

平成 27 年度
原子力施設等防災対策等委託費（斜面の安定性
に係るリスク評価手法に関する岩塊転動試験）
事業

平成 28 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原子力規制委員会からの委託により実施した平成 27 年度原子力施設等防災対策等委託費（斜面の安定性に係るリスク評価手法に関する岩塊転動試験）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、原子力規制庁の承認が必要です。

目次

1. まえがき.....	2
2. 事業内容の概要.....	3
3. 事業内容.....	4
3. 1 遠心力載荷試験.....	4
3. 1. 1 遠心力載荷試験用の斜面模型の製作.....	4
3. 1. 2 遠心力載荷試験用の地盤試料の要素試験.....	34
3. 1. 3 遠心力載荷試験用の計測機器の設置.....	37
3. 1. 4 遠心力載荷試験装置を用いた加振試験.....	44
3. 1. 5 加振試験結果データを用いた画像解析.....	46
3. 2 岩塊衝突試験.....	52
3. 2. 1 岩塊衝突試験用の反力壁の製作.....	52
3. 2. 2 岩塊衝突試験用の重錘の製作.....	73
3. 2. 3 岩塊衝突試験用の計測機器の設置.....	88
3. 2. 4 重錘を用いた衝突試験.....	98
3. 3 試験データの情報整理.....	116
3. 3. 1 遠心力載荷試験データの情報整理.....	116
3. 3. 2 岩塊衝突試験データの情報整理.....	246
3. 3. 3 過去に実施した岩塊転動試験データの画像解析.....	321
3. 4 検討委員会の開催.....	471
4. まとめ.....	472

1. まえがき

東京電力福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえ、原子炉施設における新規制基準では、自然現象等による共通要因故障に対する防護対策に係る規制要求が強化された。そのため、これらに係る審査のための技術的知見を拡充する必要がある。

今後、安全性向上評価の妥当性確認を実施するに当たって、自然現象の一つである原子力施設の周辺斜面を対象に確率論的リスク評価（PRA）を適用するためには、評価に必要な情報の収集及び分析、ハザード評価、フラジリティ評価等の検証が必要となる。

本事業は、地震時における原子力施設周辺斜面の安定性に係るリスク評価手法の整備を目的として、図 1.1 に示す原子炉建屋周辺斜面での地震時想定シナリオのうち、④土塊・土砂の衝突、⑤建屋・機器の損傷に係るリスク評価に向け、斜面崩壊に伴う岩塊等の転動および衝突荷重に関する試験を実施して、その検証に必要なデータ取得を行うものである。具体的には、遠心力载荷試験、岩塊衝突試験、試験データの情報整理、検討委員会の開催を実施した。

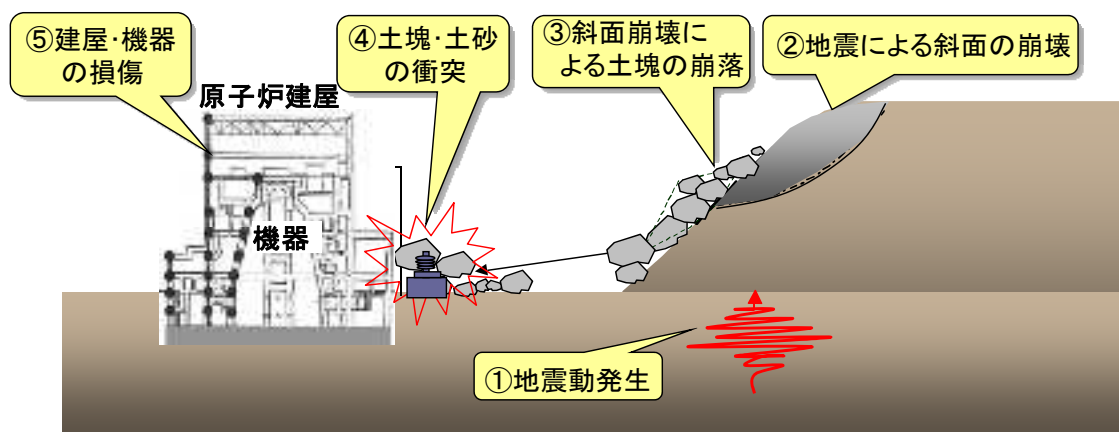


図 1.1 原子炉建屋周辺斜面での地震時想定シナリオ

2. 事業内容の概要

本事業では、地震時における原子力施設周辺斜面の安定性に係るリスク評価手法の整備を目的として、斜面崩壊に伴う岩塊等の転動および衝突荷重に関する試験を実施して、その検証に必要なデータ取得を行うものである。具体的な実施内容は、

- ①遠心力載荷試験
- ②岩塊衝突試験
- ③試験データの情報整理
- ④検討委員会の開催

の4項目からなる。

それぞれの項目での事業内容の概要を以下に示す。

①遠心力載荷試験

斜面模型の応力状態を実規模に近い応力状態とするため、遠心力載荷試験装置を用いた加振試験を実施した。加振試験では、正弦波を入力し、斜面の応答特性や変形特性に関するデータを取得するとともに、崩壊時の挙動を画像解析技術により計測した。

また、遠心力模型試験で用いる地盤試料の強度変形特性、動的変形特性、材料強度を把握するため、地盤試料の高拘束圧三軸試験、高拘束圧繰返し三軸試験、一軸圧縮試験を実施した。なお、遠心場では高い拘束圧が発揮されることから、三軸試験と繰返し三軸試験では高い拘束圧を供試体に載荷する必要がある。そこで、本試験では高い拘束圧で載荷可能な高拘束圧三軸試験装置を用いて要素試験を実施した。

②岩塊衝突試験

岩塊衝突試験では、岩塊の転動による衝突力を把握するため、反力壁に設置した荷重計に対して、岩塊等を模擬した模型を衝突させ衝突荷重を計測した。また、岩塊模型の落下高さや衝突時の速度を計測および計算し、ヘルツの理論式との比較を行った。

③試験データの情報整理

遠心力模型試験データと岩塊衝突試験データの整理を実施した。また、過去に実施した岩塊転動試験データの画像解析を実施した。

④検討委員会の開催

委託事業の進捗状況の報告及び内容の評価を行うため、地盤工学や耐震工学に関する研究者4名を含めた検討委員会を設置して、委託事業の実施期間に4回、検討委員会を開催した。

3. 事業内容

3.1 遠心力载荷試験

3.1.1 遠心力模型試験用の斜面模型の製作

(1) 概要

斜面模型は、鉄道総研が所有する剛体土槽（内寸法：長さ 1500mm×奥行き 450mm×高さ 1150mm、図 3.1.1 参照）の内部に、図 3.1.2～図 3.1.3 に示す形状で 2 ケース製作した（通番 ケース 32、ケース 33）。斜面模型は、基盤層、弱層、表層からなる三層模型とした。斜面模型に用いる地盤試料は、三種類とし、局所的な弱層を有する模型とした。なお、地盤試料の配合条件は、2 ケースとも同一である。

動的遠心载荷試験は、斜面崩壊時のすべり土塊の衝突力を計測するために、剛体土槽底面にモルタルブロックを介して土圧計を設置した。土圧計の設置位置は、ケース 32 は斜面模型の法尻から 130mm 離れた位置とし、ケース 33 では斜面模型の法尻から 270mm 離れた位置とした。

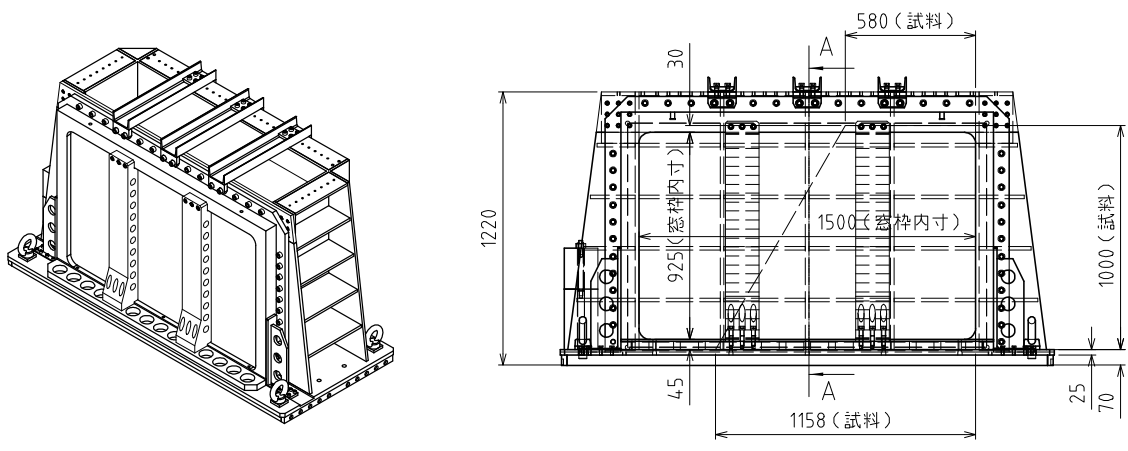
斜面模型完成後は、剛体土槽を大型遠心力载荷試験装置に締結し、動的遠心载荷試験を行った。試験は、遠心加速度 50G を载荷した上で、最大で 25G の水平加振を行った。

試験後は、大型遠心力载荷試験装置との締結を解除し、遠心ピット外に剛体土槽を移動した。移動後は、斜面模型の撤去を行いつつ、弱層部から地盤試料をサンプリングした。

サンプリングした地盤試料は、「3.1.2 遠心载荷試験用の地盤試料の要素試験」において土質試験を実施した。試験ケースの概要を、表 3.1.1 に示す。

表 3.1.1 試験ケースの概要

ケース名称	弱層の配合強度	法尻から土圧計までの距離
ケース 32	低強度	130mm
ケース 33	低強度	270mm



*奥行きは内寸450mm

図 3.1.1 剛体土槽の概要 (単位 : mm)

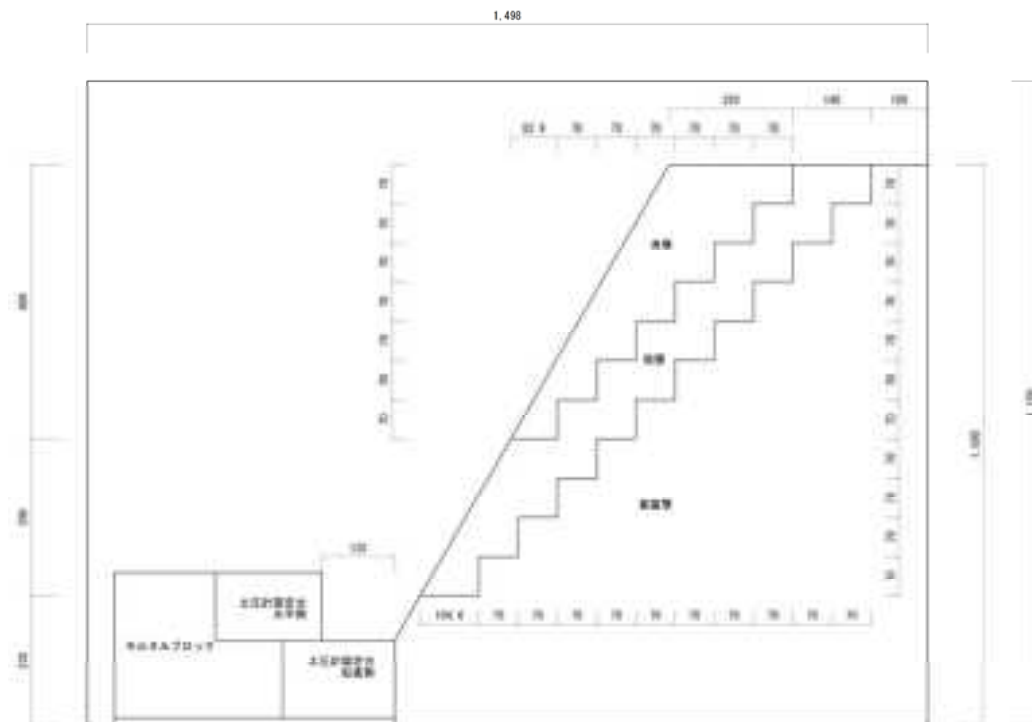


図 3.1.2 ケース 32 斜面模型概要図 (単位 : mm)

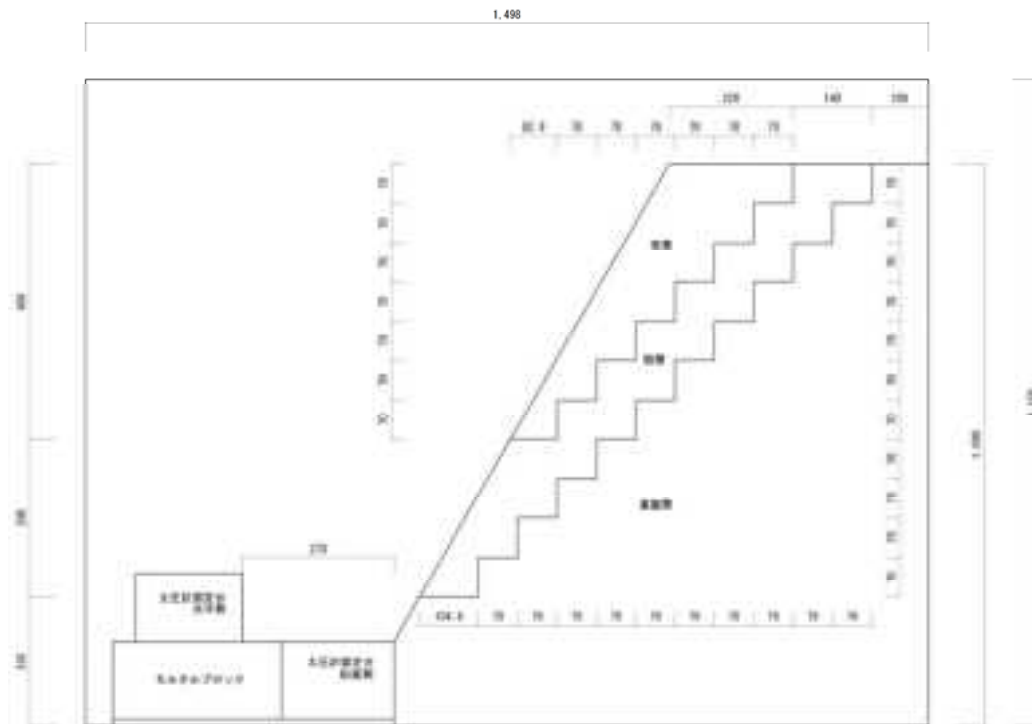


図 3.1.3 ケース 33 斜面模型概要図 (単位 : mm)

(2) 斜面模型の製作

①計測機器の動作確認

計測機器は、試験前に動作確認を行った。ひずみゲージ式の計測機器は、静ひずみ計を用いて初期値と出力値の確認を行った。圧電式の計測機器は、ハンディキャリブレータを用いて感度の確認を行った。模型地盤内に用いる計測機器は、大林組技術研究所が所有するものを使用した。斜面崩壊時のすべり土塊の衝突力を計測する土圧計は、50G の遠心加速度が作用した状態でも正常に動作し、大型遠心載荷試験装置で使用可能なものを選定した。

②土圧計固定用モルタルブロックの作製

モルタルブロックは、土圧計を内蔵したアルミ製の固定台と剛体土槽とを剛結するために、斜面模型の製作前に作製した。モルタルブロックの作製では、高ナットや塩ビパイプを用いて固定治具や固定穴を配置した型枠を準備し、型枠内にセメント系無収縮材（太平洋マテリアル(株)：プレユーロックス）を打設した。なお、土圧計固定台の設置位置は、ケース 32 とケース 33 では異なるため、各々の設置位置に合わせて 2 基作製した（図 3.1.4～図 3.1.5）。モルタルブロックの作製と設置状況を写真 3.1.1～写真 3.1.10 に示す。

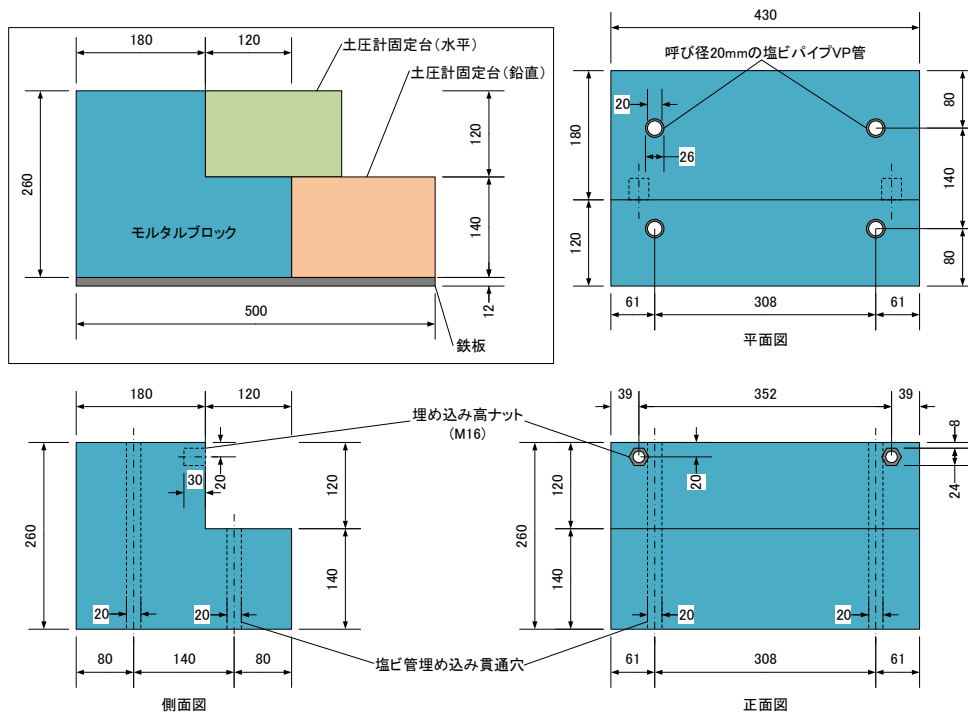


図 3.1.4 ケース 32 用モルタルブロック概要図 (単位 : mm)

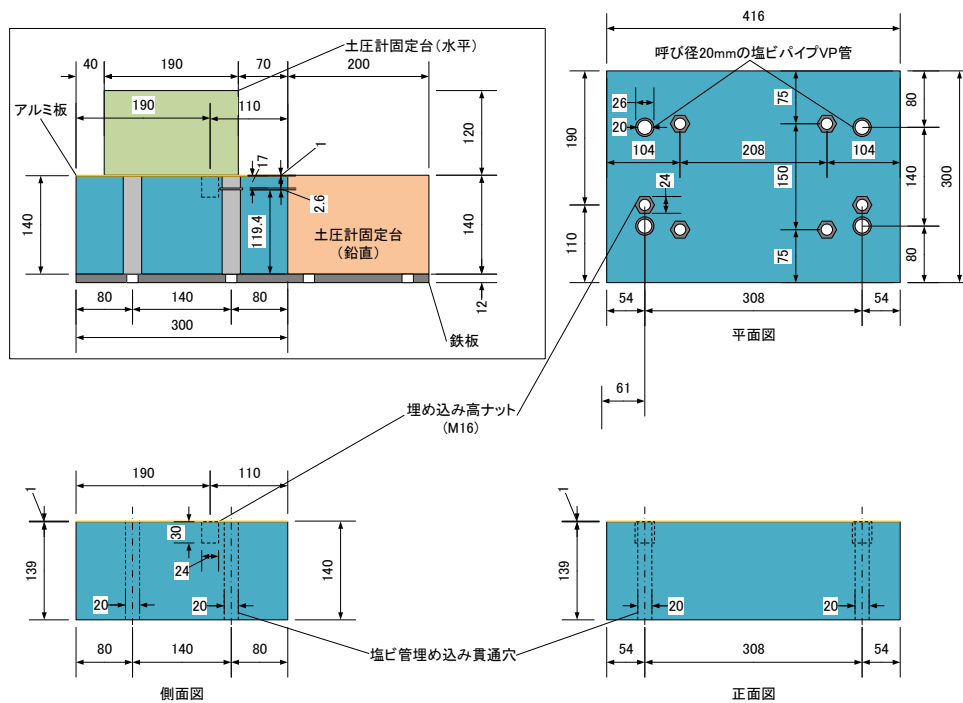


図 3.1.5 ケース 33 用モルタルブロック概要図 (単位 : mm)



写真 3.1.1 型枠作製 (ケース 32)



写真 3.1.2 モルタル打設 (ケース 32)



写真 3.1.3 作製完了 1 (ケース 32)



写真 3.1.4 作製完了 2 (ケース 32)



写真 3.1.5 設置状況 1 (ケース 32)



写真 3.1.6 設置状況 2 (ケース 32)



写真 3.1.7 作製完了 1 (ケース 33)



写真 3.1.8 作製完了 2 (ケース 33)



写真 3.1.9 設置状況 1 (ケース 33)



写真 3.1.10 設置状況 2 (ケース 33)

③予備試験 (ケース 32)

ケース 32 は、波形確認および本試験で実施する画像解析の条件設定を確認することも加味して実施した。従って、ケース 32 に当たっては、本試験のケース 33 と同一の模型を作製し、土槽を遠心载荷試験装置に据え付けた後に、高速度カメラ 3 台を土槽および遠心载荷試験装置のバケットに設置した。高速度カメラの設置方法は、アクリル面を通じて土槽正面から斜面模型を撮影する 1 台をバケットに治具を設置して固定し、土槽に設置して斜面模型の天端およびのり面を撮影する 2 台はを土槽に治具を設置して固定した。カメラの固定後は、バケットや剛体土槽に照明を設置し、カメラの配線を固定した上で、遠心加速度を 50G まで増大させて試験を行った。試験中は、画像解析システムにて模型地盤内部に設置した標点の変位を計測し、画像解析システムの精度確認を行った。

画像解析システムの精度確認後は、本試験で使用する地震動波形について加振を行い、加振波

形の確認を行った。

④斜面模型の構築

(a) 罫書き

罫書き作業は、斜面模型の形状、標点の設置位置について行った。罫書き作業を写真 3.1.11～写真 3.1.12 に示す。



写真 3.1.11 罫書き 1



写真 3.1.12 罫書き 2

(b) 地盤試料の作製

地盤試料は、表 3.1.2～表 3.1.4 に示す仕様で配合した。配合した地盤試料は、作製した日に模型地盤作製に使用した。ケース 32、ケース 33 における地盤材料の作製状況を写真 3.1.13～写真 3.1.16 に示す。

表 3.1.2 基盤層試料の配合

配合重量比 (%)		
粒調碎石 M40	セメント	水
100	6	7

※ケース 33 は、ケース 32 と同一の基盤層を使用した。

表 3.1.3 弱層試料の配合

配合重量比 (%)			
硅砂 6 号	ベントナイト U	消石灰	水
100	5	60	20

※ケース 32 とケース 33 は、同一の配合とした。

表 3.1.4 表層試料の配合

配合重量比 (%)			
磁砂鉄	ベントナイト U	セメント	水
100	10	8	19

※ケース 32 とケース 33 は、同一の配合とした。



写真 3.1.13 基盤層に使用するセメントの計量



写真 3.1.14 基盤層試料の攪拌



写真 3.1.15 弱層試料の作製



写真 3.1.16 表層試料の攪拌

(c) 摩擦低減層の設置

摩擦低減層として、図 3.1.6 に示す仕様でアクリル面および土槽の内壁との間に摩擦低減層を設置した。摩擦低減層として使用するシートは、表 3.1.5 に記載したものをを用いた。摩擦低減層シートの設置状況を写真 3.1.17～写真 3.1.20 に示す。

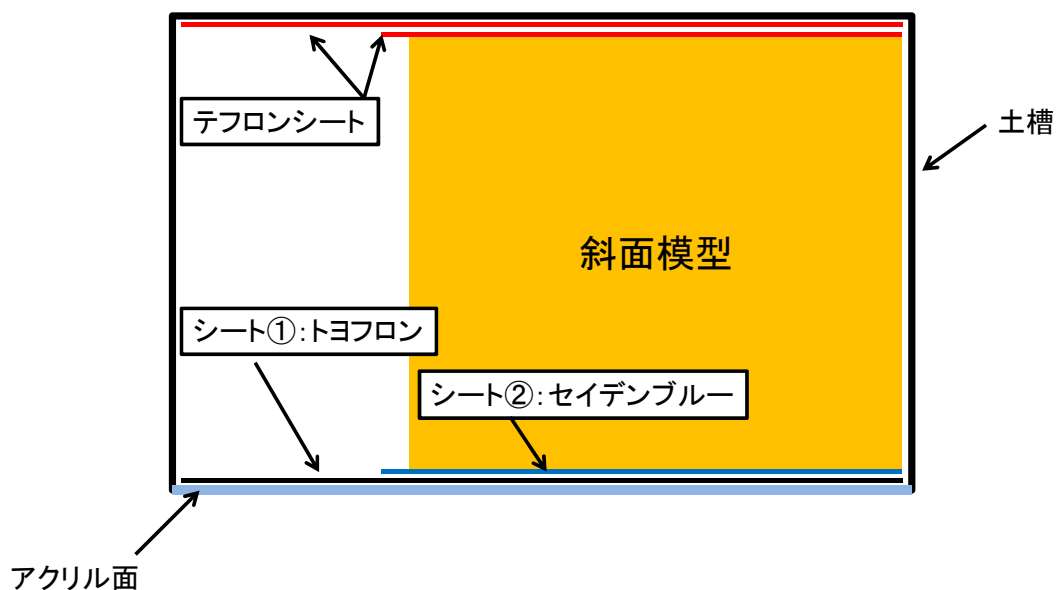


図 3.1.6 摩擦低減層シート設置概要

表 3.1.5 摩擦低減層シートの仕様

分類	メーカー	形式
シート①	東レフィルム加工 (株)	トヨフロン ETTE t=0.1mm
シート②	三鬼化成 (株)	サンキポリセイデンプルー t=0.1mm
テフロンシート	日東電工 (株)	ニトフロン t=0.1mm



写真 3.1.17 トヨフロンシート切断



写真 3.1.18 フッ素スプレー塗布

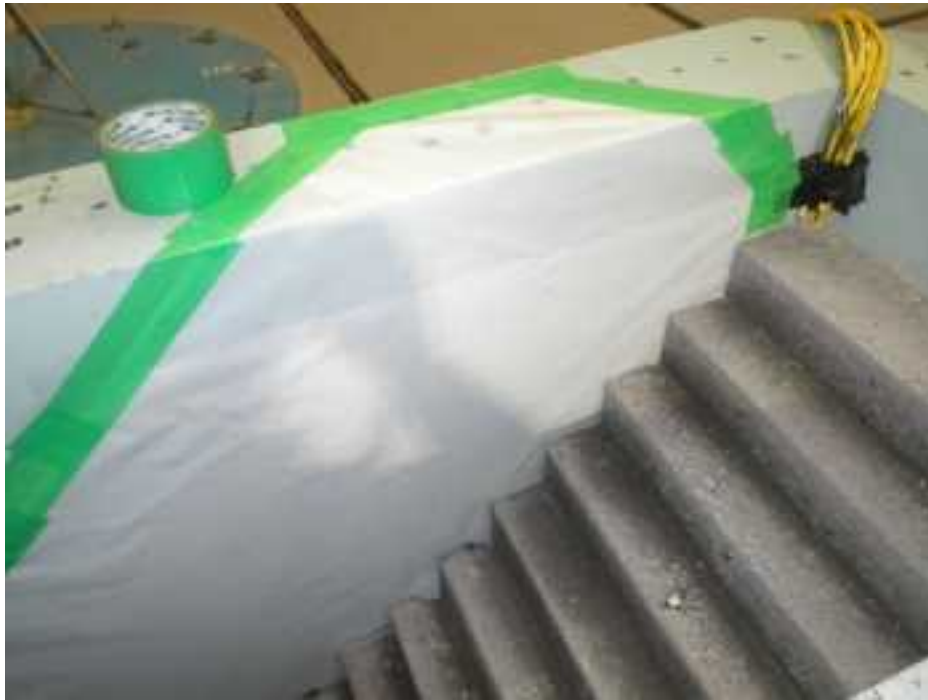


写真 3.1.19 テフロンシート貼り



写真 3.1.20 セイデンブルーシート貼り

(d) 基盤層・弱層・表層の作製

基盤層・弱層・表層は、表 3.1.2～表 3.1.4 に示す配合に従い、試料を突き固めて作製した。作製する目標湿潤密度は、ケース 32、ケース 33 とともに同一とし、基盤層は $\rho_t=1.90\text{g/cm}^3$ 、弱層は $\rho_t=1.65\text{g/cm}^3$ 、表層は $\rho_t=3.00\text{g/cm}^3$ とした。

基盤層は、加振時に変位が生じないように底面に等辺山形鋼を剛結した土槽内に作製した。また、基盤層内には、剛体土槽を反力としたアンカーも設置した（写真 3.1.21～写真 3.1.22）。アンカーは、M10mm の全ネジボルトの先端に、50mm×50mm×3mm の鋼板を固定した構造となっており、図 3.1.7 に示すように、6 段×3 列で設置した。

表層内には、弱層部の崩壊前に表層部が崩壊するのを防止するため、図 3.1.8 に示す補強材（ジオテキスタイル）を各段の中央部に上下方向の配置間隔 70mm で配置した。

各層の作製状況を写真 3.1.23～写真 3.1.25 に、各層の作製密度を表 3.1.6～表 3.1.11 に示す。また、表層部補強材の設置状況を写真 3.1.26～写真 3.1.27 に示す。

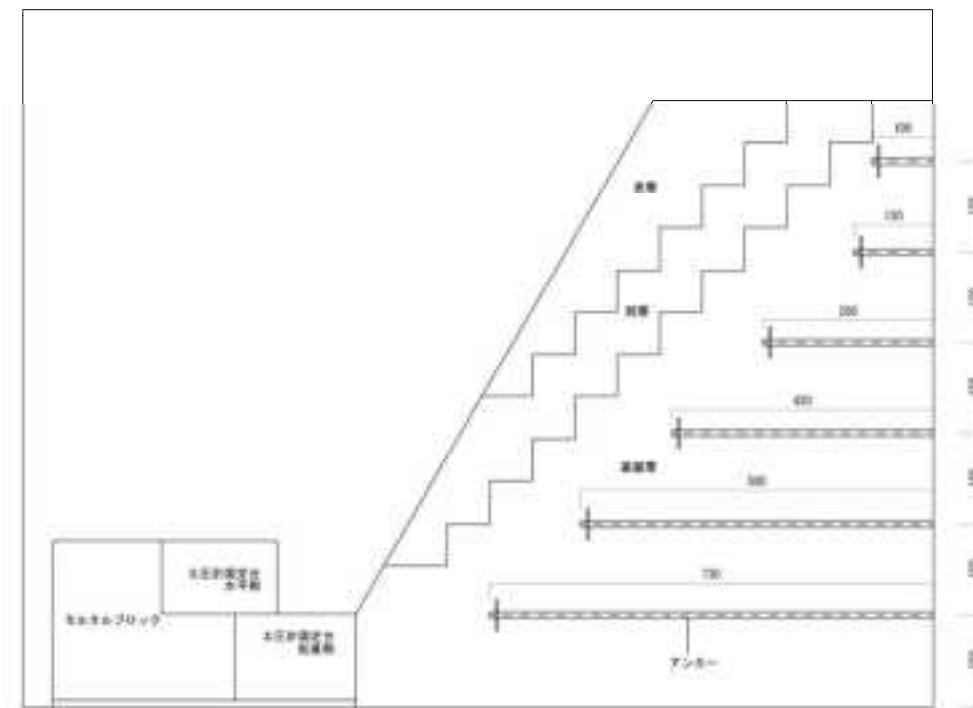


図 3.1.7 基盤層内アンカー配置図（単位/mm）



写真 3.1.21 土槽底面に剛結した等辺山形鋼



写真 3.1.22 剛体土槽を反力としたアンカー設置



写真 3.1.23 基盤層の作製状況

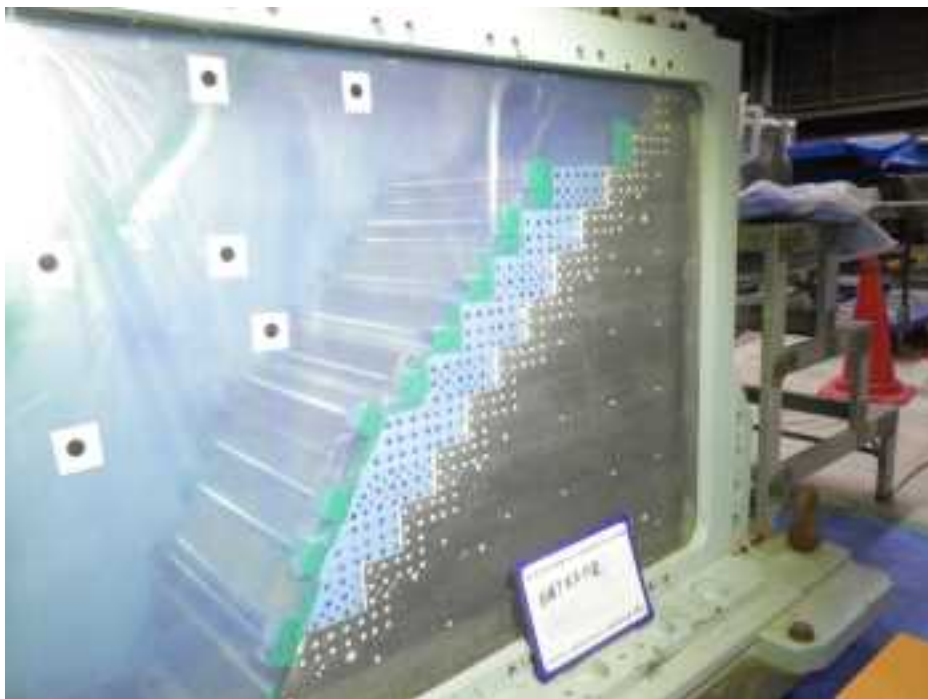


写真 3.1.24 弱層の作製状況



写真 3.1.25 表層の作製状況

表 3.1.6 各層の作製密度

ケース名	地層名	体積 (cm ³)	投入量 (g)	湿潤密度 (g/cm ³)
ケース 32	基盤層	253408	481480	1.900
	弱層	47061	77720	1.651
	表層	33250	89760	2.700
ケース 33	基盤層	—	—	—
	弱層	47092	77720	1.650
	表層	33386	89301	2.675

※ケース 33 の基盤層は、ケース 32 と同一とした。

表 3.1.7 基盤層各層の密度管理結果 (ケース 32・33)

層番号 (下段から)	高さ (cm)	計画層厚 (cm)	計画断面積 (cm ²)	計画体積 (cm ³)	目標密度 (g/cm ³)	計画投入重量 (g)	実績投入重量 (g)	実績層厚 (cm)	実績体積 (cm ³)	実績密度 (g/cm ³)
基盤層1	0~13.0	13.0	1234.5	55551.2	1.900	105547	105550	13.3	56833.6	1.857
基盤層2	13.0~23.0	10.0	932.0	41941.4	1.900	79689	79690	9.7	40690.7	1.958
基盤層3	23.0~30.0	7.0	560.0	25200.0	1.900	47880	47880	7.0	25243.2	1.897
基盤層4	30.0~37.0	7.0	511.0	22995.0	1.900	43691	43690	6.9	22748.6	1.921
基盤層5	37.0~44.0	7.0	462.0	20790.0	1.900	39501	39500	7.0	20905.8	1.889
基盤層6	44.0~51.0	7.0	413.0	18585.0	1.900	35312	35310	7.0	18542.5	1.904
基盤層7	51.0~58.0	7.0	364.0	16380.0	1.900	31122	31120	7.0	16422.1	1.895
基盤層8	58.0~65.0	7.0	315.0	14175.0	1.900	26933	26930	7.0	14193.2	1.897
基盤層9	65.0~72.0	7.0	266.0	11970.0	1.900	22743	22740	7.0	11985.4	1.897
基盤層10	72.0~79.0	7.0	217.0	9765.0	1.900	18554	18550	7.0	9760.8	1.900
基盤層11	79.0~86.0	7.0	168.0	7560.0	1.900	14364	14360	7.0	7571.9	1.896
基盤層12	86.0~93.0	7.0	119.0	5355.0	1.900	10175	10170	7.0	5368.0	1.895
基盤層13	93.0~100.0	7.0	70.0	3150.0	1.900	5985	5990	7.0	3142.4	1.906
実績密度平均 (g/cm ³)										1.901

表 3.1.8 弱層各層の密度管理結果 (ケース 32)

層番号 (下段から)	高さ (cm)	計画層厚 (cm)	計画断面積 (cm ²)	計画体積 (cm ³)	目標密度 (g/cm ³)	計画投入重量 (g)	実績投入重量 (g)	実績層厚 (cm)	実績体積 (cm ³)	実績密度 (g/cm ³)
弱層1	23.0~30.0	7.0	59.0	2657.1	1.650	4384	4380	7.1	2707.5	1.618
弱層2	30.0~37.0	7.0	79.8	3589.0	1.650	5922	5920	6.9	3536.6	1.674
弱層3	37.0~44.0	7.0	100.5	4521.0	1.650	7460	7460	7.0	4520.3	1.650
弱層4	44.0~51.0	7.0	121.2	5452.9	1.650	8997	9000	7.0	5426.9	1.658
弱層5	51.0~58.0	7.0	98.0	4410.0	1.650	7277	7280	7.1	4473.0	1.628
弱層6	58.0~65.0	7.0	98.0	4410.0	1.650	7277	7280	6.9	4326.2	1.683
弱層7	65.0~72.0	7.0	98.0	4410.0	1.650	7277	7280	7.0	4430.8	1.643
弱層8	72.0~79.0	7.0	98.0	4410.0	1.650	7277	7280	7.0	4389.2	1.659
弱層9	79.0~86.0	7.0	98.0	4410.0	1.650	7277	7280	7.0	4410.0	1.651
弱層10	86.0~93.0	7.0	98.0	4410.0	1.650	7277	7280	7.0	4410.0	1.651
弱層11	93.0~100.0	7.0	98.0	4410.0	1.650	7277	7280	7.0	4430.8	1.643
実績密度平均 (g/cm ³)										1.649

表 3.1.9 弱層各層の密度管理結果 (ケース 33)

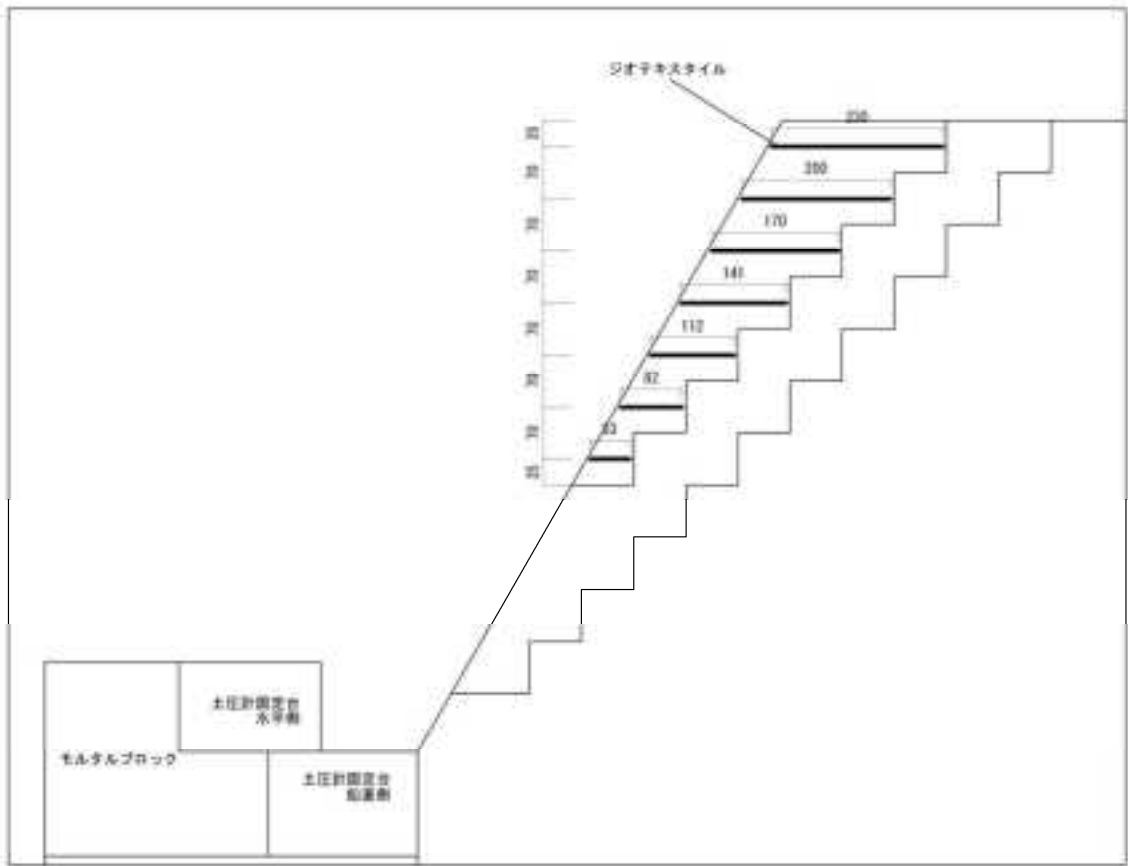
層番号 (下段から)	高さ (cm)	計画層厚 (cm)	計画断面積 (cm ²)	計画体積 (cm ³)	目標密度 (g/cm ³)	計画投入重量 (g)	実績投入重量 (g)	実績層厚 (cm)	実績体積 (cm ³)	実績密度 (g/cm ³)
弱層1	23.0~30.0	7.0	59.0	2657.1	1.650	4384	4380	7.0	2657.0	1.648
弱層2	30.0~37.0	7.0	79.8	3589.0	1.650	5922	5920	7.0	3570.9	1.658
弱層3	37.0~44.0	7.0	100.5	4521.0	1.650	7460	7460	7.0	4541.6	1.643
弱層4	44.0~51.0	7.0	121.2	5452.9	1.650	8997	9000	7.0	5452.7	1.651
弱層5	51.0~58.0	7.0	98.0	4410.0	1.650	7277	7280	7.0	4389.2	1.659
弱層6	58.0~65.0	7.0	98.0	4410.0	1.650	7277	7280	7.0	4430.8	1.643
弱層7	65.0~72.0	7.0	98.0	4410.0	1.650	7277	7280	7.0	4430.8	1.643
弱層8	72.0~79.0	7.0	98.0	4410.0	1.650	7277	7280	7.0	4389.2	1.659
弱層9	79.0~86.0	7.0	98.0	4410.0	1.650	7277	7280	7.0	4410.0	1.651
弱層10	86.0~93.0	7.0	98.0	4410.0	1.650	7277	7280	7.0	4389.2	1.659
弱層11	93.0~100.0	7.0	98.0	4410.0	1.650	7277	7280	7.0	4430.8	1.643
実績密度平均 (g/cm ³)										1.651

表 3.1.10 表層各層の密度管理結果 (ケース 32)

層番号 (下段から)	高さ (cm)	計画層厚 (cm)	計画断面積 (cm ²)	計画体積 (cm ³)	目標密度 (g/cm ³)	計画投入重量 (g)	実績投入重量 (g)	実績層厚 (cm)	実績体積 (cm ³)	実績密度 (g/cm ³)
表層1	51.0~58.0	7.0	43.9	1974.9	3.000	5925	5057	7.2	2022.2	2.501
表層2	58.0~65.0	7.0	64.6	2906.8	3.000	8720	8086	7.1	2949.0	2.742
表層3	65.0~72.0	7.0	85.3	3838.8	3.000	11516	10087	6.9	3785.0	2.665
表層4	72.0~79.0	7.0	106.0	4770.7	3.000	14312	13026	7.1	4838.8	2.692
表層5	79.0~86.0	7.0	126.7	5702.6	3.000	17108	15391	6.9	5620.1	2.739
表層6	86.0~93.0	7.0	147.4	6634.6	3.000	19904	17522	6.8	6480.4	2.704
表層7	93.0~100.0	7.0	168.1	7566.5	3.000	22700	20591	7.0	7554.4	2.726
									実績密度平均 (g/cm ³)	2.681

表 3.1.11 表層各層の密度管理結果 (ケース 33)

層番号 (下段から)	高さ (cm)	計画層厚 (cm)	計画断面積 (cm ²)	計画体積 (cm ³)	目標密度 (g/cm ³)	計画投入重量 (g)	実績投入重量 (g)	実績層厚 (cm)	実績体積 (cm ³)	実績密度 (g/cm ³)
表層1	51.0~58.0	7.0	43.9	1974.9	3.000	5925	5142	6.9	1956.1	2.629
表層2	58.0~65.0	7.0	64.6	2906.8	3.000	8720	7473	7.1	2949.0	2.534
表層3	65.0~72.0	7.0	85.3	3838.8	3.000	11516	10091	6.9	3803.6	2.653
表層4	72.0~79.0	7.0	106.0	4770.7	3.000	14312	13041	7.1	4838.8	2.695
表層5	79.0~86.0	7.0	126.7	5702.6	3.000	17108	15251	7.0	5673.8	2.688
表層6	86.0~93.0	7.0	147.4	6634.6	3.000	19904	18023	7.0	6633.9	2.717
表層7	93.0~100.0	7.0	168.1	7566.5	3.000	22700	20280	7.0	7530.6	2.693
									実績密度平均 (g/cm ³)	2.658



単位/mm

図 3.1.8 表層部補強材（ジオテキスタイル）配置図



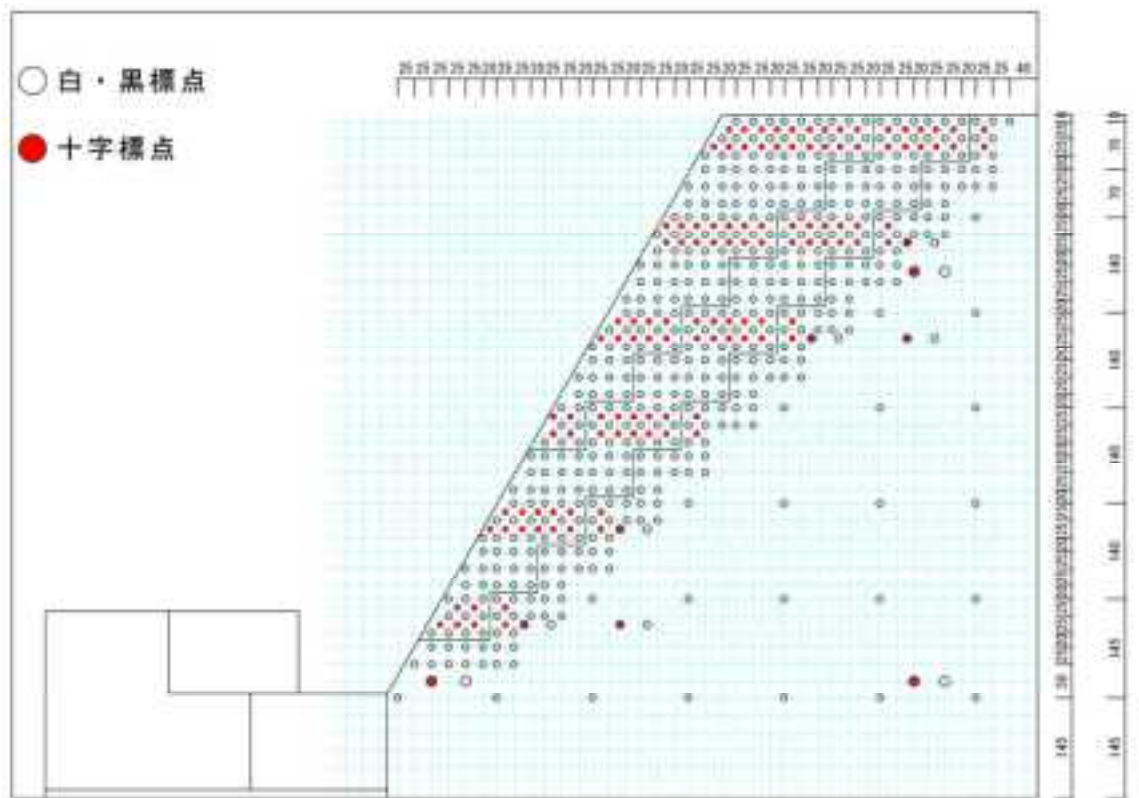
写真 3.1.26 表層部補強材敷設状況 1



写真 3.1.27 表層部補強材敷設状況 2

(e) 標点の設置

標点は、斜面模型の作製とともにアクリル面に設置した。使用した標点 ($\phi=10\text{mm}$ 、アルミリベット) は、黒色または白色に塗布したものと、十字型に色を塗り分けたものの3種類とした。標点の配置間隔は、変形が集中すると考えられる箇所は 20mm または 25mm 、基盤層深部については 140mm または 145mm とした。標点配置図を図 3.1.9 に、配置状況を写真 3.1.28～写真 3.1.29 に示す。



単位/mm

図 3.1.9 ケース 32・33 標点配置図



写真 3.1.28 ケース 32 標点配置状況

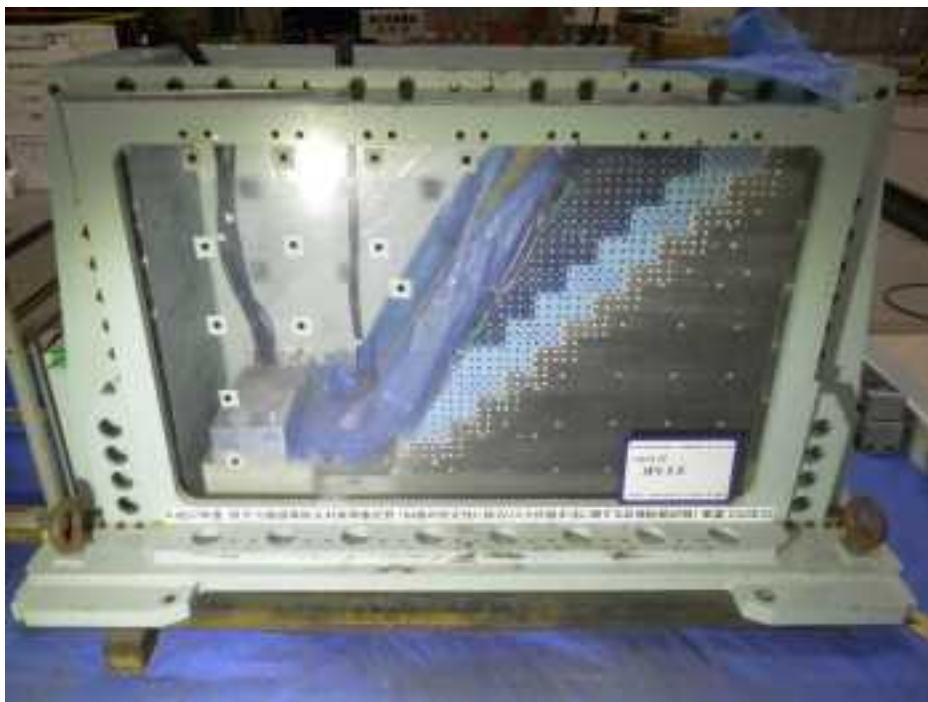


写真 3.1.29 ケース 33 標点配置状況

(f) 斜面模型の出来形確認

斜面模型作製完了後は、模型天端・斜面の寸法形状について模型寸法の検測を行った。各ケースの検測状況は、写真 3.1.30～写真 3.1.33 に示すとおりである。

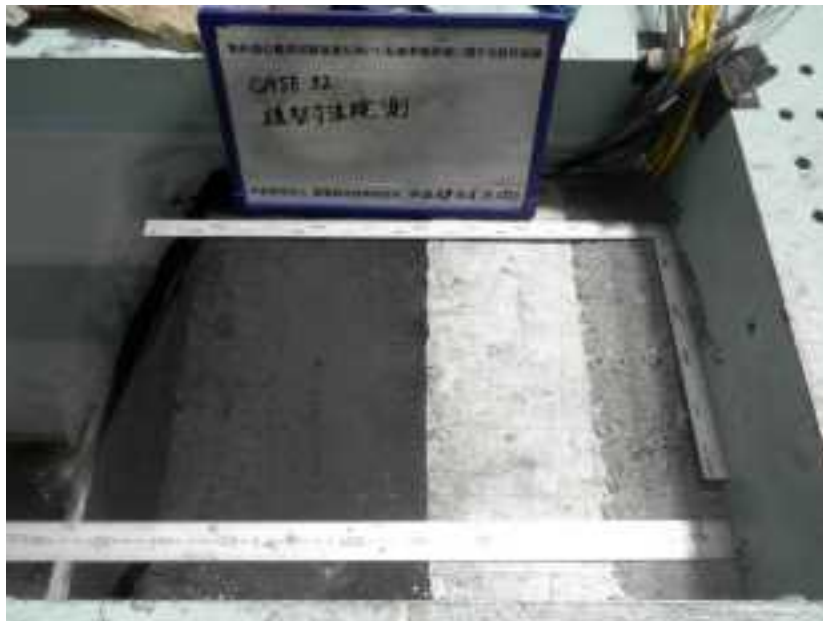


写真 3.1.30 ケース 32 模型寸法の検測状況 1

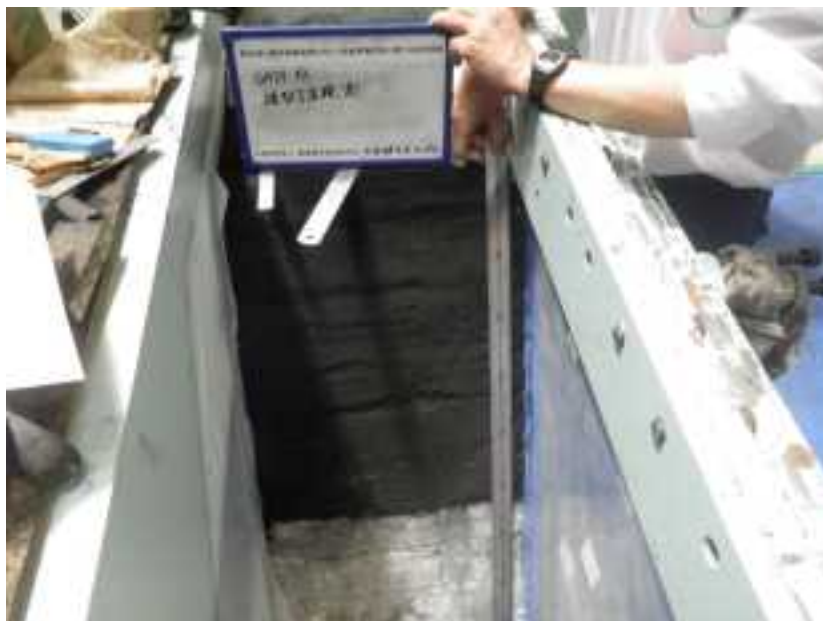


写真 3.1.31 ケース 32 模型寸法の検測状況 2



写真 3.1.32 ケース 33 模型寸法の検測状況 1

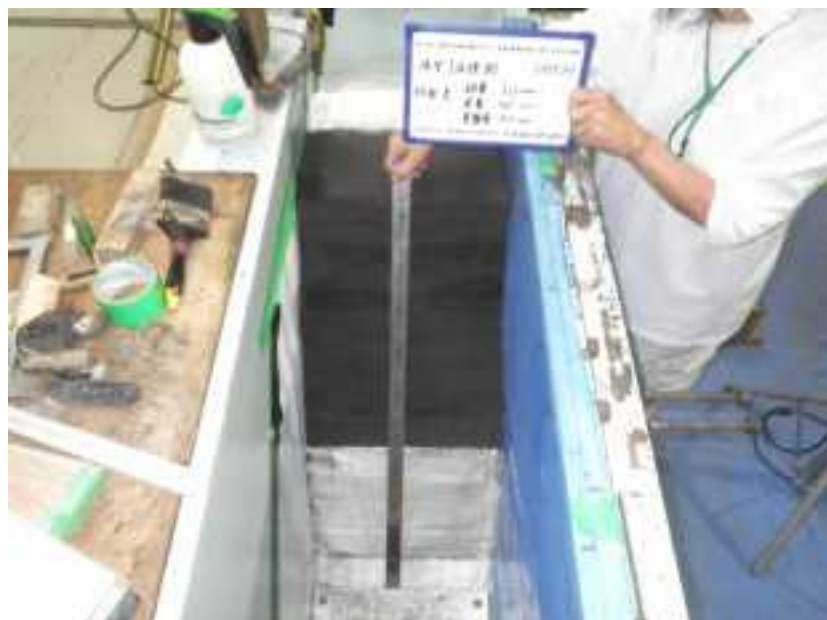


写真 3.1.33 ケース 33 模型寸法の検測状況 2

⑤土槽の据え付け

斜面模型作製後は、土槽を大型遠心力载荷試験装置に据え付けた。据付けに当たっては、斜面前面側の土槽外部にカウンターウェイトを取り付けた状態で、重心確認を行ったうえで天井クレーンを用いて土槽の据え付けを行った。土槽の据え付け状況は、写真 3.1.34～写真 3.1.37 に示すとおりである。



写真 3.1.34 ケース 32 土槽運搬状況



写真 3.1.35 ケース 32 土槽据え付け状況

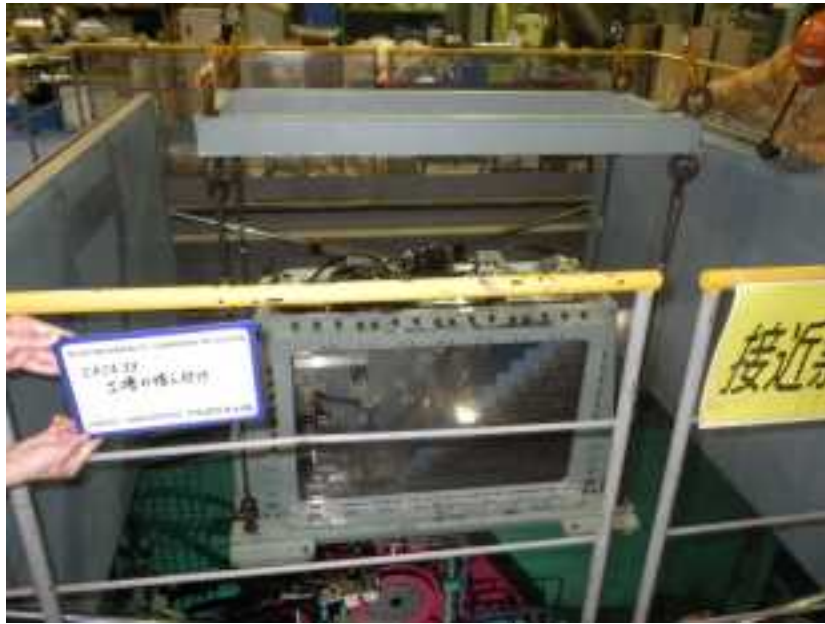


写真 3.1.36 ケース 33 土槽運搬状況



写真 3.1.37 ケース 33 土槽据え付け状況

(3) 土試料のサンプリング

動的遠心载荷試験終了後は、写真撮影後、土試料のサンプリングを行った。土試料のサンプリングは、弱層部のすべり破壊の影響が比較的小さい箇所から行った。サンプリング数量は、各ケース 3 本の強度確認試験（一軸圧縮試験）が実施出来るように、6 試料以上を目途に各段から採れるだけ採取した。なお、土試料のサンプリングは、剛体土槽を大型遠心力载荷試験装置より取り外し、遠心ピット外に移動してから行った。また、弱層撤去時には、試験後の含水比測定を各ケースにおいて行った。土試料のサンプリング状況を写真 3.1.38～写真 3.42 に示し、弱層の試験後含水比結果を表 3.1.12～表 3.1.13 に示す。



写真 3.1.38 ケース 32 土試料のサンプリング状況 1



写真 3.1.39 ケース 32 土試料のサンプリング状況 2



写真 3.1.40 ケース 33 土試料のサンプリング状況 1



写真 3.1.41 ケース 33 土試料のサンプリング状況 2



写真 3.1.42 ケース 33 土試料のサンプリング状況 3

表 3.1.12 ケース 32 弱層試験後含水比結果

測定段数 (上から)	含水比 (%)
1 段	8.0
2 段	9.5
3 段	9.7
4 段	9.4
5 段	9.0
6 段	9.7
7 段	9.4
8 段	9.2
9 段	8.7
10 段	9.0
11 段	8.6

表 3.1.13 ケース 33 弱層試験後含水比結果

測定段数 (上から)	含水比 (%)
1 段	4.7
2 段	7.4
3 段	8.1
4 段	—
5 段	9.0
6 段	9.0
7 段	8.9
8 段	8.7
9 段	8.3
10 段	7.1
11 段	6.7

3.1.2 遠心力模型試験用の地盤試料の要素試験

(1) 概要

強度確認試験は表 3.1.14 に示す試験項目を実施した。強度確認試験に使用した材料は、表 3.1.15 に示すとおりである。

表 3.1.14 強度確認試験実施項目一覧

試験項目	試験名	数量 (本)	備考
一軸圧縮試験	UC-1~30	30	詳細は表 3.1.15 参照
三軸圧縮試験	TC-1~18	18	詳細は表 3.1.15 参照
三軸圧縮繰返し試験	CYC-1~3	3	詳細は表 3.1.15 参照
一面せん断試験	DS-1~6	6	詳細は表 3.1.15 参照

表 3.1.15 材料配合条件一覧

配合条件	配合比 (重量比)	目標湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)
配合⑧	硅砂 6 号(100) : ベントナイトクニゲル-U(5) : 消石灰(60) : 水(20)	1.650
表層 C5	磁砂鉄(100) : ベントナイトクニゲル-U(10) : NPC(5) : 水(17.5)	3.000
表層 C8	磁砂鉄(100) : ベントナイトクニゲル-U(10) : NPC(8) : 水(19)	3.000
表層	磁砂鉄(100) : ベントナイトクニゲル-U(10) : NPC(8) : 水(19)	3.000
材料 A	硅砂 6 号(100) : ベントナイトクニゲル-U(1) : 水(10)	1.767
材料 D	硅砂 6 号(100) : ベントナイトクニゲル-U(5) : 消石灰(60) : 水(20)	1.650

(2) 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験は、斜面供試体の強度確認を目的として、表 3.1.16 に示す 30 ケースを実施した。土試料は、室内作製試料、模型構築時に作製した試料、斜面供試体より実験後にサンプリングした試料の 3 種類を用いた。なお、サンプリングした土試料の供試体寸法は、直径 $\phi=35\text{mm}$ 、高さ $h=70\text{mm}$ を目標値とした。

表 3.1.16 一軸圧縮試験一覧

試験名	斜面供試体 ケース	配合条件	試料の種別	養生日数* σ (日)	試験数量 (本)
UC-1~3	ケース 32	配合⑧	模型構築試料	8	3
UC-4~6	ケース 32	配合⑧		9	3
UC-7~9	ケース 32	配合⑧		13	3
UC-10~12	ケース 32	配合⑧	サンプリング試料	-	3
UC-13~15	ケース 33	配合⑧	模型構築試料	13	3
UC-16~18	ケース 33	配合⑧		14	3
UC-19~21	ケース 33	配合⑧		15	3
UC-22~24	ケース 33	配合⑧	サンプリング試料	-	3
UC-25~27	-	表層 C5	室内作製試料	3	3
UC-28~30	-	表層 C8	室内作製試料	3	3

*養生は、室内気中にて密閉養生を行った（サンプリング試料除く）。

(3) 三軸圧縮試験

三軸圧縮試験は、斜面供試体の強度特性における拘束圧依存性を確認することを目的として、表 3.1.17 に示す 18 ケースを実施した。

表 3.1.17 三軸圧縮試験一覧

試験名	斜面供試体 ケース	供試体 寸法 (mm)	配合 条件	試料の種別	養生日数* σ (日)	拘束圧 (kPa)	試験 数量 (本)
TC-1~3	ケース 32	$\phi 50$ \times h100	配合⑧	模型構築試料	8	50	3
TC-4~6					9	200	3
TC-7~9					13	400	3
TC-10~12	ケース 33		配合⑧	模型構築試料	17	50	3
TC-13~15					18	200	3
TC-16~18					19	400	3

*養生は、室内気中にて密閉養生を行った。

(4) 三軸圧縮繰返し試験

三軸圧縮繰返し試験は、斜面模型の動的変形特性を確認することを目的として、表 3.1.18 に示す 3 ケースを実施した。

表 3.1.18 三軸圧縮繰返し試験一覧

試験名	斜面供試体 ケース	供試体 寸法 (mm)	配合 条件	試料の種別	養生日数* σ (日)	拘束圧 (kPa)	試験 数量 (本)
CYC-1	ケース 32	$\phi 50$	配合⑧	模型構築試料	9	200	1
CYC-2	ケース 33	×	配合⑧	模型構築試料	12		1
CYC-3		h100	表層	模型構築試料	13		1

*養生は、室内気中にて密閉養生を行った。

(5) 一面せん断試験

一面せん断試験は、斜面供試体の強度特性における拘束圧依存性を確認することを目的として、表 3.1.19 に示す内容で 6 ケース実施した。

表 3.1.19 一面せん断試験一覧

試験名	配合 条件	供試体 寸法 (mm)	試料の種別	養生日数* σ (日)	拘束圧 (kPa)	試験数量 (本)
DS-1	材料 A	$\phi 60$ × h20	室内作製試料	14	10	1
DS-2					25	1
DS-3					50	1
DS-4	材料 D		室内作製試料	14	20	1
DS-5					50	1
DS-6					200	1

*養生は、室内気中にて密閉養生を行った。

3.1.3 遠心力模型試験用の計測機器の設置

計測機器は、図 3.1.10～図 3.1.14 に示すとおりに配置した。計測機器の極性の定義図を図 3.1.15 に示す。

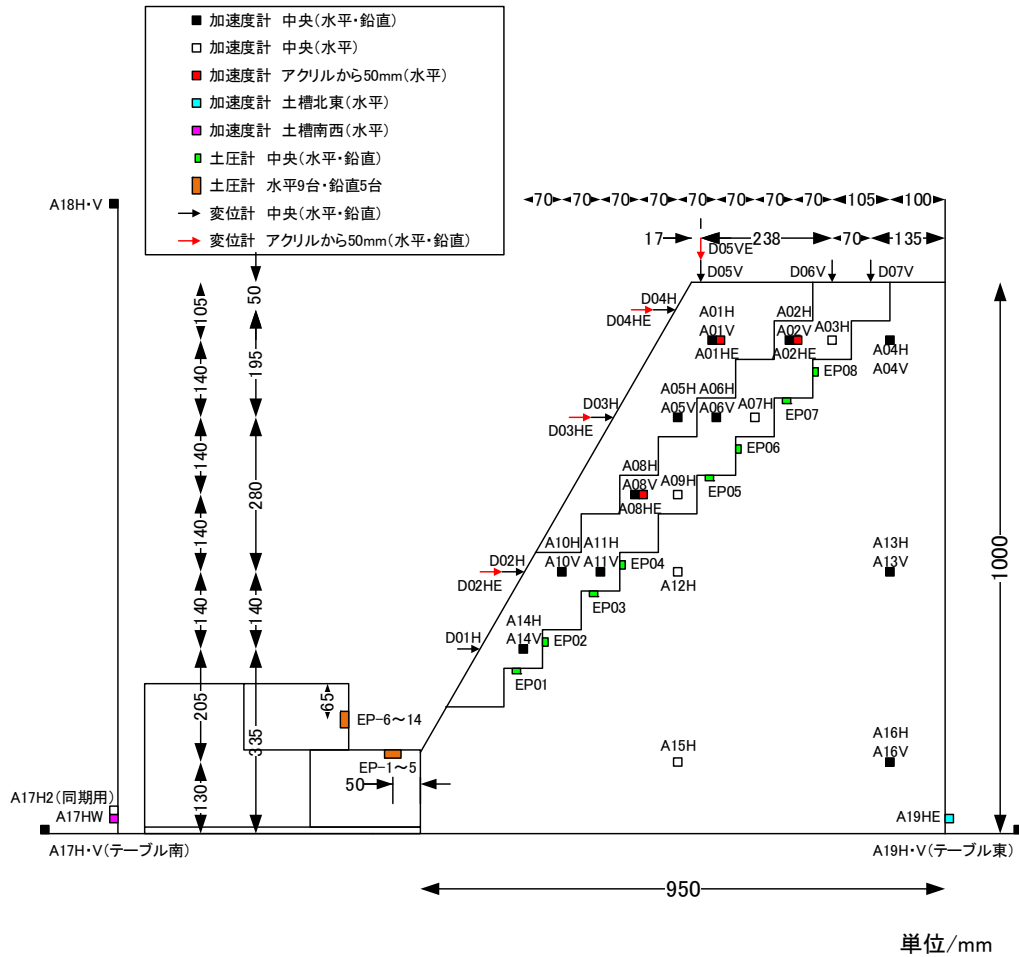


図 3.1.10 ケース 32 計測機器配置図 (立面図)

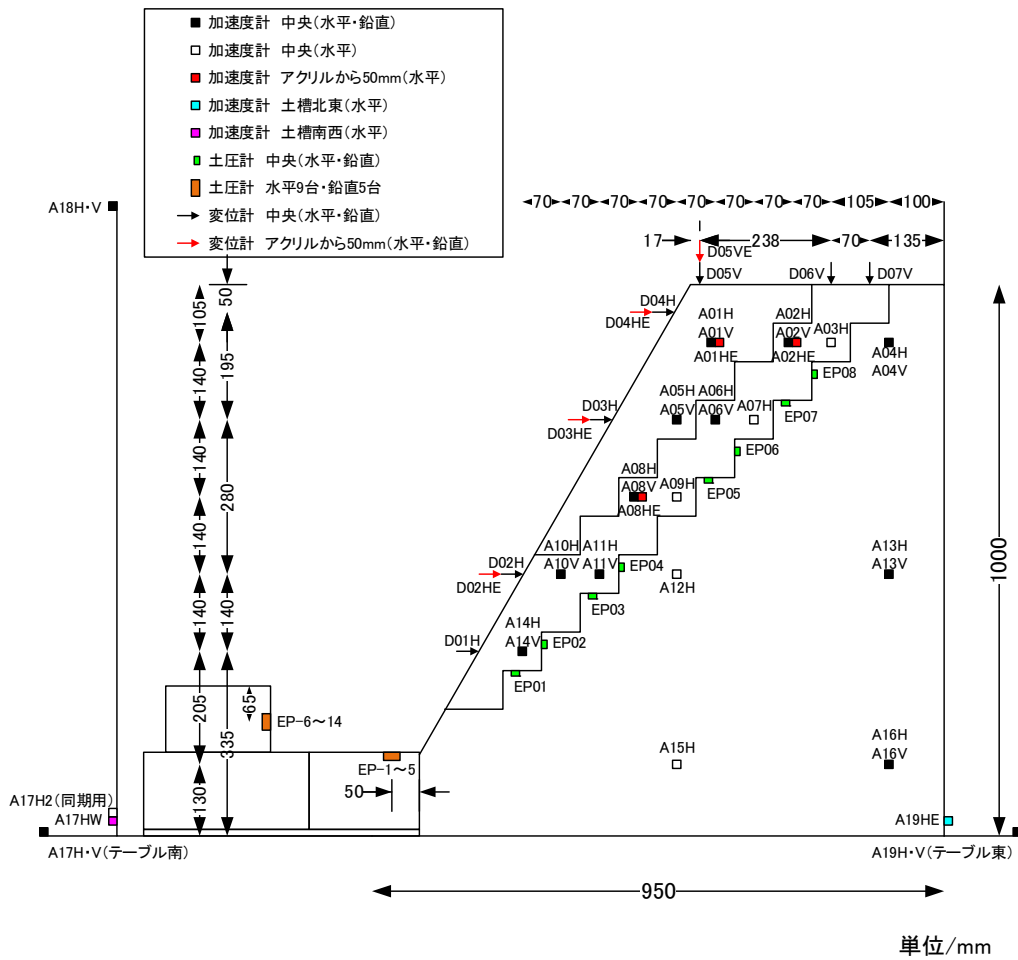


図 3.1.11 ケース 33 計測機器配置図 (立面図)

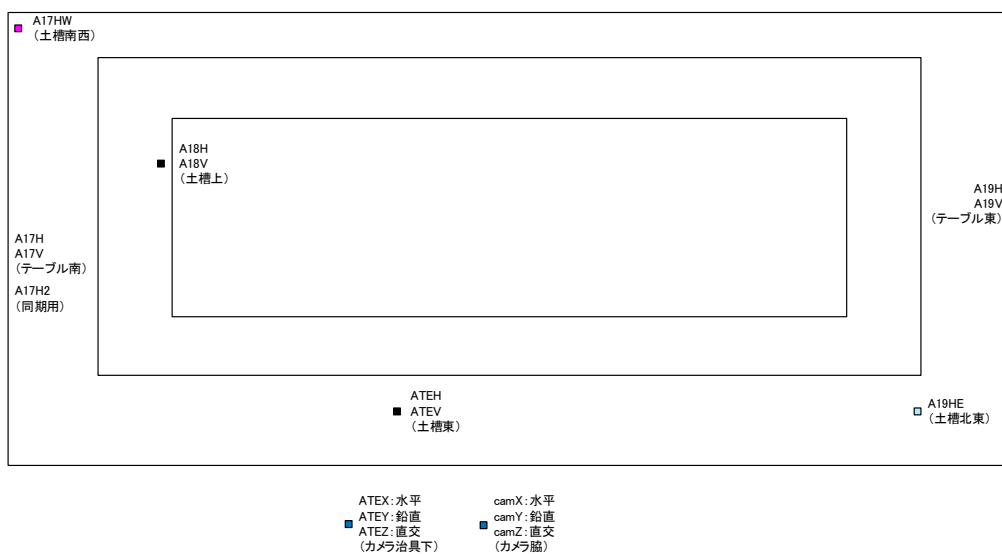


図 3.1.12 ケース 32・33 計測機器配置図 (平面図)

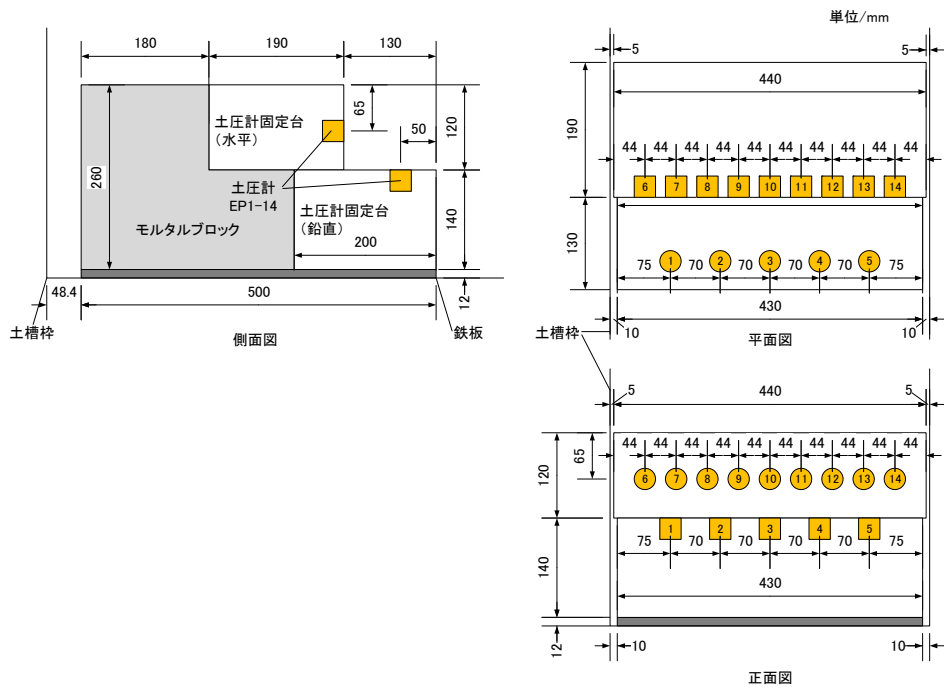


図 3.1.13 ケース 32 土圧計配置詳細図

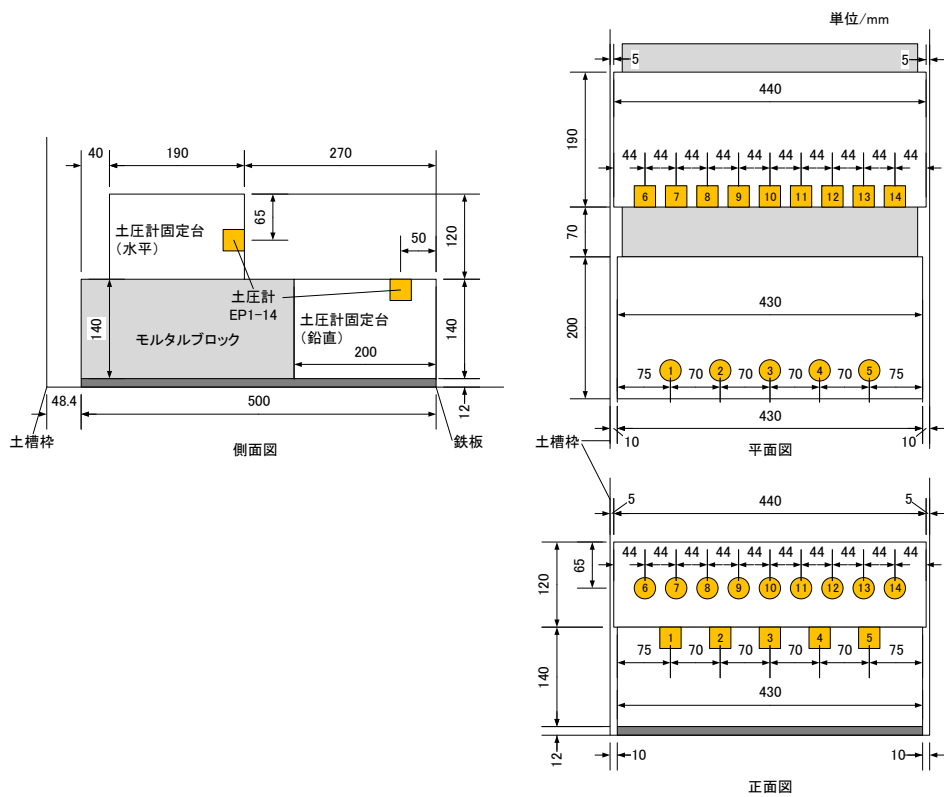


図 3.1.14 ケース 33 土圧計配置詳細図

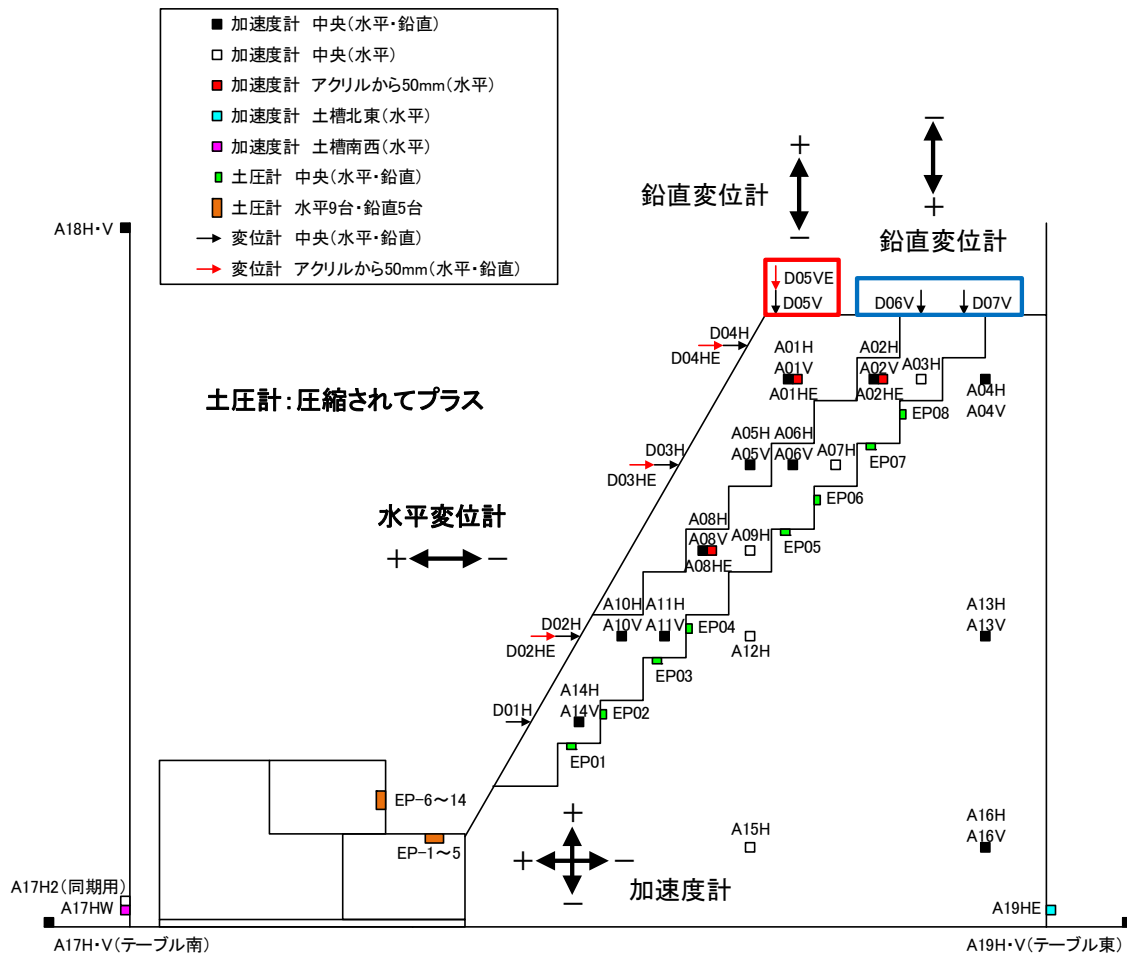


図 3.1.15 ケース 32・33 計測機器の極性の定義図

(1) 斜面模型・土槽の加速度応答・変位計測・土圧計測

加速度応答については、模型地盤内の表層、弱層、基盤層および土槽と振動台テーブルに加速度計を設置した。

変位計測は、斜面模型の変形量を計測するため、レーザー変位計を斜面水平および斜面天端鉛直方向に設置した。

土圧計測は、弱層と基盤層の境界部に水平および鉛直方向に土圧計を設置した。また、斜面崩壊時のすべり土塊の衝突力を計測するため、土槽底面に溶接した固定用鋼板とモルタルブロックを用いて、土圧計を内蔵したアルミ製固定台を設置した。

計測に当たっては、斜面模型・土槽に設置した加速度計、変位計、土圧計ケーブルの結線を行った後、遠心場においてケーブルが外れないように、土槽、バケットおよび回転腕に固定した。計測機器の仕様を表 3.1.20～表 3.1.21 に示す。

表 3.1.20 計測機器名および仕様（その 1）

機器名称	加速度計		土圧計	
型式	710	AS100H	P310	BER-A-2MP15S
メーカー	TEAC	共和電業	SSK	共和電業
容量	±550g	±100g	500kPa	2MPa
形式	圧電式	ひずみゲージ式	ひずみゲージ式	

表 3.1.21 計測機器名および仕様（その 2）

機器名称	変位計		
型式	LKG-505	LKG-155	LK-080
メーカー	キーエンス		
容量	±300mm	±40mm	±15mm
形式	CMOS レーザー式		

(2) 模型斜面の局所変位計測（画像計測）

本試験では、斜面模型内部におけるひずみの増加傾向を確認することを目的として、アクリル面側からハイスピードカメラによる撮影を実施し、地盤中の局所変位に変換した。また、天端およびのり面におけるテンションクラックの発達状況を確認するために、天端およびのり面についてもハイスピードカメラによる撮影を実施した。カメラ収録部は、遠心装置アーム内に搭載し、そこからバケット部（土槽および振動台設置部）まで配線した。遠心装置アーム内から計測室までは、スリップリングを通して制御経路を確保し、遠心装置回転中でも自由にカメラのオペレーションや映像モニター、収録データのバックアップメモリへの転送等が出来るようにした。

(3) カメラ・ケーブル・ライトの結線・固定

ハイスピードカメラ 3 台のうち高精細ヘッド 1 台は、バケット部のアルミ製治具に取り付け、土槽のアクリル面を介して斜面模型の崩壊状況を側面より撮影した。また、残りのペンシル型ヘッド 2 台は、斜面模型の天端ならびにのり面を撮影するために、バケット部のアルミ製治具上部と土槽上部に固定した。

ハイスピードカメラは、毎秒 1,000 コマで画像を取り込むため、撮影には大容量の照明が必要

である。そのため、バケット部には大容量LEDランプ（2台・側面）とハロゲンランプ（8台・上部）を取り付けた。



写真 3.1.43 ハイスピードカメラ設置状況 1



写真 3.1.44 ハイスピードカメラ設置状況 2



写真 3.1.45 ハイスピードカメラ設置状況 3



写真 3.1.46 照明設置状況 1



写真 3.1.47 照明設置状況 2



写真 3.1.48 ケーブル配線状況

3.1.4 遠心力模型試験装置を用いた加振試験

(1) 遠心载荷

遠心载荷にあたっては、安全確認のため遠心载荷装置の回転上昇率を小さく設定し、遠心力を作用させた。また、各ケースにおいて、振動実験実施前に遠心载荷に伴う斜面の変形量をモニターして、遠心重力による斜面模型の安定性を確認した。その結果、ケース 32・33 においては、遠心重力が 50G に到達するまで斜面の変形量に急激な増加傾向は認められず、振動実験実施時に斜面が安定していることが確認された。表 3.1.22 に各ケースでの試験実施状況を示す。

表 3.1.22 試験ケースと試験実施状況

ケース名称	弱層の配合強度	対策工	試験実施状況
ケース 32	低強度	なし	遠心载荷 50G→50G 振動試験
ケース 33	低強度	なし	遠心载荷 50G→50G 振動試験

(2) 振動試験

振動試験は、過去の試験において、高い振動数での加振試験では土槽のロッキングモードが現れ、斜面上部での加速度の増幅が抑制される傾向があることが判明しているため、表 3.1.23 に示す Sin50Hz・10 波の入力を基本とした。振動試験時に、加振制御システムに入力した振動台入力地震動時刻歴を、図 3.1.16 に示す。表 3.1.24 には、遠心模型実験の相似則の比較表を示す。振動試験は、試験体の変形状態をモニターしながら、実物換算で 100Gal から開始し、以降 100Gal ピッチで最大 500Gal（模型で最大 25G）まで入力した。

表 3.1.23 入力地震動

ケース名称	振動試験時 遠心重力	入力地震動	実物換算 振動数
ケース 32	50G	Sin50Hz 10 波	1Hz
ケース 33	50G	Sin50Hz 10 波	1Hz

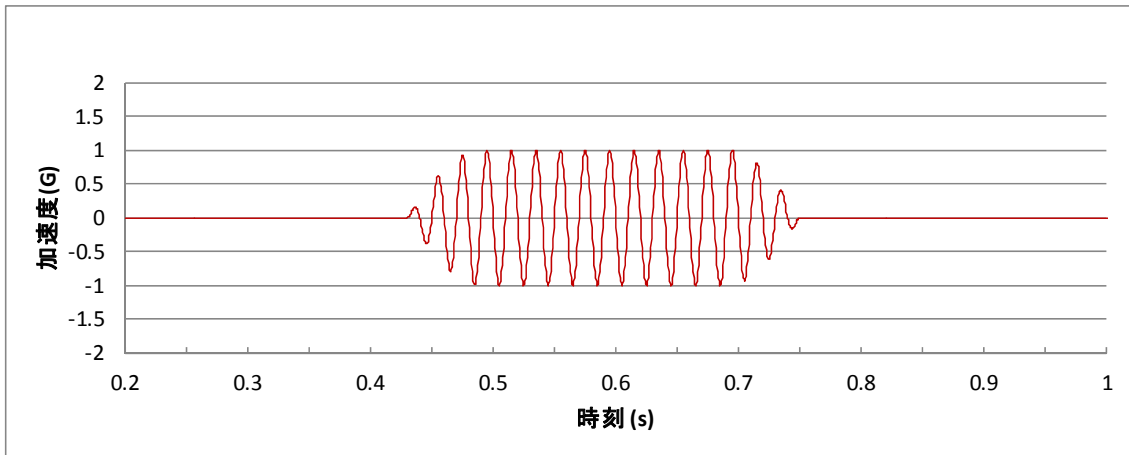


図 3.1.16 振動台入力地震動時刻歴

表 3.1.24 相似則の比較 (縮尺 1/50)

実験	重力場*		遠心力場	
	模型/実物	縮尺	模型/実物	縮尺
物理量 力学量				
長さ	$1/\lambda$	1/50	$1/\lambda$	1/50
密度	1	1	1	1
時間	$1/\lambda^{0.75}$	$1/(50)^{0.75}=1/18.8$	$1/\lambda$	1/50
振動数	$\lambda^{0.75}$	18.8	λ	50
応力	$1/\lambda$	1/50	1	1
間隙水圧	$1/\lambda$	1/50	1	1
変位	$1/\lambda^{1.5}$	$1/(50)^{1.5}=1/354$	$1/\lambda$	1/50
速度	$1/\lambda^{0.75}$	$1/(50)^{0.75}=1/18.8$	1	1
加速度	1	1	λ	50
備考	*井合の重力場相似則 (地盤ひずみの相似比を $1/\lambda^{0.5}$ と仮定) : 第 19 回地震工学研究発表会, 土木学会耐震工学委員会, pp.341-344, 1987			

3.1.5 加振試験結果データを用いた画像解析

(1) 概要

斜面模型を用いた遠心載荷実験において、高速度カメラを用いて撮影を行い、撮影した画像を解析することにより、斜面模型の標点変位を追跡した。以下に今回の画像解析作業に用いた試験ケース名と斜面模型の仕様を表 3.1.25 に、表 3.1.26 に試験条件を示す。

表 3.1.25 試験ケース名と斜面模型の仕様

ケース名	試験体仕様
ケース 32 (予備試験)	弱層勾配：45 度、弱層厚さ：70mm、摩擦軽減層あり（フィルム） 無対策、のり先より 130mm に土圧計設置
ケース 33	弱層勾配：45 度、弱層厚さ：70mm、摩擦軽減層あり（フィルム） 無対策、のり先より 270mm に土圧計設置

表 3.1.26 試験条件

ケース 32		
試番	遠心力	入力波形
1	50G	正弦波 5Hz100gal
2	50G	正弦波 5Hz200gal
3	50G	正弦波 5Hz220gal
4	50G	正弦波 5Hz300gal
5	50G	正弦波 5z300gal
ケース 33		
試番	遠心力	入力波形
1	50G	正弦波 5Hz100gal
2	50G	正弦波 5Hz200gal
3	50G	正弦波 5Hz300gal
4	50G	正弦波 5Hz300gal
5	50G	正弦波 5Hz400gal
6	50G	正弦波 5Hz500gal
7	50G	正弦波 5Hz500gal

表 3.1.27 に試験ケースと撮影条件を示す。

表 3.1.27 試験ケースと撮影条件

ケース名	カメラ	レンズ	絞り値	解像度	撮影レート	露光時間
ケース 32 (予備試験)	GX-5 HR-Cam	17mmF3.0	3	1.350mm/画素	500Hz	1/2000 秒
ケース 33	GX-5 HR-Cam	17mmF3.0	3	1.360mm/画素	500Hz	1/2000 秒



写真 3.1.49 ケース 32 の振動実験の状況 (写真左：加振前、写真右：加振後)



写真 3.1.50 ケース 33 の振動実験の状況 (写真左：加振前、写真右：加振後)

(2) レンズのゆがみ補正

今回の画像解析作業では、超広角レンズの 17mm を使用した。使用したレンズは、広角レンズ特有の樽型湾曲であるため、予め相互の距離が判っている標点を設けた上で撮影を行い、画像解析ソフト (Move-tr2D) のレンズのゆがみ補正機能『二次元 DLT』を使って補正を行った。

図 3.1.17 に補正に用いた標点を、図 3.1.18 に補正に用いた標点間距離を示す。



図 3.1.17 レンズゆがみ補正に用いた標点 (ケース 32,33 共通)

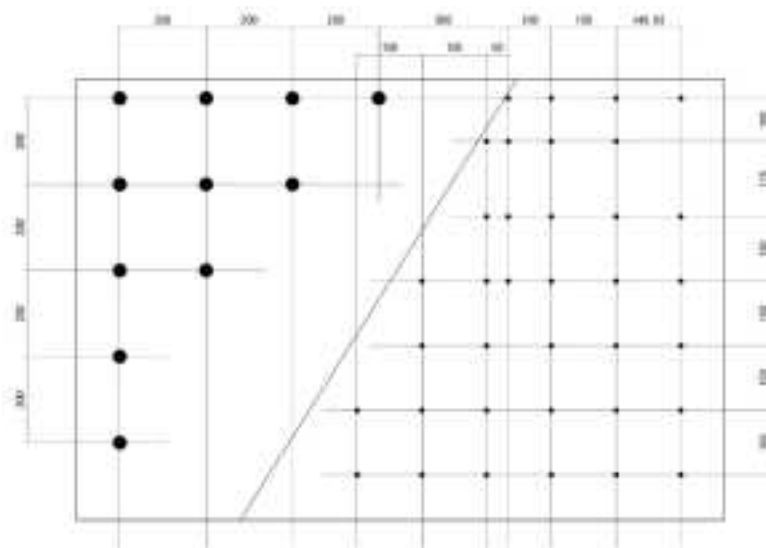


図 3.1.18 レンズのゆがみ補正に用いた標点間距離 (ケース 32,33 共通・単位 mm)

表 3.1.28 と表 3.1.29 に各ケースにおけるレンズのゆがみ補正の結果を示す。

表 3.1.28 補正原点を 1 番とした場合の補正結果 (ケース 32)

歪み補正データ 作成時の標点 番号	画像解析に 於ける標点 番号	備考	原点位置		CASE32		設計位置との差分		原点からの直線 距離	原点からの 直線位置	理論値との 差分
			(設計位置)		解析結果(補正あり)		X	Y	(理論値)	解析結果 (補正あり)	
			X	Y	X	Y					
1	11	補正原点	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	15	表層	90	0	90.24	-0.11	0.24	-0.11	90.00	90.24	0.24
42	481	基盤層	-475	820	-474.34	822.87	0.66	2.87	947.64	949.8	2.16
43	482	基盤層	-330	820	-328.45	821.76	1.55	1.76	883.91	884.97	1.06
44	483	基盤層	-190	820	-188.47	821.48	1.53	1.48	841.72	842.82	1.10
45	484	基盤層	-50	820	-49.94	820.64	0.06	0.64	821.52	822.16	0.64
46	485	基盤層	90	820	90.57	820.05	0.57	0.05	824.92	825.03	0.11
47	486	基盤層	230	820	230.83	819.8	0.83	-0.2	851.65	851.67	0.02
48	487	基盤層	370	820	369.74	820.29	-0.26	0.29	899.61	899.77	0.16
36	447	基盤層	-330	675	-329.63	676.94	0.37	1.94	751.35	752.93	1.58
37	452	基盤層	-190	675	-190.5	676.9	-0.5	1.9	701.23	703.2	1.97
38	453	基盤層	-50	675	-51.59	676.12	-1.59	1.12	676.85	678.09	1.24
39	454	基盤層	90	675	90.56	674.22	0.56	-0.78	680.97	680.27	-0.70
40	455	基盤層	230	675	230.13	675.09	0.13	0.09	713.11	713.23	0.12
41	456	基盤層	370	675	370.58	676.24	0.58	1.24	769.76	771.13	1.37
31	422	基盤層	-190	535	-187.11	534.06	2.89	-0.94	567.74	565.88	-1.86
32	426	基盤層	-50	535	-50.04	534.83	-0.04	-0.17	537.33	537.17	-0.16
33	427	基盤層	90	535	91.79	533.44	1.79	-1.56	542.52	541.28	-1.24
34	428	基盤層	230	535	231.24	533.39	1.24	-1.61	582.34	581.36	-0.98
35	429	基盤層	370	535	372.15	534.09	2.15	-0.91	650.48	650.96	0.48
26	395	基盤層	-50	395	-49.96	392.25	0.04	-2.75	398.15	395.42	-2.73
27	397	基盤層	0	395	-2.38	397.2	-2.38	2.2	395.00	397.21	2.21
28	400	基盤層	90	395	89.2	394.16	-0.8	-0.84	405.12	404.13	-0.99
29	401	基盤層	230	395	231.87	396.65	1.87	1.65	457.08	459.45	2.37
30	402	基盤層	370	395	371.32	399.15	1.32	4.15	541.23	545.16	3.93
22	367	基盤層	90	255	91.62	257.34	1.62	2.34	270.42	273.16	2.74
4	324	基盤層	370	0	369.87	1.97	-0.13	1.97	370.00	369.87	-0.13
23	372	基盤層	230	255	231.99	255.75	1.99	0.75	343.40	345.29	1.89
24	373	基盤層	370	255	371.68	258.8	1.68	3.8	449.36	452.91	3.55
25	240	弱層	-190	395	-191.9	395.82	-1.9	0.82	438.32	439.89	1.57
21	207	弱層	0	255	0.78	256.42	0.78	1.42	255.00	256.42	1.42
20	205	弱層	-50	255	-51.09	256.2	-1.09	1.2	259.86	261.25	1.39
19	166	弱層	230	95	230.65	93.66	0.65	-1.34	248.85	248.94	0.09
3	139	弱層	230	0	229.7	0.35	-0.3	0.35	230.00	229.7	-0.30
18	55	表層	90	95	90.35	92.83	0.35	-2.17	130.86	129.54	-1.32
17	51	表層	0	95	0.07	92.93	0.07	-2.07	95.00	92.93	-2.07
16	49	表層	-50	95	-50.92	91.95	-0.92	-3.05	107.35	105.11	-2.24
8	488	補正用固定点	-900	0	-900.12	3.39	-0.12	3.39	900.00	900.12	0.12
7	489	補正用固定点	-700	0	-698.87	0.45	1.13	0.45	700.00	698.87	-1.13
6	490	補正用固定点	-500	0	-498.77	0.56	1.23	0.56	500.00	297.31	-202.69
5	491	補正用固定点	-300	0	-297.31	1.74	2.69	1.74	300.00	498.77	198.77
11	492	補正用固定点	-900	200	-900.72	202.86	-0.72	2.86	921.95	923.28	1.33
10	493	補正用固定点	-700	200	-696.73	196.72	3.27	-3.28	728.01	723.97	-4.04
9	494	補正用固定点	-500	200	-498.8	200.69	1.2	0.69	538.52	537.66	-0.86
13	495	補正用固定点	-900	400	-899.46	399.41	0.54	-0.59	984.89	984.15	-0.74
12	496	補正用固定点	-700	400	-696.69	399.41	3.31	-0.59	806.23	803.06	-3.17
14	497	補正用固定点	-900	600	-898.99	602.46	1.01	2.46	1081.67	1082.19	0.52
15	498	補正用固定点	-900	800	-900.9	795.65	-0.9	-4.35	1204.16	1201.95	-2.21

表 3.1.29 補正原点を1番とした場合の補正結果 (ケース 33)

歪み補正データ 作成時の標点 番号	画像解析に 於ける標点 番号	備考	原点位置		CASE33		設計位置との差分		原点からの直線 距離	原点からの 直線位置	理論値との 差分
			(設計位置)		解析結果(補正あり)		X	Y	(理論値)	解析結果 (補正あり)	
			X	Y	X	Y	mm	mm	mm		
1	11	補正原点	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	15	表層	90	0	90.42	0	0.42	0	90.00	90.42	0.42
42	-	基盤層	-475	820	-	-	-	-	-	-	-
43	474	基盤層	-330	820	-327.81	820.21	2.19	0.21	883.91	883.29	-0.62
44	475	基盤層	-190	820	-187.7	819.19	2.3	-0.81	841.72	840.42	-1.30
45	476	基盤層	-50	820	-49.9	819.13	0.1	-0.87	821.52	820.65	-0.87
46	477	基盤層	90	820	91.11	818.54	1.11	-1.46	824.92	823.6	-1.32
47	478	基盤層	230	820	231.78	817.67	1.78	-2.33	851.65	849.89	-1.76
48	479	基盤層	370	820	370.13	818.14	0.13	-1.86	899.61	897.97	-1.64
36	445	基盤層	-330	675	-329.3	675.75	0.7	0.75	751.35	751.72	0.37
37	450	基盤層	-190	675	-189.17	675.32	0.83	0.32	701.23	701.32	0.09
38	451	基盤層	-50	675	-51.18	674.76	-1.18	-0.24	676.85	676.7	-0.15
39	452	基盤層	90	675	90.94	673.11	0.94	-1.89	680.97	679.22	-1.75
40	453	基盤層	230	675	230.75	673.34	0.75	-1.66	713.11	711.78	-1.33
41	454	基盤層	370	675	371.34	674.24	1.34	-0.76	769.76	769.73	-0.03
31	421	基盤層	-190	535	-187.39	533.37	2.61	-1.63	567.74	565.33	-2.41
32	425	基盤層	-50	535	-48.87	533.71	1.13	-1.29	537.33	535.94	-1.39
33	426	基盤層	90	535	92.8	531.86	2.8	-3.14	542.52	539.9	-2.62
34	427	基盤層	230	535	231.23	531.75	1.23	-3.25	582.34	579.85	-2.49
35	428	基盤層	370	535	372.49	532.4	2.49	-2.6	650.48	649.77	-0.71
26	394	基盤層	-50	395	-49.46	391.53	0.54	-3.47	398.15	394.64	-3.51
27	396	基盤層	0	395	-2.61	396.14	-2.61	1.14	395.00	396.15	1.15
28	399	基盤層	90	395	89.14	392.95	-0.86	-2.05	405.12	402.94	-2.18
29	400	基盤層	230	395	232.07	395.13	2.07	0.13	457.08	458.24	1.16
30	401	基盤層	370	395	371.6	397.61	1.6	2.61	541.23	544.23	3.00
22	368	基盤層	90	255	91.22	257.05	1.22	2.05	270.42	272.76	2.34
4	327	基盤層	370	0	369.22	0.46	-0.78	0.46	370.00	369.22	-0.78
23	373	基盤層	230	255	232.23	254.55	2.23	-0.45	343.40	344.57	1.17
24	374	基盤層	370	255	371.79	257.46	1.79	2.46	449.36	452.23	2.87
25	241	弱層	-190	395	-191.19	393.81	-1.19	-1.19	438.32	437.76	-0.56
21	207	弱層	0	255	0.59	252.43	0.59	-2.57	255.00	252.44	-2.56
20	205	弱層	-50	255	-49.64	253.27	0.36	-1.73	259.86	258.09	-1.77
19	166	弱層	230	95	230.88	91.96	0.88	-3.04	248.85	248.52	-0.33
3	139	弱層	230	0	230	-2.09	0	-2.09	230.00	230.01	0.01
18	55	表層	90	95	91.05	92.36	1.05	-2.64	130.86	129.69	-1.17
17	51	表層	0	95	0.92	91.99	0.92	-3.01	95.00	92	-3.00
16	49	表層	-50	95	-50.18	91.9	-0.18	-3.1	107.35	104.71	-2.64
8	480	補正用固定点	-900	0	-900.01	1.39	-0.01	1.39	900.00	900.01	0.01
7	481	補正用固定点	-700	0	-698.77	-0.88	1.23	-0.88	700.00	698.77	-1.23
6	482	補正用固定点	-500	0	-498.34	-0.77	1.66	-0.77	500.00	498.34	-1.66
5	483	補正用固定点	-300	0	-296.57	0.86	3.43	0.86	300.00	296.57	-3.43
11	484	補正用固定点	-900	200	-900.7	201.19	-0.7	1.19	921.95	922.9	0.95
10	485	補正用固定点	-700	200	-696.6	195.45	3.4	-4.55	728.01	723.5	-4.51
9	486	補正用固定点	-500	200	-498.73	199.34	1.27	-0.66	538.52	537.1	-1.42
13	487	補正用固定点	-900	400	-899.53	397.8	0.47	-2.2	984.89	983.56	-1.33
12	488	補正用固定点	-700	400	-696.27	398.21	3.73	-1.79	806.23	802.1	-4.13
14	489	補正用固定点	-900	600	-898.79	600.78	1.21	0.78	1081.67	1081.09	-0.58
15	490	補正用固定点	-900	800	-900.71	794	-0.71	-6	1204.16	1200.72	-3.44

(3) 標点の二次元変位の追跡

斜面模型に設置された全ての標点の二次元的変位を追跡行った。各標点の変位は不動点からの相対変位として算出し、ケース 32 とケース 33 において試番 1 の加振開始前を初期値とした。

標点の状況が、変位量が大きく追跡不可能、消失、他の標点と重なり識別が不可能となった時は、その時点で画像解析を中止した。

(4) ひずみ量の算定

標点の二次元的変位の追跡で算出した各標点の変位量から、斜面模型中の最大せん断ひずみ量(γ_{\max})を算定した。

最大せん断ひずみの算定は、隣接する標点から四角形要素を定義してアイソパラメトリック要素法を用いて算出し、最大せん断ひずみ算定ソフト (MGRID) を用いて行った。

3.2 岩塊衝突試験

3.2.1 岩塊衝突試験用の反力壁の製作

(1) 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、骨組モデルを用いるものとし、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拠して設計を行った。

設計上考慮する外力は想定される荷重の最大値として、3分力荷重計の荷重計直方向の計測容量の最大値である1.0MNの荷重が作用した場合を想定し、荷重計の中心に作用した場合と、偏心して作用した場合について照査を実施した。

反力壁の設計においては、上記の荷重が作用した際に反力壁、基礎杭および支持地盤に破壊が生じないこと、岩塊衝突時の変位量が微小であること（本設計においては岩塊衝突時の反力壁の変位量を10mm以内とした）を確認し、反力壁が所要の性能を有することを確認した。以下に主要な照査項目を記載する。

- 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
- ⑤ 反力壁の変位量の照査

照査結果の詳細を以降に示す。なお、本設計は以下の設計標準に従い実施した。

国土交通省監修、鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物，平成24年1月。

以下では、この設計標準を基礎標準と略す。

(1) 設計条件

1) 使用材料

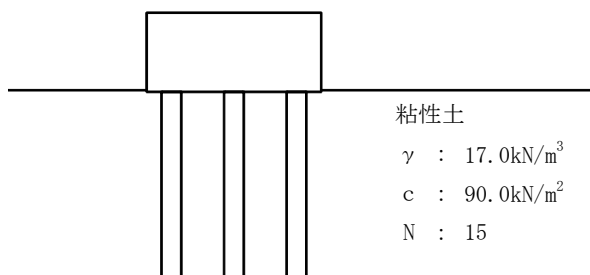
コンクリート	30N/mm ²
異型鉄筋	SD345 (f _{syd} =345N/mm ²)
H鋼	SS400 (f _{syd} =235N/mm ²)

2) 検討荷重

岩塊による衝突荷重	1000kN
-----------	--------

3) 地盤条件

盛土試験場の土質条件を以下に示す.



4) 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 3.2.1 に解析モデルを示す。

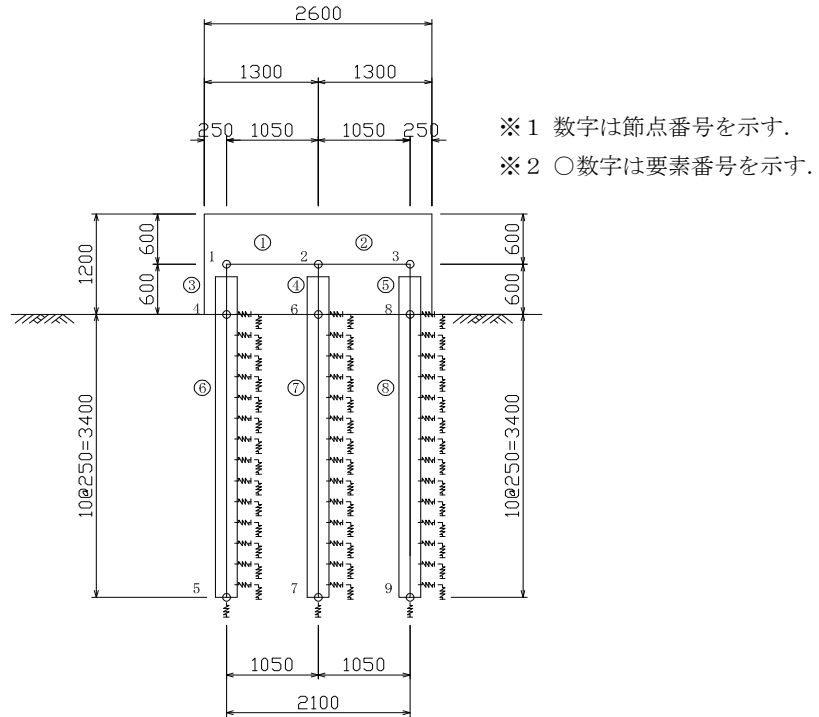


図 3.2.1 解析モデル

(3) 断面諸元

表 3.2.1 に断面諸元を示す。

表 3.2.1 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	1.2	1.4	1.68	0.2016	28
躯体②	3~5	剛域		1000	1000	
杭	6~8	H-250*250*9*14		0.009143	0.000107	200

(4) 地盤ばねの計算

1) 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。

$$\begin{aligned}k_{tv} &= 7.0 \rho_{gk} E_d D^{-3/4} \\ &= 7.0 \times 1.0 \times 35000 \times 0.25^{-3/4} \\ &= 692965 \text{ kN/m}^3\end{aligned}$$

ここに、

k_{tv} : 杭先端の鉛直地盤反力係数 (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)】

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

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)

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

γ_{gE} : 地盤調査係数 (= 1.7)

D : 杭径(m) (= 0.25 m)

2) 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/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)】

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

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)

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

γ_{gE} : 地盤調査係数 (= 1.7)

3) 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.

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

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)】

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

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)

$E_N = 4000N$ (粘性土)

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

γ_{gE} : 地盤調査係数 (= 1.7)

D : 杭径(m) (= 0.25 m)

4) 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.

5) 地盤ばねの算定【基礎標準15.2.2.2】

(a) 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。

$$\begin{aligned} K_{tv} &= k_{tv}A_t \\ &= 692965 \times 0.009143 \\ &= 6336 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{aligned} K_{tv} &: \text{杭先端の鉛直地盤ばね定数 (kN/m)} \\ k_{tv} &: \text{杭先端の鉛直地盤反力係数 (kN/m}^3\text{)} \\ A_t &: \text{杭先端の面積 (m}^3\text{)} \quad (\text{H鋼の断面積} \quad A_t = 0.009143 \text{ m}^2) \end{aligned}$$

(b) 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。

$$\begin{aligned} K_{fv} &= k_{fv}U\Delta l \\ &= 7000 \times 1.0 \times 3.40 \\ &= 23800 \text{ kN/m} \quad (\text{※入力値} = 7000 \text{ kN/m}^2) \\ &\quad \text{※ 電算入力の際は分布ばねの値を用いる} \end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{aligned} K_{fv} &: \text{杭周面の鉛直せん断地盤ばね定数 (kN/m)} \\ k_{fv} &: \text{杭周面の鉛直せん断地盤反力係数 (kN/m}^3\text{)} \\ \Delta l &: \text{杭周面の鉛直せん断地盤ばね定数を算定する区間の長さ (m)} \quad (= 3.4 \text{ m}) \\ U &: \text{杭の周長 (m)} \quad (= 0.25 \times 4 = 1.0 \text{ m}) \end{aligned}$$

(c) 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。

$$\begin{aligned} K_h &= k_h D \Delta l \\ &= 178191 \times 0.25 \times 3.40 \\ &= 151462 \text{ kN/m} \quad (\text{※入力値} = 44548 \text{ kN/m}^2) \\ &\quad \text{※ 電算入力の際は分布ばねの値を用いる} \end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{aligned} K_h &: \text{杭周面の水平地盤ばね定数 (kN/m)} \\ k_h &: \text{杭周面の水平地盤反力係数 (kN/m}^3\text{)} \\ D &: \text{杭の載荷幅 (m)} \quad (= 0.25 \text{ m}) \\ \Delta l &: \text{杭周面の水平地盤ばね定数を算定する区間の長さ (m)} \quad (= 3.4 \text{ m}) \end{aligned}$$

(5) 荷重計算

1) 永久作用

壁体自重 $W1 = 24.50 \text{ kN/m}^3 \times 1.20 \text{ m} \times 1.40 \text{ m} = 41.16 \text{ kN/m}$

杭自重 (H-250*250*9*14) $W2 = 71.8 \text{ kg/m} \times 9.8 \div 1000 \times 2 \text{ 本} = 1.41 \text{ kN/m}$

2) 偶発作用

衝突荷重 $P1 = 1000 \text{ kN}$

3) 荷重状態図

図 3.2.2 に荷重状態図を示す.

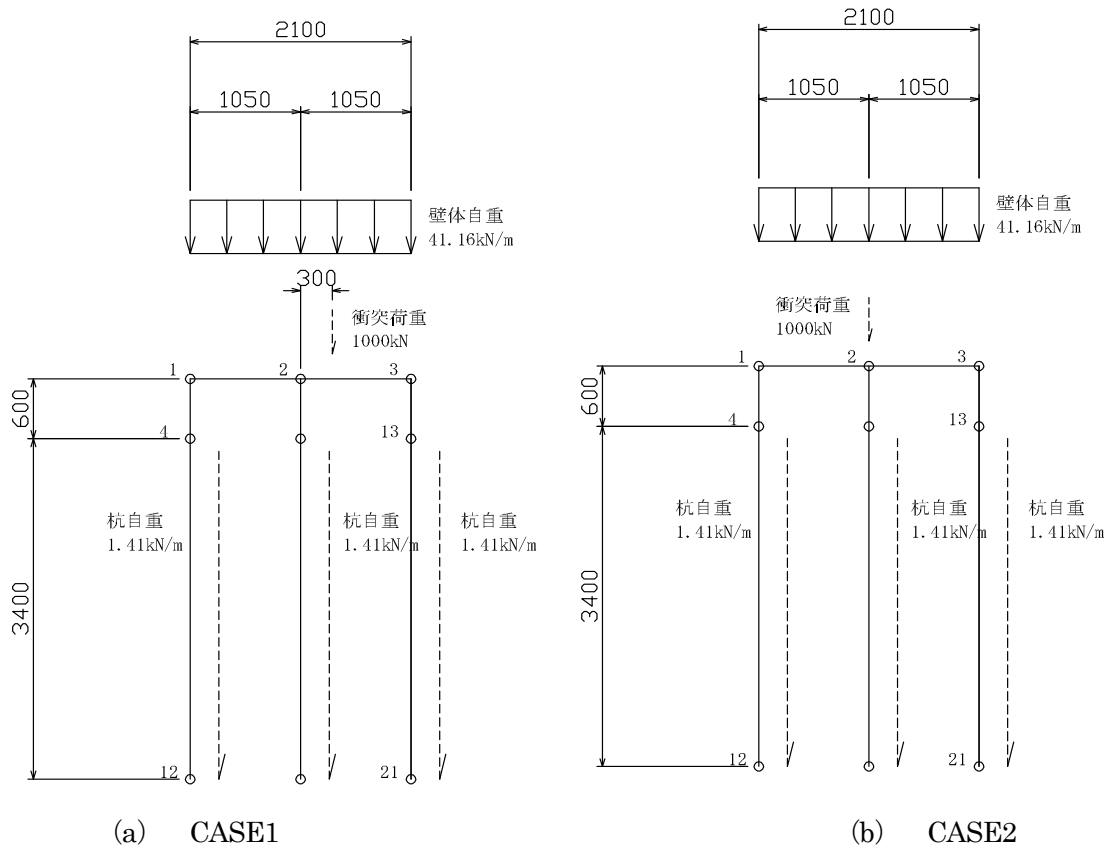


図 3.2.2 荷重状態図

(6) 応答値算定

図 3.2.3, 図 3.2.4 に岩塊が衝突した時の断面力および変位量を示す。

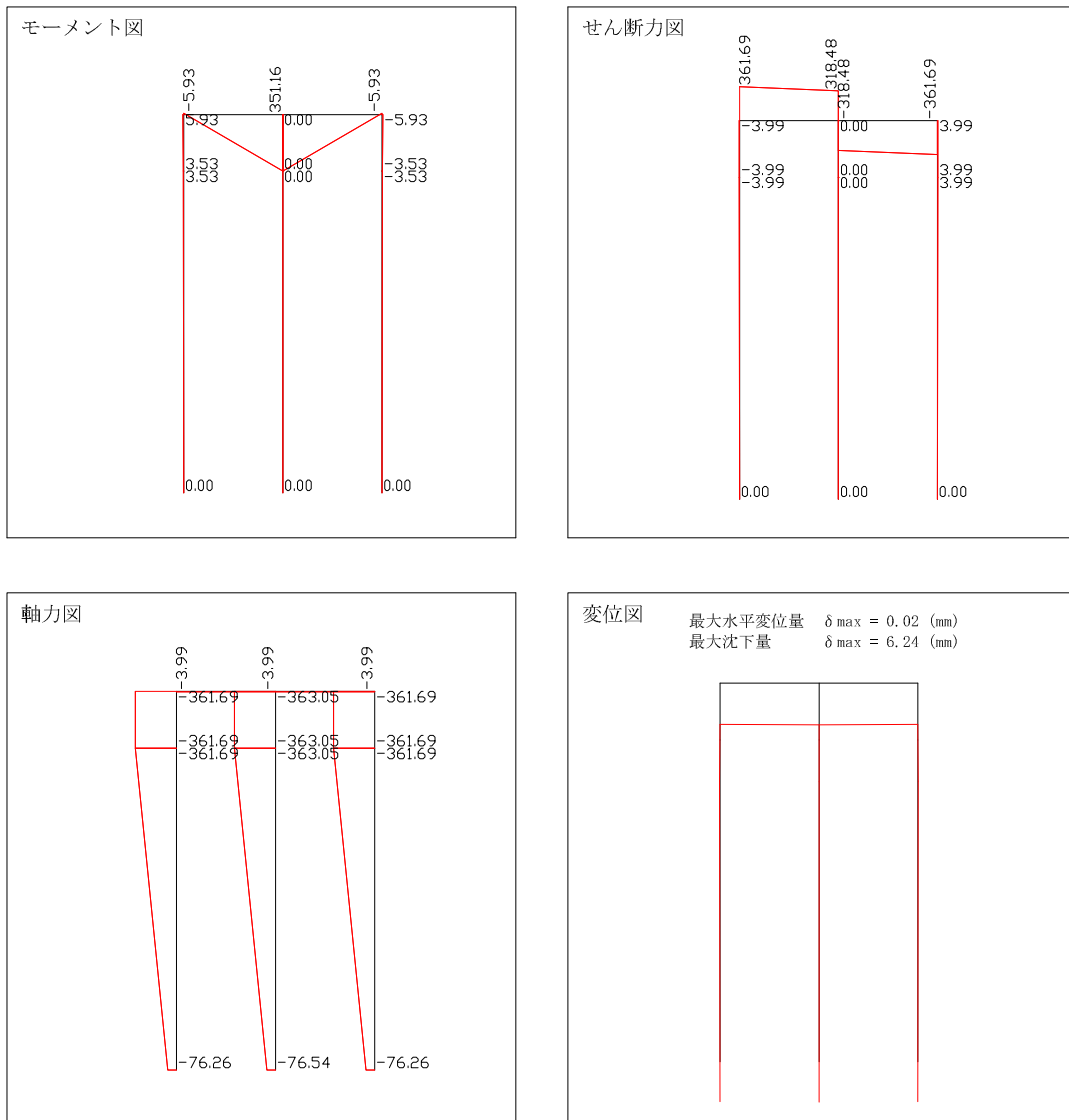


図 3.2.3 CASE1 断面力図

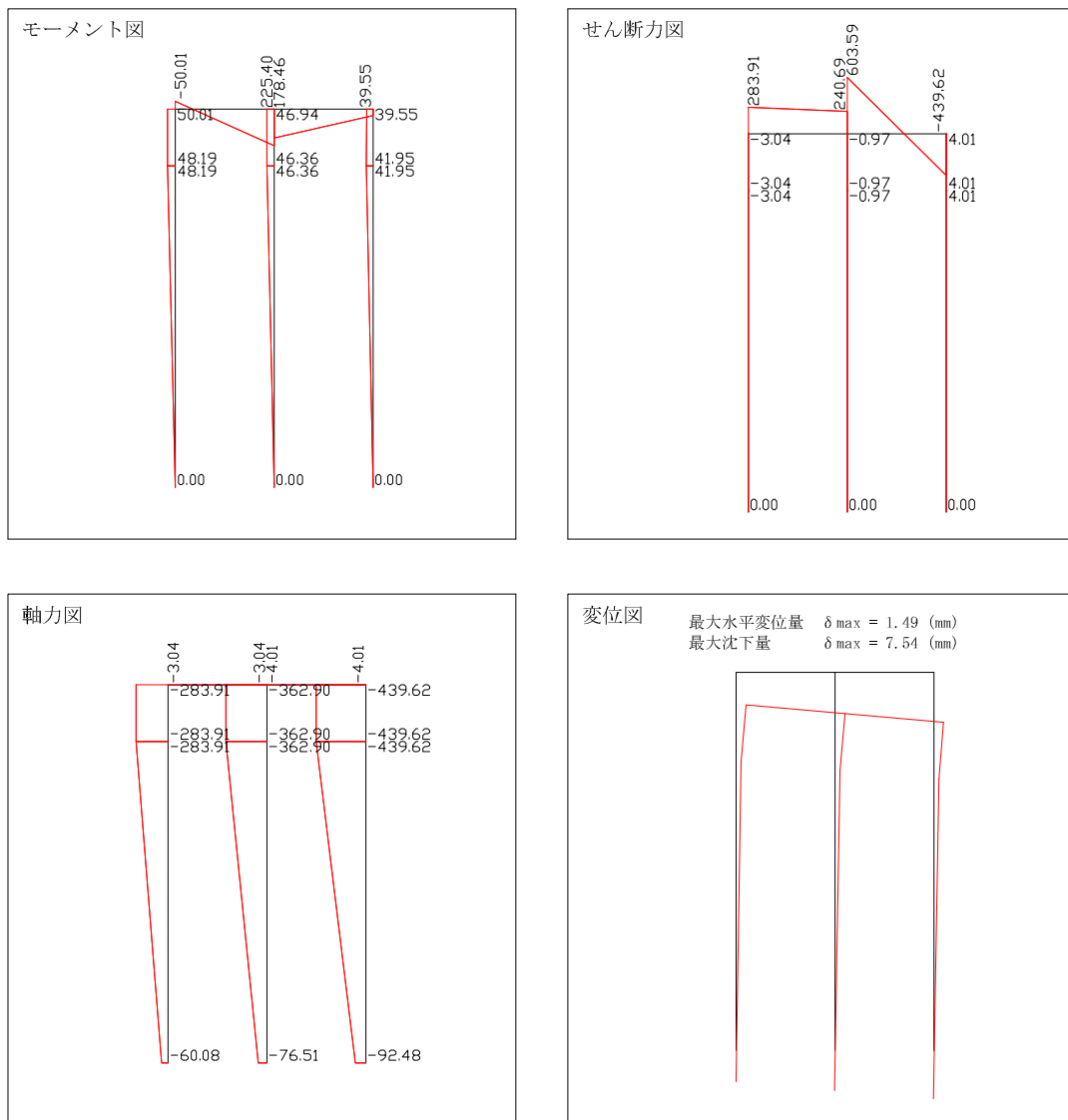


図 3.2.4 CASE2 断面力図

照査に用いる応答値を表 3.2.2 にまとめる.

表 3.2.2 照査に用いる応答値

照査項目	ケース	曲げモーメント (kN・m)	せん断力 (kN)	軸力 (kN)	変位量 (mm)
反力壁の曲げに対する照査	CASE1	351.16	318.48	363.05	-
反力壁のせん断に対する照査	CASE2	178.46	603.59	4.01	-
反力壁の杭体の照査	CASE2	48.19	4.01	439.62	-
反力壁の支持力の照査	CASE2	-	-	439.62	-
反力壁の変位量の照査	CASE2	-	-	-	7.54

(7) 照査結果

1) 反力壁壁体の照査

(a) 曲げに対する照査

曲げに対する照査結果を表 3.2.3 に示す。

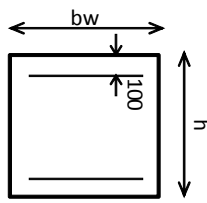
表 3.2.3 曲げに対する照査結果

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 D25-10本 (引張側・圧縮側 各5本) せん断補強鉄筋 D13-2組-ctc300
h (mm)	1200
bw(r)(mm)	1400
Ast (mm ²)	2533.5
dst (mm)	100
Asc (mm ²)	2533.5
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)	351.2
N'd (kN)	-4
ϵ'_{cu}	0.0003
ϵ_s	0.0017
x (mm)	180.7
My (kN·m)	902.91
γ_b	1.0
Myd (kN·m)	902.91
γ_i	1.0
$\gamma_i \cdot Md / Myd$	0.39
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 3.2.4 に示す。

表 3.2.4 せん断に対する照査結果

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 D25-10本 (引張側・圧縮側 各5本) せん断補強鉄筋 D13-2本-ctc300
h (mm)	1200
bw (mm)	1400
Ast (mm ²)	2533.5
dst (mm)	100
Asc (mm ²)	2533.5
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)	178.5
N'd (kN)	-4
Vd (kN)	603.6
ϵ'_{cu}	0.0035
ϵ_s	0.0505
x (mm)	71.3
Mu (kN·m)	983.5
Aw (mm ²)	506.8
fwyd (N/mm ²)	345
fbyd (N/mm ²)	345
θ_s (°)	90
ss (mm)	300
fvc d (N/mm ²)	0.569
β_d	0.976
ρ_c	0.00165
β_p	0.548
M0 (kN·m)	-0.8
β_n	0.997
γ_{bc}	1.3
Vcd (kN)	359.72
γ_{bs}	1.1
Vsd (kN)	506.8
Vyd (kN)	866.52
γ_i	1.2
$\gamma_i \cdot Vd/Vyd$	0.84
照査結果	OK

2) 杭体の照査

(a) 軸方向力に対する照査

使用材料 H-250*250*9*14 SS400

$$\begin{aligned}\text{軸方向耐力} \quad N_{ud} &= f_{syd} \cdot A \times 2 \text{本} \\ &= 235 \text{ N/mm}^2 \times 9143 \text{ mm}^2 \times 2 \text{本} \\ &= 4297210 \text{ N} \\ &= 4297.21 \text{ kN}\end{aligned}$$

$$\text{応答値} \quad N_d = 439.62 \text{ kN}$$

$$\text{照査結果} \quad N_d/N_{ud} = 0.102 \quad \text{OK}$$

(b) 曲げに対する照査

使用材料 H-250*250*9*14 SS400

$$\begin{aligned}\text{曲げ耐力} \quad M_{ud} &= f_{syd} \cdot Z \times 2 \text{本} \\ &= 235 \text{ N/mm}^2 \times 860000 \text{ mm}^3 \times 2 \text{本} \\ &= 404200000 \text{ N}\cdot\text{mm} \\ &= 404.20 \text{ kN}\cdot\text{m}\end{aligned}$$

$$\text{応答値} \quad M_d = 48.19 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\text{照査結果} \quad M_d/M_{ud} = 0.119 \quad \text{OK}$$

(c) せん断に対する照査

使用材料 H-250*250*9*14 SS400

$$\begin{aligned}\text{せん断耐力} \quad V_{yd} &= f_{svyd} \cdot A_w \times 2 \text{本} \\ &= 135 \text{ N/mm}^2 \times 1998 \text{ mm}^2 \times 2 \text{本} \\ &= 539460 \text{ N} \\ &= 539.46 \text{ kN}\end{aligned}$$

$$\text{応答値} \quad V_d = 4.01 \text{ kN}$$

$$\text{照査結果} \quad V_d/V_{yd} = 0.007 \quad \text{OK}$$

(d) 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。

$$(N_d/N_{ud} + M_d/M_{ud})^2 + (V_d/V_{yd})^2 \leq 1.0$$

$$(N_d/N_{ud} + M_d/M_{ud})^2 + (V_d/V_{yd})^2 = 0.221^2 + 0.007^2 = 0.049 \quad \text{OK}$$

3) 支持力の照査【基礎標準15.3.2.2】

(a) 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。

$$\begin{aligned} q_{tk} &= 70N \leq 20000 && (L/D \leq 5 \text{の範囲}) \\ &= 70 \times 15.0 = 1050 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{aligned} q_{tk} &: \text{基準先端支持力度 (kN/m}^2\text{)} \\ N &: \text{杭先端のN値 (N値= 15)} \end{aligned}$$

(b) 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。

$$\begin{aligned} \gamma_{fk} &= 6N \leq 120 \\ &= 6 \times 15.0 = 90 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{aligned} \gamma_{fk} &: \text{基準周面支持力度 (kN/m}^2\text{)} \\ N &: \text{杭先端のN値 (N値= 15)} \end{aligned}$$

(c) 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。

$$\begin{aligned} R_k &= R_{tk} + \sum R_{fk} \\ &= 9.6 + 306 = 315.6 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{tk} &= q_{tk} \times A_t \\ &= 1050 \times 0.009143 = 9.6 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{fk} &= \gamma_{fk} \times U \times \Delta l \\ &= 90 \times 1 \times 3.40 = 306 \text{ kN} \end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{aligned} R_k &: \text{押し込み側の基準支持力(kN)} \\ R_{tk} &: \text{基準先端支持力(kN)} \\ R_{fk} &: \text{各層での基準周面支持力(kN)} \\ q_{tk} &: \text{基準先端支持力度 (kN/m}^2\text{)} \\ A_t &: \text{杭先端の面積(m}^2\text{)} \quad (\text{H鋼の断面積} \quad A_t = 0.009143 \text{ m}^2) \\ \gamma_{fk} &: \text{各層での基準周面支持力度 (kN/m}^2\text{)} \\ U &: \text{杭の周長(m)} \quad (= 0.25 \times 4 = 1 \text{ m}) \\ \Delta l &: \text{基準周面支持力を算定する区間の長さ(m)} \quad (= 3.40 \text{ m}) \end{aligned}$$

(d) 支持力に対する照査

支持力に対する照査は下式にて行った.

$$R_d/R_{vd} \leq 1.0 \quad \text{押し込み側}$$
$$R_d/R_{vd} = 439.62 \text{ kN} / 820.56 \text{ kN} = 0.536 \quad \text{OK}$$

ここに,

$$R_{vd} = f_r \times R_k \quad \text{押し込み側}$$
$$= 1.3 \times 315.6 \times 2 \text{ (片側杭本数)} = 820.56 \text{ kN}$$

f_r : 地盤抵抗係数【基礎標準 解説図 15.3.2.2-1】 (≈ 1.3)

p_t : 基準先端支持力比 ($= R_{tk} / R_k = 9.6 \text{ kN} / 315.6 \text{ kN} = 0.03$)

R_{vd} : 設計鉛直支持力(kN)

R_k : 押し込み側の基準支持力(kN)

R_{tk} : 基準先端支持力(kN)

(e) 変位量に対する照査

岩塊衝突時の反力壁の変位量は微小な変位に抑えることとし, 変位量の制限値は10mmとする.

$$\text{変位量の制限値} \quad \delta a = 10 \text{ mm}$$

$$\text{岩塊衝突時の変位量} \quad \delta = 7.54 \text{ mm} \leq 10 \text{ mm} \quad \text{OK}$$

(8) 反力壁図面

図 3.2.5, 図 3.2.6 に反力壁の図面を示す.

反力壁一般図 1/50

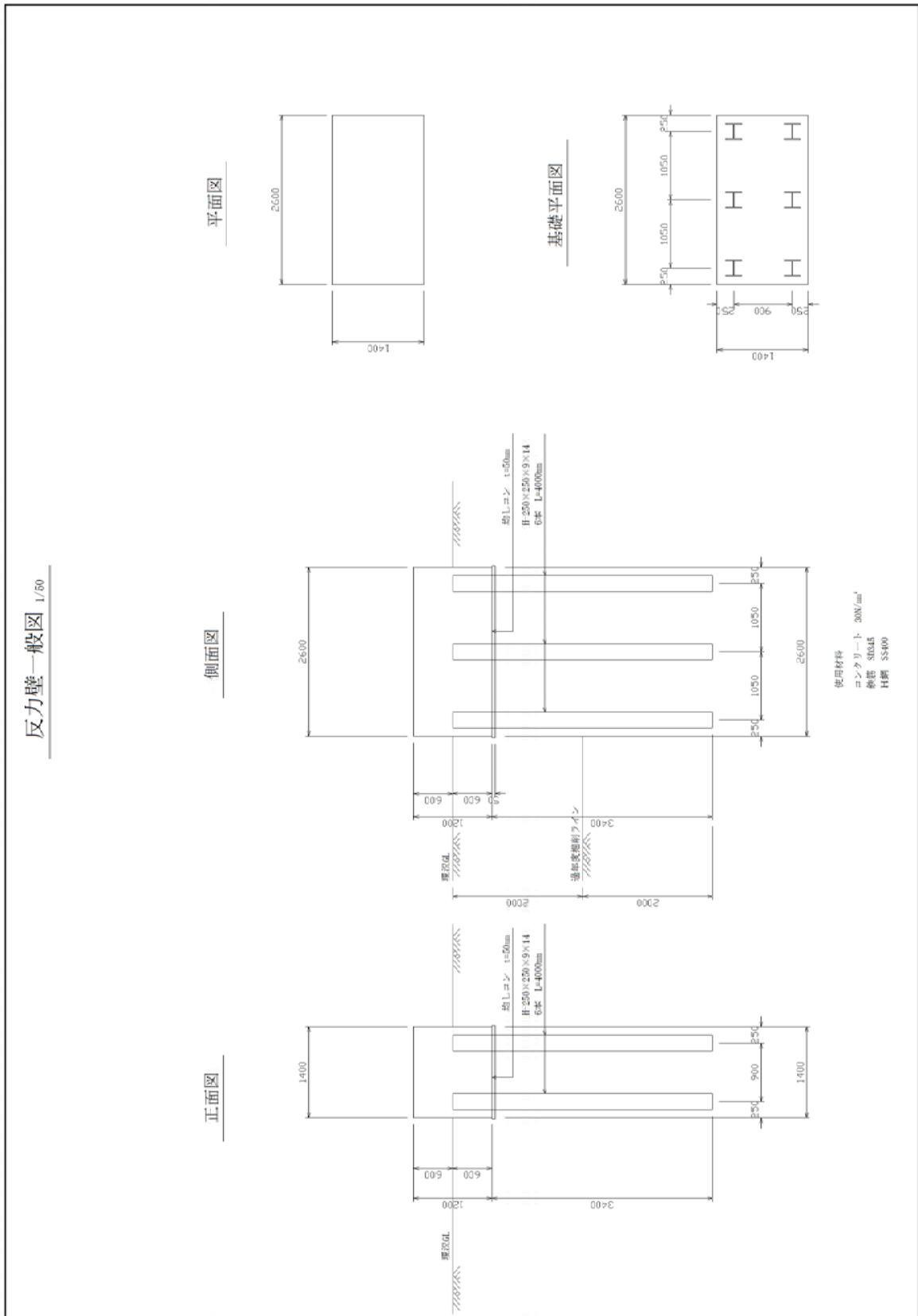
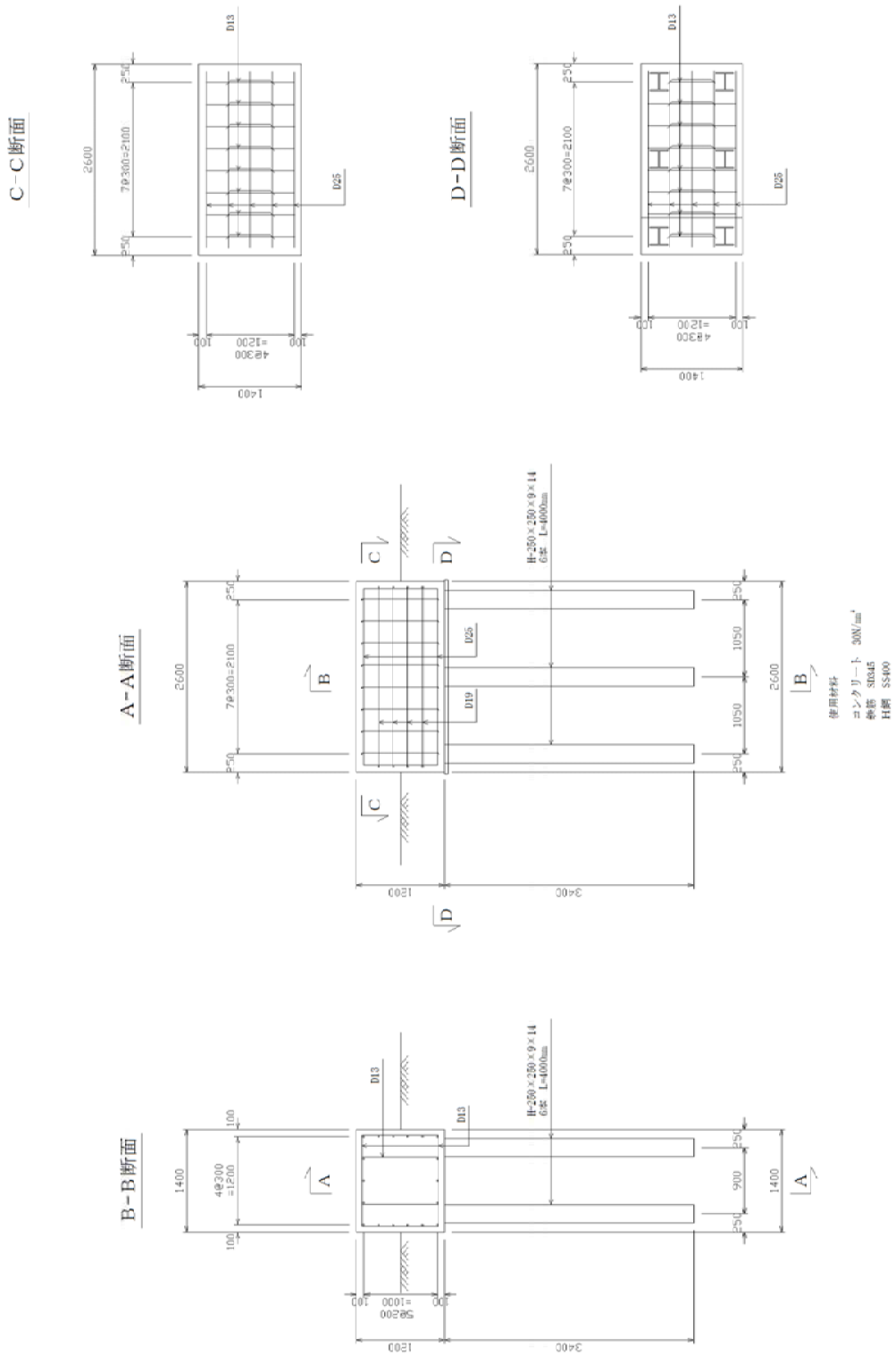


図 3.2.5 反力壁一般図

反力壁配筋図 1/50



(2) 反力壁の製作

反力壁は現状路盤から2.19m掘下げた位置に $B \times W \times H = 1.4\text{m} \times 2.6\text{m} \times 1.2\text{m}$ の反力壁を鉄筋コンクリート造にて構築した。使用したコンクリートは設計基準強度 30N/mm^2 を用いた。

反力壁の基礎は杭基礎とし、杭袋には $H-200 \times 200 \times 8 \times 12$ を用い杭長5mのH鋼杭を6本圧入した。なお反力壁の周辺は親杭横矢板工法により山留を行った。

反力壁天端中央には荷重計を剛に反力壁へ取り付けるため、厚さ100mm材質SS400の鋼板を取り付けた。図3.2.7～図3.2.9に反力壁および山留の設計図面を、図3.2.10に完成写真を示す。

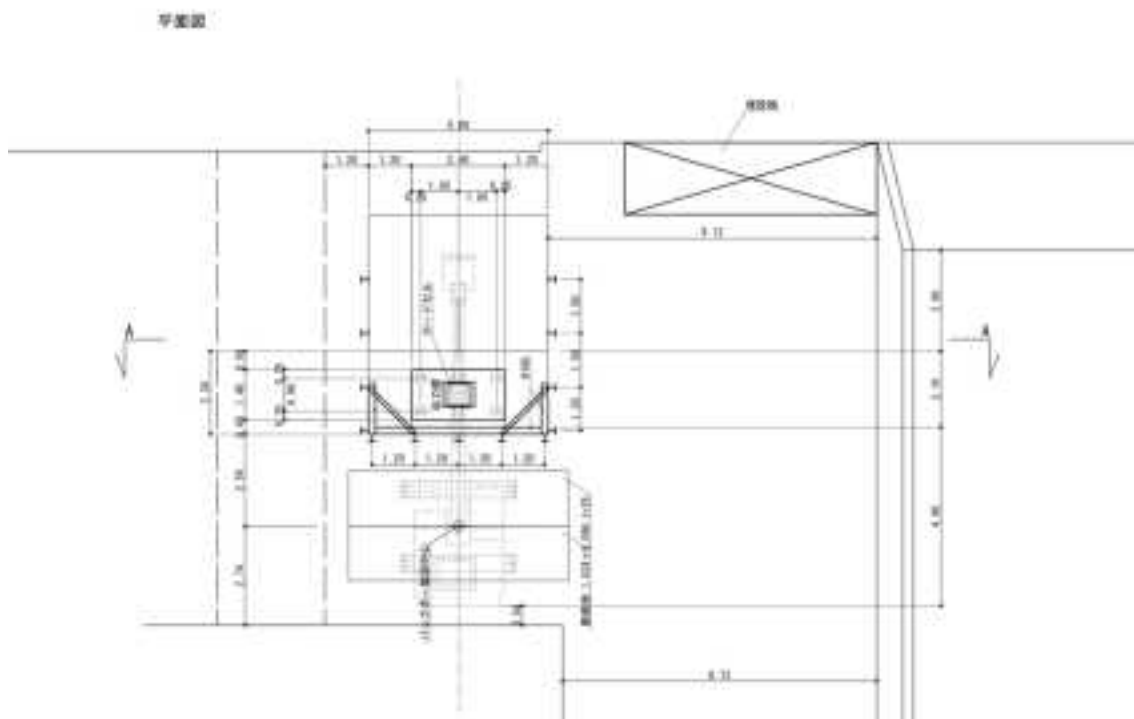


図 3.2.7 平面図

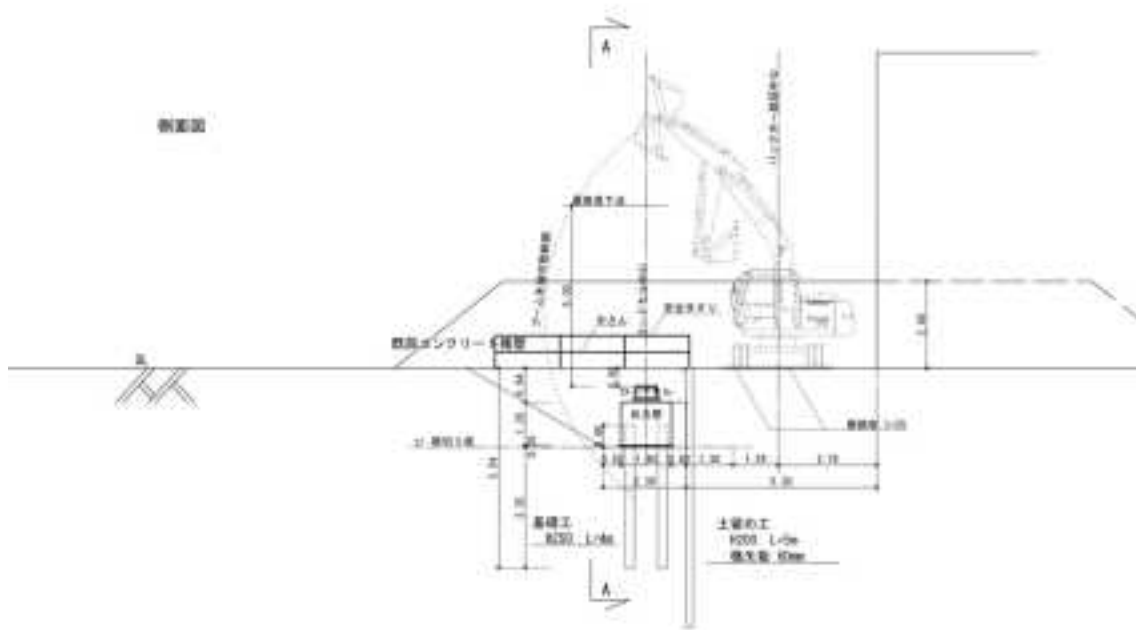


図 3.2.8 側面図

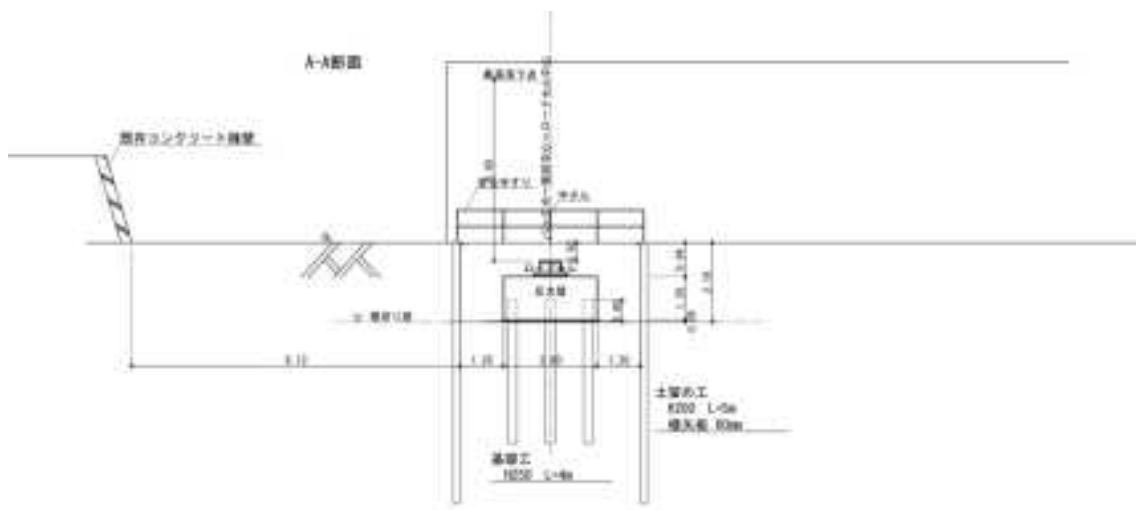


図 3.2.9 断面図



图 3.2.10 完成写真

表 3.2.5、表 3.2.6 に、反力壁に用いたコンクリートの強度試験成績書を示す。

表 3.2.5 コンクリート強度試験成績書

目標強度	呼び強度 30 N/mm ²
材齢(日)	24
養生条件	現場封緘
打設日	2015/10/13
試験日	2015/11/6

表 3.2.6 コンクリート供試体の詳細

No.	直径 (mm)	高さ (mm)	断面積 (mm ²)	質量 (g)	密度 (t/m ³)	最大荷 重 (KN)	圧縮強度 (N/mm ²)	高さ/直 径比	強度補正 係数
1	100.00	203.75	7854	3741	2.34	260	33.1	2.04	1.000
2	100.00	202.25	7854	3713	2.34	303	38.6	2.02	1.000
3	100.00	204.00	7854	3729	2.33	288	36.7	2.04	1.000
全 平 均	100.00	203.33	7854	3728	2.33	284	36.1	—	—

以下に完成図面を示す。

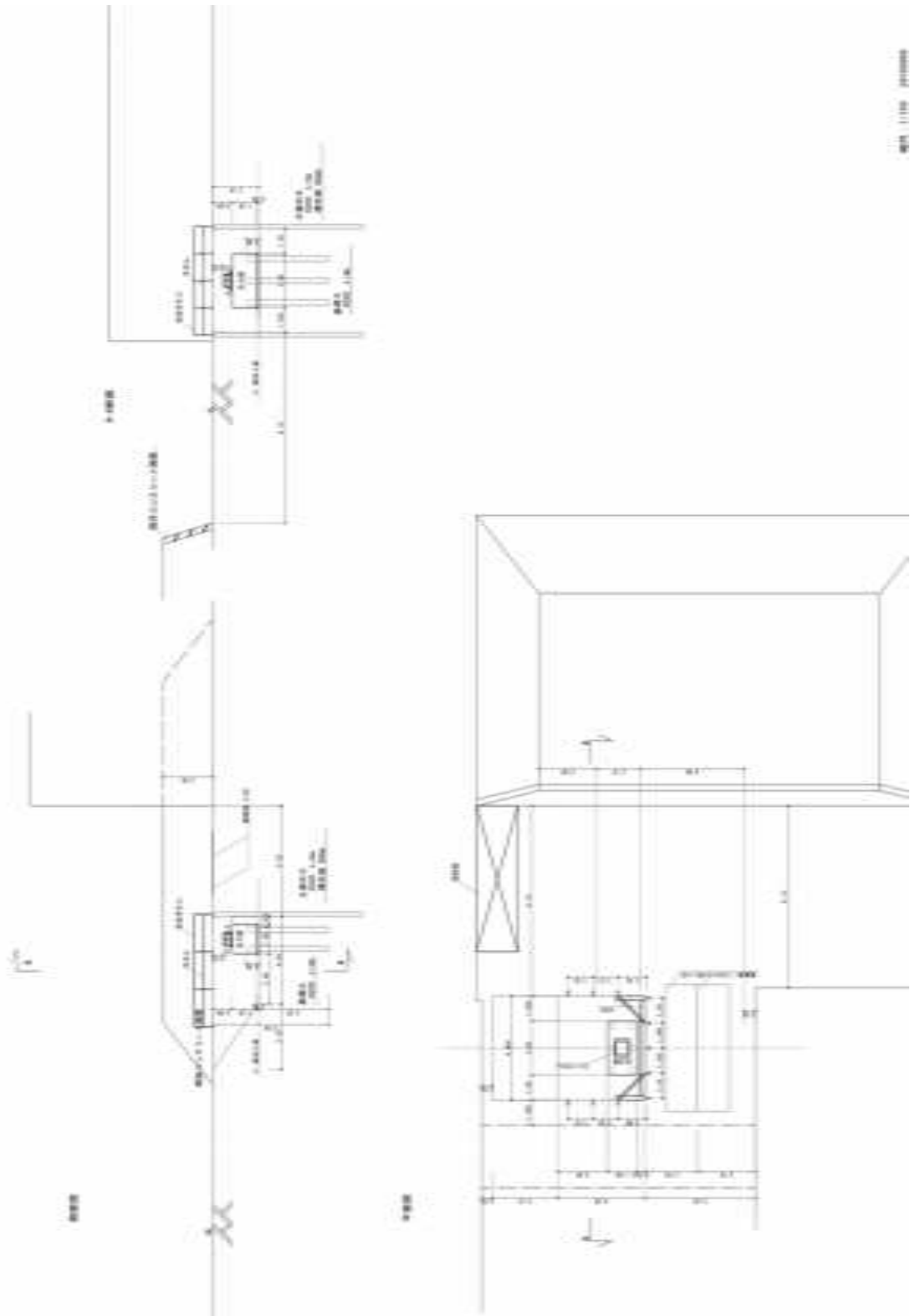


図 3.2.11 完成図面

3.2.2 岩塊衝突試験用の重錘の製作

(1) 多面体模型型枠の作製

岩塊模型の作製にあたり 20cm および 40cm の型枠を新規に作成した。図 3.2.12～図 3.2.13 に、20cm、40cm 用型枠を示す。



図 3.2.12 多面体 20cm 用型枠



図 3.2.13 多面体 40cm 用型枠

(2) 球状・多面体模型の作製

多面体模型の作製に当たっては表 3.2.7 に示す材料と配合とした。なお、配合重量はチチブベースタイトグラウト N 1 袋 25kg に対する重量である。

作成した多面体岩塊模型の一覧を表 3.2.8 に、球状岩塊模型の一覧を表 3.2.9 に示す。

表 3.2.7 材料配合表

	主剤	繊維	練混水
材料	チチブベースタイトグラウト N	クレハ RF400×30	水道水
配合	25kg	69.7g	4.5L

表 3.2.8 多面体岩塊模型一覧

20cm 多面体岩塊模型			40cm 多面体岩塊模型		
No	重量(kg)	備考	No	重量(kg)	備考
1	8.14		1	32.000	
2	8.34		2	32.300	
3	8.08		3	32.280	
4	8.24		4	32.180	
5	8.24		5	32.280	
6	8.28		6	32.280	
7	8.28		7	32.300	
8	8.26		8	32.180	
9	8.26		9	32.180	
10	8.32		10	31.980	
11	8.24		11	32.400	
12	8.24		12	31.980	
13	8.12		13	32.400	

表 3.2.9 球状岩塊模型一覧

20cm 球状岩塊模型			40cm 球状岩塊模型		
No	重量(kg)	備考	No	重量(kg)	備考
1	9.040		1	71.820	
2	9.020		2	71.900	
3	9.040		3	71.920	
4	9.020		4	71.780	
5	9.060		5	71.420	

図 3.2.14～図 3.2.22 に使用した材料と作業状況を示す。



図 3.2.14 チチブペースタイトグラウト N



図 3.2.15 クレハ RF400×30



図 3.2.16 練混状況



图 3.2.17 40cm 球状模型打設狀況



图 3.2.18 20cm 球状模型打設狀況



図 3.2.19 多面体 40cm 打設状況



図 3.2.20 多面体 20cm 打設状況



图 3.2.21 球状·多面体模型完成状况



图 3.2.22 多面体 40cm 模型完成状况

(3) 実岩塊模型の採取

実岩塊模型については甲州砕石（株）初狩営業所より 20cm および 40cm に相当する大きさの岩塊を採取した。岩塊衝突実験においては、採取した岩塊のうち形状区分が塊状に該当する模型のみ実験に用いた。採取した実岩塊模型の形状区分を図 3.2.12 および図 3.2.13 に、詳細な寸法、重量を表 3.2.10 および表 3.2.11 に示す。また、図 3.2.25～図 3.2.28 に採取状況を示す。

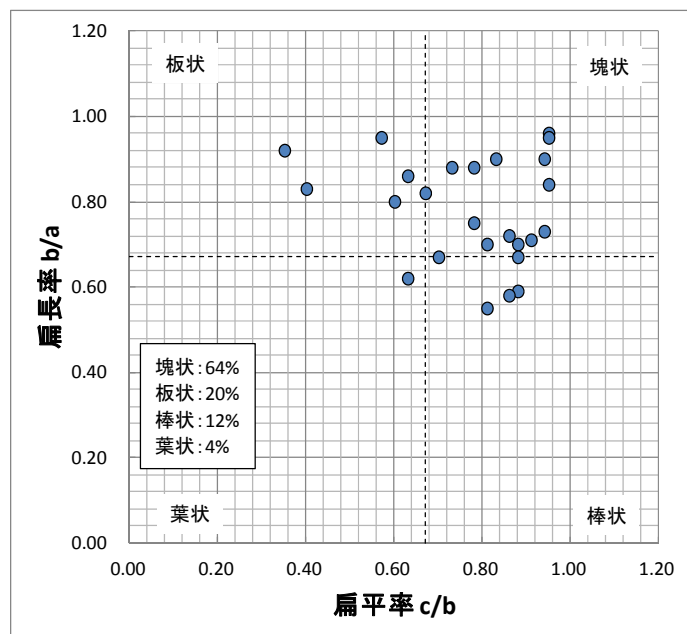


図 3.2.23 実岩塊模型の形状区分 (20cm)

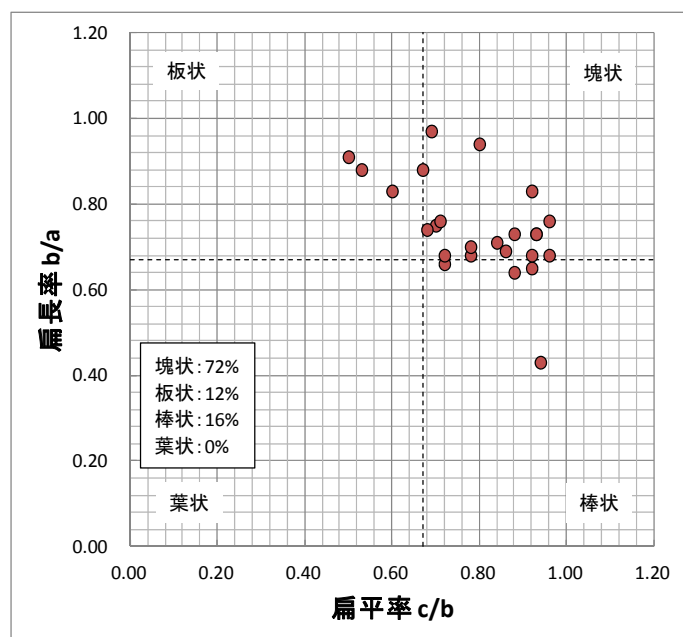


図 3.2.24 実岩塊模型の形状区分 (40cm)

表 3.2.10 実岩塊模型の形状寸法、重量

サイズ	No.	長辺長 a (cm)	中間長 b (cm)	短辺長 c (cm)	扁長率 b/a	扁平率 c/b	形状
20cm	1	29	17	15	0.59	0.88	棒状
	2	29	21	18	0.72	0.86	塊状
	3	26	23	18	0.88	0.78	塊状
	4	24	18	14	0.75	0.78	塊状
	5	31	22	20	0.71	0.91	塊状
	6	23	16	14	0.70	0.88	塊状
	7	28	24	15	0.86	0.63	板状
	8	22	21	12	0.95	0.57	板状
	9	20	18	15	0.90	0.83	塊状
	10	25	20	12	0.80	0.60	板状
	11	22	16	15	0.73	0.94	塊状
	12	23	22	21	0.96	0.95	塊状
	13	25	21	20	0.84	0.95	塊状
	14	24	14	12	0.58	0.86	棒状
	15	23	16	13	0.70	0.81	塊状
	16	24	20	8	0.83	0.40	板状
	17	22	18	12	0.82	0.67	塊状
	18	30	20	14	0.67	0.70	塊状
	19	24	16	14	0.67	0.88	塊状
	20	25	22	16	0.88	0.73	塊状
	21	25	23	8	0.92	0.35	板状
	22	20	19	18	0.95	0.95	塊状
	23	20	18	17	0.90	0.94	塊状
	24	26	16	10	0.62	0.63	葉状
	25	29	16	13	0.55	0.81	棒状
						塊状 =	16/25
40cm	1	37	28	27	0.76	0.96	塊状
	2	34	23	18	0.68	0.78	塊状
	3	39	25	22	0.64	0.88	棒状
	4	35	25	21	0.71	0.84	塊状
	5	46	32	25	0.70	0.78	塊状
	6	36	27	19	0.75	0.70	塊状
	7	41	30	28	0.73	0.93	塊状
	8	35	32	16	0.91	0.50	板状
	9	32	22	19	0.69	0.86	塊状
	10	43	38	20	0.88	0.53	板状
	11	40	29	27	0.73	0.93	塊状
	12	40	26	24	0.65	0.92	棒状
	13	29	24	22	0.83	0.92	塊状
	14	33	32	22	0.97	0.69	塊状
	15	32	30	24	0.94	0.80	塊状
	16	34	23	22	0.68	0.96	塊状
	17	34	30	20	0.88	0.67	塊状
	18	38	25	18	0.66	0.72	棒状
	19	42	35	21	0.83	0.60	板状
	20	34	25	17	0.74	0.68	塊状
	21	37	28	20	0.76	0.71	塊状
	22	42	18	17	0.43	0.94	棒状
	23	37	25	18	0.68	0.72	塊状
	24	45	33	29	0.73	0.88	塊状
	25	38	26	24	0.68	0.92	塊状
						塊状 =	18/25

表 3.2.11 実岩塊一覽表

20cm 実岩塊			40cm 実岩塊		
No	重量(kg)	備考	No	重量(kg)	備考
1	13.840		1	66.380	
2	19.460		2	22.300	
3	19.600		3	44.160	
4	12.280		4	34.160	
5	20.260		5	63.080	
6	8.000		6	43.280	
7	12.960		7	46.540	
8	10.300		8	25.420	
9	7.900		9	27.260	
10	7.620		10	46.420	
11	11.520		11	70.360	
12	17.480		12	59.180	
13	17.920		13	28.860	
14	10.380		14	64.120	
15	14.340		15	38.180	
16	13.600		16	26.600	
17	9.440		17	30.920	
18	12.140		18	38.240	
19	13.160		19	45.800	
20	16.300		20	28.820	
21	12.420		21	50.760	
22	8.760		22	36.120	
23	11.000		23	30.500	
24	11.680		24	52.540	
25	21.320		25	42.460	



图 3.2.25 実岩塊採取状況



图 3.2.26 実岩塊採取状況



図 3.2.27 実岩塊 20cm



図 3.2.28 実岩塊 40cm

(4) 土砂模型の作成

土砂模型は表 3.2.12 に示す形状のものをトンパックもしくは土のう袋に粒度調整砕石 M40 を詰めて作成した。図 3.2.29～図 3.2.33 に作成した土砂模型の状況を示す。

表 3.2.12 土砂模型一覧

土砂模型		
No	重量(kg)	備考
1	160	トンパック (土のう詰め)
2	40	土のう 2 段
3	80	土のう 4 段
4	120	土のう 6 段
5	100	トンパック 100kg



図 3.2.29 土のう 2 段



図 3.2.30 土のう 4 段



図 3.2.31 土のう 6 段



図 3.2.32 トンパック



図 3.2.33 トンパック(土のう詰め)

3.2.3 岩塊衝突試験用の計測機器の設置

(1) 荷重計の性能確認試験

貸与した 3 分力荷重計の室内性能確認試験を実施した。表 3.2.13 に 3 分力荷重計の仕様を示す。図 3.2.34～図 3.2.40 に作業写真を示す。

表 3.2.13 3 分力荷重計の仕様

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	

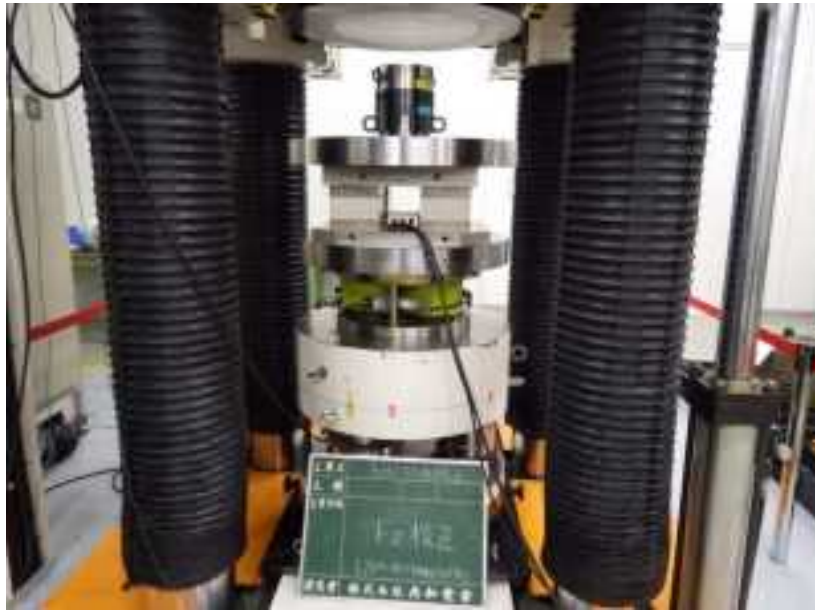


图 3.2.34 鉛直 Z 方向鋼製作業狀況



图 3.2.35 水平 X 方向 (正) 校正作業狀況



图 3.2.36 水平 X 方向 (負) 校正作業狀況



图 3.2.37 水平 Y 方向 (正) 校正作業狀況



図 3.2.38 水平 Y 方向（負）校正作業状況



図 3.2.39 偏心荷重校正作業状況その 1



図 3.2.40 偏心荷重校正作業状況その2

(2) 荷重計の校正試験

荷重計を反力壁に設置した状態で球状岩塊模型20cmおよび40cmを落下させ得られた荷重と、落下させた球状岩塊模型の重量から得ることのできる衝突荷重の理論値を比較することにより荷重計の校正試験を行った。なお、落下高さは1.0mとした。

荷重計受圧板はベニヤ板とし、受圧面を9等分し落下位置を変化させることにより偏心荷重に関する校正試験も同時に行った。図 3.2.41 に落下位置図を示す。なお、落下回数はそれぞれの位置で2回とした。

荷重の計測には共和電業製ユニバーサルレコーダーEDX-100A に 4ch 動ひずみ測定器カード DPM-42F を接続して用いた。またノイズ対策として荷重計を据付けた鋼板にアースを接続した。

データ収録時サンプリング周波数は 50kHz、測定時間は 2 秒とし、1 チャンネル当たり 10 万点のデータを収録した。なお、計測時のデータに対してフィルタリング等の処理は行っていない。

表 3.2.14 および表 3.2.15 に荷重計校正試験結果を示す。また図 3.2.42 および図 3.2.43 に偏心荷重に関する結果を示す。落下位置に拘らず概ね同等の荷重を計測できることを確認した。

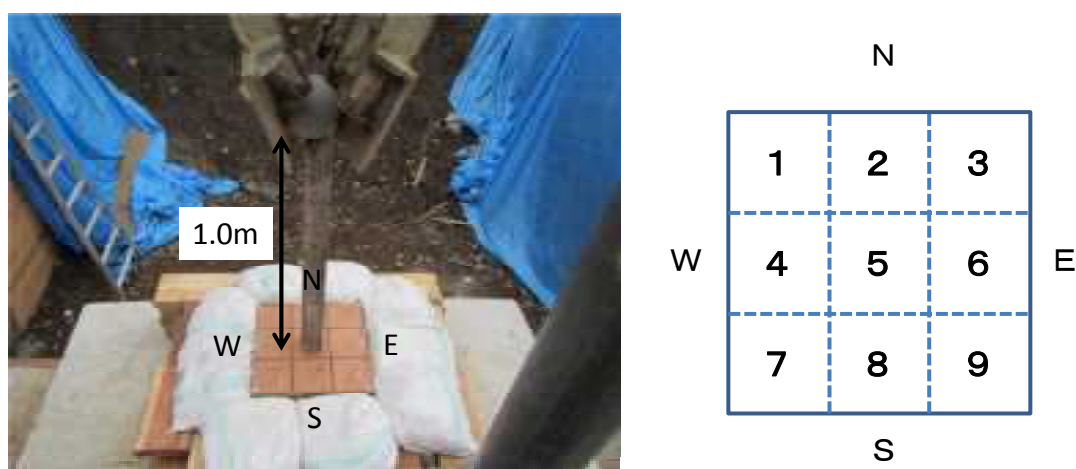


図 3.2.41 受圧面落下位置番号図

表 3.2.14 球状 20cm 荷重計校正試験結果一覧

落下位置	試験体番号	試験体重量 (kg)	落下高さ (m)	衝突荷重 (kN)	理論速度 (m/s)	推定荷重継続時間 (s)	理論衝突荷重 (kN)
1	1	9.040	1.001	45.127	4.43	0.001	40.06
1			1.015	43.360	4.46	0.001	40.33
2			0.966	51.586	4.35	0.001	39.35
2			1.007	56.740	4.44	0.001	40.18
3			1.006	46.157	4.44	0.001	40.16
3			0.996	49.212	4.42	0.001	39.96
4			1.016	45.035	4.46	0.001	40.35
4			0.988	54.973	4.40	0.001	39.79
5			1.039	47.482	4.51	0.001	40.81
5			1.009	48.255	4.45	0.001	40.22
6			1.009	54.752	4.45	0.001	40.22
6			1.013	73.045	4.46	0.001	40.29
7			1.025	44.979	4.48	0.001	40.53
7			1.007	50.740	4.44	0.001	40.18
8			1.006	45.808	4.44	0.001	40.16
8			1.003	48.863	4.44	0.001	40.10
9			1.001	46.139	4.43	0.001	40.06
9			1.009	45.789	4.45	0.001	40.22

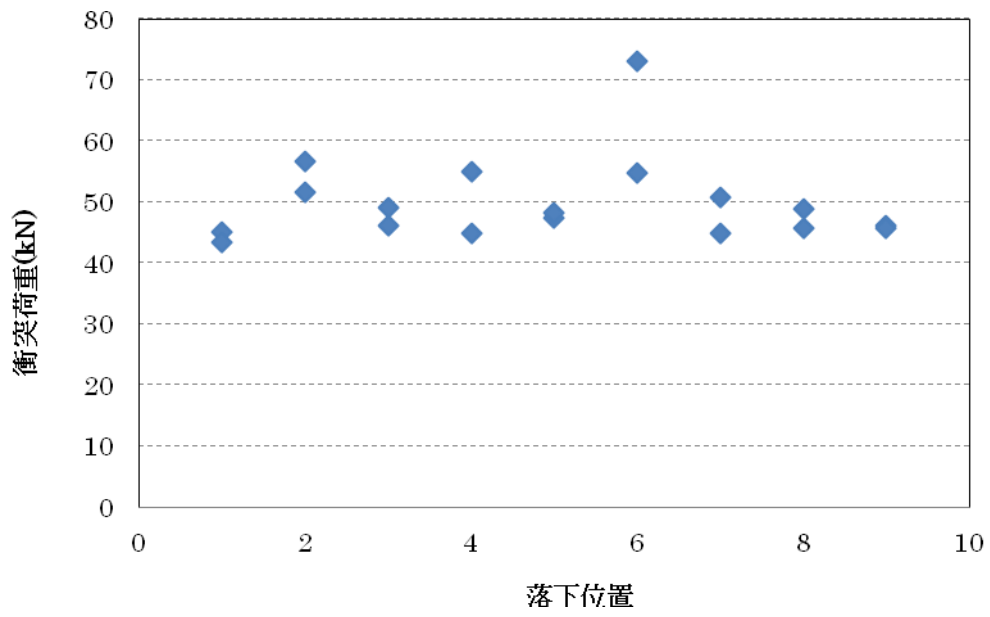


图 3.2.42 球状 20cm 偏心荷重結果

表 3.2.15 球状 40cm 荷重計校正試験結果一覧

落下位置	試験体番号	試験体重量 (kg)	落下高さ (m)	衝突荷重 (kN)	理論速度 (m/s)	推定荷重継続時間 (s)	理論衝突荷重 (kN)
1	1	71.820	0.993	194.125	4.41	0.001	316.95
1			0.997	189.837	4.42	0.001	317.59
2			0.988	215.382	4.40	0.001	316.15
2			1.000	344.983	4.43	0.001	318.07
3			1.007	175.869	4.44	0.001	319.18
3			0.997	163.740	4.42	0.001	317.59
4			0.993	193.205	4.41	0.001	316.95
4			0.988	211.572	4.40	0.001	316.15
5			0.999	211.572	4.43	0.001	317.91
5			1.005	191.162	4.44	0.001	318.86
6			1.005	206.695	4.44	0.001	318.86
6			1.006	195.046	4.44	0.001	319.02
7			1.010	190.058	4.45	0.001	319.65
7			0.996	173.145	4.42	0.001	317.43
8			1.009	186.341	4.45	0.001	319.50
8			1.005	201.542	4.44	0.001	318.86
9			1.009	190.997	4.45	0.001	319.50
9			1.000	215.916	4.43	0.001	318.07

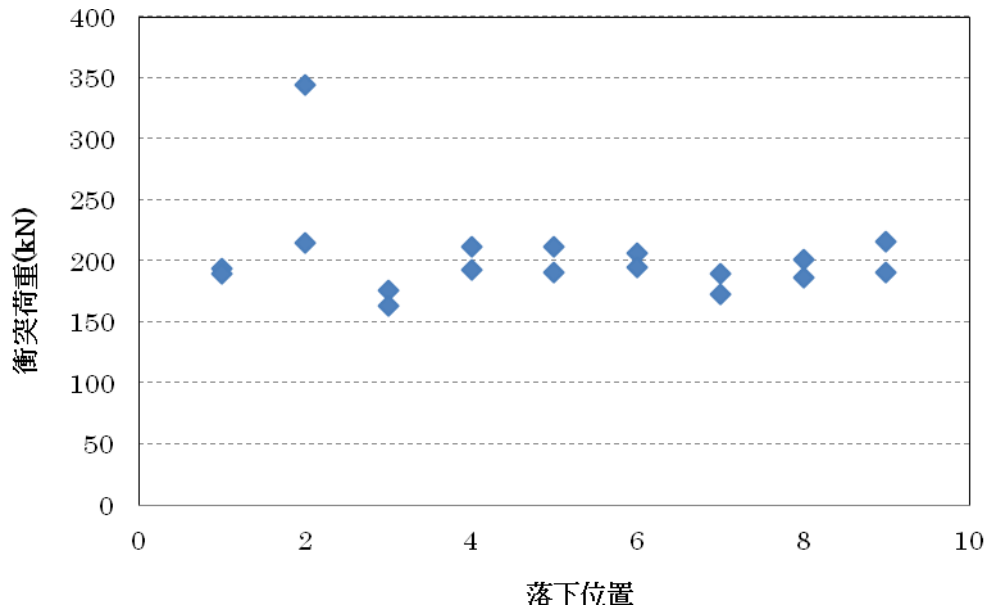


图 3.2.43 球状 40cm 偏心荷重結果

3.2.4 重錘を用いた衝突試験

(1) 概要

a) 落下方法

本実験は自由落下試験であるため任意の高さより岩塊・土砂模型を落下させるために、回転式グラブプラーを取り付けた0.45m³バックホーを用いた。図 3.2.44 に試験状況を示す。



図 3.2.44 試験状況

b) 計測項目

計測項目は3方向荷重計によって得られる3方向の荷重時刻歴であり、落下速度については理論式により算出した。一部試番にて高速度カメラによる撮影を行い、得られた画像から岩塊および土砂の衝突直前直後の速度を求め、以下の理論式により算出した速度 V との比較を行った。

$$V = \sqrt{2gh} \quad \text{式(3.2.1)}$$

荷重の計測には共和電業製ユニバーサルレコーダーEDX-100A に 4ch 動ひずみ測定器カード DPM-42F を接続して用いた。またノイズ対策として荷重計を据付けた鋼板にアースを接続した。

データ収録時サンプリング周波数は 50kHz、測定時間は 2 秒とし、1 チャンネル当たり 10 万点のデータを収録した。なお計測時のデータに対してフィルタリング等の処理は行っていない。

高速度カメラによる撮影は受圧板をコンクリート板とした CaseB のみ行った。また撮影には高速度カメラシステムを用いた。撮影条件を表 3.2.16 に示す。

表 3.2.16 撮影条件

模型種類		岩塊	土砂
使用カメラ		M3	M3
カメラの設定	ゲイン	2.82	2.82
	撮影レート(Hz)	500	500
	露光時間 (μs)	500	500
	撮影フレーム数	1000	1000
	撮影時間	2 秒	2 秒
レンズ		Ai Nikkor 50mm f/1.2S	AI Nikkor 35mm f/1.4S

カメラは三脚に固定し山留壁近傍の荷重計を正面から撮影できる位置に設置した。設置状況を図 3.2.45 高速度カメラ設置状況に示す。



図 3.2.45 高速度カメラ設置状況

撮影時には荷重計受圧板に白色固定点を設け、各種模型落下時の衝撃力によりカメラが振動してしまった場合に補正が出来るようにした。また岩塊・土砂模型それぞれに画像解析用の白色標点を設けた。図 3.2.46～図 3.2.48 に標点の状況を示す。



図 3.2.46 岩塊模型標点



図 3.2.47 土砂模型標点



図 3.2.48 固定点および距離補正用スケール設置状況

画像解析を行う際に必要な距離のキャリブレーション用に図 3.2.48 に示すように荷重計受圧板中央部にスケールを設置した状態で、高速度カメラ撮影を行った日ごとに撮影した。

c) 試験条件

実験条件は落下させる岩塊・土砂模型の形状・重量のほかロードセル受圧面の条件をベニヤ板 CaseA とコンクリート板 CaseB の 2 種類とし、落下高さについては 1 ～ 5 m の範囲で変化させた。使用したベニヤ板とコンクリート板の仕様を表 3.2.17 に示す。

表 3.2.17 受圧板の仕様

受圧板種別	ベニヤ板	コンクリート板
材料	ラワン	鉄筋コンクリート
材料強度	—	Fc27
板厚(mm)	21	60
平面形状(mm)	500×500	450×600

落下高さの管理にはレーザー距離計 (Laica 製 DISTO D5) を 2 台使い、その平均高さとした。

図 3.2.49～図 3.2.50 に設置状況を示す。



図 3.2.49 レーザー距離計設置状況



図 3.2.50 レーザー距離計設置状況

(2) 試験状況写真

以下に試験状況写真を示す。



図 3.2.51 落下高さ計測状況



図 3.2.52 落下荷重計測状況



図 3.2.53 ベニヤ板 球状岩塊模型 20cm 試験状況



図 3.2.54 ベニヤ板 球状岩塊模型 40cm 試験状況



図 3.2.55 ベニヤ板 実岩塊模型 20cm 試験状況



図 3.2.56 ベニヤ板 実岩塊模型 40cm 試験状況



図 3.2.57 ベニヤ板 多面体岩塊模型 20cm 試験状況



図 3.2.58 ベニヤ板 多面体岩塊模型 40cm 試験状況



図 3.2.59 ベニヤ板 土砂模型（土のう 2 段） 試験状況



図 3.2.60 ベニヤ板 土砂模型（土のう 4 段） 試験状況



図 3.2.61 ベニヤ板 土砂模型（土のう 6 段） 試験状況



図 3.2.62 ベニヤ板 土砂模型（トンパック） 試験状況



図 3.2.63 ベニヤ板 土砂模型（トンパック土のう詰め） 試験状況



図 3.2.64 コンクリート板 球状岩塊模型 20cm 試験状況



図 3.2.65 コンクリート板 球状岩塊模型 40cm 試験状況



図 3.2.66 コンクリート板 実岩塊模型 20cm 試験状況



図 3.2.67 コンクリート板 実岩塊模型 40cm 試験状況



図 3.2.68 コンクリート板 多面体岩塊模型 20cm 試験状況



図 3.2.69 コンクリート板 多面体岩塊模型 40cm 試験状況



図 3.2.70 コンクリート板 土砂模型（土のう 2 段） 試験状況



図 3.2.71 コンクリート板 土砂模型（土のう 4 段） 試験状況



図 3.2.72 コンクリート板 土砂模型（土のう 6 段） 試験状況



図 3.2.73 コンクリート板 土砂模型（トンパック） 試験状況



図 3.2.74 コンクリート板 土砂模型（トンパック土のう詰め） 試験状況