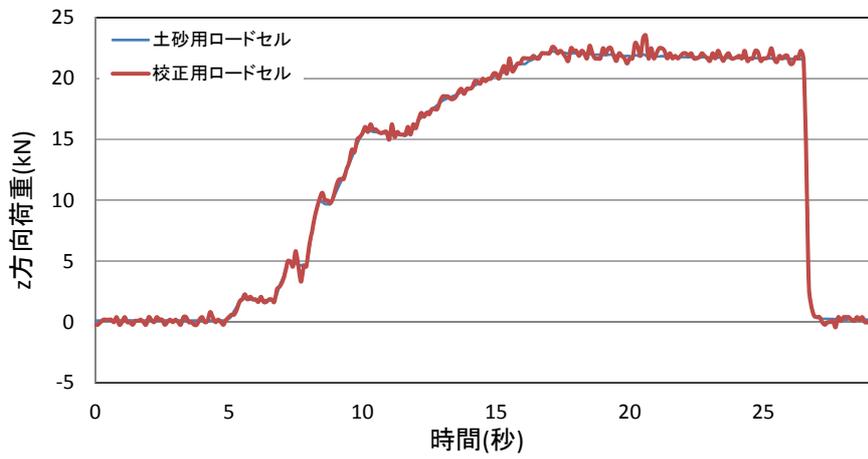


図 5.1.65 No.12 II-③ 2回目校正試験結果

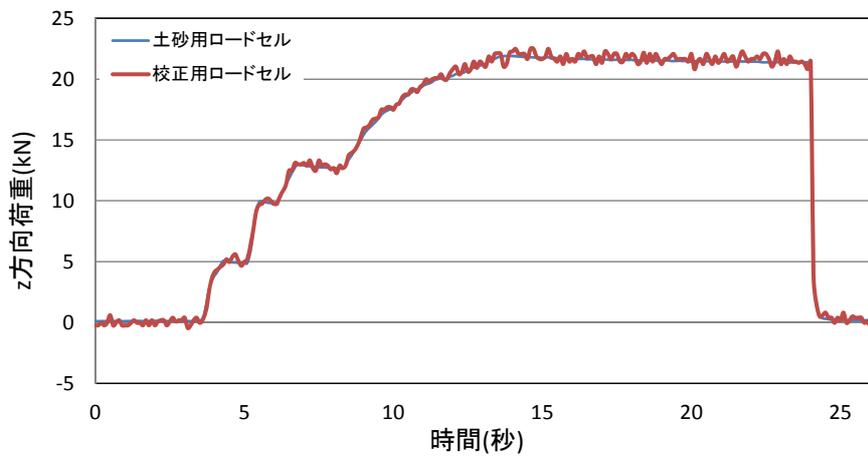


図 5.1.66 No.12 II-③ 3回目校正試験結果

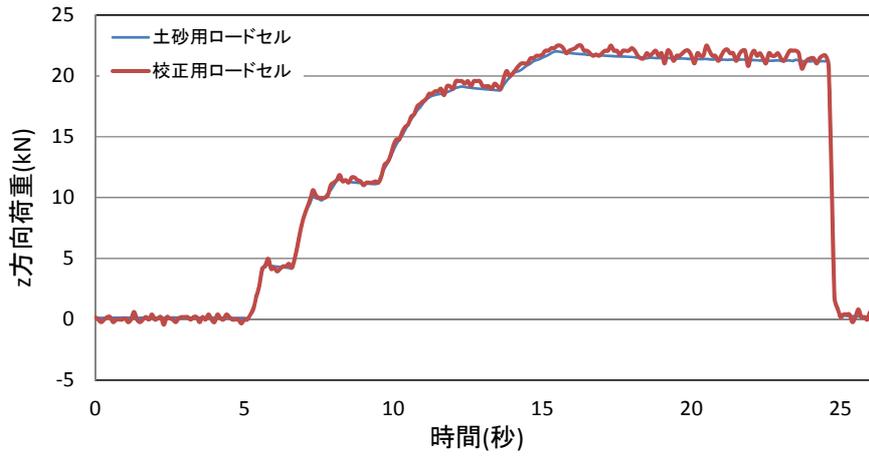


図 5.1.67 No.13 II-④ 1回目校正試験結果

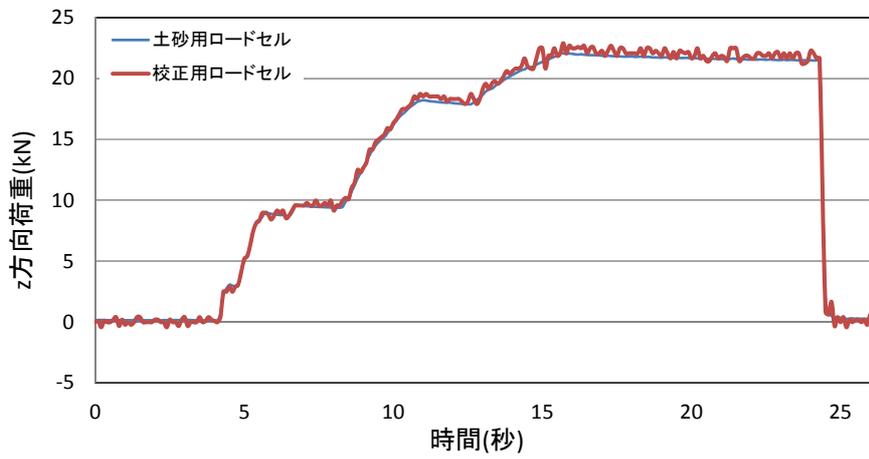


図 5.1.68 No.13 II-④ 2回目校正試験結果

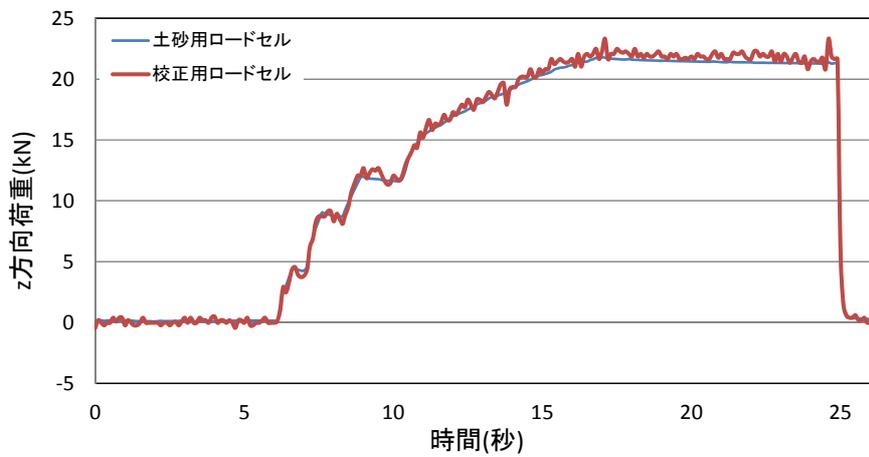


図 5.1.69 No.13 II-④ 3回目校正試験結果

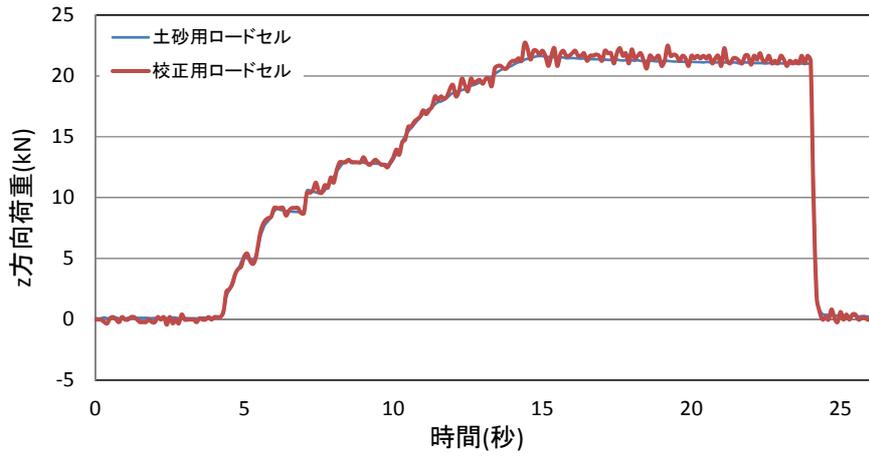


図 5.1.70 No.14 II-⑤ 1回目校正試験結果

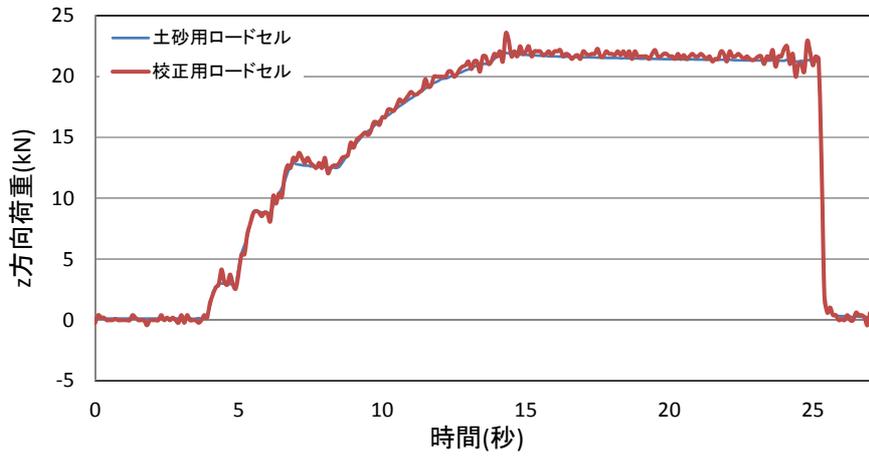


図 5.1.71 No.14 II-⑤ 2回目校正試験結果

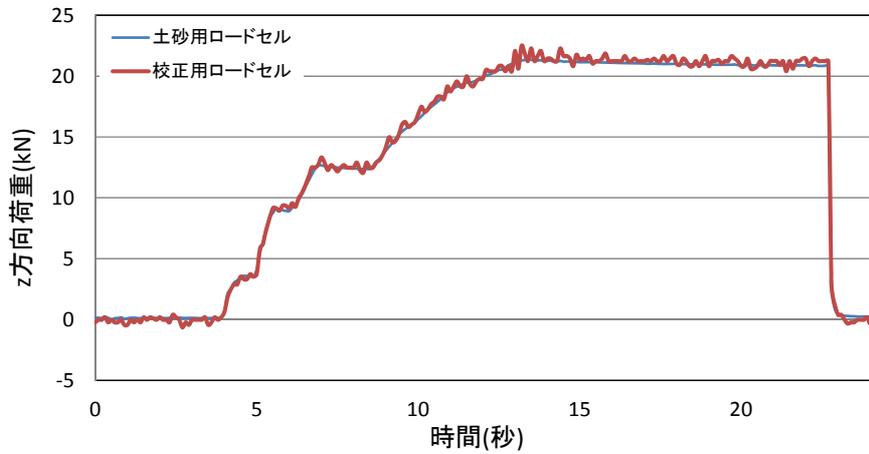


図 5.1.72 No.14 II-⑤ 3回目校正試験結果

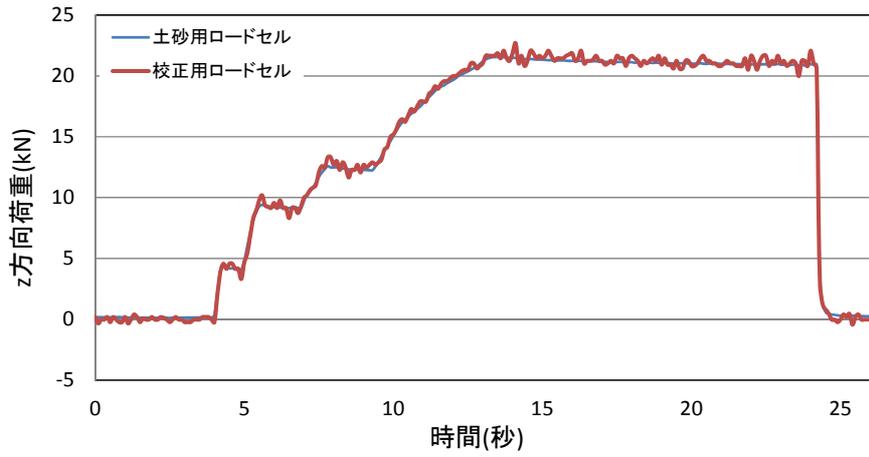


図 5.1.73 No.15 II-⑥ 1回目校正試験結果

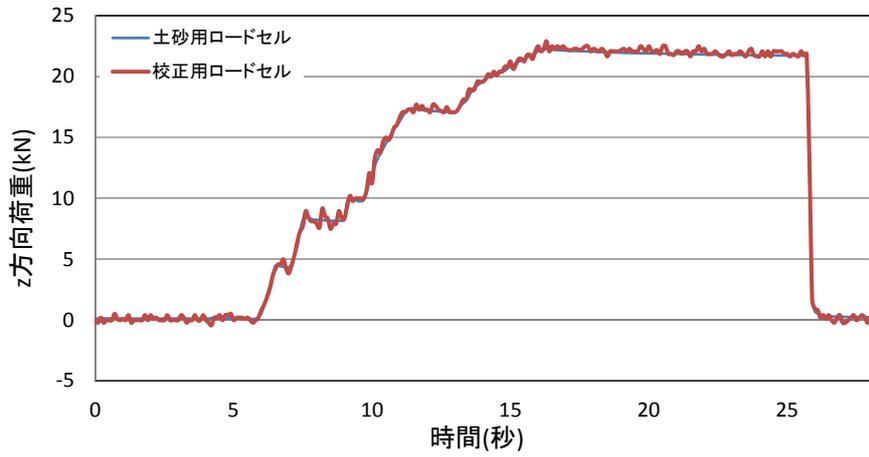


図 5.1.74 No.15 II-⑥ 2回目校正試験結果

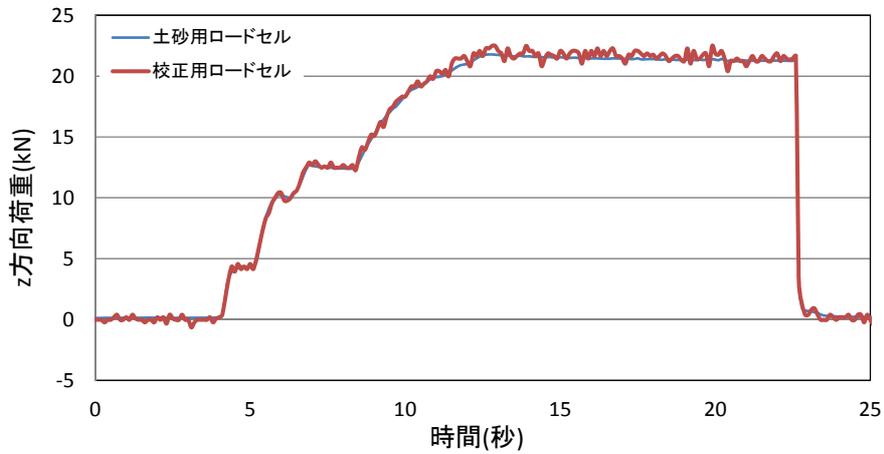


図 5.1.75 No.15 II-⑥ 3回目校正試験結果

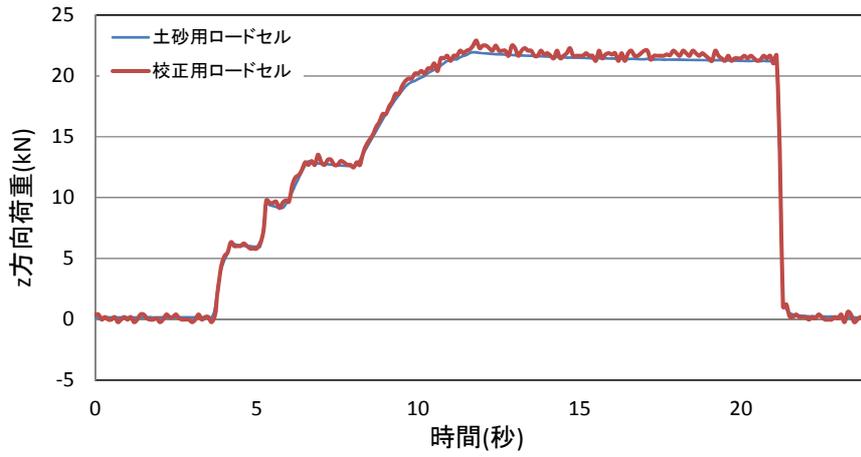


図 5.1.76 No.16 II-⑦ 1回目校正試験結果

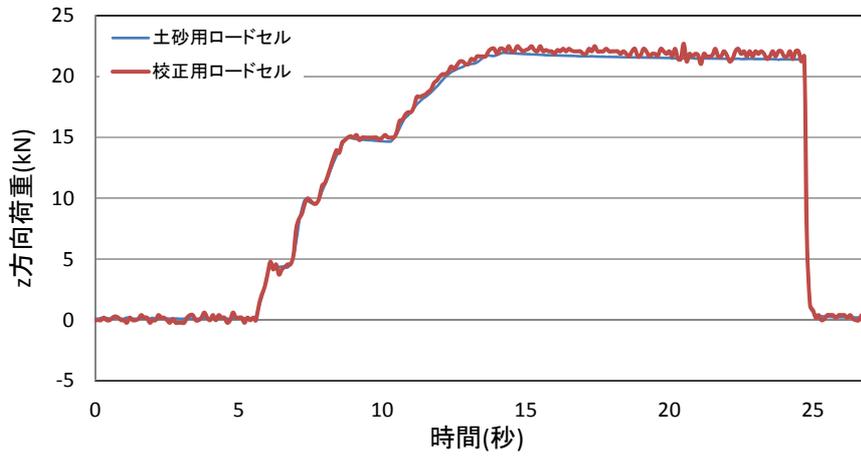


図 5.1.77 No.16 II-⑦ 2回目校正試験結果

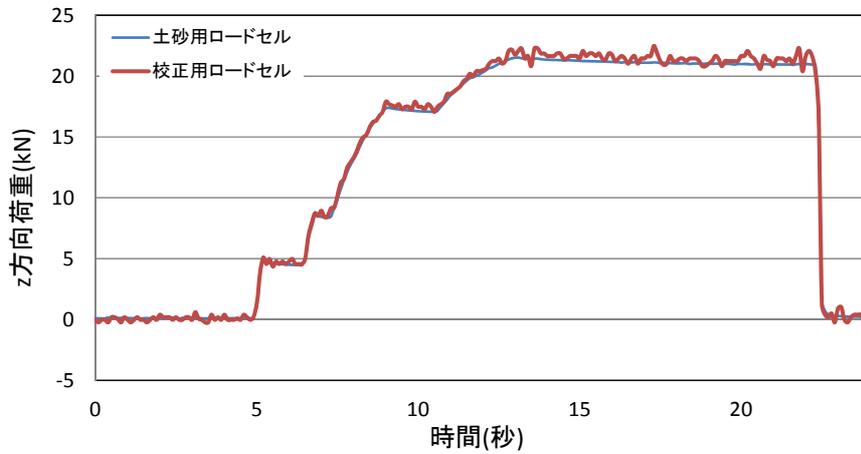


図 5.1.78 No.16 II-⑦ 3回目校正試験結果

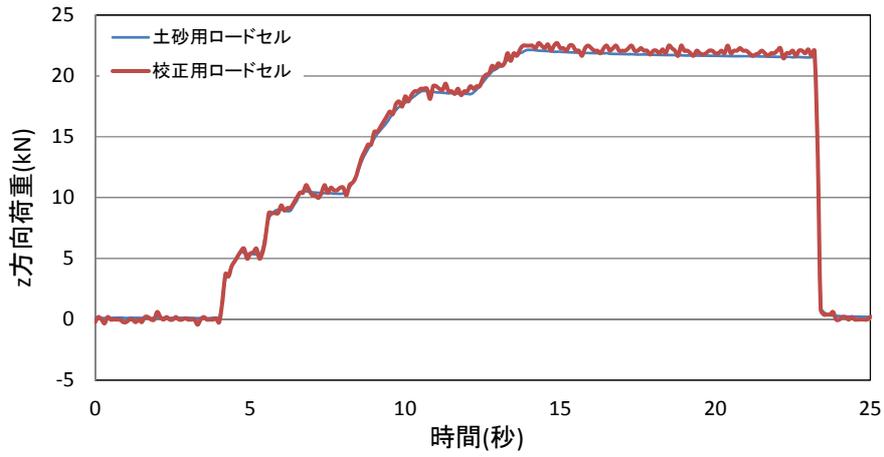


図 5.1.79 No.17 II-⑧ 1回目校正試験結果

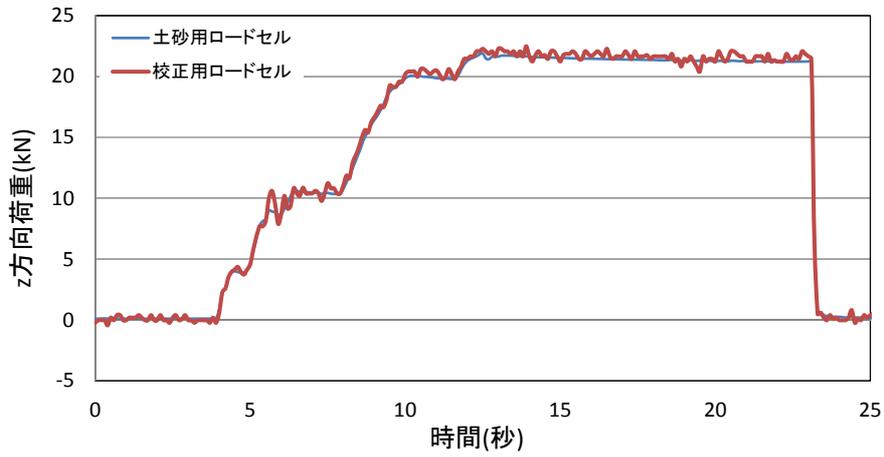


図 5.1.80 No.17 II-⑧ 2回目校正試験結果

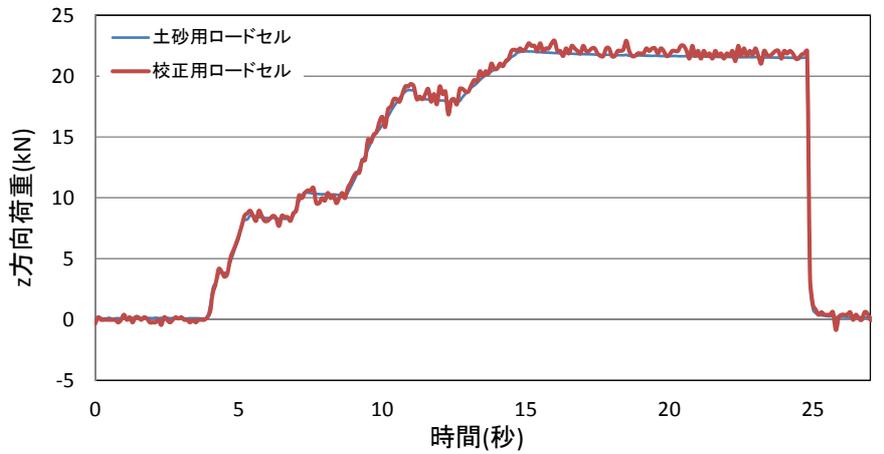


図 5.1.81 No.17 II-⑧ 3回目校正試験結果

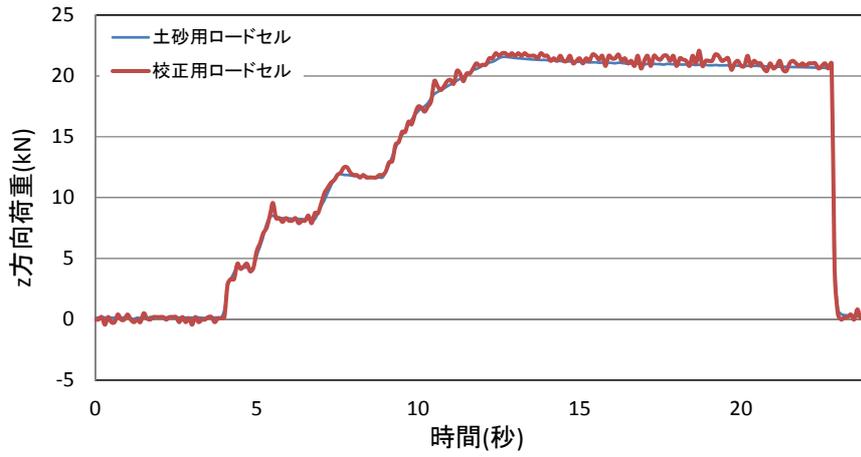


図 5.1.82 No.18 II-⑨ 1回目校正試験結果

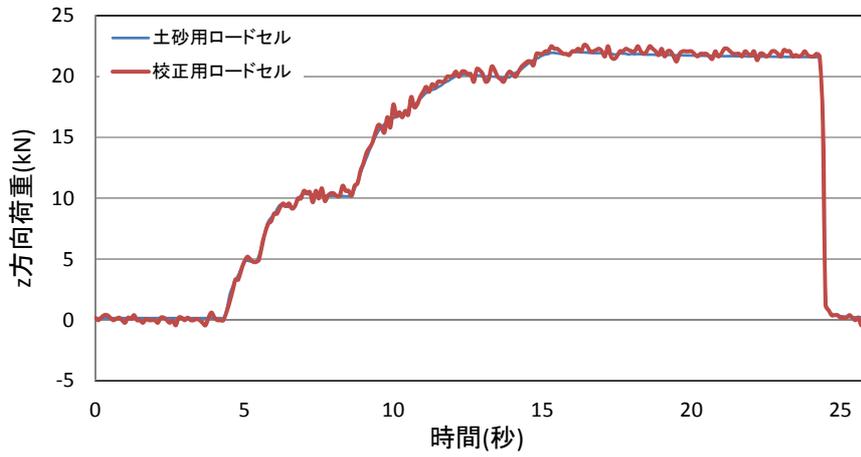


図 5.1.83 No.18 II-⑨ 2回目校正試験結果

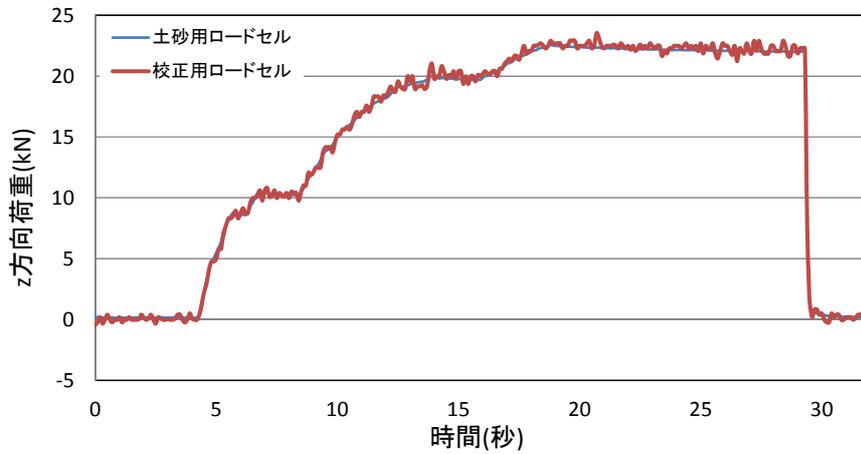


図 5.1.84 No.18 II-⑨ 3回目校正試験結果

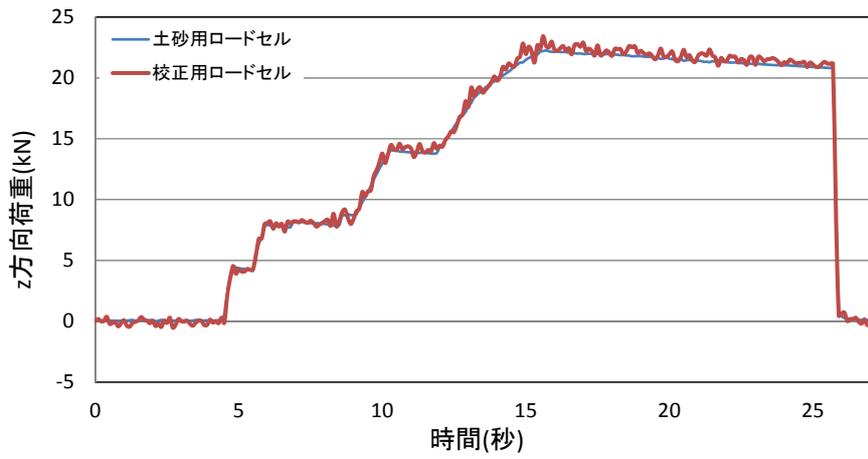


図 5.1.85 No.19 III-① 1回目校正試験結果

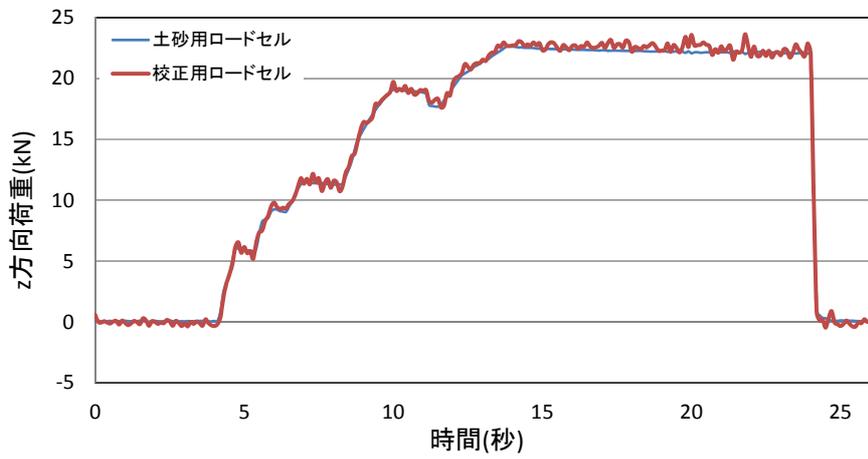


図 5.1.86 No.19 III-① 2回目校正試験結果

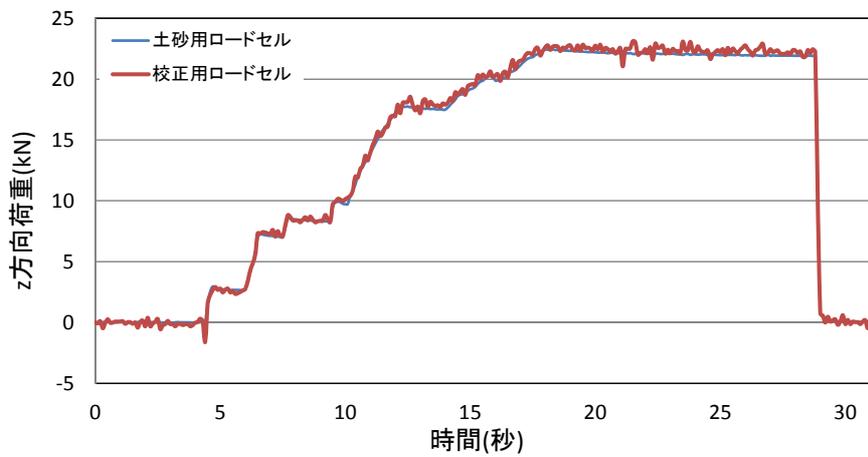


図 5.1.87 No.19 III-① 3回目校正試験結果

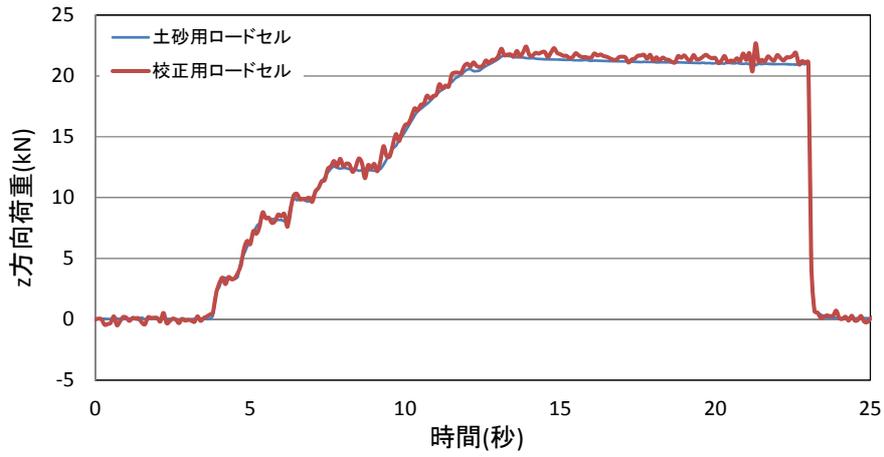


図 5.1.88 No.20 III-② 1回目校正試験結果

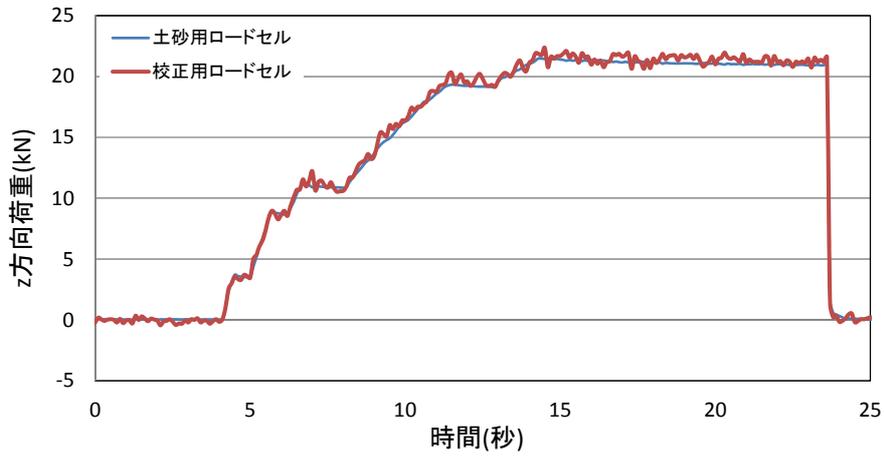


図 5.1.89 No.20 III-② 2回目校正試験結果

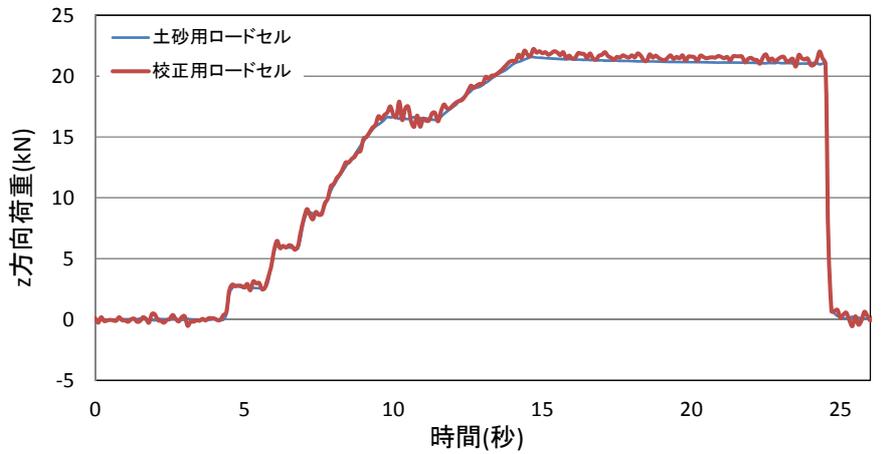


図 5.1.90 No.20 III-② 3回目校正試験結果

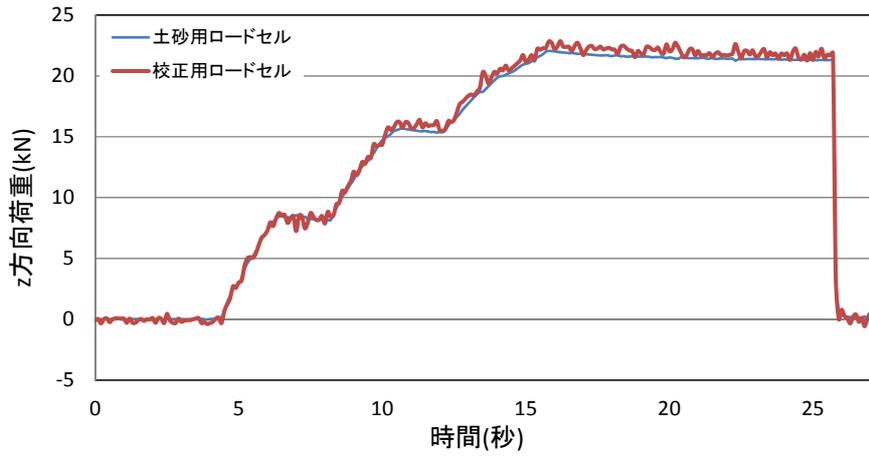


図 5.1.91 No.21 III-③ 1回目校正試験結果

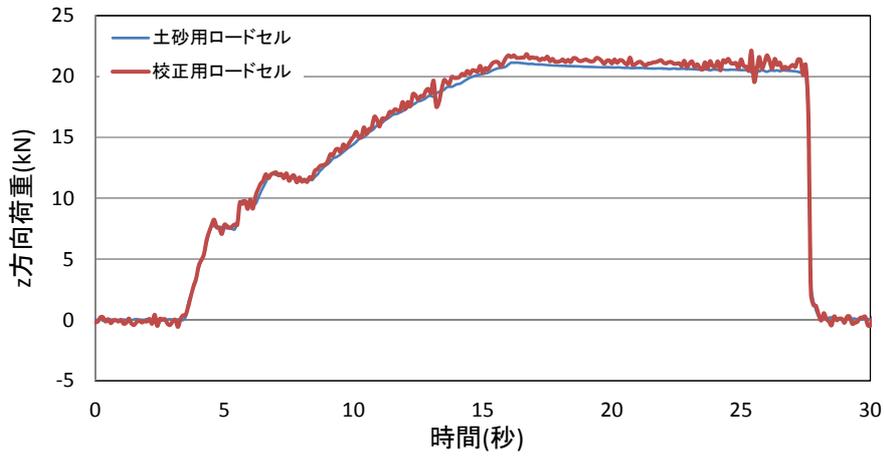


図 5.1.92 No.21 III-③ 2回目校正試験結果

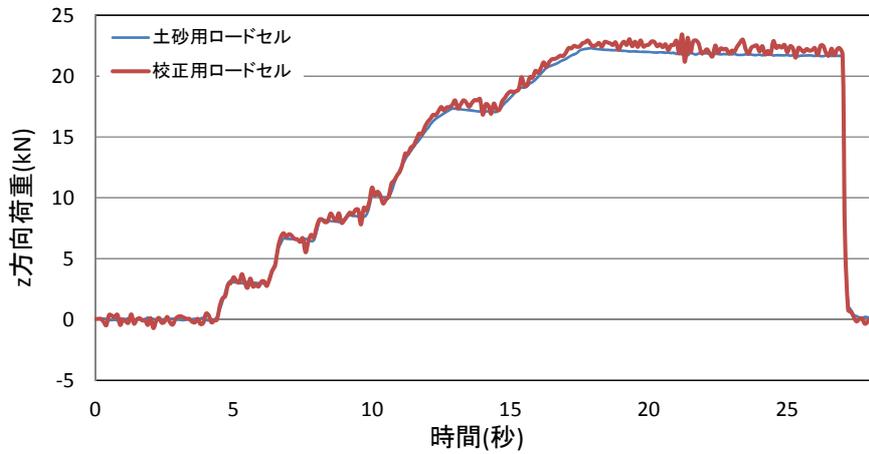


図 5.1.93 No.21 III-③ 3回目校正試験結果

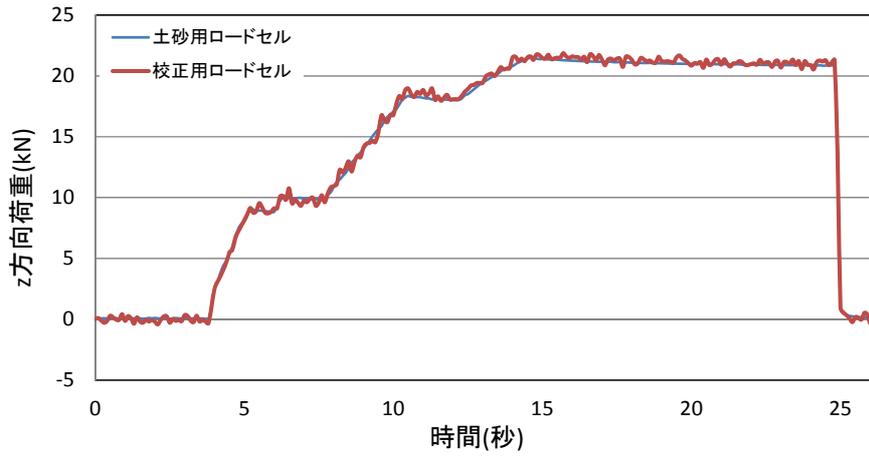


図 5.1.94 No.22 III-④ 1回目校正試験結果

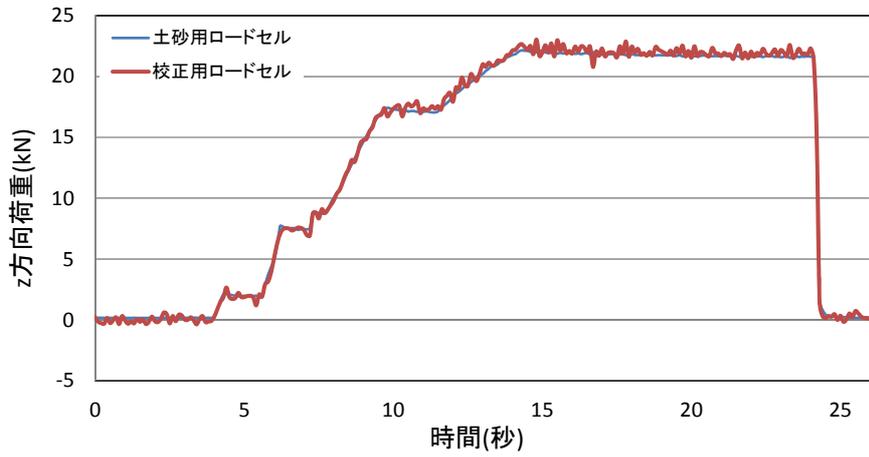


図 5.1.95 No.22 III-④ 2回目校正試験結果

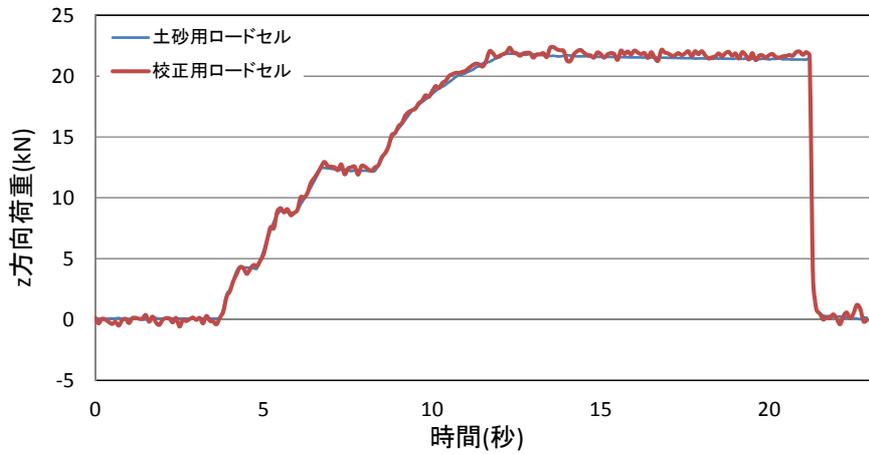


図 5.1.96 No.22 III-④ 3回目校正試験結果

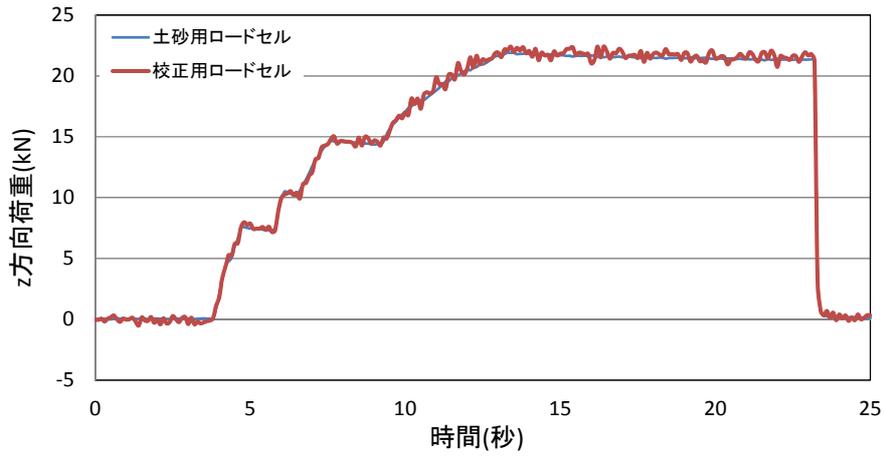


図 5.1.97 No.23 III-⑤ 1回目校正試験結果

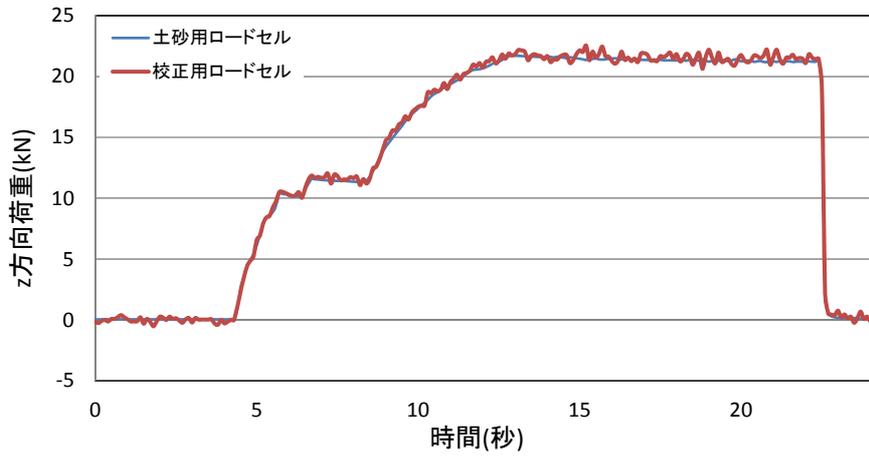


図 5.1.98 No.23 III-⑤ 2回目校正試験結果

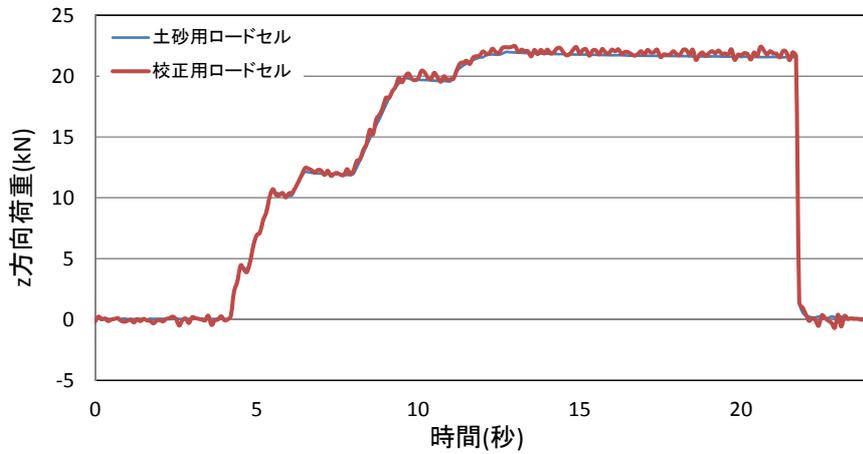


図 5.1.99 No.23 III-⑤ 3回目校正試験結果

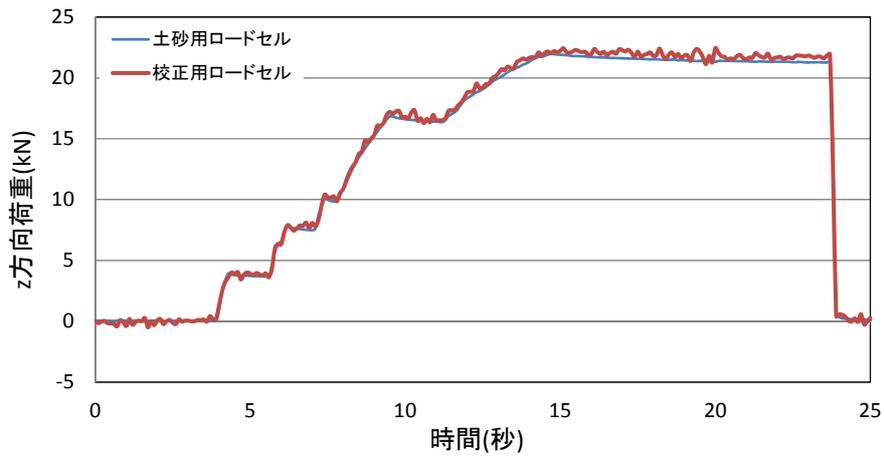


図 5.1.100 No.24 III-⑥ 1回目校正試験結果

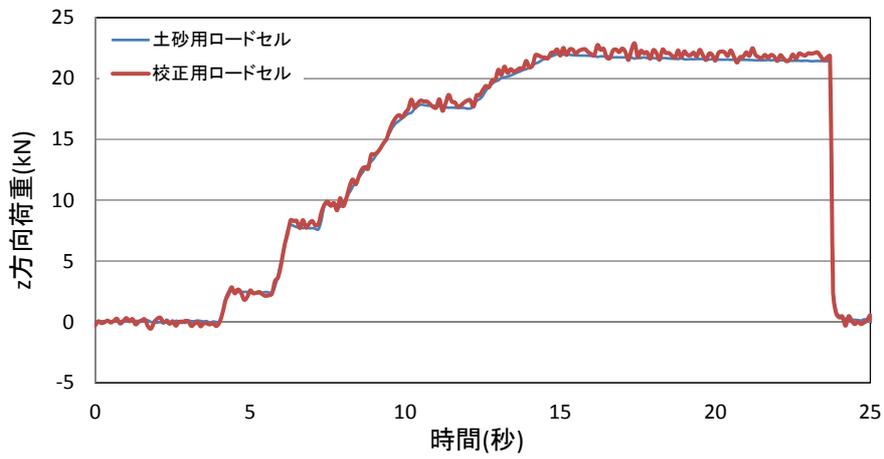


図 5.1.101 No.24 III-⑥ 2回目校正試験結果

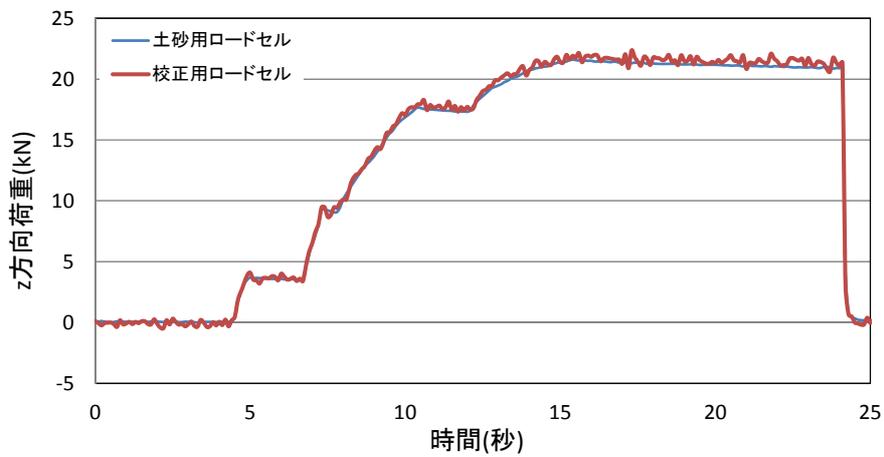


図 5.1.102 No.24 III-⑥ 3回目校正試験結果

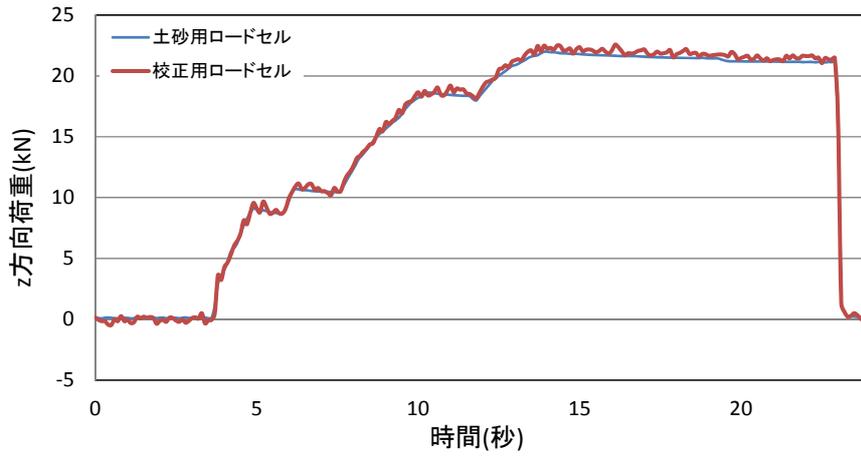


図 5.1.103 No.25 III-⑦ 1回目校正試験結果

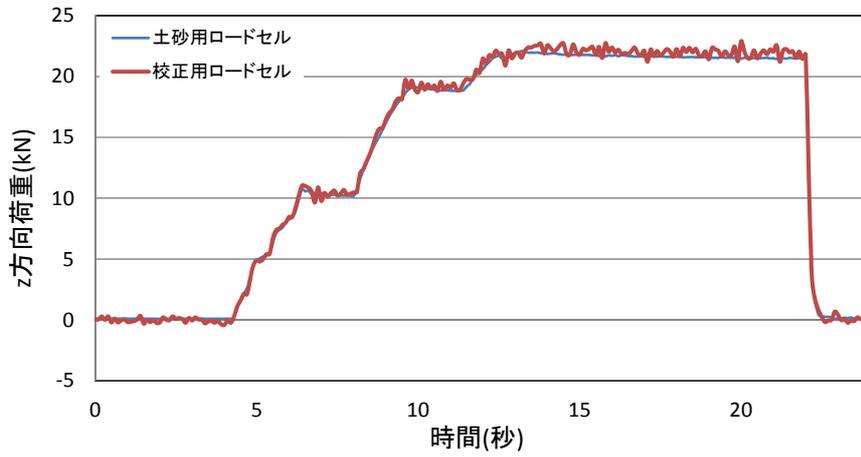


図 5.1.104 No.25 III-⑦ 2回目校正試験結果

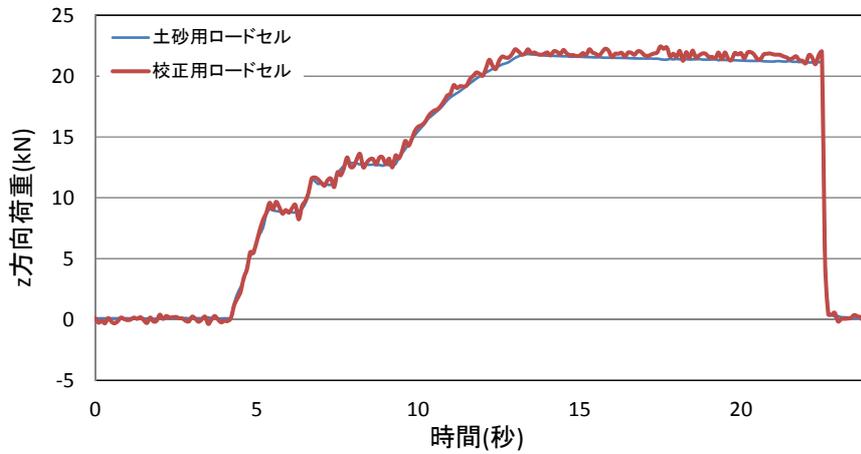


図 5.1.105 No.25 III-⑦ 3回目校正試験結果

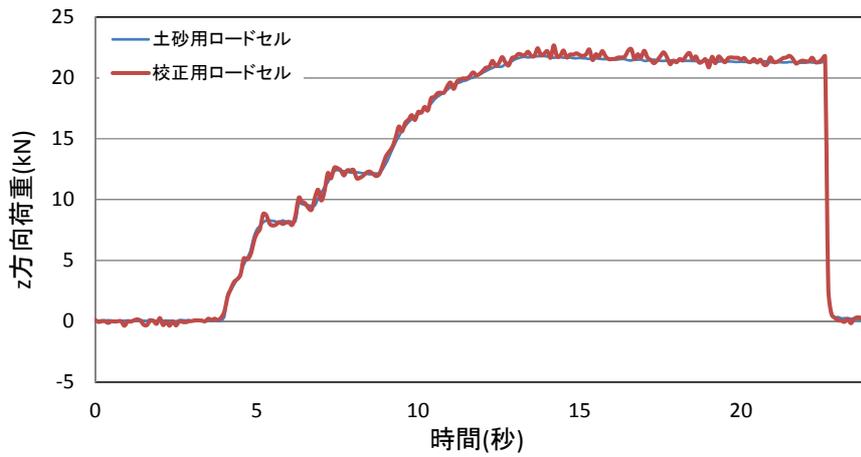


図 5.1.106 No.26 III-⑧ 1回目校正試験結果

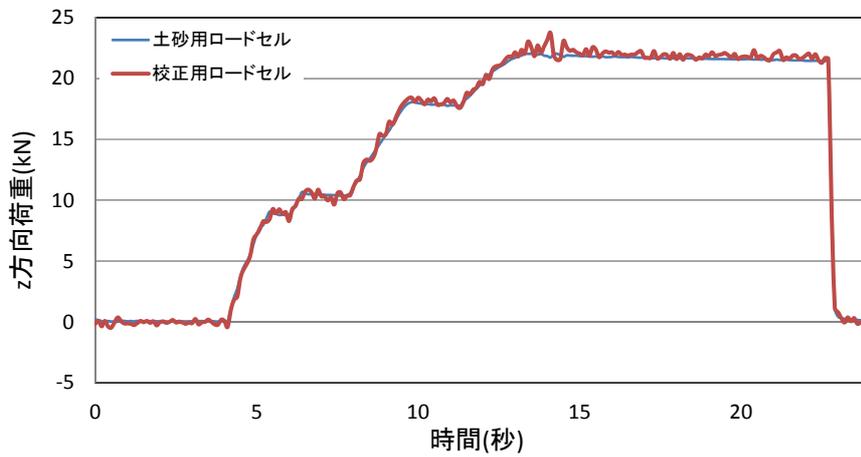


図 5.1.107 No.26 III-⑧ 2回目校正試験結果

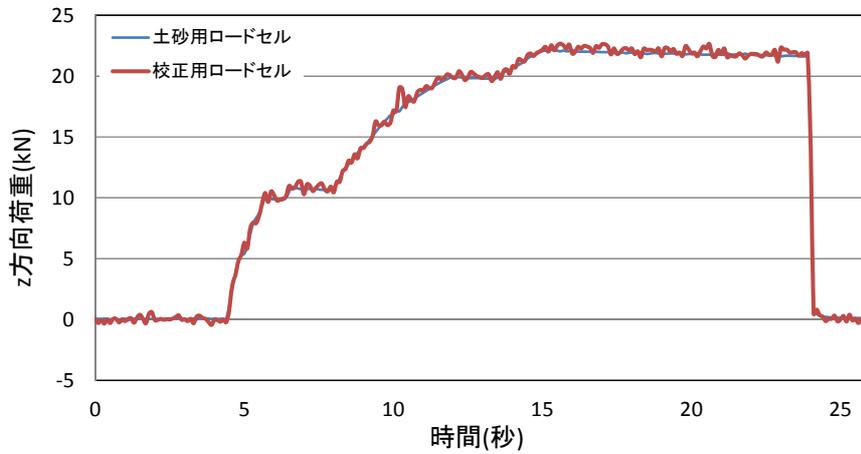


図 5.1.108 No.26 III-⑧ 3回目校正試験結果

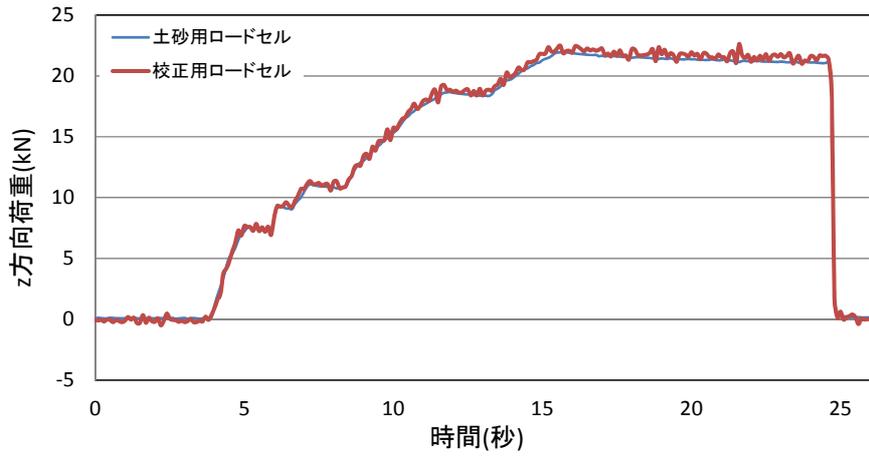


図 5.1.109 No.27 III-⑨ 1回目校正試験結果



N 図 5.1.110 o.27 III-⑨ 2回目校正試験結果

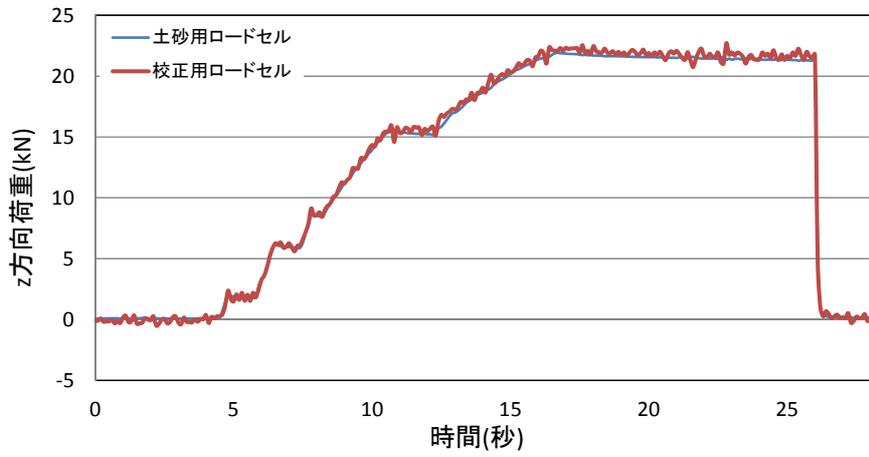


図 5.1.111 No.27 III-⑨ 3回目校正試験結果

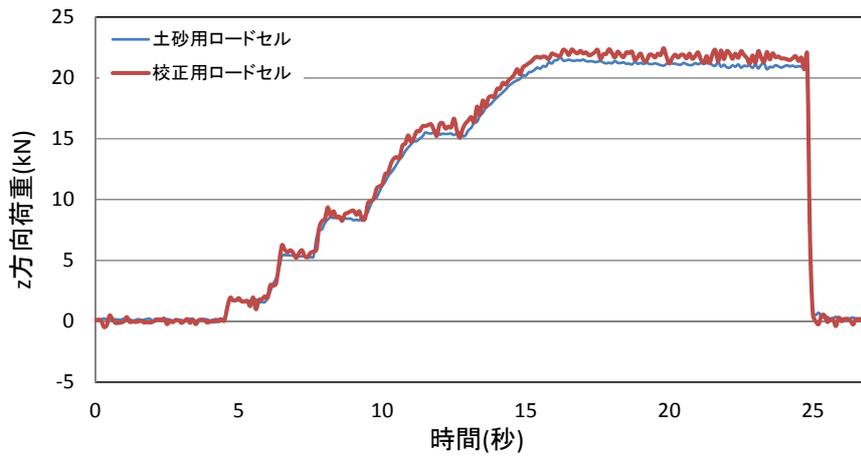


図 5.1.112 No.28 IV-① 1回目校正試験結果

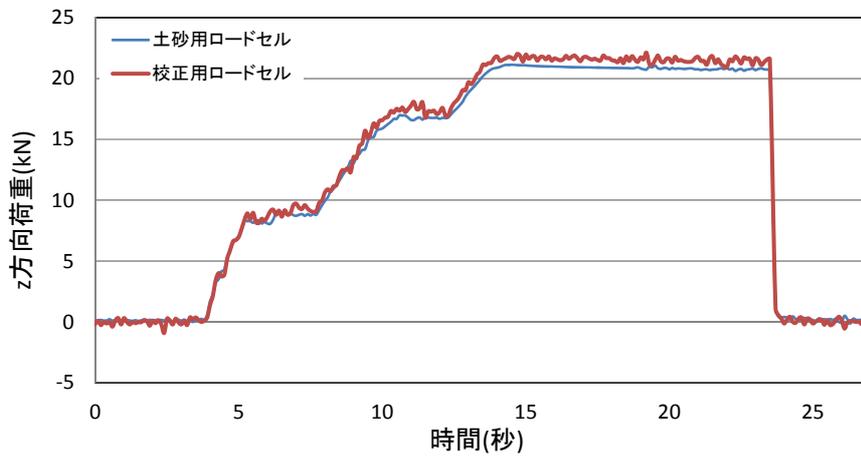


図 5.1.113 No.28 IV-① 2回目校正試験結果

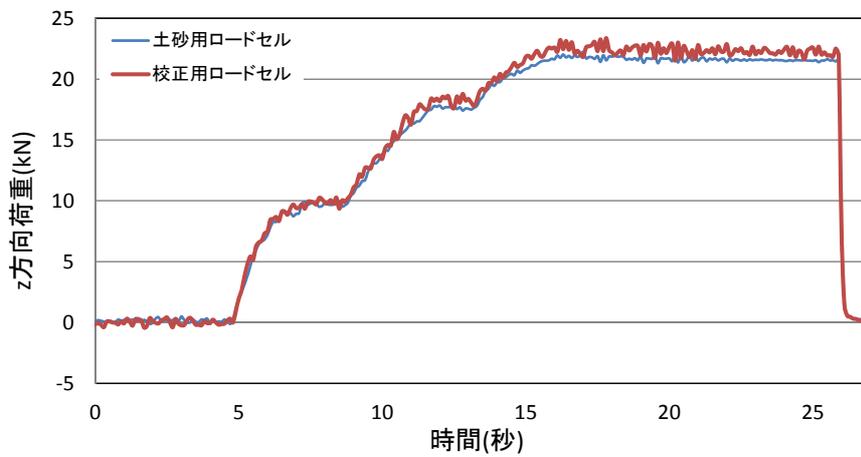


図 5.1.114 No.28 IV-① 3回目校正試験結果

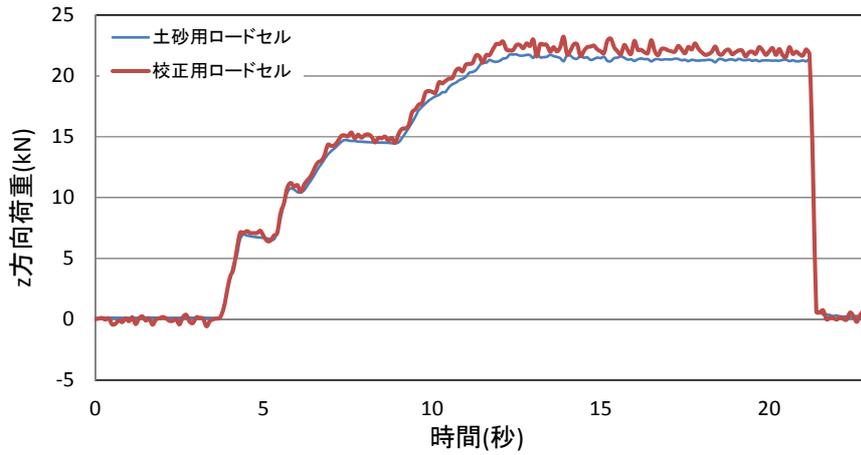


図 5.1.115 No.29 IV-② 1回目校正試験結果

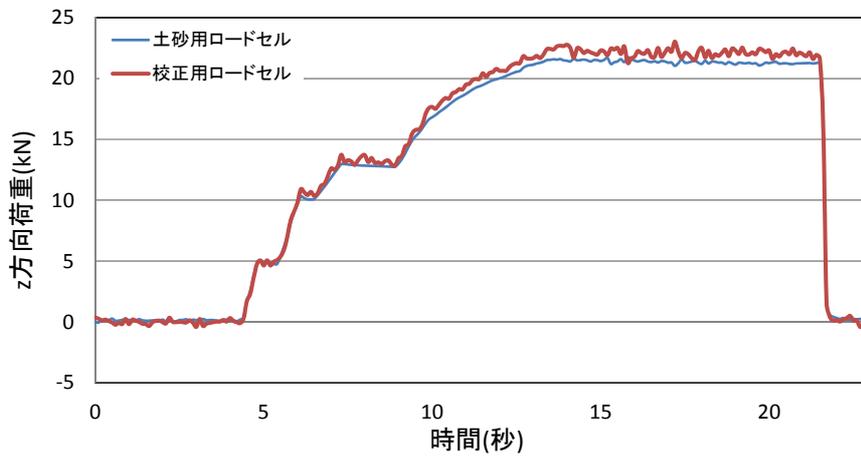


図 5.1.116 No.29 IV-② 2回目校正試験結果

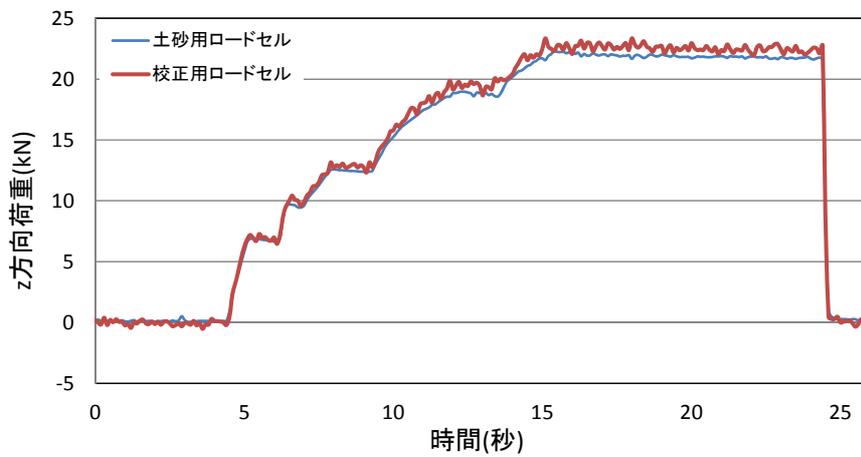


図 5.1.117 No.29 IV-② 3回目校正試験結果

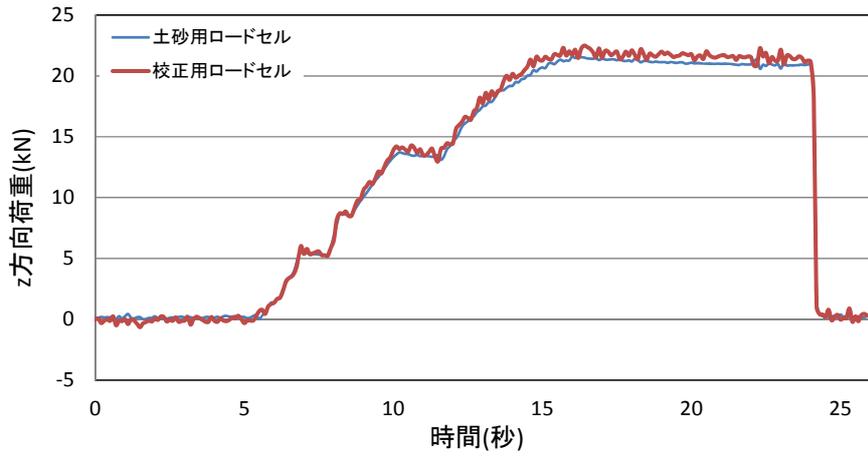


図 5.1.118 No.30 IV-③ 1回目校正試験結果

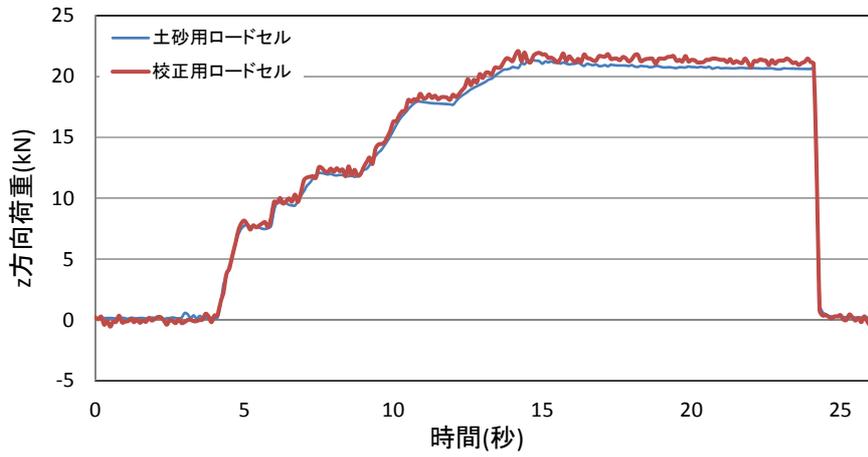


図 5.1.119 No.30 IV-③ 2回目校正試験結果

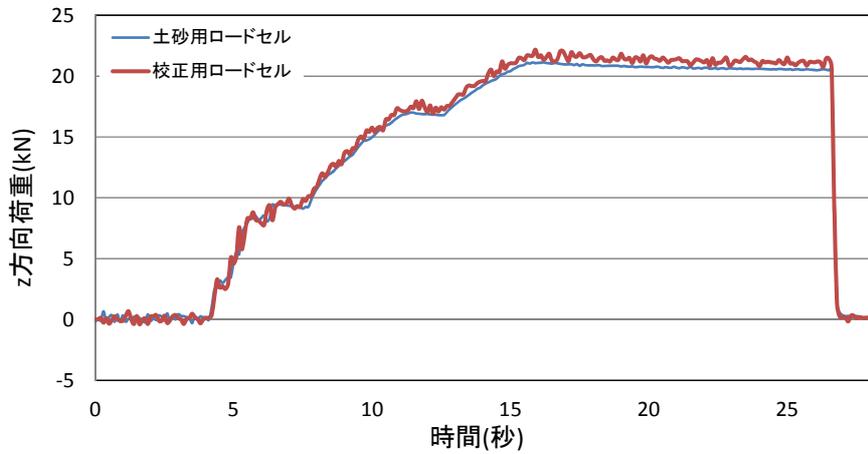


図 5.1.120 No.30 IV-③ 3回目校正試験結果

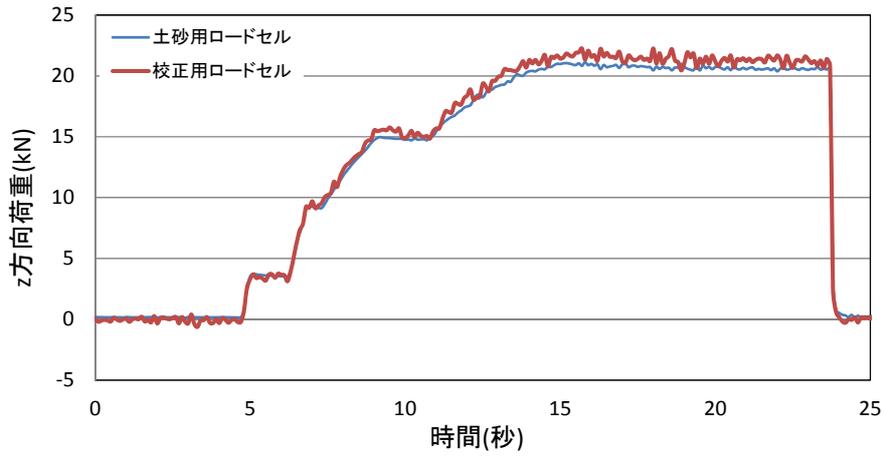


図 5.1.121 No.31 IV-④ 1回目校正試験結果

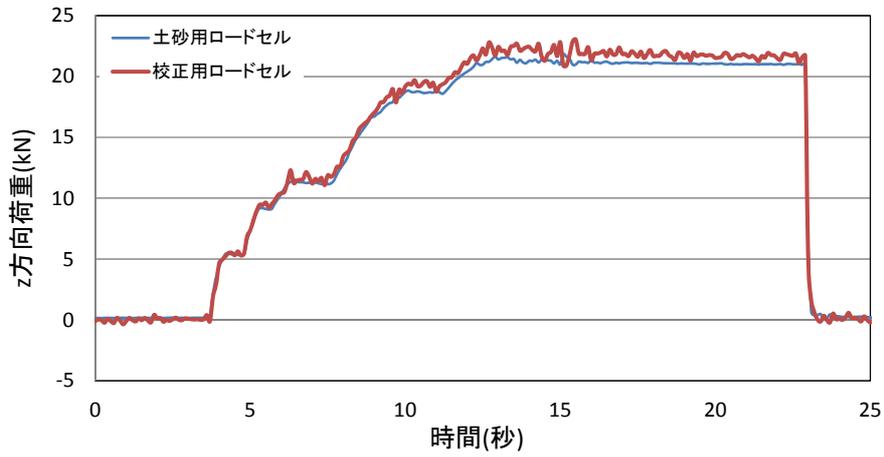


図 5.1.122 No.31 IV-④ 2回目校正試験結果

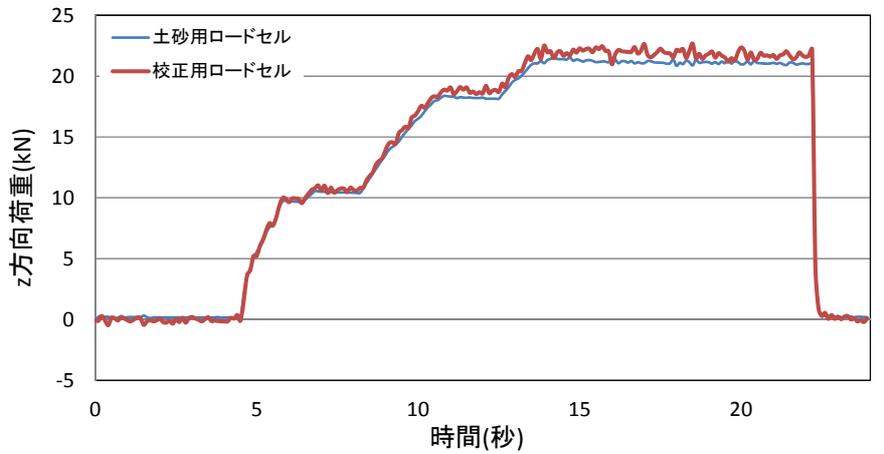


図 5.1.123 No.31 IV-④ 3回目校正試験結果

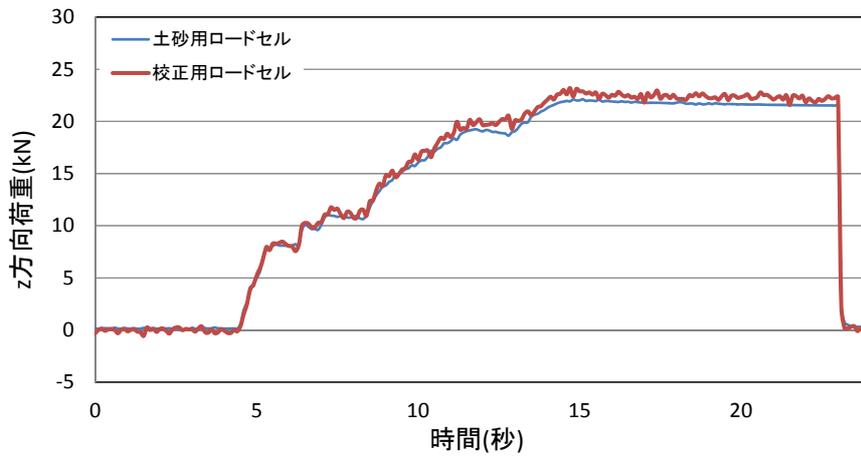


図 5.1.124 No.32 IV-⑤ 1回目校正試験結果

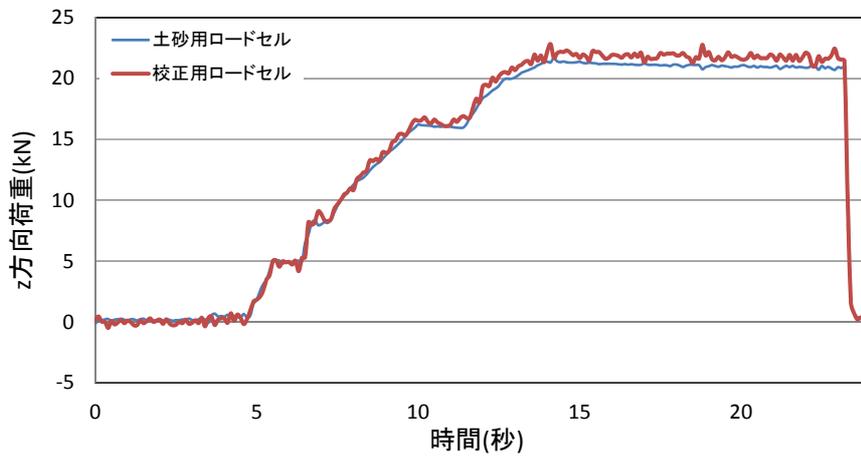


図 5.1.125 No.32 IV-⑤ 2回目校正試験結果

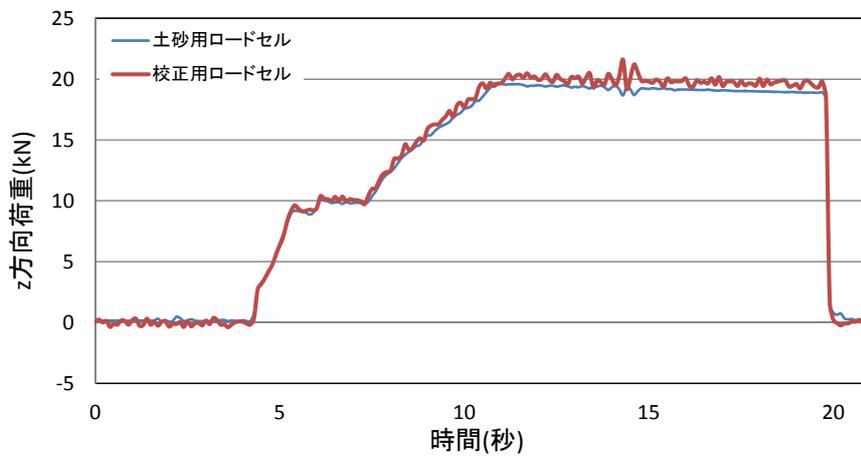


図 5.1.126 No.32 IV-⑤ 3回目校正試験結果

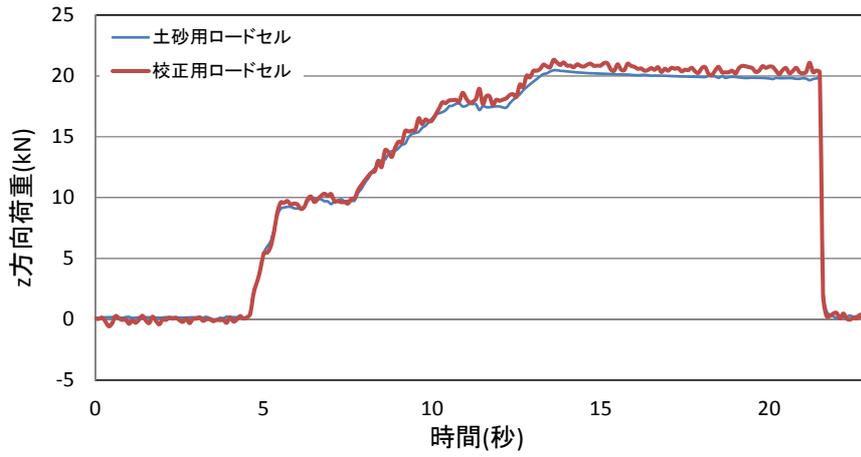


図 5.1.127 No.33 IV-⑥ 1回目校正試験結果

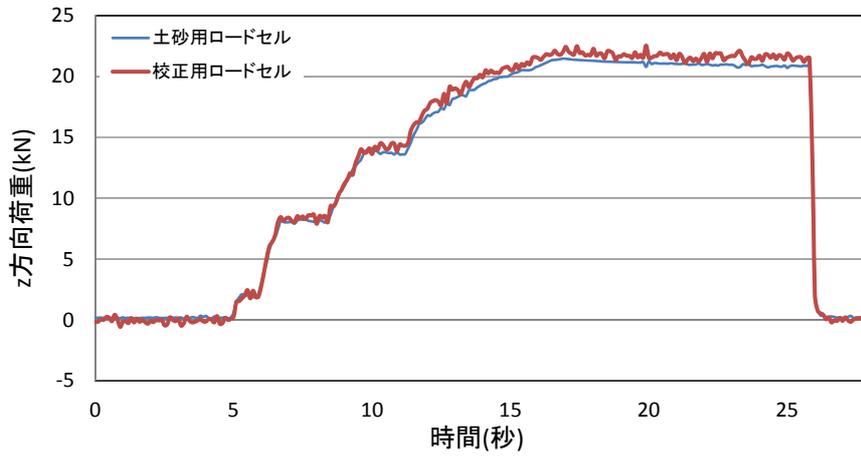


図 5.1.128 No.33 IV-⑥ 2回目校正試験結果

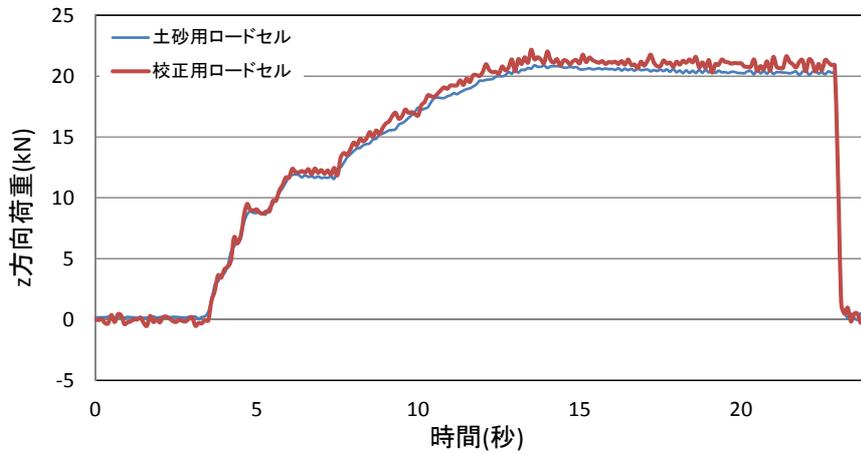


図 5.1.129 No.33 IV-⑥ 3回目校正試験結果

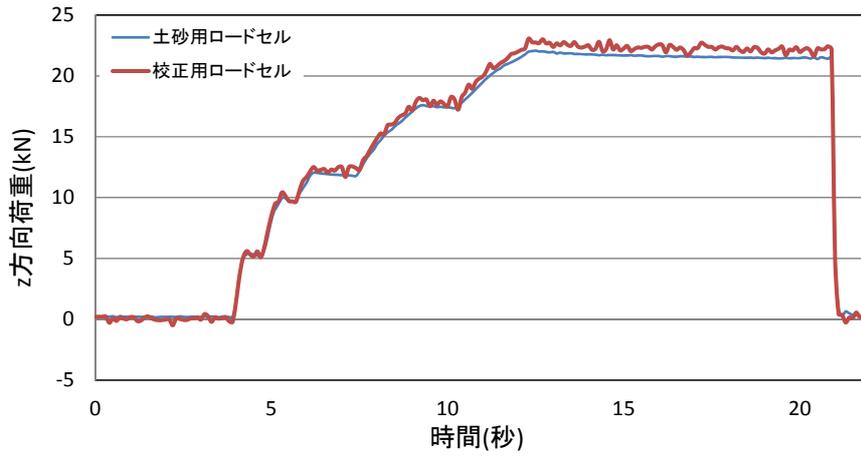


図 5.1.130 No.34 IV-⑦ 1回目校正試験結果

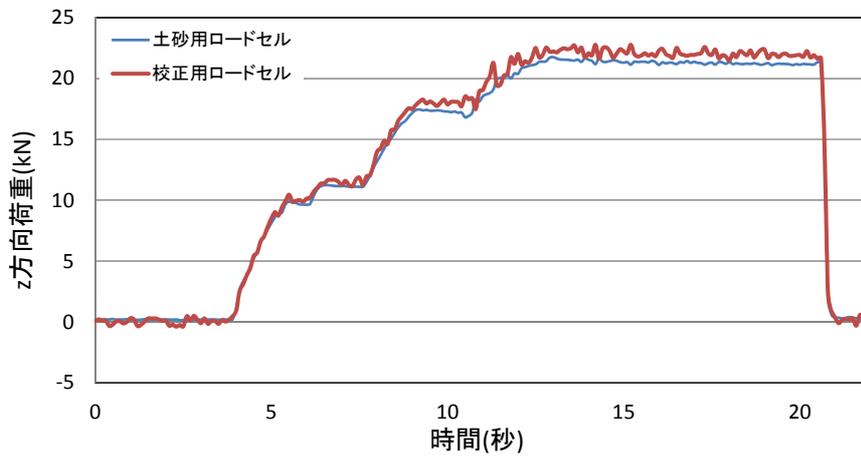


図 5.1.131 No.34 IV-⑦ 2回目校正試験結果

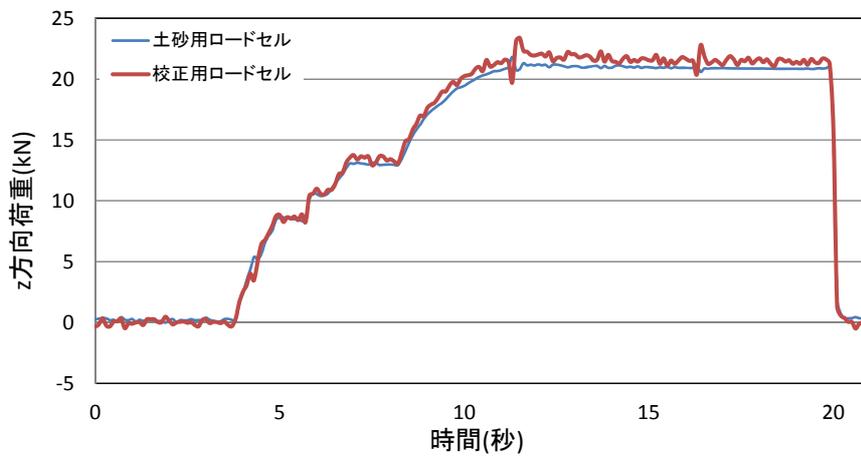


図 5.1.132 No.34 IV-⑦ 3回目校正試験結果

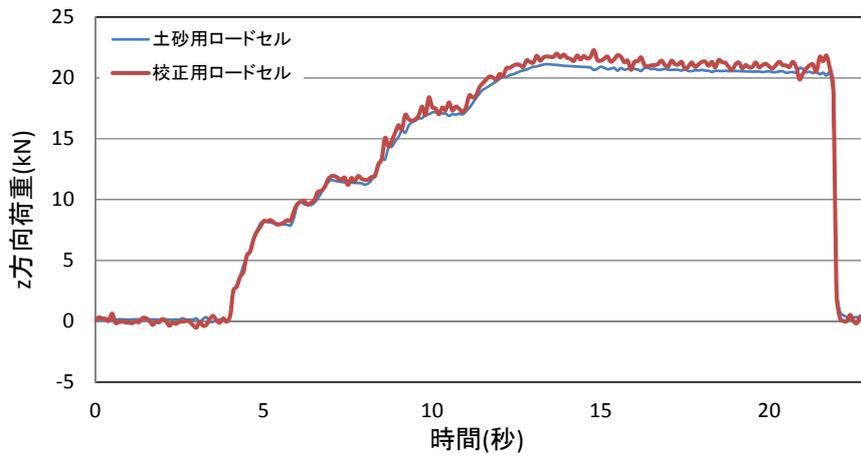


図 5.1.133 No.35 IV-⑧ 1回目校正試験結果

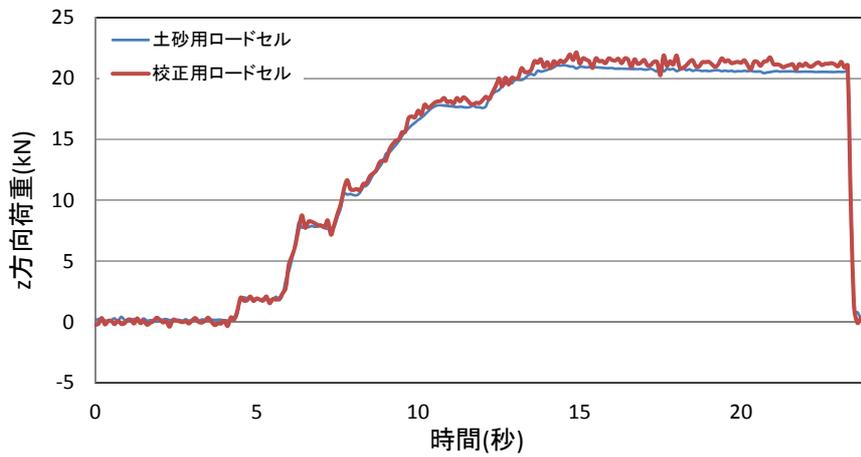


図 5.1.134 No.35 IV-⑧ 2回目校正試験結果

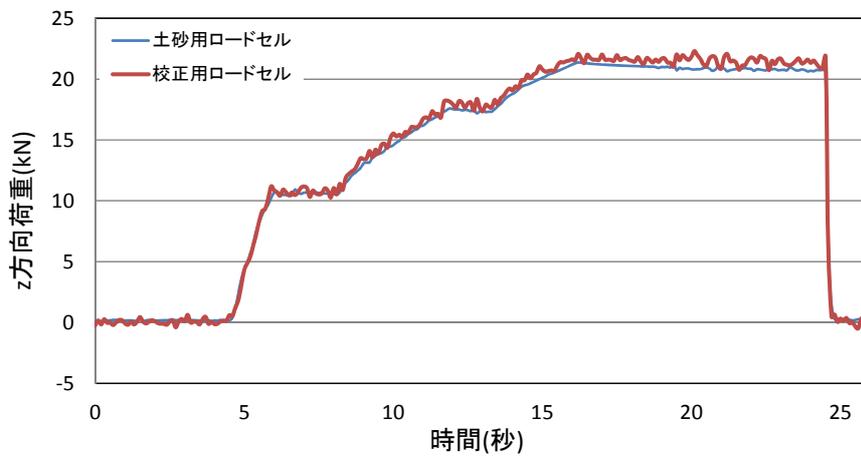


図 5.1.135 No.35 IV-⑧ 3回目校正試験結果

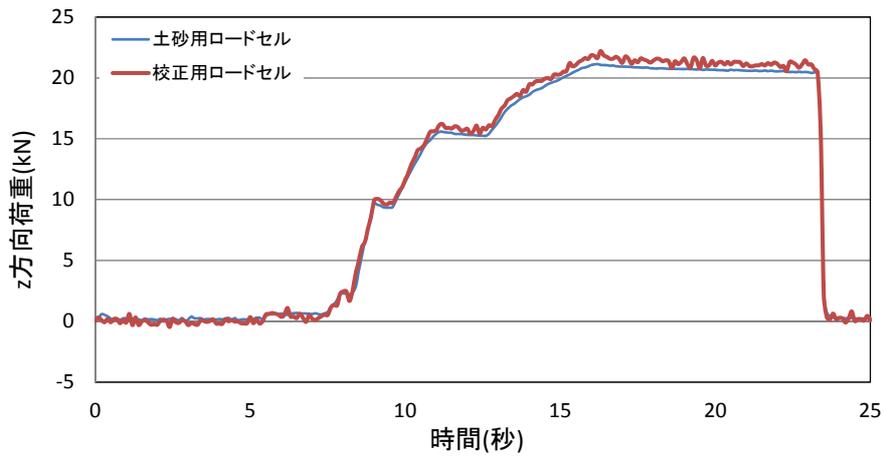


図 5.1.136 No.36 IV-⑨ 1回目校正試験結果

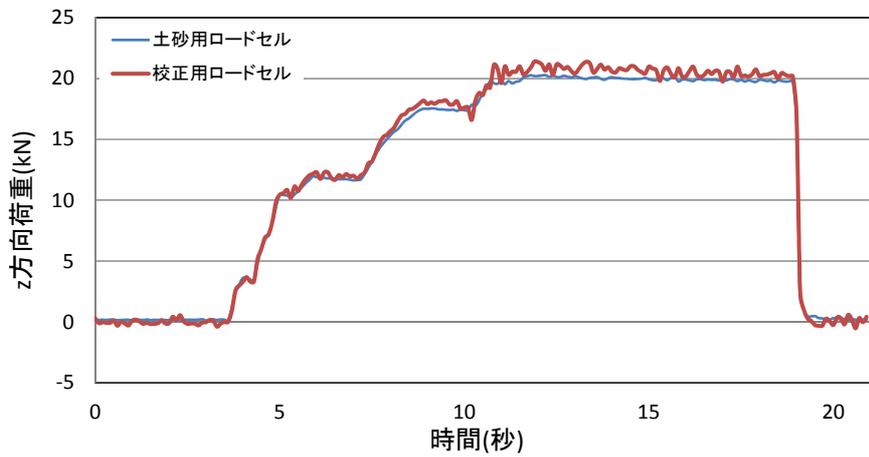


図 5.1.137 No.36 IV-⑨ 2回目校正試験結果

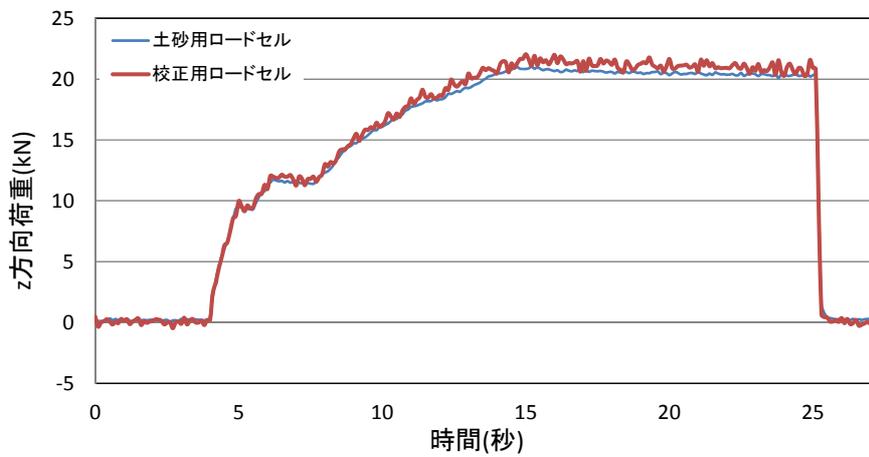


図 5.1.138 No.36 IV-⑨ 3回目校正試験結果

(3) 荷重計校正試験のまとめ

以上示した荷重計校正試験結果より、以下のことが言える。

- 1) 岩塊用荷重計の校正試験結果より、衝突方向において校正用荷重計の値と良好な一致を示した。ただし、載荷位置に拘らず、衝突方向以外の方向においても 2.0～5.0 kN 程度の荷重が生じる。特に、上下方向 (y 方向) においてその荷重は大きい。これは、衝突方向に作用した荷重の 5% 程度である。
- 2) 岩塊用荷重計においては、定期的なノイズが生じる。これは 2.0 kN 程度の大きさがある。この原因としては、荷重が小さい領域ではノイズが生じやすいことに加え、外部電源からのノイズが影響したものと考えられる。
- 3) 土砂用荷重計の校正試験結果より、衝突方向において、校正用荷重計の値と良好な一致を示すことを確認した。
- 4) 以上から、土砂用荷重計については、精度上問題はない。岩塊用荷重計については、荷重が小さい場合のノイズと、荷重計間の干渉の問題はあるが、干渉の度合いは約 5.0kN 以下の微小なものであり、岩塊用荷重計の精度としては問題が無いものと言える。

5. 1. 4 振り子試験

(1) 概要

写真 5.1.6 に振り子試験の様子を示す。岩塊用荷重計受け面より 50~140cm 程度、球形 20cm、40cm および 50cm 径岩塊に対し引き代を用意し、初期速度ゼロで衝突させることで岩塊用荷重計の校正を行った。その際、後述するレーザー変位計を反力壁後方に、圧電型加速度計を反力壁前方上面に取り付け試験を行った。そして、レーザー変位計から反力壁が衝突時動かないこと、加速度計から衝突時の時間と反力壁の動的挙動を確認した。



写真 5.1.6 振り子試験の様子

図 5.1.139 に振り子試験における荷重方向を示す。載荷方向として荷重計に直角に衝突する場合、荷重計に 60 度斜め方向から衝突する場合を考え試験を行った。

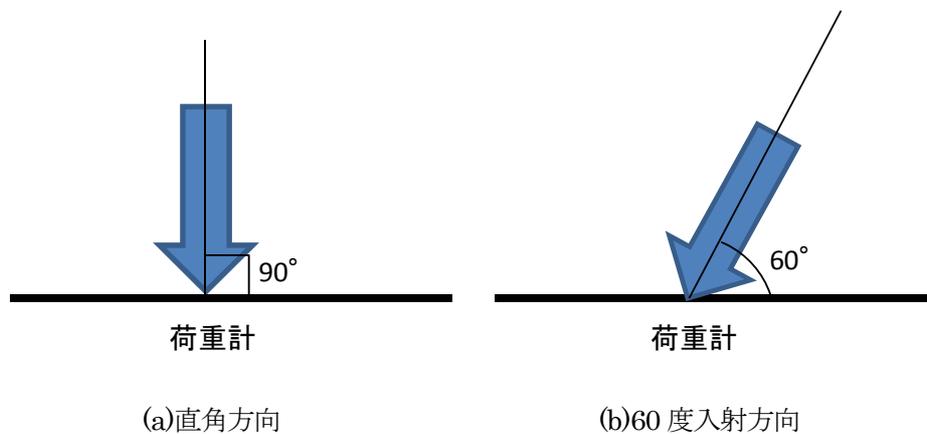


図 5.1.139 荷重計に対する載荷方向

図 5.1.140 に荷重計に対する載荷位置を示す。載荷位置として荷重計中心を載荷位置とする中央載荷、荷重計の端部を載荷する端部載荷を実施した。

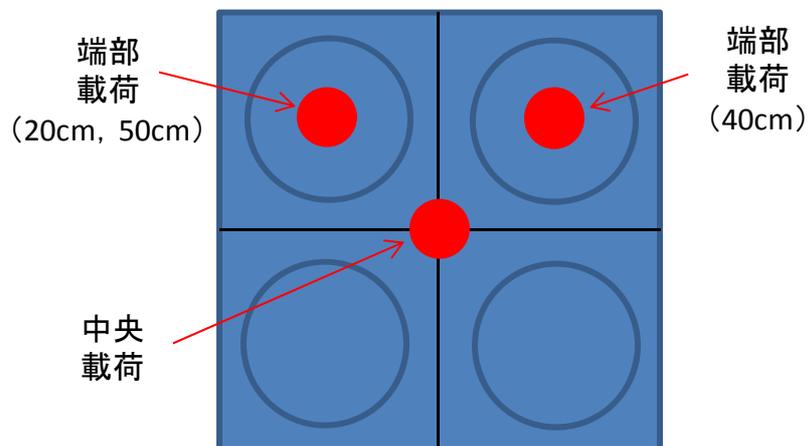


図 5.1.140 荷重計に対する載荷位置

表 5.1.3 に振り子試験における試験 No.と球形サイズ、載荷位置、荷重の入力角および引き代の大きさの関係を示す。

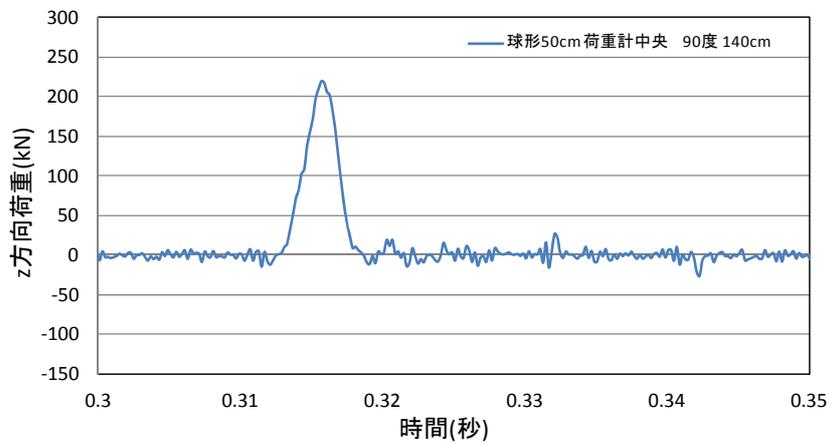
表 5.1.3 試験ケース

試験 No.	形状	サイズ	載荷位置	入力角	引き代(cm)
1	球形	50cm	荷重計中央	90°	140
2	球形	50cm	荷重計中央	90°	100
3	球形	50cm	荷重計中央	90°	50
4	球形	50cm	荷重計中央	90°	70
5	球形	50cm	荷重計中央	60°	50
6	球形	50cm	荷重計中央	60°	70
7	球形	50cm	荷重計中央	60°	100
8	球形	50cm	荷重計端部	90°	50
9	球形	50cm	荷重計端部	90°	70

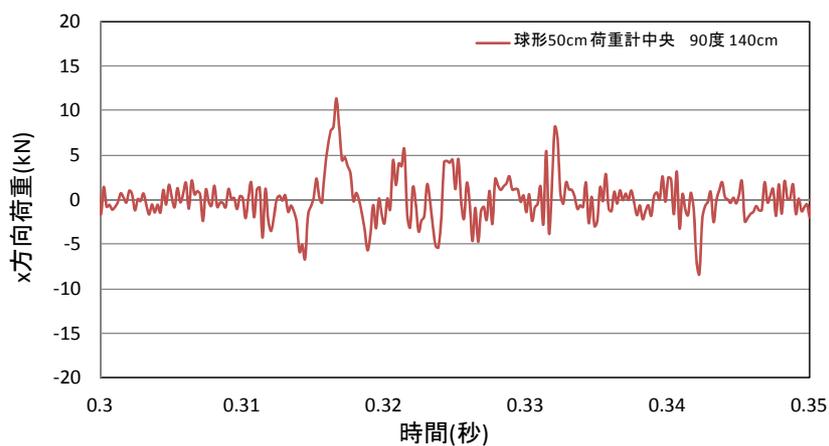
10	球形	50cm	荷重計端部	90°	140
11	球形	50cm	荷重計端部	60°	50
12	球形	50cm	荷重計端部	60°	70
13	球形	50cm	荷重計端部	60°	100
14	球形	20cm	荷重計中央	90°	140
15	球形	20cm	荷重計中央	90°	100
16	球形	20cm	荷重計中央	90°	70
17	球形	20cm	荷重計中央	60°	100
18	球形	20cm	荷重計端部	90°	140
19	球形	20cm	荷重計端部	90°	100
20	球形	20cm	荷重計端部	90°	70
21	球形	40cm	荷重計中央	90°	50
22	球形	40cm	荷重計中央	90°	70
23	球形	40cm	荷重計中央	90°	140
24	球形	40cm	荷重計中央	60°	50
25	球形	40cm	荷重計中央	60°	70
26	球形	40cm	荷重計中央	60°	90
27	球形	40cm	荷重計端部	90°	50
28	球形	40cm	荷重計端部	90°	70
29	球形	40cm	荷重計端部	90°	140
30	球形	40cm	荷重計端部	60°	50
31	球形	40cm	荷重計端部	60°	70
32	球形	40cm	荷重計端部	60°	100

(2) 試験結果

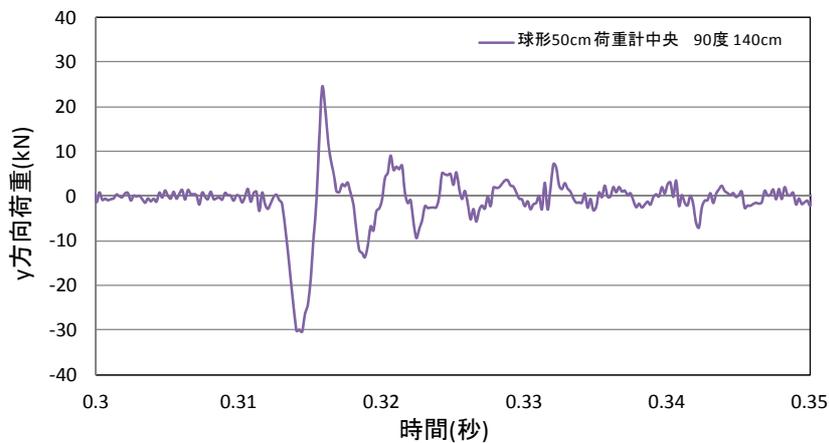
以下に振り子試験の結果を示す。



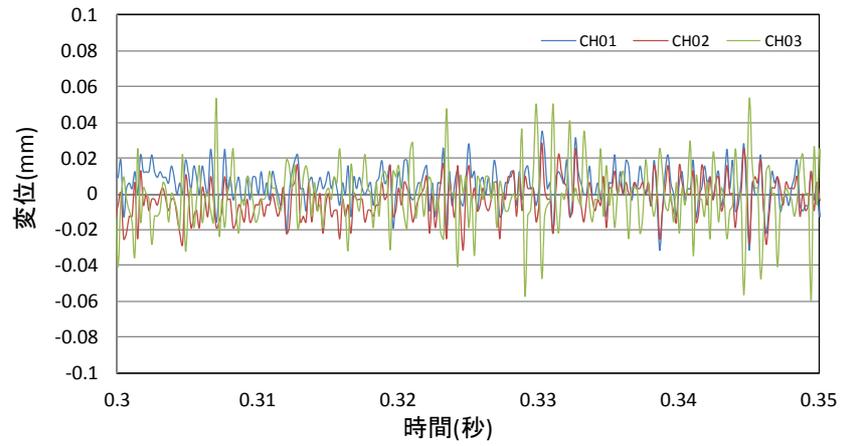
(a)衝突方向



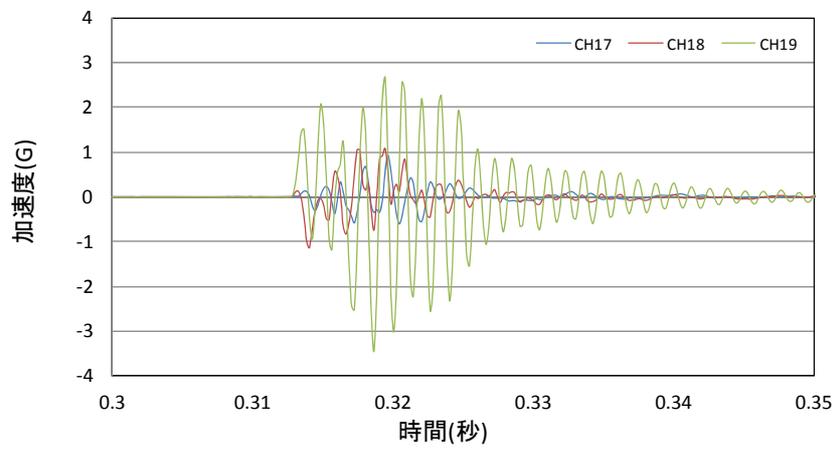
(b)衝突直角方向



(c)上下方向

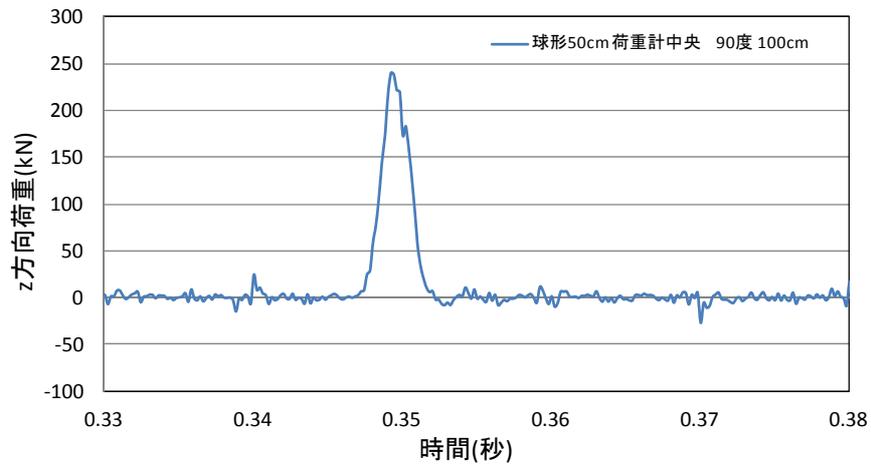


(d) レーザー変位計

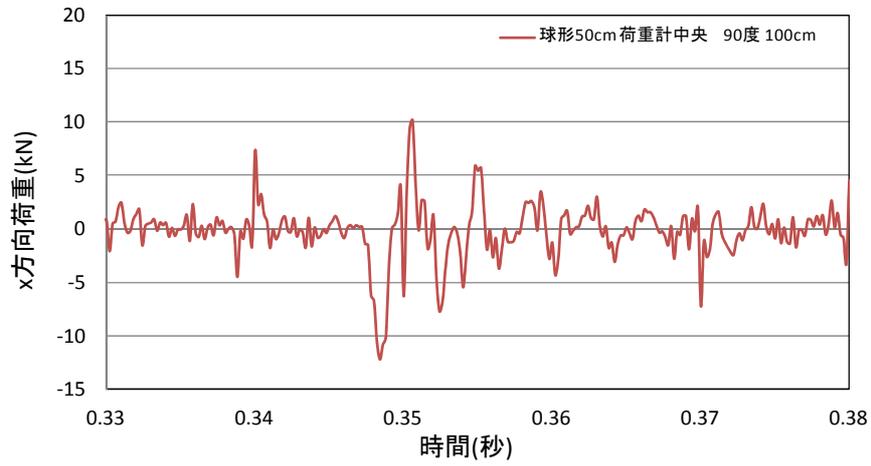


(e) 圧電型加速度計

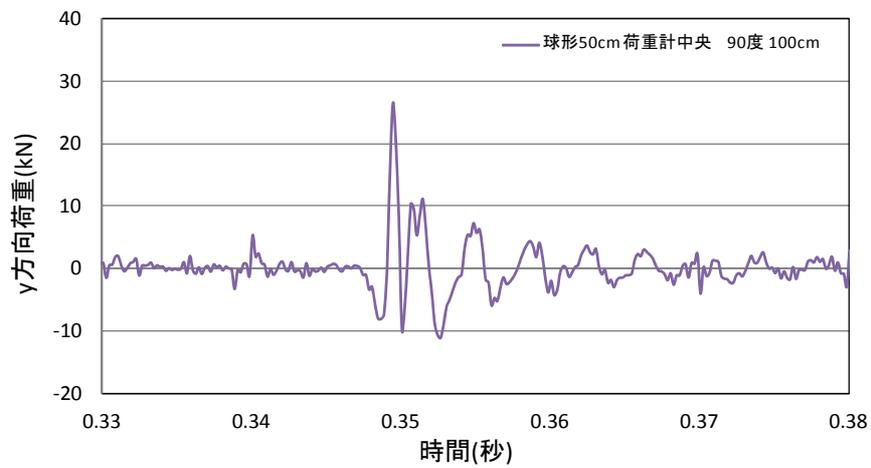
図 5.1.141 No.1 球形 50cm 中央載荷 直角載荷 引き代 140cm



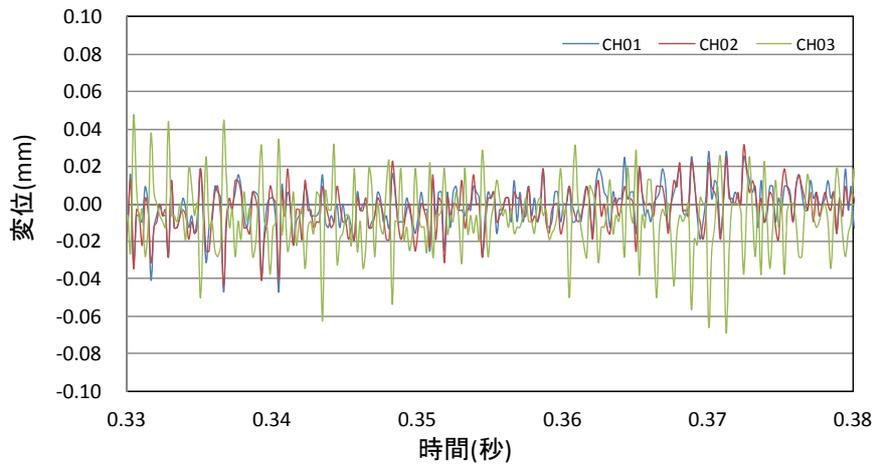
(a)衝突方向



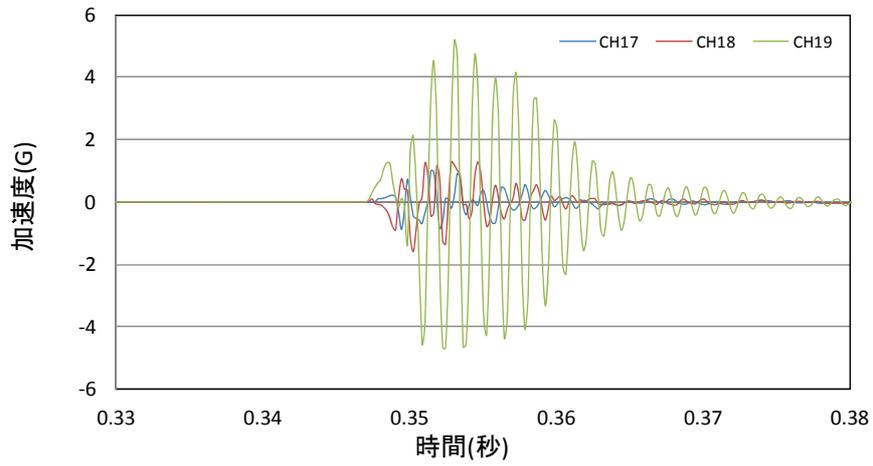
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

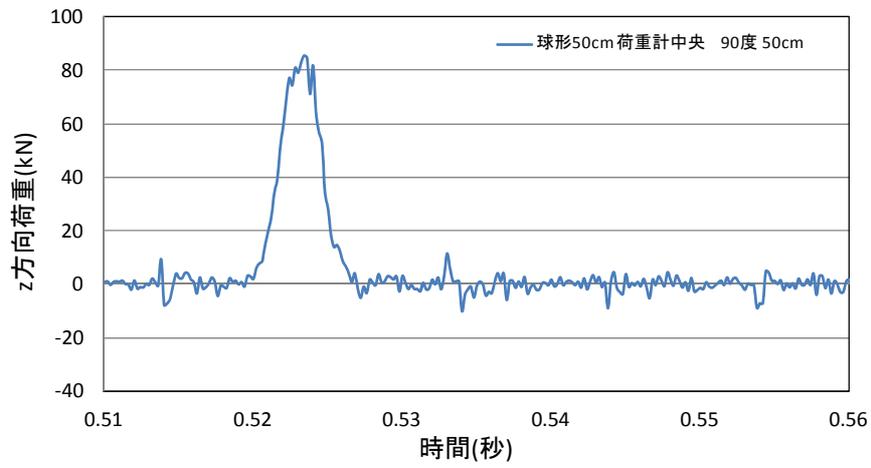


(d)レーザー変位計

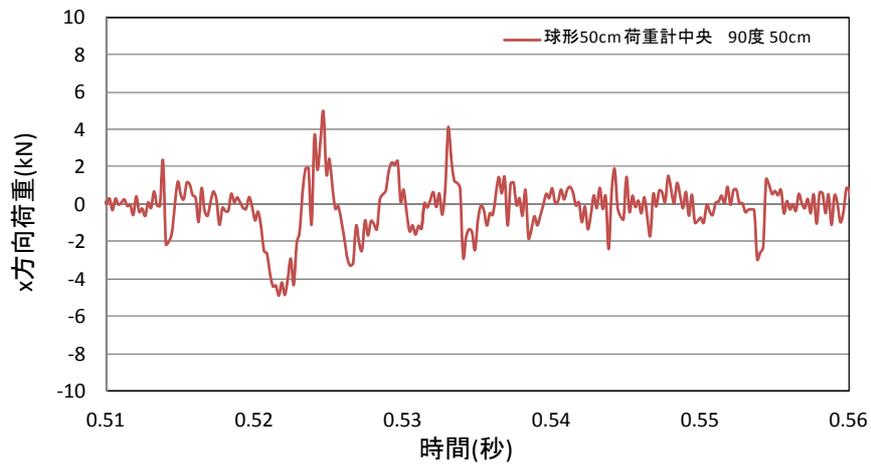


(e)圧電型加速度計

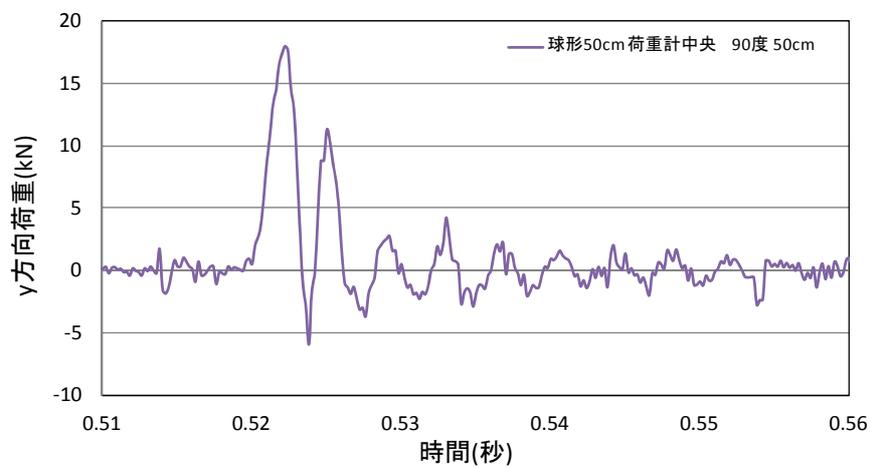
図 5.1.142 No.2 球形 50cm 中央載荷 直角載荷 引き代 100cm



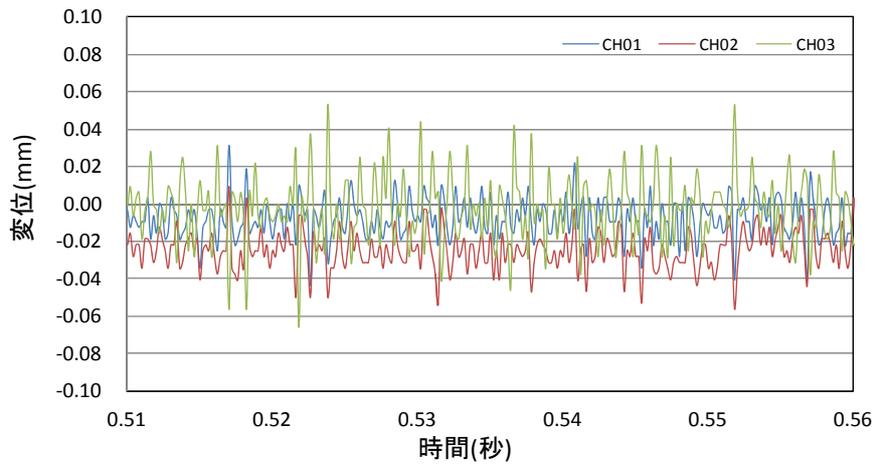
(a)衝突方向



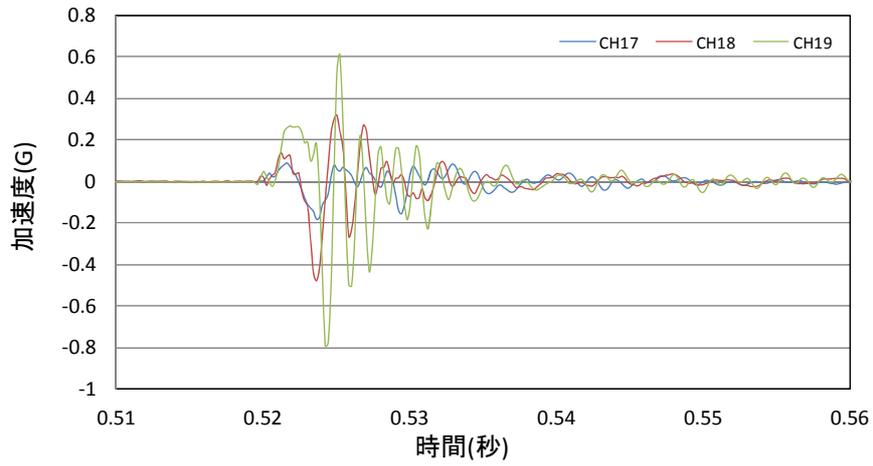
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

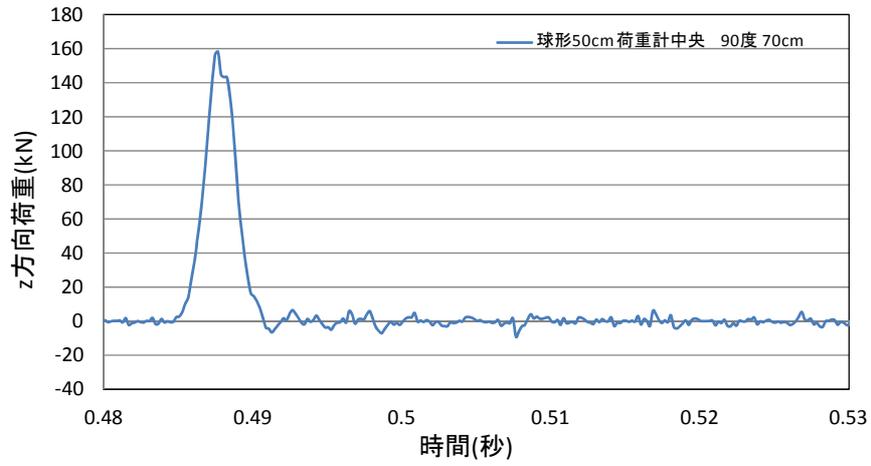


(d) レーザー変位計

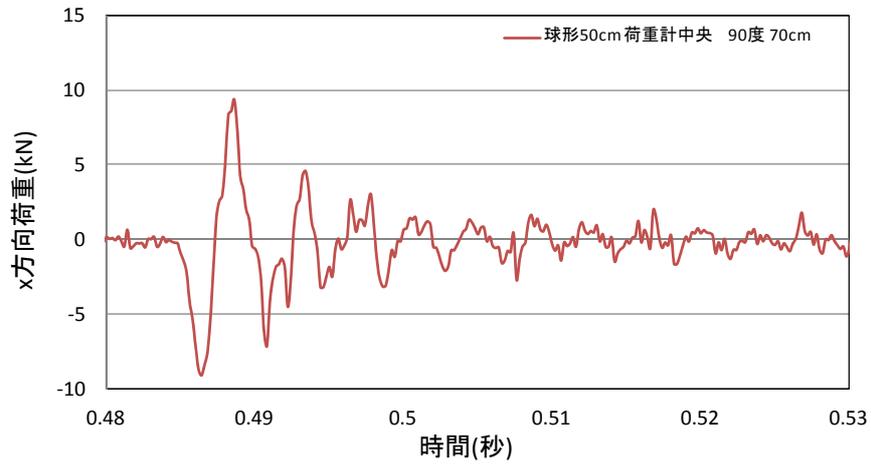


(e) 圧電型加速度計

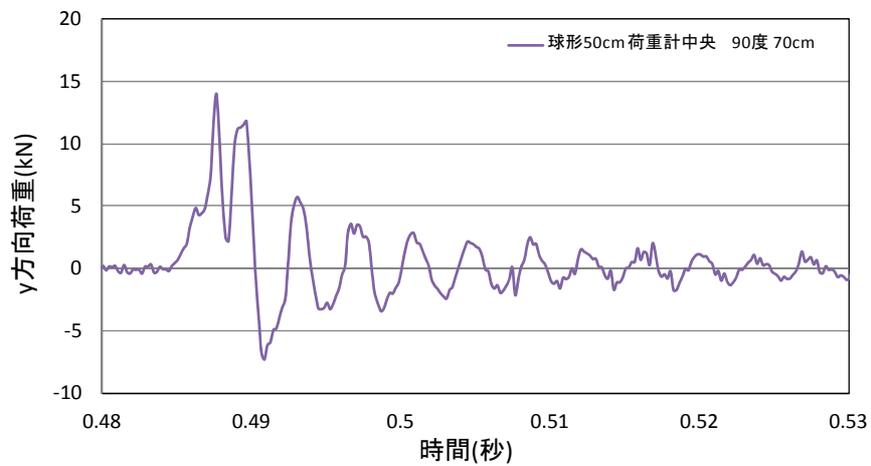
図 5.1.143 No.3 球形 50cm 中央載荷 直角載荷 引き代 50cm



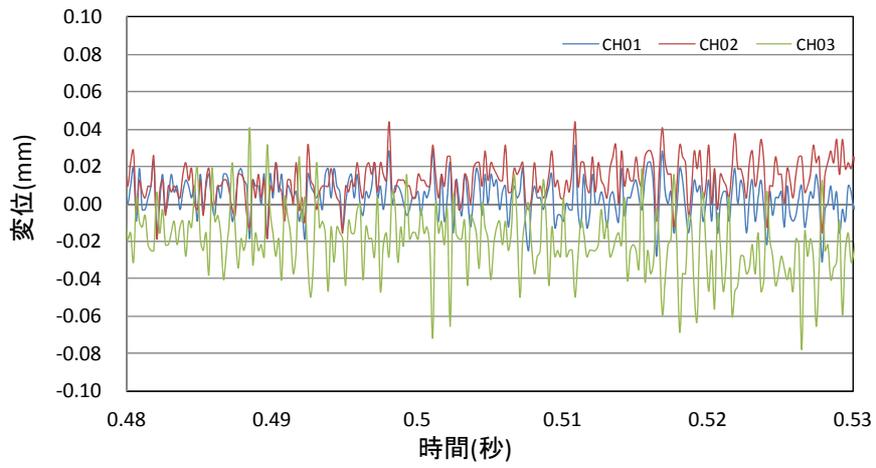
(a)衝突方向



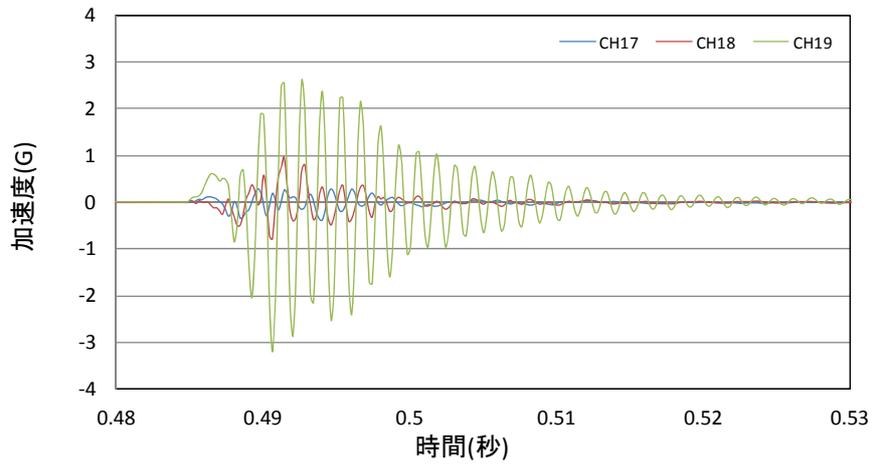
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

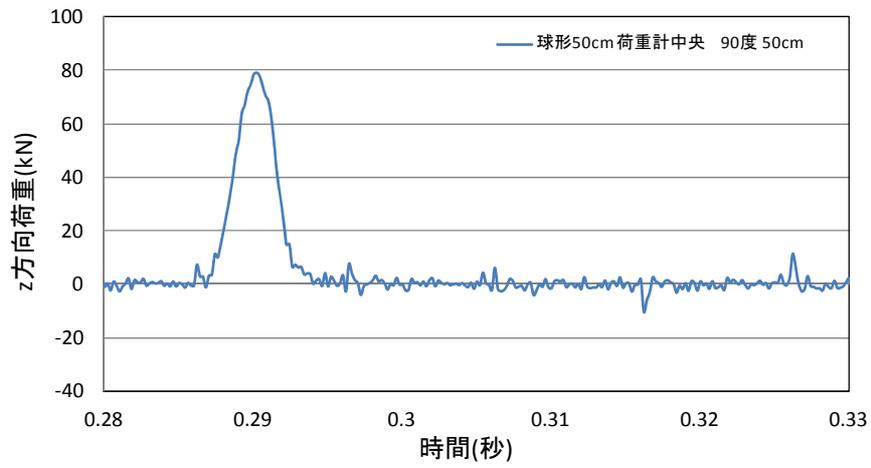


(d) レーザー変位計

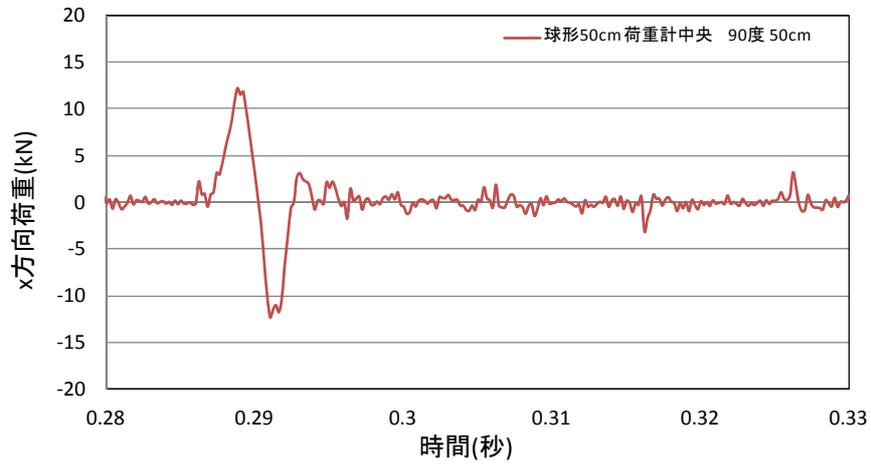


(e) 圧電型加速度計

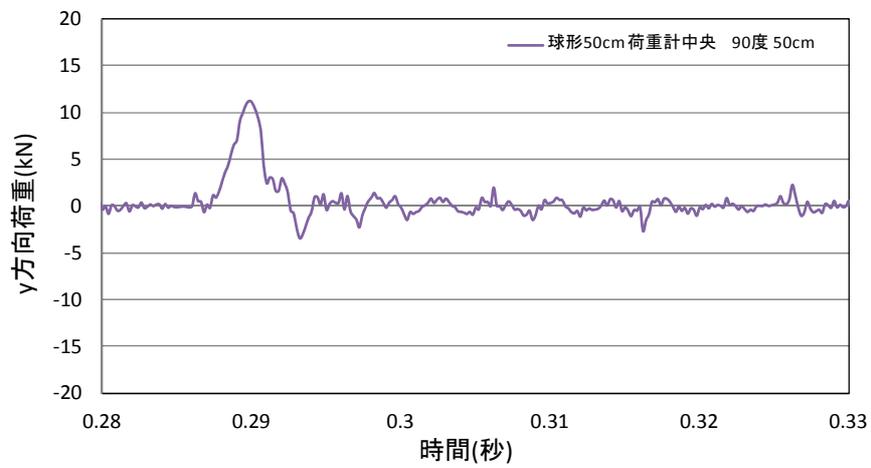
図 5.1.144 No.4 球形 50cm 中央載荷 直角載荷 引き代 70cm



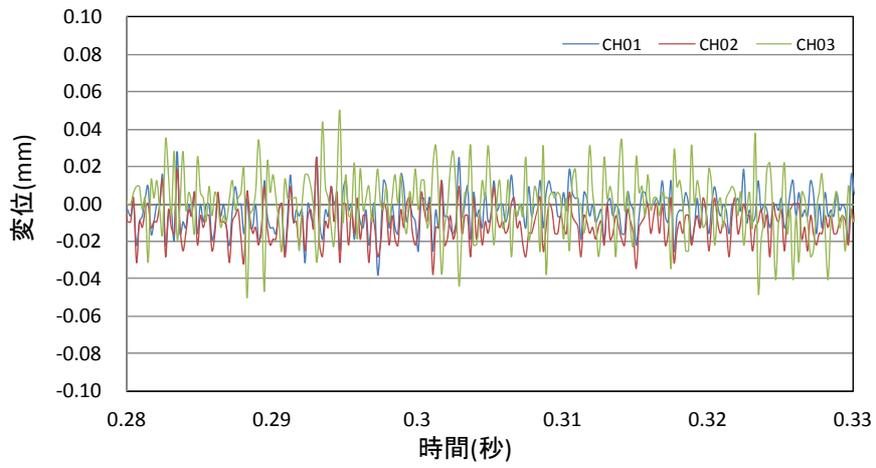
(a)衝突方向



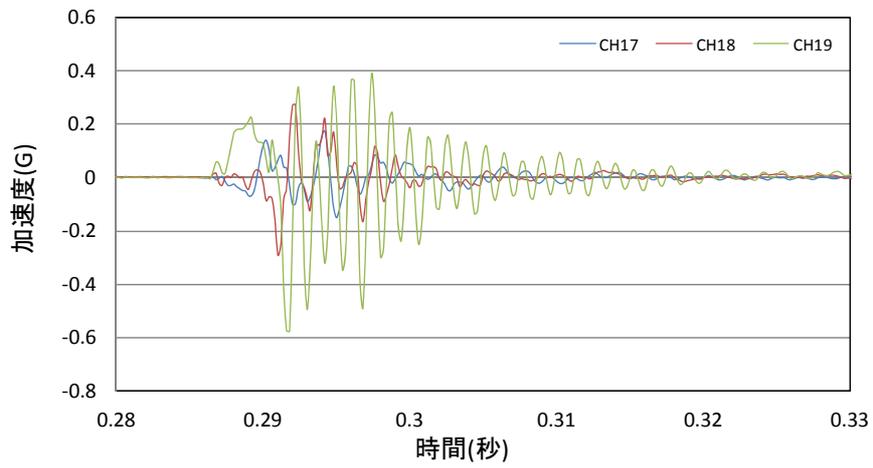
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

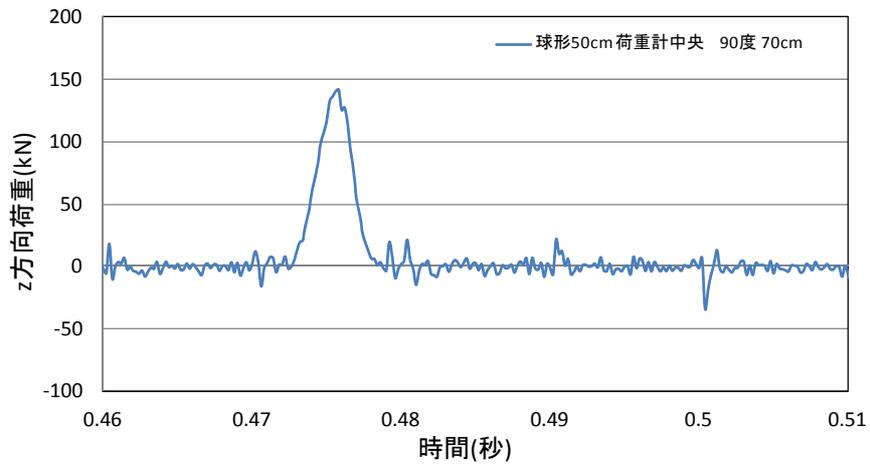


(d)レーザー変位計

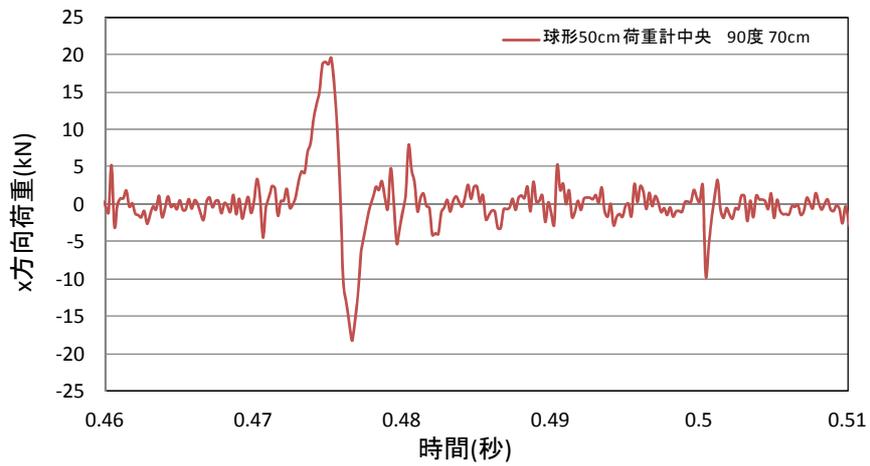


(e)圧電型加速度計

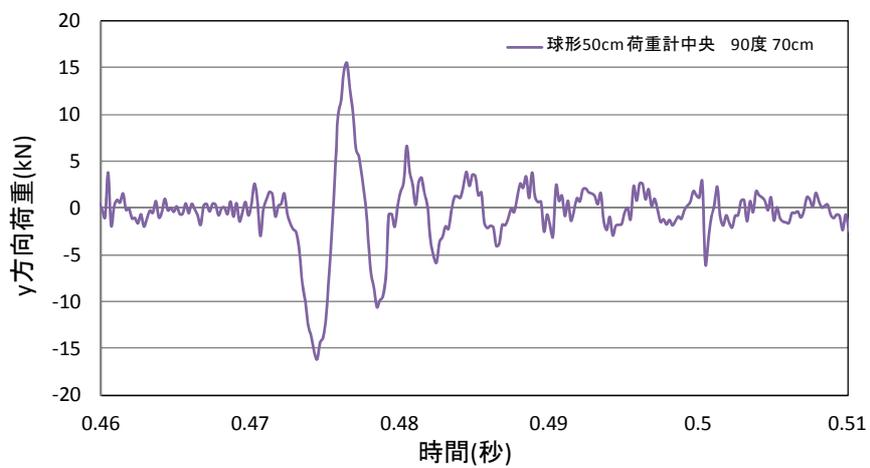
図 5.1.145 No.5 球形 50cm 中央載荷 60 度入射載荷 引き代 50cm



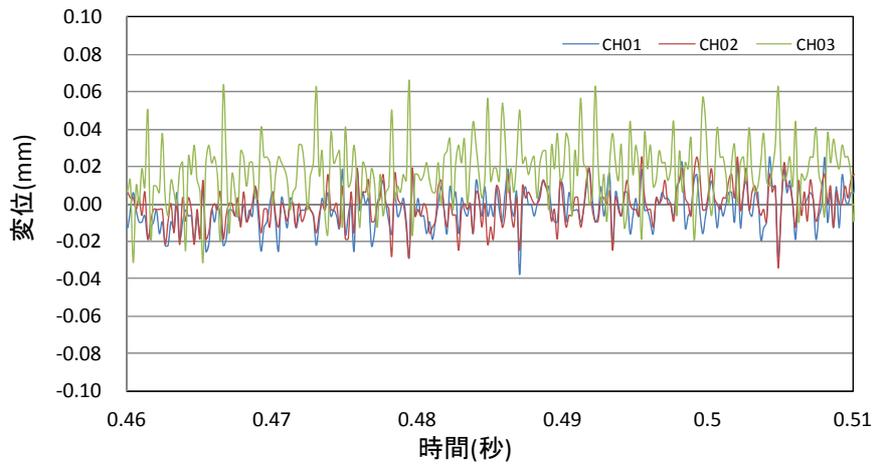
(a)衝突方向



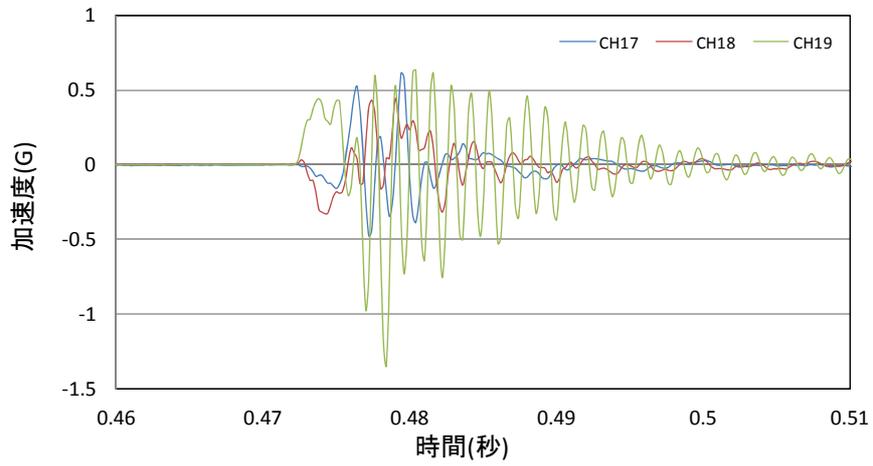
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

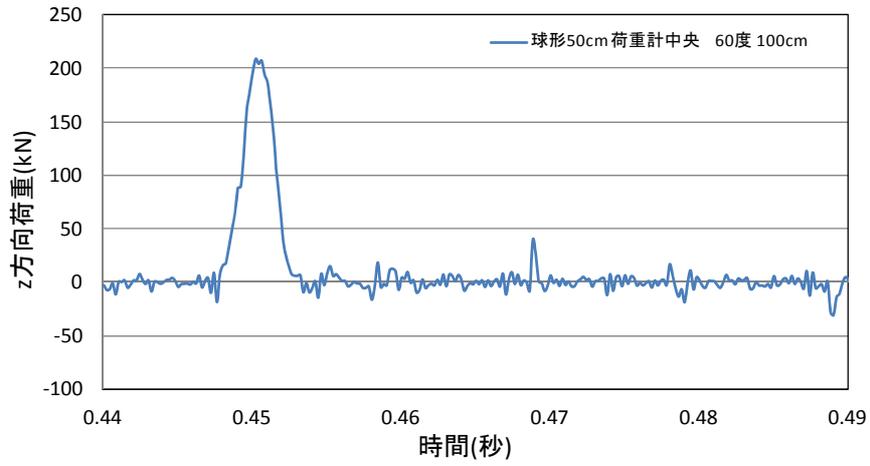


(d) レーザー変位計

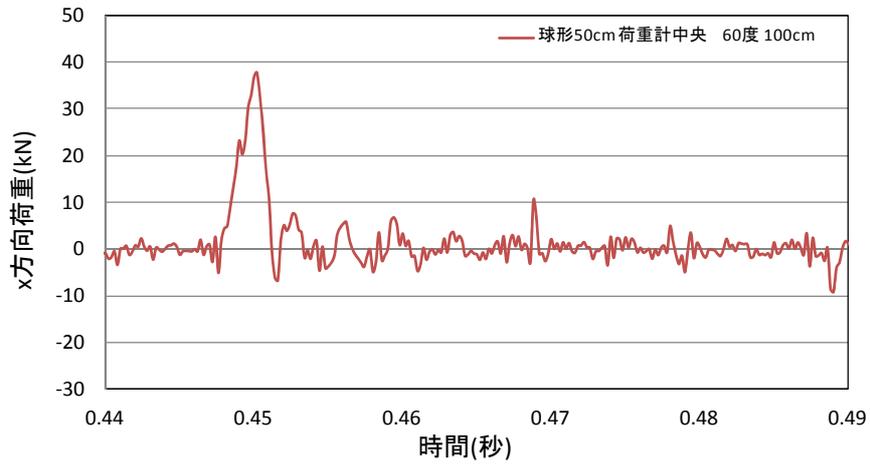


(e) 圧電型加速度計

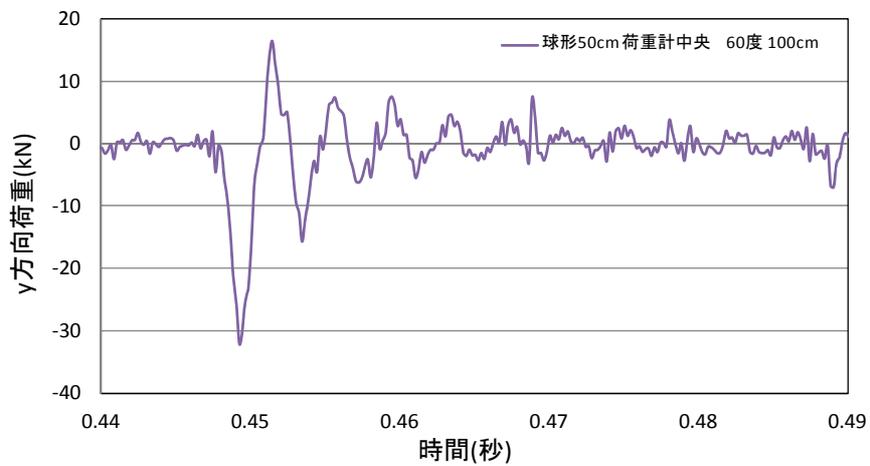
図 5.1.146 No.6 球形 50cm 中央載荷 60度入射載荷 引き代 70cm



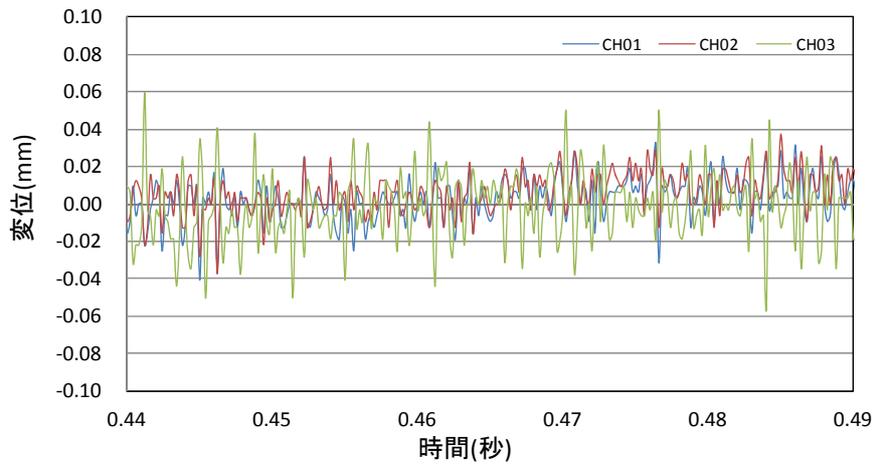
(a)衝突方向



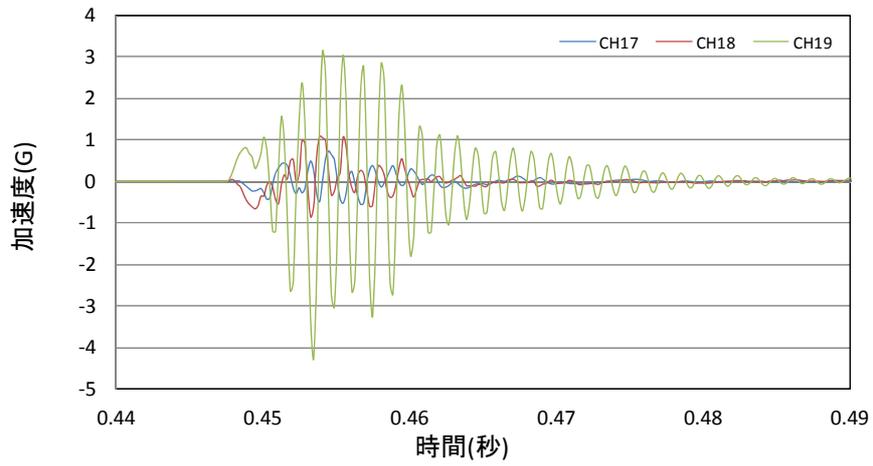
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

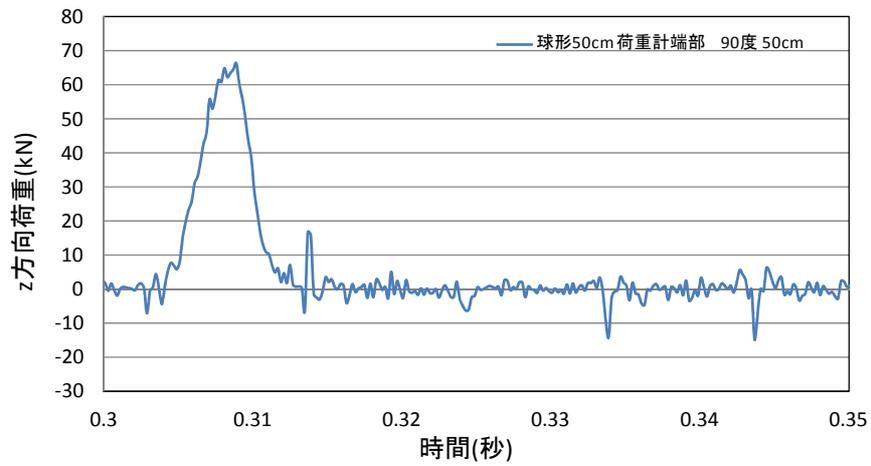


(d) レーザー変位計

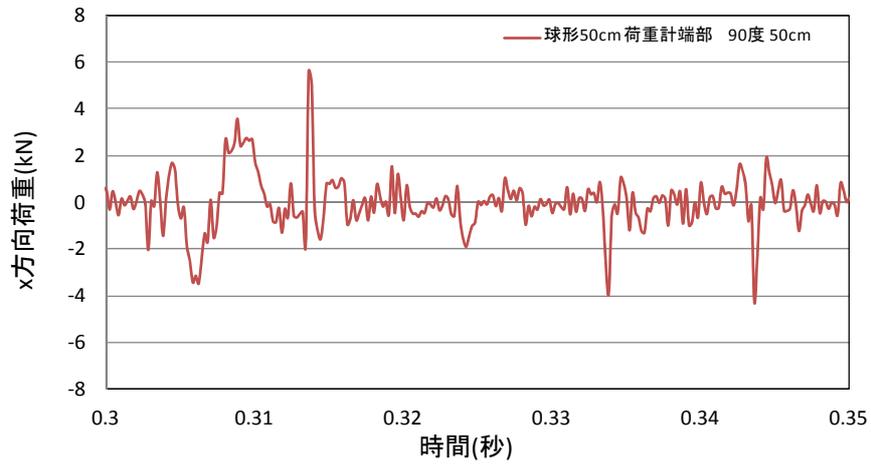


(e) 圧電型加速度計

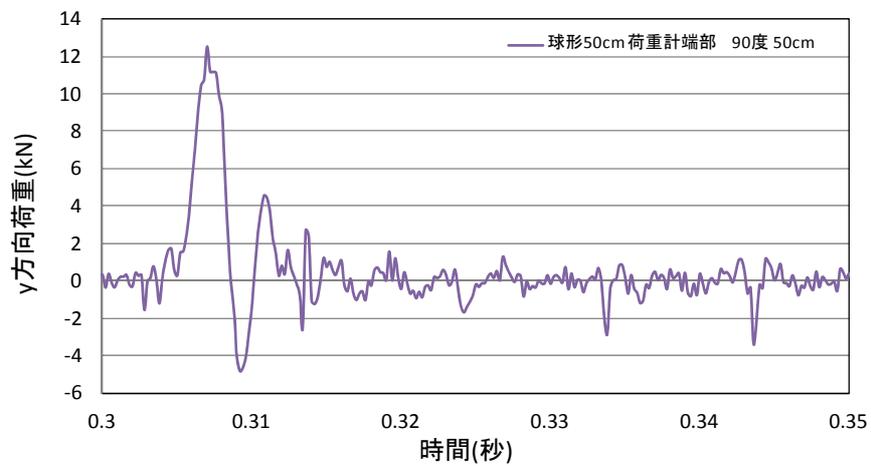
図 5.1.147 No.7 球形 50cm 中央載荷 60度入射載荷 引き代 100cm



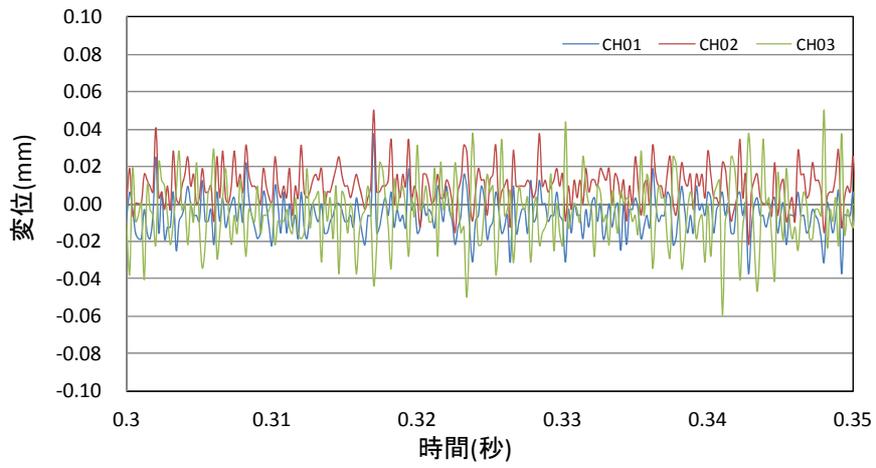
(a)衝突方向



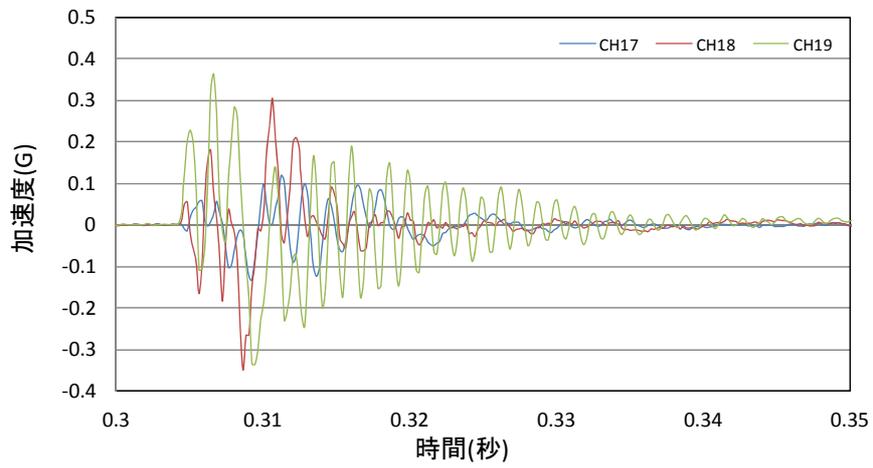
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

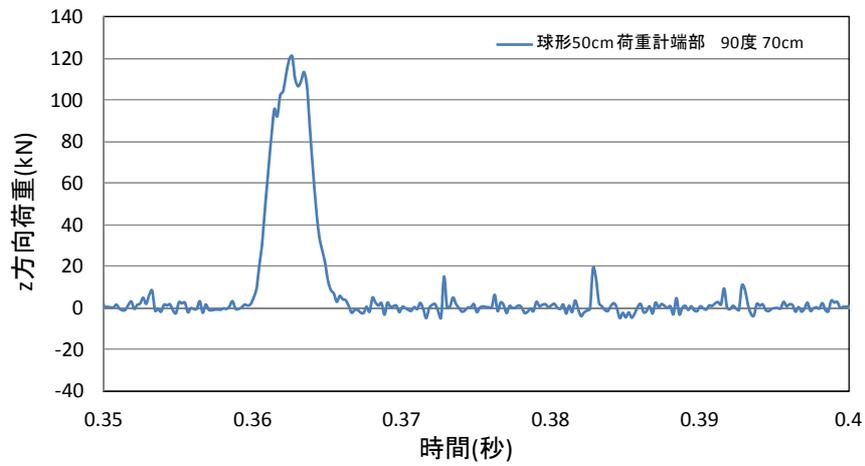


(d) レーザー変位計

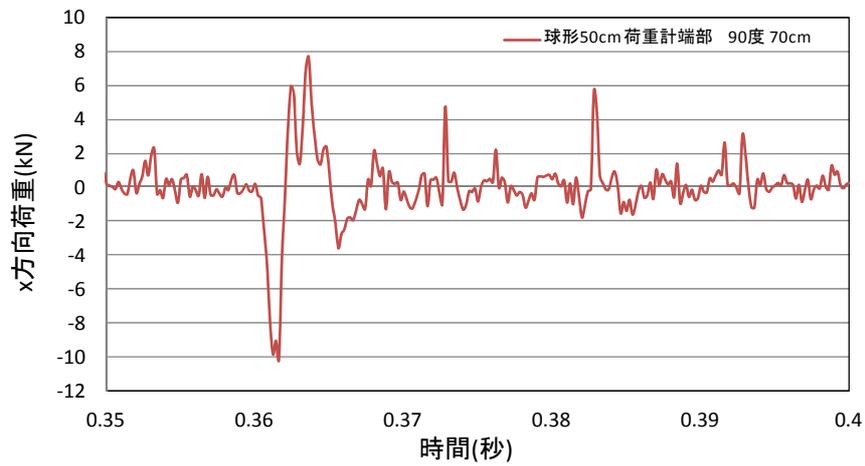


(e) 圧電型加速度計

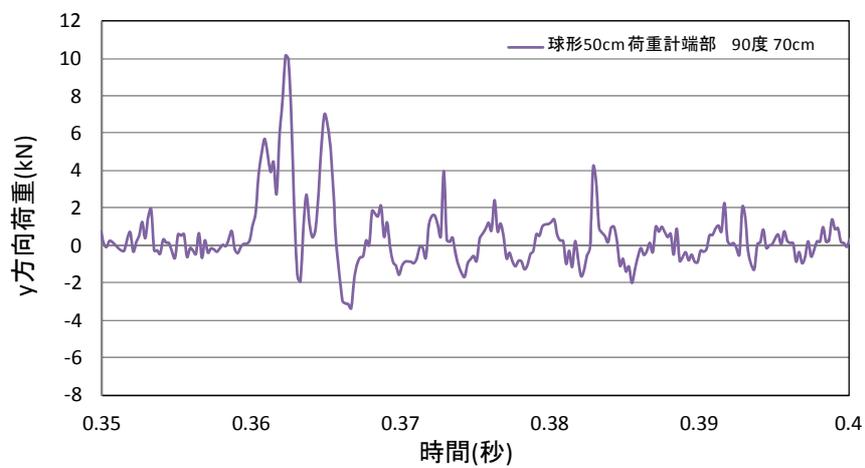
図 5.1.148 No.8 球形 50cm 端部載荷 直角載荷 引き代 50cm



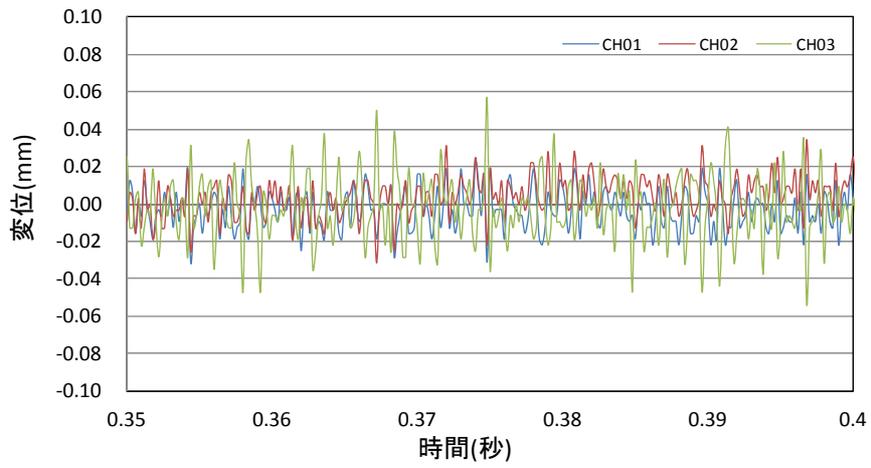
(a)衝突方向



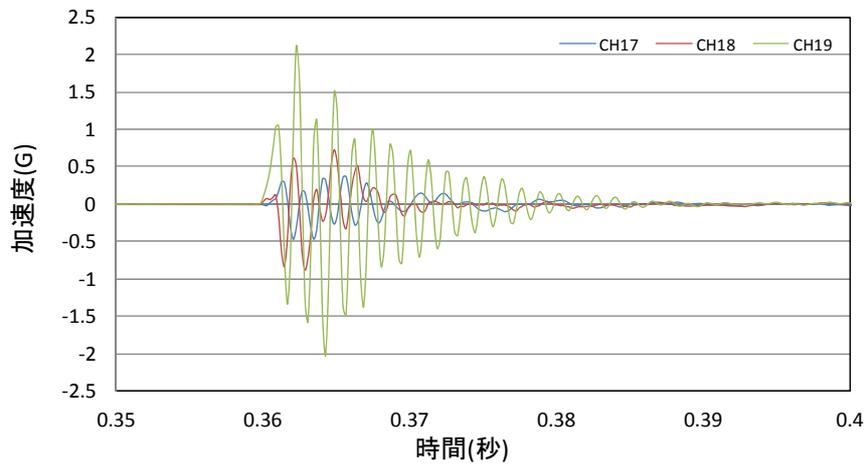
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

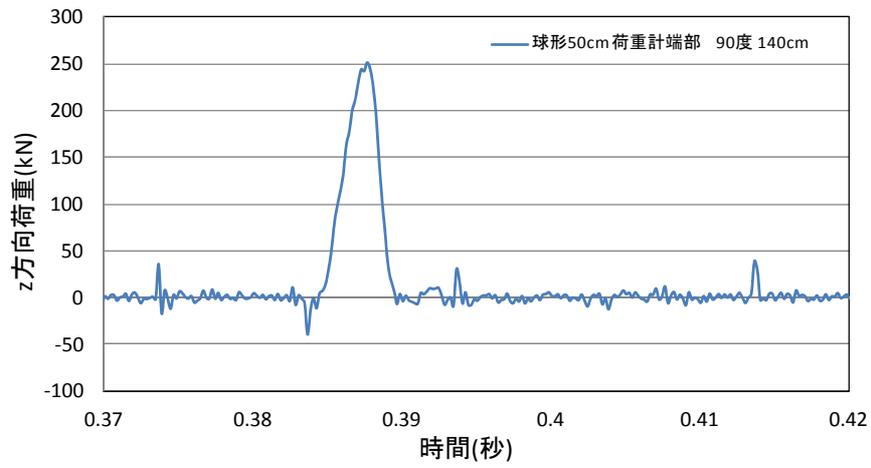


(d) レーザー変位計

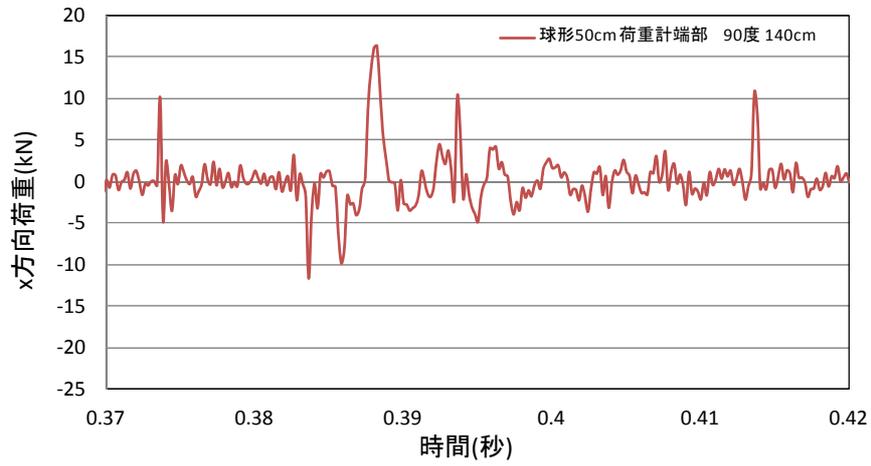


(e) 圧電型加速度計

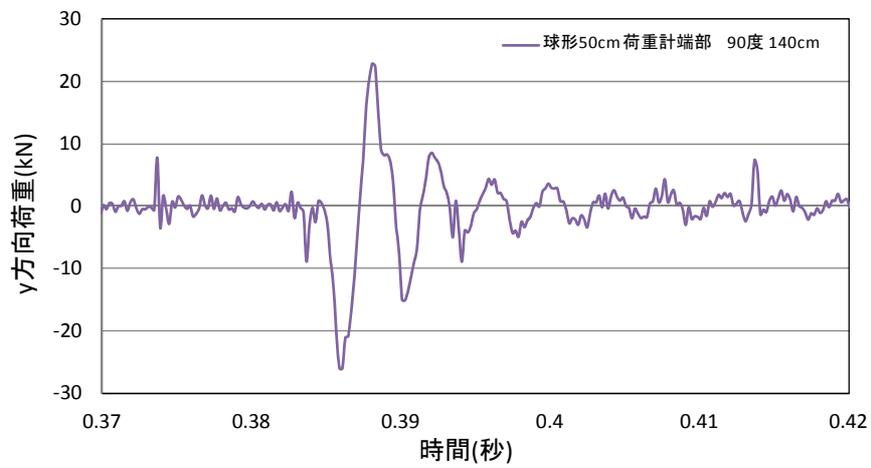
図 5.1.149 No.9 球形 50cm 端部載荷 直角載荷 引き代 70cm



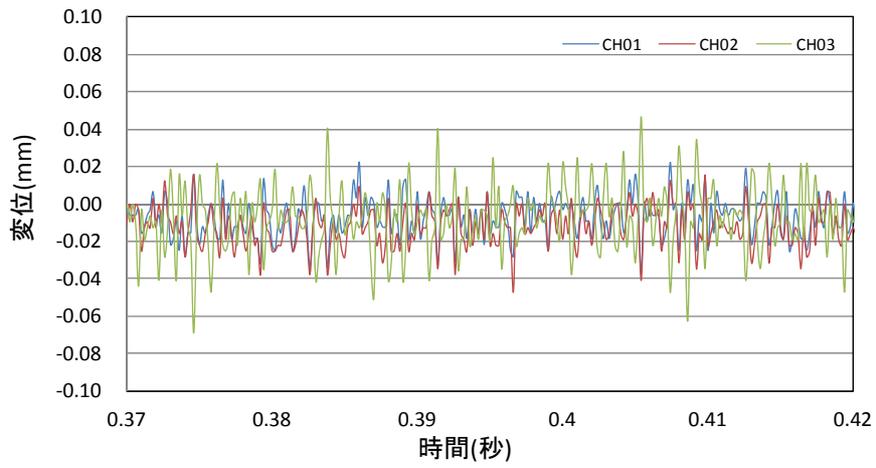
(a)衝突方向



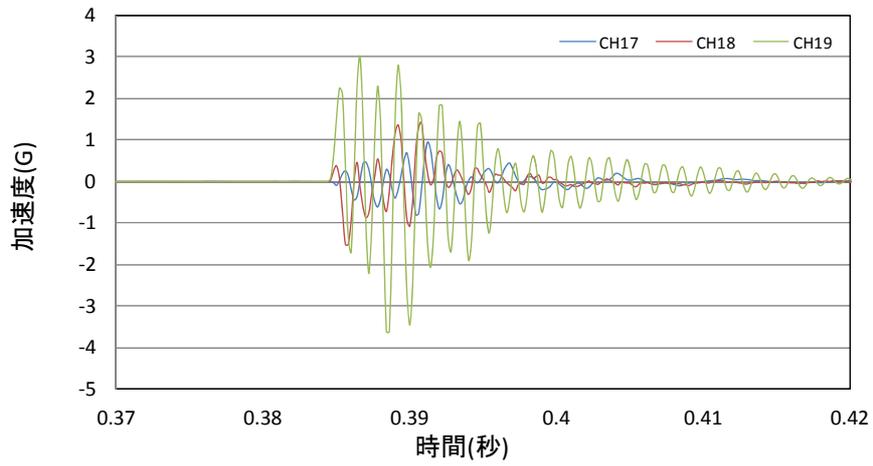
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

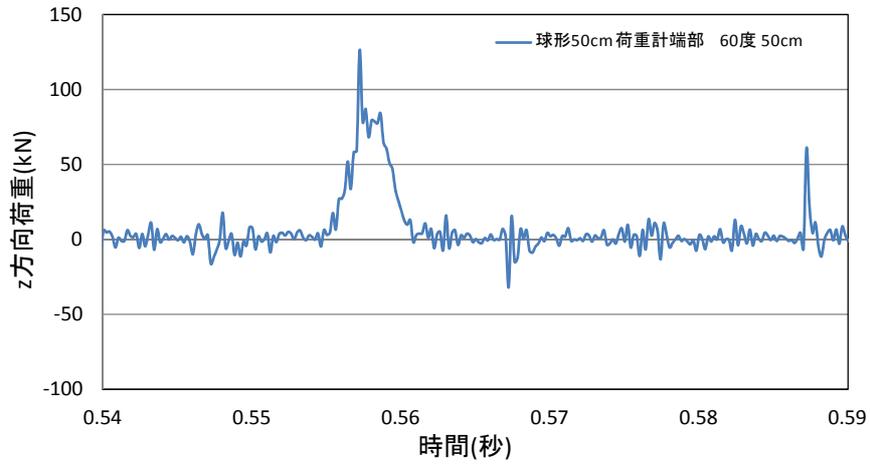


(d)レーザー変位計

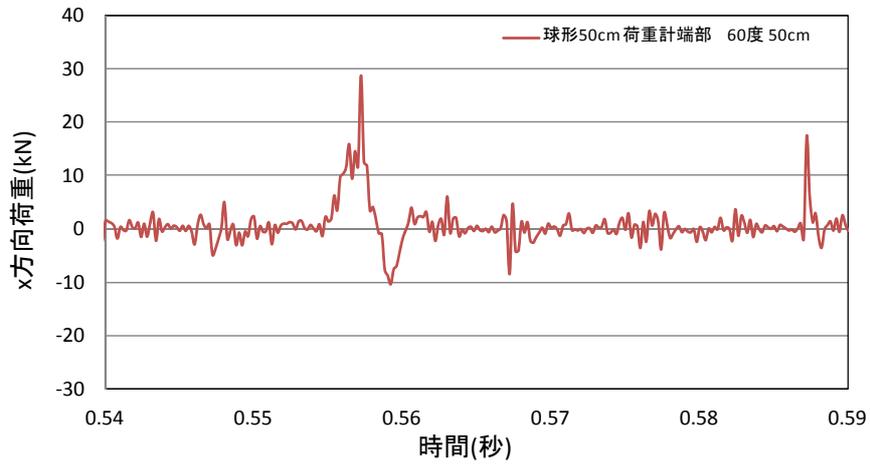


(e)圧電型加速度計

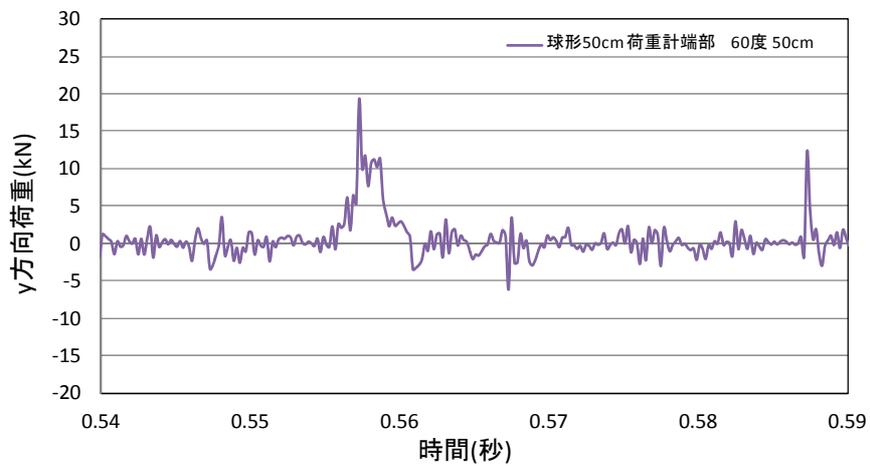
図 5.1.150 No.10 球形 50cm 端部載荷 直角載荷 引き代 140cm



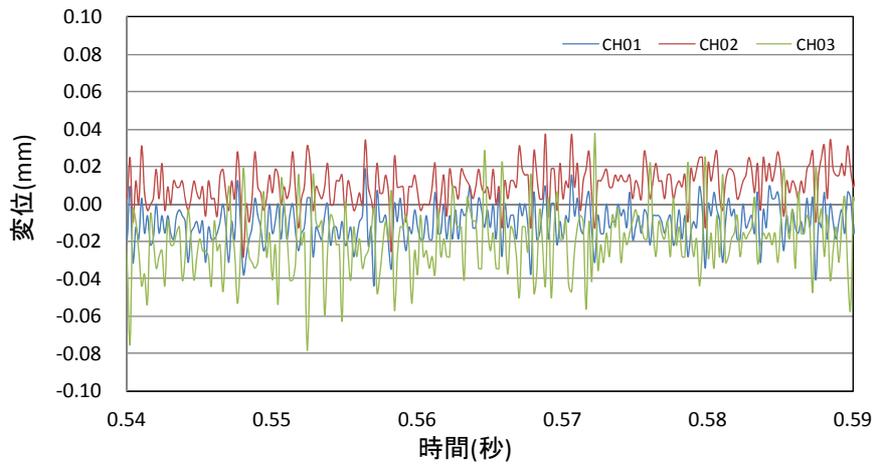
(a)衝突方向



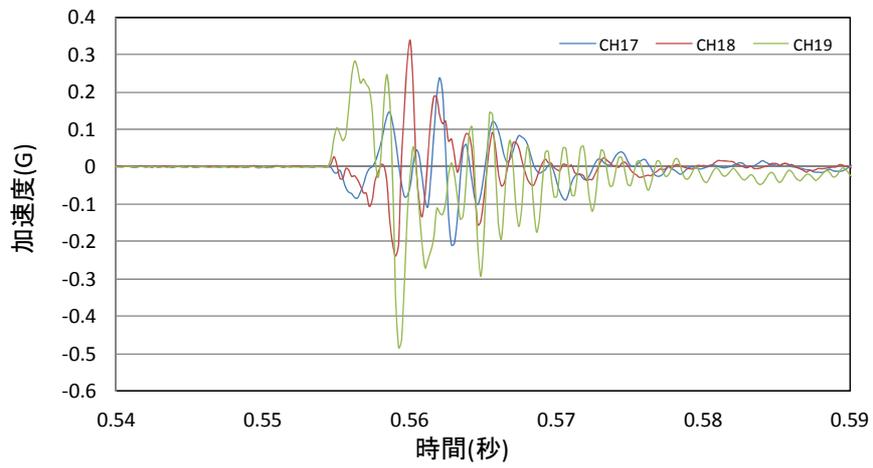
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

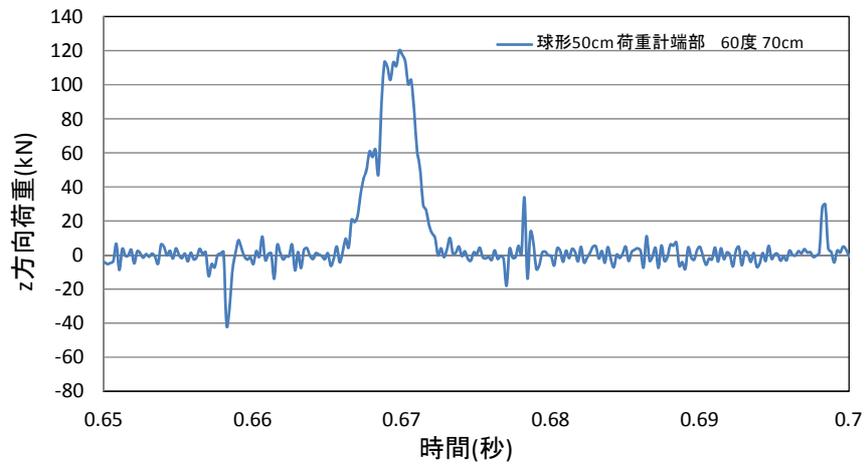


(d) レーザー変位計

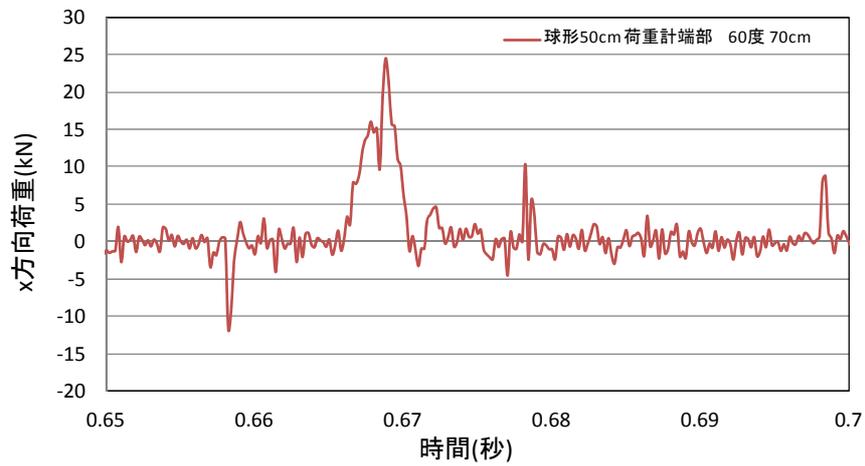


(e) 圧電型加速度計

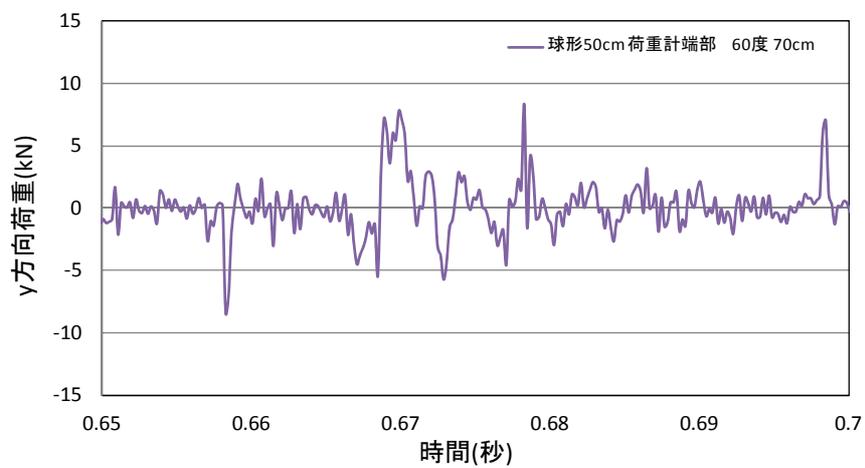
図 5.1.151 No.11 球形 50cm 60 度入射载荷 端部载荷 引き代 50cm



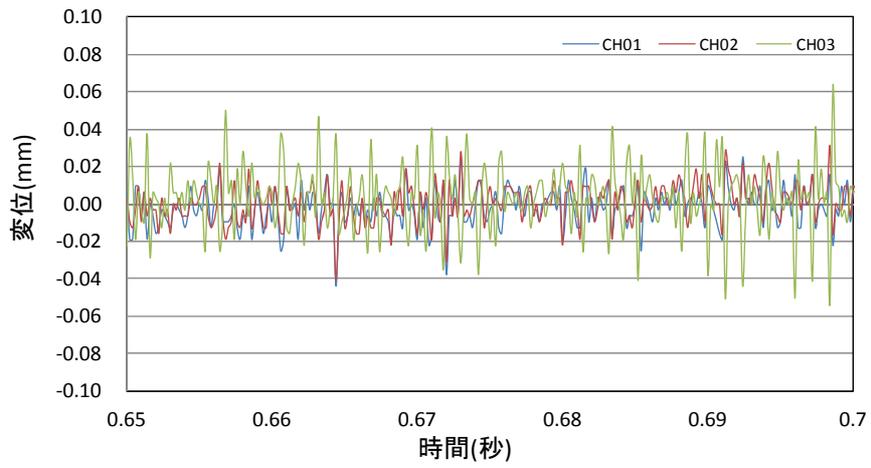
(a)衝突方向



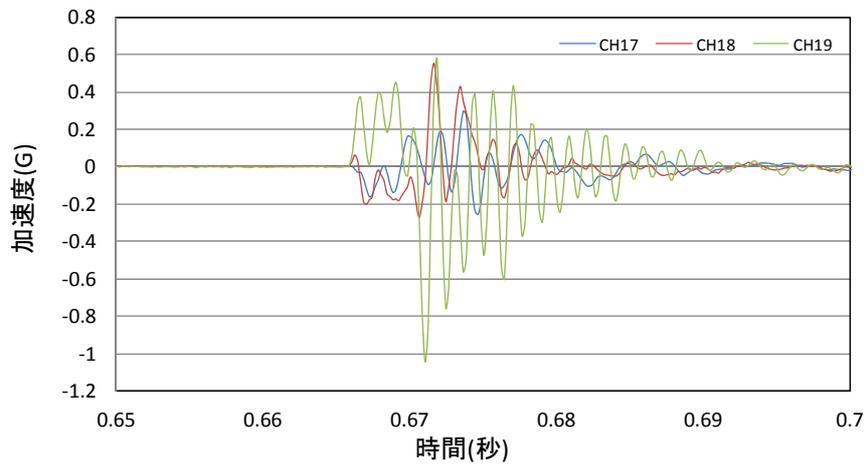
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

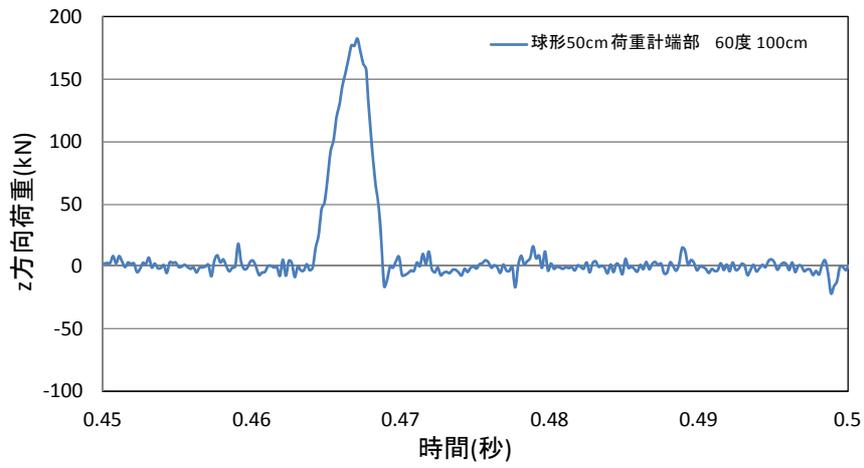


(d)レーザー変位計

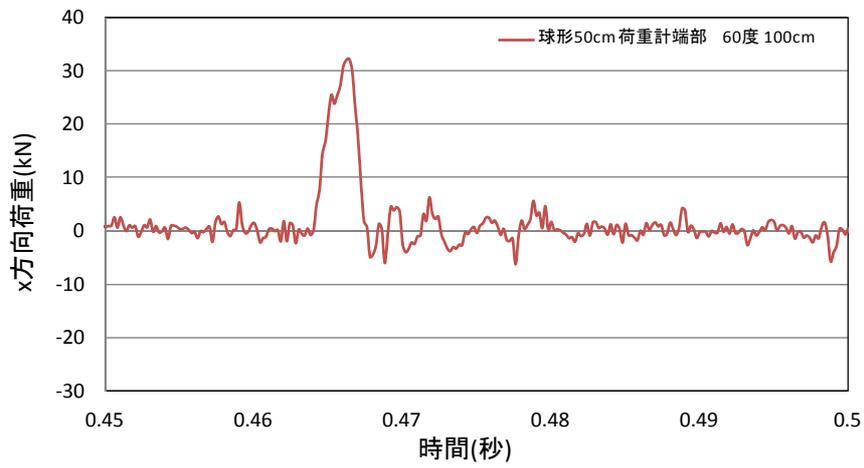


(e)圧電型加速度計

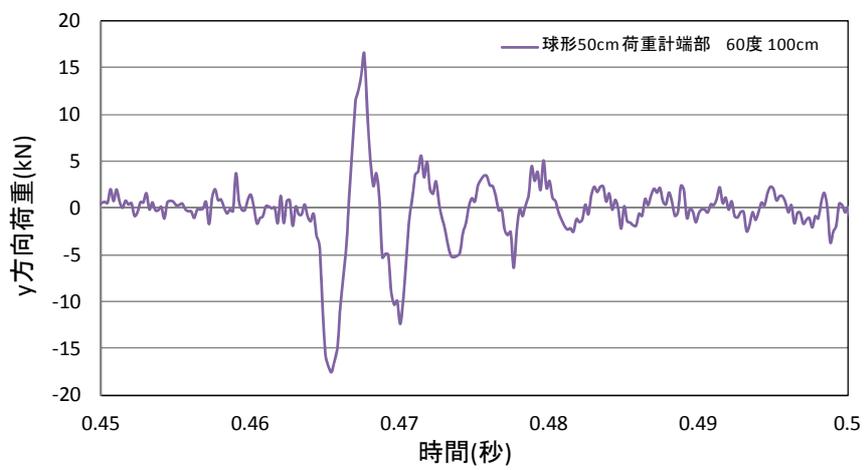
図 5.1.152 No.12 球形 50cm 60度入射载荷 端部载荷 引き代 70cm



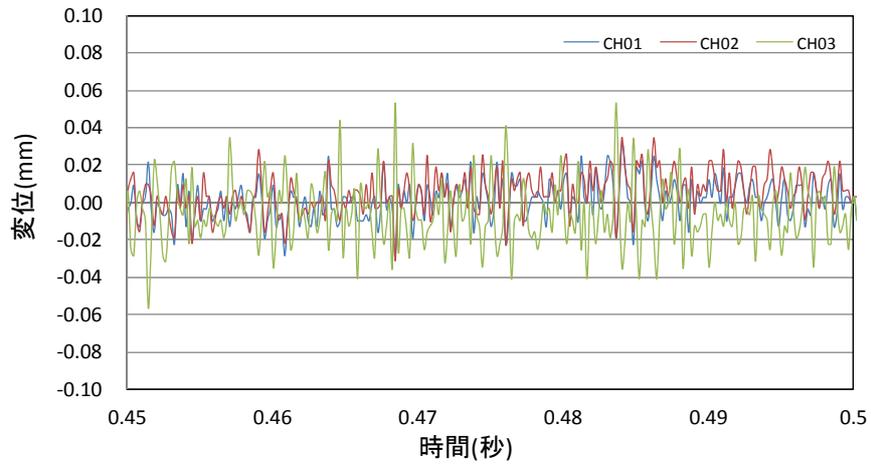
(a)衝突方向



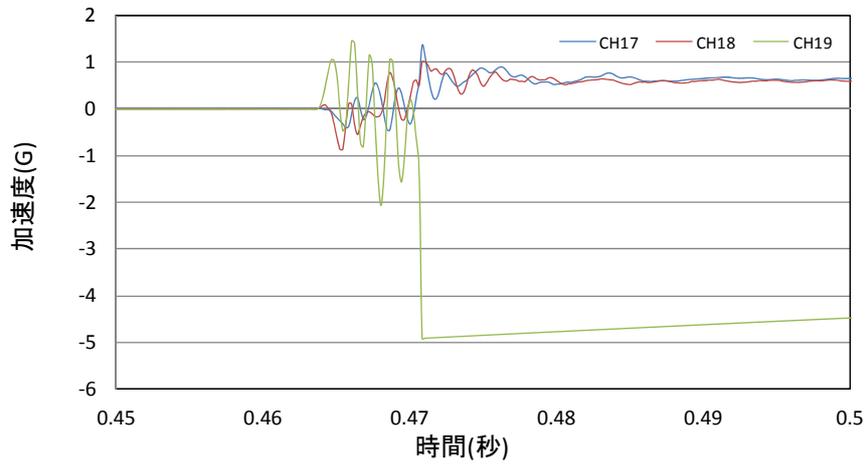
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

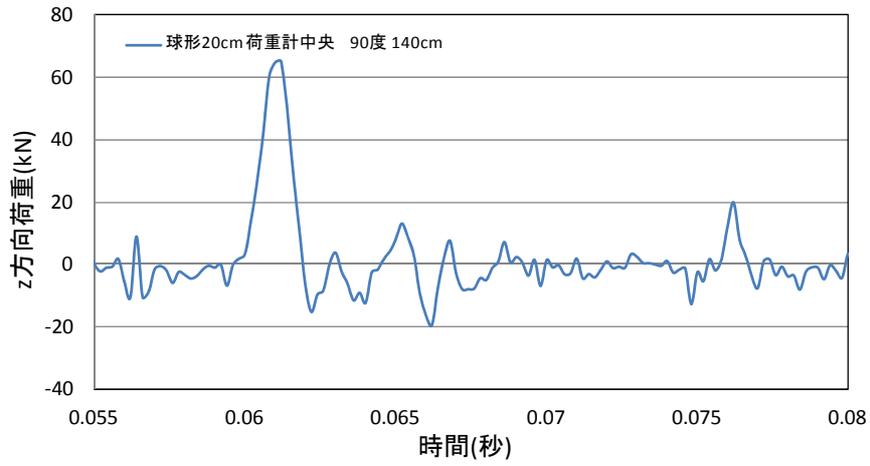


(d) レーザー変位計

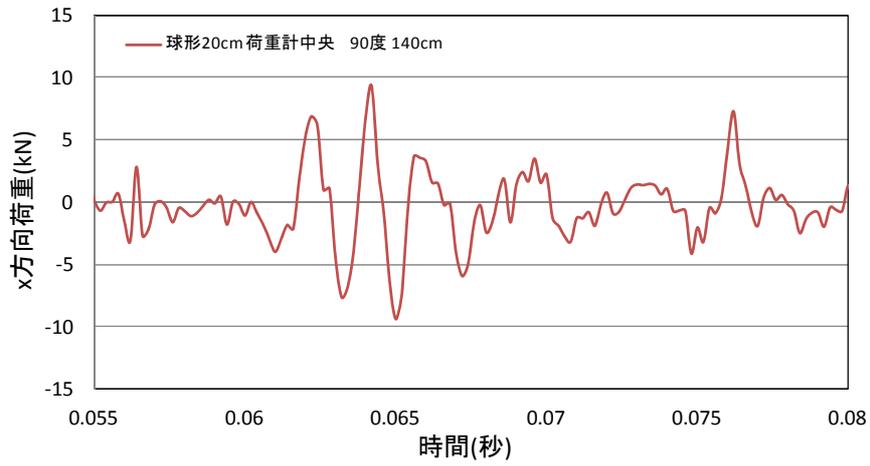


(e) 圧電型加速度計

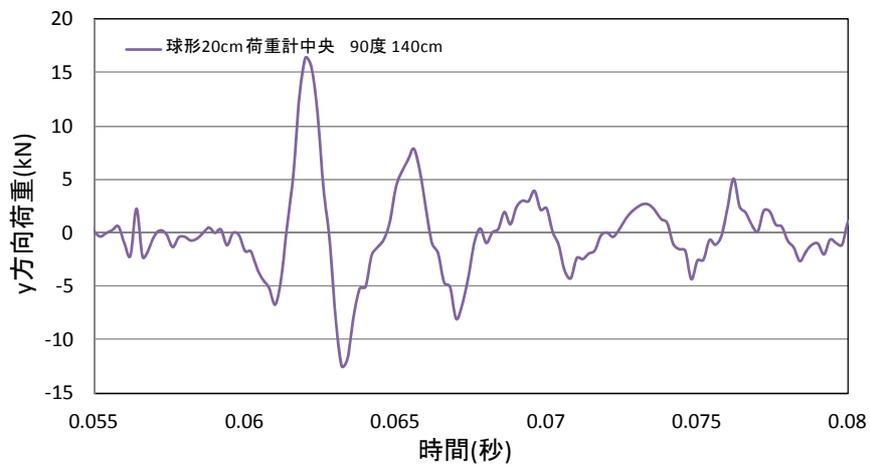
図 5.1.153 No.13 球形 50cm 60度入射载荷 端部载荷 引き代 100cm



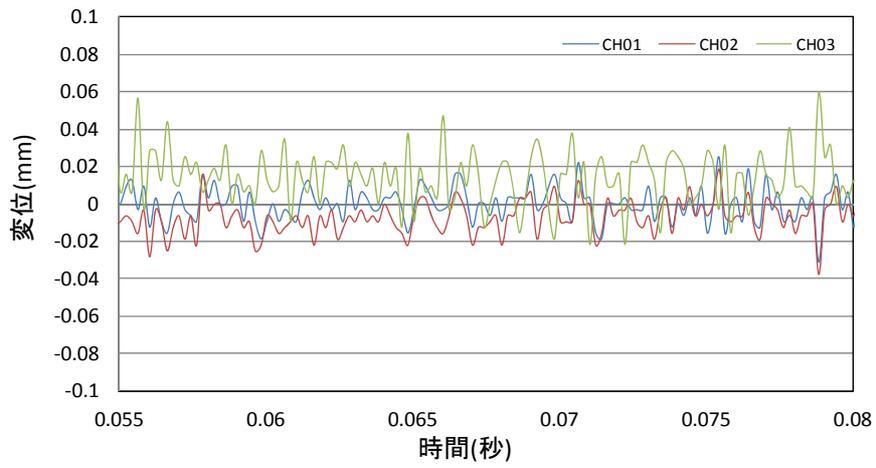
(a)衝突方向



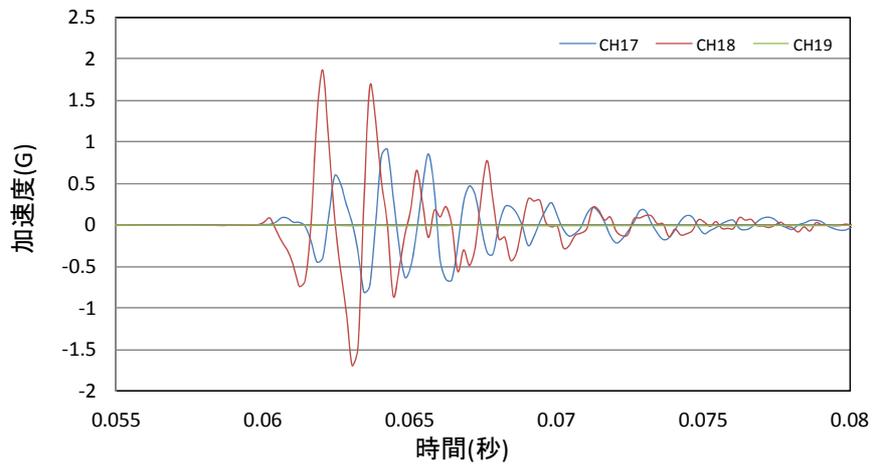
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

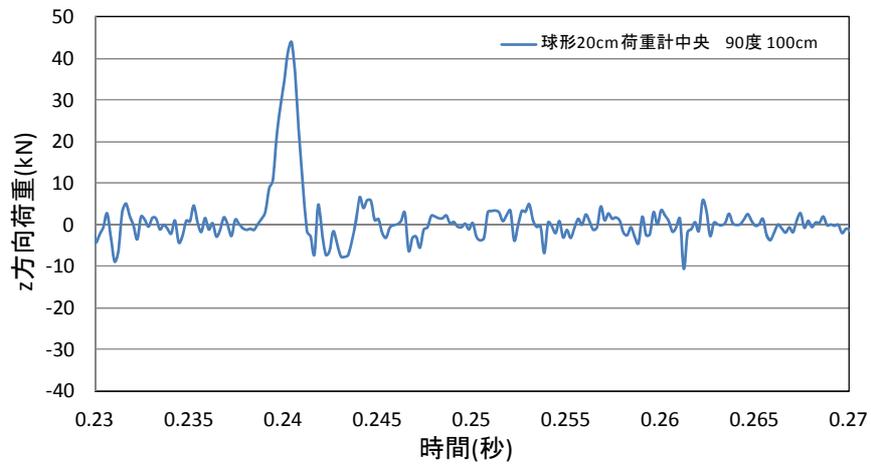


(d) レーザー変位計

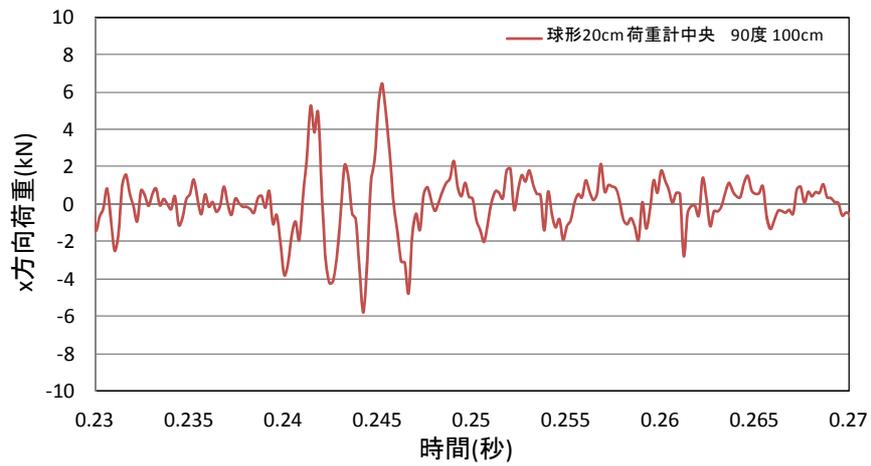


(e) 圧電型加速度計

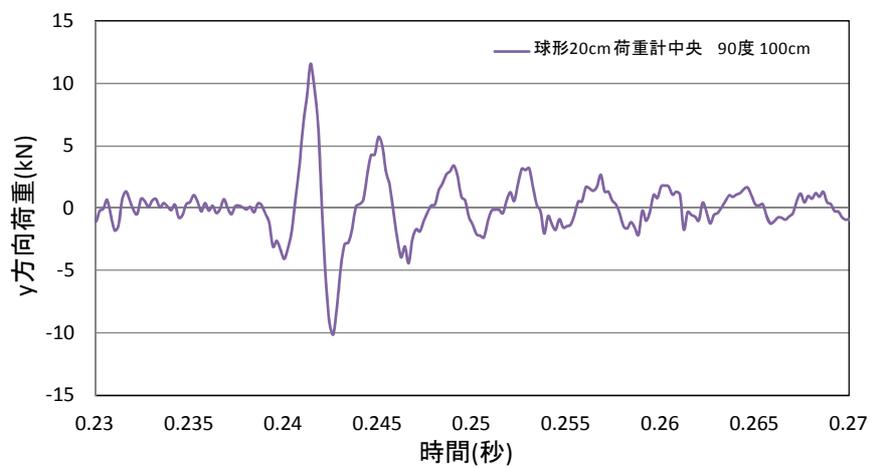
図 5.1.154 No.14 球形 20cm 直角載荷 中央載荷 引き代 140cm



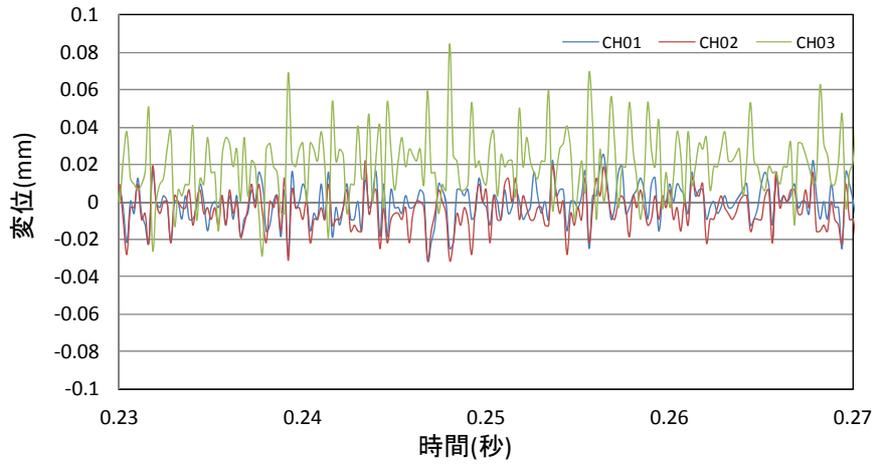
(a)衝突方向



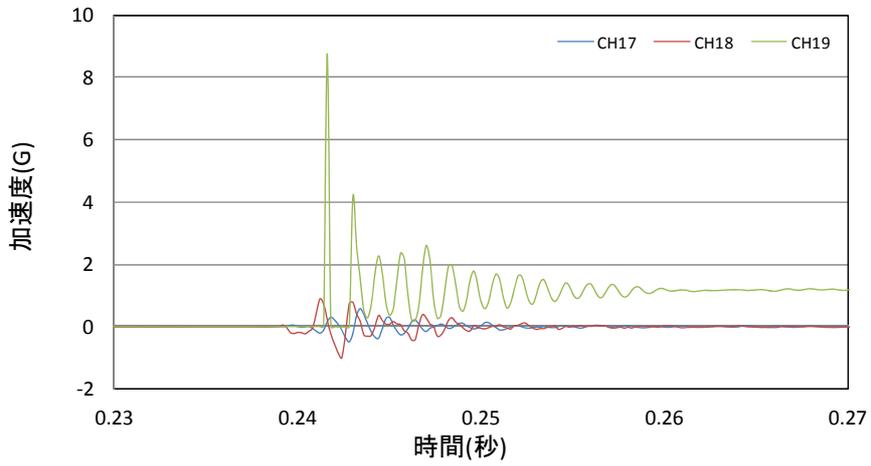
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

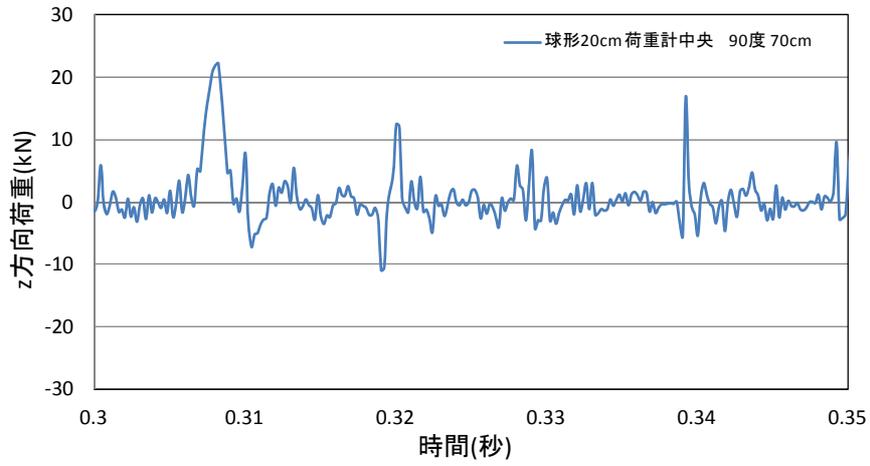


(d)レーザー変位計

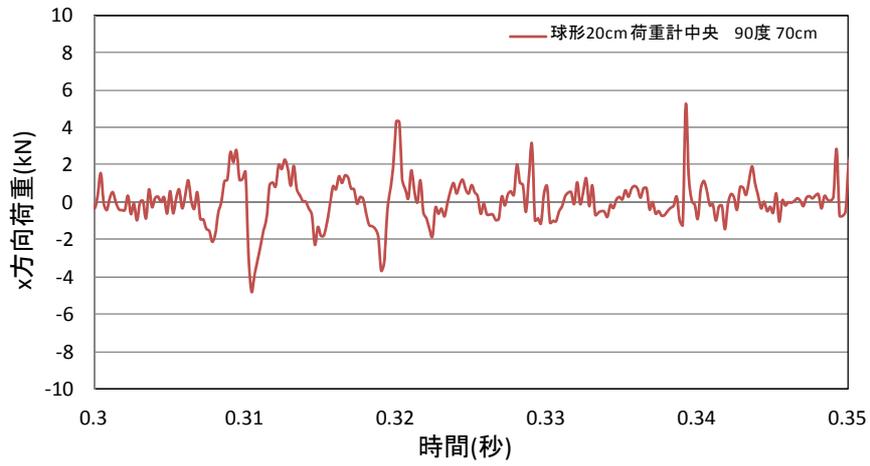


(e)圧電型加速度計

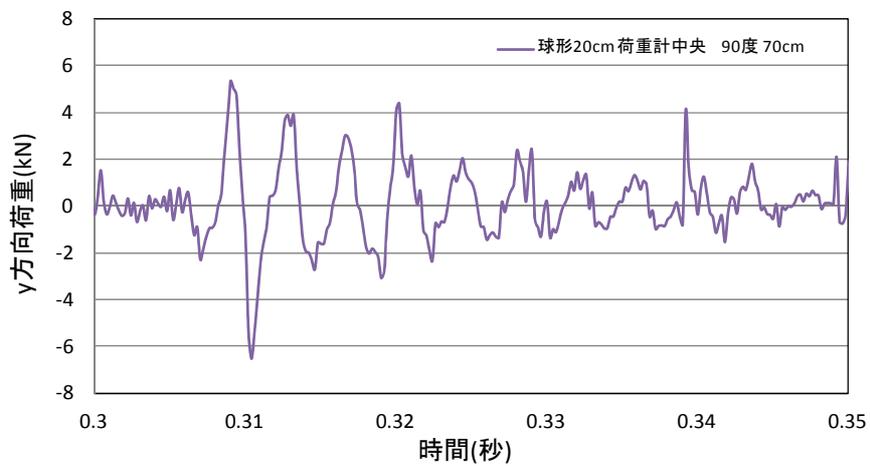
図 5.1.155 No.15 球形 20cm 直角載荷 中央載荷 引き代 100cm



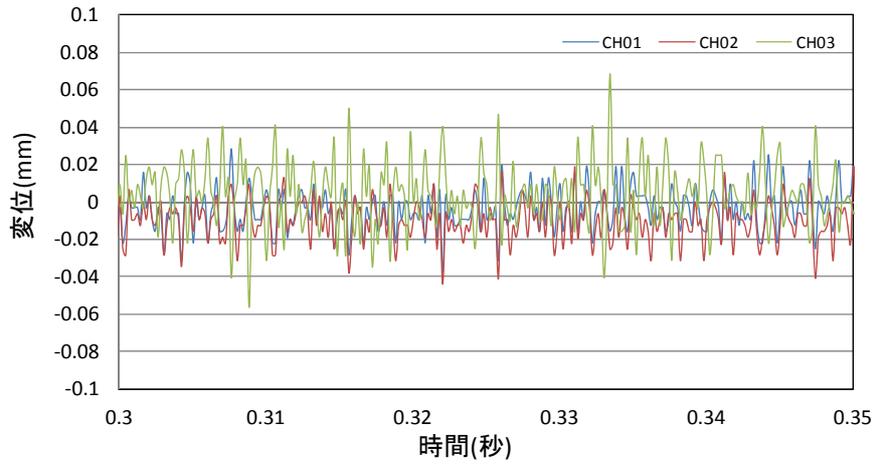
(a)衝突方向



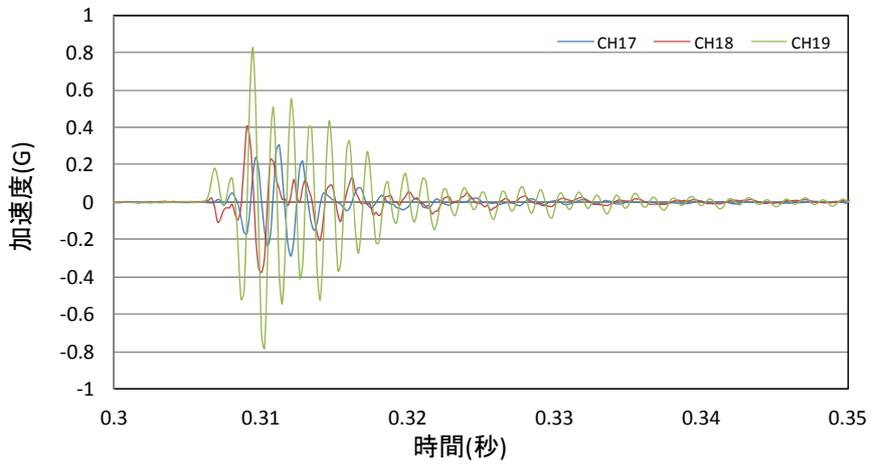
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

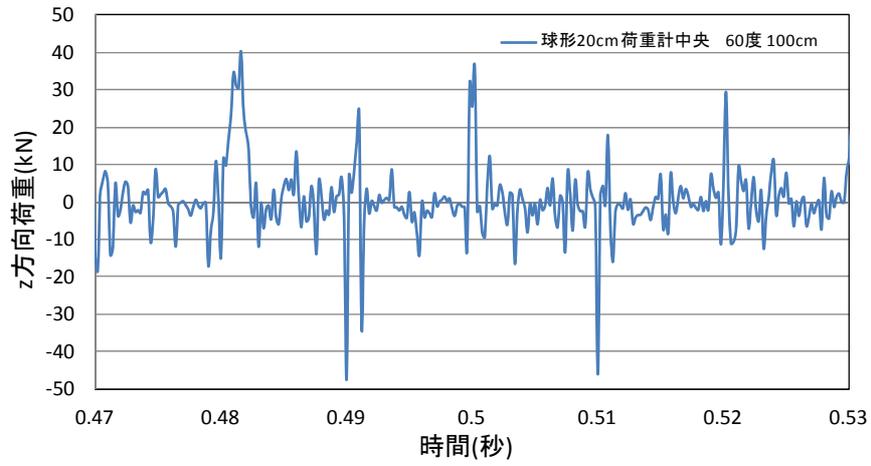


(d) レーザー変位計

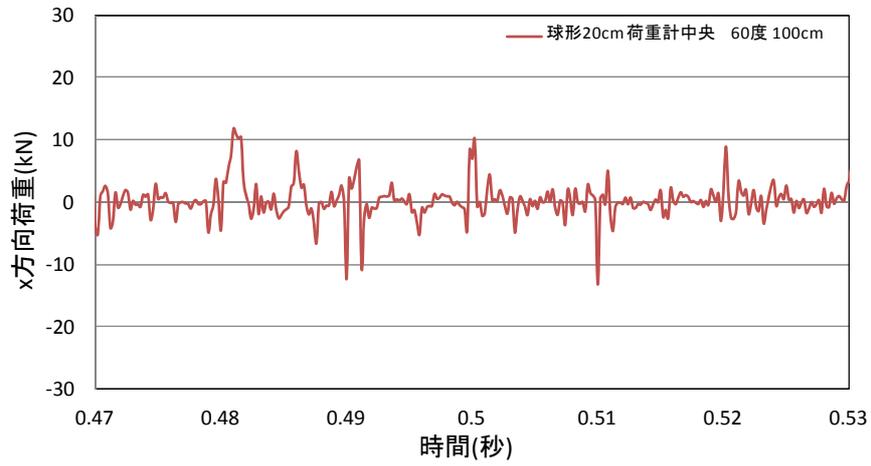


(e) 圧電型加速度計

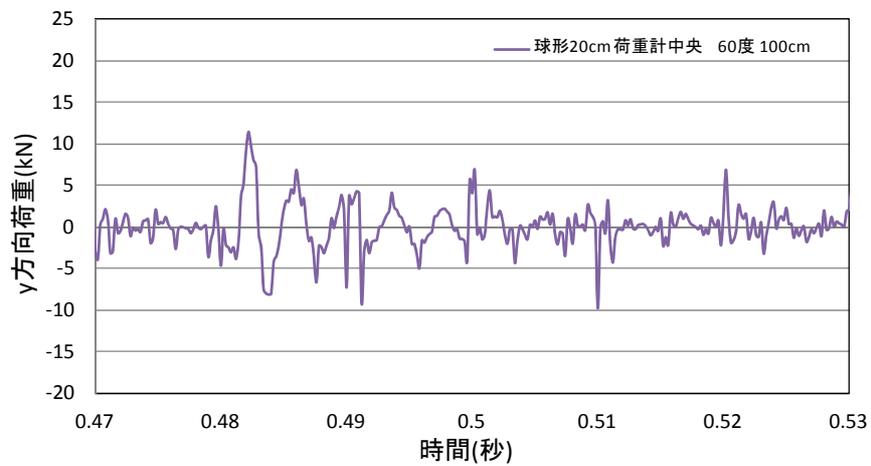
図 5.1.156 No.16 球形 20cm 直角載荷 中央載荷 引き代 70cm



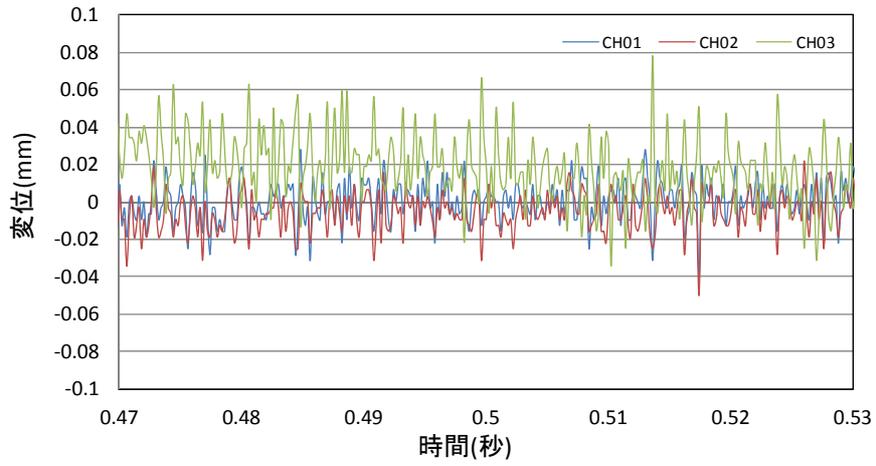
(a)衝突方向



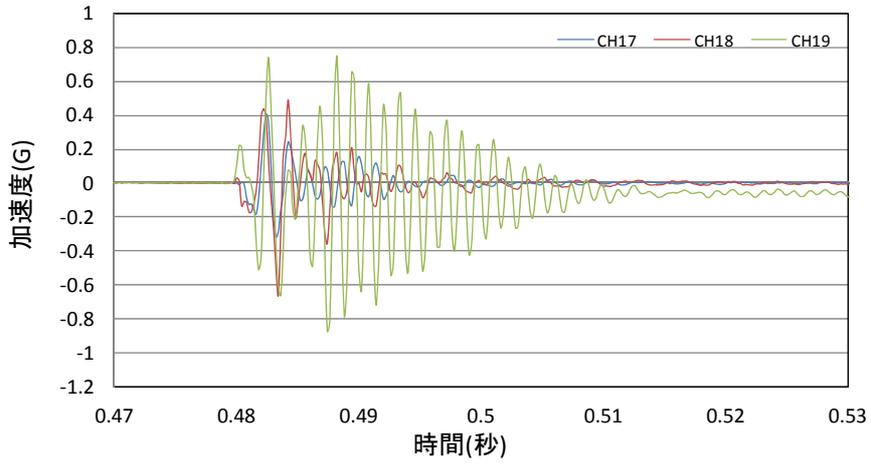
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

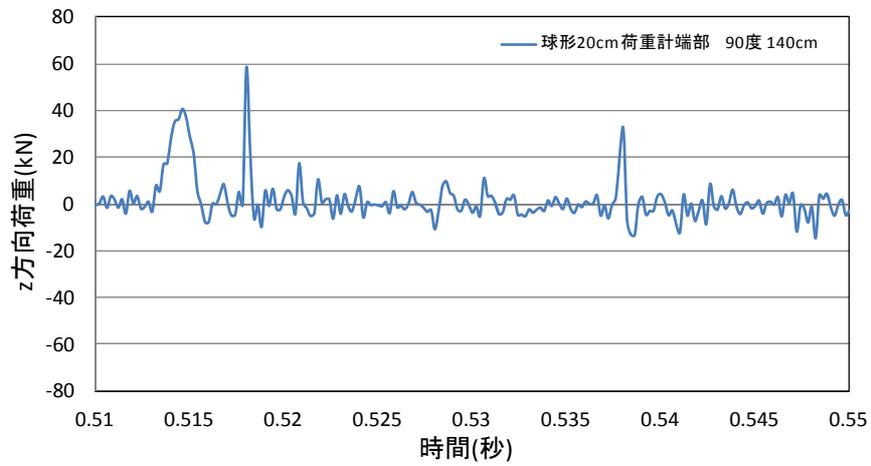


(d)レーザー変位計

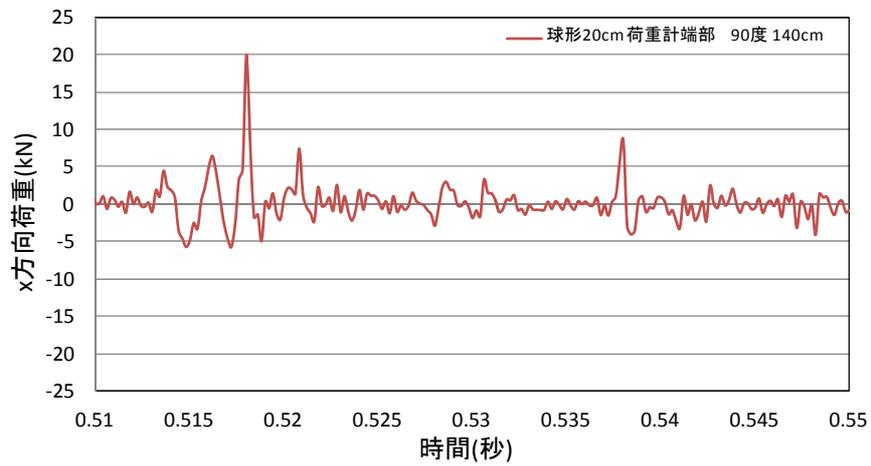


(e)圧電型加速度計

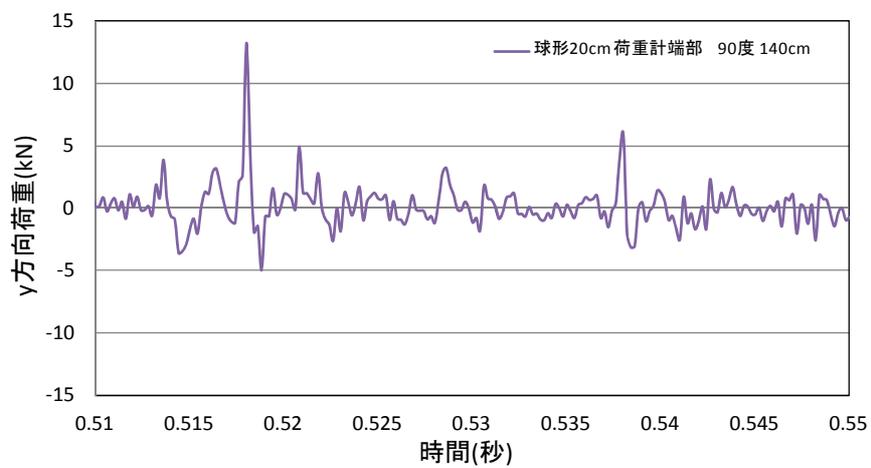
図 5.1.157 No.17 球形 20cm 中央載荷 60度入射載荷 引き代 100cm



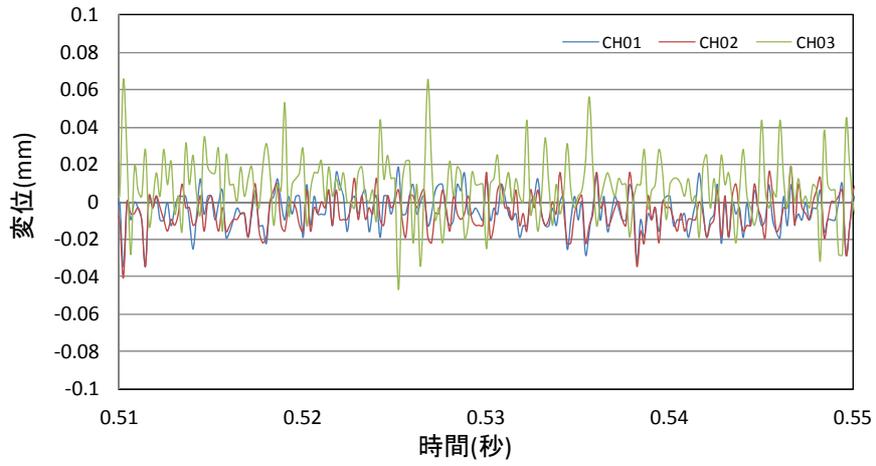
(a)衝突方向



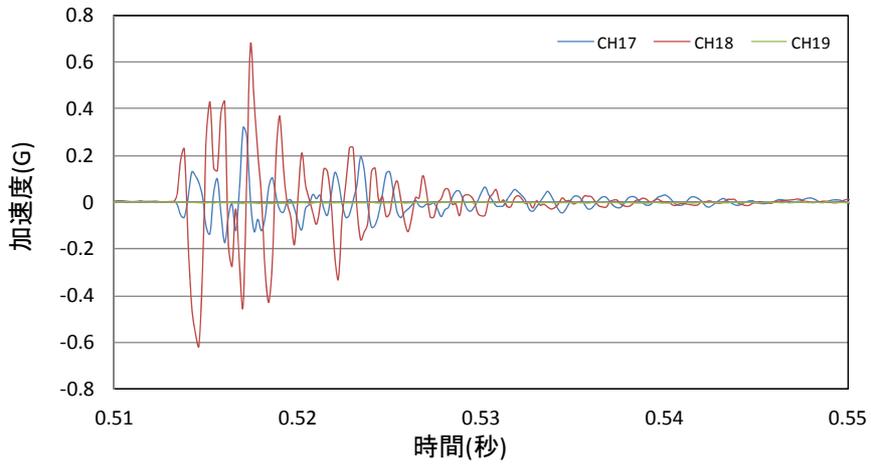
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

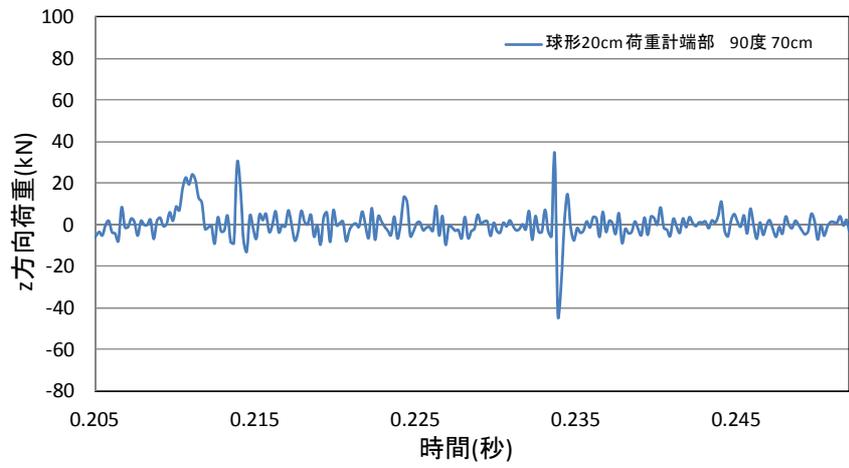


(d)レーザー変位計

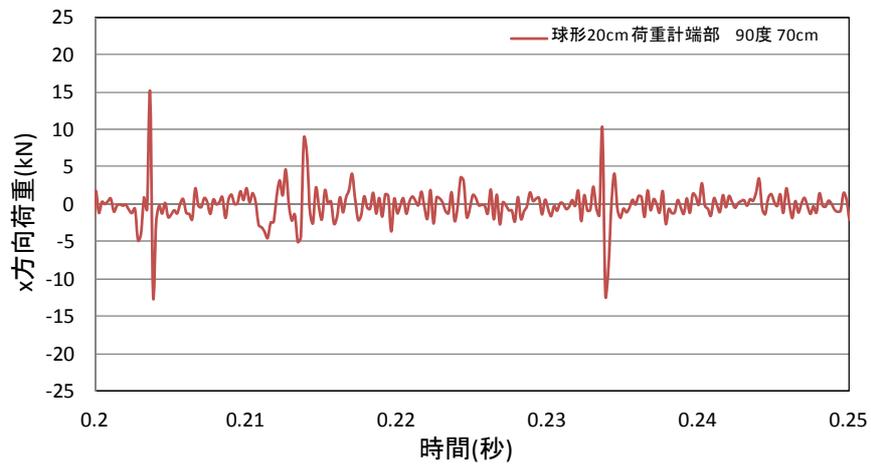


(e)圧電型加速度計

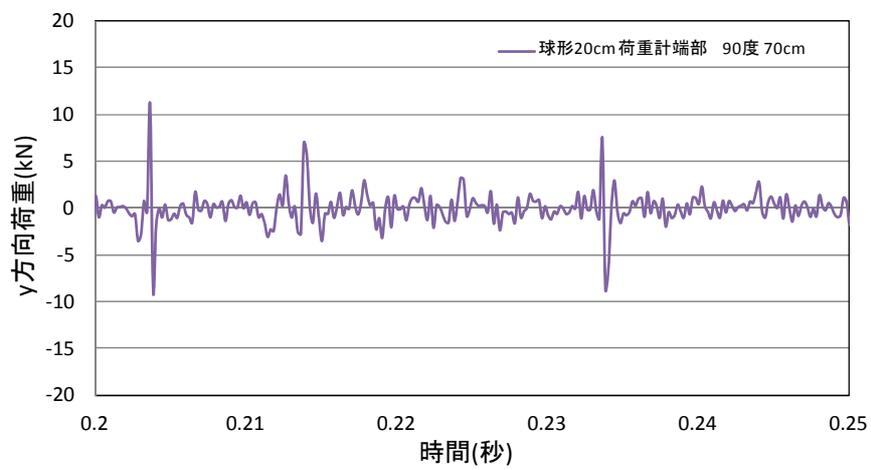
図 5.1.158 No.18 球形 20cm 端部載荷 直角載荷 引き代 140cm



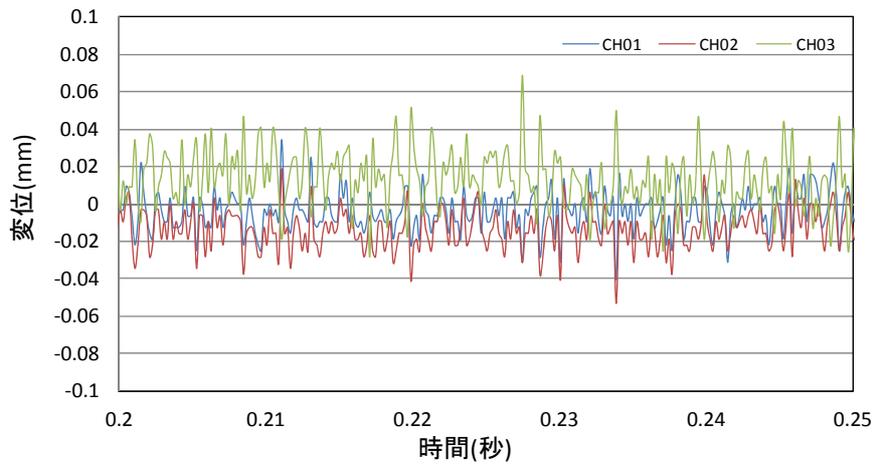
(a)衝突方向



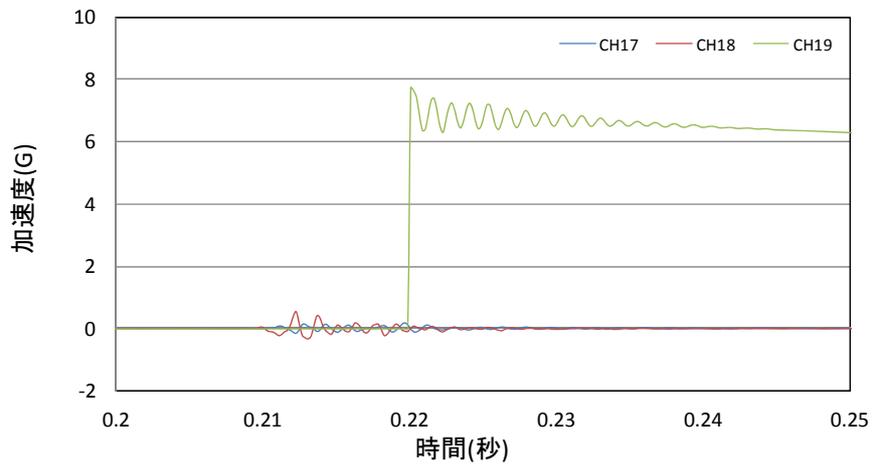
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

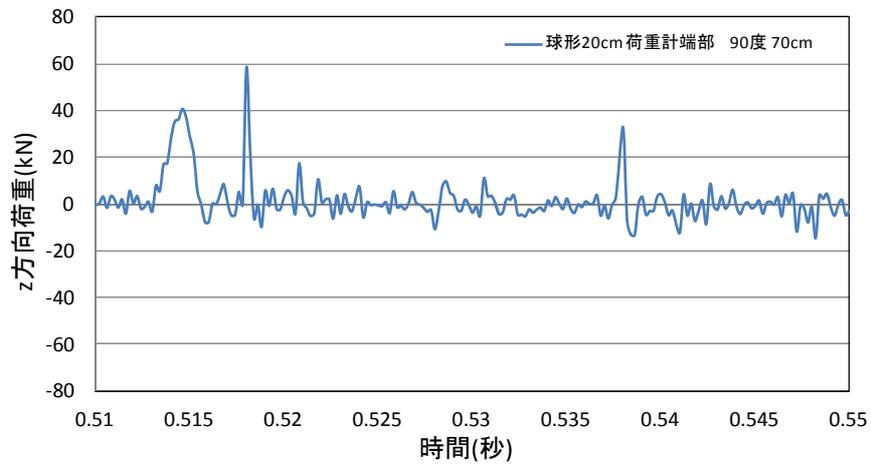


(d)レーザー変位計

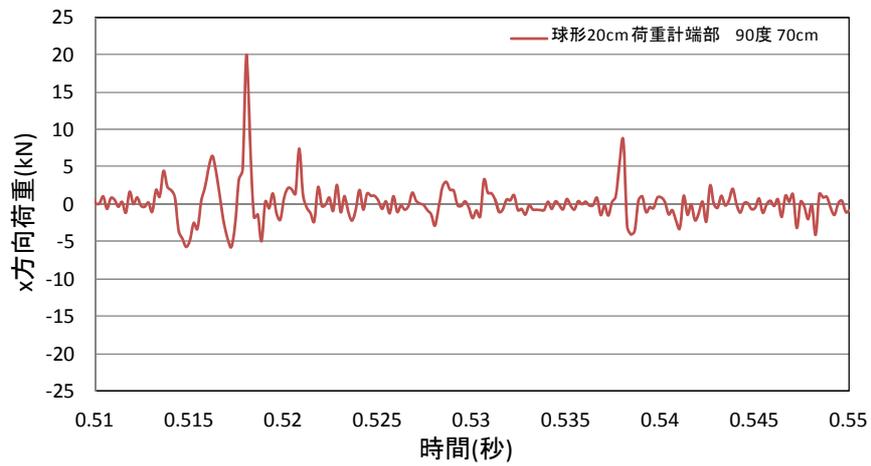


(e)圧電型加速度計

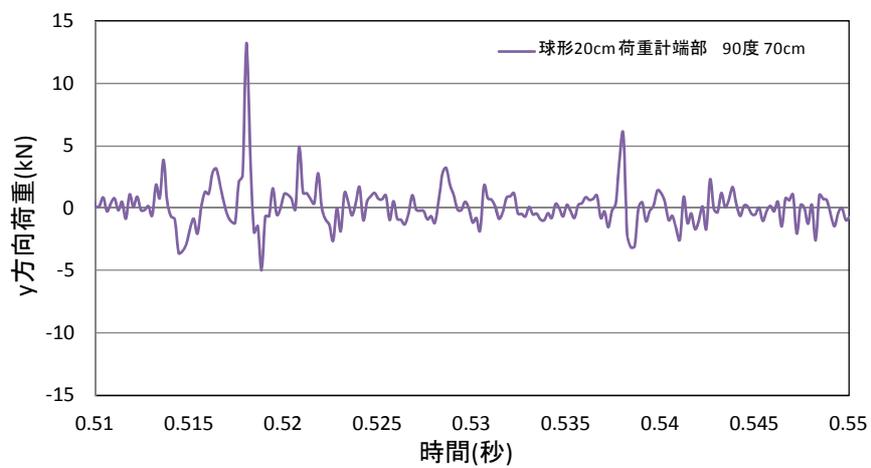
図 5.1.159 No.19 球形 20cm 端部載荷 直角載荷 引き代 70cm



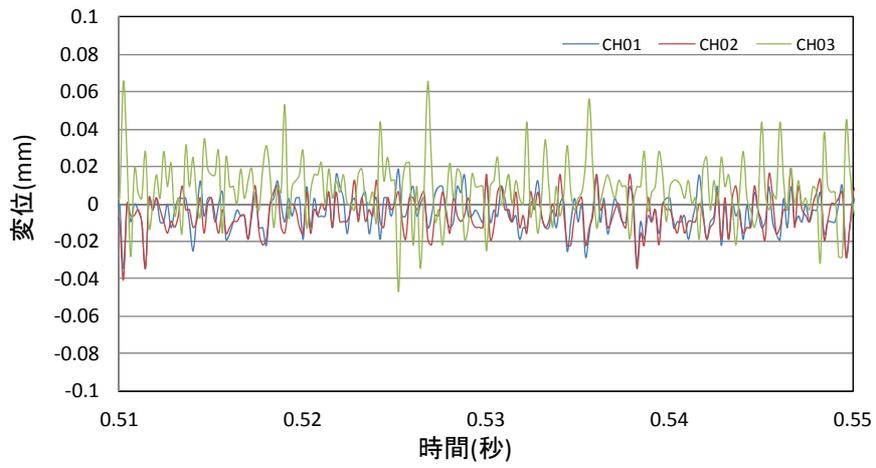
(a)衝突方向



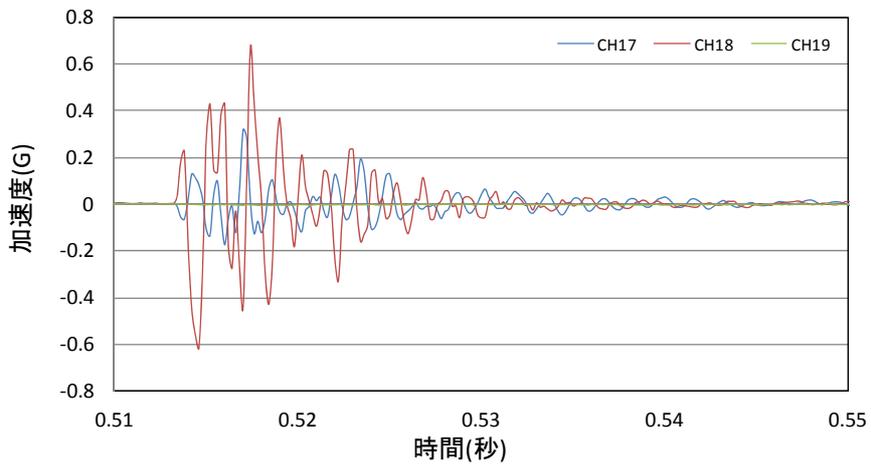
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

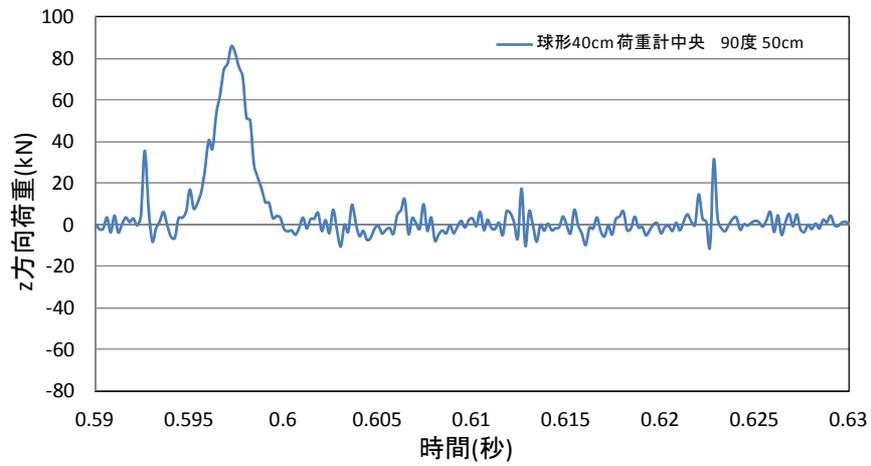


(d)レーザー変位計

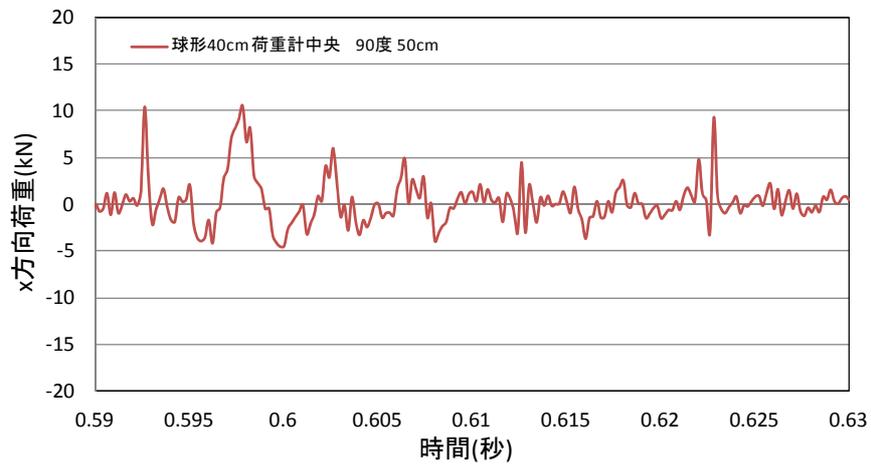


(e)圧電型加速度計

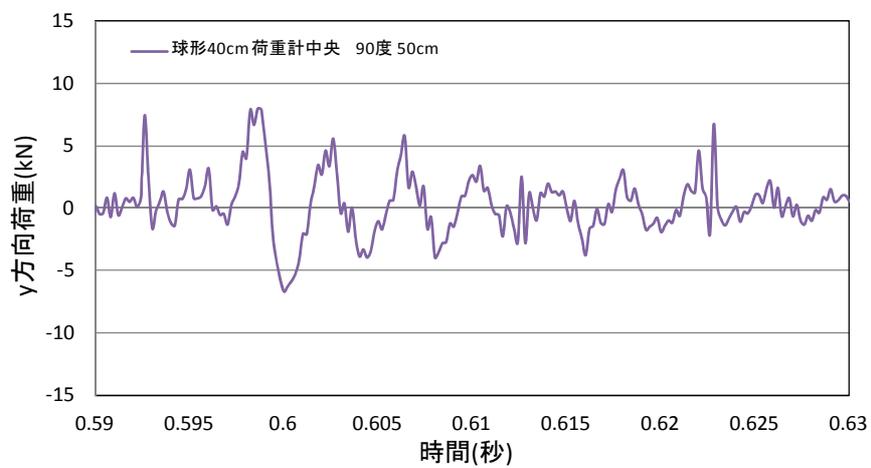
図 5.1.160 No.20 球形 20cm 端部載荷 直角載荷 引き代 70cm



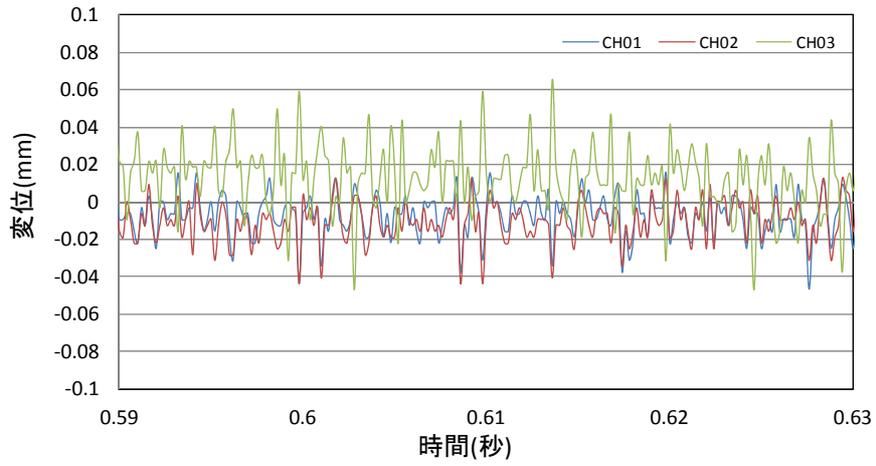
(a)衝突方向



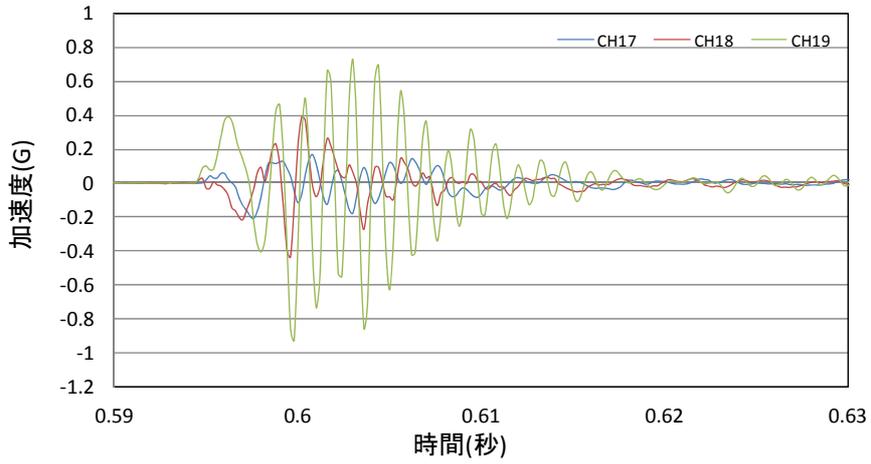
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

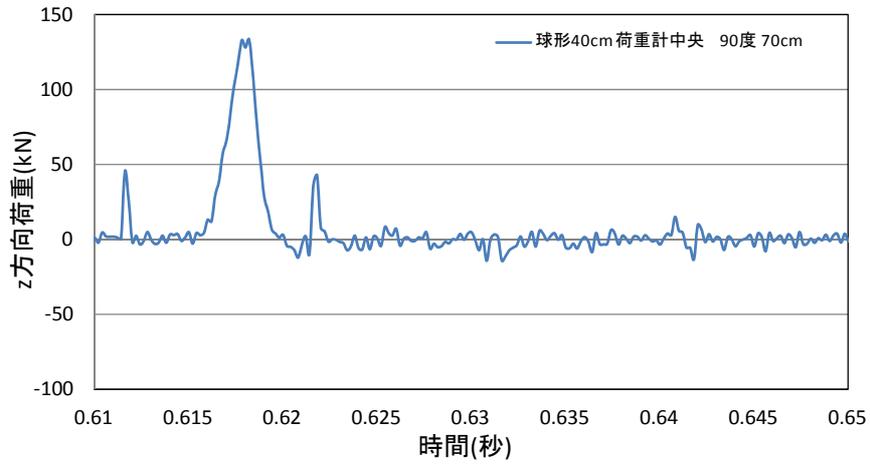


(d) レーザー変位計

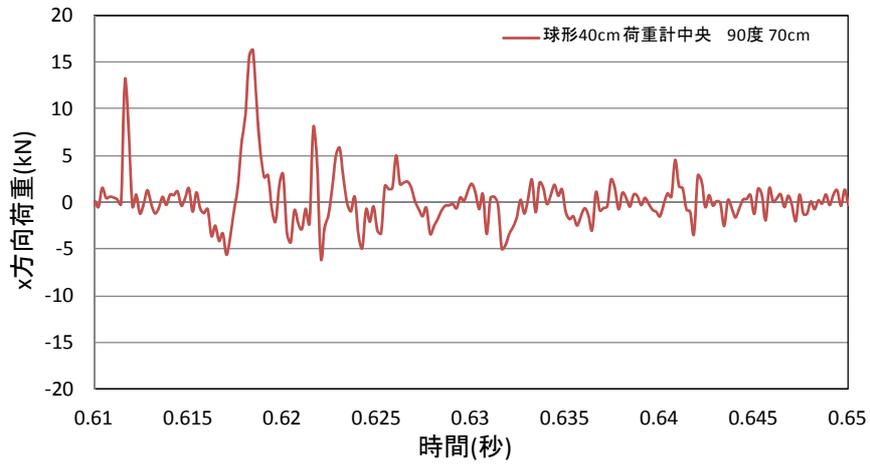


(e) 圧電型加速度計

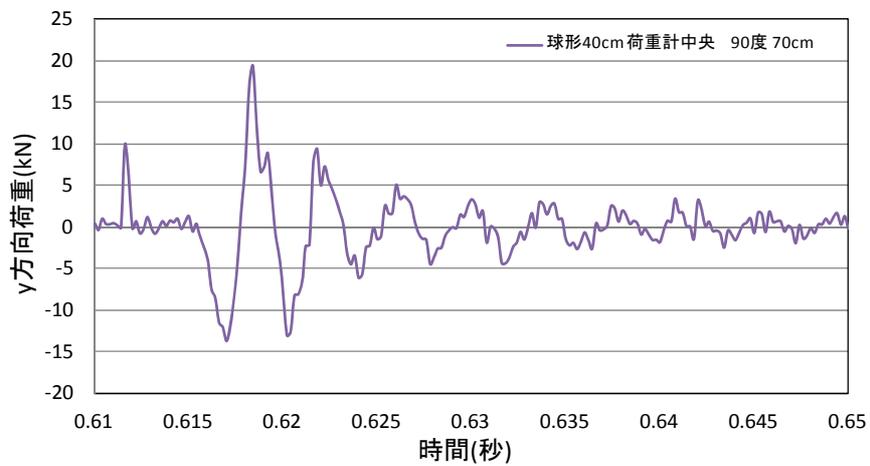
図 5.1.161 No.21 球形 40cm 中央載荷 直角載荷 引き代 50cm



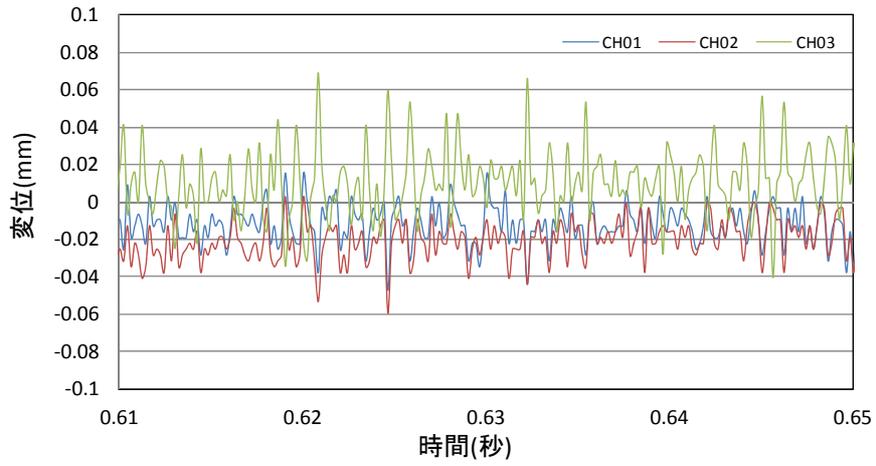
(a)衝突方向



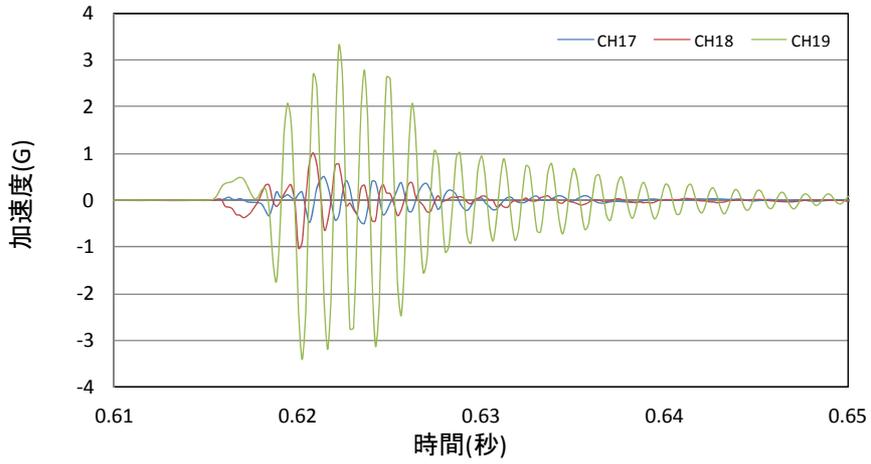
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

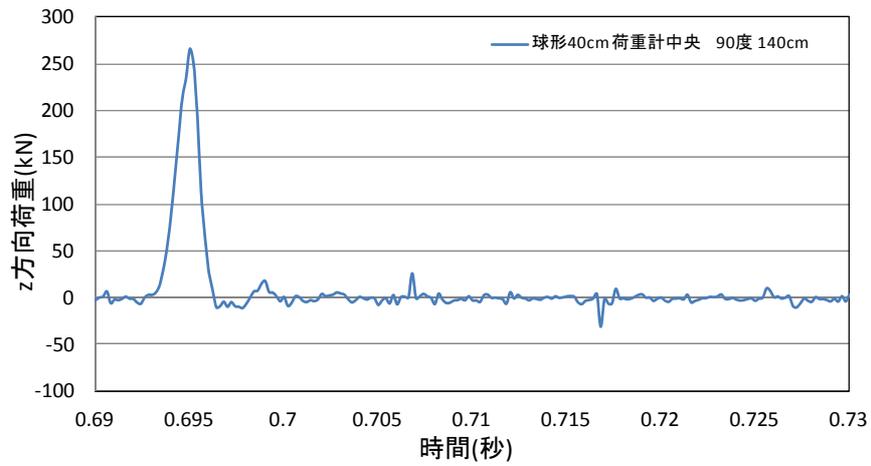


(d)レーザー変位計

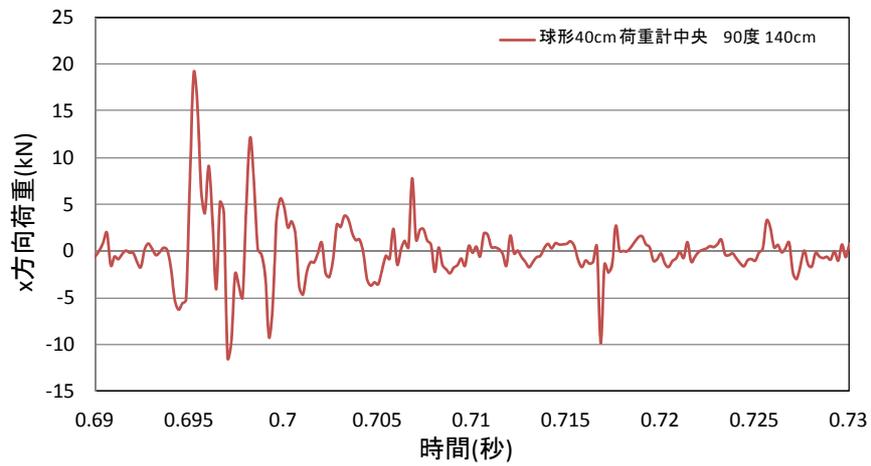


(e)圧電型加速度計

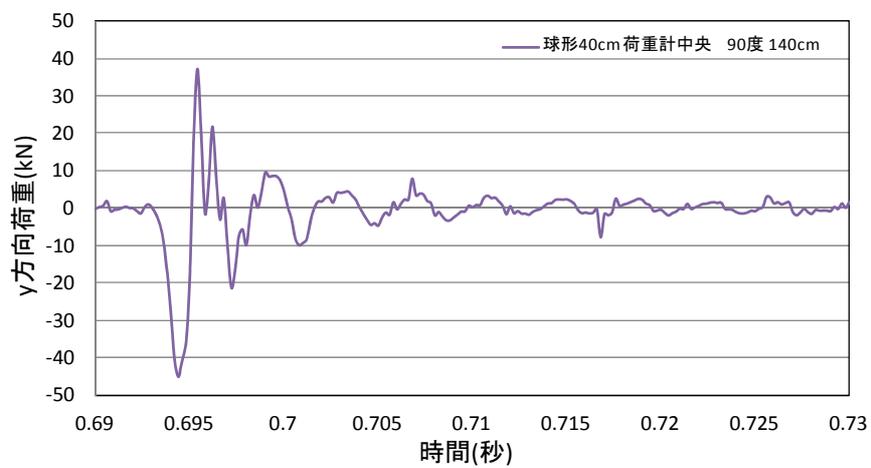
図 5.1.162 No.22 球形 40cm 中央載荷 直角載荷 引き代 70cm



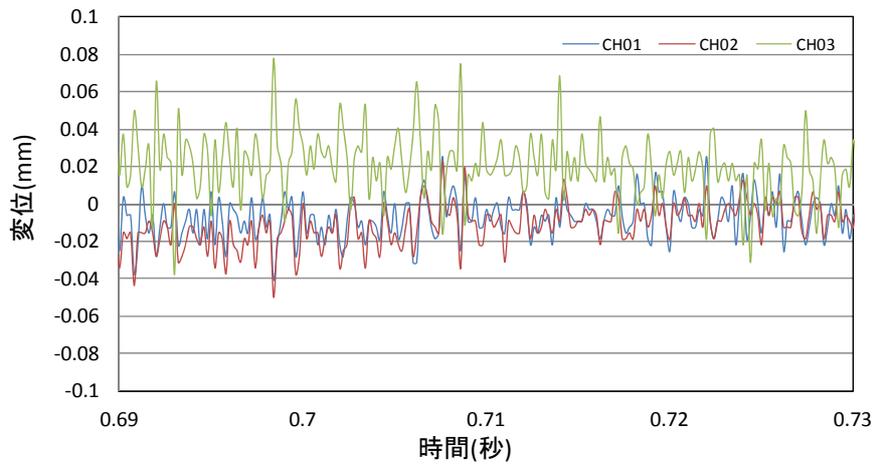
(a)衝突方向



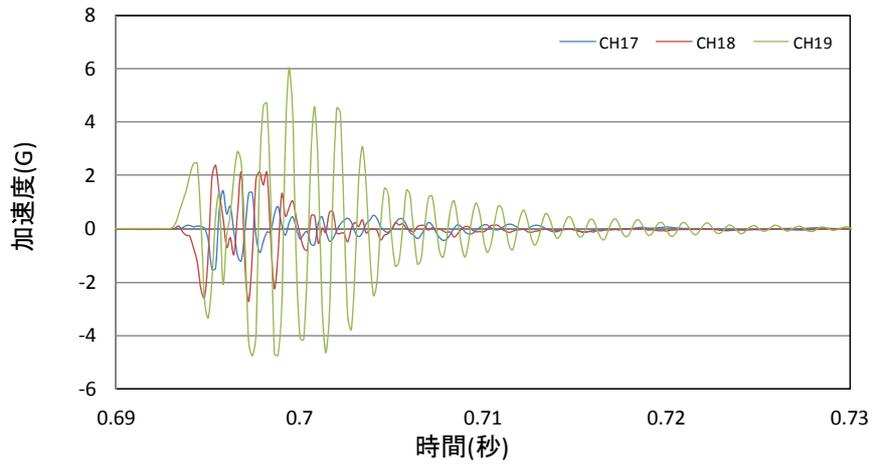
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

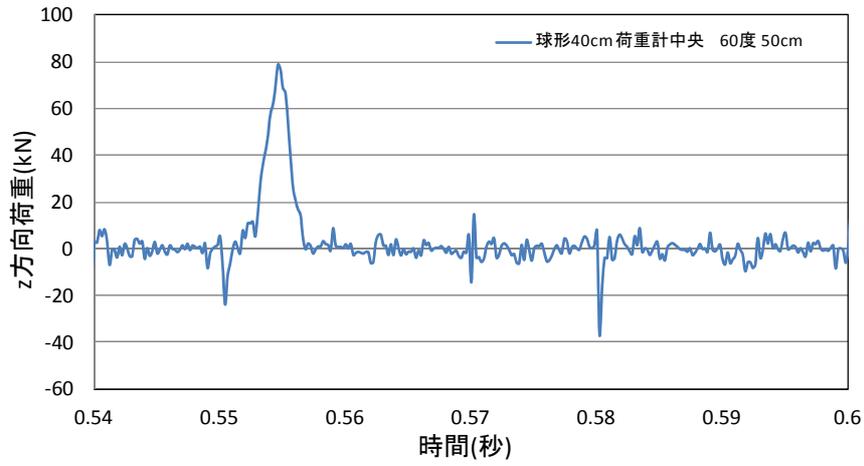


(d) レーザー変位計

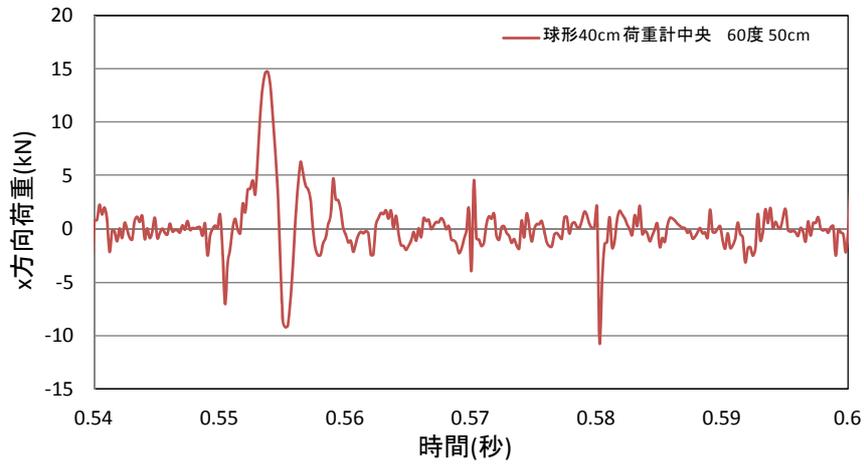


(e) 圧電型加速度計

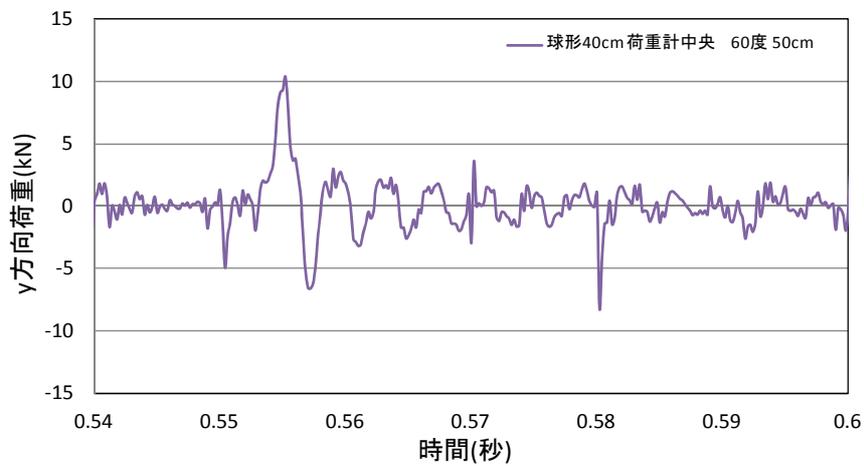
図 5.1.163 No.23 球形 40cm 中央載荷 直角載荷 引き代 140cm



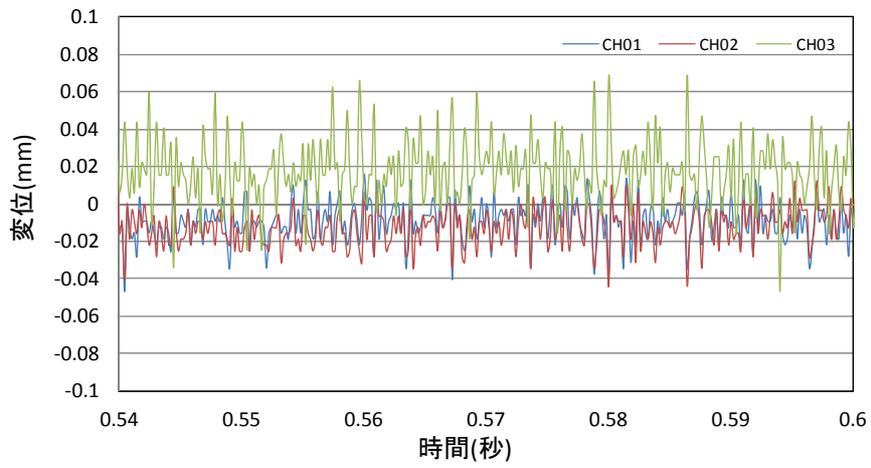
(a)衝突方向



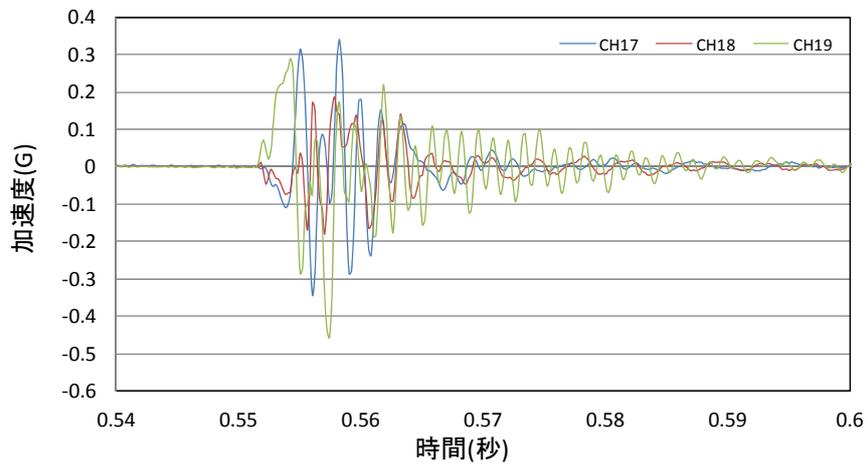
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

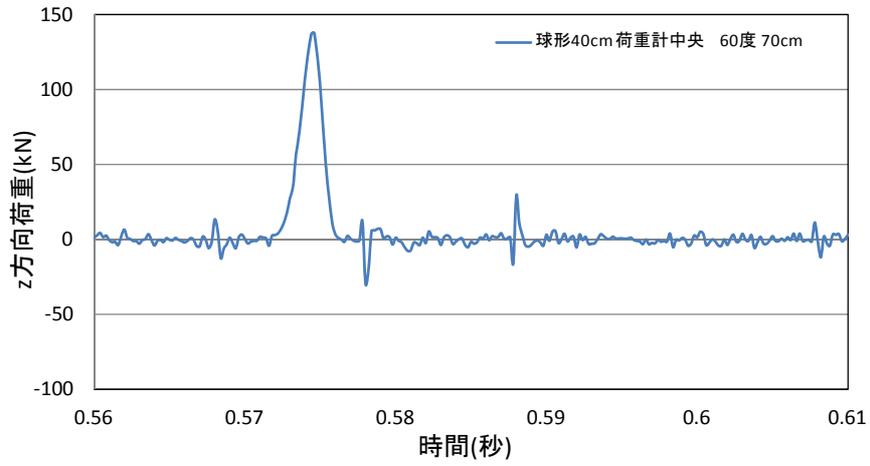


(d)レーザー変位計

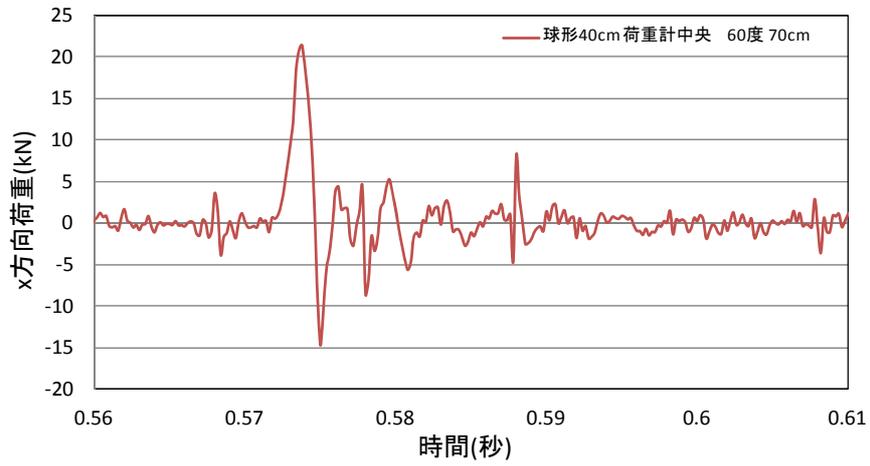


(e)圧電型加速度計

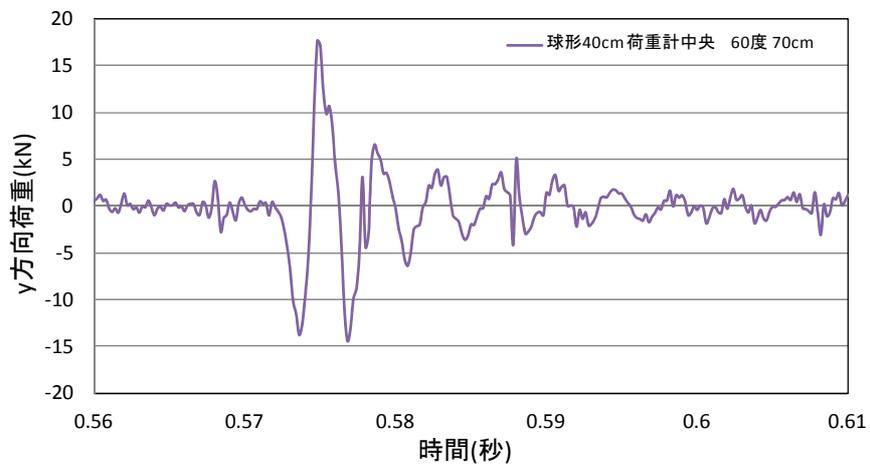
図 5.1.164 No.24 球形 40cm 中央載荷 60度入射載荷 引き代 50cm



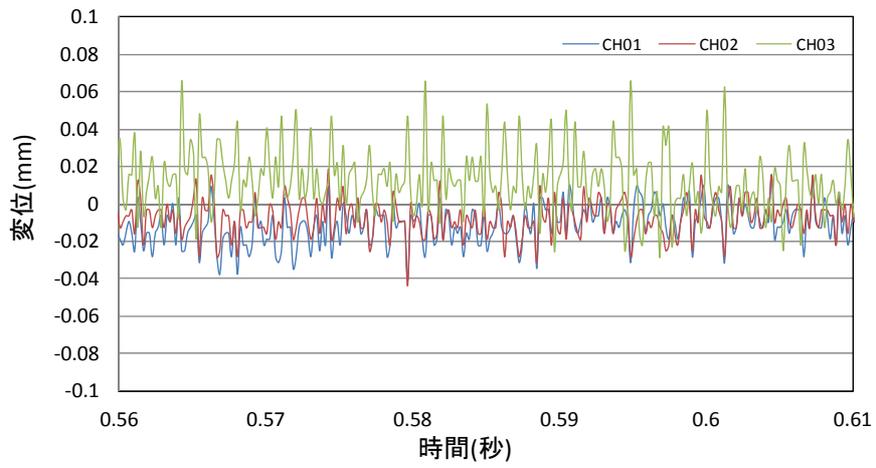
(a)衝突方向



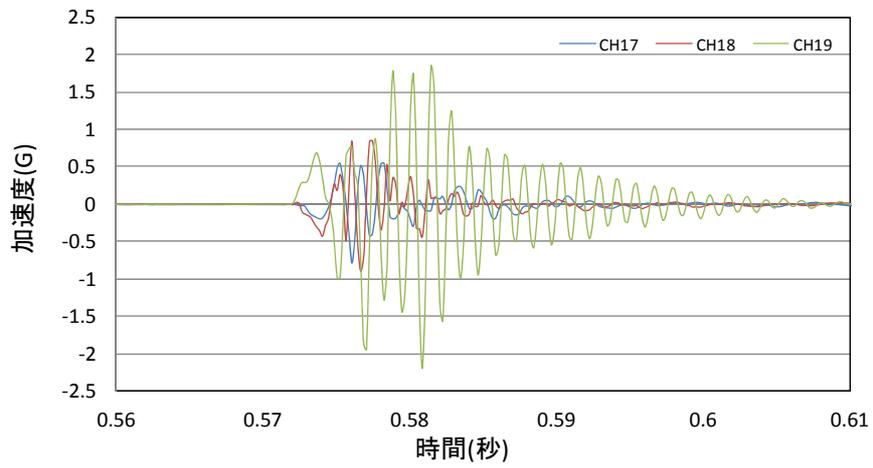
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

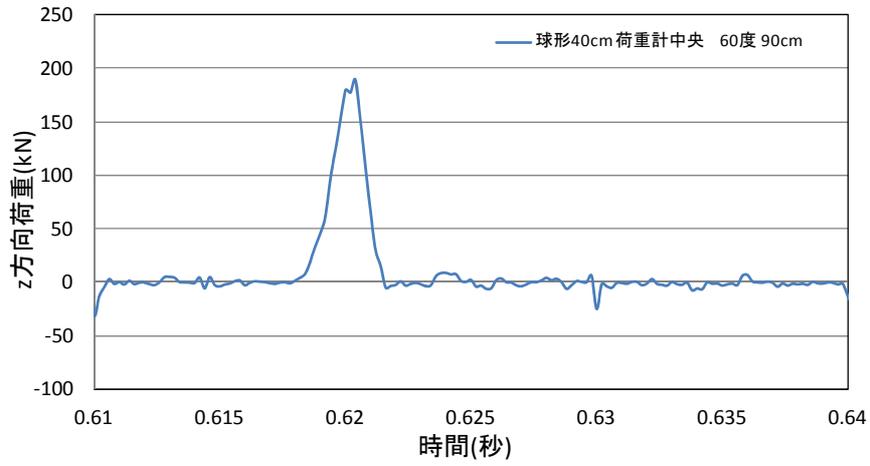


(d) レーザー変位計

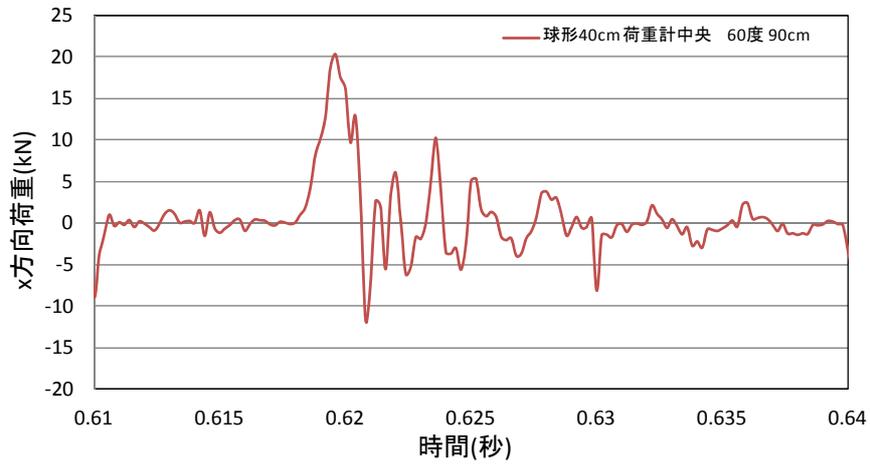


(e) 圧電型加速度計

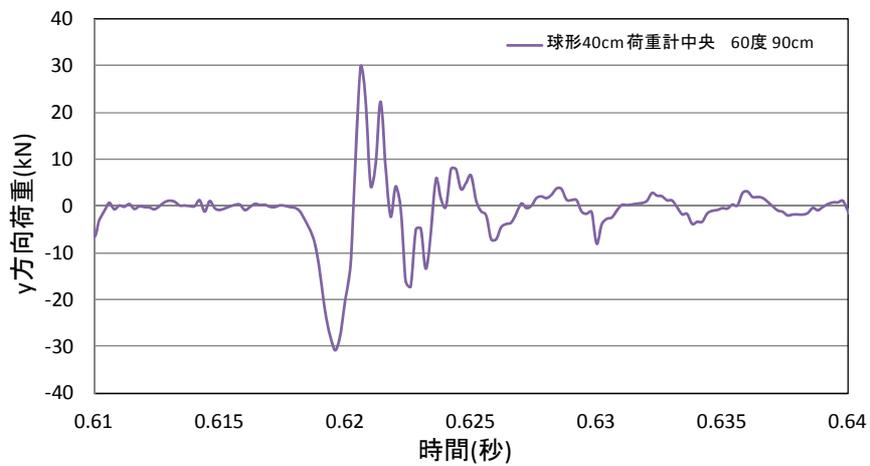
図 5.1.165 No.25 球形 40cm 中央載荷 60度入射載荷 引き代 70cm



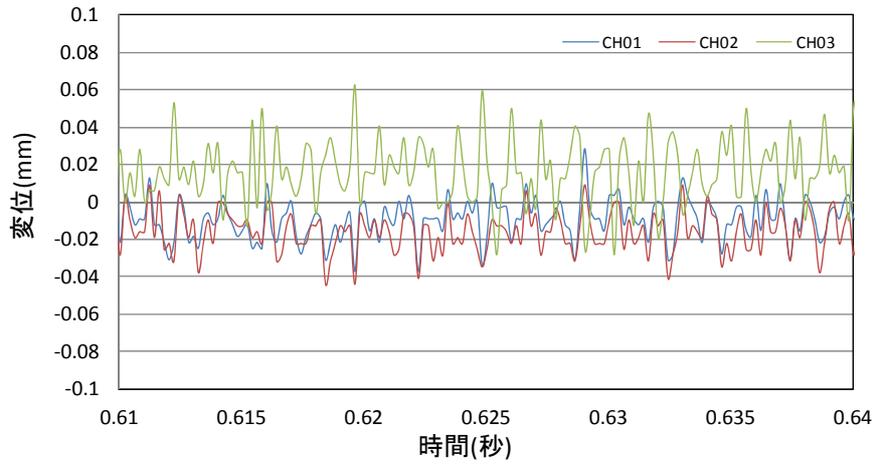
(a)衝突方向



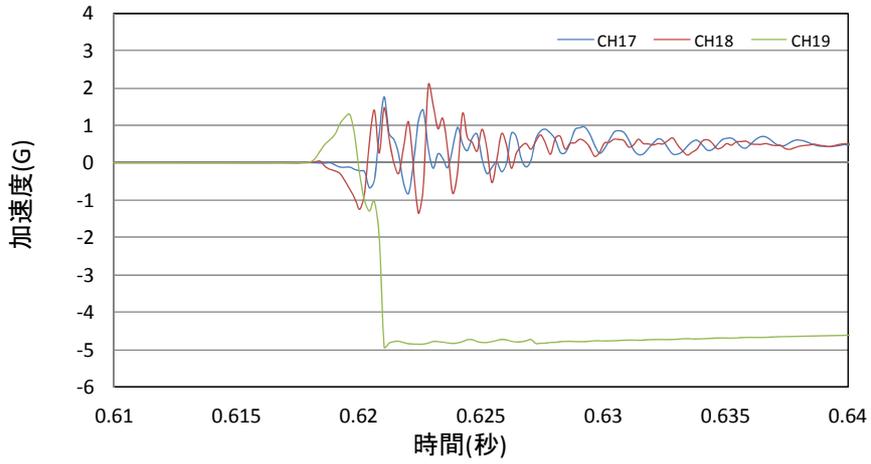
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

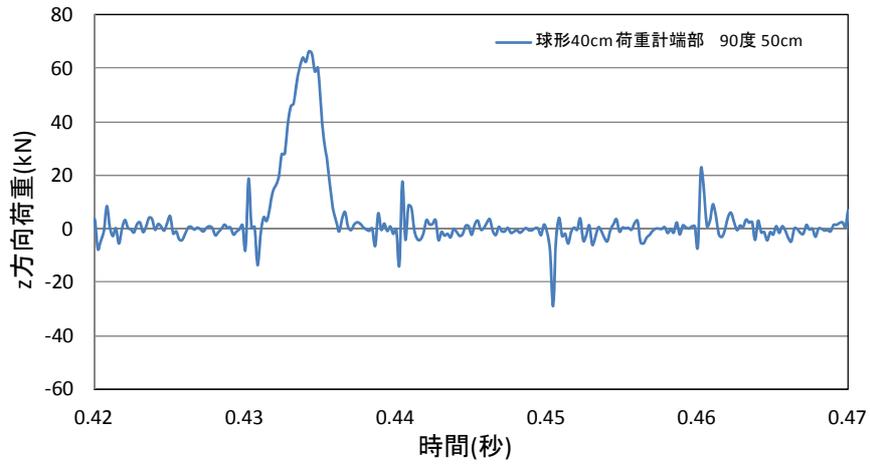


(d)レーザー変位計

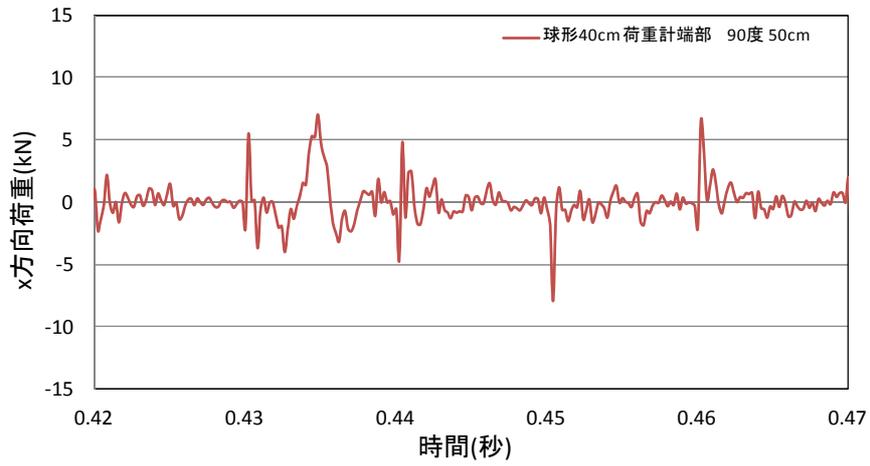


(e)圧電型加速度計

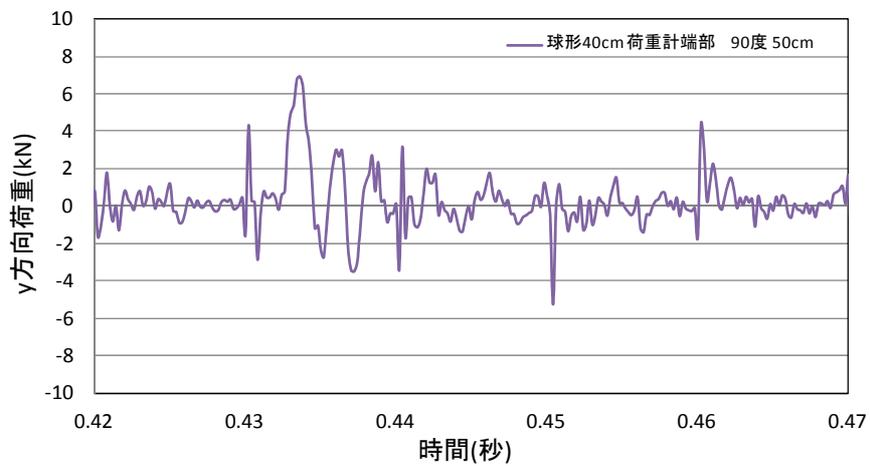
図 5.1.166 No.26 球形 40cm 中央載荷 60度入射載荷 引き代 90cm



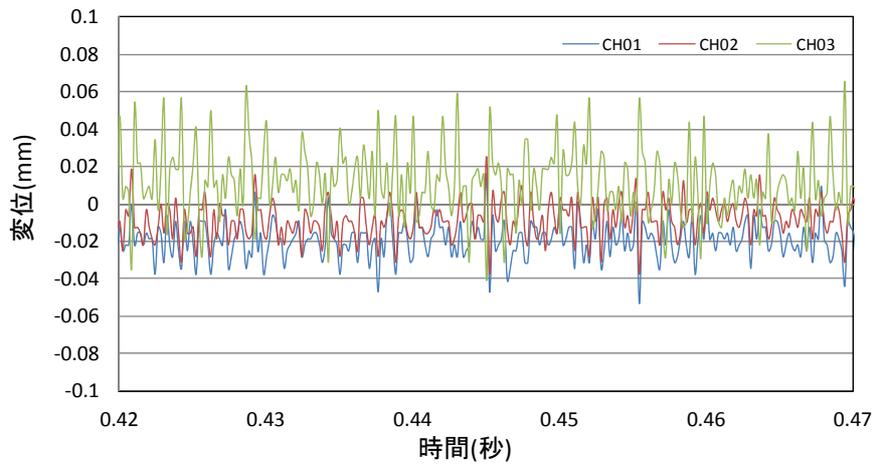
(a)衝突方向



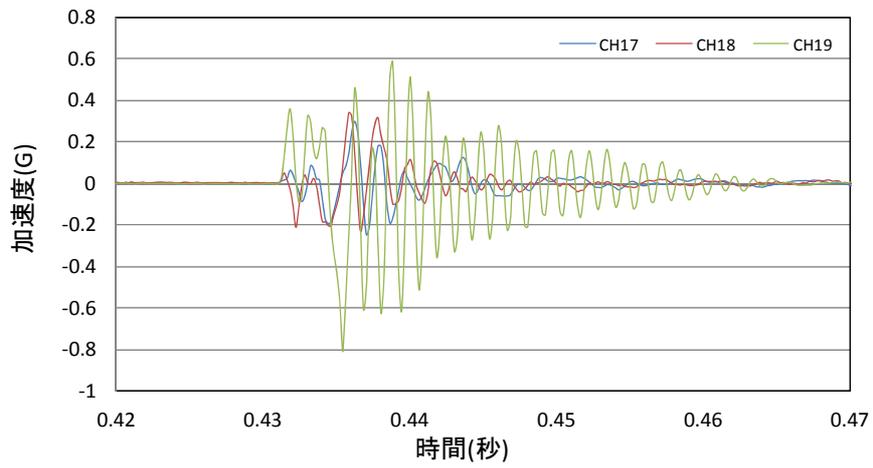
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

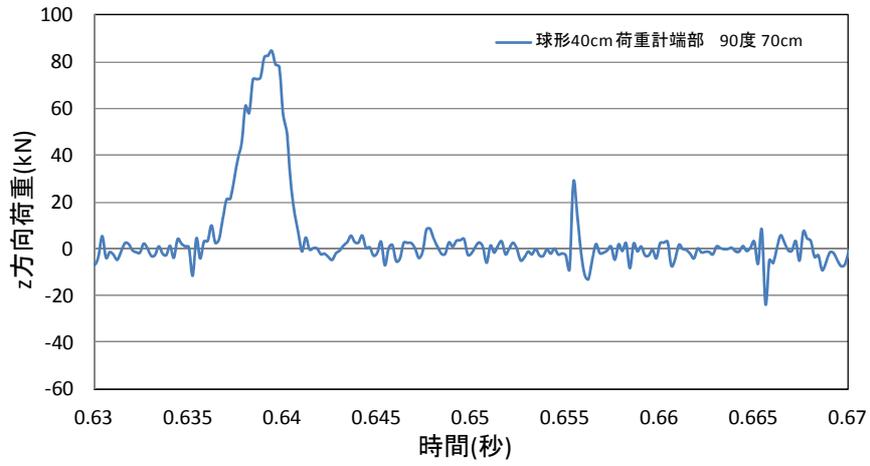


(d)レーザー変位計

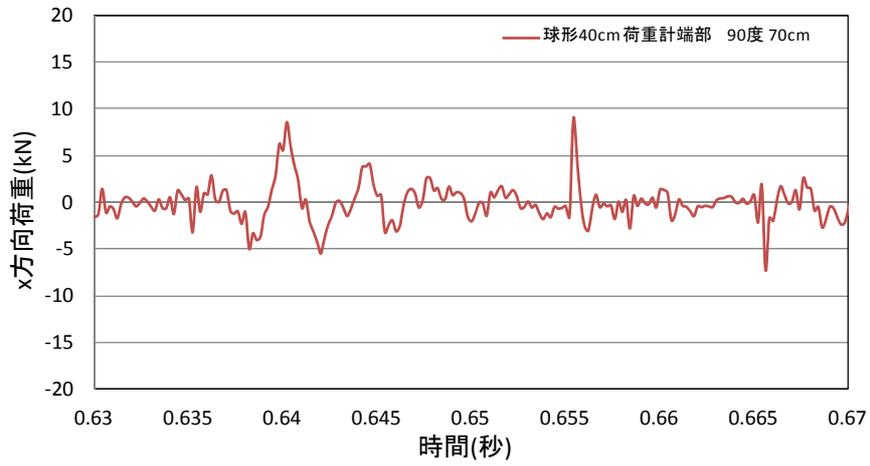


(e)圧電型加速度計

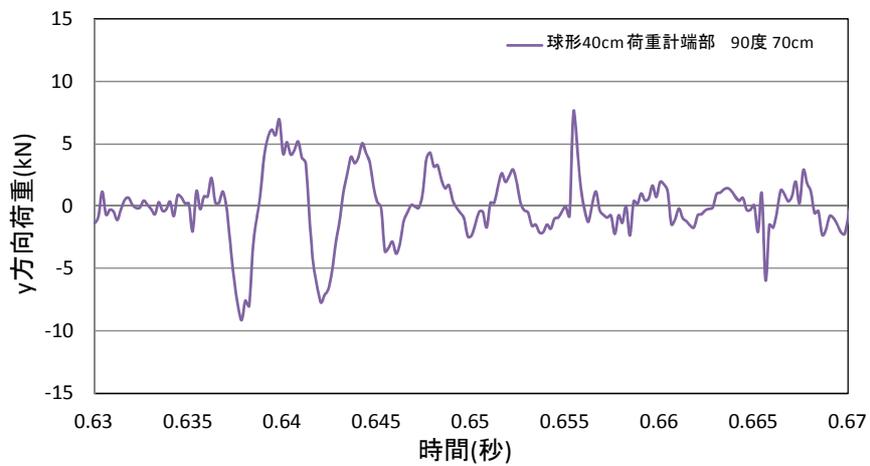
図 5.1.167 No.27 球形 40cm 端部載荷 直角載荷 引き代 50cm



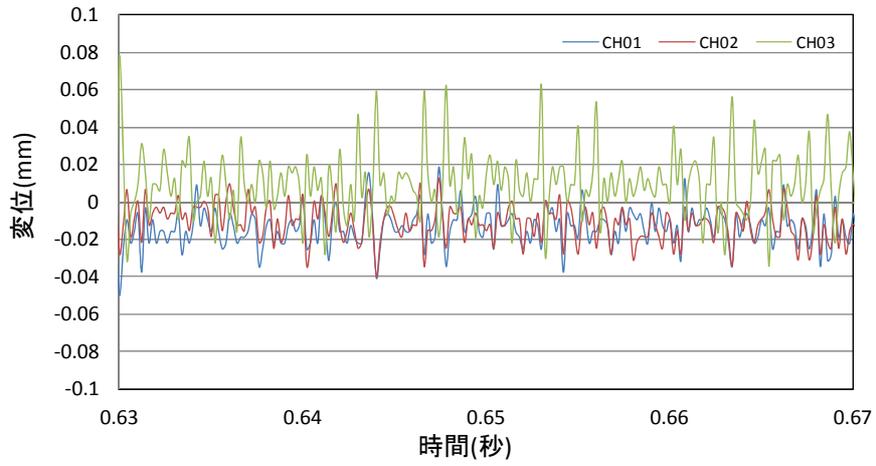
(a)衝突方向



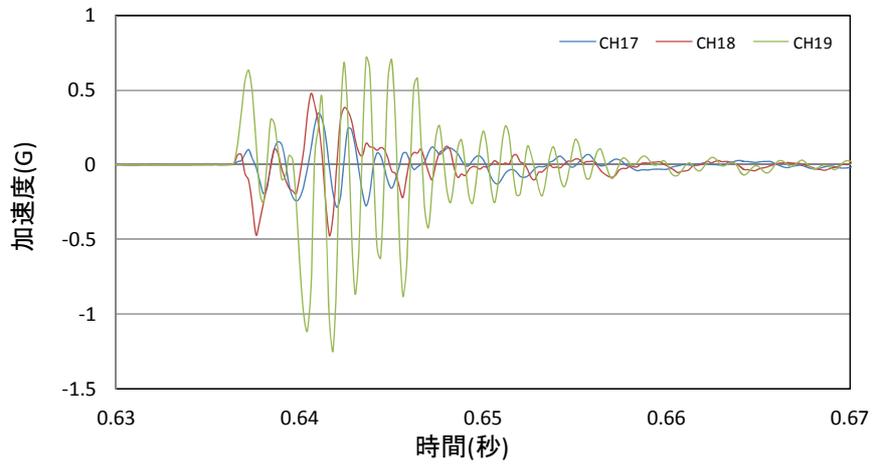
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

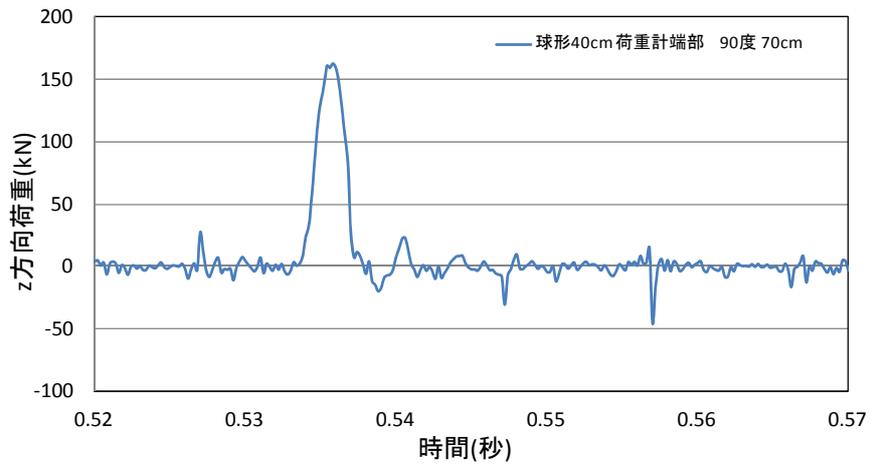


(d) レーザー変位計

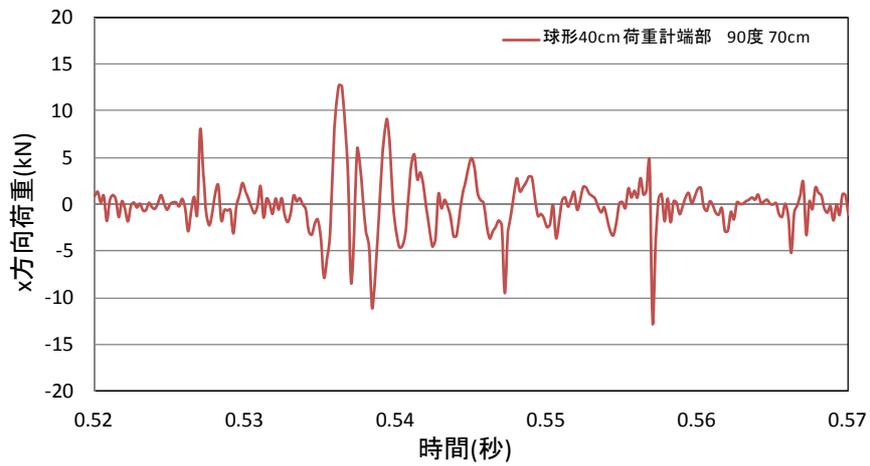


(e) 圧電型加速度計

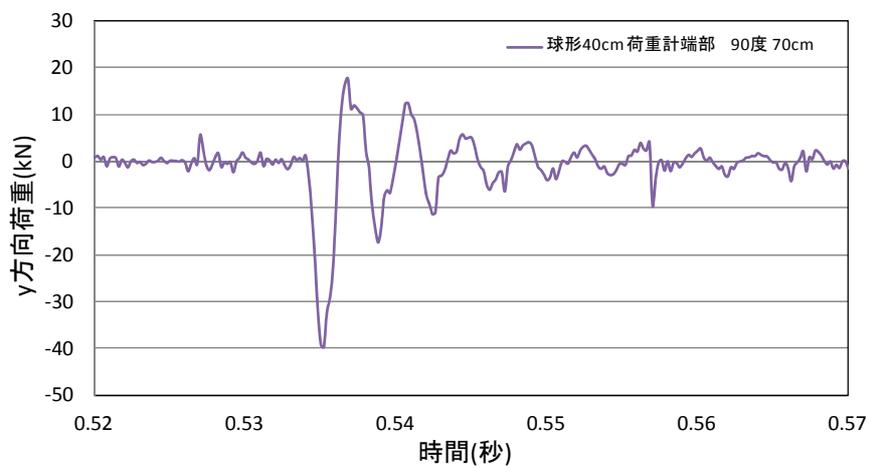
図 5.1.168 No.28 球形 40cm 端部載荷 直角載荷 引き代 70cm



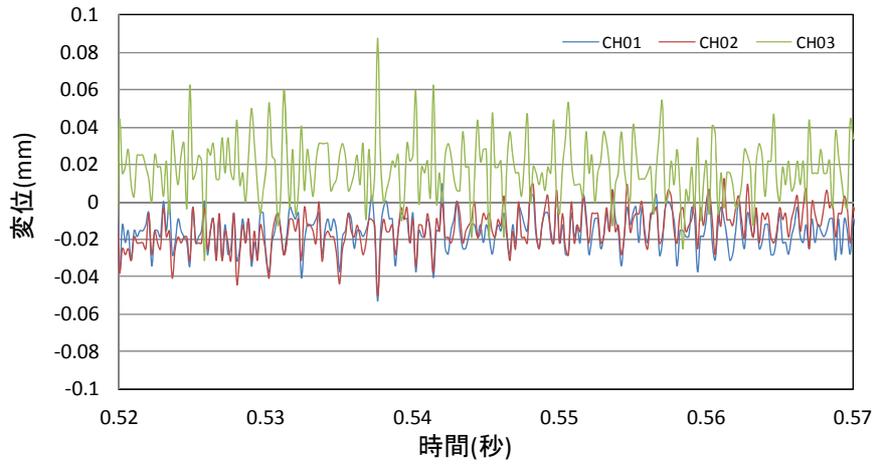
(a)衝突方向



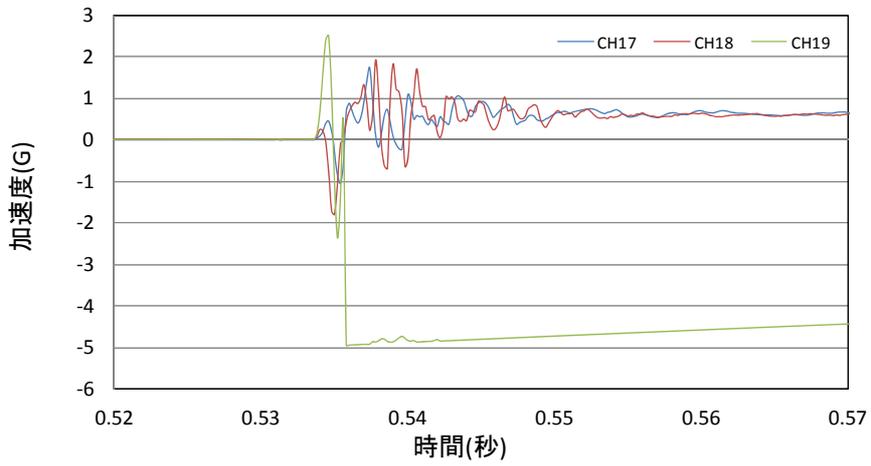
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

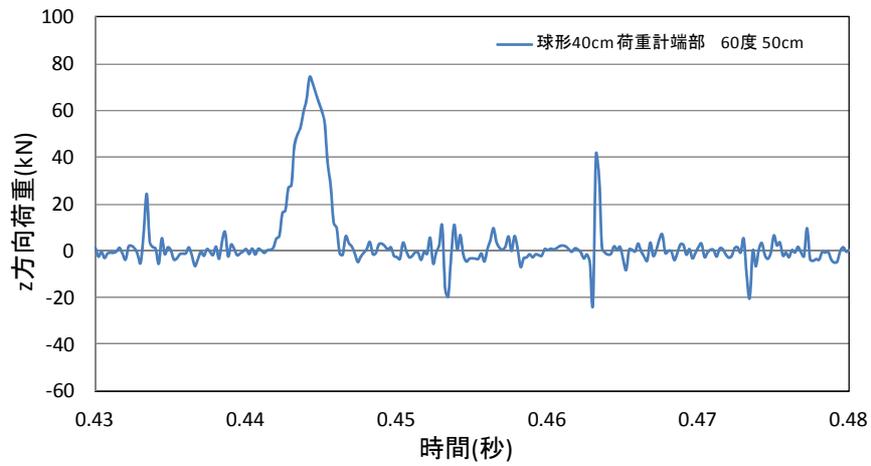


(d)レーザー変位計

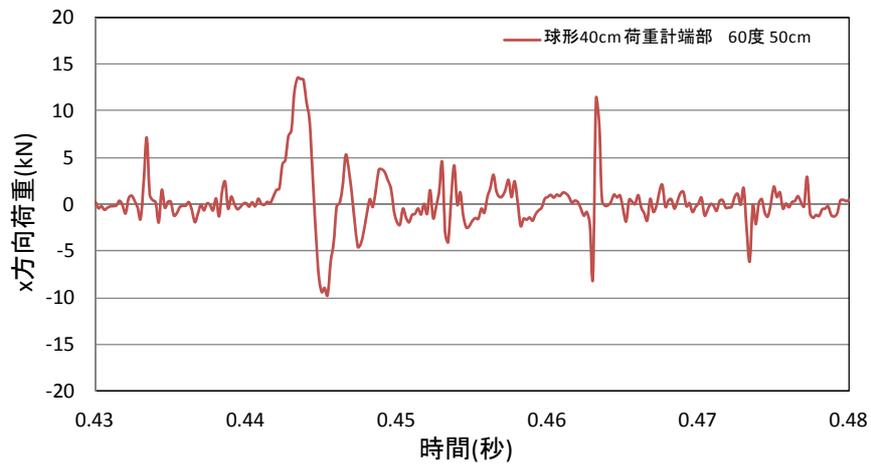


(e)圧電型加速度計

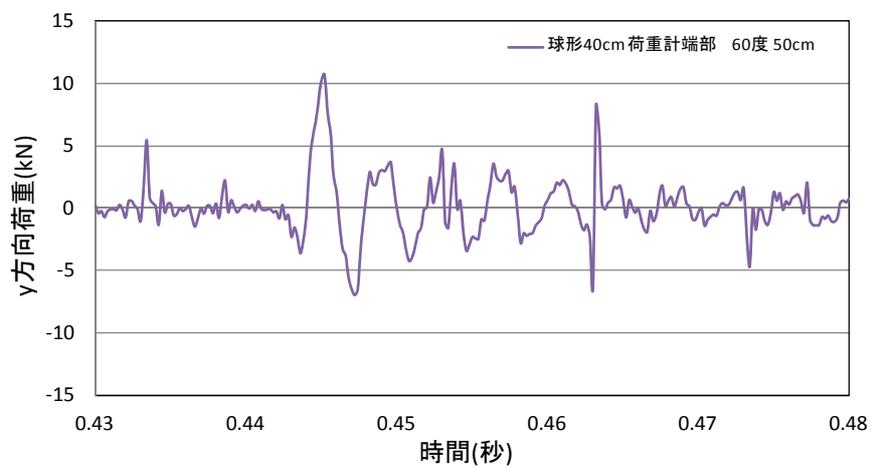
図 5.1.169 No.29 球形 40cm 端部載荷 直角載荷 引き代 70cm



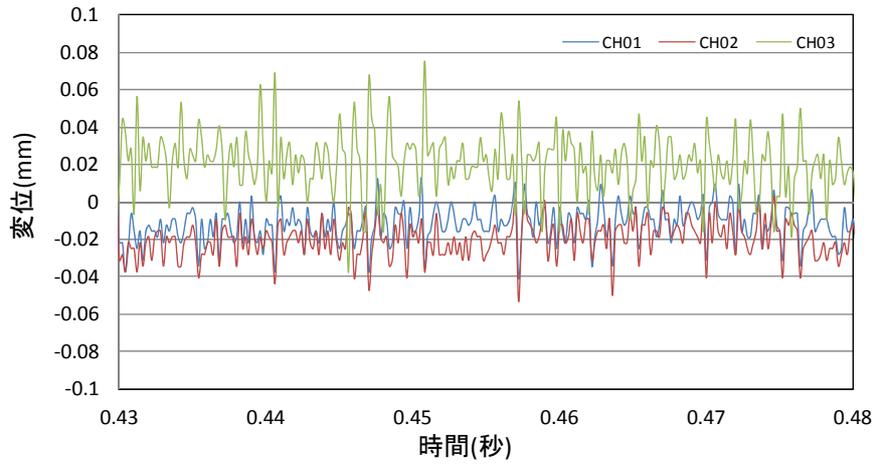
(a)衝突方向



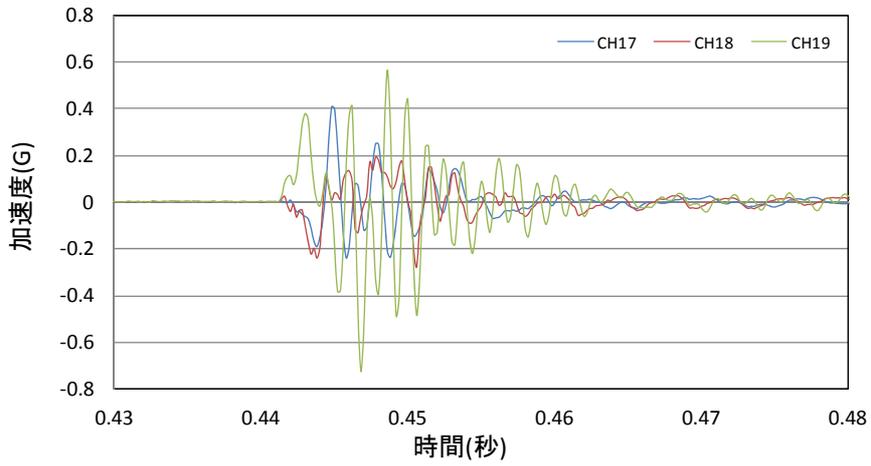
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

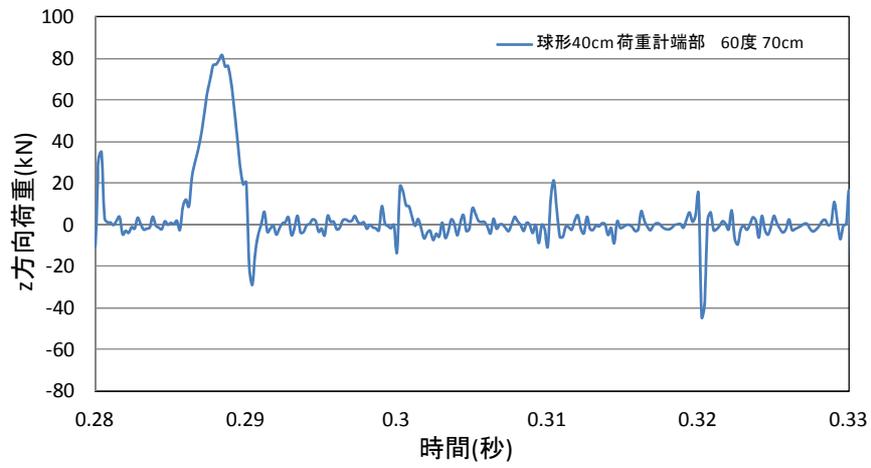


(d)レーザー変位計

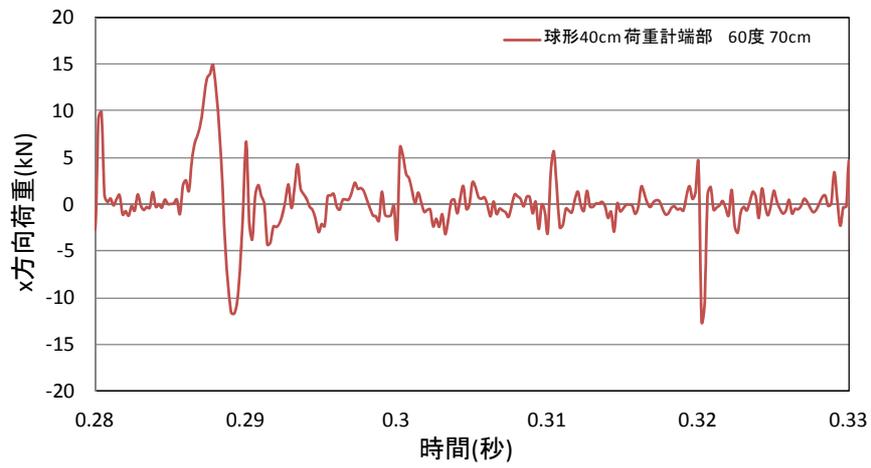


(e)圧電型加速度計

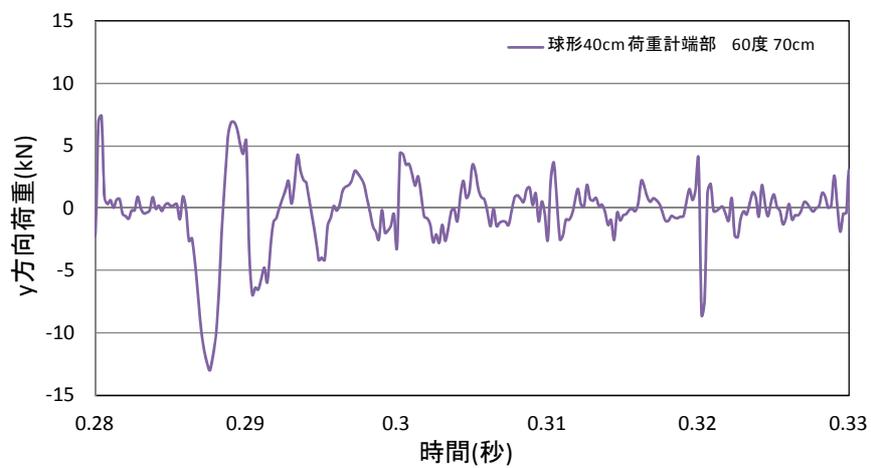
図 5.1.170 No.30 球形 40cm 端部载荷 60度入射载荷 引き代 50cm



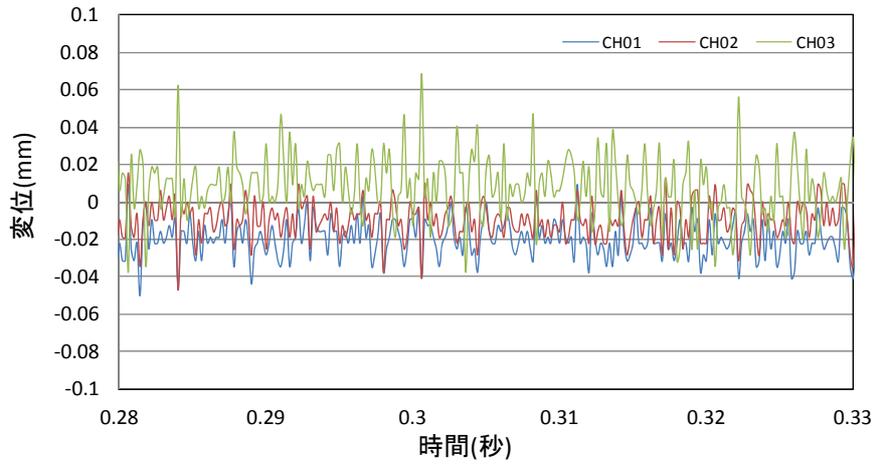
(a)衝突方向



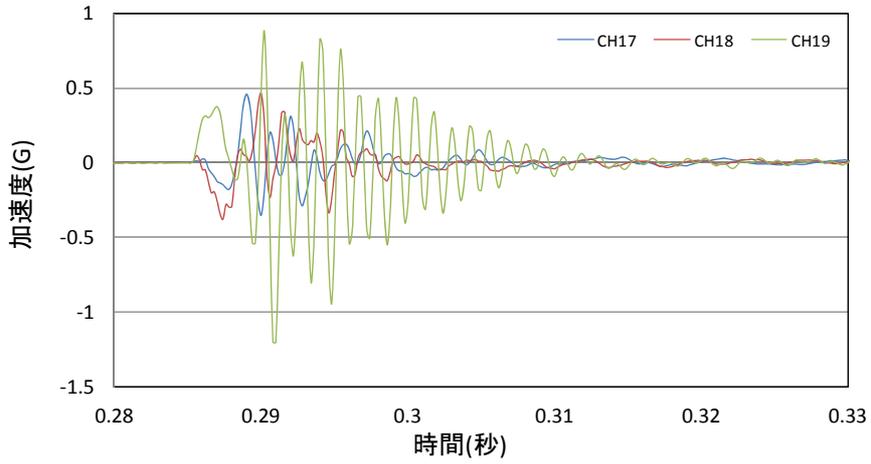
(b)衝突直交方向



(c)上下方向

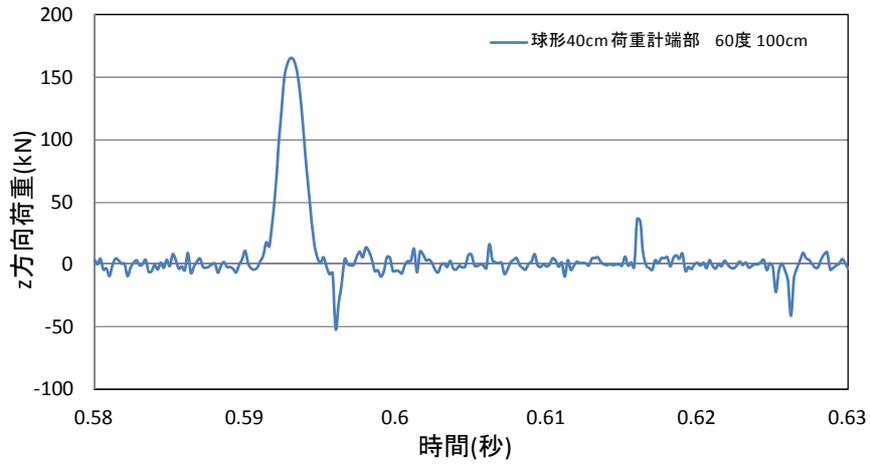


(d)レーザー変位計

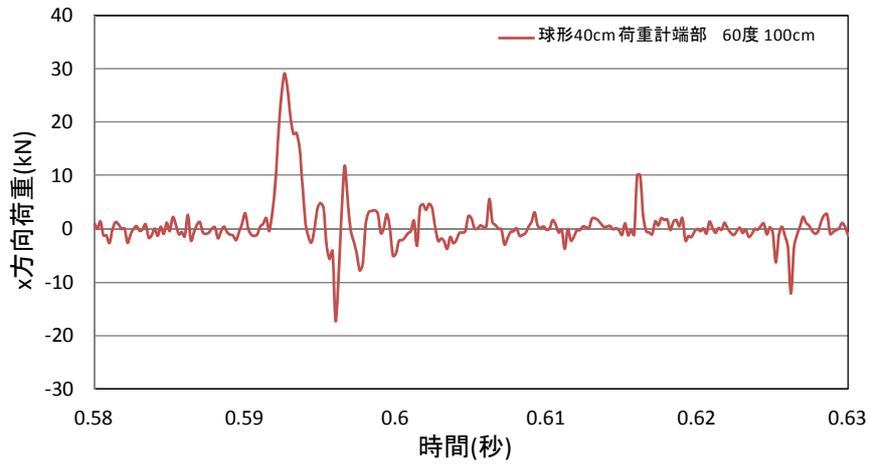


(e)圧電型加速度計

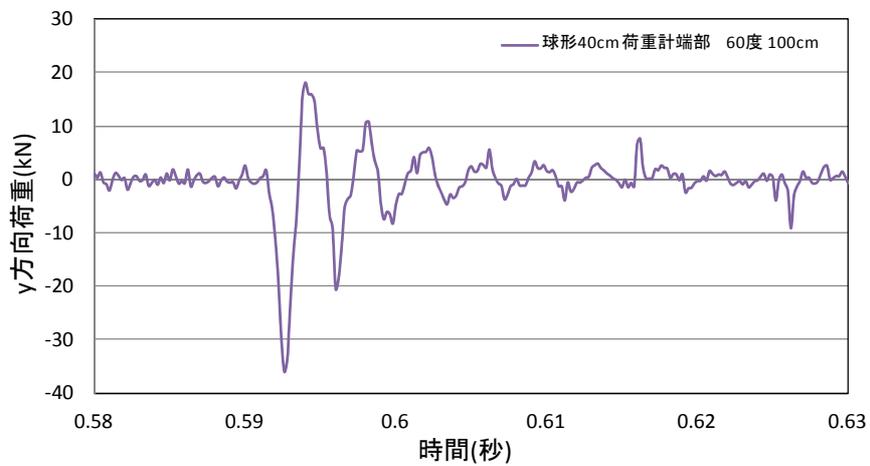
図 5.1.171 No.31 球形 40cm 端部载荷 60度入射载荷 引き代 70cm



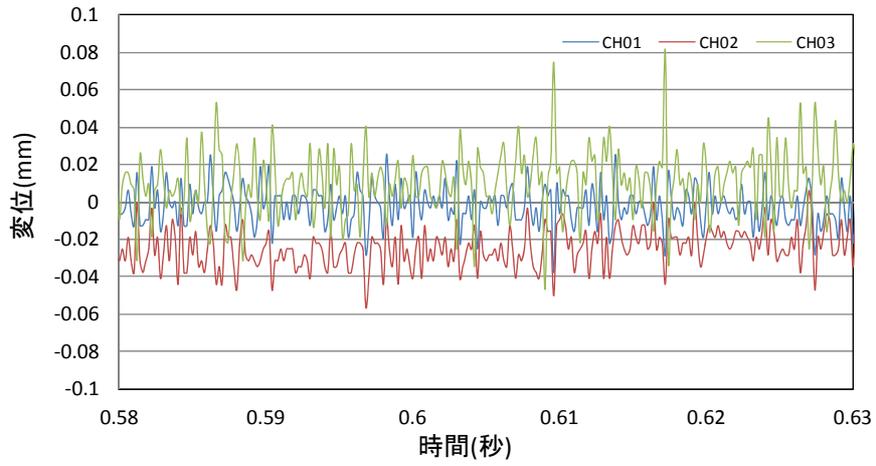
(a)衝突方向



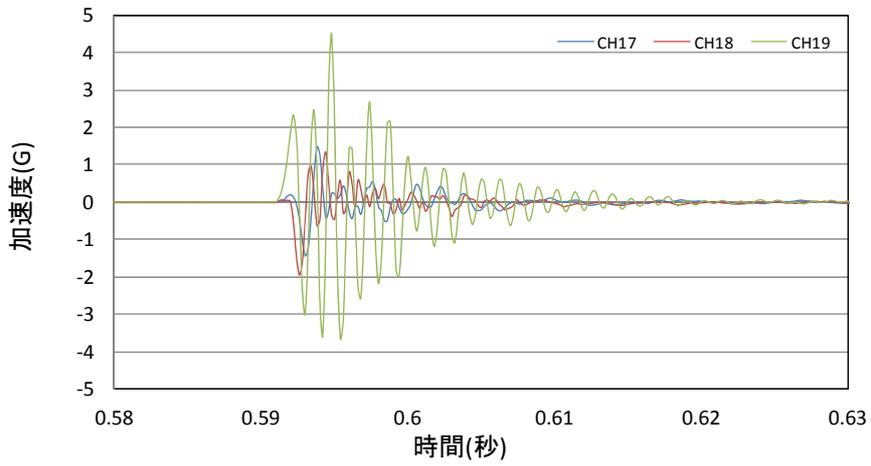
(b)衝突直交方向



(c)上下方向



(d)レーザー変位計



(e)圧電型加速度計

図 5.1.172 No.32 球形 40cm 端部載荷 60度入射載荷 引き代 100cm

(3) 振り子試験のまとめ

図 5.1.173～図 5.1.176 に引き代と最大合力荷重 (x, y, z 方向の荷重の合力の最大値) の関係を示す。端部荷重の際には、荷重が小さくなるケースもあるが、全般的に、載荷位置、載荷方向に拘わらず、引き代が大きくなるほど最大荷重が一樣に大きくなる。よって、衝撃載荷の観点からも荷重計は概ね良好な精度を有すると言える。

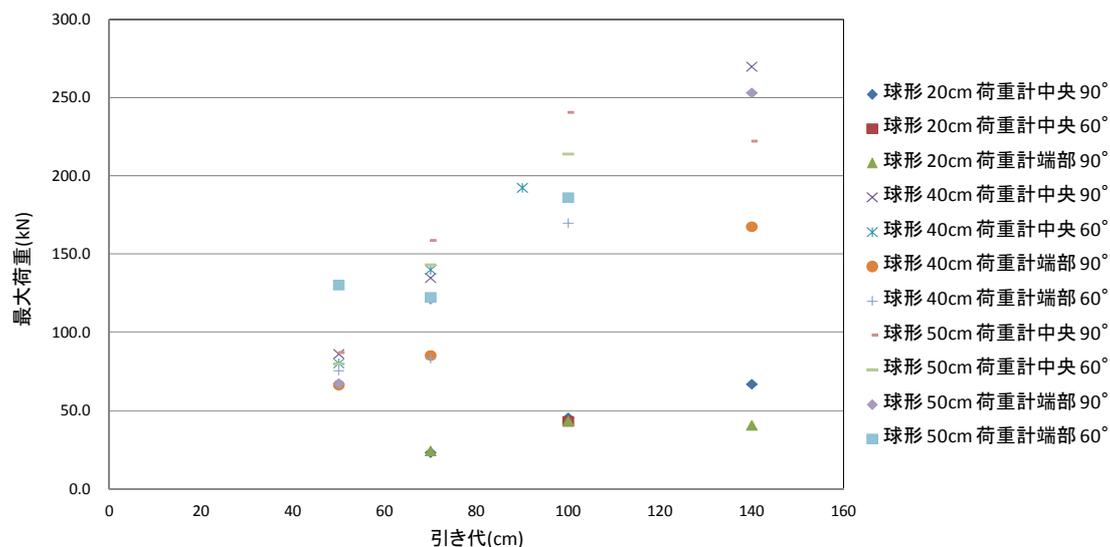


図 5.1.173 最大荷重と引き代の関係 (全データ)

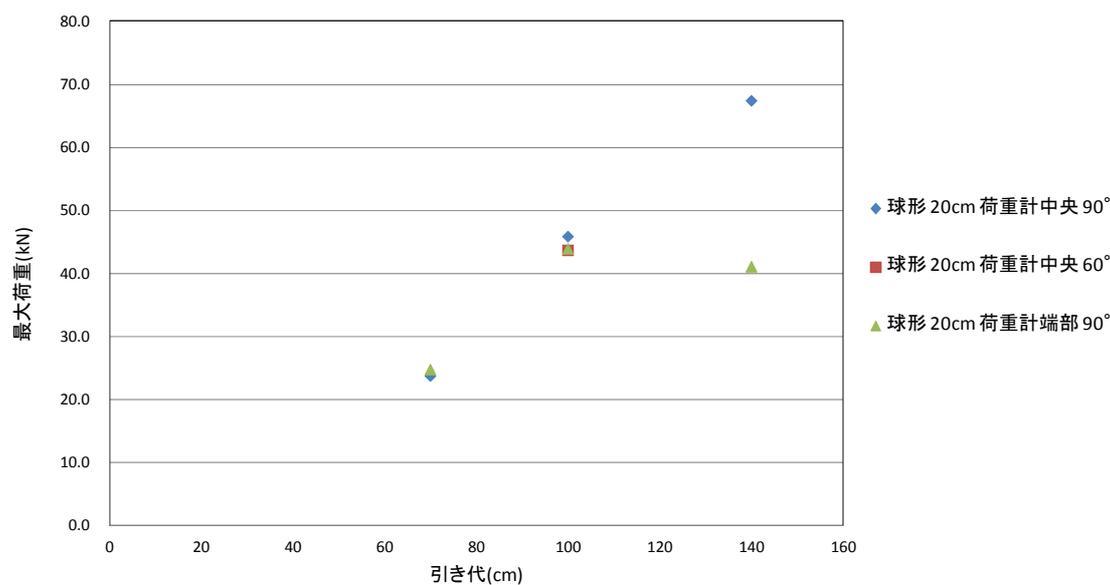


図 5.1.174 最大荷重と引き代の関係 (球形 20cm)

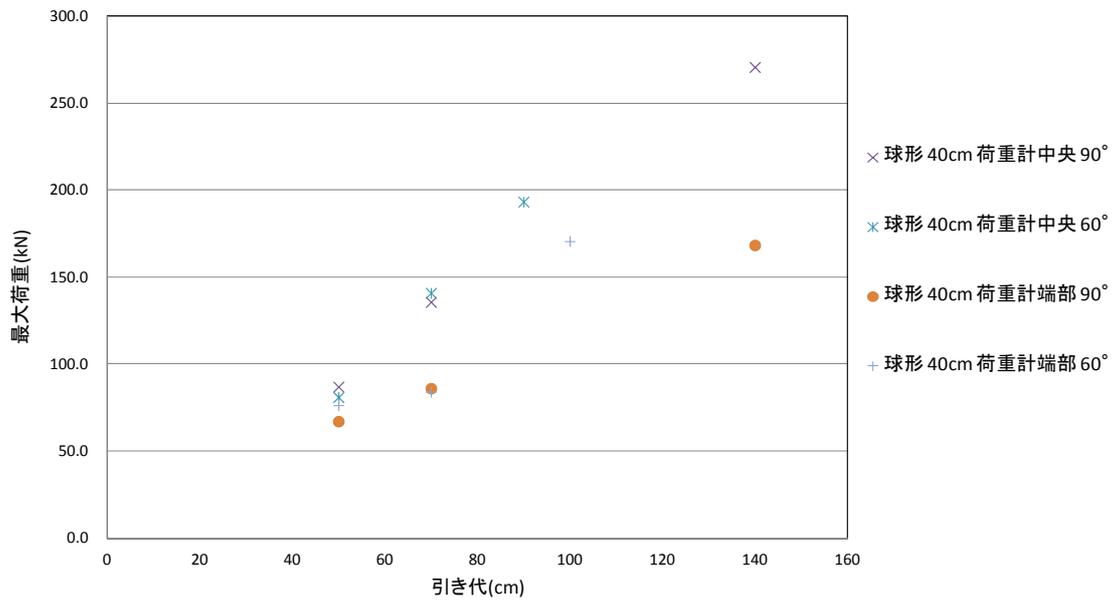


図 5.1.175 最大荷重と引き代の関係 (球形 40cm)

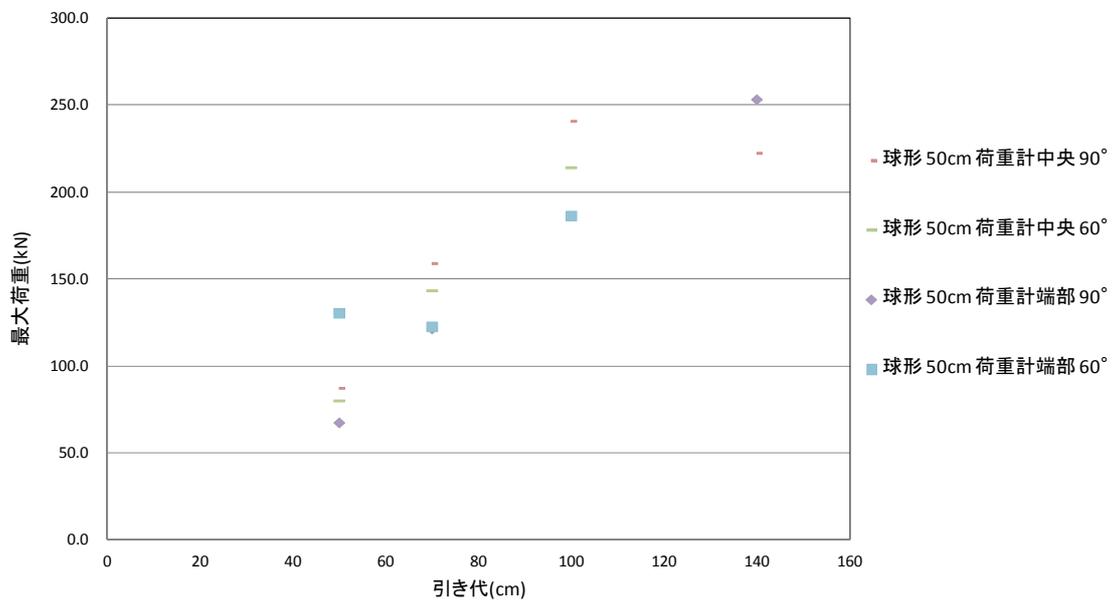


図 5.1.176 最大荷重と引き代の関係 (球形 50cm)

5. 2 反力壁の変位を計測するためのレーザー変位計

岩塊および土砂が衝突した際の反力壁の変位計測を目的に設置する。基準距離 500mm、計測精度 2 μ m のレーザー式変位計を用いた。使用するレーザー変位計は、キーエンス社の LK-G505 とした。高精度（分解能数 2 μ m 程度）、基準距離が 500mm 程度、測定範囲が 750mm 程度の変位計である。表 5.2.1 にレーザー変位計の仕様を示す。

表 5.2.1 レーザー変位計の仕様

メーカー	型式	測定範囲	感度
キーエンス	LK-G505	-250mm～+500mm	2 μ m

レーザー変位計については、反力壁背面に 3 個設置するものとした。写真 5.2.1 にレーザー変位計の設置後の様子を示す。



写真 5. 2. 1 レーザー変位計設置後の様子

5. 3 反力壁の加速度を計測するための加速度計

振り子試験において、岩塊および土砂が衝突した際の反力壁の加速度を計測することを目的に設置する。加速度計は圧電型の加速度計とした。なお、圧電型の加速度計は比較的高額だが、計測精度が高く、計測できる周波数範囲も広いという特徴を有する。表 5.3.1 に本業務で使用した加速度計の仕様を示す。

表 5.3.1 加速度計の仕様

メーカー	型式		定格容量	応答周波数範囲 (23 度)	取付共振周波数
ウィルコクソン	793L	圧電型	100 m/s ²	0.2~2300Hz	15000Hz

加速度計については、振り子試験の際に、反力壁前面に写真 5.3.1 のように設置し、衝突方向、衝突直交方向および上下方向の加速度成分を計測するものとした。



写真 5.3.1 加速度計設置後の様子

5. 4 デジタルビデオカメラ

6章で述べる画像解析システムに加え、岩塊および土砂の動画を撮影するために、デジタルビデオカメラによる撮影を行った。表 5.4.1 に本業務で使用したデジタルビデオカメラの仕様を示す。JVC 製のカメラは、5 倍速による撮影が可能であり、特に岩塊および土砂の動きを撮影することが重要な箇所において用いた。ソニー製のカメラについては、試験全体の撮影等、補助的な撮影に用いた。

表 5.4.1 デジタルビデオカメラの仕様

名称	メーカー	型式
高速・高画質デジタルビデオカメラ	JVC	GC-P100
デジタルHDビデオカメラレコーダー	ソニー	HDR-PJ630V

写真 5. 4. 1 にデジタルビデオカメラの設置状況を示す。デジタルビデオカメラは、全体撮影、斜面部上面および側面撮影、平坦部上面および側面撮影ができるよう設置した。



(a)デジタルビデオカメラ設置状況①



(b)デジタルビデオカメラ設置状況②

写真 5.4.1 デジタルビデオカメラの設置状況

6. 画像解析システムの選定と設置

6. 1 画像解析システムの選定と購入

土砂の流動試験および岩塊の転動試験において、土砂と岩塊の挙動を三次元的に計測することを目的として、画像解析システムを購入した。表 6.1.1 に購入した画像解析システムを示す。購入する画像解析システムは、岩塊の転動試験について側面、上方からの同時計測が可能で、同期がとれる仕様とした。また、土砂の流動試験においては、防水、屋外での使用に優れたカメラを購入した。なお、カメラの性能を確認するため、画像解析の予備試験として以下の項目について検討した。

- ・1.0m 流路模型を用いて、岩塊および土砂の画像解析による流速把握の精度確認試験を行う。流速は、岩塊および土砂の標点を把握して流速を計測することを基本とする。
- ・10.0m 離れた箇所から、対象物の微小な動き（20～50mm 程度）を上記カメラにより把握できるか確認する。

表 6.1.1 購入した画像解析システムの概要

品名	型番	用途・特徴
M5 カメラ・解析システム	MotionScopeM5	側面より撮影（流路部用） 400 万画素 カメラリンク
M3 カメラ・解析システム	MotionScopeM3	側面より撮影（平坦部用） 130 万画素 カメラリンク 高速度撮影
NX カメラ・解析システム	MotionXtraNX4S1	上面より撮影（流下方向距離については、 流路にスケールを設置することで把握） 100 万画素 バッテリ Wifi 内蔵 LAN ケーブルでも接続可

写真 6.1.1 に購入した高速度カメラを示す。M3 カメラは、高速度撮影に適しているため、岩塊および土砂は減速する挙動や、反力壁に衝突する挙動を詳細に計測するため、平坦部側面に設置するものとした。M5 カメラについては、既に所有のカメラ 1 台を追加し、計 2 台で、斜面部側面と平坦部上面からの撮影に用いた。NX カメラについては、斜面部上面の撮影に用いた。サンプリング周波数については、M3 カメラは 500Hz、M5 カメラは 150Hz、NX カメラは 100Hz に設定した。



(a) M3 カメラ



(b) M5 カメラ



(c) NX カメラ

写真 6.1.1 高速度カメラ

写真 6.1.2 に画像解析の予備試験の様子を示す。約 1.5m の流路模型を傾け、小石または碎石および乾燥砂を流下させ、それらの挙動を画像解析システムにより撮影および計測した。図 6.1.3 に画像解析システムによる結果を示す。上記の条件で撮影を行ったが、岩塊および土砂の挙動を精緻に計測できることを確認した。



写真 6.1.2 予備試験の状況

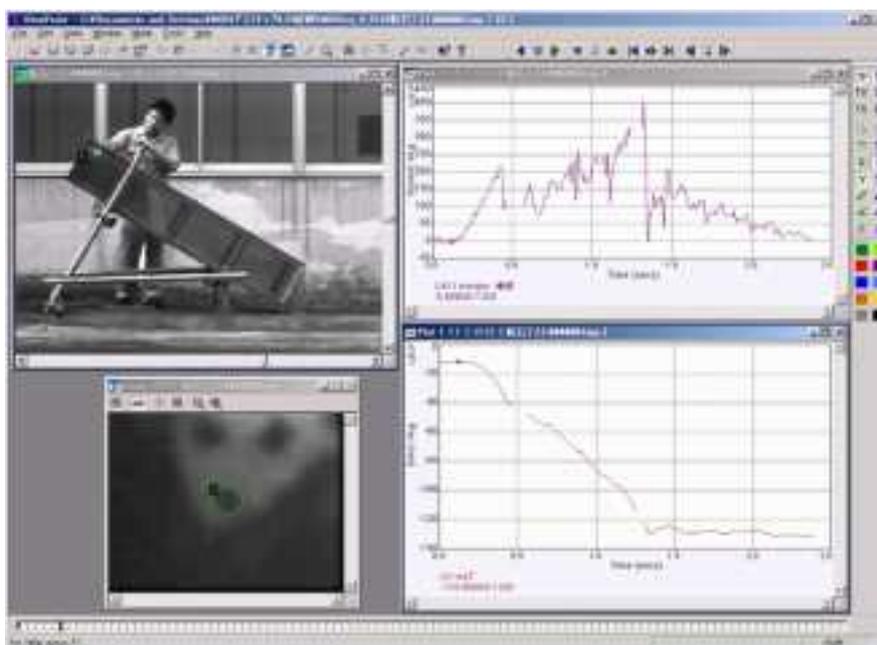


写真 6.1.2 予備試験結果

6. 2 岩塊の挙動を計測するための画像解析システムの設置

図 6.2.1 に示すように高解像度カメラを 2 台側面に、2 台を上面に取付け計測した。岩塊の転動については以下の項目について計測することを基本とした。計測は、岩塊に標点等を取り付け、標点の軌跡を画像解析で追跡する手法を用いた。また、標点を岩塊に多数取付、岩塊の回転挙動も計測することを検討した。

- ① 流路側面から見た岩塊の跳ね返り挙動 (図 6.2.2①)
- ② 流路側面から見た岩塊の滑動挙動 (図 6.2.2②)
- ③ 流路側面から見た岩塊の衝突挙動 (図 6.2.2③)
- ④ 流路上面から見た岩塊の流下挙動 (図 6.2.3④)
- ⑤ 流路上面から見た岩塊の拡散挙動 (図 6.2.3⑤)

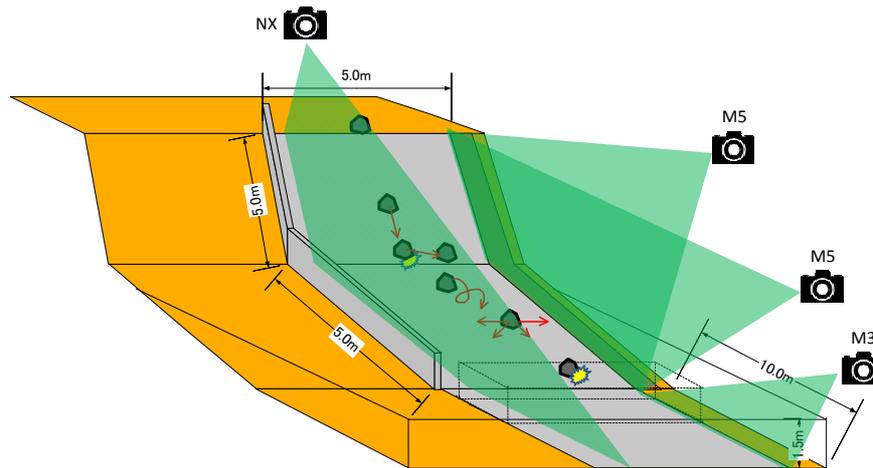


図 6.2.1 岩塊の転動実験におけるカメラ配置計画図

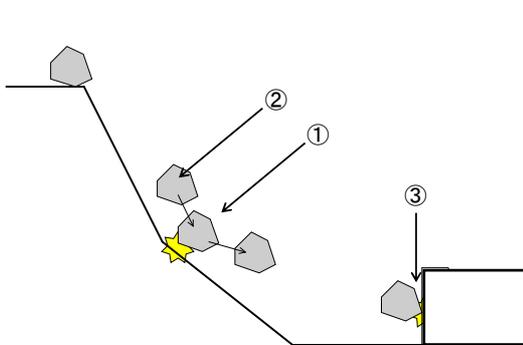


図 6.2.2 側面から見た図

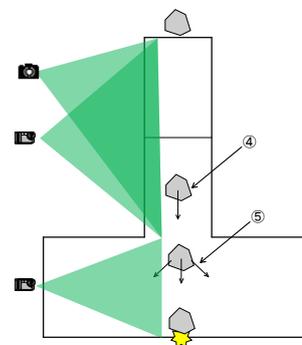


図 6.2.3 上面から見た図

写真 6.2.4 に高速度カメラの設置状況を示す。高速度カメラは、斜面部上面および側面撮影、平坦部上面および側面撮影ができるよう設置した。



(a)高速度カメラ設置状況①



(b)高速度カメラ設置状況②

写真 6.2.4 高速度カメラの設置状況

6. 3 土砂の挙動を計測するための画像解析システムの設置

土砂模型の挙動を3次元で計測できるように画像解析システムを用いた計測を行った。図 6.3.1 に示すように高解像度カメラ2台を側面に、2台を上面に取付け計測した。土砂の流動については以下の項目について計測した。計測は、土砂に標点等を取り付け、標点の軌跡を画像解析で追跡する手法を用いた。設置位置は、写真 6.2.4 の位置と同じである。

- ① 流路側面から見た土塊の流下挙動 (図 6.3.2①)
- ② 流路側面から見た土塊の衝突挙動 (図 6.3.2②)
- ③ 流路上面から見た土塊の流下挙動 (図 6.3.3③)
- ④ 流路上面から見た土塊の拡散挙動 (図 6.3.3④)

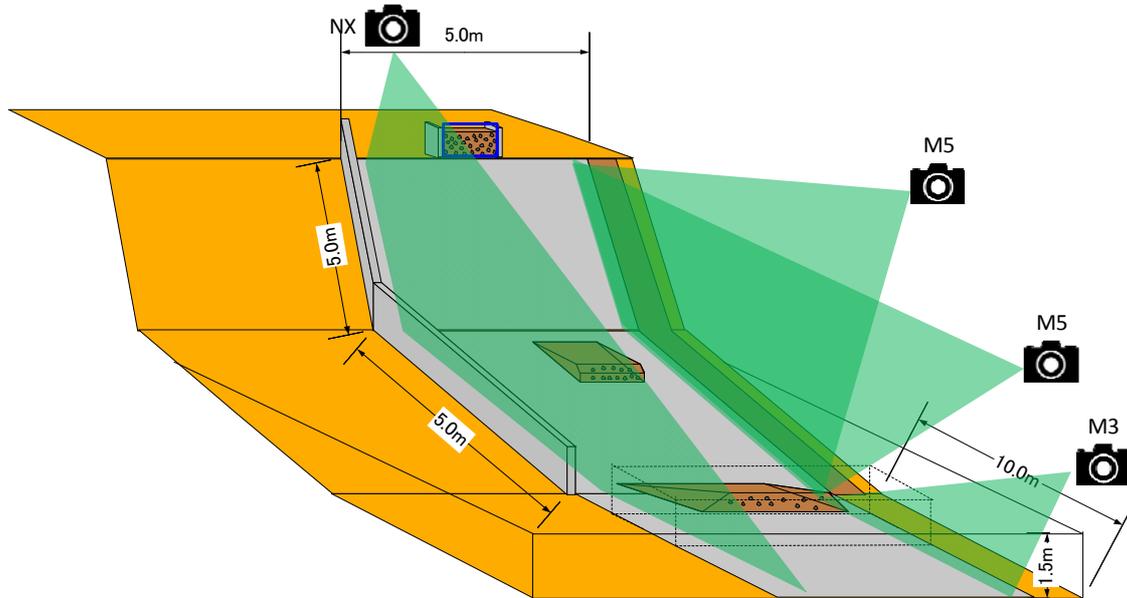


図 6.3.1 土砂流動試験におけるカメラ配置図

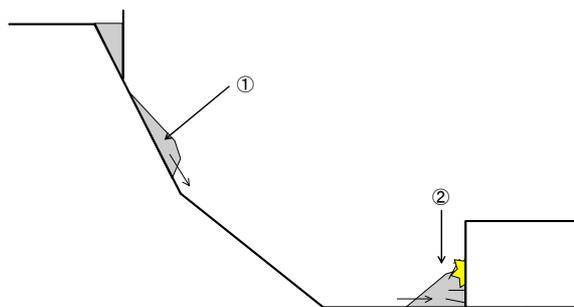


図 6.3.2 側面から見た図

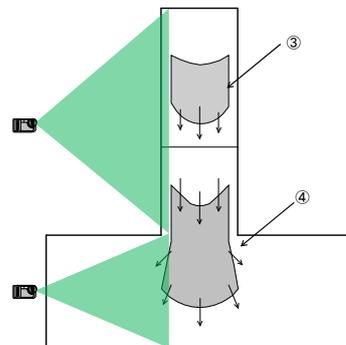


図 6.3.3 上面から見た図

7. 地盤材料の要素試験と各試験データの取得

転動, 流動実験に用いる岩塊および土砂の変形強度特性を評価するための要素試験を実施した。要素試験は, 土砂の物性を把握するための三軸圧縮試験, 三軸圧縮繰返し試験と, 岩塊および土砂の動摩擦係数を把握する一面せん断試験, 岩塊の跳ね返り係数を把握する跳ね返り試験からなる。

転動試験では岩塊と斜面との摩擦特性, 岩塊間または岩塊と斜面間の跳ね返り係数を評価する必要がある。さらに, 流動実験では土砂の物性を把握する必要もある。そこで, 要素実験では, 摩擦係数を計測する一面せん断試験, 三軸圧縮試験, 繰返し三軸圧縮試験, 跳ね返り係数実測試験を実施する。

要素試験の内訳を表 7.1 に示す。

表 7.1 要素試験の内訳

試験名	着目する パラメータ	備考
三軸圧縮試験	粘着力 内部摩擦角	流動試験 (碎石) : 3 本×1 試料=3 本 流動試験 (土砂) : 3 本×1 試料=3 本
三軸圧縮 繰返し試験	せん断剛性 減衰率	流動試験 (碎石) : 1 本×1 試料=1 本 流動試験 (土砂) : 1 本×1 試料=1 本
岩塊の跳ね返り係数計 測のための要素実験	跳ね返り係数	岩塊種別数 : 3
摩擦係数を計測するた めの一面せん断試験	動摩擦係数	岩塊表面, 碎石, 山砂に対し, 流路底面が P C 版

7. 1 土砂模型に関する要素試験

7. 1. 1 三軸圧縮試験および繰り返し三軸圧縮試験

(1) 試験条件

土砂模型に使用した碎石と土砂に対して、強度特性（粘着力、内部摩擦角）ならびに変形特性（せん断剛性、減衰率）の把握を目的として、三軸圧縮試験、繰返し三軸試験を行った。

三軸圧縮試験は、強度特性（粘着力、内部摩擦角）の把握を目的とし、試料・拘束圧を変化させて計 6 ケース行った。繰返し三軸試験では、変形特性（せん断剛性、減衰率）の把握を目的とし、2 種類の試料を用いて計 2 ケース行った。実施した要素試験の条件は、表 7.1.1 に示すとおりである。

表 7.1.1 要素試験条件一覧

試験 ケース	試験	土砂模型材料	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	拘束圧 σ'_r (kPa)	供試体寸法 (mm)	排水条件	飽和条件
LTC1	*1	土砂	1.64	5	ϕ 200 × h400	排水	不飽和
LTC2				10			
LTC3				50			
LTC4		碎石	1.85	5			
LTC5				10			
LTC6				50			
LCYC1	*2	土砂	1.64	50			
LCYC2		碎石	1.85	50			

*1 土の圧密排水(CD)三軸圧縮試験 JGS 0524-2009

*2 地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験 JGS 0542-2009

(2) 供試体作成

供試体は、「JGS 0520 土の三軸試験の供試体作製・設置方法」に準拠し、締固め法により作製した。供試体作製時の湿潤密度は、土砂：1.64 g/cm³、碎石：1.85 g/cm³を目標値とした。密度管理は、高さ 400mm の供試体を 5 層に分割し、各層の投入量と締固め後の仕上がり高さ測定により行った。

(3) 使用した計測器・試験装置

本試験に使用した計測器および校正係数を表 7.1.2 に、使用した大型三軸試験装置概要を図 7.1.1 に示す。写真 7.1.1 と写真 7.1.2 に試験の様子を示す。

表 7.1.2 計測器および校正係数一覧

計測項目	計測器	校正係数	
軸荷重	容量 300kN 門型ロードセル	42.81522	N/ $\mu\epsilon$
軸変位	容量 100mm 接触式変位計	0.01	mm/ $\mu\epsilon$
間隙水圧	容量 1MPa 圧力計	0.51288	kPa/ $\mu\epsilon$
局所変位	LDT1(長さ 200mm)	$0.10748X^2 + 1.08318X$	mm/volt
局所変位	LDT2(長さ 200mm)	$0.10738X^2 + 1.19033X$	mm/volt
側方ひずみ	ClipGauge1	-0.01375	mm/ $\mu\epsilon$
側方ひずみ	ClipGauge2	-0.0135	mm/ $\mu\epsilon$
側方ひずみ	ClipGauge3	-0.01346	mm/ $\mu\epsilon$

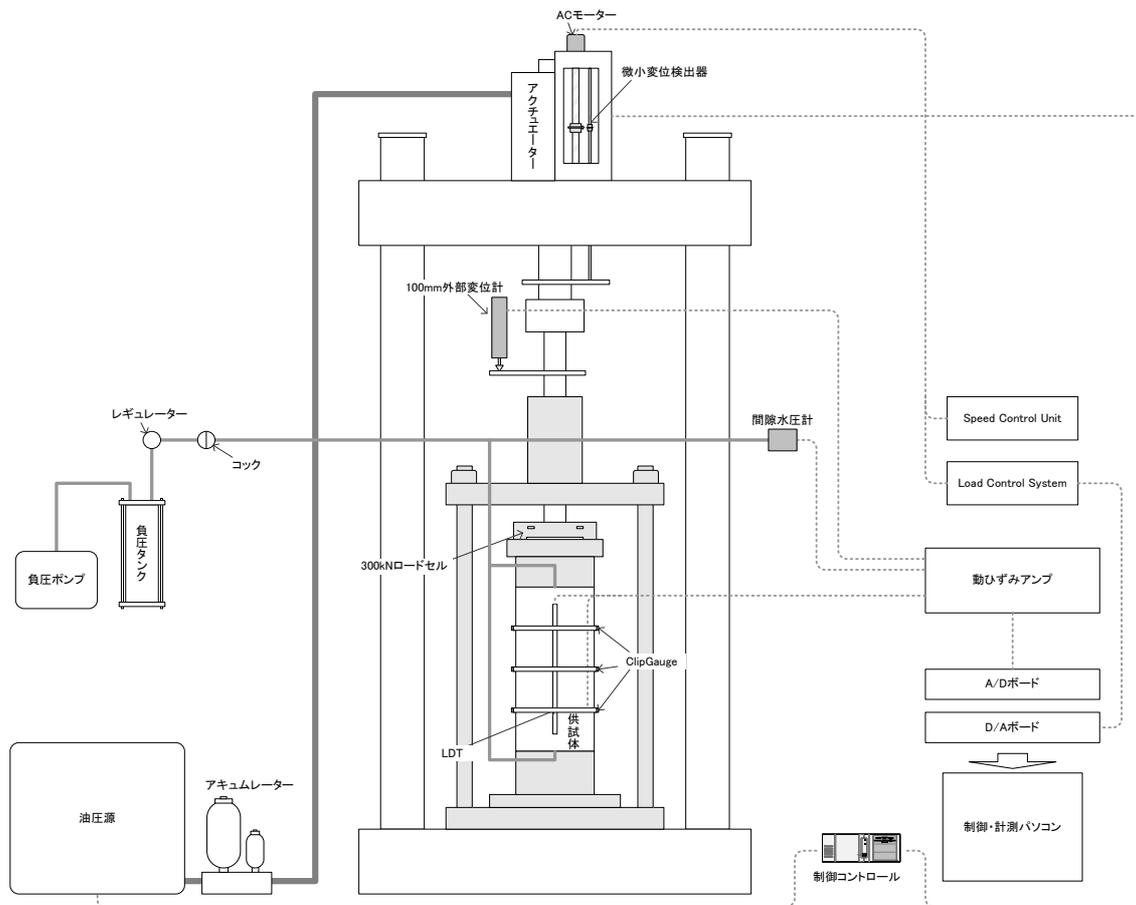


図 7.1.1 大型三軸試験機装置概要

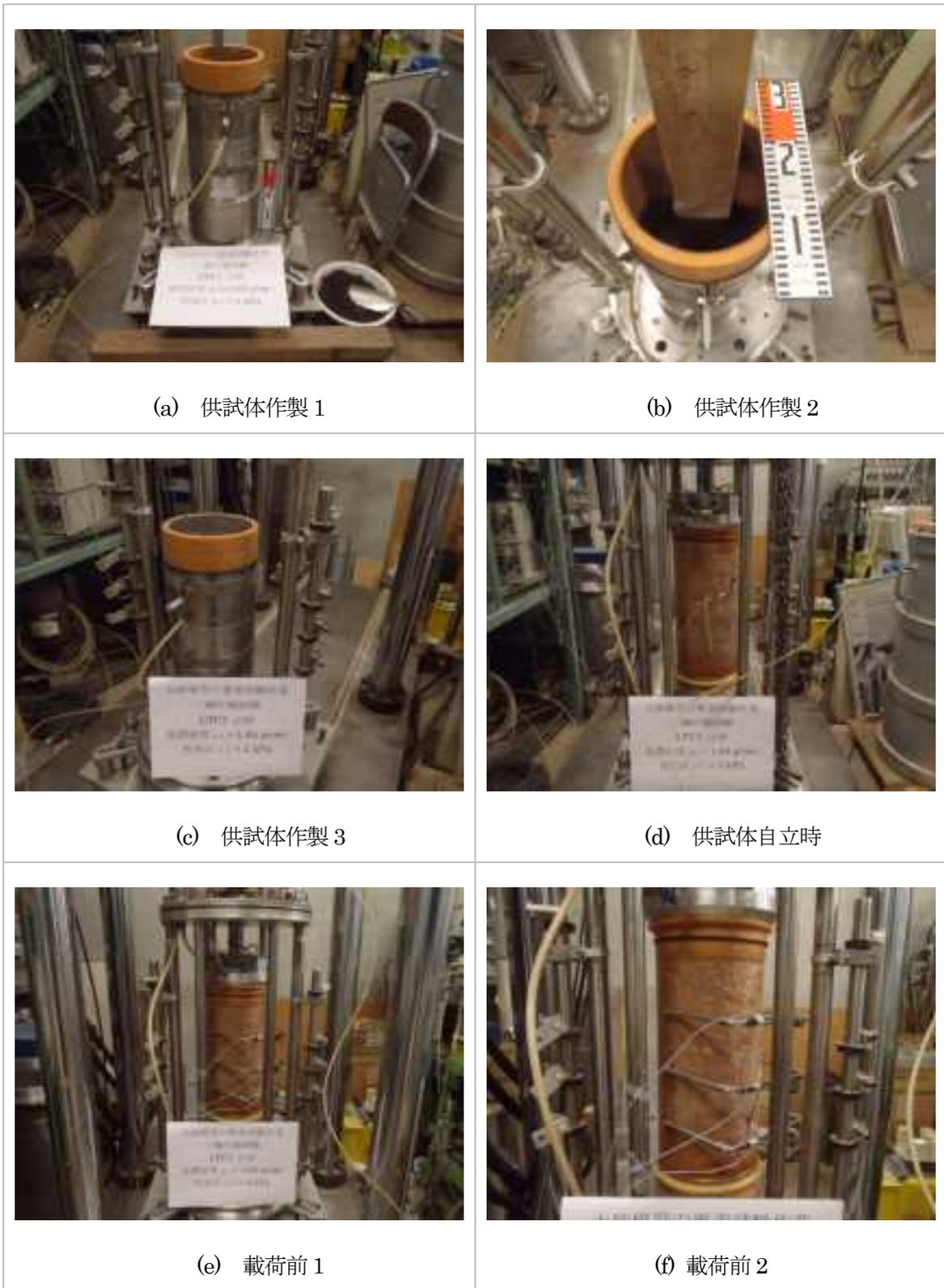


写真 7.1.1 要素試験試験前の様子



写真 7.1.2 要素試験試験後の様子

(4) 載荷条件

・土の圧密排水(CD)三軸圧縮試験

本試験は、表 7.1.3 に示す拘束圧で等方圧密した不飽和供試体に、排水条件のもと、油圧アクチュエーターにより一定軸ひずみ速度で軸荷重を負荷させる単調載荷試験を行った。載荷は、載荷速度を 0.05%/min で、軸ひずみ $\epsilon_a = 15\%$ まで行った。

表 7.1.3 土の圧密排水(CD)三軸圧縮試験の載荷条件一覧

試験 ケース	土砂模型材料	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	排水 条件	飽和 条件	載荷速度 (%/min)	拘束圧 (kPa)
LTC1	土砂	1.64	排水	不飽和	0.05	5
LTC2						10
LTC3						50
LTC4	砕石	1.85				5
LTC5						10
LTC6						50

・地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験

本試験は、表 7.1.4 に示す拘束圧で等方圧密した不飽和供試体に、排水条件のもと、油圧アクチュエーターにより繰返し軸荷重を負荷させる繰返し三軸試験を行った。繰返し載荷は、表 7.1.5 に示す載荷ステップで、載荷速度を 0.05%/min として三角波による繰返し載荷を各ステップでそれぞれ 11 回行った。

表 7.1.4 地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験の載荷条件

試験 ケース	土砂模型材料	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	排水 条件	飽和 条件	載荷速度 (%/min)	拘束圧 (kPa)	繰返し 波形
LCYC1	土砂	1.64	排水	不飽和	0.05	50	三角波
LCYC2	砕石	1.85					

表 7.1.5 繰返し载荷パターン

Step	軸差応力 $\Delta q(\text{kPa})$	繰返し回数 (回)
a	0.2	各 11
b	0.5	
c	1	
d	2	
e	4	
f	7	
g	11	
h	16	
i	22	
j	29	
k	37	
l	46	

(5) 試験結果の整理

以下、試験結果の整理方法を列記する。

- 軸方向ひずみ ϵ_a (%)

外部変位計による軸方向ひずみ ϵ_a (%)を次式で算定した。

$$\epsilon_a = \frac{\Delta H}{H_i} \times 100 \quad (\text{PERCENT})$$

ここに、

H_i : 供試体の初期高さ (mm)

ΔH : 外部変位計の軸変位量 (mm)

局所変位計 LDT による軸方向ひずみ ϵ_a (AV&LDT)(%)を次式で算定した。

$$\varepsilon_{n, \text{Ave.LDT}} = \frac{\Delta \text{Ave.LDT}}{\text{Ave.LDT}_t} \times 100 \quad (B.10.1E)$$

ここに、

Ave.LDT_t : LDT 1 と LDT2 の初期長さの平均(mm)

$\Delta \text{Ave.LDT}$: LDT 1 と LDT2 の変位置の平均 (mm)

- 側方向ひずみ ε_r (%)

Clip Gauge による側方向ひずみ ε_r (%)を次式で算定した。

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta \text{Ave.ClipGauge}}{\text{Ave.ClipGauge}_t} \times 100 \quad (B.10.2E)$$

ここに、

Ave.ClipGauge_t : ClipGauge1~3 の初期長さの平均(mm)

$\Delta \text{Ave.ClipGauge}$: ClipGauge1~3 の変位置の平均 (mm)

- 主応力差・軸差応力 q (kPa)

側方向ひずみから供試体断面積を算出し、軸方向荷重を面積で除して主応力差 q (kPa) を算定した。また、得られた主応力差 q (kPa)にメンブレンの張力補正をかけた。

供試体断面積 A (mm²)を次式で算定した。

$$A = \frac{V}{H_t - \Delta H}$$

ここに、

V : 供試体の体積 (mm³)

また、メンブレンによる軸方向応力の補正量 $\Delta \sigma_{am}$ (kPa)を次式で算出した。

$$\Delta \sigma_{am} = \frac{6E_m \cdot t_m}{3d} (2\varepsilon_{am} + \varepsilon_{\theta m})$$

ここに、

E_m : メンブレンのヤング率 (kPa) (既往の研究より 1400kPa)

t_m : メンブレンの厚さ(mm) (本試験では 1.0mm 厚を使用)

d : 供試体の直径(mm)

ε_{am} : メンブレンの軸方向ひずみ (圧縮正)

$\varepsilon_{\theta m}$: メンブレンの円周方向ひずみ (圧縮正)

上式をもとに主応力差 q (kPa)を次式で算定した。

$$q = 1000 \frac{P}{A} + \Delta q_{\theta m}$$

ここに、

P : 軸方向荷重 (N) (圧縮正)

- 等価ヤング率 $E_{\varepsilon q}$ (繰返し三軸試験) (MPa)

繰返し载荷試験において、軸差応力 q (kPa)・軸ひずみ ε_a (Ave. Δε) 関係の履歴から、等価ヤング率 $E_{\varepsilon q}$ (MPa)を算出した。図 7.1.2 に示すように、軸差応力最大の点 A と点 B においては、その平均値 (点 D) を取り、点 C との傾きから等価ヤング率 $E_{\varepsilon q}$ (MPa)を算出した。

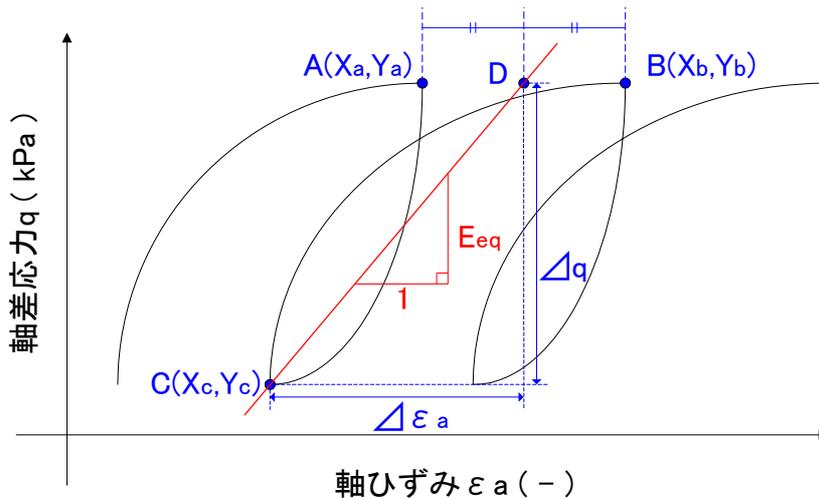


図 7.1.2 等価ヤング率 $E_{\varepsilon q}$ (MPa)概念図

上記より、等価ヤング率 $E_{\varepsilon q}$ (MPa)を次式で算出した。

$$E_{\varepsilon q} = \frac{\Delta q / 1000}{\Delta \varepsilon_a}$$

Δq 、 $\Delta \varepsilon_a$ 共に「図 7.1.2 等価ヤング率 $E_{\varepsilon q}$ (MPa)概念図」参照のこと。

- せん断ひずみ γ , 等価せん断剛性 G_{eq} (MPa)

軸ひずみ ε_a と側方向ひずみ ε_r の関係から求めたポアソン比 ν より、せん断ひずみ γ および等価せん断剛性 G_{eq} を次式で算出した。

$$\gamma = \frac{\Delta\varepsilon_r}{\Delta\varepsilon_a}$$

ここに、

$\Delta\varepsilon_r$: 「図 7.1.2 等価ヤング率 E_{eq} (MPa)概念図」より、点 C・D の側方向ひずみ差分

$\Delta\varepsilon_a$: 「図 7.1.2 等価ヤング率 E_{eq} (MPa)概念図」より、点 C・D の軸方向ひずみ差分

$$\gamma = \frac{2(1+\nu)}{2} \varepsilon_a \quad G_{eq} = \frac{E_{eq}}{2(1+\nu)}$$

- 履歴減衰率 h (%)

図 7.1.3 に履歴減衰率算定の概念図を示す。ここでは、次式により履歴減衰率 $h(\%)$ を算定した。

$$h = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \times 100 \quad W = \frac{1}{4} \cdot \Delta P \cdot \Delta L$$

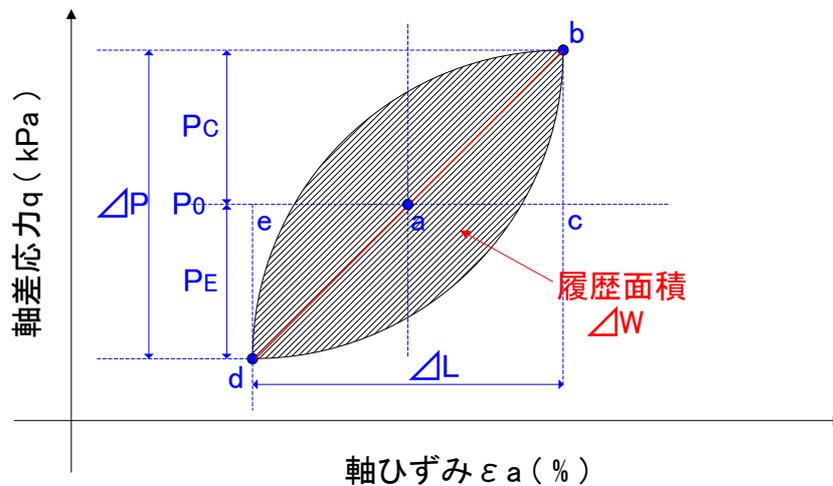


図 7.1.3 履歴減衰率 $h(\%)$ の概念図

(6) 試験結果

・供試体作製結果

表 7.1.6 に供試体作製密度および含水比を示す。

表 7.1.6 供試体作製密度および含水比測定結果一覧

case	土砂模型材料	乾燥密度 $\rho_d(\text{g/cm}^3)$			試験後含水比 $w(\%)$
		作製時	圧密前	圧密後	
LTC1	土砂	1.497	1.517	1.524	9.55
LTC2		1.498	1.519	1.554	9.48
LTC3		1.511	1.538	1.716	8.50
LTC4	碎石	1.785	1.778	1.778	3.63
LTC5		1.763	1.751	1.756	4.93
LTC6		1.778	1.775	1.813	4.04
LCYC1	土砂	1.494	1.512	1.692	9.79
LCYC2	碎石	1.787	1.780	1.817	3.55

・土の圧密排水(CD)三軸圧縮試験結果

表 7.1.7 ならびに図 7.1.4~7.1.9 に土の圧密排水(CD)三軸圧縮試験結果を示す。

表 7.1.7 土の圧密排水(CD)三軸圧縮試験結果一覧

case	土砂模型材料	ピーク強度	破壊ひずみ	残留強度	内部摩擦角	粘着力
		$q_{\max}(\text{kN/m}^2)$	$\varepsilon_f(\%)$	$q_{\text{res}}(\text{kN/m}^2)$	$\phi(\text{deg.})$	$c(\text{kN/m}^2)$
LTC1	土砂	17.5	15.0	17.5	34.6	2.1
LTC2		35.0	15.0	34.9		
LTC3		137.7	15.0	137.5		
LTC4	碎石	34.8	4.6	28.7	40.9	3.0
LTC5		51.4	10.4	50.6		
LTC6		202.8	14.8	202.4		

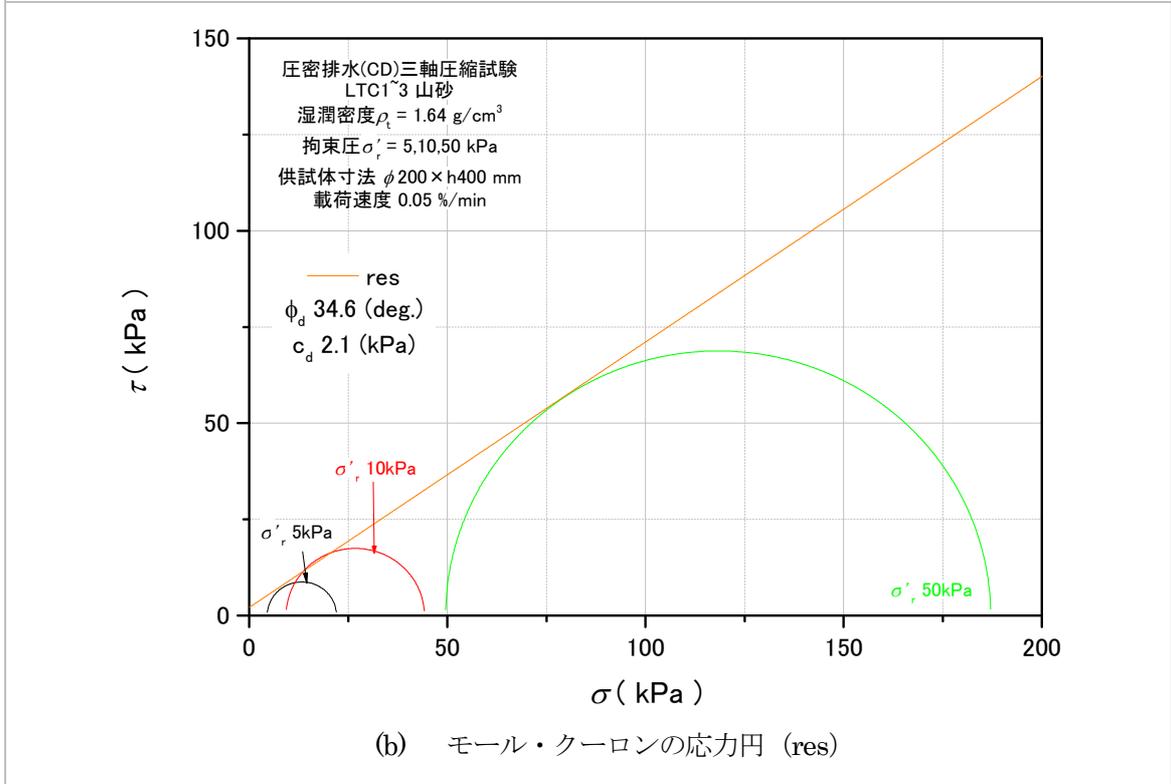
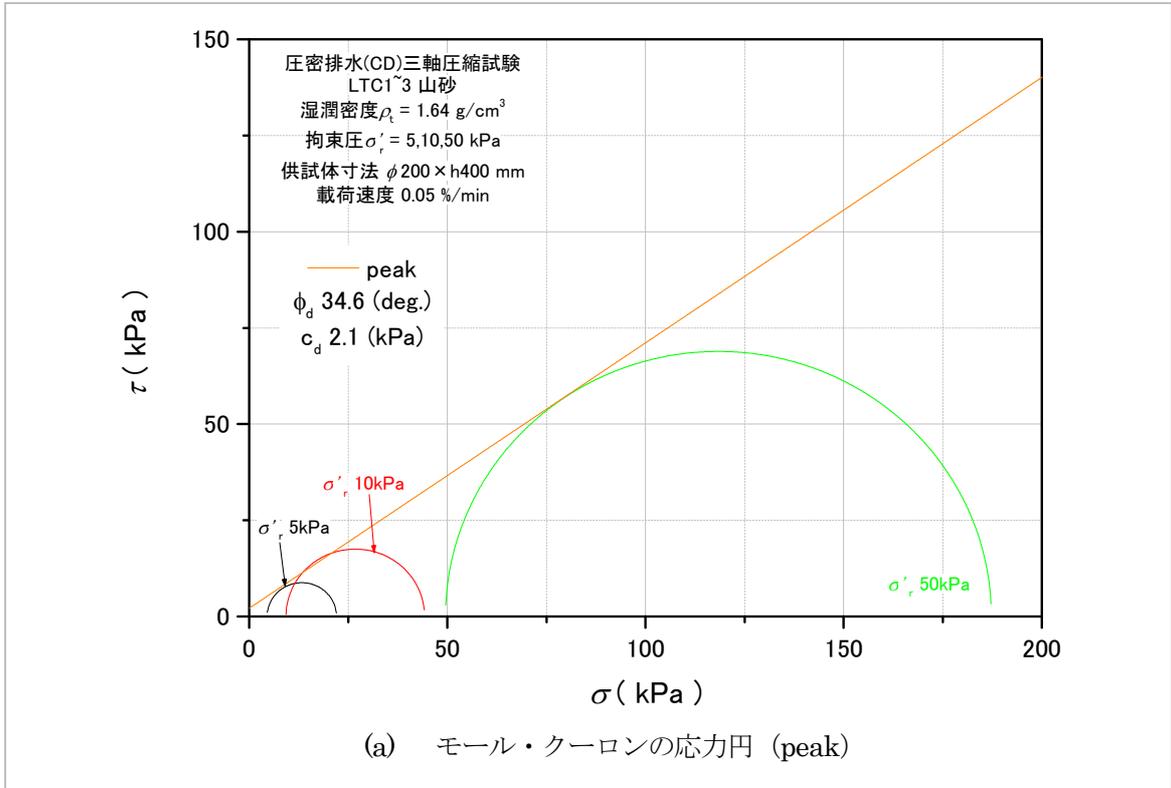
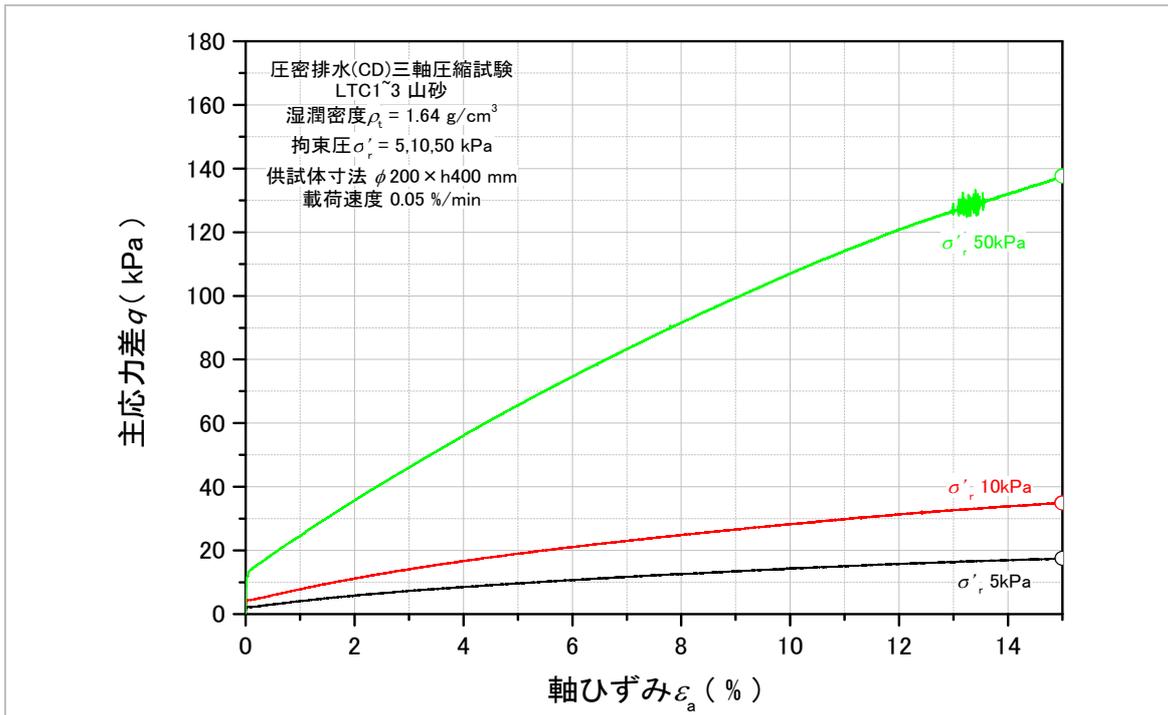
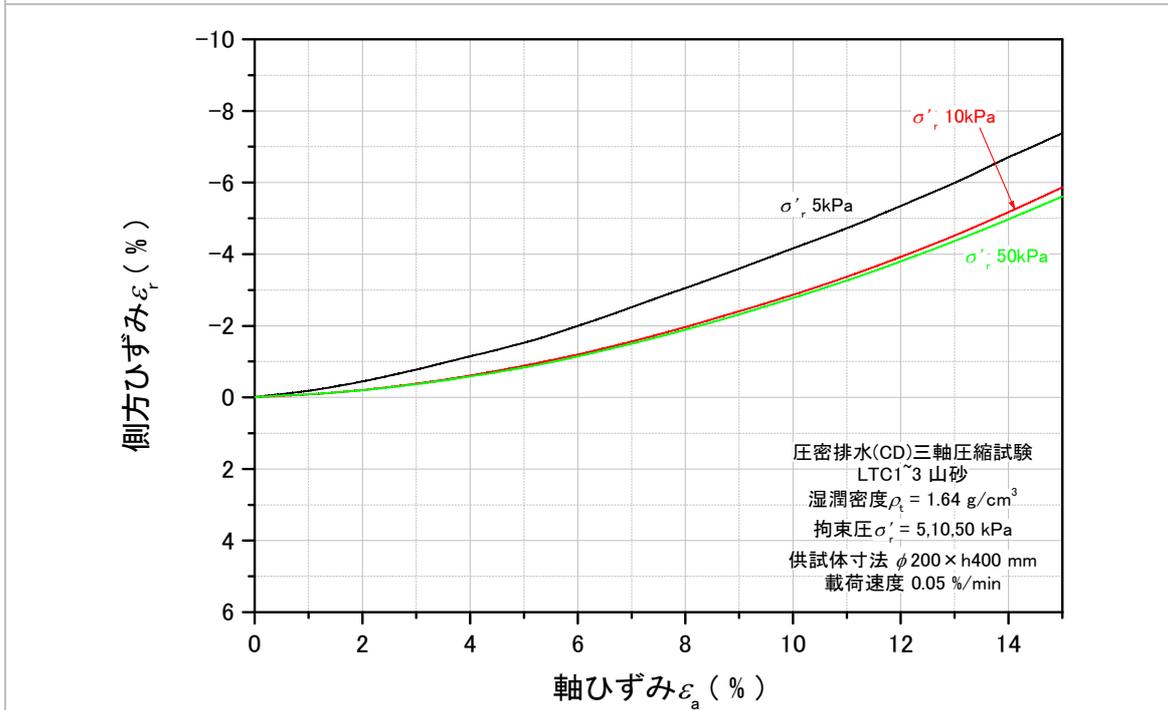


図 7.1.4 土の圧密排水(CD)三軸圧縮試験結果_LTC1~3(土砂)_1



(a) 主応力差 - 軸ひずみ関係



(b) 側方ひずみ - 軸ひずみ関係

図 7.1.5 土の圧密排水(CD)三軸圧縮試験結果_LTC1~3(土砂)_2

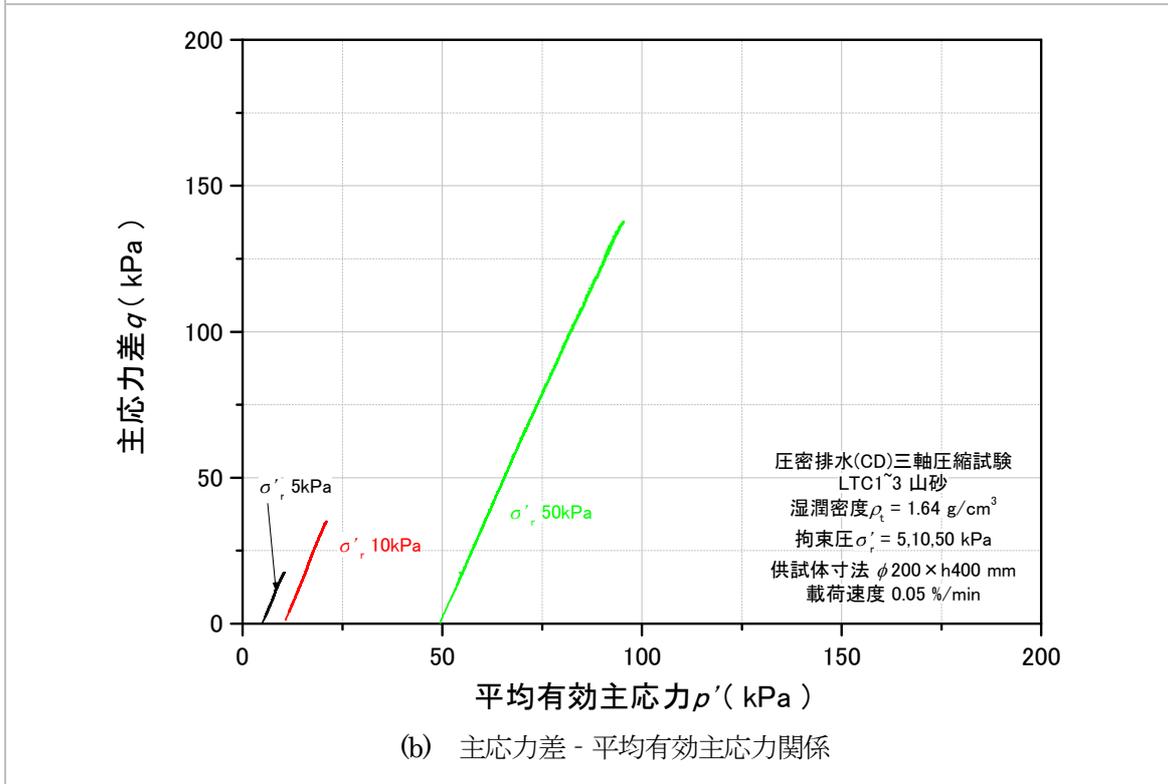
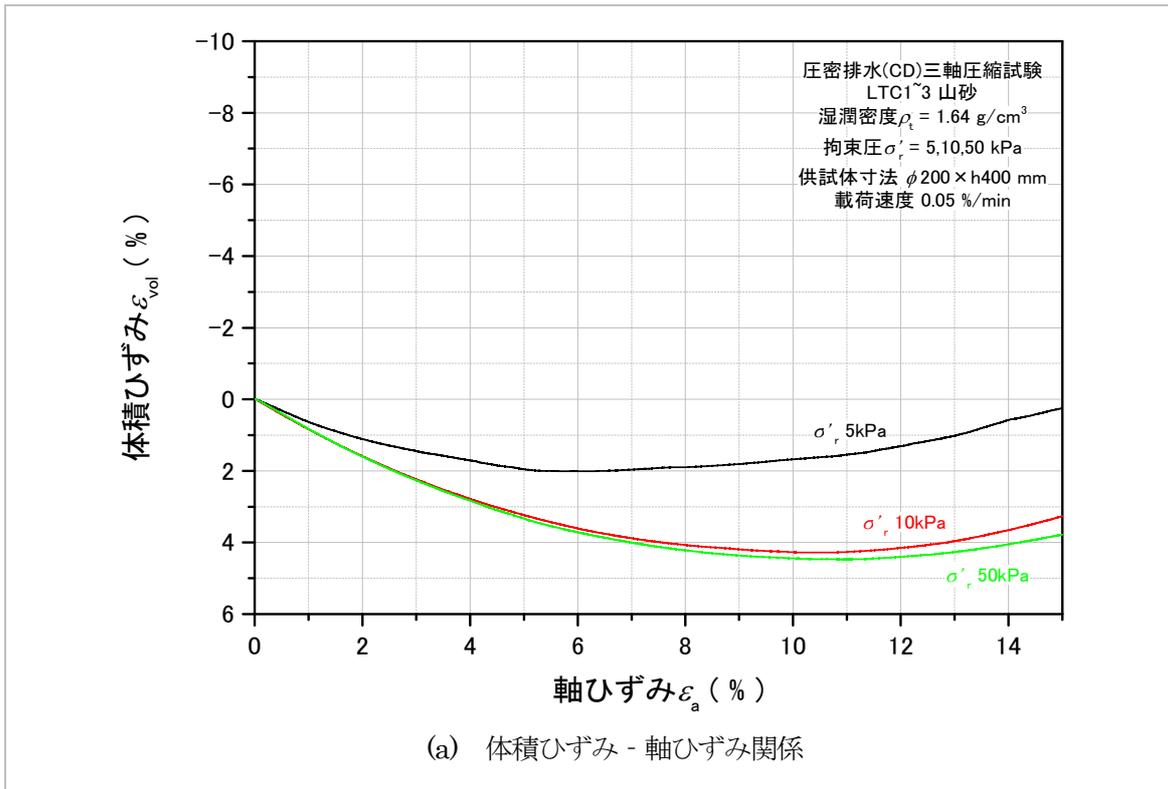


図 7.1.6 土の圧密排水(CD)三軸圧縮試験結果_LTC1~3(土砂)_3

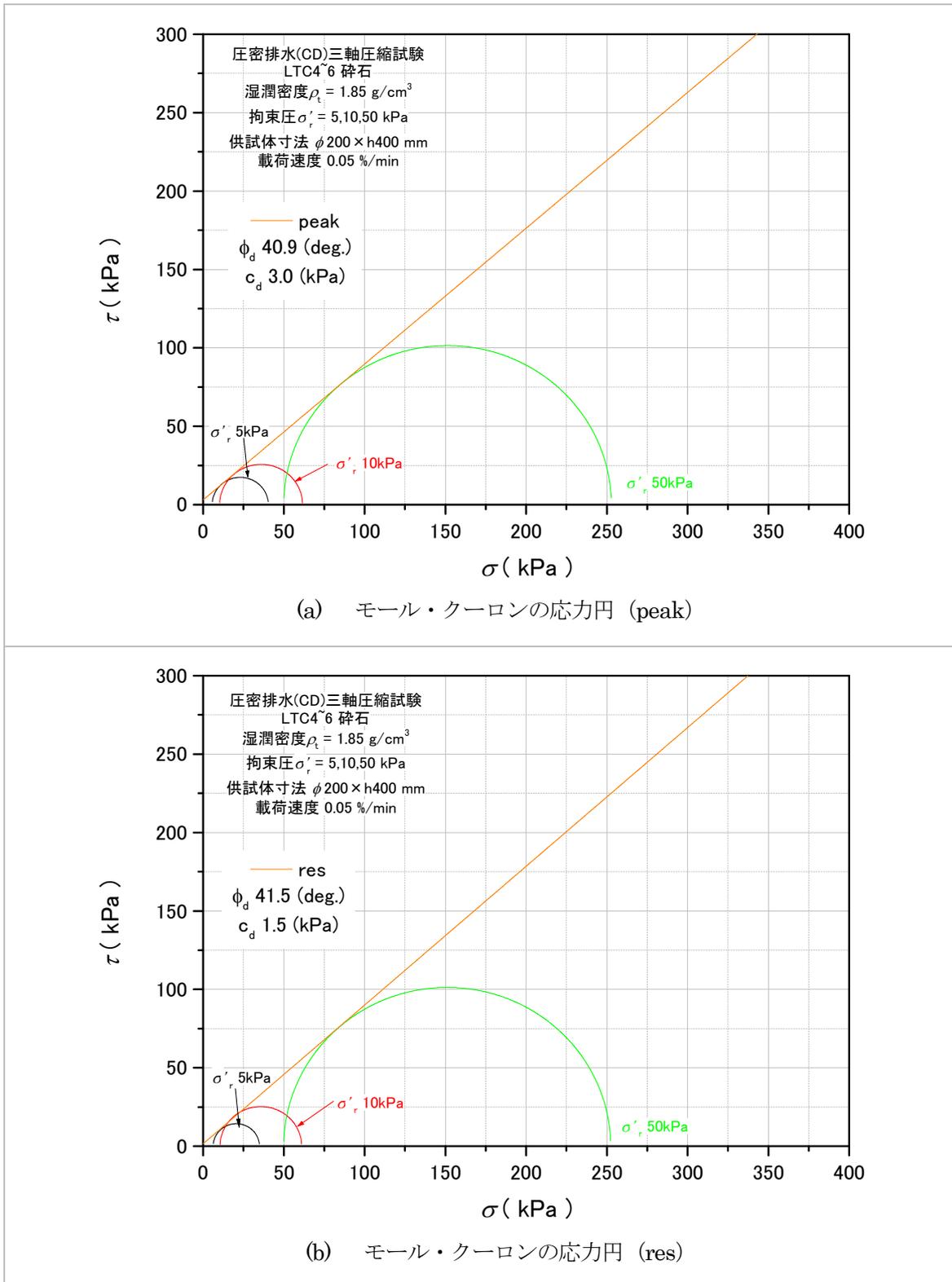
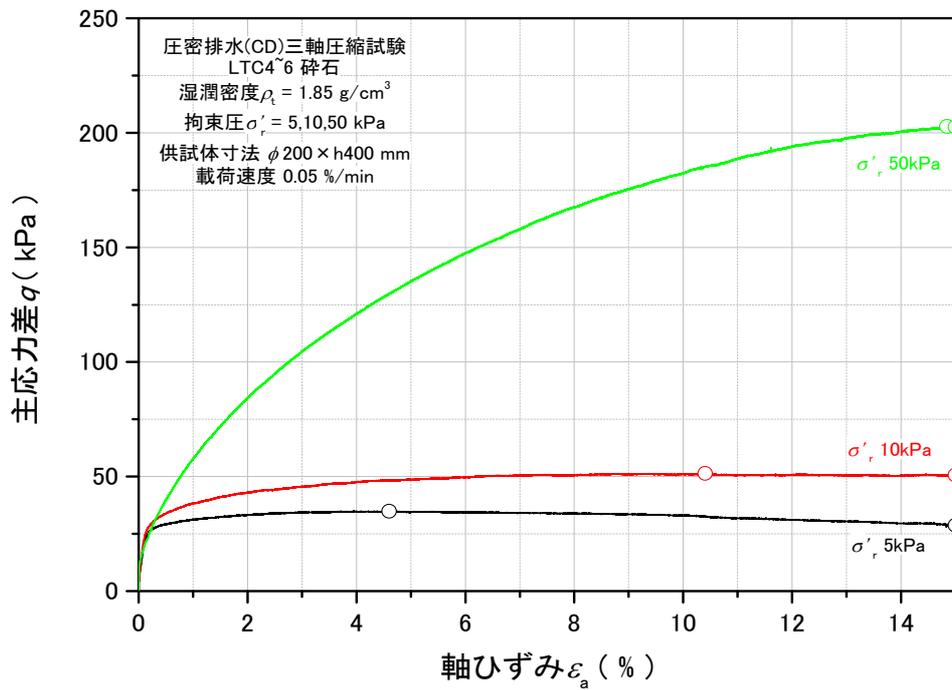
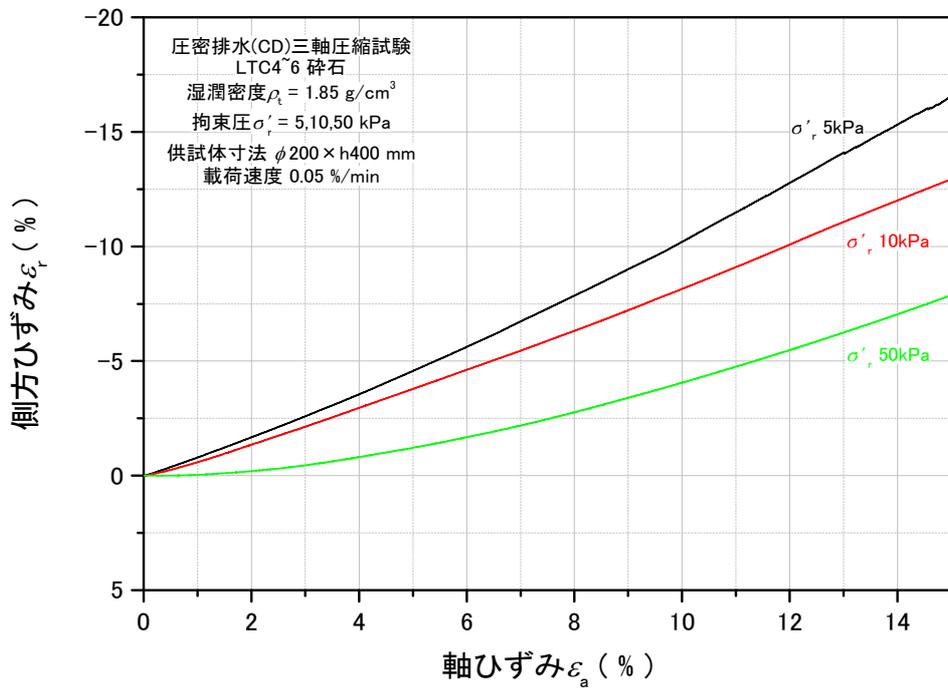


図 7.1.7 土の圧密排水(CD)三軸圧縮試験結果_LTC4~6(砕石)_1

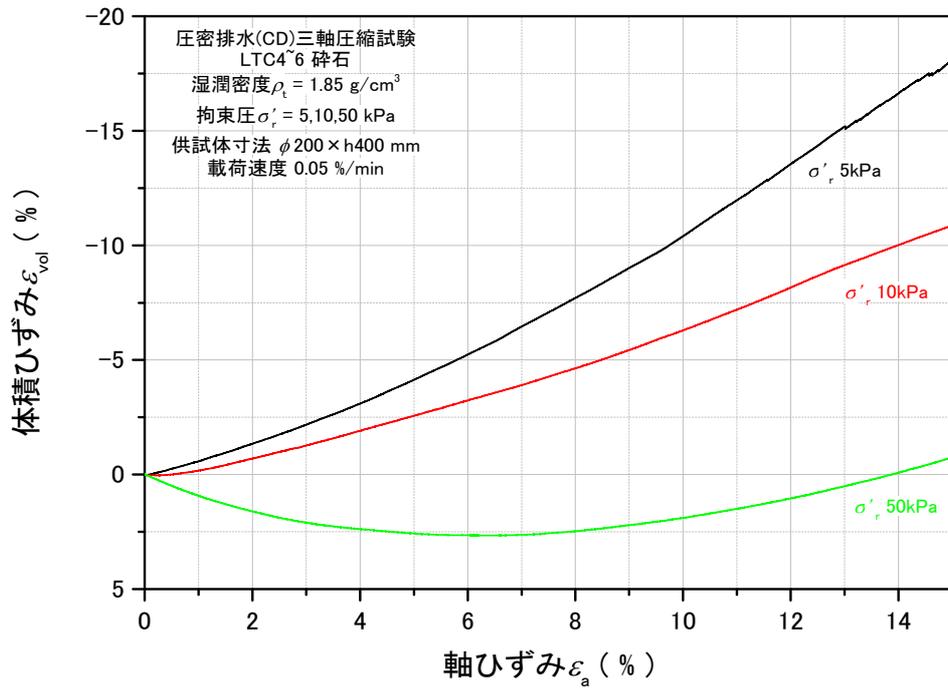


(a) 主応力差 - 軸ひずみ関係

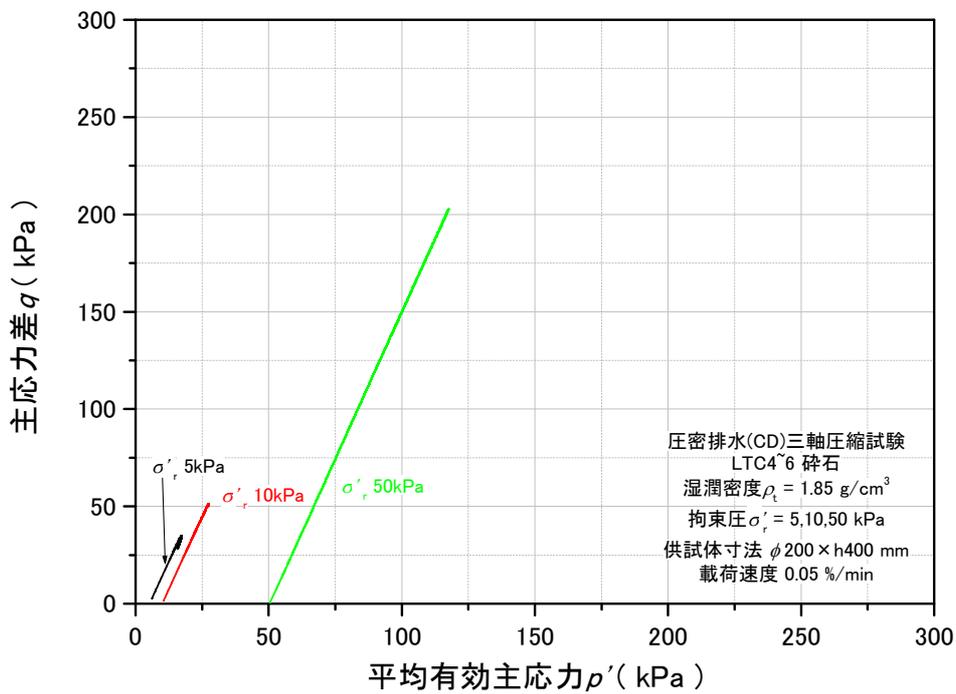


(b) 側方ひずみ - 軸ひずみ関係

図 7.1.8 土の圧密排水(CD)三軸圧縮試験結果_LTC4~6(碎石)_2



(a) 体積ひずみ - 軸ひずみ関係



(b) 主応力差 - 平均有効主応力関係

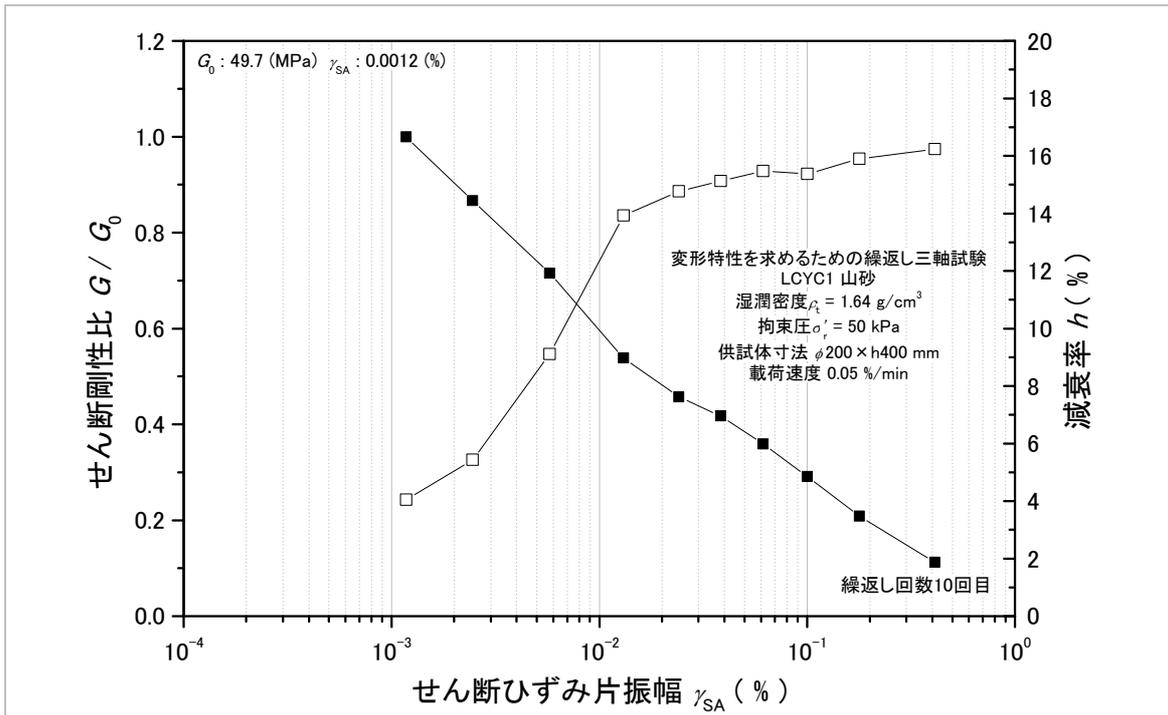
図 7.1.9 土の圧密排水(CD)三軸圧縮試験結果_LTC4~6(砕石)_3

- ・地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験結果

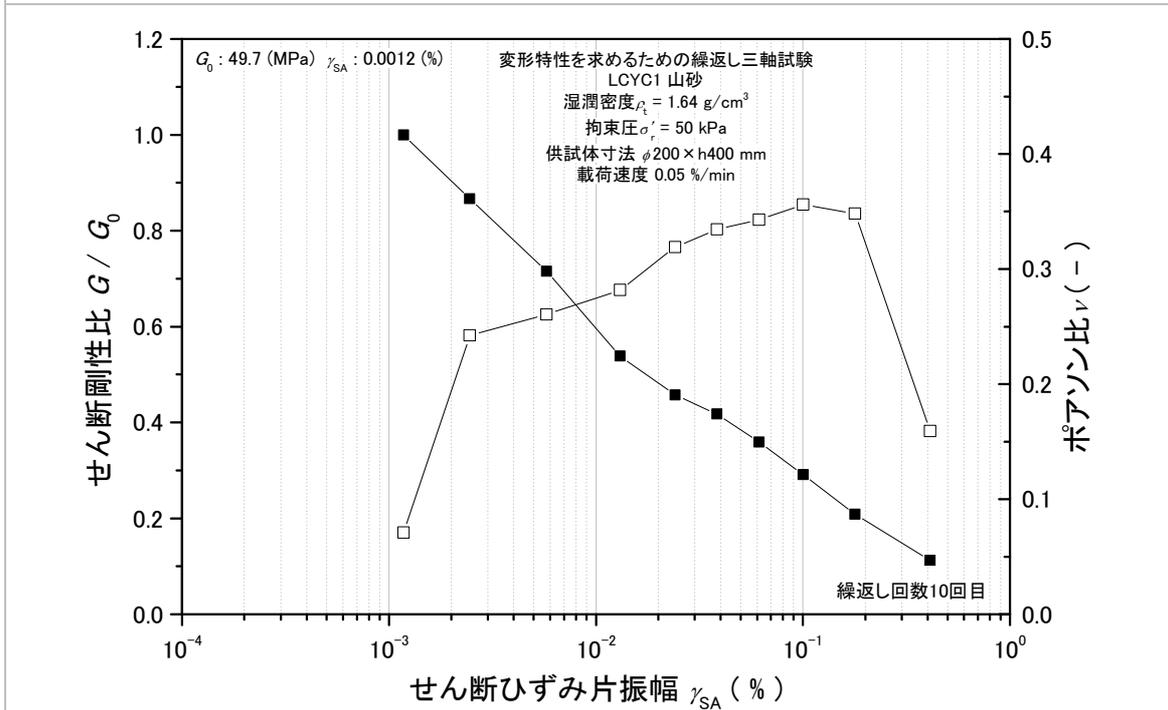
表 7.1.8 ならびに図 7.1.10~7.1.11 に繰返し三軸試験結果を示す。

表 7.1.8 地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験結果一覧

case	土砂模型材料	初期せん断剛性	
		G_0 (MN/m ²)	γ_{SA} (%)
LCYC1	土砂	49.7	0.0012
LCYC2	碎石	83.4	0.00055

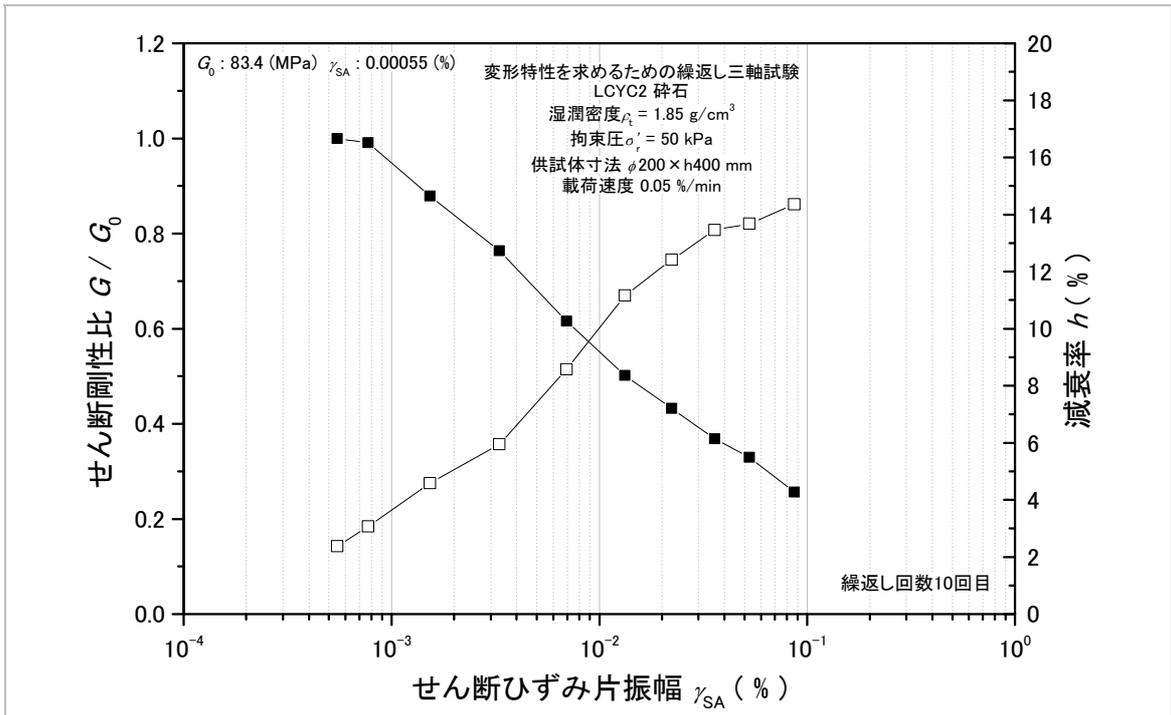


(a) せん断剛性比 - 減衰率 - せん断ひずみ片振幅関係

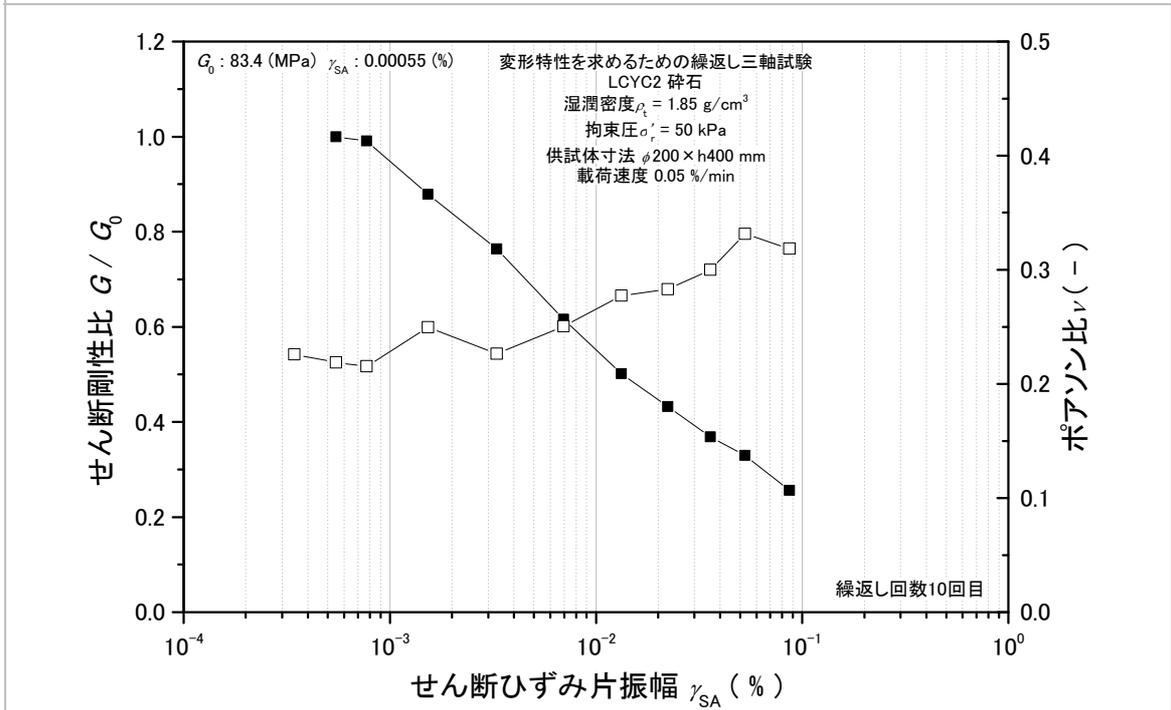


(b) せん断剛性比 - ポアソン比 - せん断ひずみ片振幅関係

図 7.1.10 地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験結果_LCYC1(土砂)



(a) せん断剛性比 - 減衰率 - せん断ひずみ片振幅関係



(b) せん断剛性比 - ポアソン比 - せん断ひずみ片振幅関係

図 7.1.11 地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験結果_LCYC2(砕石)

7. 1. 2 土砂模型の密度測定試験

(1) 試験条件

本作業は、作製された各土砂模型に対して、砂置換法による密度測定を行った。試験は、表 7.1.9 に示すとおり合計 15 ケース行った。

表 7.1.9 密度測定試験ケース一覧

試験 No.	試験	土砂模型材料	試験実施日	模型構築回数 (回目)	試験用砂
1	*3	碎石	2013年 12月6日	1	東北硅砂6号
2				2	
3				3	
4		土砂	2013年 12月9日	1	
5				2	
6				3	
7		土砂	2013年 12月12日	1	
8				2	
9				3	
10		碎石	2014年 1月21日	2	
11				3	
12		碎石	2014年 1月22日	1	
13				2	
14		土砂	2014年 1月23日	3	
15		土砂		1	

*3 砂置換法による土の密度試験 JIS A 1214:2001

(2) 密度測定器

使用した密度測定器は、ジャーとアタッチメントを組立てて一体の容器としたもので、図 7.1.12、写真 7.1.3 に示す形状からなるものを使用した。

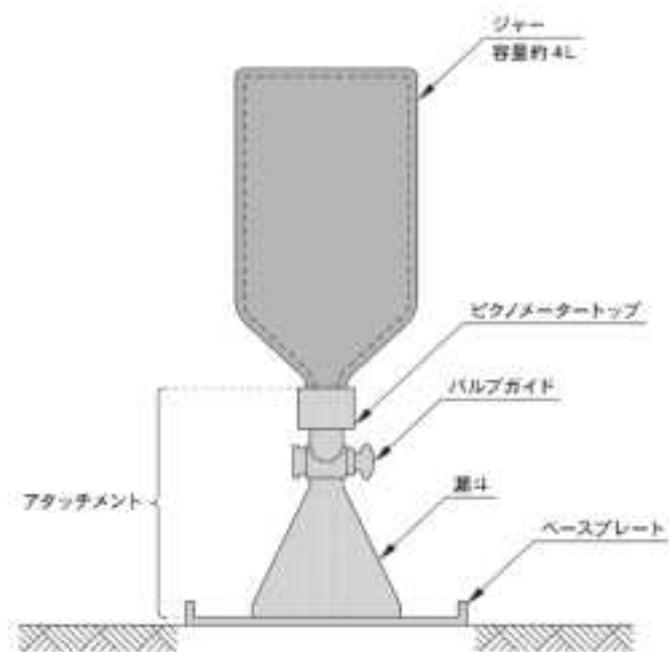


図 7.1.12 密度測定器概要



写真 7.1.3 使用した密度測定器

(3) 密度の校正

・試験用砂の密度の校正

試験用砂の密度の校正値は、体積 2000cm^3 の測定器に試験用砂を撒き出し、測定器に詰まった砂の重量から求めた。試験用砂は、東北硅砂 6 号を使用した。試験用砂の密度の校正値は、表 7.1.10 に示すとおりであった。

表 7.1.10 試験用砂の密度の校正値

回	試験用砂重量(g)	密度(g/cm^3)	平均密度(g/cm^3)
1	2774	1.387	1.396
2	2801	1.401	
3	2800	1.400	

・漏斗を満たすのに必要な試験用砂の質量の校正

漏斗を満たすのに必要な試験用砂の質量の校正値は、表.7.1.11 に示すとおりであった。

表 7.1.11 漏斗を満たすのに必要な試験用砂の質量の校正値

回	試験用砂重量(g)	平均試験用砂重量(g)
1	1479	1477
2	1476	
3	1476	

・試験結果

表 7.1.12 に密度測定試験結果一覧を示す。碎石の湿潤密度は、 $1.61\text{ g}/\text{cm}^3\sim 1.84\text{ g}/\text{cm}^3$ であった。これは、質量と体積から求めた密度 $1.85\text{ g}/\text{cm}^3$ より小さい傾向がある。また、含水比が大きいほど湿潤密度は小さい傾向がある。

土砂の湿潤密度は、 $1.61\text{ g}/\text{cm}^3\sim 1.73\text{ g}/\text{cm}^3$ であった。これは、質量と体積から求めた密度 $1.64\text{ g}/\text{cm}^3$ より大きい傾向がある。なお、含水比の湿潤密度に対する影響は、碎石の場合ほど大きくない。

表 7.1.12 密度測定試験結果一覧

試験用砂の密度 g/cm ³	1.396			試験孔から取り出した 湿潤土の質量 g	1477		
試験実施日	2013/12/6			2013/12/9			
模型構築回数	1	2	3	1	2	3	
土砂模型材料	碎石			山砂			
試験孔から取り出した 湿潤土の質量 g	1159	1149	999	1749	1344	1330	
ジャーとピクノメータートップに 砂を満たした質量 g	8244	8349	7857	8323	8338	8401	
測定器と残った砂の質量 g	5920	6015	5582	5395	5782	5872	
試験孔の体積 cm ³	606.7	613.9	571.6	1039.4	772.9	753.6	
湿潤密度 g/cm ³	1.910	1.872	1.748	1.683	1.739	1.765	
乾燥密度 g/cm ³	1.843	1.811	1.682	1.570	1.623	1.637	
含水比 %	3.62	3.36	3.91	7.15	7.16	7.81	
試験実施日	2013/12/12			2014/1/21			
模型構築回数	1	2	3	2	3		
土砂模型材料	山砂			碎石			
試験孔から取り出した 湿潤土の質量 g	1293	1211	1722	1516	1499		
ジャーとピクノメータートップに 砂を満たした質量 g	8372	8381	8357	8462	8495		
測定器と残った砂の質量 g	5713	5728	5285	5814	5605		
試験孔の体積 cm ³	846.7	842.4	1142.6	838.8	1012.2		
湿潤密度 g/cm ³	1.527	1.438	1.507	1.807	1.481		
乾燥密度 g/cm ³	1.387	1.317	1.396	1.725	1.417		
含水比 %	10.14	9.12	7.96	4.76	4.53		
試験実施日	2014/1/22			2014/1/23			
模型構築回数	1	2	3	1			
土砂模型材料	碎石		山砂	山砂			
試験孔から取り出した 湿潤土の質量 g	1724	1649	1427	1880			
ジャーとピクノメータートップに 砂を満たした質量 g	8405	8363	8381	8401			
測定器と残った砂の質量 g	5511	5390	5701	5249			
試験孔の体積 cm ³	1015.0	1071.6	861.7	1199.9			
湿潤密度 g/cm ³	1.698	1.539	1.656	1.567			
乾燥密度 g/cm ³	1.599	1.467	1.499	1.425			
含水比 %	6.2	4.92	10.47	9.96			

7. 1. 3 土砂模型の粒度試験

(1) 試験条件

本作業は、土砂模型材料2種類に対して、粒度試験を実施した。粒度試験一覧は、表 7.1.13 に示すとおりである。

表 7.1.13 粒度試験一覧

試験数量	試験	土砂模型材料	分析
1	*4	山砂	ふるい分析
2		碎石	

*4 土の粒度試験 JIS A 1204:2009

(2) 測定器具

使用した測定器具は、写真 7.1.4 に示すとおりである。



写真 7.1.4 粒度試験に使用した測定器具

(3) 試験結果

表 7.1.14~7.1.17 に、粒度試験結果を示す。土砂の方が細粒分が多いことが分かる。その割合は、碎石に対し約 15%多い。

表 7.1.14 粒度試験結果 1

土質試験結果一覧表 (基礎地盤)					
調査件名 土砂橋型の要素試験作業			試験年月日	平成 20年 1月 20日	
			試験担当者	小野村 成男	
試料番号 (深さ)	山砂	碎石			
一 般 地 盤	湿潤密度 ρ g/cm ³				
	乾密度 ρ_d g/cm ³				
	土粒子の密度 ρ_s g/cm ³				
	自然含水比 w %				
	孔隙比 e				
粒 度	粒径 7.75mm (%)				
	粒径 12~75mm (%)	45.3	68.2		
	粒径 75~475mm (%)	28.2	24.2		
	粒径 475~750mm (%)				
	粒径 750~950mm (%)	16.5	7.6		
	最大粒径 d_{max} mm	37.5	37.5		
流 動 性	流動指数 I_L %				
	塑性限界 w_p %				
	塑性指数 I_p				
分 類	地盤材料の 分類名	粘性土質	粘性土まじり		
	分類記号	(SCsE)	(SE-Cs)		
任 意 試 験	試験方法				
	圧縮指数 C_c				
	圧縮係数 μ kN/m ²				
一 軸 圧 縮	一軸圧縮強さ σ_1 kN/m ²				
	一軸圧縮強さ σ_2 kN/m ²				
	一軸圧縮強さ σ_3 kN/m ²				
	一軸圧縮強さ σ_4 kN/m ²				
三 軸 圧 縮	試験条件				
	主応力 σ_1 kN/m ²				
	側応力 σ_2 kN/m ²				
	有効応力 σ_3 kN/m ²				
特記事項			① 五分を除いた 75mm未満の土質材料に対する百分率で表す。 【kN/m ² = 0.101972kgf/cm ² 】		

表 7.1.15 粒度試験結果 2

JGS 0051		地盤材料の工学的分類	
調査件名 土砂性状の要素試験作業		試験年月日	平成 26年 1月 20日
		試験者	小野村 成男
試料番号 (深さ)	山形	高さ	
五分(75mm以上)	%		
横分(2~75mm)	%	45.3	108.2
砂分(0.075~2mm)	%	38.2	24.2
細粒分(0.075mm未満)	%	16.5	7.6
シルト分(0.005~0.075mm)	%		
粘土分(0.005mm未満)	%		
最大粒径	mm	37.5	37.5
均等係数 e_u		-	10.70
塑性限界 w_p	%		
液性限界 w_L	%		
塑性指数 I_p			
地盤材料の分類名	粘性土質	粘性土まじり	
	砂質種	砂質種	
分類記号	(C _u S)	(C _u -C _u)	
凡例記号	○	◎	

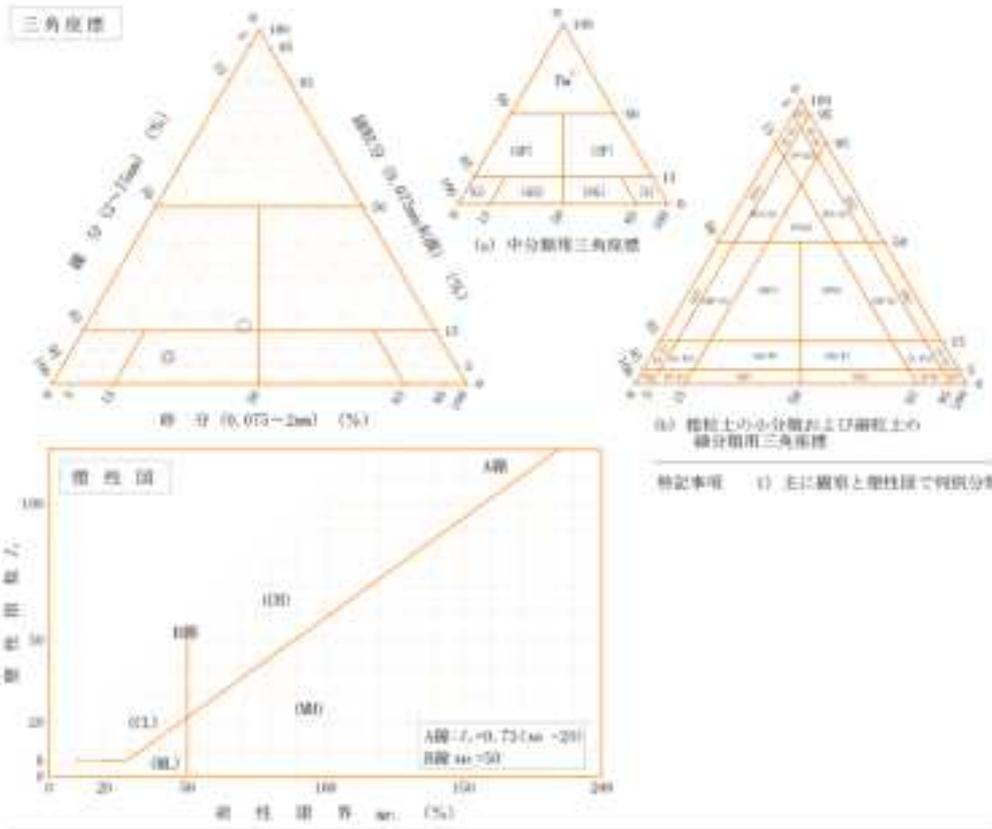


表 7.1.16 粒度試験結果 3

JIS 4 1204 165 0131		土の粒度試験 (粒径加積曲線)			
調査件名 土砂模型の登表試験作業		試験年月日 平成 26年 1月 16日			
		試験者 小野村 成男			
試料番号 (標 記)	山砂		試料番号 (標 記)		山砂
	粒径 mm	通過質量百分率%	粒径 mm	通過質量百分率%	
ふ る る い 分 辨	75		75		粗 粒 分 % 11.5
	20		20		中 粒 分 % 20.7
	47.5	100.0	47.5		細 粒 分 % 13.1
	24.8	94.4	24.8		粗 砂 分 % 7.8
	19	88.5	19		中 砂 分 % 17.1
	9.5	79.1	9.5		細 砂 分 % 13.3
	4.75	67.8	4.75		シ ュ ー ト 分 % 16.6
	2	54.7	2		2mmより大きい通過質量百分率 % 54.7
	0.850	46.9	0.850		475μmより大きい通過質量百分率 % 35.4
	0.425	35.4	0.425		75μmより大きい通過質量百分率 % 16.6
ば い 分 類	0.250	29.8	0.250		最大粒径 mm 37.5
	0.106	19.0	0.106		60 % 粒 径 の mm 2.9920
	0.075	16.5	0.075		50 % 粒 径 の mm 1.1316
					30 % 粒 径 の mm 0.2547
					10 % 粒 径 の mm -
					均 等 係 数 の -
				曲 率 係 数 の -	
				土粒子の密度 ρ _s g/cm ³ -	
				使用した分級機 -	
				浴液の種類、浴液の体積 -	
				20 % 粒 径 の mm 0.1172	

粗 土	シ ー ト	細 砂	中 砂	粗 砂	細 砂	中 粒	粗 粒
-----	-------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

特記事項

表 7.1.17 粒度試験結果 4

JIS A 1204 JIS 0121		土の粒度試験 (粒径加積曲線)					
調査件名: 土砂性状の要素試験作業				試験年月日: 平成 26年 1月 16日			
				試験者: 小野村 成男			
試験番号 (場 所)	砕石				試料番号 (場 所)		砕石
	粒径 mm	通過質量百分率 %	粒径 mm	通過質量百分率 %	粗 粒 分 %	細 粒 分 %	
よ ろ い 分 析	75		75		粗 粒 分 %	11.0	
	75		75		中 粒 分 %	43.2	
	75		75		細 粒 分 %	14.0	
	47.5	100.0	47.5		粗 粒 分 %	8.0	
	20.0	95.0	20.0		中 粒 分 %	11.0	
	10	80.0	10		細 粒 分 %	3.8	
	0.5	63.4	0.5		シ ル ト 分 %	7.6	
	4.75	45.8	4.75		地 土 分 %	7.6	
	2	31.8	2		2mmより大きい通過質量百分率 %	31.8	
	0.850	22.9	0.850		425 μ mより大きい通過質量百分率 %	14.7	
	0.425	14.7	0.425		75 μ mより大きい通過質量百分率 %	7.6	
	0.250	11.4	0.250		最大粒径 mm	37.5	
	0.106	8.3	0.106		60 % 粒径 D_{60} mm	8.5708	
0.075	7.6	0.075		50 % 粒径 D_{50} mm	5.8300		
注 録 分 割					30 % 粒径 D_{30} mm	1.7105	
					10 % 粒径 D_{10} mm	0.1689	
					均 等 係 数 C_u	30.78	
					曲 率 係 数 C_c	2.02	
					土粒子の密度 ρ_s g/cm ³	-	
					検閲した分取割	-	
				市販濃度, 消液添加量	-		
				20 % 粒径 D_{20} mm	0.6693		

粒径 (mm)	通過質量百分率 (%)
0.075	7.6
0.106	8.3
0.250	11.4
0.425	14.7
0.850	22.9
2	31.8
4.75	45.8
10	63.4
20	80.0
47.5	100.0

特記事項

7. 2 岩塊の跳ね返り係数計測試験

7. 2. 1 検討内容

(1) 目的

想定を超える地震動が作用し斜面が崩壊した場合の原子力施設へのリスク評価には課題が残されており、粒子法や個別要素法等の離散系の数値解析手法の整備が求められている。そこで、斜面崩壊の評価に関して、連続した角度の異なる2枚の斜面を転がり落ちる人工岩塊の転動挙動に対する個別要素法の適用方法について検討するために、基礎試験として球形・塊状・板状形状の人工岩塊の反発係数を求めた。

(2) 概要

試験場概要と試験風景を図7.2.1, 7.2.2に示す。球形・塊状・板状形状の3種類の人工岩塊を用いて(図7.2.3)、衝突方法・岩塊サイズ・衝突速度・被衝突体種類・衝突面湿潤状態を変化させて跳ね返り実験を実施した。なお、サイズが大きい岩塊は人力では持ち上げられないため、図7.2.4に示すような電磁石とバックホウにより落下させた。反発試験の撮影には、デジタルハイスピードカメラを使用した。カメラは、株式会社ライブラリーの「ひまわりCL6740」、画面解像度は 640×480 pixels, フレームレートは400fps, 露光時間は $1/2000$ s, モノクロの条件で撮影した。デジタルハイスピードカメラにより撮影した連番画像を画像解析することで反発係数を算出した。試験ケース一覧を表7.2.1に示す。

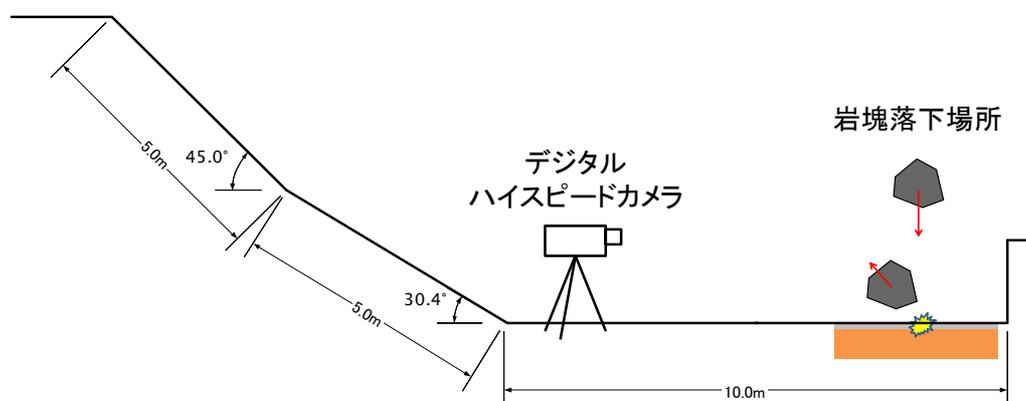


図 7.2.1 試験場概要

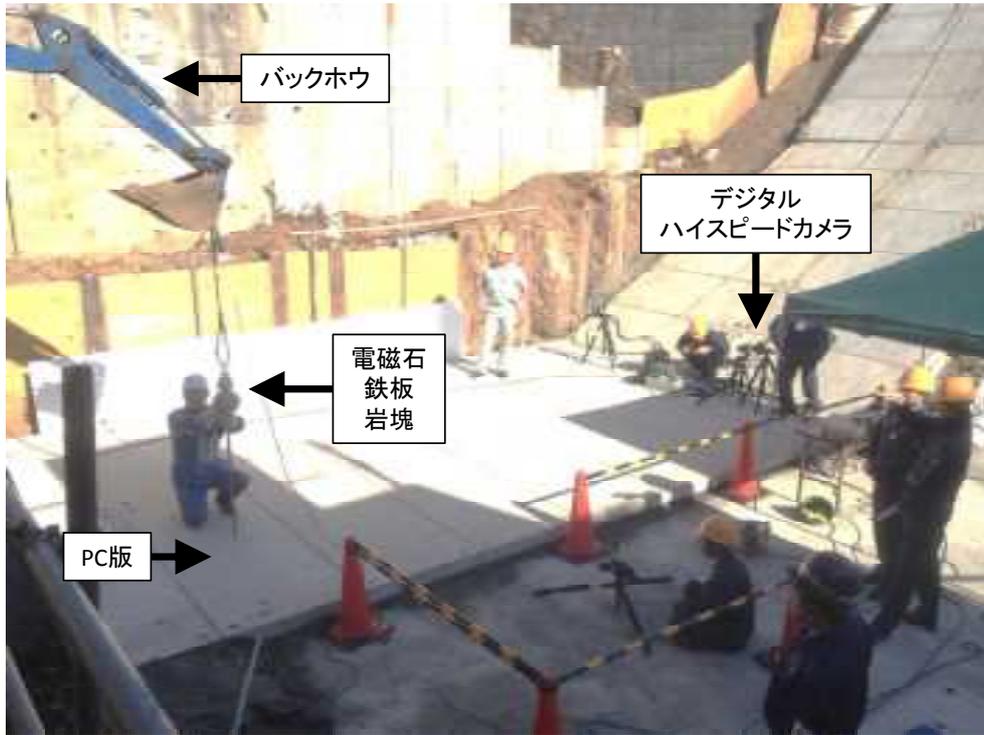


図 7.2.2 試験風景



図 7.2.3 球形・塊状・扁平形状の人工岩塊

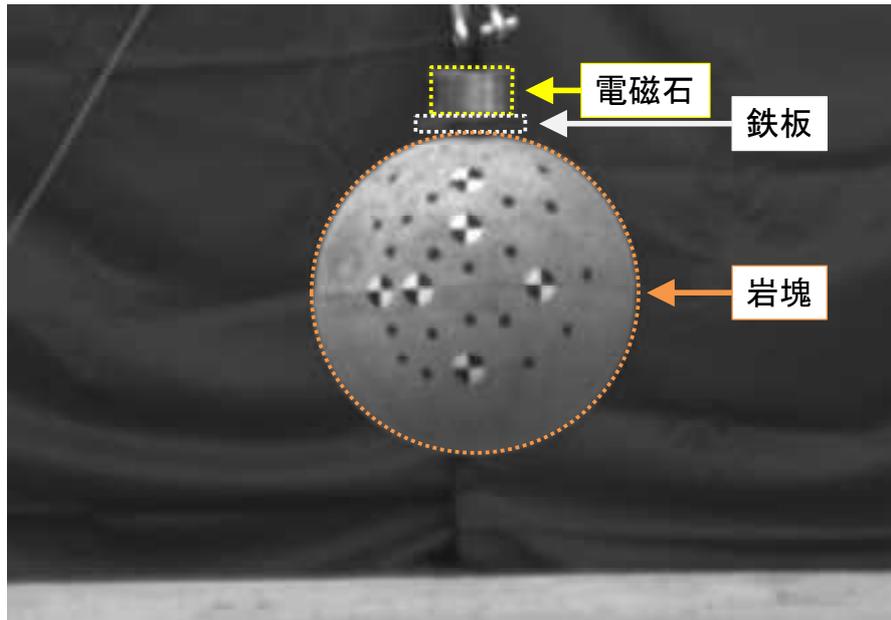


図 7.2.4 電磁石による落体の吊り上げ状況

表 7.2.1 反発試験ケース一覧

施行日	施行番号	実験ケース (施行順)	衝突方法	衝突体	落下 高さ	衝突体 直径	被衝突体	表面 状態
11月28日(木)	1	01_ball-h1-d20	自由落下	球体	h1	d20	PC版	乾燥
11月28日(木)	2	02_ball-h1-d40	自由落下	球体	h1	d40	PC版	乾燥
11月28日(木)	3	03_ball-h0.5-d40	自由落下	球体	h0.5	d40	PC版	乾燥
11月28日(木)	4	04_ball-h1.5-d20	自由落下	球体	h1.5	d20	PC版	乾燥
11月28日(木)	5	05_ball-h0.5-d20	自由落下	球体	h0.5	d20	PC版	乾燥
11月28日(木)	6	06_ballshapedblock-h0.5-d20	自由落下	塊状	h0.5	d20	PC版	乾燥
11月28日(木)	7	07_ballshapedblock-h1-d20	自由落下	塊状	h1	d20	PC版	乾燥
11月28日(木)	8	08_flatblock-shortside-h0.5-d20	自由落下	扁平短辺	h0.5	d20	PC版	乾燥
11月28日(木)	9	09_flatblock-longside-h0.5-d20	自由落下	扁平長辺	h0.5	d20	PC版	乾燥
11月28日(木)	10	10_flatblock-shortside-h1-d20	自由落下	扁平短辺	h1	d20	PC版	乾燥
11月28日(木)	11	11_flatblock-longside-h1-d20	自由落下	扁平長辺	h1	d20	PC版	乾燥
11月28日(木)	12	12_ball-h0.25-d40	自由落下	球体	h0.25	d40	PC版	乾燥
11月28日(木)	13	13_ball-h2-d40	自由落下	球体	h2	d40	PC版	乾燥
11月28日(木)	14	14_ballshapedblock-h0.5-d40	自由落下	塊状	h0.5	d40	PC版	乾燥
11月28日(木)	15	15_ballshapedblock-h2-d40	自由落下	塊状	h2	d40	PC版	乾燥
11月28日(木)	16	16_flatblock-shortside-h0.5-d40	自由落下	扁平短辺	h0.5	d40	PC版	乾燥
11月28日(木)	17	17_flatblock-longside-h0.5-d40	自由落下	扁平長辺	h0.5	d40	PC版	乾燥
11月28日(木)	18	18_flatblock-longside-h2-d40	自由落下	扁平長辺	h2	d40	PC版	乾燥
11月29日(金)	19	19_ball-h0.5-d50	自由落下	球体	h0.5	d50	PC版	乾燥
11月29日(金)	20	20_ball-h1-d40	自由落下	球体	h1	d40	PC版	乾燥
11月29日(金)	21	21_ball-h1-d20	自由落下	球体	h1	d20	PC版	乾燥
11月29日(金)	22	22_ball-d20-naname	斜方投射	球体	斜め	d20	PC版	乾燥
11月29日(金)	23	23_ball-d20-naname-water	斜方投射	球体	斜め	d20	PC版	散水
11月29日(金)	24	24_ball-h1-d20-water	自由落下	球体	h1	d20	PC版	散水
11月29日(金)	25	25_ball-d20-d20-furiko	振り子	球体	振り子	d20	d20	乾燥
11月29日(金)	26	26_ball-d20-d40-furiko	振り子	球体	振り子	d20	d40	乾燥
11月29日(金)	27	27_ball-d40-d20-furiko	振り子	球体	振り子	d40	d20	乾燥
11月29日(金)	28	28_ball-d40-d40-furiko	振り子	球体	振り子	d40	d40	乾燥
11月29日(金)	29	29_ball-d50-d50-furiko	振り子	球体	振り子	d50	d50	乾燥

7. 2. 1 検討結果

(1) 画像撮影結果

a) 鉛直自由落下試験

鉛直自由落下試験のデジタルハイスピードカメラによる撮影状況を示す (図 7.2.5)。

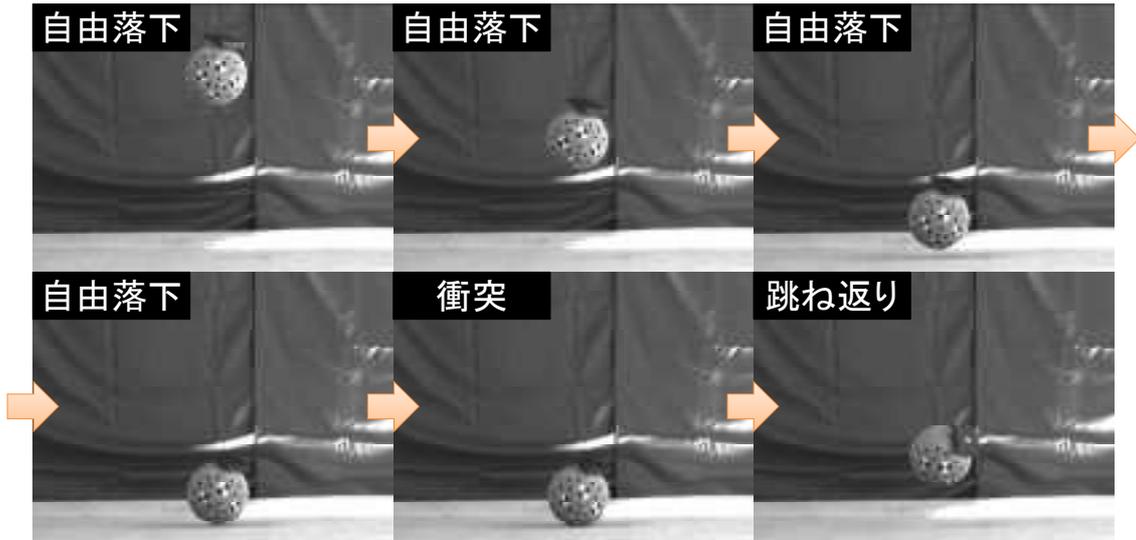


図 7.2.5 鉛直自由落下試験の様子 (01_ball-h1-d20- 1 回目)

b) 振り子試験

振り子試験のデジタルハイスピードカメラによる撮影状況を示す (図 7.2.6)。

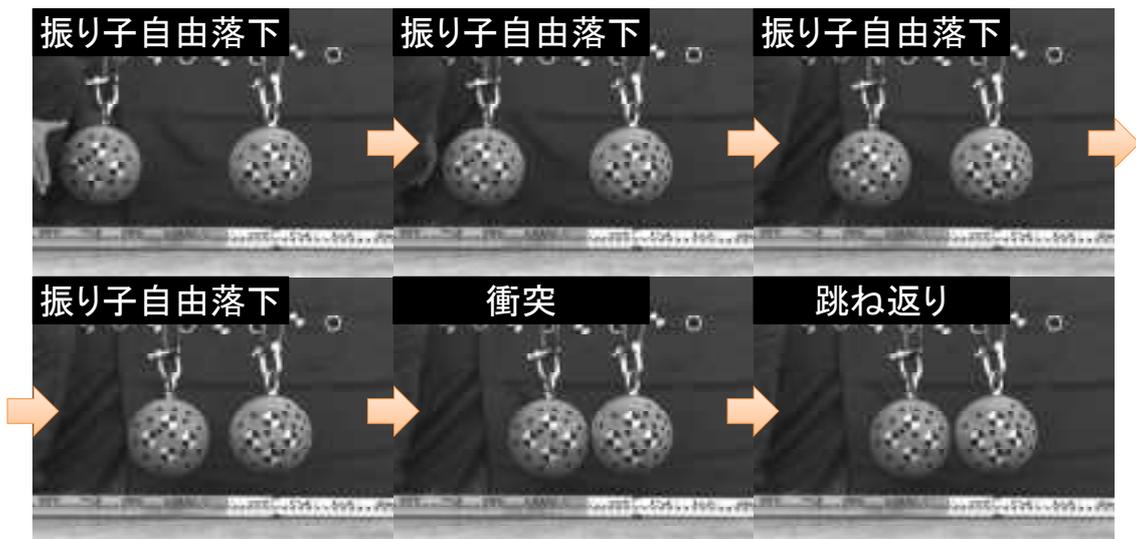


図 7.2.6 振り子試験の様子 (25_ball-d20-d20-furiko-水平方向引き代 25cm)

c) 斜方投射試験

斜方投射試験のデジタルハイスピードカメラによる撮影状況を示す (図 7.2.7)。

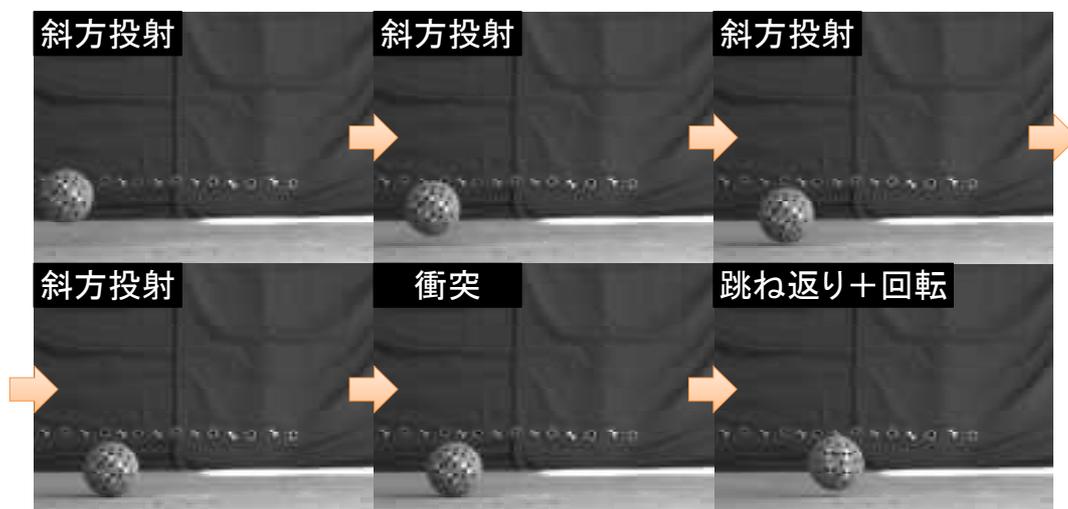


図 7.2.7 斜方投射試験の様子 (22_ball-d20-naname-1 回目)

(2) 画像解析結果

a) 球形岩塊の鉛直自由落下試験に対する画像解析

球形岩塊の鉛直自由落下試験では、衝突前後の4枚の画像から得られる入射速度と反射速度から反発係数を算定した(図7.2.8)。入射速度は、衝突直前から5ms前までの5ms間の岩塊移動量から算定し、反射速度は、衝突時から最大跳ね返り高さ到達時までの岩塊移動量から算定した(図7.2.9)。

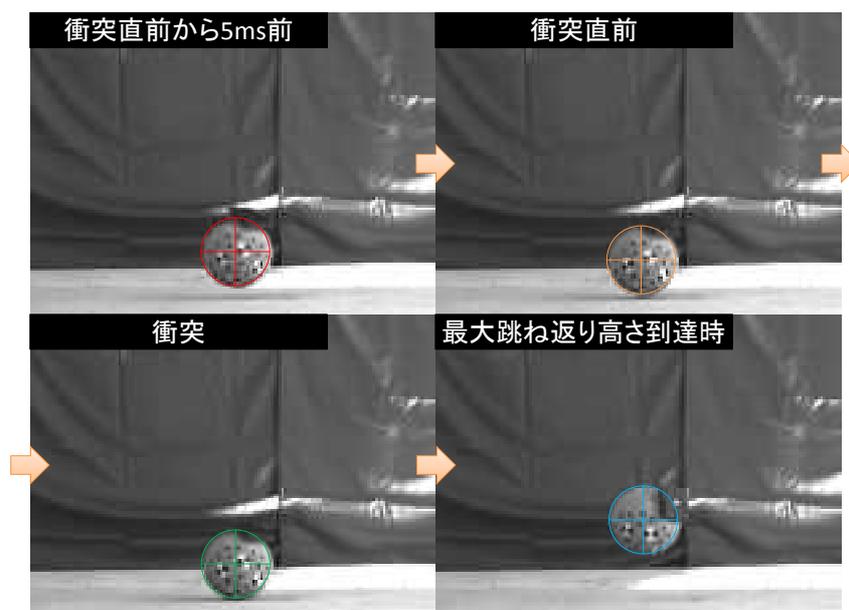


図 7.2.8 鉛直方向反発係数算定に必要な画像の選定例 (01_ball-h1-d20- 1 回目)

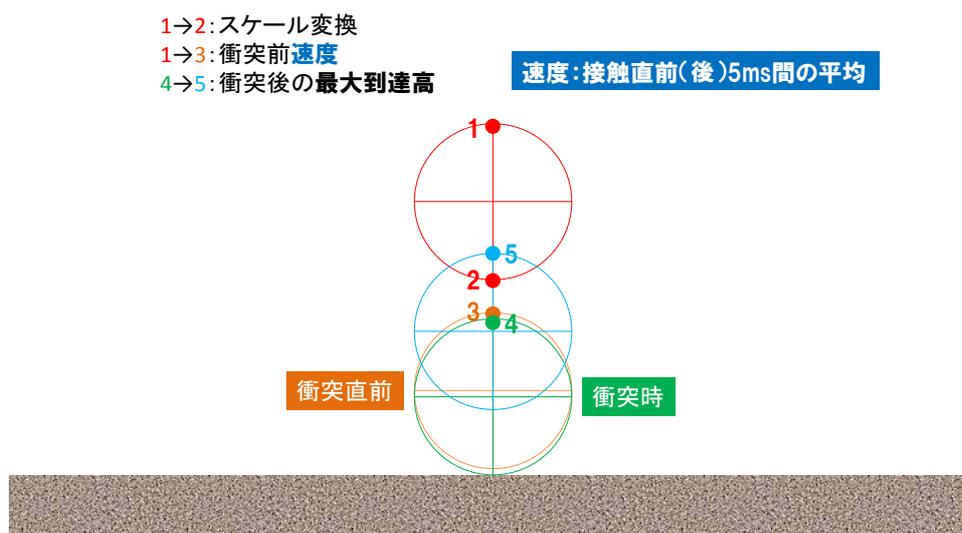


図 7.2.9 鉛直自由落下試験の画像処理イメージ

b) 塊状及び板状岩塊の鉛直自由落下試験に対する画像解析

塊状及び板状岩塊の鉛直自由落下試験では、岩塊に貼付した標点変位から得られる入射速度と反射速度から反発係数を算定した（図 7.2.10）。入射速度と反射速度は、追跡可能な全ての標点変位の平均値を岩塊重心の変位と仮定することで算定した（図 7.2.11）。

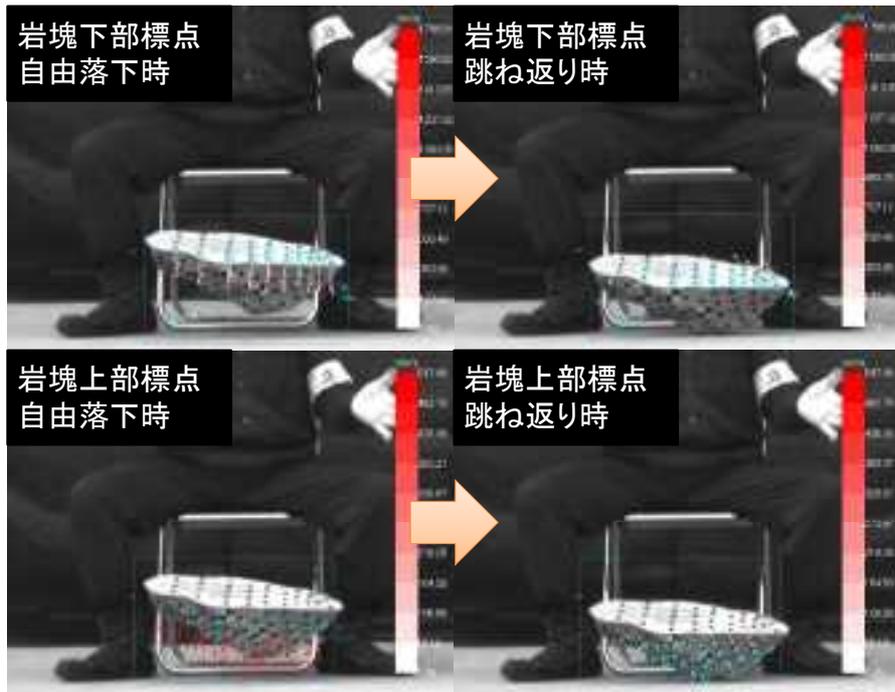


図 7.2.10 標点追跡例 (08_flatblock-shortside-h0.5-d20-4 回目)

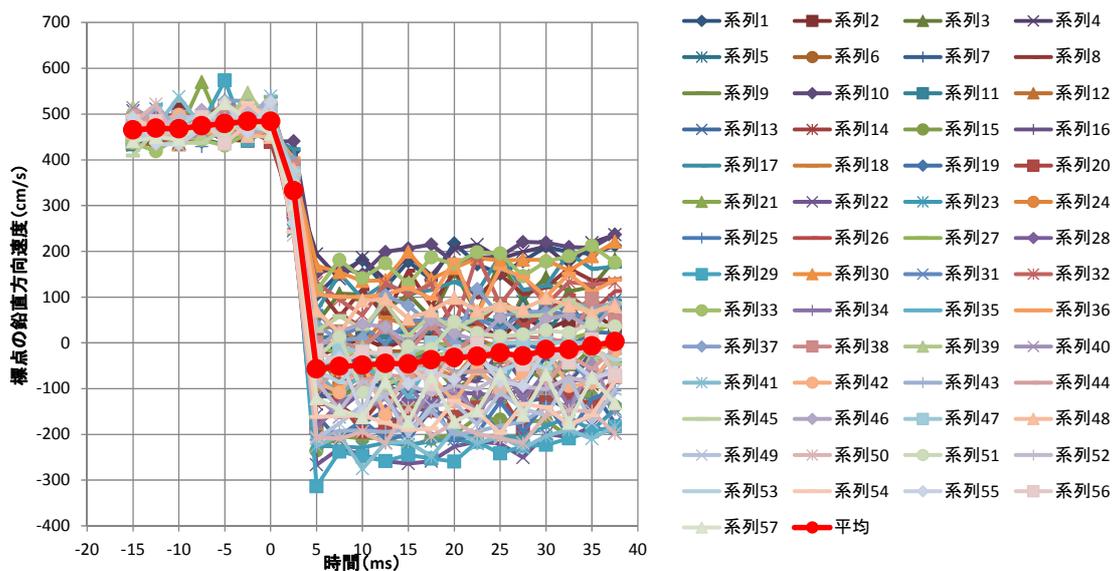


図 7.2.11 標点の鉛直方向速度の継時変化例 (08_flatblock-shortside-h0.5-d20-4 回目)

c) 球形岩塊の斜方投射試験に対する画像解析

球形岩塊の斜方投射試験では、衝突前後の6枚の画像から得られる入射速度と反射速度から反発係数を算定した(図7.2.12)。入射速度は、衝突直前から5ms前までの5ms間の岩塊移動量から算定し、反射速度は、衝突直後から5ms後までの5ms間の岩塊移動量から算定した(図7.2.13)。また、入射角速度は、衝突直前から20ms前までの20ms間の岩塊回転量から算定し、反射角速度は、衝突直後から20ms後までの20ms間の岩塊回転量から算定した。

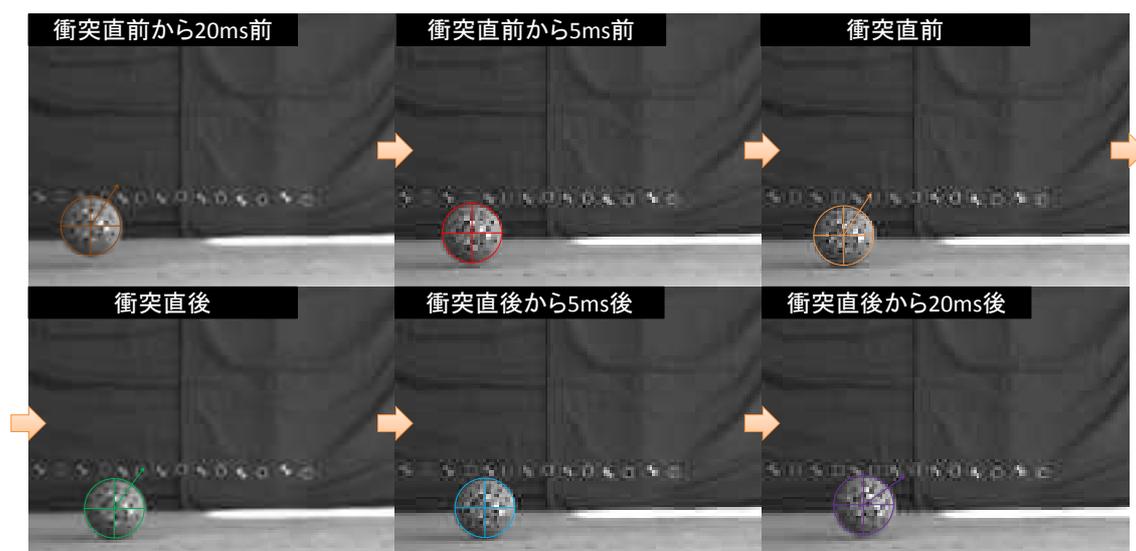


図 7.2.12 水平方向反発係数及び角速度算定に必要な画像の選定例

(22_ball-d20-naname-1回目)

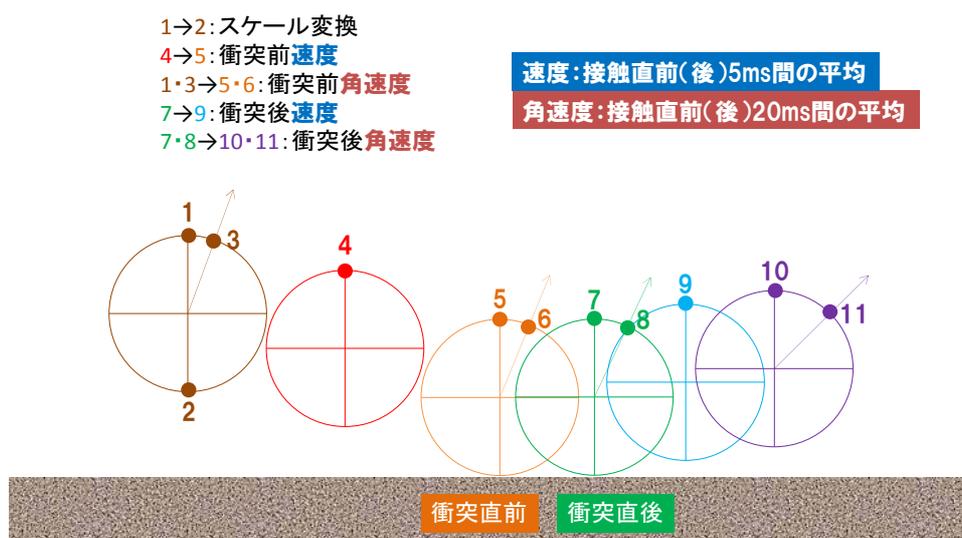


図 7.2.13 斜方投射試験の画像処理イメージ

d) 球形岩塊の振り子試験に対する画像解析

球形岩塊の斜方投射試験では、衝突前後の4枚の画像から得られる入射速度と反射速度から反発係数を算定した(図7.2.14)。入射速度は、衝突直前から20ms前までの20ms間の岩塊相対移動量から算定し、反射速度は、衝突直後から20ms後までの20ms間の岩塊相対移動量から算定した(図7.2.15)。

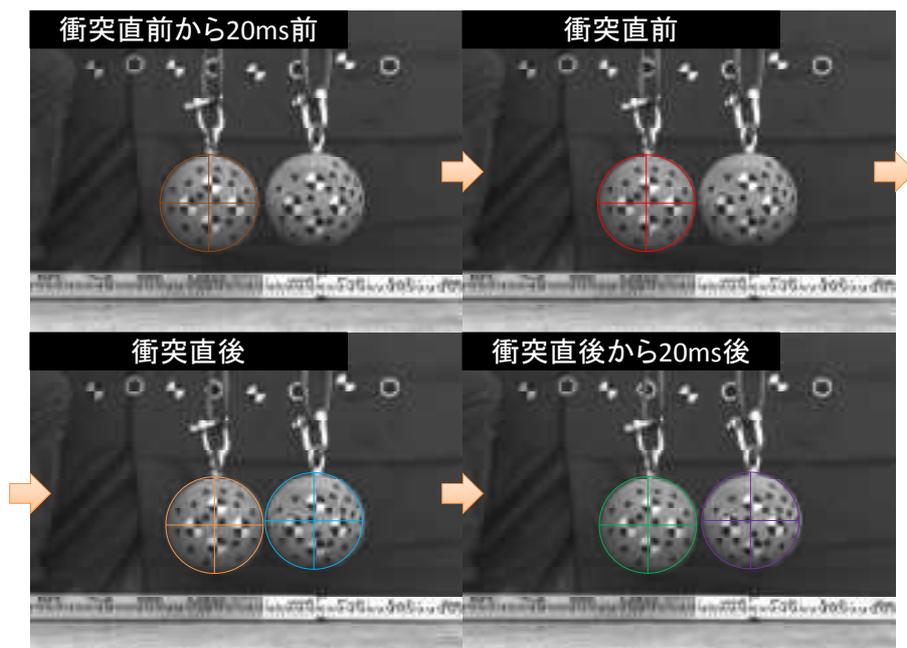


図 7.2.14 振り子試験時の水平方向反発係数算定に必要な画像の選定例

(25_ball-d20-d20-furiko-水平方向引き代 25cm)

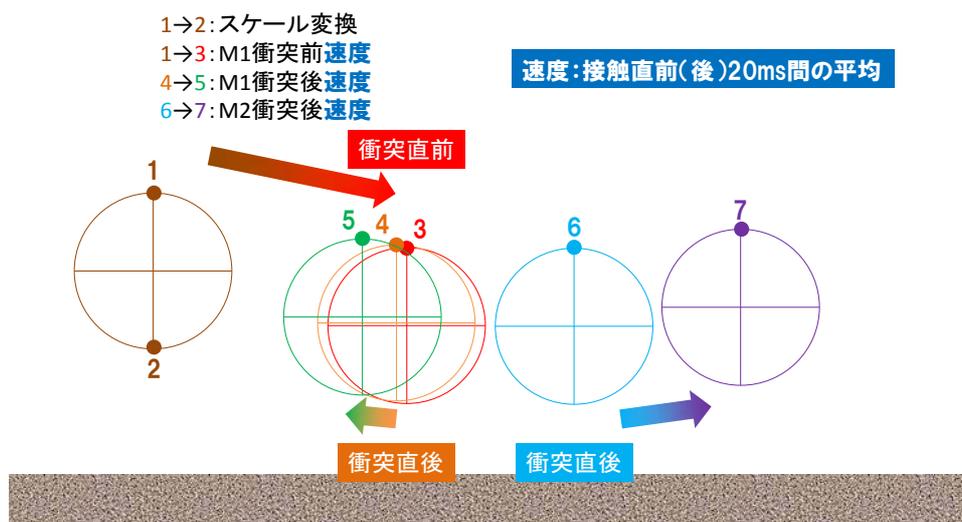


図 7.2.15 振り子試験の画像処理イメージ

(3) 反発係数の算定

a) 球形岩塊の鉛直自由落下試験結果

球形岩塊の鉛直自由落下試験から鉛直方向反発係数を算定した (図 7.2.16)。

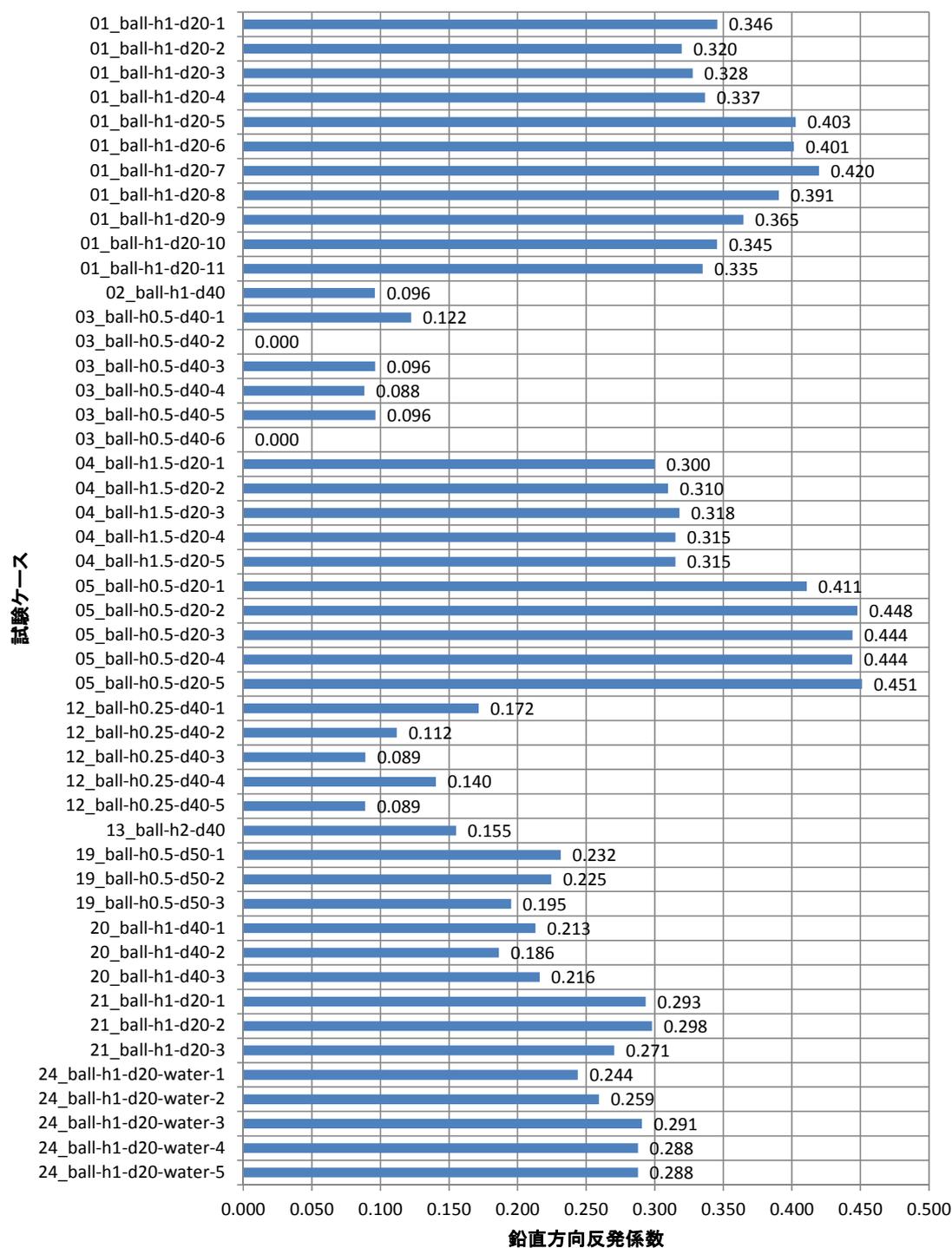


図 7.2.16 鉛直方向反発係数一覧 (球形岩塊の鉛直自由落下試験結果)

図 7.2.17 には、鉛直方向入射速度と鉛直方向反発係数の関係を示す。試験ケースごとにプロットを分けており、20cm 球を青、40cm 球を赤、50cm 球を緑としている。それぞれ同じ試験条件の中では、反発係数は近い値を示し、入射速度が大きいくほど反発係数が小さくなる傾向となる。反発係数が最も大きくなる岩塊サイズは 20cm 球であり、岩塊サイズが大きい 40cm 球、50cm 球になると反発係数が小さくなる傾向がある。

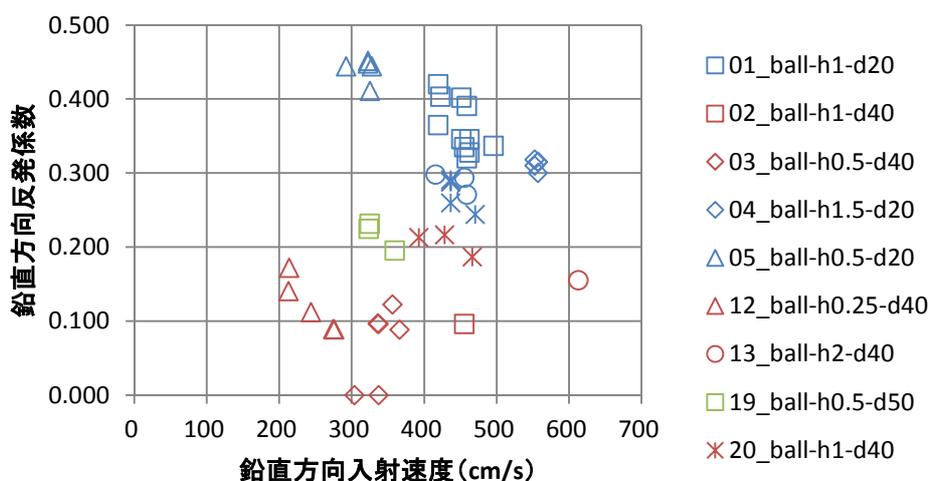


図 7.2.17 鉛直方向入射速度と鉛直方向反発係数の関係
(球形岩塊の鉛直自由落下試験結果)

b) 塊状・板状岩塊の鉛直自由落下試験結果

塊状・板状岩塊の鉛直自由落下試験結果から鉛直方向反発係数を算定した (図 7.2.18)。

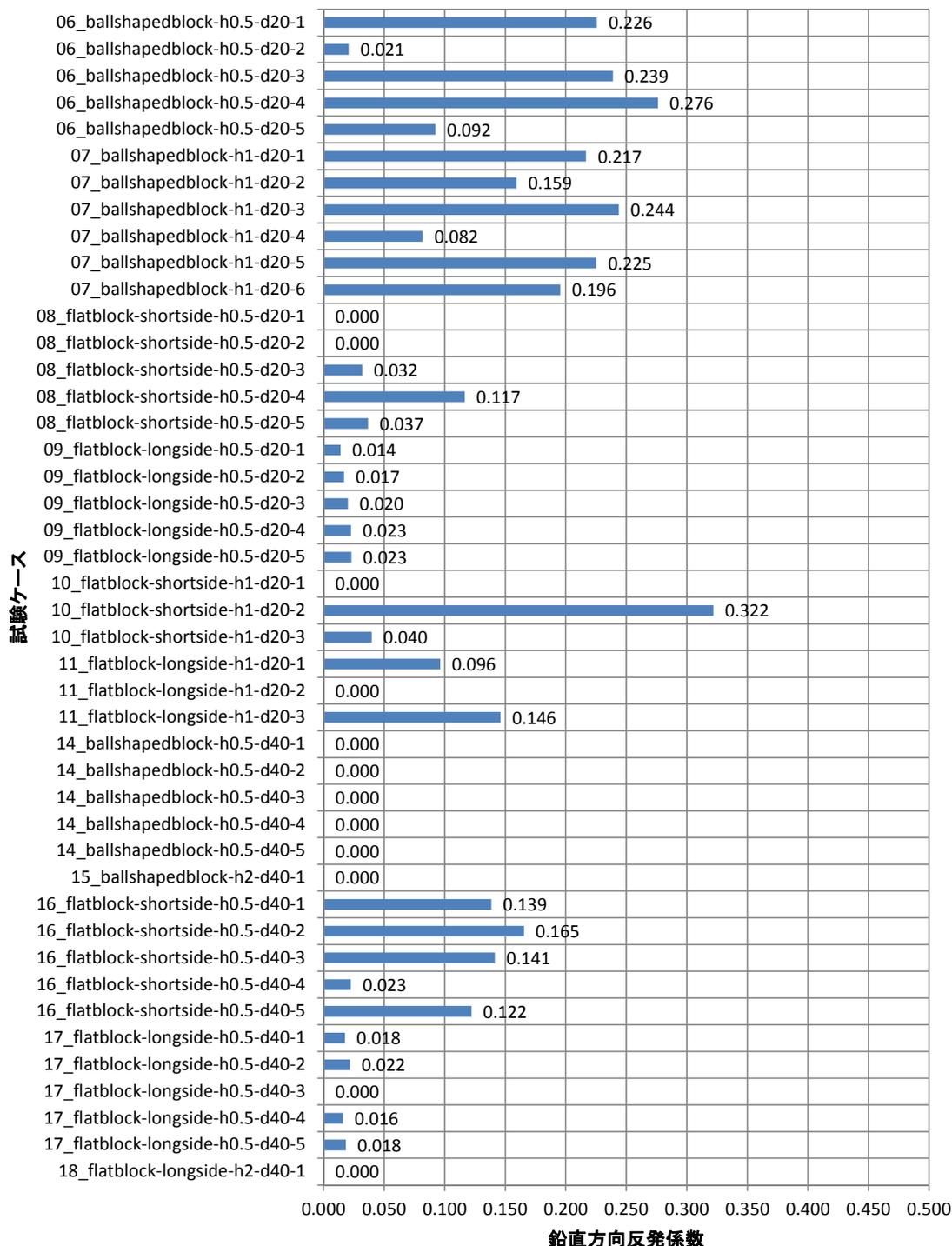


図 7.2.18 鉛直方向反発係数一覧 (塊状・扁平岩塊の鉛直自由落下試験結果)

図 7.2.19 には、鉛直方向入射速度と鉛直方向反発係数の関係を示す。試験ケースごとにプロットを分けており、塊状 20cm を青塗りつぶし、板状 20cm を青白抜き、塊状 40cm を赤塗りつぶし、板状 40cm を赤白抜きとしている。塊状岩塊は、20cm、40cm とともに、入射速度の増加に伴い反発係数は減少し、岩塊サイズが小さい 20cm の方が、反発係数が大きくなる傾向がある。一方で、板状岩塊は、入射速度の違いや岩塊サイズの違い、落下方向（短辺または長辺）の違いによる明瞭な傾向はなく、反発係数に非常にばらつきがある岩塊形状であると言える。

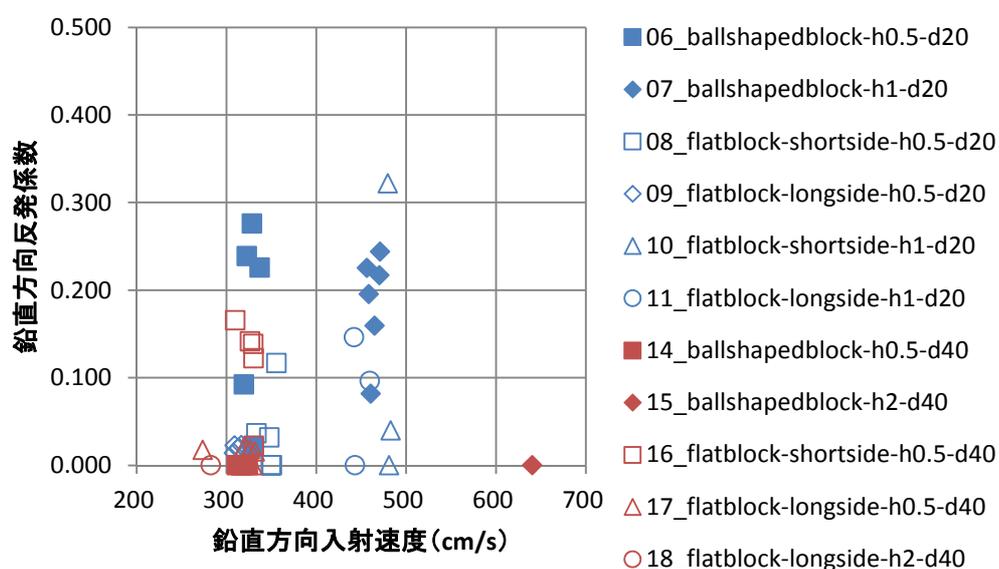


図 7.2.19 鉛直方向入射速度と鉛直方向反発係数の関係
(塊状・板状岩塊の鉛直自由落下試験結果)

c) 球形岩塊の斜方投射試験結果

① 反発係数算定結果

球形岩塊の斜方投射試験結果から鉛直方向反発係数を算定した（図 7.2.20）。

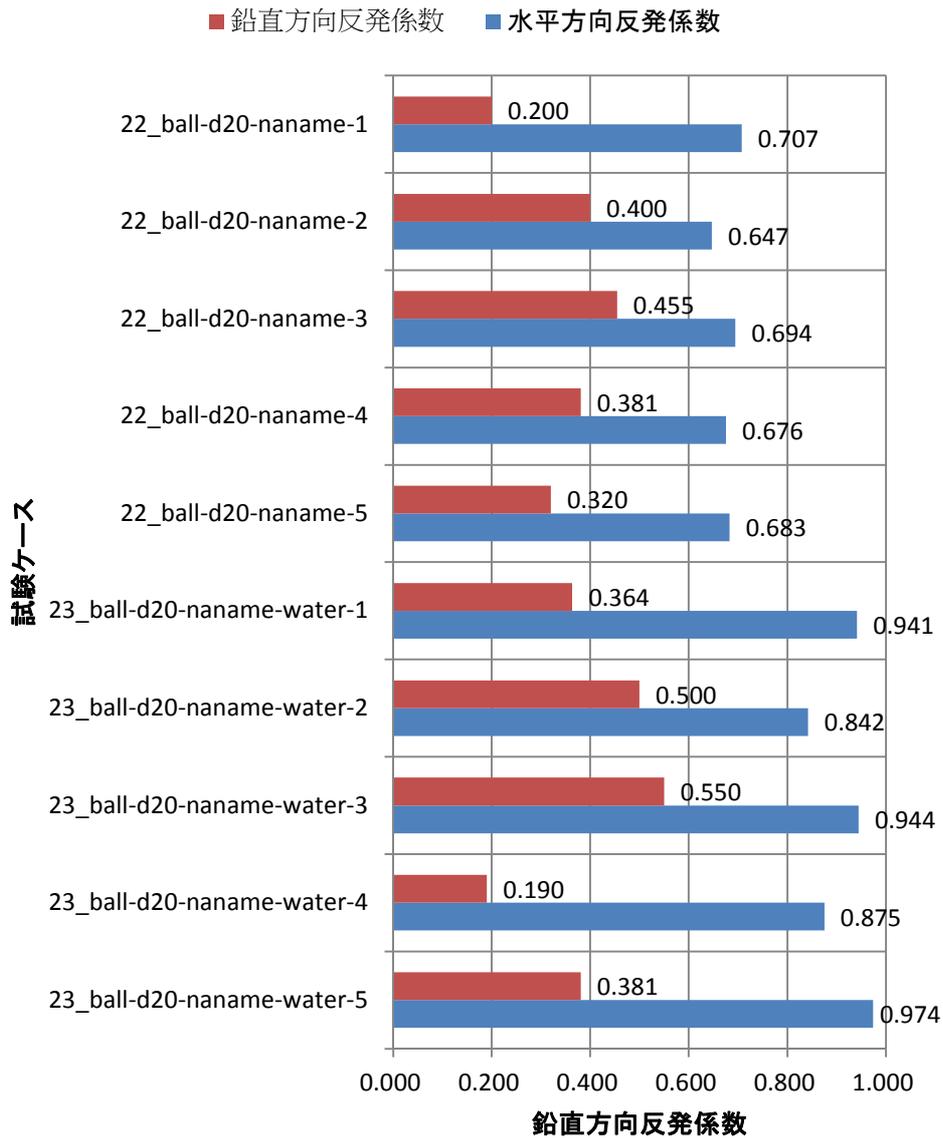


図 7.2.20 水平・鉛直方向反発係数一覧（球形岩塊の斜方投射試験結果）

とにプロットを分けており、PC版の表面が乾いたケースを赤、表面が濡れたケースを青としている。乾いたケースでは、衝突前後の水平方向の速度の関係が式(4)に沿い、水平方向反射速度と回転角速度の関係も式(5)に沿う。乾いたケースでは、衝突時にほとんど滑らずに転がる運動になると言える。一方、濡れたケースでは、水平方向の入射速度に対して反射速度の割合が式(4)より大きく、水平方向の反射速度に対する回転角速度の割合が式(5)より小さい。濡れたケースでは、滑りを伴った衝突現象になることがわかる。

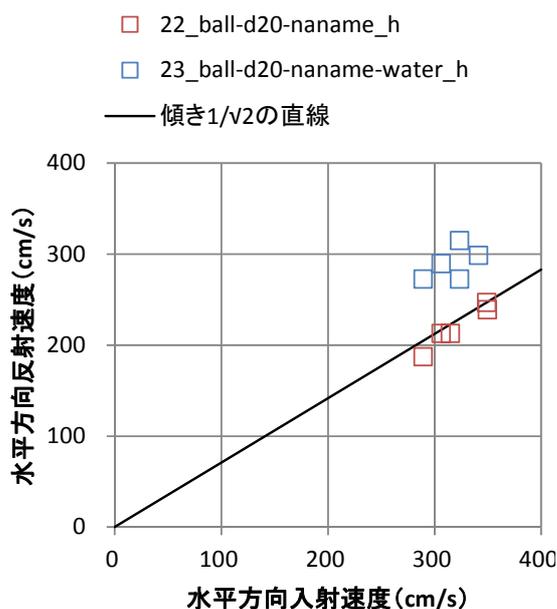


図 7.2.22 水平方向入射速度と水平方向反射速度の関係

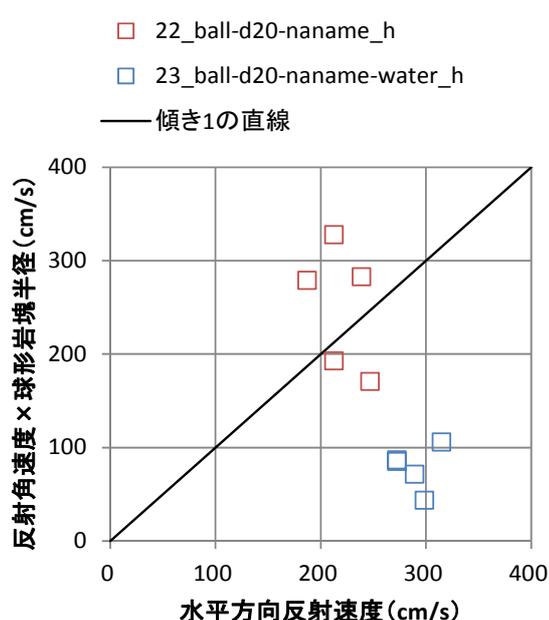


図 7.2.23 球形岩塊円周上の任意の点の速度と水平方向反射速度の関係

衝突時に滑るか転がるかの判定を簡易に行うために転動係数を定義する (式(6)).

$$C_r = \frac{\omega r}{v'} \quad (6)$$

ここで、 C_r : 転動係数、 v' : 衝突面に平行な反射速度、 ω : 回転角速度、 r : 球形岩塊の半径である。 $C_r = 1$ のとき、滑らずに転がっており、 $C_r = 0$ のとき、転がらずに滑っていると判断できる。

d) 球形岩塊の振り子試験結果

① 反発係数算定結果

球形岩塊の振り子試験結果から水平方向反発係数を算定した（図 7.2.24）。

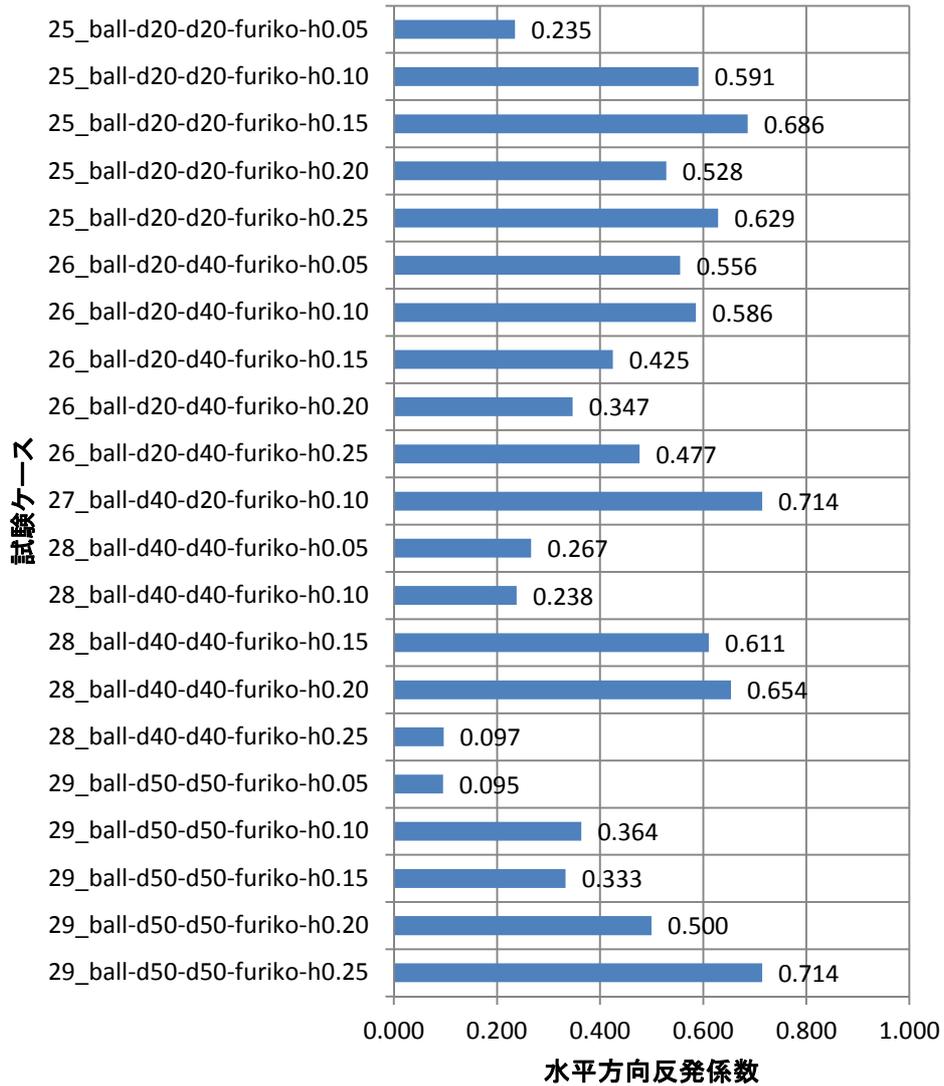


図 7.2.24 水平方向反発係数一覧（球形岩塊の振り子試験結果）

図 7.2.25 には、水平方向入射速度と水平方向反発係数の関係を示す。試験ケースごとにプロットを分けている。いずれの試験ケースにおいても、水平方向入射速度の増加に伴う水平方向反発係数の明瞭な変化はなく、水平方向反発係数はばらついていると言える。今回実施した振り子試験では、球形岩塊をバックホウで吊った状態で 2 つの球形岩塊を衝突させた。バックホウは油圧でアームの高さを調節するが、油圧は抜け続けるためアームの高さを維持することは容易ではなかった。そのため、2 つの球形岩塊の重心高さを合わせきれていないために反発係数のばらつきが大きくなったものと考えられる。

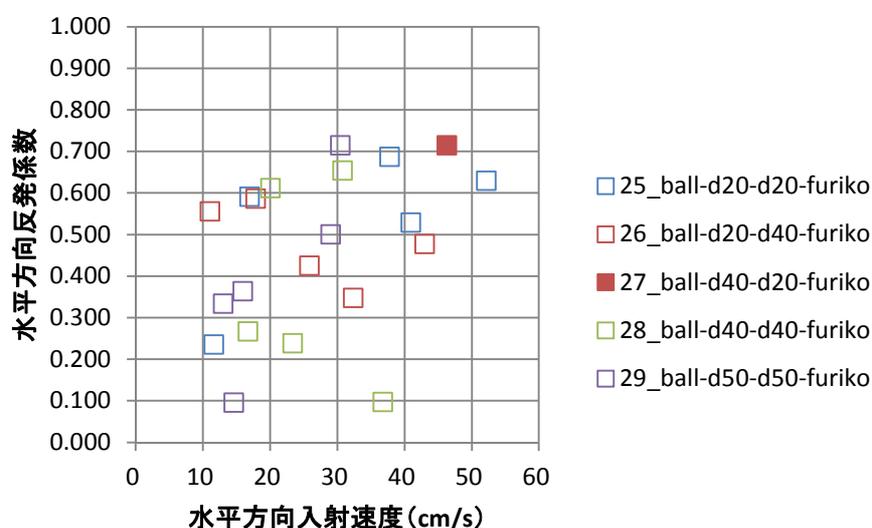


図 7.2.25 水平方向入射速度と水平方向反発係数の関係

② 換算質量が反発係数へ及ぼす影響の理論値と実験値の比較

反発係数は、材料が同じでも岩塊サイズや衝突条件によって値が異なる。ここで、球が剛な床に衝突したときの損失エネルギーは、式(7)のように球の質量と入射速度と反発係数で表される。一方で、2つの球の衝突時における損失エネルギーは、球が剛な床に衝突するときと同様に、式(8)のように換算質量 $((m_1 m_2)/(m_1 + m_2))$ と相対速度差と反発係数で表される。

$$E_L = \frac{1}{2} m_1 (v_1)^2 - \frac{1}{2} m_1' (v_1')^2 = \frac{1}{2} m_1 (v_1)^2 (1 - e^2) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} E_L &= \frac{1}{2} m_1 (v_1)^2 + \frac{1}{2} m_2 (v_2)^2 - \frac{1}{2} m_1' (v_1')^2 - \frac{1}{2} m_2' (v_2')^2 \\ &= \frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (v_1 - v_2)^2 (1 - e^2) \end{aligned} \quad (8)$$

材料によって相対速度差に対してエネルギー損失する割合が等しいと仮定した場合、換算質量が増加すると反発係数は減少する。図 7.2.26 には、球形岩塊を用いた各実験ケースの平均反発係数と換算質量の関係を示す。算質量の増加に伴い反発係数が減少する傾向があることから、岩塊サイズ等の影響で反発係数が異なる理由の一つに、反発係数は換算質量に依存することが考えられる。

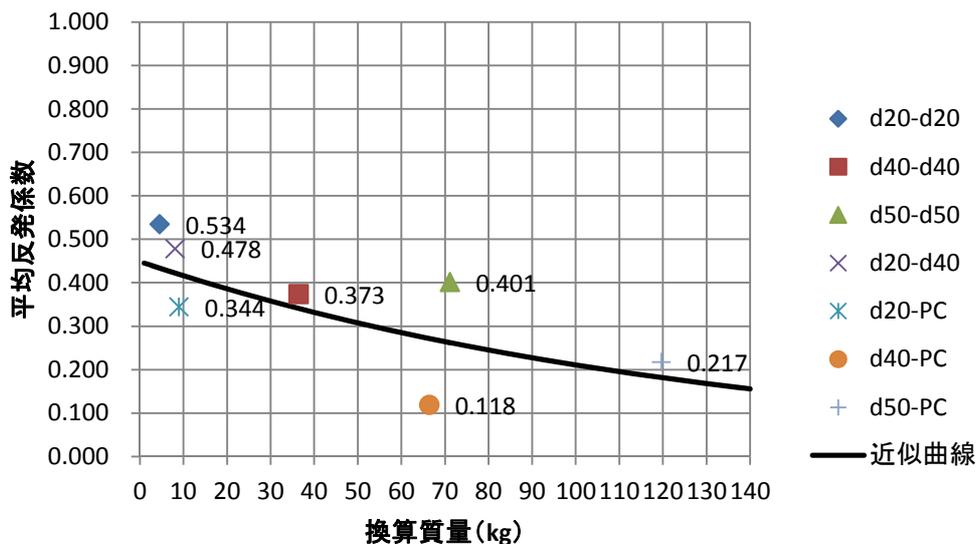


図 7.2.26 球形岩塊を用いた各実験ケースの平均反発係数と換算質量の関係

7. 2. 2 質量が大きい岩塊の繰り返し载荷を受けた PC 版の損傷状態

今回実施した反発試験は 2 日間にわたっており、1 日目と 2 日目の両日に同じ落下条件の試験を実施している (図 7.2.27)。しかし、同じ落下条件にもかかわらず 1 日目と 2 日目の反発係数に差が生じた。40cm 球は 2 日目の方が反発係数は大きくなり、20cm 球は 2 日目の方が反発係数は小さくなった。

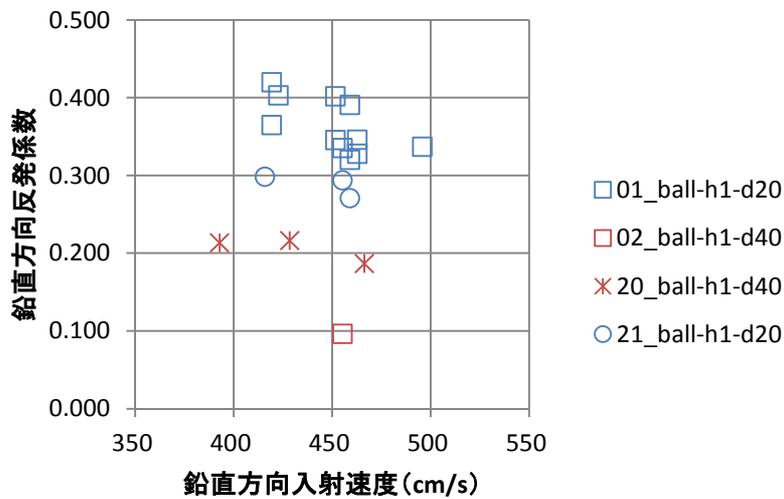


図 7.2.27 実験 1 日目と 2 日目の鉛直自由落下試験による鉛直方向反発係数の比較 ;

20cm 球の 1m 落下 (1 日目 : 01_ball-h1-d20, 2 日目 : 21_ball-h1-d20),

40cm 球の 1m 落下 (1 日目 : 02_ball-h1-d40, 2 日目 : 20_ball-h1-d40)

そこで、1日目と2日目のPC版の固有周期を確認してPC版に損傷がないか調べた。PC版の損傷には岩塊サイズが大きい40cm球の方が目に見える変位を与えると考えられるので、1日目と2日目の40cm球の1m落下の試験ケースで比較した(図7.2.28)。調査の結果、2日目の方がPC版の固有周期が1.3倍程度長いことがわかった。PC版の固有周期は長くなり、40cm球の反発係数は大きくなった。



図 7.2.28 実験 1 日目と 2 日目の PC 版の固有周期の比較；

1 日目：02_ball-h1-d40, 2 日目：20_ball-h1-d40-1 回目

通常、衝撃問題では損傷が進むとエネルギー吸収が大きくなるため反発係数は小さくなる。しかし、接触面の初期不整形がある場合、大きな荷重を繰り返し载荷したときに初期不整形が解消されることでエネルギー吸収が小さくなることが考えられる。

初期不整形の話を踏まえると以下のような原因が考えられる（図 7.2.29）。大きな荷重の载荷履歴のない状態で初期不整形により PC 版とモルタル間にわずかな凸凹と空隙があると仮定する。そこに大きな荷重が载荷すると徐々に凸凹が平滑化される可能性がある。また、初期不整形が解消される際にはモルタルの凸凹の破碎によるエネルギー損失が大きいことが考えられるため载荷履歴の少ない 1 日目の試験では反発係数が小さくなった可能性がある。複数回の载荷履歴を受け、モルタル表面が平滑化されて初期不整形が解消された 2 日目の試験では、モルタル破碎によるエネルギー損失が小さいため 40cm 球の反発係数が大きくなった可能性が考えられる。また、20cm 球が 2 日目に反発係数が小さくなった原因には、PC 版が梁のような変形をすることにより運動量を PC 版に与えた可能性が考えられる。

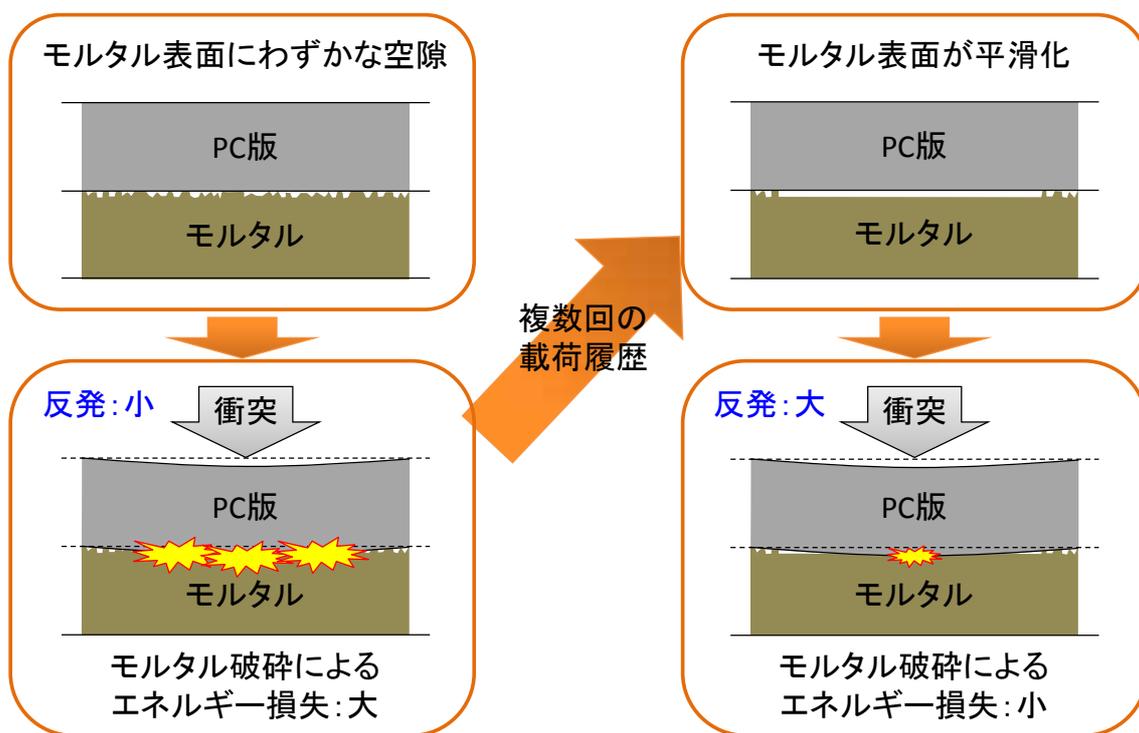


図 7.2.29 PC 版損傷原因の検討

7. 2. 3 反発係数のまとめ

本試験で得られた PC 版に対する反発係数一覧を表 7.2.2 に示す。前述したように、岩塊のサイズの影響が考えられることから、形状およびサイズ毎に跳ね返り係数を設定した。また、前述したように PC 板の損傷の影響も考えられる。本件における検証解析に用いるパラメータとしては、各回の平均値を用いるものとした。

表 7.2.2 反発係数一覧表

模型		サイズ	高さ(m)	跳ね返り係数		
球形 岩塊	20cm	0.5	0.440			
			1.0	1 回目	0.399	0.343 (平均値)
				2 回目	0.287	
		1.5	0.312			
		40cm	0.25	0.120		
			0.5	0.067		
	1.0		1 回目	0.096	0.151 (平均値)	
			2 回目	0.205		
	2.0	0.155				
	塊状 岩塊	20cm	0.5	0.171		
1.0			0.187			
40cm		0.5	0.000			
		2.0	0.000			
板状 岩塊	横	20cm	0.5	0.037		
			1.0	0.121		
		40cm	0.5	0.118		
	縦	20cm	0.5	0.019		
			1.0	0.081		
		40cm	0.5	0.015		

7. 3 岩塊の摩擦係数を計測するための一面せん断試験

7. 3. 1 試験内容

岩塊、山砂および碎石と PC 板面の摩擦係数を計測した。写真 7.3.1 に示すように、ここでは実際に大型流路模型に使用した PC 板を 1 枚用意し、その上に岩塊模型を作成した材料と同一のものを使用して作成した剛体模型を載せた状態で一端を吊り上げ、剛体模型が滑動した時点の角度を計測した。同時に、写真 7.3.2 に示すように、高速度カメラによって撮影し画像解析を行うことで、剛体模型の時刻歴変位から剛体模型の滑動距離とその距離を計測した。



写真 7.3.1 試験状況



写真 7.3.2 画像撮影状況

写真 7.3.3 に剛体模型、写真 7.3.4 に剛体模型底面の写真を示す。剛体模型として、底面がモルタル無地、黒色塗装したもの、底面に碎石または土砂をエポキシ樹脂で接着させたもの、4 種類作成した。



写真 7.3.3 剛体模型



(a)底面無地



(b)底面黒色塗装



(c)底面碎石接着



(d)底面土砂接着

写真 7.3.4 剛体模型底面の状況

表 7.3.1 と表 7.3.2 に実施した試験ケースを示す。なお表中で黄色のマークをつけた試番について画像解析を行った。

表 7.3.1 試験ケース（底面乾燥）

ケース	試番	底面の状態	PC 板表面	滑動時の角度 (°)
1	1	無地	乾燥	38
	2			37
	3			36
	4			37
2	1	黒色塗装		33
	2			34
	3			34
	4			35
	5			36
3	1	碎石		37
	2			38
	3			37
	4			41
	5			36
4	1	土砂		38
	2			38
	3			38
	4			37
	5			36

表 7.3.2 試験ケース（底面湿潤）

ケース	試番	底面の状態	PC 板表面	滑動時の角度 (°)
5	1	無垢	湿潤	35
	2			34
	3			38
6	1	碎石		37
	2			37
	3			36
7	1	黒色塗装		35
	2			34
	3			33
8	1	土砂		34
	2			37
	3			36

静摩擦係数は、滑動開始時の底面の角度より求めた。動摩擦係数は、下記の剛体の式から摩擦係数を求めるものとした。

$$\mu = \frac{1}{2gL \cos \theta} \{v_2^2 - v_1^2 - 2g(h_1 - h_2)\} \quad (9)$$

ここで、 μ は動摩擦係数、 L は滑動距離、 θ は滑動時の底面角、 v_i は地点 i における速度、 h_i は地点 i における高さである。

7. 3. 2 試験結果

(1) 底面無地

図 7.3.1 に画像解析に用いた標点を示す。剛体の軌跡としては、標点 No. 6 を用い、地点 No. 2 と No. 3 における高さと速度を用いて動摩擦係数を求めた。

表 7.3.3 に計測結果を示す。動摩擦係数としては、0.626 となった。

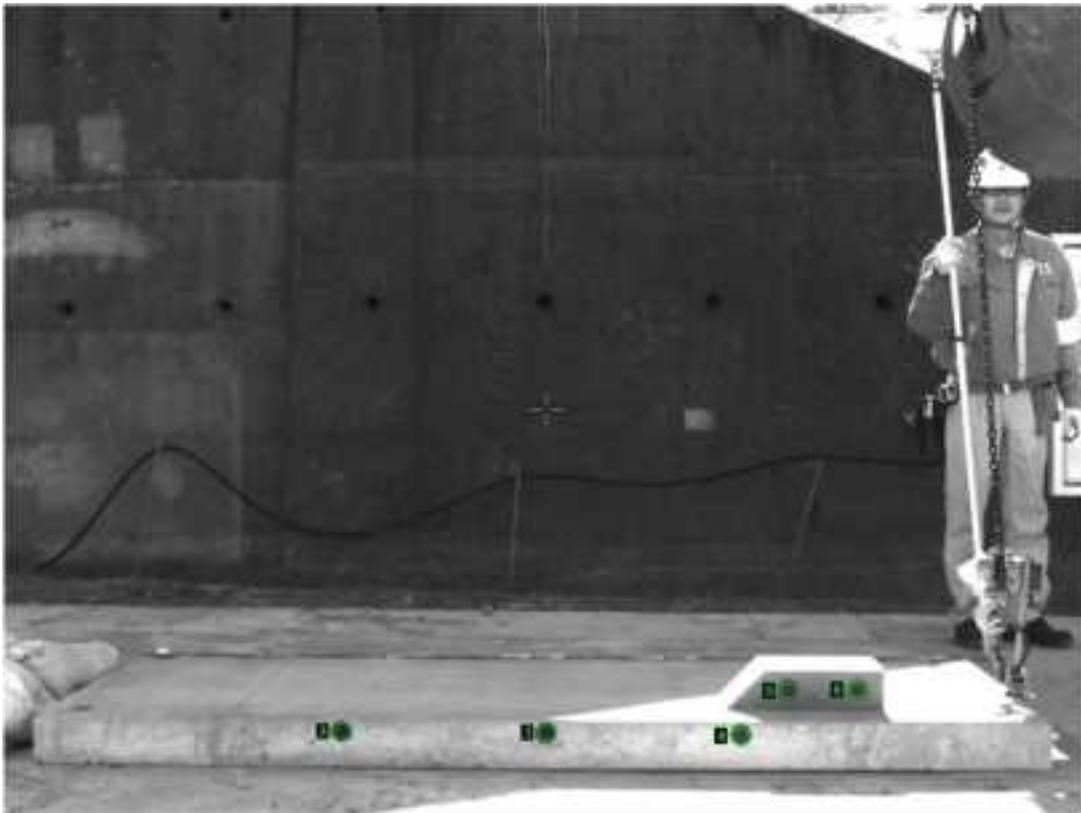


図 7.3.1 画像解析に用いた標点

表 7.3.3 計測結果

標点 No	高さ (mm)		速度 (cm/sec)		動摩擦係数	静摩擦係数
	No3	No2	No3	No2		
No6	752.577	450.286	293.819	440.379	0.626	0.781

(2) 底面黒色塗装

図 7.3.2 に画像解析に用いた標点を示す。剛体の軌跡としては、標点 No. 5 を用い、地点 No. 2 と No. 3 における高さと速度を用いて動摩擦係数を求めた。

表 7.3.4 に計測結果を示す。動摩擦係数としては、0.411 となった。

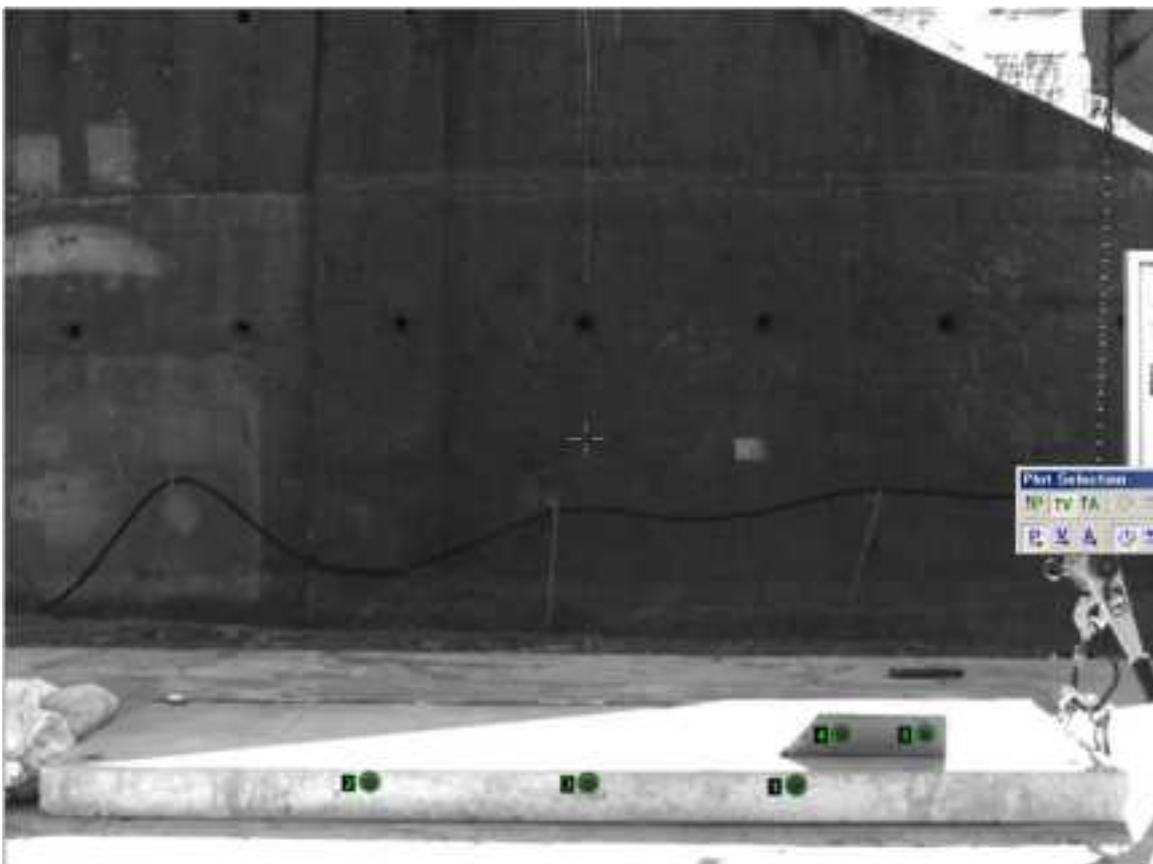


図 7.3.2 画像解析に用いた標点

表 7.3.4 計測結果

標点 No	高さ (mm)		速度 (cm/sec)		動摩擦係数	静摩擦係数
	No3	No2	No3	No2		
No5	691.983	414.084	274.181	403.735	0.411	0.675

(3) 底面砕石接着

図 7.3.3 に画像解析に用いた標点を示す。剛体の軌跡としては、標点 No. 4 を用い、地点 No. 2 と No. 3 における高さと速度を用いて動摩擦係数を求めた。

表 7.3.5 に計測結果を示す。動摩擦係数としては、0.394 となった。

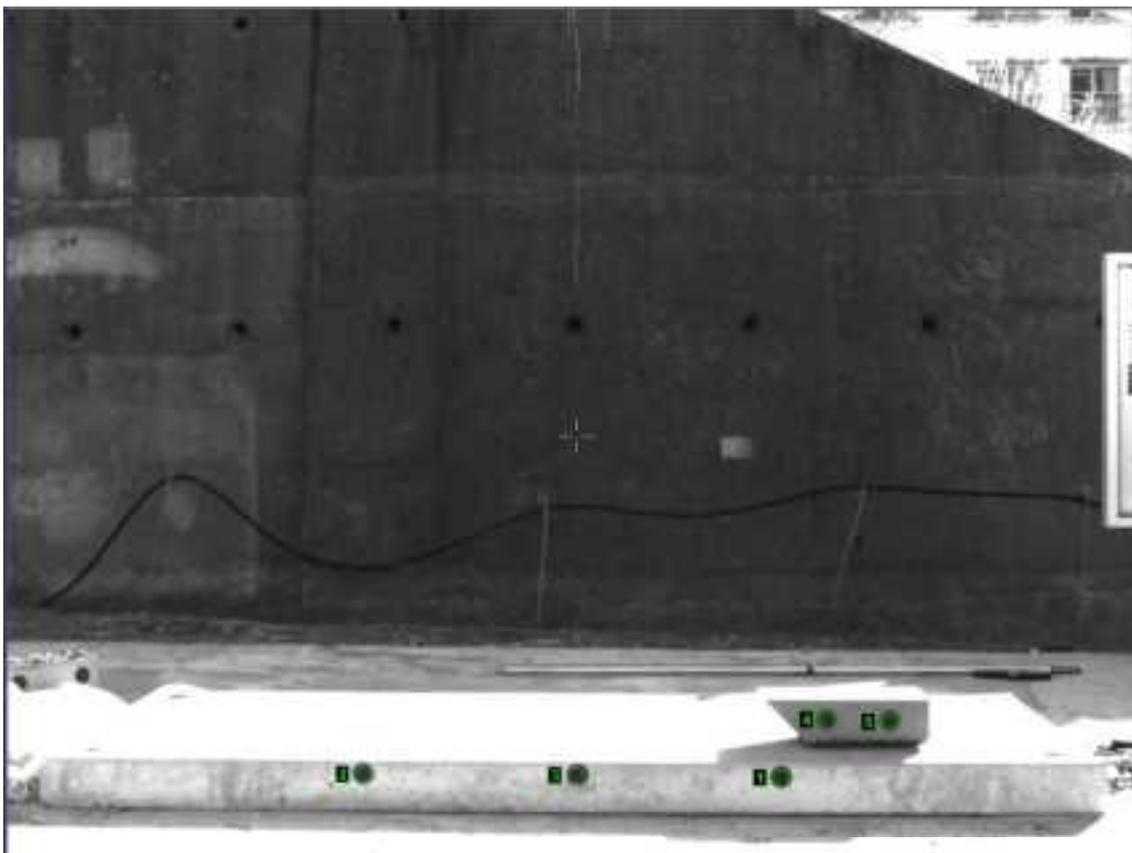


図 7.3.3 画像解析に用いた標点

表 7.3.5 計測結果

標点 No	高さ (mm)		速度 (cm/sec)		動摩擦係数	静摩擦係数
	No3	No2	No3	No2		
No4	740.115	442.445	308.579	429.451	0.394	0.754

(4) 底面土砂接着

図 7.3.4 に画像解析に用いた標点を示す。剛体の軌跡としては、標点 No. 5 を用い、地点 No. 2 と No. 3 における高さと速度を用いて動摩擦係数を求めた。

表 7.3.5 に計測結果を示す。動摩擦係数としては、0.301 となった。

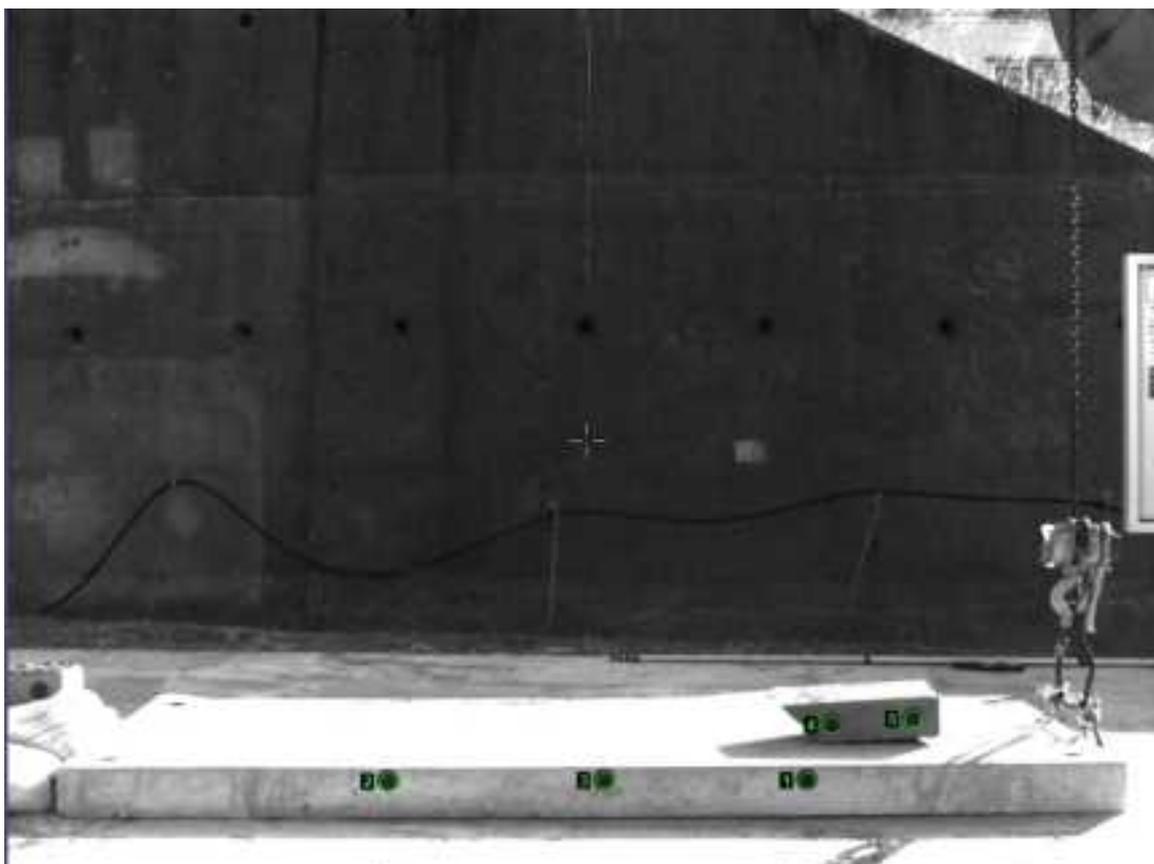


図 7.3.4 画像解析に用いた標点

表 7.3.5 計測結果

標点 No	高さ (mm)		速度 (cm/sec)		動摩擦係数	静摩擦係数
	No3	No2	No3	No2		
No5	744.128	439.606	361.817	462.400	0.301	0.782

7. 3. 3 一面せん断試験（摩擦係数試験）のまとめ

表 7.3.6 に試験結果一覧を示す。摩擦係数の大きさとしては、無地>黒色塗装>碎石>土砂の順に大きい。碎石、土砂において、動摩擦係数が小さくなった原因としては、無地や黒色塗装の場合に対して、底面との接触面積が小さくなったことが考えられる。

本件では、これらの試験結果を解析的検討の入力パラメータとして用いた。

表 7.3.6 試験結果一覧

底面	底面状態	静摩擦係数	動摩擦係数
無地	乾燥	0.781	0.626
黒色塗装	乾燥	0.675	0.411
碎石	乾燥	0.754	0.394
土砂	乾燥	0.781	0.301

8. 土砂の流動試験および岩塊の転動試験と各試験データの取得

8. 1 岩塊および土砂の転動、流動試験

岩塊および土砂の転動・流動試験を実施し、岩塊および土塊の構造物への衝突に伴う影響を定量的に評価するための基礎データを取得した。計測方法としては、画像解析技術を用い、岩塊の跳躍、滑動、回転時の速度等、土塊の流動、拡散時の速度等を計測した。壁有の試験ケースにおいては、流路下部に反力壁を設置し岩塊または土塊が衝突した際の衝撃荷重について計測した。また、反力壁を設置しない場合でも試験を実施し、岩塊または土塊の転動・流動距離について計測することを検討した。

試験は同じ岩塊模型を用いて合計 68 回（壁無 34 回，壁有 34 回）実験を実施し、転動・流動距離、衝撃荷重に対するばらつきについて検討した。表 8. 1. 1 に壁無ケースにおける試験ケース，表 8. 1. 2 に壁有ケースにおける試験ケースを示す。

表 8. 1. 1 壁無ケースにおける試験ケース

No.	ケース	岩塊模型	サイズ	落下方向
1	岩塊単体 標点無	球形	20cm	
2		塊状	20cm	平面上
3		板状	20cm	平面上
4		球形	40cm	
5		塊状	40cm	平面上
6		板状	40cm	平面上
7		板状	20cm	平面上
8		板状	40cm	平面上
9		塊状	20cm	平面上
10		塊状	40cm	平面下
11		板状	40cm	縦
12	岩塊単体 標点有	球形	40cm	
13		塊状	40cm	平面下

14		塊状	20cm	平面上
15		板状	20cm	平面上
16		板状	40cm	平面下
17		球形	20cm	
18	碎石		0.5m ³	
19			0.5m ³	
20	土砂		0.5m ³	
21			0.5m ³	
22	複数岩塊 +土砂	塊状+板状	40cm, 0.5m ³	
23	岩塊単体 (アン グル付)	球形	20cm	
24		塊状	20cm	平面上
25		球形	40cm	
26		塊状	40cm	平面上
27		板状	40cm	平面上
28		球形	20cm	
29		塊状	20cm	平面上
30		板状	20cm	平面上
31		球形	40cm	
32		塊状	40cm	平面上
33		板状	40cm	平面上
34		板状	20cm	平面上

表 8.1.2 壁有ケースにおける試験ケース

試験 No.	形状	体積 サイズ	落下方向 キャリア 角度	標点の種類	アングル、凹凸	
1	碎石	1.0 m ³	66 (度)	白丸標点	アングル、 凹凸 無	
2		0.5 m ³				
3	土砂	0.5 m ³				
4		1.0 m ³				
5	球形	20cm	-			
6			-			
7			-			
8	塊状		平面上			
9			平面上			
10	板状		平面上			
11	球形		40cm		-	
12		-				45 度流路中間か ら落下
13	塊状	平面下				
14	板状	平面上				
15	板状	20cm	平面下	白丸標点 (球体以外は 偶角無着色)	アングル、 凹凸 無	
16			平面下			
17	塊状	平面下				
18		平面下				
19	板状	平面上		手落として落下		
20	球形	40cm	-	黒色標点		
21	板状		平面上			

22	塊状	20cm	平面下	無 (模型黒塗り)	30° 斜面上、 法尻より上方 4.5m にアングル 1 段設置
23	塊状	20cm	平面下	無 (模型黒塗り)	30° 斜面上、 法尻より上方 3.5m にアングル 1 段設置
24		40cm	平面下	白丸標点 (偶角無着色)	
25		20cm	平面下		
26			平面下		
27	球形		-	黒丸標点	45 度流路中間から落下
28		40cm	-	白丸標点	
29	塊状	20cm	平面下	白丸標点 (偶角無着色)	30° 斜面上、 法尻より上方 2.5m にアングル 1 段設置
30			平面下		
31			平面下		
32	板状	40cm	平面下		
33	塊状	20cm	平面下	黒丸標点	30° 斜面上、約 1m 幅で セメント・砂利による 凹凸設置
34	板状		平面上		

岩塊模型および土砂模型の投入方法について、図 8.1.1 に示す。

20cm 径の岩塊模型については、流路模型天端にて一般に 1.0 m の高さから手落としで投入するものとした。

40cm 径の岩塊模型についても、20cm 径の岩塊模型同様、流路模型天端にて一般に 1.0 m の高さから投入するものとした。ただし、人力による投入は困難なため、パワーショベルにより投入した。

碎石、土砂模型については、図に示すように、トラックに荷台に土砂を 0.5~1.0m³ の体積で積載し、荷台を約 60~66 度傾けることで投入した。

図 8.1.2 に岩塊模型および土砂模型の初期状態を示す。写真 8.1.1、8.1.2 に投入時の状況を示す。

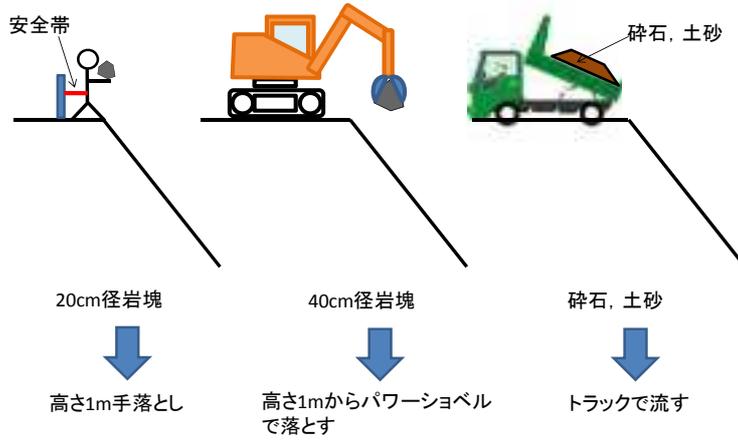
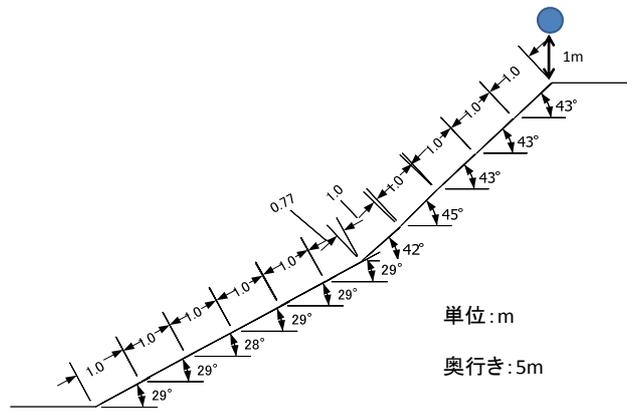
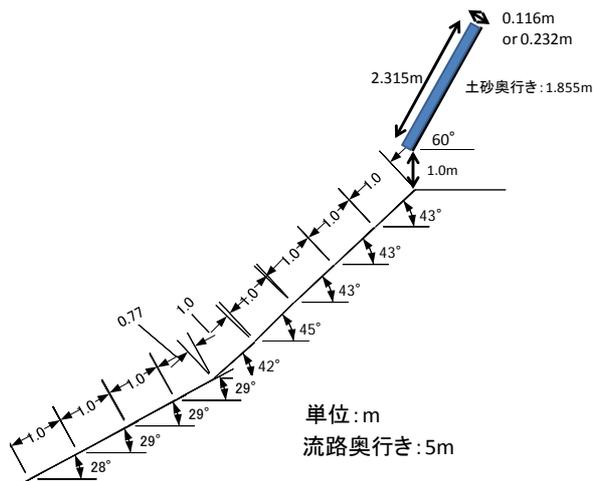


図 8.1.1 岩塊模型および土砂模型の投入方法



(a)岩塊模型



(b)土砂模型

図 8.1.2 岩塊模型および土砂模型の初期状態



(a)20cm 径岩塊模型



(b)40cm 径岩塊模型

写真 8.1.1 岩塊模型の投入時の様子



(a)碎石



(b)土砂

写真 8.1.2 土砂模型の投入時の様子

また、壁無ケースにおいては、写真 8.1.3 に示すように、土砂に複数の岩塊（塊状 20cm、40cm、板状 20cm、40cm）を含めたものによる流動試験も行った。また、写真 8.1.4 に示すように高さ 5.0cm のアングル材を 30 度部に多段で設置した場合の岩塊の転動試験も実施した。



写真 8.1.3 土砂+複数岩塊の場合の初期状態



写真 8.1.4 アングル材設置状況

壁有ケースにおいては、写真 8.1.5 に示すように、アンゲル材を 1 段、30 度部において 3 パターンで設置箇所を変えて岩塊の転動試験を実施した。また、写真 8.1.6 に示すように、30 度部に碎石をモルタルで接着し、幅 1.0m、最大高さ約 4cm の凹凸を付加した場合でも試験を実施した。



写真 8.1.5 30 度部にアンゲル材を設置した状況



写真 8.1.6 30 度部に凹凸を設置した状況

8. 2 データ取得

計測項目として、土砂および岩塊の挙動、岩塊の回転角、土砂および岩塊が反力壁に衝突した際の衝突荷重を計測した。土砂および岩塊の挙動については、前述した画像解析システムにより三次元的に計測した。土砂および岩塊が反直壁に衝突した際の衝突荷重については、反力壁前面に設置した荷重計および画像解析より把握した力積より求めた。また、壁有ケースにおいては、岩塊および土砂衝突時の反力壁の変位をレーザー変位計により計測した。

画像解析においては、土砂に混入させた白塗りの小石（写真8.2.1）、岩塊に描写した標点（写真8.2.2、8.2.3）、を標点として、標点追跡法（PTV法）により、岩塊および土砂の変位軌跡を計測した。これらのデータをM3カメラでは、500Hz、M5カメラでは150Hz、NXカメラでは100Hzのサンプリング周波数で収録した。なお、撮影時間は約5秒である。



(a) 流動前

(b) 流動後

写真8.2.1 土砂模型に混入させた標点用白色小石



(a) 球形 20cm



(b) 球形 40cm



(c) 塊状 20cm



(d) 塊状 40cm



(e) 板状 20cm



(f) 板状 40cm

写真 8.2.2 黒塗り白標点の岩塊模型



(a) 球形 20cm



(b) 球形 40cm



(c) 塊状 20cm



(d) 塊状 40cm



(e) 板状 20cm



(f) 板状 40cm

写真 8.2.3 無地黒標点の岩塊模型

衝撃荷重については、反力壁前面に取り付けた荷重計により計測した。その際、岩塊模型については、荷重計に岩塊模型が衝突するまで試験を繰り返した。また、荷重計のサンプリング周波数は5.0～20kHzに設定し計測を行った。また、荷重計、レーザー変位計ともに、トリガー操作により画像解析と連動して計測するようにし、時間誤差が生じないようにした。

8. 3 データ分析

得られたデータについて、画像解析等を用いて分析を行った。主な分析項目は以下の通りである。詳細については、9章に示す。

- ①岩塊模型形状が岩塊の転動挙動，衝撃荷重に及ぼす影響
- ②土砂の種類が土砂の流動挙動，衝撃荷重に及ぼす影響
- ③流路底面の特性が岩塊および土砂の転動，流動挙動に及ぼす影響
- ④岩塊および土砂の転動，流動挙動のばらつきの度合いに関する統計的検討