

柏崎刈羽原子力発電所第6号機 設計及び工事計画認可申請に係る説明について (大物搬入建屋 杭の損傷要因について)

2022年3月31日
東京電力ホールディングス株式会社

■ 指摘事項 (No.1)

杭の損傷状況についてのデータ整理を行い、考察の充実を図ること。

■ 回答

第6号機大物搬入建屋の杭上部及び下部の損傷状況調査結果（外観目視、打音検査、内部鉄筋調査、及び非破壊試験）を示し、No.8杭の杭頭部鉄筋破断及びNo.6・8杭の杭中間部水平ひび割れ等に関する考察を行った。（本資料の1章部分）

■ 指摘事項 (No.2)

杭の損傷原因の特定にあたっての要因の絞り込みに係る考え方、プロセスを説明すること。その説明にあたっては、杭の特異な損傷状態を念頭に設計データ、施工データ等を網羅的に確認できるようにすること。

■ 回答

2.1節に示す損傷要因評価フローに基づき、調査結果、設計データ及び施工データ等に基づく多面的な分析及び絞り込みを行い、No.6・8杭に生じた特異な損傷の主な要因は、地震及び杭周辺地盤状況の複合による損傷と推定した。（本資料の2章部分）

■ 指摘事項 (No.3)

要因の絞り込みのプロセスに関して、東京電力が要因を特定する際に実施した解析的検証等の方針、方法、条件、結果についても妥当性を説明すること。その説明にあたっては、杭の損傷状況と解析的検証との関係についても考察すること。

■ 回答 (本資料の3章及び4章部分)

①No.8杭頭部は、セメント改良土により変形が拘束されたことに着目し、3次元FEM静的応力解析を行い、セメント改良土による杭頭せん断力分担率への影響を確認した。その結果、セメント改良土を模擬したケースにおいてセメント改良土がないケースに比べ杭頭せん断力が3倍程度大きくなり、セメント改良土の影響でNo.8杭に応力集中する傾向を確認した。

以上より、No.8杭がセメント改良土に拘束されていたことが損傷要因と考えられる。

②No.6・8杭の杭中間部の曲げによるひび割れについては今後、回答する。

1. 杭の健全性調査結果

- 1.1 第6号機大物搬入建屋の概要
- 1.2 杭の健全性調査結果の概要
- 1.3 杭上部の調査結果
- 1.4 杭下部の調査結果
- 1.5 杭の損傷状況まとめ

2. 杭の損傷要因の絞り込み

- 2.1 損傷要因評価フロー
- 2.2 損傷要因の抽出
- 2.3 損傷要因の絞り込み
- 2.4 損傷要因のまとめ

3. 杭の損傷要因の検証

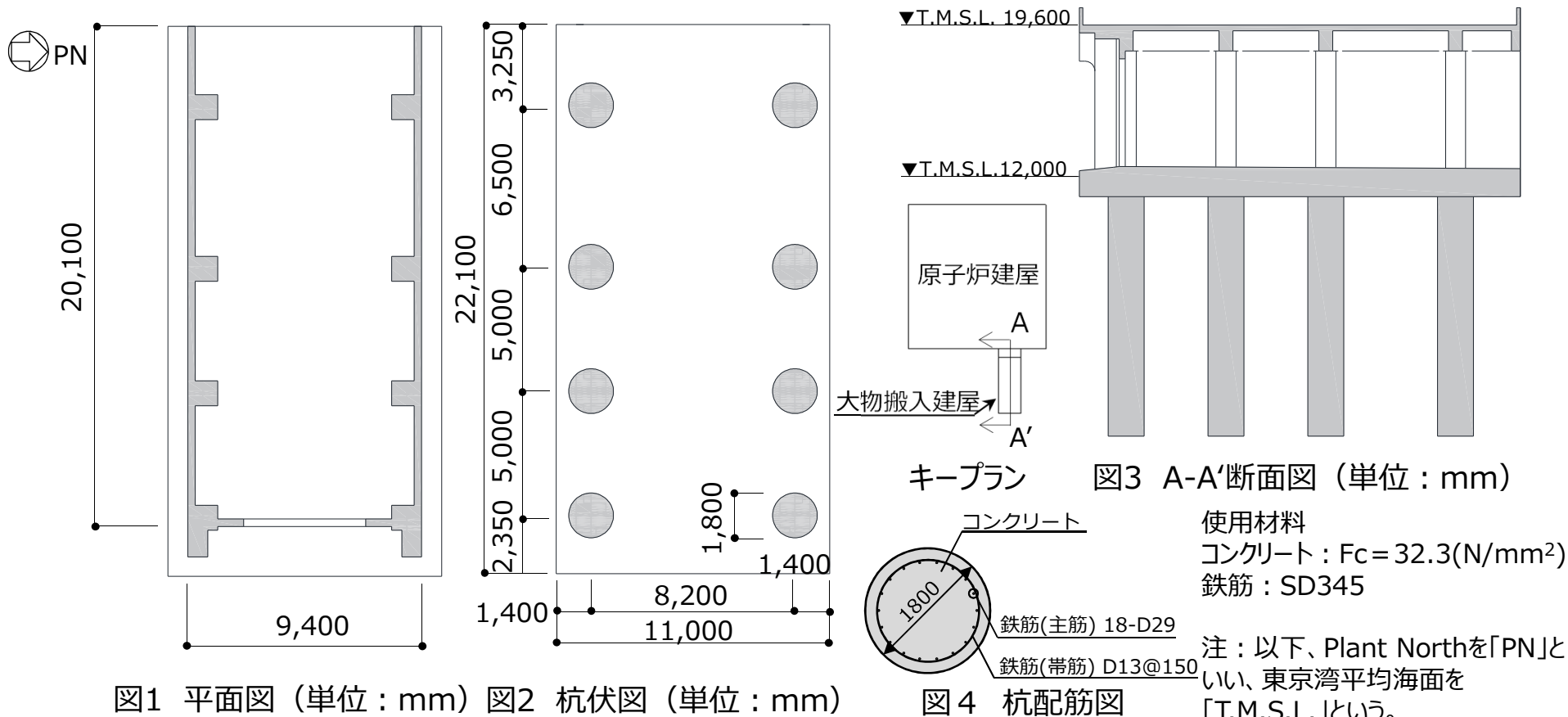
- 3.1 セメント改良土に着目した解析
- 3.2 No.8杭のせん断に着目した解析
- 3.3 No.8杭のせん断に着目した解析のまとめ
- 3.4 No.6・8杭の曲げに着目した解析
- 3.5 No.6・8杭の曲げに着目した解析のまとめ

4. 杭の損傷要因の特定

- 4.1 まとめ

1.1 第6号機大物搬入建屋の概要

- 柏崎刈羽原子力発電所第6号機大物搬入建屋（以下、「K6大物搬入建屋」という。）は、第6号機原子炉建屋の北東側に隣接する鉄筋コンクリート造1階建であり、基礎平面は11.0m（南北方向）×22.1m（東西方向）、地上高さは7.6mである。
- 平面図、杭伏図、断面図及び杭配筋図を図1～4に示す。



1.2 杭の健全性調査結果の概要

- K6大物搬入建屋の杭伏図及び断面図を図5、及び図6に示す。
- 杭上部：基礎スラブ下約5.5mまで掘削し、杭の外観目視によるひび割れ等の調査結果を表1に示す。
 - ✓ No.1・4・7：損傷なし。
 - ✓ No.2・3・5：支持性能に大きな支障となる損傷はなく、耐震性能に影響はない。
 - ✓ No.6・8：耐震性能に影響はあるが、鉛直支持力はある程度保持されている状態である。
- 杭下部：非破壊試験による健全性調査を行い、全ての杭下部で「健全性は高い」と判定した。
- 次ページ以降に、調査結果の詳細を示す。

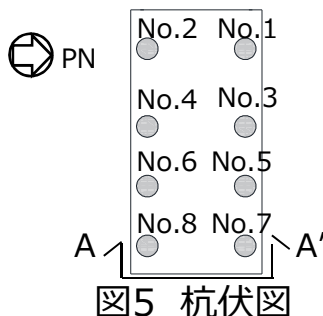


図5 杭伏図

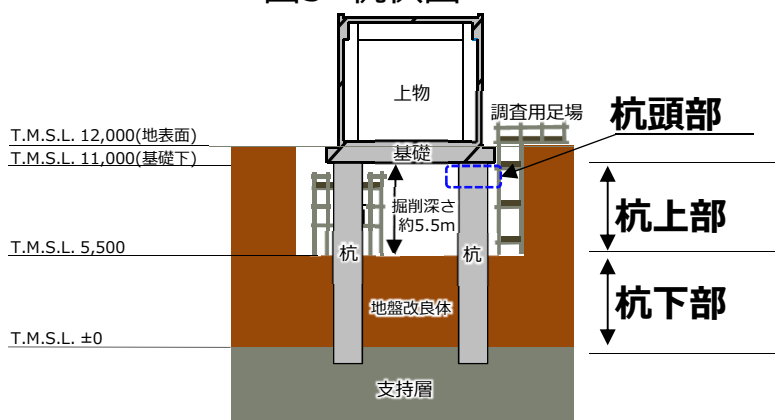


図6 A-A'断面図 (単位：mm)

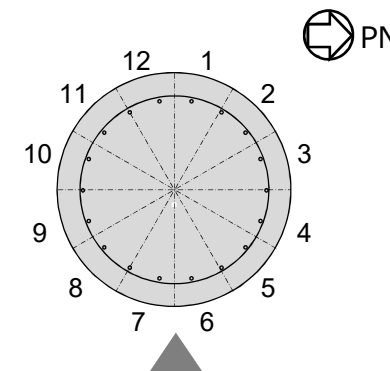
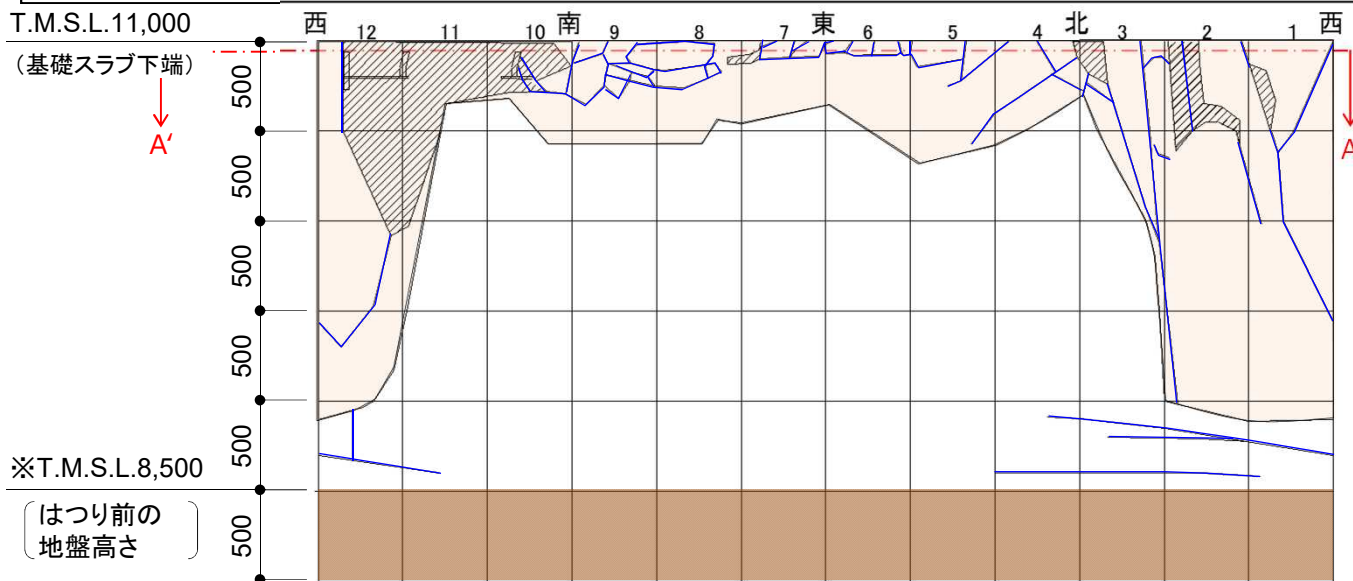
表1 杭上部調査結果一覧

杭No	調査項目	コンクリート剥離	コンクリート浮き	コンクリートひび割れ幅	鉄筋状態	損傷度※
No.1		なし	表面のみ	なし	損傷なし	なし
No.2		なし	表面のみ	最大1.8mm計1本	損傷なし	Ⅱ
No.3		なし	表面のみ	最大0.7mm計1本	損傷なし	Ⅱ
No.4		なし	表面のみ	なし	損傷なし	なし
No.5		なし	表面のみ	最大1.1mm計1本	損傷なし	Ⅱ
No.6		なし	主筋内側まで	最大4.0mm計6本	損傷なし	Ⅲ
No.7		なし	表面のみ	なし	損傷なし	なし
No.8		あり	主筋内側まで	鉄筋が見えるひび割れ	変形11本破断7本	Ⅳ

※建築研究資料 No.90 1997.8 建築基礎の被災度区分判定指標及び復旧技術例の考えに沿って評価

1.3 杭上部の調査結果 (No.8杭のはつり取り前)

- No.8杭のはつり取り前の杭上部の調査結果を図7に示す。なお、基礎スラブ下約2.5m※まで掘削し、鉄筋調査のためにコンクリートをはつり取る前の調査結果である。
 - ✓ ひび割れ : 鉄筋の見えるひび割れを含め、鉛直、水平及び斜め方向に複数本確認した。
 - ✓ 浮き及び剥落 : 基礎スラブ下から約2.1mの範囲に、浮き及び剥落を確認した。



杭断面図 (A-A'断面図)



西側

南側

東側

北側

- 凡例
- : 鉄筋
 - : ひび割れ
 - ▨ : 剥落
 - : 浮き
 - ▲ : 展開図の中心位置

図7 No.8杭上部 展開図 (コンクリートはつり取り前) (単位: mm)

1.3 杭上部の調査結果 (No.8杭のはつり取り後)

- 基礎スラブ下約5.5m※まで掘削し、コンクリートをはつり取った後のNo.8杭上部の調査結果を図8に示す。
- ✓ ひび割れ：基礎スラブ下から約2.1m～3mの範囲に、ひび割れ幅0.1～5.0mmの水平方向のひび割れを3本確認した。
- ✓ 鉄筋：主筋18本中、7本が破断、11本が変形を確認した。変形方向は、基礎スラブからみて杭鉄筋が東から西に変形している。

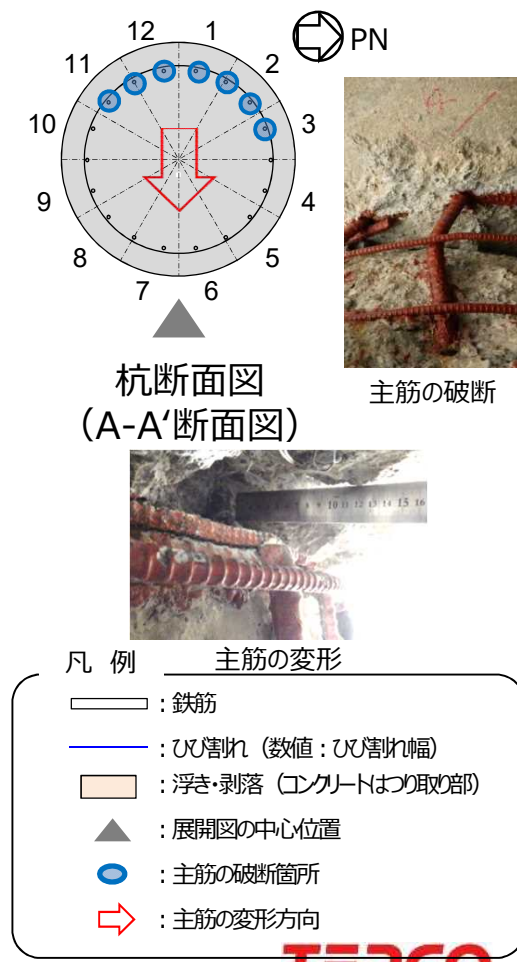
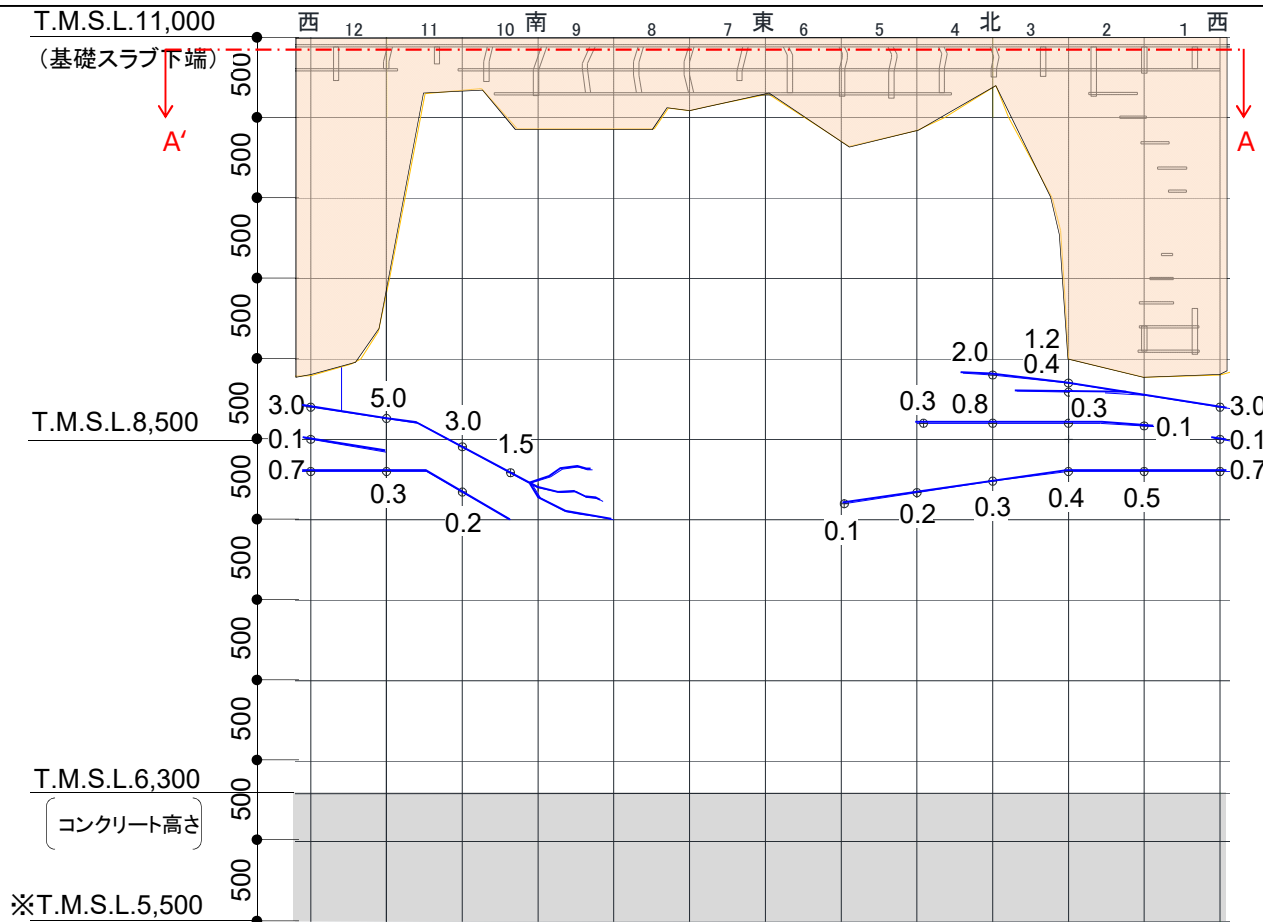


図8 No.8杭上部 展開図 (コンクリートはつり取り後) (単位: mm)



1.3 杭上部の調査結果（No.6杭のはつり取り前）

- No.6杭上部の調査結果を図9に示す。
 なお、No.8杭同様に基礎スラブ下約2.5m※まで掘削し、鉄筋調査のためにコンクリートをはつり取る前の調査結果である。
 - ✓ ひび割れ：基礎スラブ下約2.1m～2.5mの範囲に水平ひび割れを複数本確認した。
 - ✓ 浮き：基礎スラブ下から約0.3mの範囲に浮きを確認した。

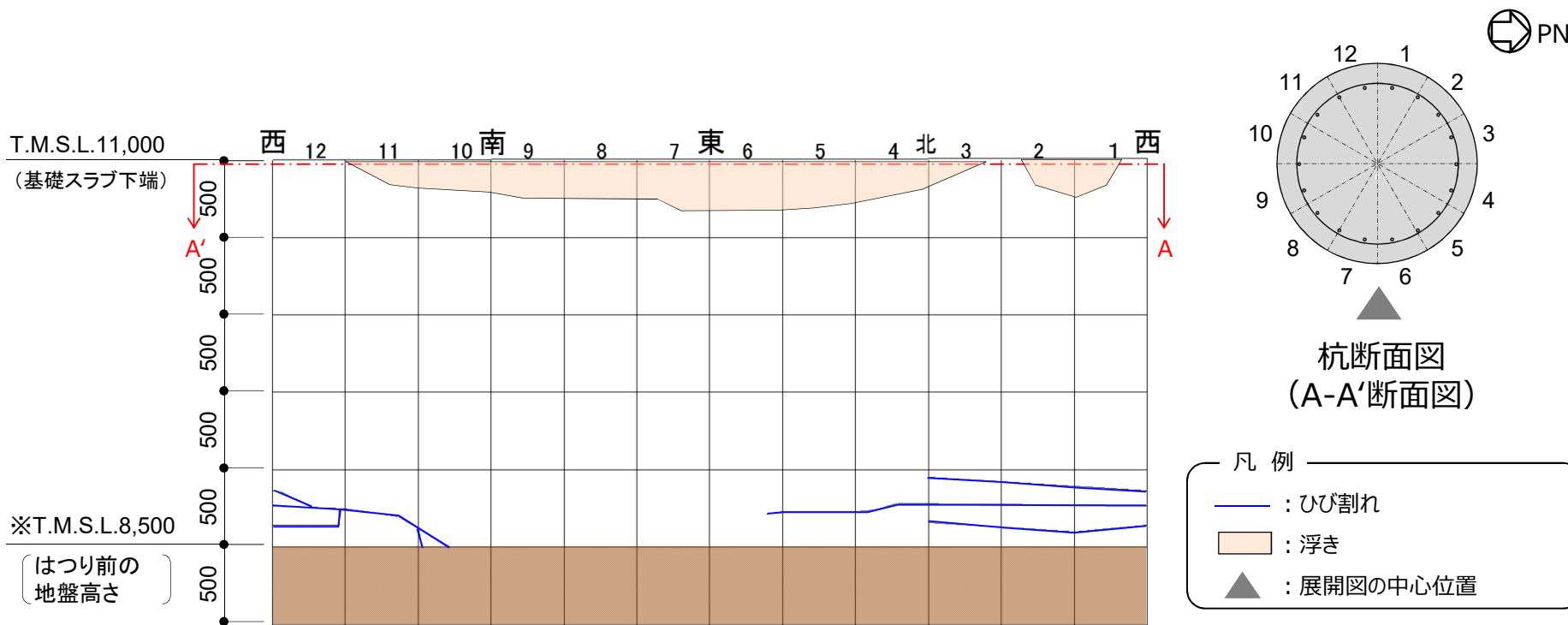


図9 No.6杭上部 展開図（コンクリートはつり取り前）（単位：mm）

1.3 杭上部の調査結果（No.6杭のはつり取り後）

- 基礎スラブ下約5.5m※まで掘削し、鉄筋調査のためにコンクリートをはつり取った後のNo.6杭上部の調査結果を図10に示す。
- ✓ ひび割れ：基礎スラブ下から約2.1～4.2mの範囲に、ひび割れ幅0.2～4.0mmの水平方向のひび割れを6本確認した。また、ひび割れは2段に分かれていた。
- ✓ 鉄筋：損傷は確認されなかった。

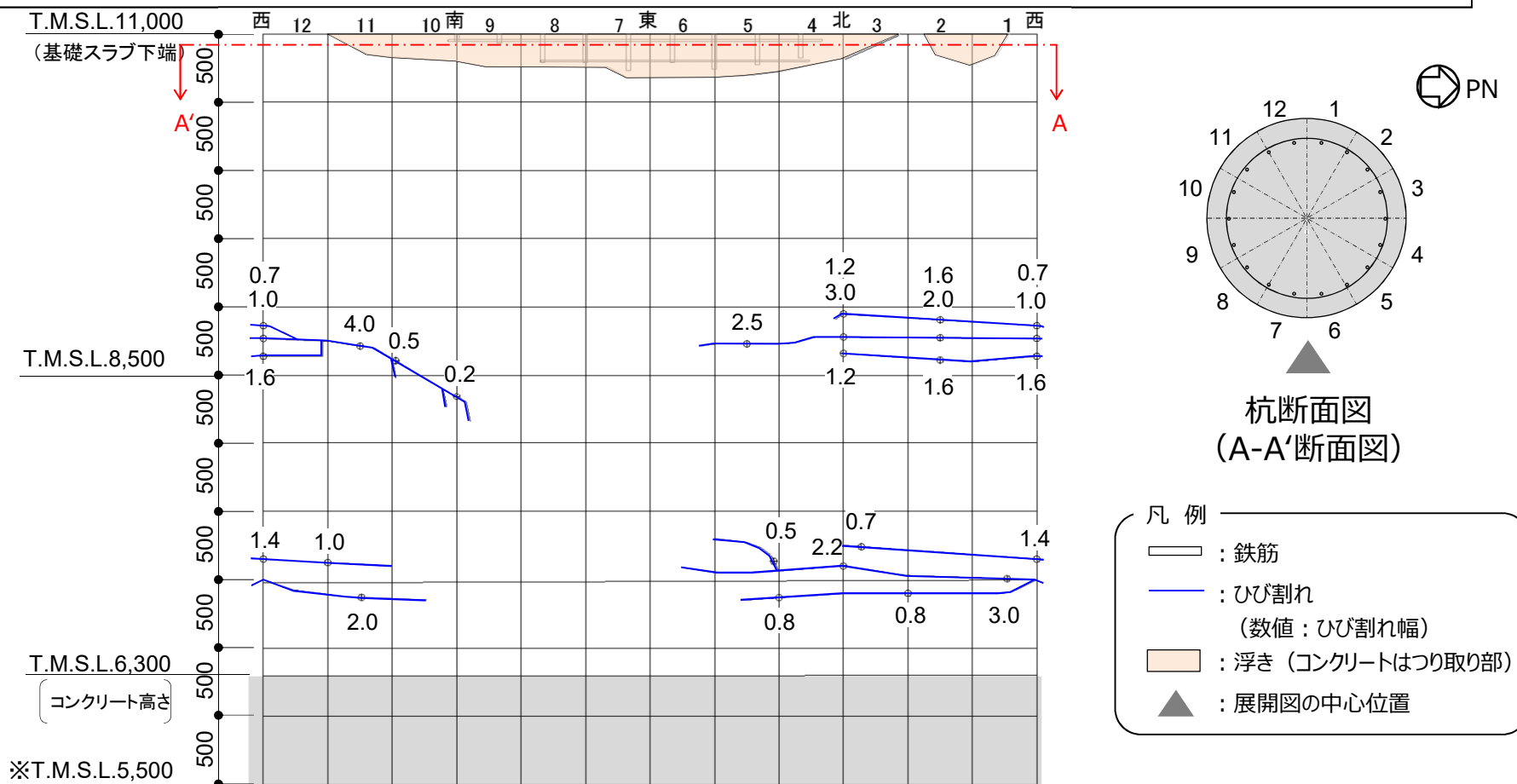
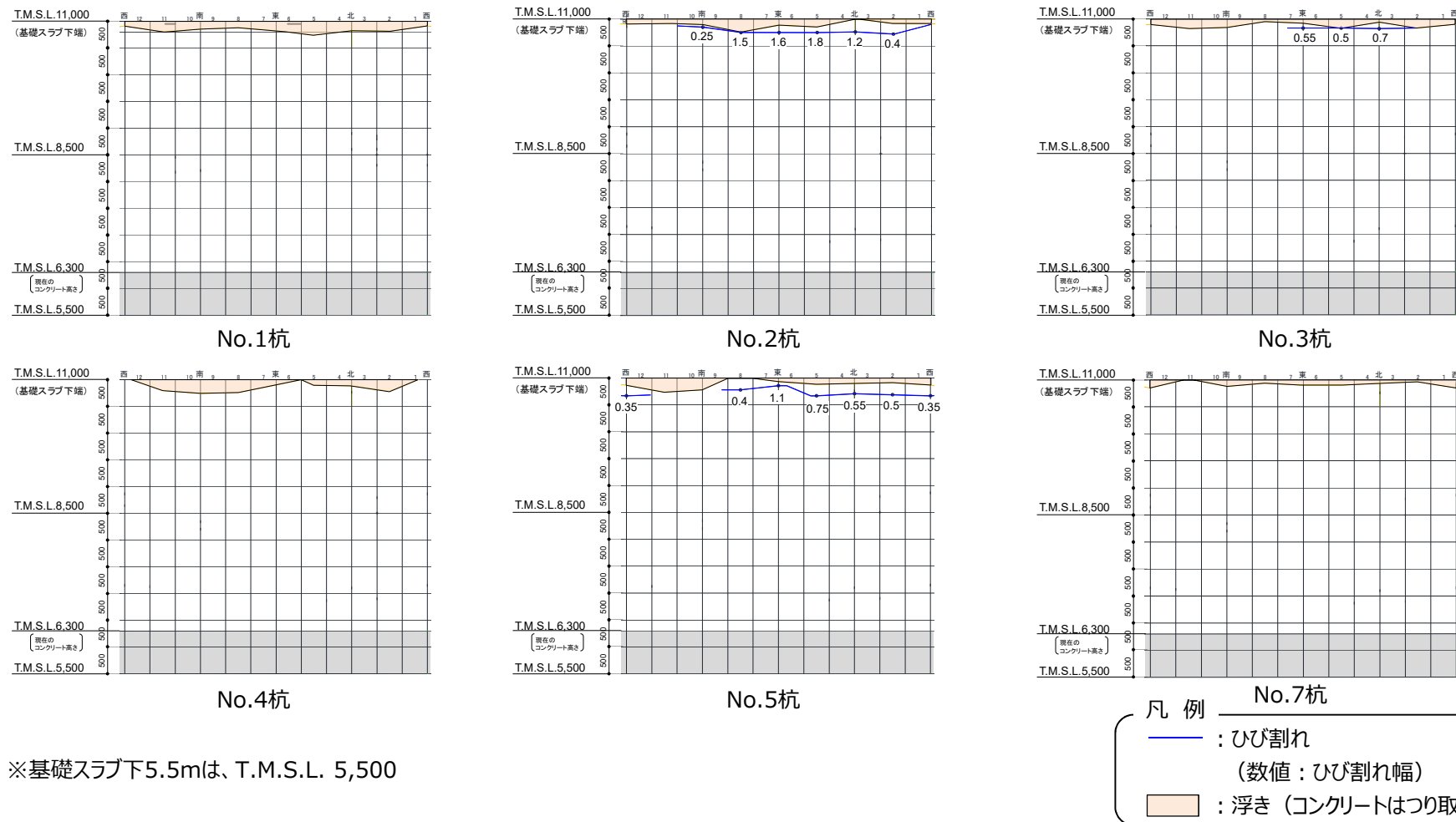


図10 No.6杭上部 展開図（コンクリートはつり取り後）（単位：mm）

1.3 杭上部の調査結果

- 基礎スラブ下約5.5m※まで掘削し、打音検査における異音が生じた部分のコンクリートをはつり取った後のNo.1～5・7杭上部の調査結果を図11に示す。
- ✓ ひび割れ：幅0.25～1.8mmの水平方向のひび割れをNo.2・3・5杭で1本ずつ確認した。



※基礎スラブ下5.5mは、T.M.S.L. 5,500

図11 No.1～5・7杭上部の調査結果（コンクリートはつり取り後）（単位：mm）

1.4 杭下部の調査結果

- 杭下部は、外観目視による調査が困難なことから、図12に示す非破壊試験（衝撃弾性波反射法※1）により健全性を調査した。
- 文献※2に基づく調査の結果、全ての杭下部の「健全性が高い」と判定した。
- 判定基準例を図13に示す。
- また、次ページ以降の図14にNo.1～4杭の結果を、図15にNo.5～8杭の結果を示す。

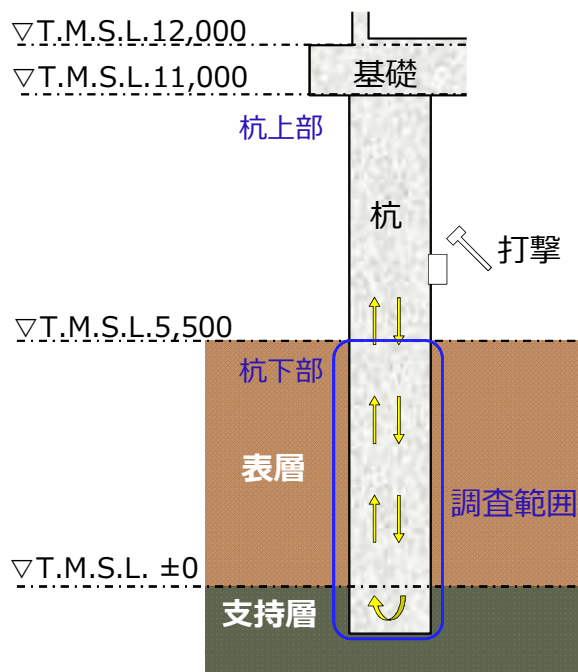


図12 非破壊試験概要図（単位：mm）

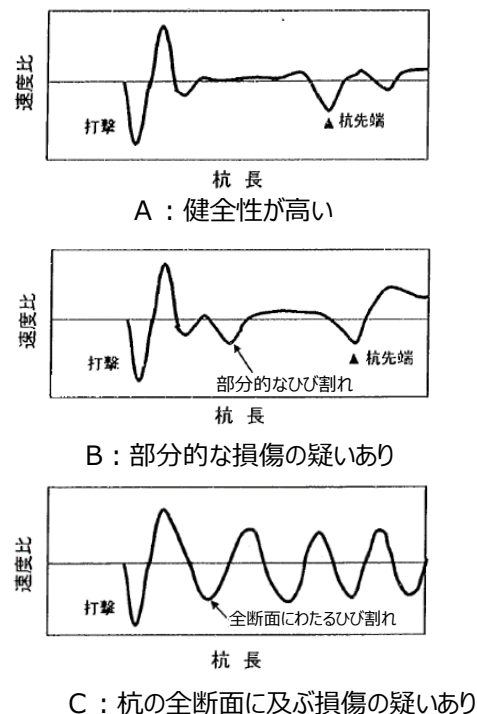


図13 判定基準例

※1 杭体をハンマーで打撃し、杭中を伝わる振動を計測することにより杭の健全性を判定する手法

※2 橋梁基礎構造の形状および損傷調査マニュアル（案）インテグリティ試験を用いた橋梁基礎調査法マニュアル（案）による

1.4 杭下部の調査結果

➤ 図14に示すように、No.1～4杭の非破壊試験の結果、杭の先端反射が明瞭であり、杭の先端反射以浅（手前）に下向きピークがみられないため、健全性は高いと判断される。

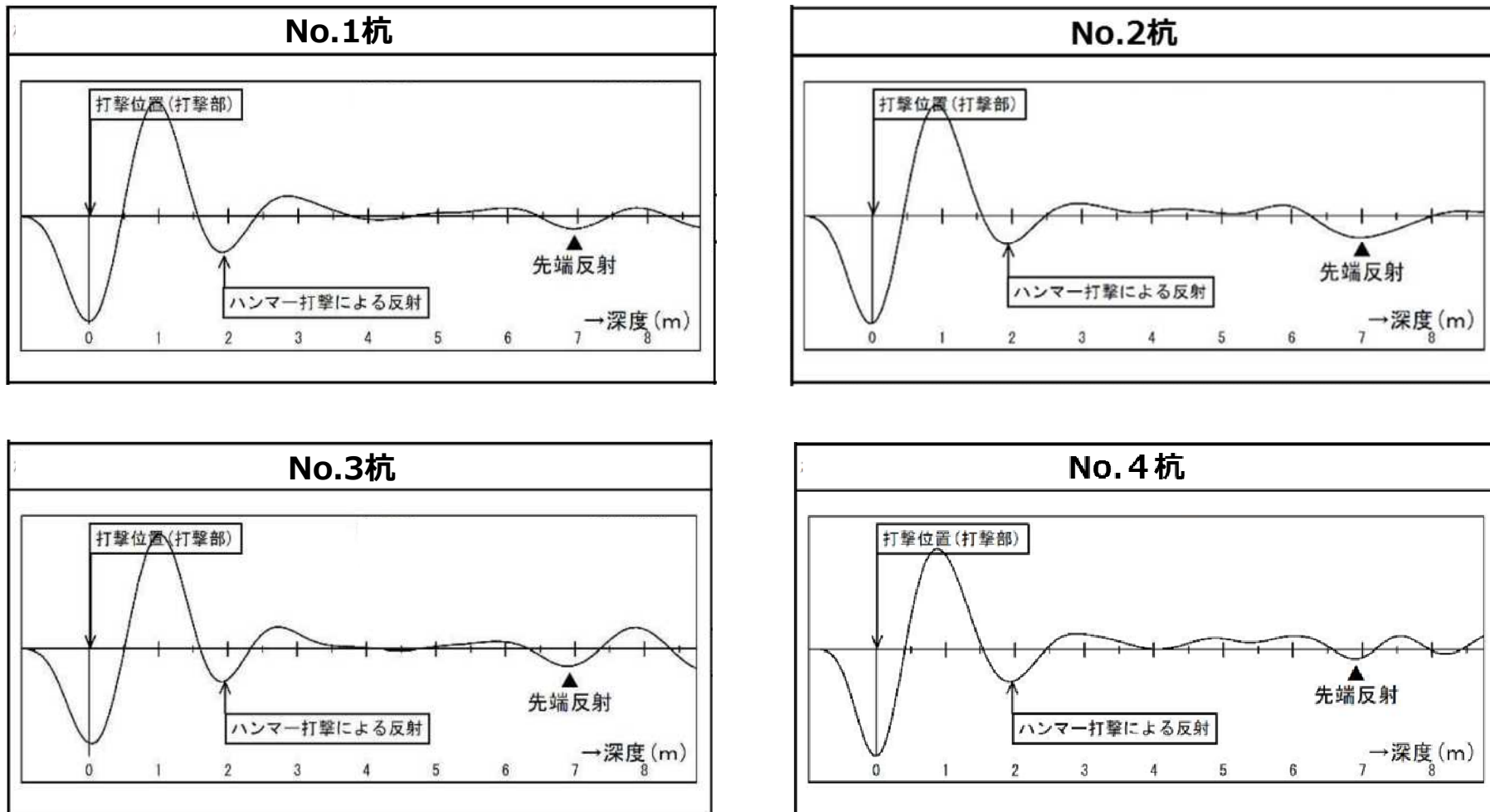


図14 No.1～4杭下部の非破壊試験結果

1.4 杭下部の調査結果

➤ 図15に示すように、No.5～8杭の非破壊試験の結果、杭の先端反射が明瞭であり、杭の先端反射以浅（手前）に下向きピークがみられないため、健全性は高いと判断される。

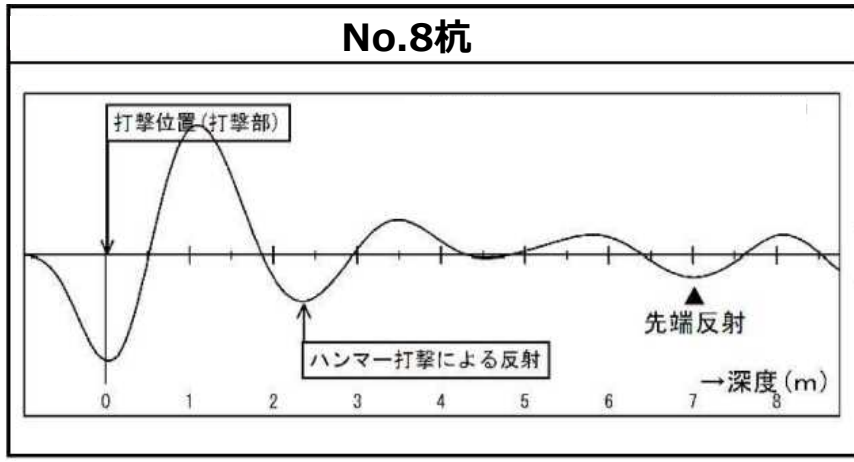
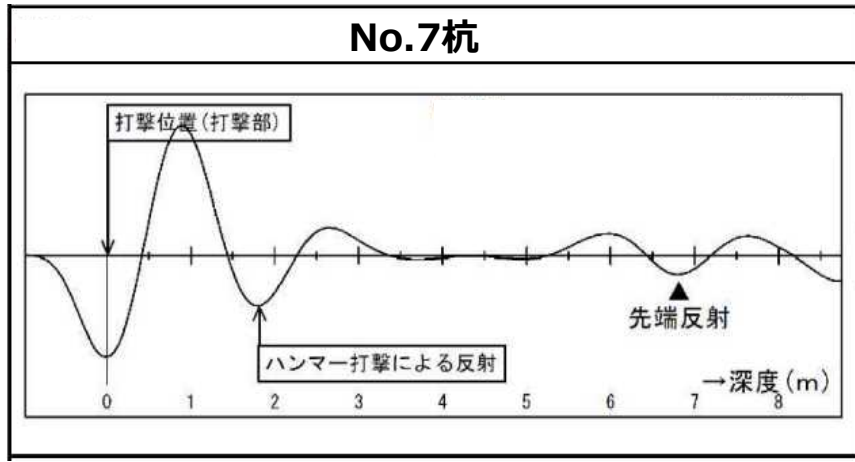
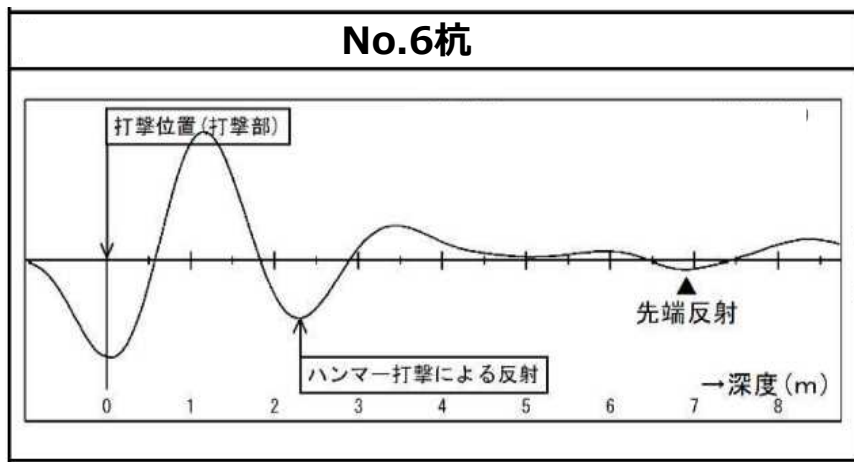
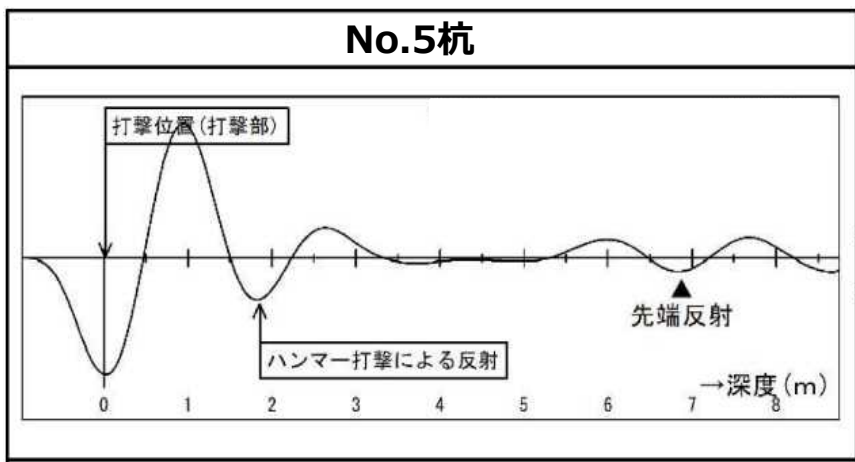


図15 No.5～8杭下部の非破壊試験結果

1.5 杭の損傷状況まとめ

No.8杭の損傷状況

- 杭頭部の鉄筋に破断及び変形が発生しており、破断及び変形の形状は、基礎スラブからみると杭鉄筋が東から西方向に変形している。これは、杭頭部に発生したせん断力により生じたものと考えられる。(損傷度Ⅳ)
- 基礎スラブ下から約2.1～3mの範囲に、ひび割れ幅0.1～5.0mmの水平方向のひび割れが3本発生している。この中間部の水平ひび割れは、曲げによるひび割れと考えられる。

No.6杭の損傷状況

- 基礎スラブ下から約2.1～4.2mの範囲に、ひび割れ幅0.2～4.0mmの水平方向のひび割れが6本発生している。この中間部の水平ひび割れは曲げによるひび割れと考えられる。(損傷度Ⅲ)
- 杭頭部に異音が発生している箇所が一部存在しているが、鉄筋の損傷は確認されていない。

No.1～5・7杭の損傷状況

- No.2・3・5杭は、杭頭部に水平方向のひび割れが発生している。(損傷度Ⅱ)
- No.1・4・7杭は、ひび割れが確認されていない。(損傷なし)

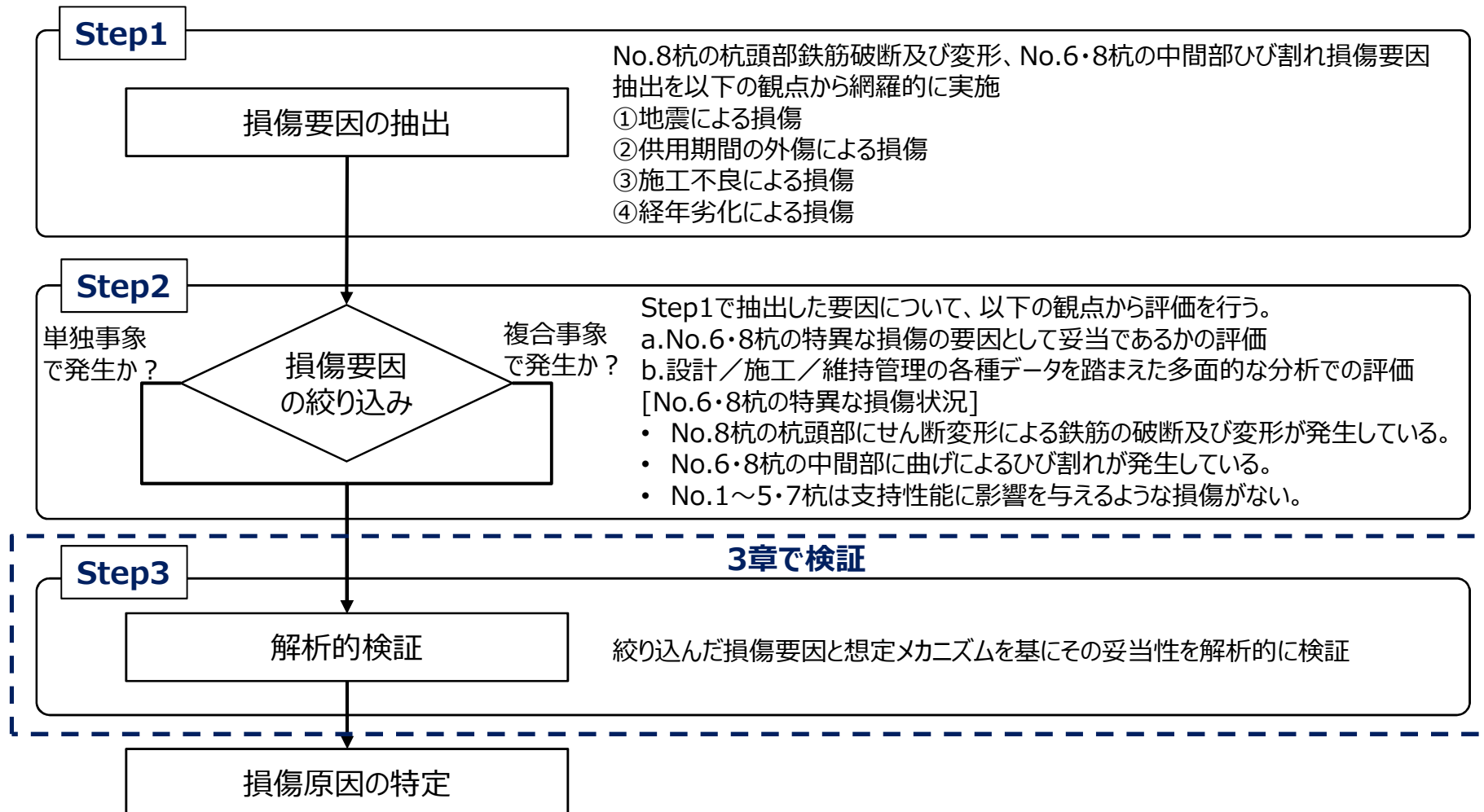
以上をまとめると

- ✓ No.8杭の杭頭部にせん断変形による鉄筋の破断・変形が発生している。
- ✓ No.6・8杭の中間部に曲げによるひび割れが発生している。
- ✓ No.1～5・7杭は支持性能に影響を与えるような損傷がない。

このことから、No.6・8杭に特異な力が作用したものと考えられる。

2.1 損傷要因評価フロー

➤ No.6・8杭の損傷原因を特定するため、以下の損傷要因評価フローに基づき、Step1として「損傷要因の抽出」を、Step2で「損傷要因の絞り込み」を、Step3で「解析的検証」を行い、損傷要因の特定を実施する。



2.2 杭損傷要因の抽出

➤ Step 1として、No.8杭の杭頭部の鉄筋破断、No.6・8杭のひび割れ等の引き起こす要因として①～④項目で整理を行い、要因を抽出した。

①地震による損傷

- (1)建屋の慣性力・ねじれ
- (2)地盤の液状化

②供用期間の外傷による損傷

- (1)重機等の衝突
- (2)重車両の走行影響

③施工不良による損傷（支持力不足、強度・耐力不足及び建設時の外傷）

④経年劣化による損傷

- (1)アルカリ骨材反応
- (2)化学的浸食
- (3)凍結融解作用
- (4)熱
- (5)放射線照射
- (6)機械振動
- (7)中性化
- (8)塩分浸透

➤ Step2では、Step1で抽出した要因に対して、

- a.No.6・8杭の特異な損傷の要因として妥当であるかの評価
- b.設計／施工／維持管理データ各種を踏まえた多面的な分析での評価

を踏まえた損傷要因となる可能性を次ページ以降で評価した。

a.No.6・8杭の特異な損傷状況

- No.8杭頭部に鉄筋の破断・変形が発生している。
- No.6・8杭の中間部に曲げによるひび割れが発生している。
- No.1～5・7杭は支持性能に影響をあたえるような損傷がない。

b.設計／施工／維持管理データ

- 設計データ：設備図書（設計方針、設計条件、評価方法及び評価結果）
- 施工データ：工事記録（施工要領書、図面、品質管理記録）
- 維持管理データ：定期点検記録、臨時点検記録及び不適合管理情報

Step2 ①地震による損傷

(1)建屋の慣性力・ねじれ

a.杭配置からみた考察

- K6大物搬入建屋は左右対称な建屋形状で杭配置がほぼ均等であることから、建屋の地震による慣性力や偏心によるねじれ影響が要因となり、No.6・8杭の特異な損傷を引き起こす可能性は考えにくい。(図16及び図17)

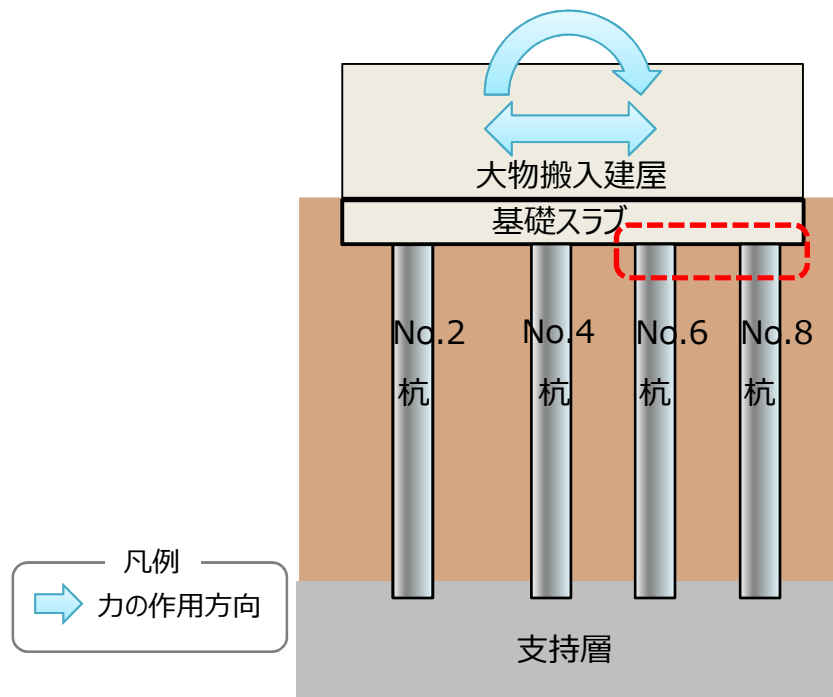


図16 慣性力イメージ図

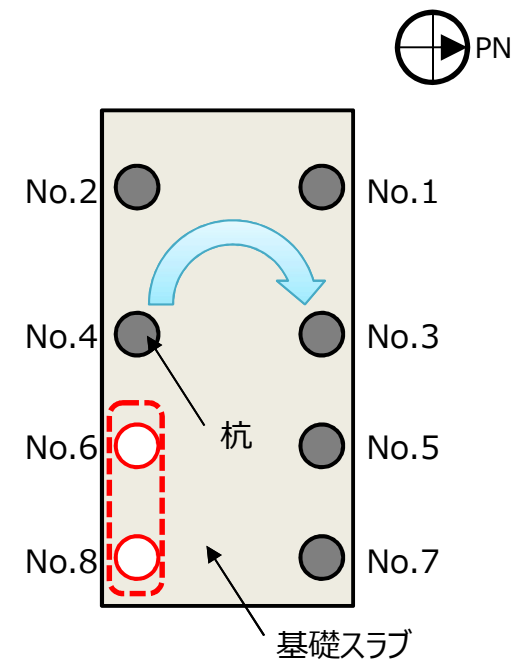


図17 ねじれイメージ図

Step2 ①地震による損傷

b.原設計からみた考察

➤ 原設計の設計方針・条件・評価方法・評価結果は以下のとおり。

1)設計方針

- K6大物搬入建屋は、自主的に耐震Aクラス相当で耐震設計を実施しており、静的地震力3.0Ciと基準地震動 S_1 による動的地震力の大きい値に対して、短期許容応力度設計を実施している。

2)設計条件

- 基準地震動 S_1 、地盤条件、建屋諸元を基に地震応答解析を実施している。

3)評価方法

- 上部構造からの地震力は、スウェイ・ロッキングモデルの地盤ばね反力により算定し、地盤変位は一次元波動論の応答変位により算定している。
- 杭の断面算定は以下の方法による。
 - ✓ 軸力及び曲げモーメント
鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説（1988）の円形断面柱より必要鉄筋比を算定し、設計配筋以内であることを確認する。
 - ✓ せん断力
せん断力に対する断面応力度の検討は基礎指針他に基づき算定した。

Step2 ①地震による損傷

4)評価結果

- 地震時の杭への発生応力は、建屋慣性力が支配的であり、杭に発生する応力の最大値は杭頭部で発生する。
- 杭断面算定の結果では、軸曲げ先行の破壊メカニズムとなるため、地震によって杭頭のせん断破壊が発生することはない。
- 大物搬入建屋の杭は平面的にほぼ均等に配置されており全8本による応力負担に大きな差はない。

以上から、地震単独事象により、No.6・8杭の特異な損傷を引き起こす可能性は考えにくい。

Step2 ①地震による損傷

(2)地盤の液状化

- 新潟県中越沖地震時に、K6大物搬入建屋近傍の地盤では、亀裂・噴砂は確認されていない。このため、K6大物搬入建屋の周辺では液状化が発生しておらず、液状化により杭が損傷に至ったことは考えにくい。(図18)



Step2 ② 供用期間の外傷による損傷

(1) 重機等の衝突

- 供用期間に、今回実施中である耐震強化工事以外にK6大物搬入建屋の杭を露頭させたことはなく、耐震強化工事実施期間中においては、建屋下地盤掘削時に杭を露頭させた状態での重機との衝突はなかったことを工事関係者への聞き取りにより確認している。

(2) 重車両の走行影響

1) 維持管理データの観点から確認

- これまで実施している建屋の定期点検結果の確認から、重車両の建屋への衝突による損傷がないことを確認している。

2) 不適合管理データの観点から確認

- 過去の記録からも、重車両の建屋への衝突による不適合情報がないことを確認している。

3) 設計データの観点から確認

- 重車両の走行による荷重は、設計荷重として考慮されている仕様以下であることを確認している。

以上から、供用期間の外傷単独事象により杭が損傷に至ったことは考えにくい。

2.3 損傷要因の絞り込み

Step2 ③施工不良による損傷 (支持力不足、強度・耐力不足及び建設時の外傷)

- 建設時の工事記録を確認した結果、杭の損傷を引き起こす施工不良等は確認されなかった。表2に調査結果を示す。
以上から、施工不良単独事象により杭が損傷に至ったことは考えにくい。

表2 施工不良調査結果一覧表

調査項目	確認記録	判定結果	評価
(1)施工方法・手順	大物搬入口杭工事施工計画書	不良なし	杭の損傷を引き起こす施工不良等は確認されず
(2)使用材料	コンクリート圧縮強度試験成績表 配筋検査報告書	不良なし	
(3)杭位置	杭芯検査報告書	不良なし	
(4)掘削	内径寸法検査報告書 コンクリート打設前検査報告書	不良なし	
(5)鉛直精度	ケーシング建入検査報告書	不良なし	
(6)スライム	コンクリート打設前検査報告書	不良なし	
(7)鉄筋かご建込	配筋検査報告書	不良なし	
(8)コンクリート打込み	大物搬入口杭工事施工計画書	不良なし	
(9)杭頭処理	杭頭処理検査報告書	不良なし	

Step2 ④経年劣化による損傷

- K6大物搬入建屋の杭（地中埋設のコンクリート構造物）の経年劣化の要因を分析するにあたって、これまでの柏崎刈羽原子力発電所の高経年化技術評価結果を参考とし、着目すべき経年劣化事象として以下の要因を抽出した。
 - (1)アルカリ骨材反応 (2)化学的浸食 (3)凍結融解作用
 - (4)熱 (5)放射線照射 (6)機械振動
 - (7)中性化 (8)塩分浸透
- このうち、(1)アルカリ骨材反応、(2)化学的浸食及び(3)凍結融解作用は、柏崎刈羽原子力発電所では、これまでの品質管理や立地環境から発生する可能性が低く、着目する劣化要因ではないと整理しており、杭についても同様と考えられる。
- (1)アルカリ骨材反応は、建設時に実施した骨材試験により、アルカリシリカ反応が無いことを確認している。
- (2)化学的浸食は、立地地点に土壤汚染がなく、浸食性物質による劣化は生じない。
- (3)凍結融解作用は、日本建築学会 工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事の凍害危険度の分布図では、新潟県の沿岸部は凍害危険度が区分対象外であり、凍結融解作用の可能性が低いと考えられる。

Step2 ④経年劣化による損傷

- (4)熱及び(5)放射線照射は、杭は地中に設置しており、劣化環境にないため、劣化の可能性が低いと考えられる。
- (6)機械振動は、繰り返し振動の影響を受ける劣化環境にないため、劣化の可能性が低いと考えられる。
- (7)中性化及び(8)塩分浸透による劣化メカニズムは、大気中の二酸化炭素、塩化物イオン及び酸素がコンクリート中に侵入し、コンクリート中の中性化や塩分浸透が進むことにより、鉄筋腐食が進行し、鉄筋が体積膨張を起こすことでコンクリートがひび割れが発生し強度低下を起こすものである。
杭は地中に設置しており、二酸化炭素、塩化物イオン及び酸素の供給が大気中より少なく、環境条件的に劣化の可能性が低いと考えられる。また、No.6・8杭の損傷状況の確認結果からも損傷部位の鉄筋は、腐食による減肉や腐食に伴う体積膨張によるコンクリートのひび割れは確認されていないことから鉄筋コンクリートの経年劣化による損傷の可能性はない。

以上から、経年劣化単独事象により杭が損傷に至ったことは考えにくい。

2.3 損傷要因の絞り込み

- Step2において、抽出した要因①～④に対して、
 - a.No.6・8杭の特異な損傷の要因として妥当であるかの評価
 - b.設計／施工／維持管理データを踏まえた多面的な分析を踏まえた要因の可能性を評価した結果を表3の評価結果及び備考欄に示す。
- ②～④の要因が単独で損傷要因となる可能性は考えにくい評価となった。

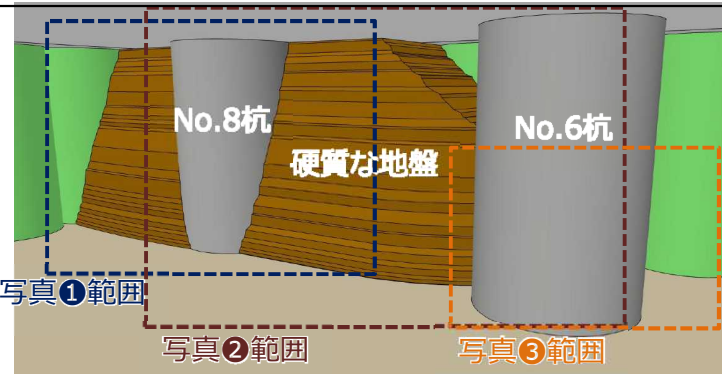
表3 損傷要因評価結果一覧表

分類	要因	評価結果
①	地震による損傷	地震による慣性力や偏心によるねじれ影響要因で、No.6・8杭が特異な損傷を引き起こす可能性は考えにくい。
②	供用期間の外傷による損傷	供用期間の外傷単独事象によりNo.6・8杭が損傷に至ったとは考えにくい。
③	施工不良による損傷	施工不良の単独事象によりNo.6・8杭が損傷に至ったとは考えにくい。
④	経年劣化による損傷	経年劣化単独事象によりNo.6・8杭が損傷に至ったとは考えにくい。

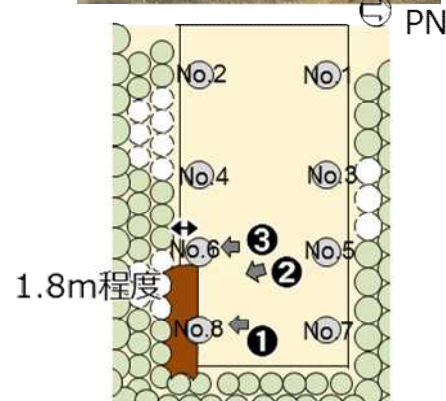
- しかしながら、
 - ✓ No.6.8杭は外傷により損傷している事実
 - ✓ ①「地震による損傷」単独による損傷要因となる可能性は低い
- 以上よりNo.6・8杭周辺地盤において、杭に応力集中を促すような要因があった場合には、地震との複合事象によって杭が損傷する可能性が考えられることから、杭周辺地盤の状況を調査した。

杭周辺地盤状況の調査

- No.6・8杭と特定の杭に損傷が集中していることから、今回の掘削作業時に損傷につながるような要因が無かったか、作業写真の確認や関係者への聞き取りを実施した。
- その結果、主に砂質土で構成されている地盤の中で、南東側周辺に硬質な地盤があったことを確認した。図19に地中埋設物の状況を示す。
- 硬質な地盤は、損傷が集中して見られるNo.6・8杭に干渉していることを確認した。

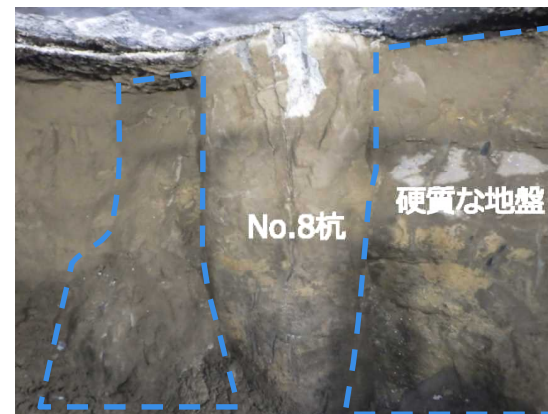


写真③



凡例

- : 掘削中に確認された硬質な地盤
- : 耐震強化工事の地盤改良体
- : 表層(砂質土)
- : 建屋下と地上の昇降口



写真①



写真②

図19 地中埋設物状況

杭周辺地盤状況の調査

- 硬質な地盤の材料や範囲等について、建設記録の確認や協力企業への聞き取りを実施した。その結果、硬質な地盤は、6号機建設時に大型クレーン位置の地盤を補強するため、セメントと土を混ぜて作られたセメント改良土であることを確認した。図20にセメント改良土配置図を示す。
- 地震が発生した際にセメント改良土の影響でNo.6及びNo.8杭に応力が集中する可能性がある。

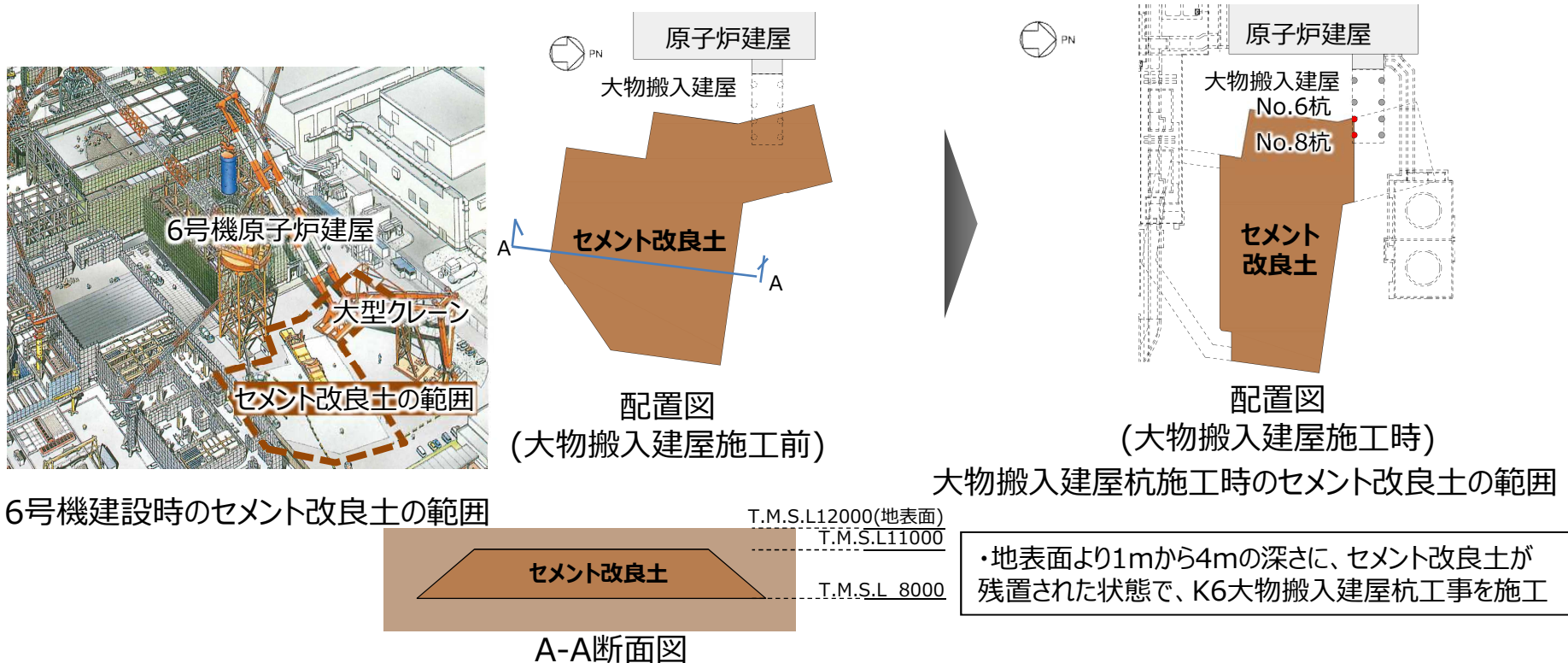


図20 セメント改良土配置図

2.4 損傷要因のまとめ

- 大物搬入建屋の周辺地盤状況を調査した結果、No.6・8杭周辺にセメント改良土が干渉していることを確認した。(表4内、最下段)
- 地震が発生した際にセメント改良土の影響でNo.6及びNo.8杭に応力が集中する可能性がある。
- このことから、「地震と杭周辺地盤の複合事象による損傷」を推定要因として絞り込み、Step3で解析的検証を行う。

表4 損傷要因調査結果一覧表

分類	要因	調査結果	p.26再掲
①	地震による損傷	地震による慣性力や偏心によるねじれ影響要因で、No.6・8杭が特異な損傷を引き起こす可能性は考えにくい。	
②	供用期間の外傷による損傷	供用期間の外傷単独事象によりNo.6・8杭が損傷に至ったとは考えにくい。	
③	施工不良による損傷	施工不良の単独事象によりNo.6・8杭が損傷に至ったとは考えにくい。	
④	経年劣化による損傷	経年劣化単独事象によりNo.6・8杭が損傷に至ったとは考えにくい。	
追加	地震と杭周辺地盤の複合事象による損傷	地震が発生した際にセメント改良土の影響でNo.6及びNo.8杭に応力が集中する可能性がある。	

3.1 セメント改良土に着目した解析

- 損傷要因評価フローから、推定要因とされた、「セメント改良土が新潟県中越沖地震時に存在していたこと」を踏まえて、「杭の損傷状況」と「周辺地盤状況」から以下の損傷メカニズムを推定した。

「杭の損傷状況」

- ・No.8杭の杭頭部にせん断変形による鉄筋の破断・変形が発生している。（図21）
- ・No.6・8杭の中間部に水平ひび割れが発生している。

「周辺地盤状況」（図22）

- ・No.6・8杭の周辺には、セメント改良土が新潟県中越沖地震時に存在した。

上記より、

- ・No.8杭頭部がセメント改良土により拘束されたため、せん断により損傷した。
- ・No.6・8杭の中間部がセメント改良土の影響による曲げにより損傷した。

と推定した。

杭頭部がせん断により損傷



図21 No.8杭の杭頭部の損傷状況

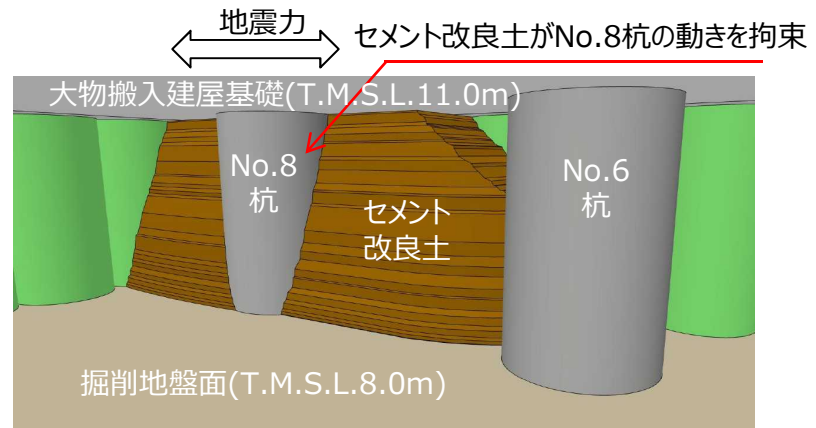


図22 杭とセメント改良土の位置関係

3.2 No.8杭のせん断に着目した解析

- セメント改良土に拘束された状態でのK6大物搬入建屋から杭への地震力（慣性力）の伝達状態（メカニズム）を図23に示す。
 - セメント改良土によってNo.8杭の変形が拘束されたため、地震力の多くが集中的に伝達された結果、杭頭部がせん断破壊したものと推定する。
- ▼
- セメント改良土がNo.8とNo.6のみに干渉していることが確認されたので、地震時にセメント改良土が杭を拘束することを想定して3次元FEMモデルを作成して杭への応力伝達を検証した。

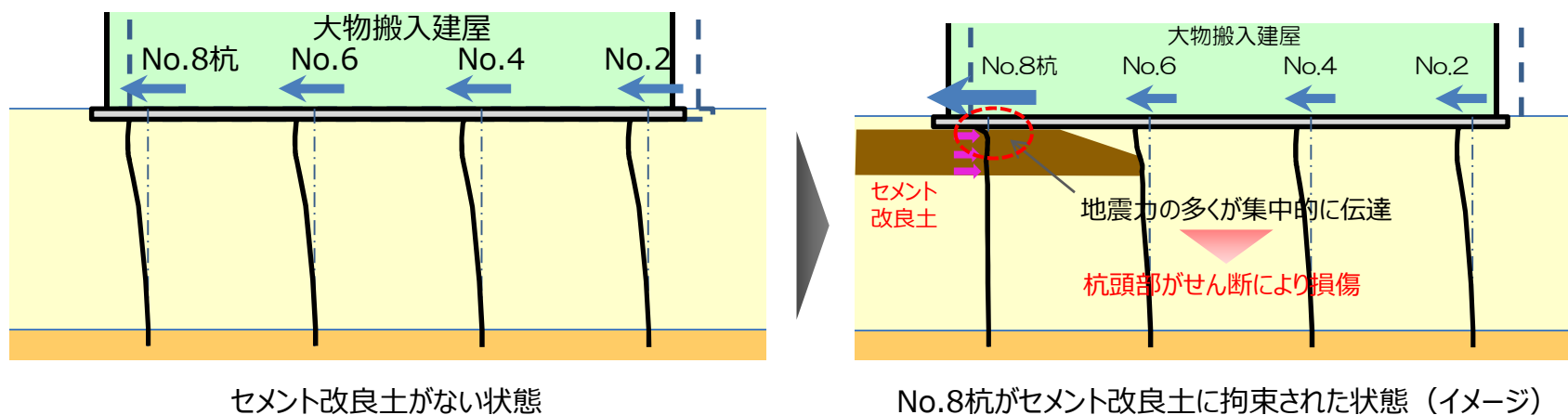


図23 地震力伝達状態

3.2 No.8杭のせん断に着目した解析

- セメント改良土によってNo.8杭の変形が拘束されたことに着目し、基礎を水平方向に加力した場合の3次元FEM静的応力解析を行い、セメント改良土による杭頭せん断力分担率への影響を確認する。
- 3次元FEM静的応力解析のイメージを図24に、建屋周辺の解析モデル図を図25に示す。

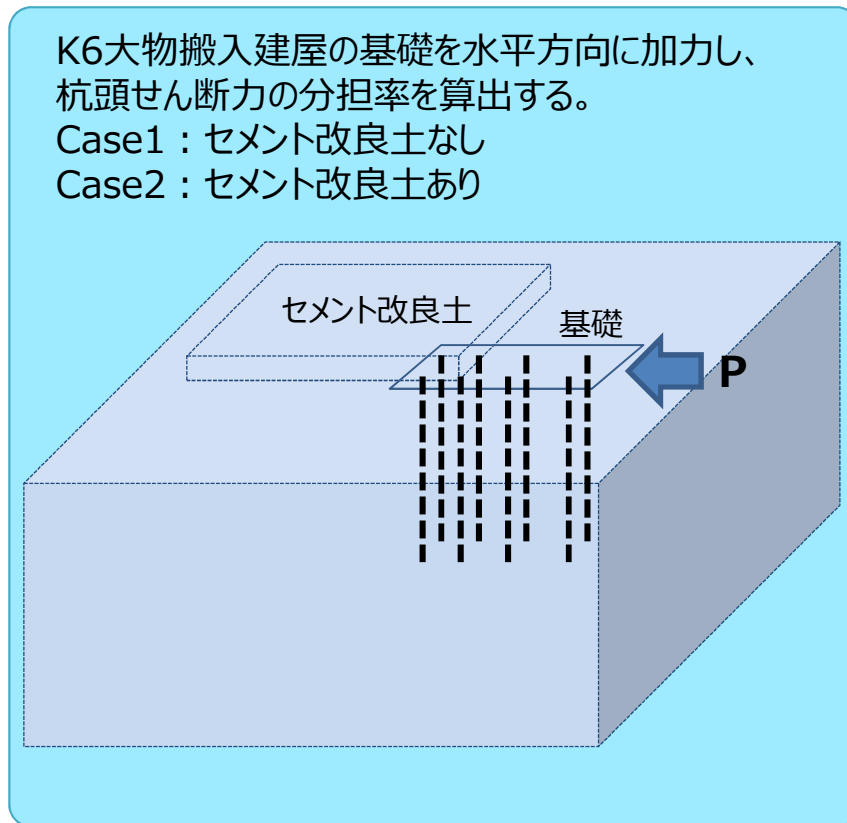
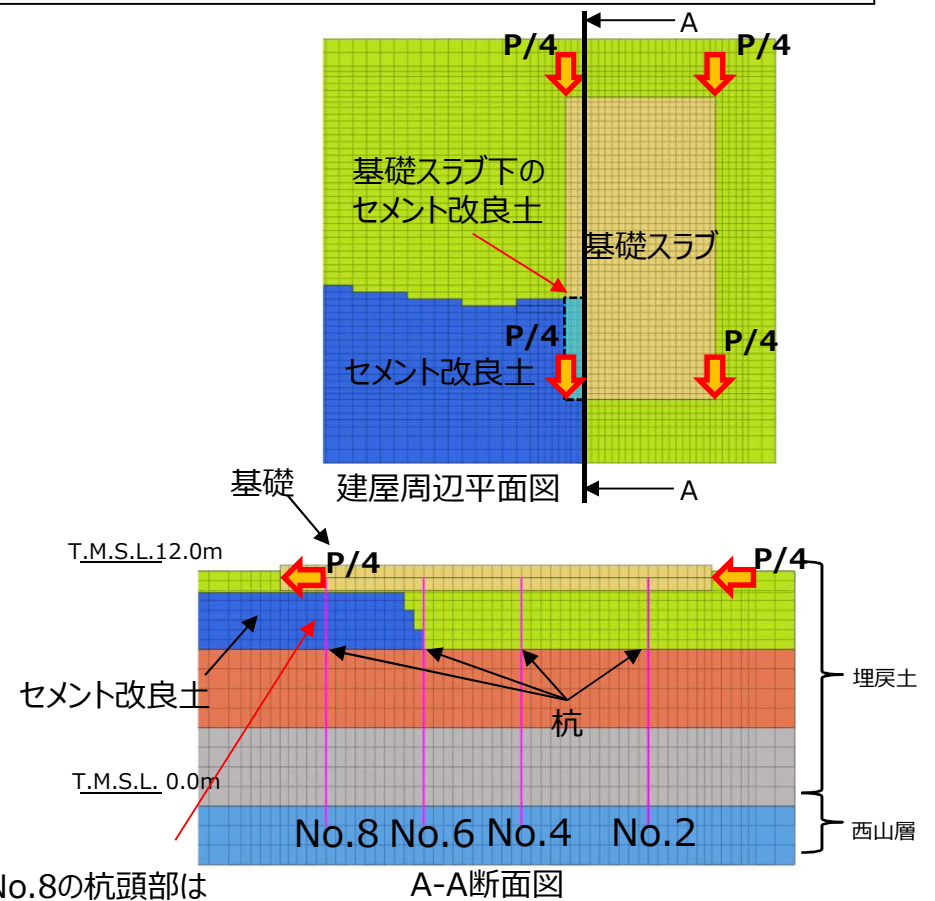


図24 3次元FEM静的応力解析のイメージ



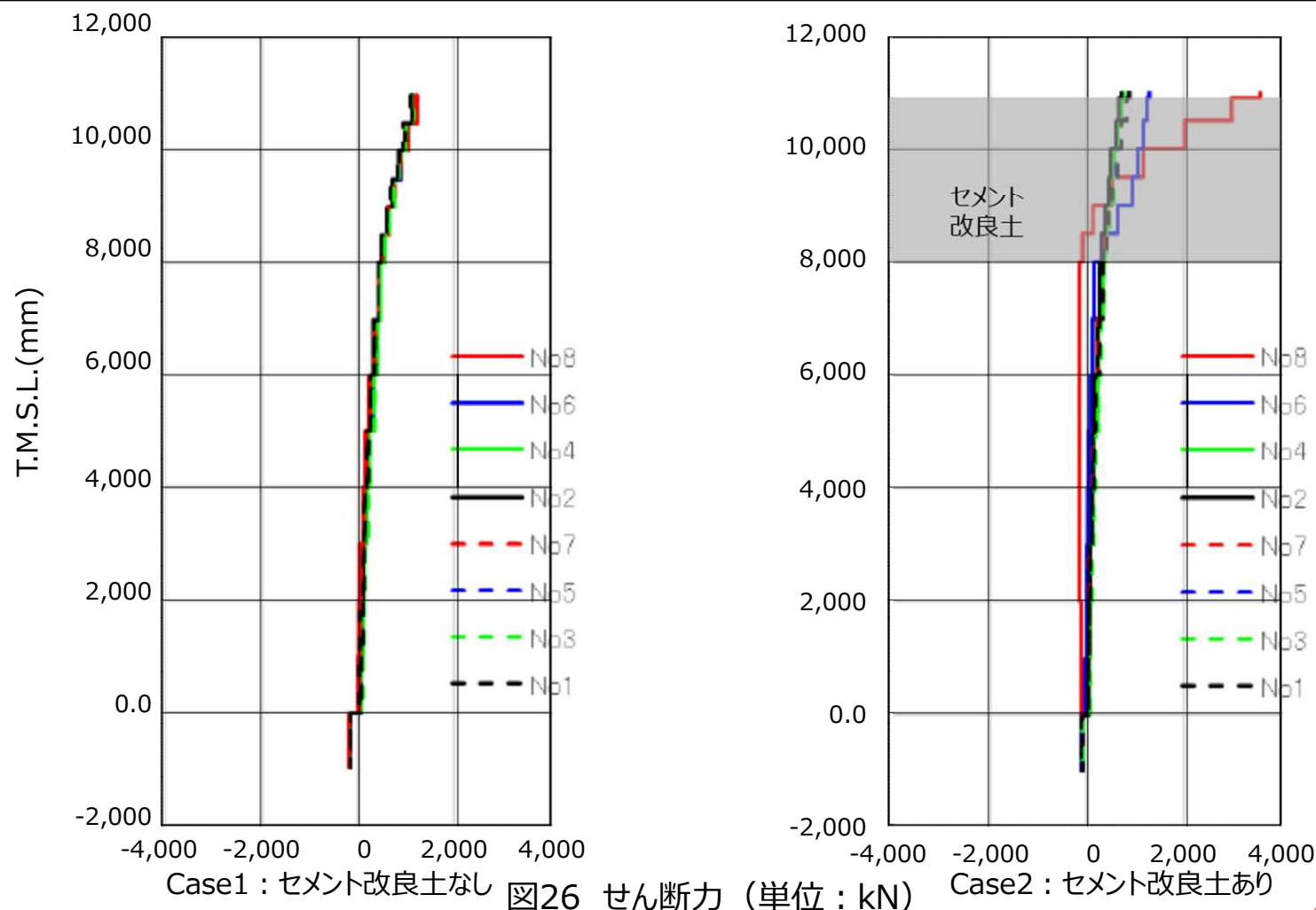
No.8の杭頭部はセメント改良土に拘束されている。

図25 建屋周辺の解析モデル図
(Case2:セメント改良土あり)

3.2 No.8杭のせん断に着目した解析

③解析結果

- K6大物搬入建屋の基礎を水平方向に加力した場合の「セメント改良土なしの場合」と「セメント改良土ありの場合」の杭のせん断力分布を図26に示す。



3.3 No.8杭のせん断に着目した解析のまとめ

- 図27に杭頭せん断力の最大値の比率を示す。
- No.8杭周辺のセメント改良土を模擬したケースでは、セメント改良土がないケースに比べ杭頭せん断力が3倍程度大きくなり、セメント改良土の影響でNo.8杭に応力集中する傾向を確認した。
- 以上より、No.8杭がセメント改良土に拘束されていたことが損傷要因と考えられる。

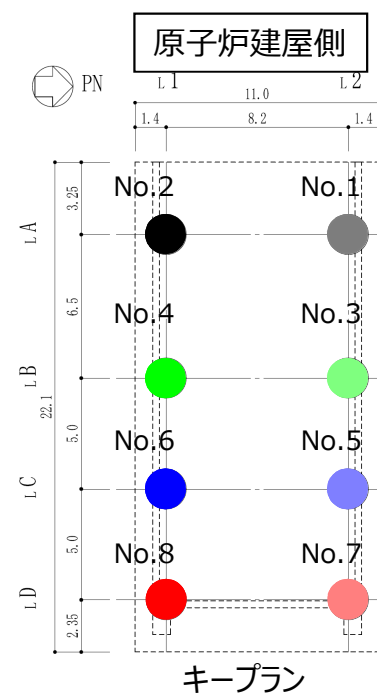
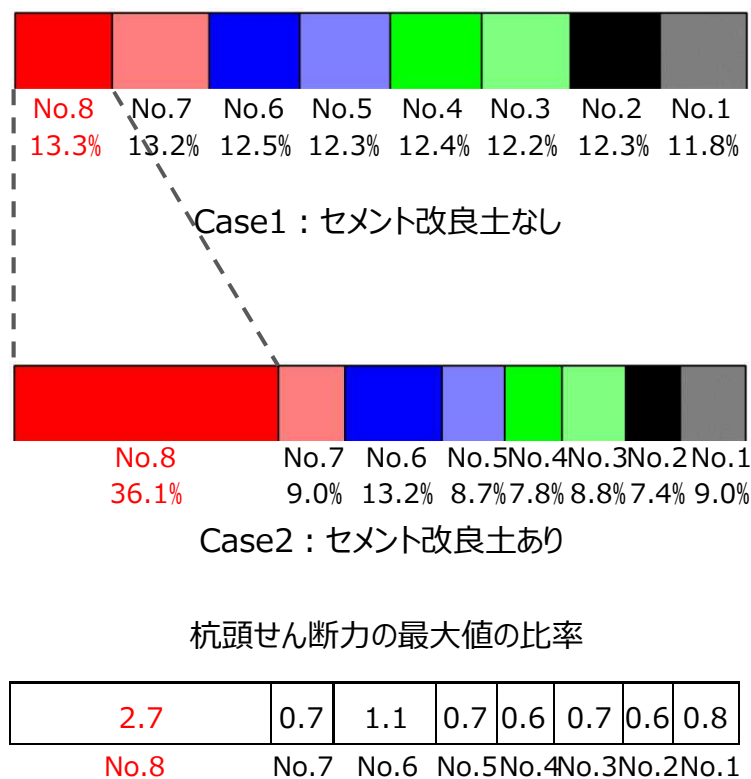


図27 Case2/Case1の比率

今後説明

今後説明

1. 杭の健全性調査結果

- 杭の健全性調査結果、No.1～5・7杭とNo. 6・8杭の損傷の程度は明らかに異なり、No.6・8杭に特異な力が作用したものと考えられる。
 - No.8杭の杭頭部にせん断変形による鉄筋の破断・変形が発生している。
 - No.6・8杭の中間部に曲げによるひび割れが発生している。
 - No.1～5・7杭は支持性能に影響を与えるような損傷がない。

2. 杭の損傷要因の絞り込み

- No.6・8杭の損傷要因を特定するために損傷要因評価フローに基づき、Step1として「損傷要因の抽出」を、Step2で「損傷要因の絞り込み」を、Step3で「解析的検証」を行い、損傷要因の特定を実施した。
- その結果、「地震と杭周辺地盤の複合事象による損傷」を推定要因として抽出した。

3. 杭の損傷要因の検証

- 上記、推定要因から、セメント改良土が地震時にNo.8杭の動きを拘束し、杭頭部がせん断により損傷したと推定メカニズムについて、解析的検証を実施した。
- No.8杭周辺のセメント改良土を模擬したケースでは、セメント改良土がないケースに比べ杭頭せん断力が3倍程度大きくなり、セメント改良土の影響でNo.8杭に応力集中する傾向を確認した。

以上より、No.8杭がセメント改良土に拘束されていたことが損傷要因と特定した。

- 原設計の杭の地震荷重に対する設計フローを図30に示す。
- 上部構造からの地震力は、スウェイ・ロッキングモデルの地盤ばね反力により算定し、地盤変位は、一次元波動論の応答変位により算定している。(図31)

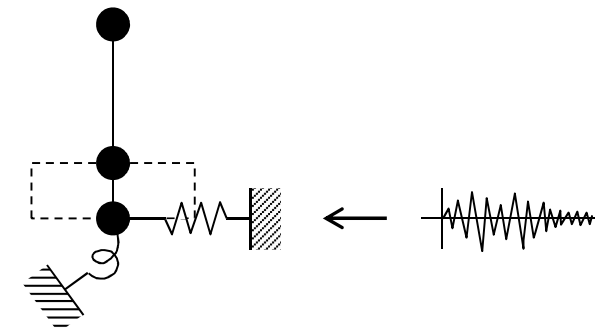
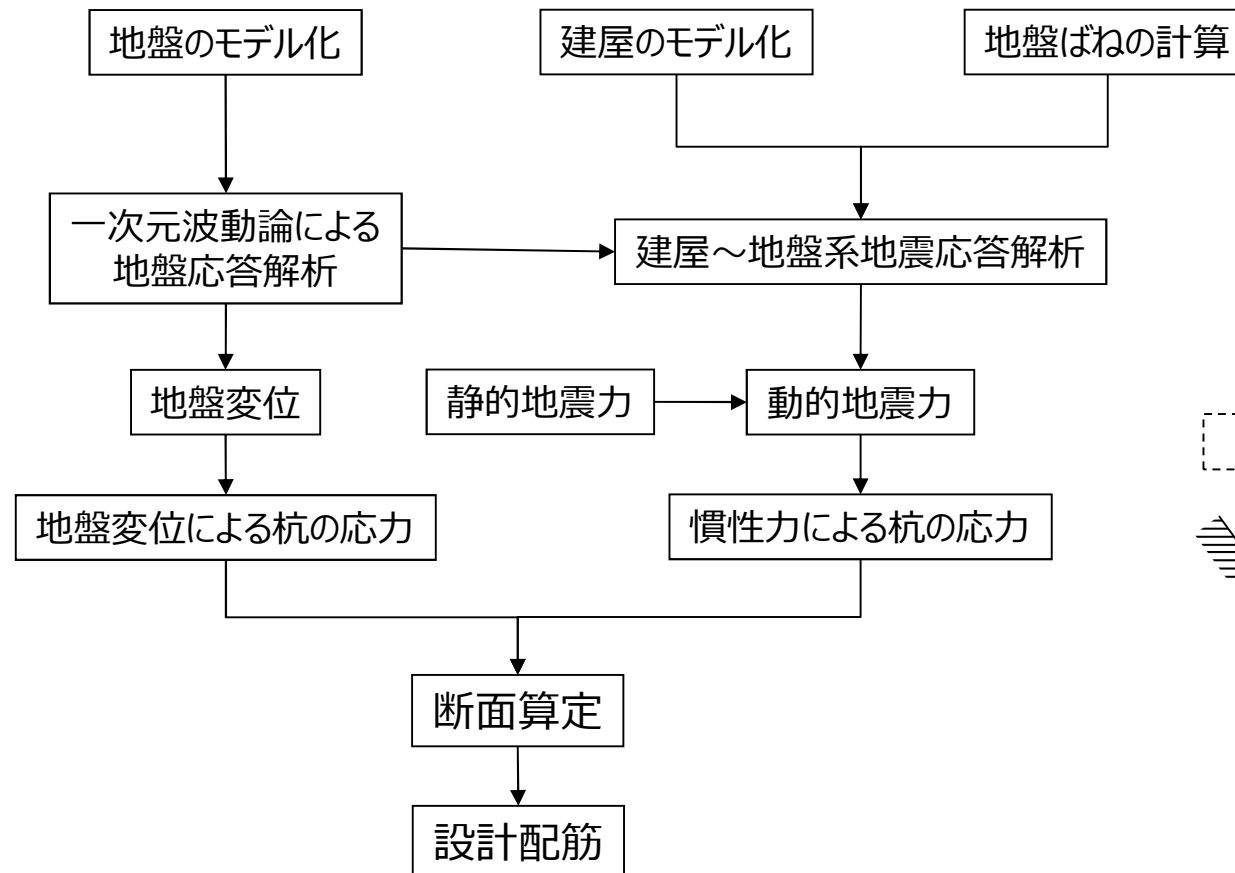


図31 地震応答解析モデル

図30 杭設計フロー図

【参考】原設計の発生応力及び断面算定結果

➤ 原設計での設計地震力での杭頭のせん断力及び曲げモーメントの発生応力及び断面算定結果を表5～7に示す。

表5 せん断及び曲げモーメント

		3.0Ci	基準地震動S1
NS方向	せん断力 (kN)	6,404	10,640
	曲げモーメント(kN・m)	31,685	34,872
EW方向	せん断力 (kN)	6,404	10,660
	曲げモーメント(kN・m)	31,685	34,931

表6 杭頭せん断力の検討

せん断力 (kN)	発生応力			短期許容応力との比較	
	地盤変位による 応力	慣性力	設計応力:Q	Qa (kN)	Q/Qa
	28	1,252	1,280	1,740	0.736

表7 杭曲げモーメントの検討

曲げモーメント (kN・m)	発生応力			鉄筋比の比較		
	地盤変位による 応力	慣性力	設計応力	必要鉄筋比reqPt	設計配筋dPt	reqPt/dPt
	929	2,346	3,275	0.435%	0.454%	0.958

【参考】基準地震動S1による杭の発生応力（せん断力）

➤ 基準地震動S₁による杭の発生応力（せん断力）を図32に示す。

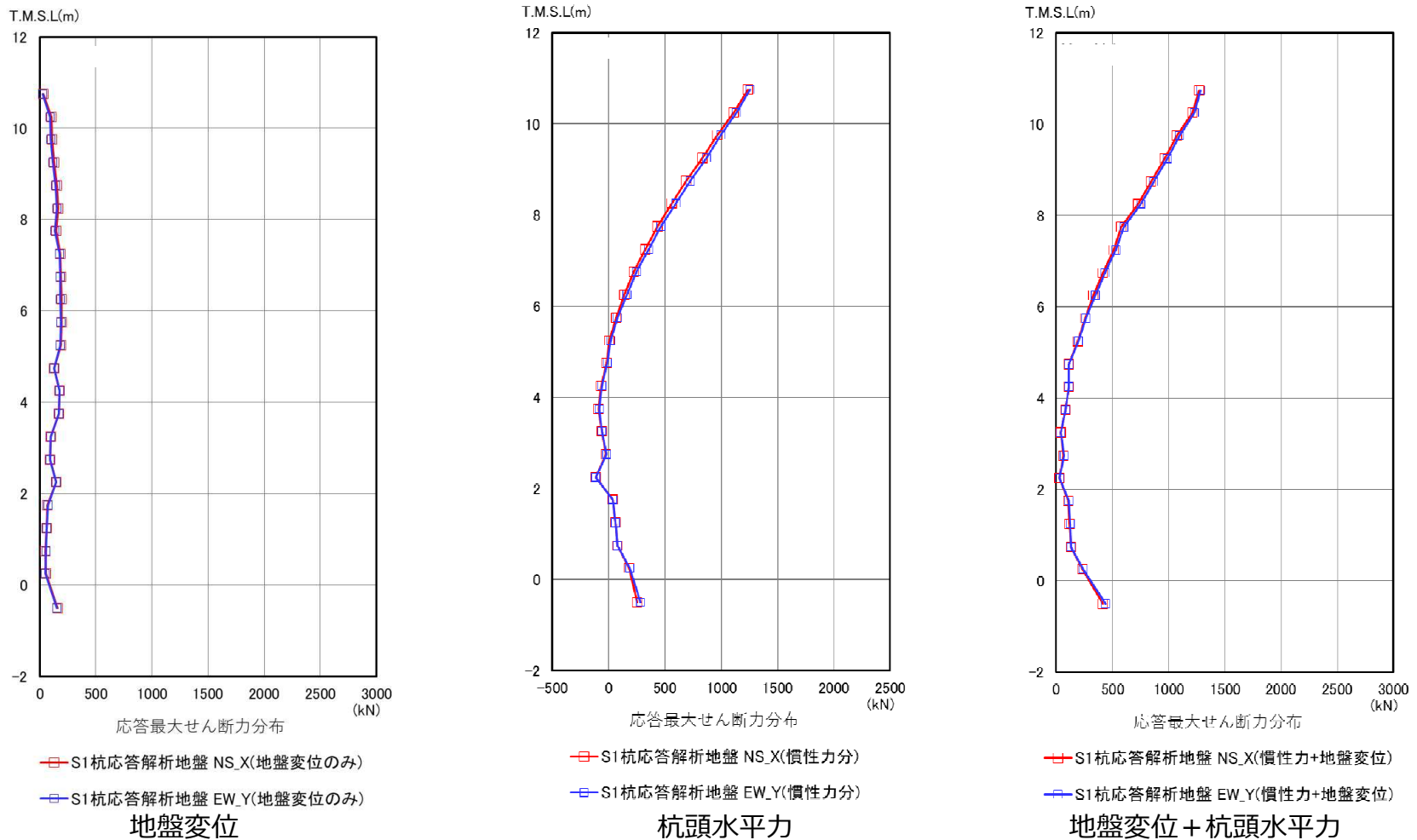


図32 杭のせん断力図（静的解析）

➤ 基準地震動S₁による杭の発生応力（曲げモーメント）を図33に示す。

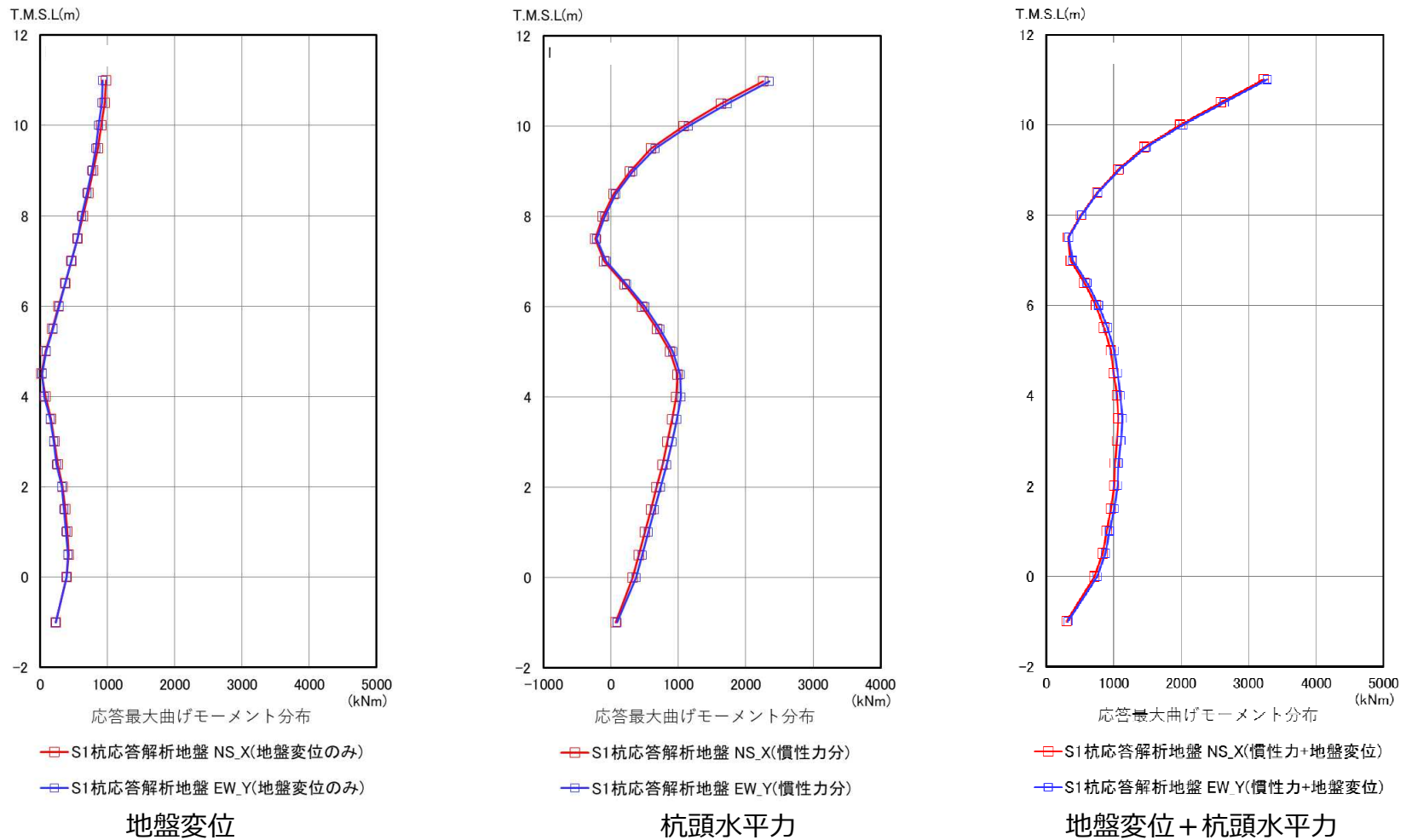


図33 杭の曲げモーメント図（静的解析）

①モデル化及び境界条件

- 図34に3次元静的FEM解析モデル図を示す。
- モデル化範囲は、大物搬入建屋とセメント改良土の残置範囲を包絡できるように設定した。
- 地盤及び大物搬入建屋は以下の要素でモデル化する。
 - ・地盤：ソリッド要素（弾性）
 - ・大物搬入建屋
 - 基礎スラブ：シェル要素（弾性）
 - 杭：はり要素（弾性）
- 境界条件は以下の通り。
 - 底面：全自由度固定
 - 側面：Z方向固定また、加力方向と平行する側面は面外変形(X方向)も固定する。

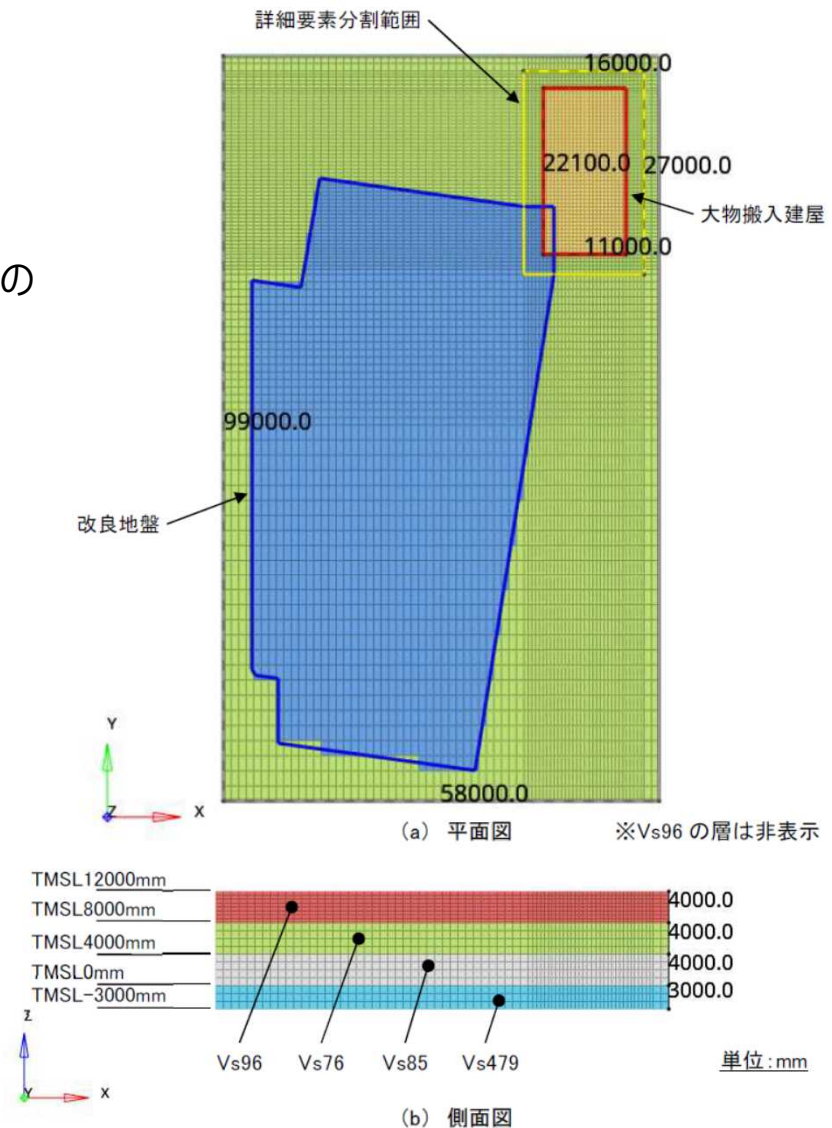


図34 解析モデル図
(Case2:セメント改良土あり)

②地盤及び大物搬入建屋の物性値

➤ 3次元FEM静的応力解析に用いた、大物搬入建屋周辺の解析モデル図を図35に、地盤の物性値、材料物性値及び杭の断面性能を表7～9に示す。



図35 大物搬入建屋周辺の解析モデル図
(Case2:セメント改良土あり)

表7 地盤の物性値

地層	せん断弾性係数 (kN/m ²)	ポアソン比
埋戻土1	1.79×10^4	0.483
埋戻土2	1.14×10^4	0.483
埋戻土3	1.43×10^4	0.483
西山層	3.99×10^5	0.451
セメント改良土	5.42×10^5	0.410

表8 大物搬入建屋（基礎スラブ及び杭）の材料物性値

	ヤング係数 (kN/m ²)	ポアソン比
基礎スラブ	2.88×10^7	0.2
杭	2.50×10^7	0.2

表9 杭の断面性能

外形 D(mm)	全断面積 (m ²)	せん断 断面積 A _S (m ²)	断面二次 モーメント I (m ⁴)
1,800	2.545	2.313	0.5153