

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7月5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、非破壊試験）を示し、No.8杭頭部の鉄筋の破断・変形及びNo.6・8杭中間部の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杭の特異な損傷の主な要因は、地震が発生した際にセメント改良土の影響で杭に応力集中したものと推定した。（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せん断力の**応力集中の傾向**を確認した。その結果、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部のせん断力が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。

②No.6・8杭中間部は、セメント改良土により拘束されたことに着目し、3次元FEM静的応力解析を行い、セメント改良土と埋戻土の境界部における曲げモーメントの発生状況を確認した。その結果、セメント改良土を模擬したケースでは、No.8杭中間部に大きな曲げモーメントが発生することを確認した。またNo.8杭頭部の損傷を**模擬**した場合、No.6杭中間部に大きな曲げモーメントが発生することを確認した。

以上から、No.6・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。

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 杭の健全性調査結果
- 1.6 杭の原設計の内容
- 1.7 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杭のせん断力に着目した解析
- 3.3 No.8杭のせん断力に着目した解析のまとめ
- 3.4 No.6・8杭の曲げモーメントに着目した解析
- 3.5 No.6・8杭の曲げモーメント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号機原子炉建屋の東側に隣接する、基礎平面は11.0m（NS方向）×22.1m（EW方向）、地上高さは7.6mの鉄筋コンクリート造1階建ての建物である。
- ▶ 平面図、杭伏図、断面図及び杭配筋図を図1～4に示す。

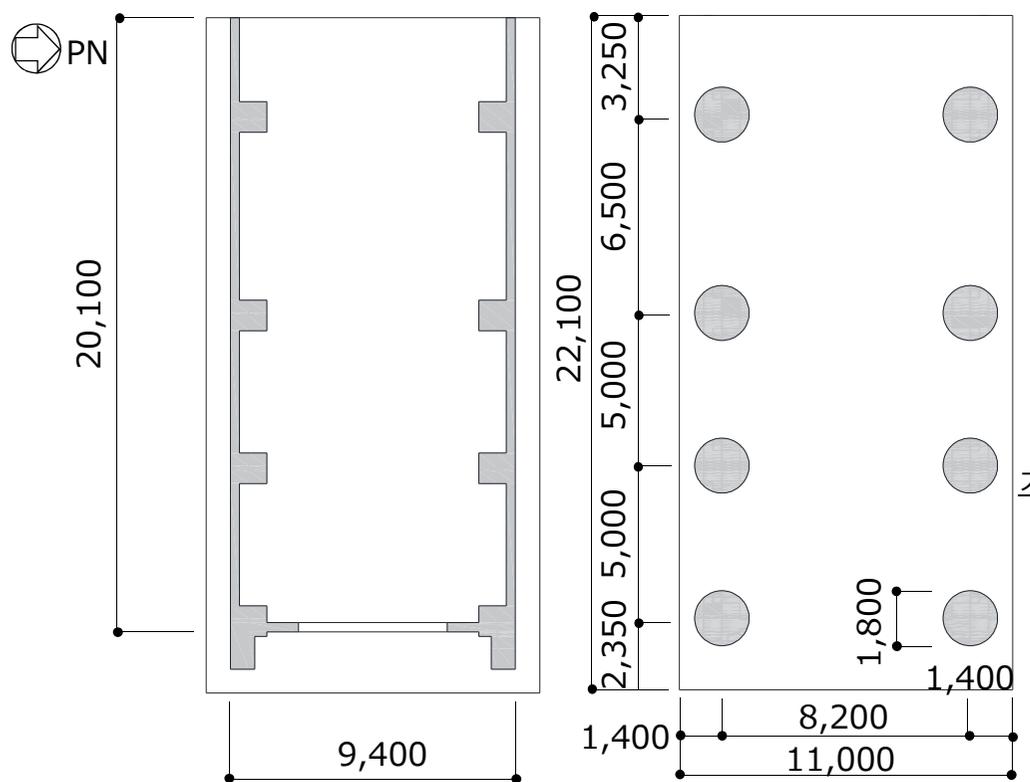


図1 平面図（単位：mm） 図2 杭伏図（単位：mm）

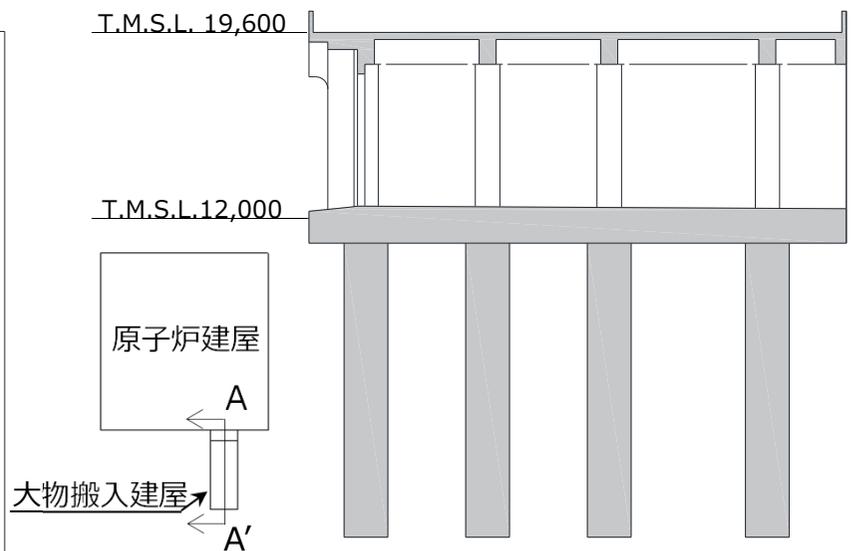


図3 A-A'断面図（単位：mm）

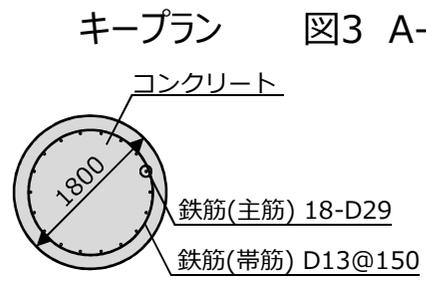


図4 杭配筋図

使用材料
 コンクリート： $F_c = 32.3 \text{ (N/mm}^2\text{)}$
 鉄筋：SD345

注：以下、Plant Northを「PN」といい、東京湾平均海面を「T.M.S.L.」という。



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※1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。

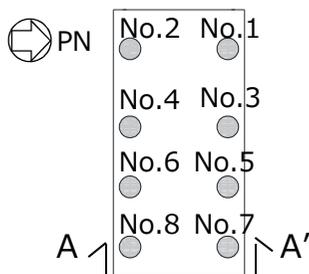


図5 杭伏図

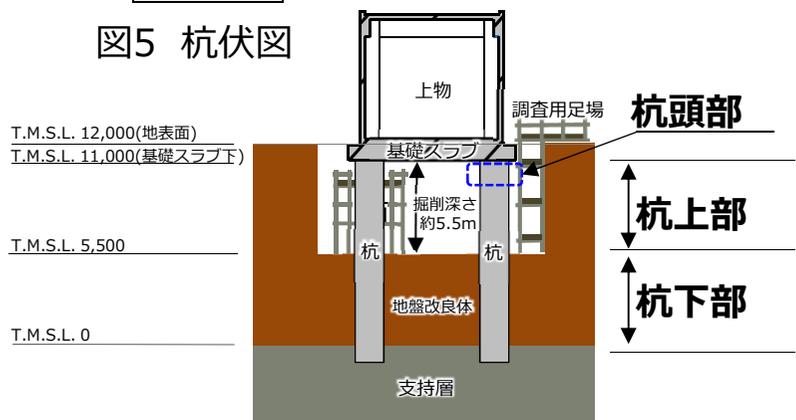


図6 A-A'断面図 (単位：mm)

表1 杭上部調査結果一覧

調査項目 杭No	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※2
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

※1 基礎スラブ下5.5mは、T.M.S.L.5,500

※2 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、この調査結果は、基礎スラブ下約2.5m※まで掘削し、杭表面に浮き・剥落を確認した範囲のコンクリートをはつり取る前のものである。
- ✓ 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。

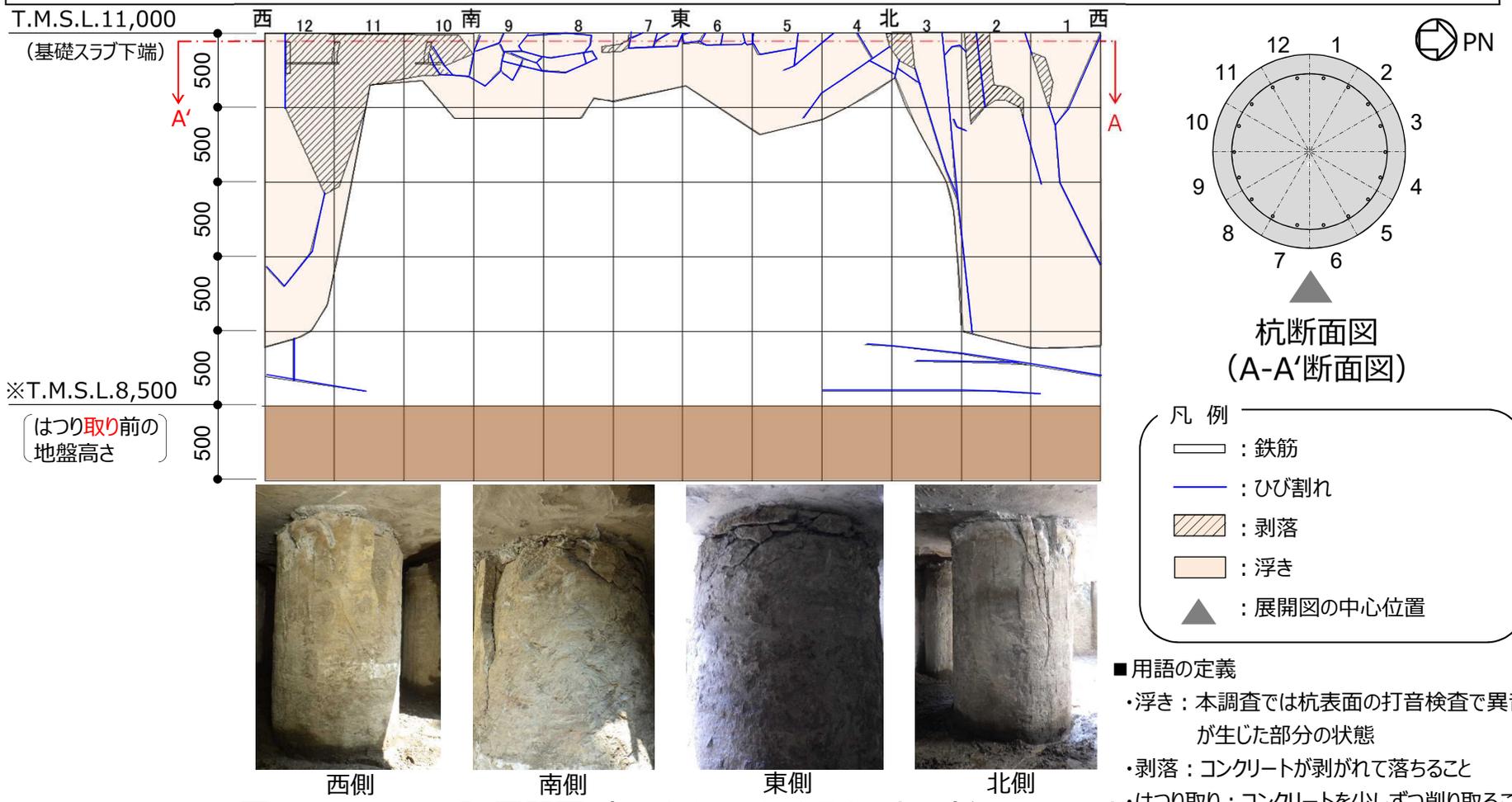


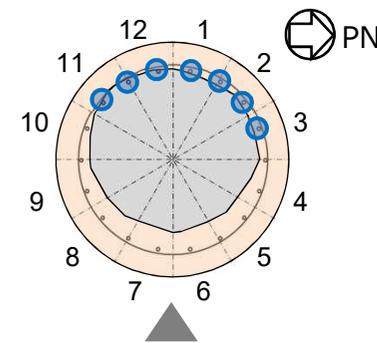
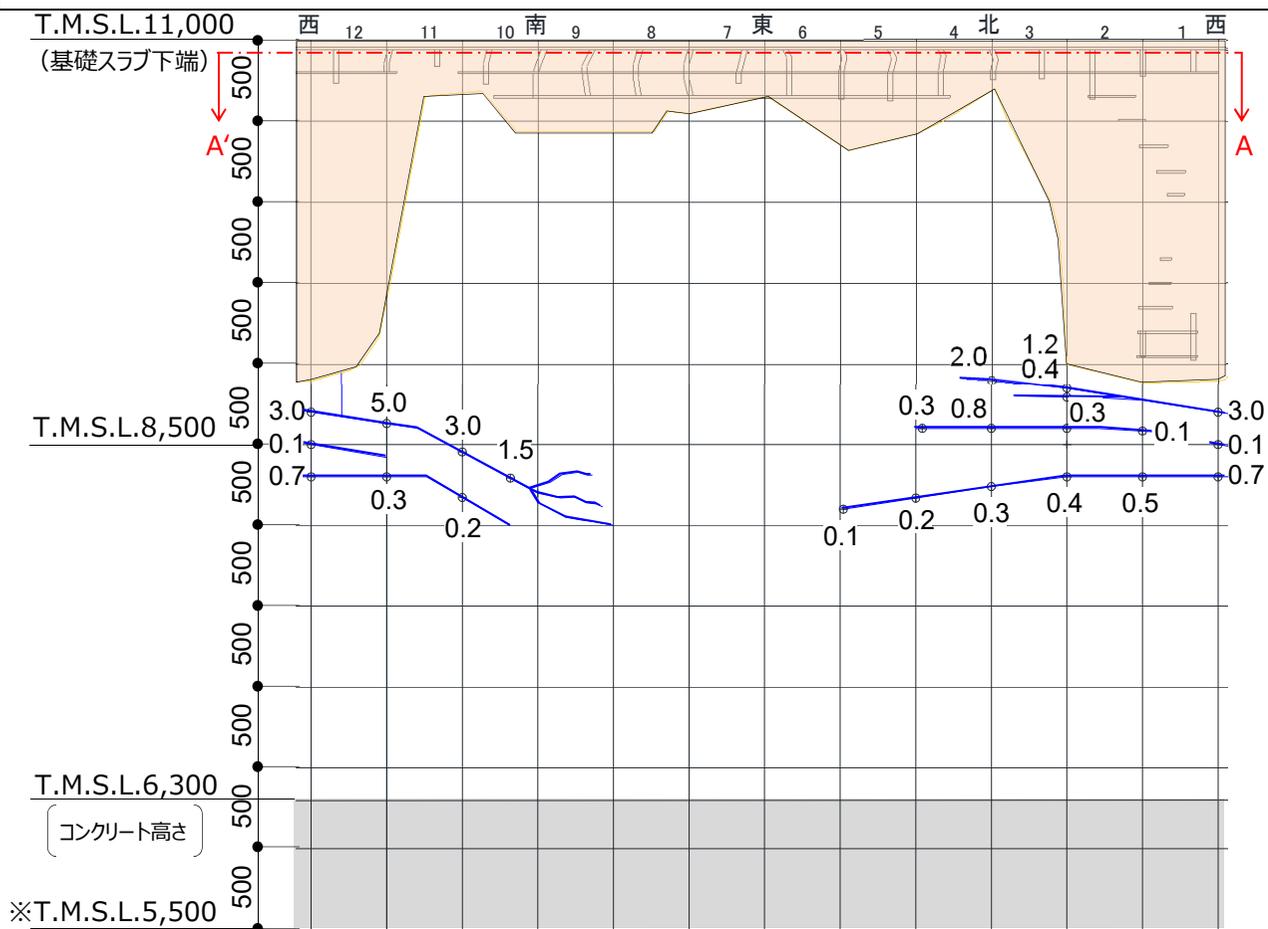
図7 No.8杭上部 展開図 (コンクリートはつり取り前) (単位: mm)

■用語の定義

- ・浮き: 本調査では杭表面の打音検査で異音が生じた部分の状態
- ・剥落: コンクリートが剥がれて落ちること
- ・はつり取り: コンクリートを少しずつ削り取ること

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：鉄筋の調査結果を次ページに示す。



杭断面図
(A-A'断面図)

凡例

- : 鉄筋
- : ひび割れ (数値: ひび割れ幅)
- : 浮き・剥落 (コンクリートはつり取り部)
- ▲ : 展開図の中心位置
- : 主筋の破断箇所

※ 基礎スラブ下5.5mは、T.M.S.L.5,500

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.8杭の鉄筋）

- No.8杭頭部の構造及び損傷状況イメージを図9に示す。
 - ✓ 鉄筋は、西側の7本（No.1～4及びNo.16～18）が破断し、それ以外のNo.5～15は、図9に示すように、杭を基準に西から東の方向に変形している。

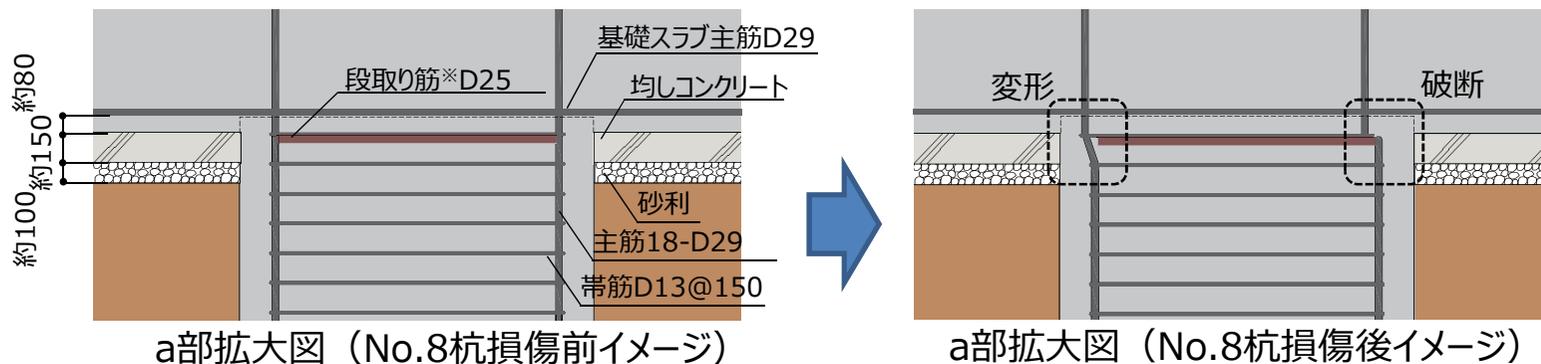
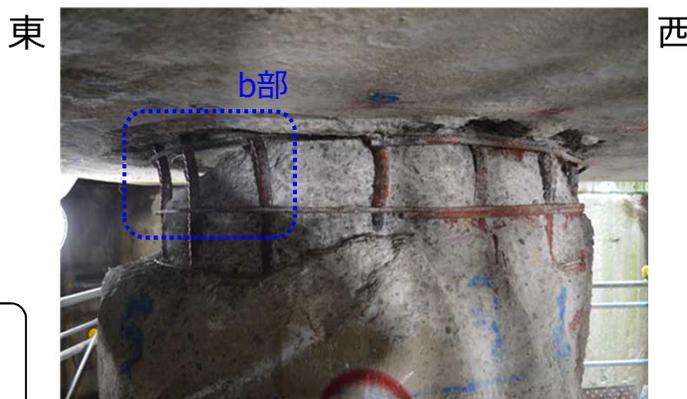
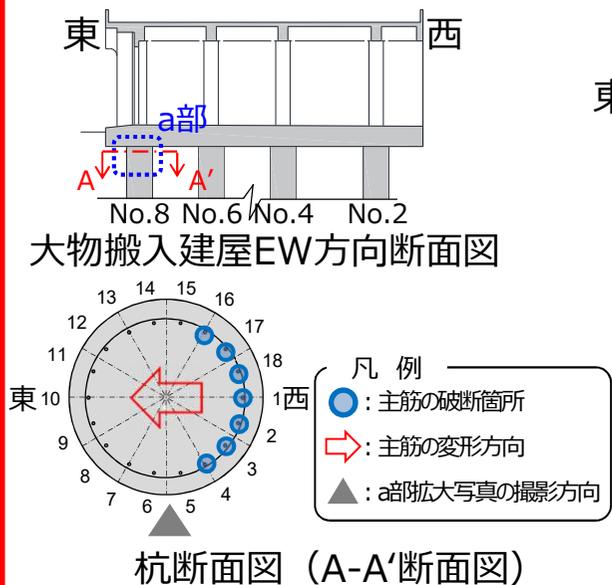


図9 No.8杭頭部の構造及び損傷状況（イメージ）（単位：mm）

※ 鉄筋かご建込用の施工上必要な鉄筋であり、約3,000mm間隔で全杭同様な位置に配筋している
 ©Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. All Rights Reserved. 無断複製・転載禁止 東京電力ホールディングス株式会社

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10に示す。なお、この調査結果は、No.8杭同様に基礎スラブ下約2.5m※まで掘削し、杭表面に浮きを確認した範囲のコンクリートをはつり取る前のものである。
- ✓ 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。

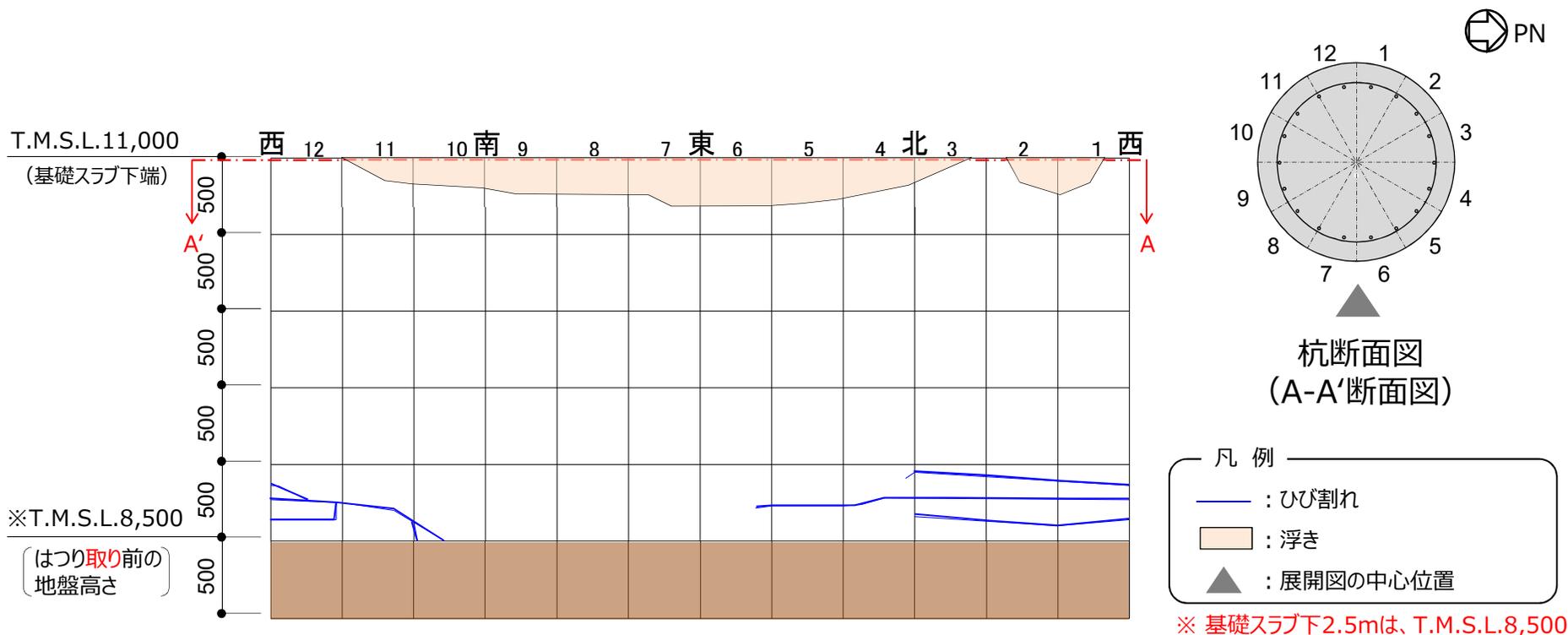
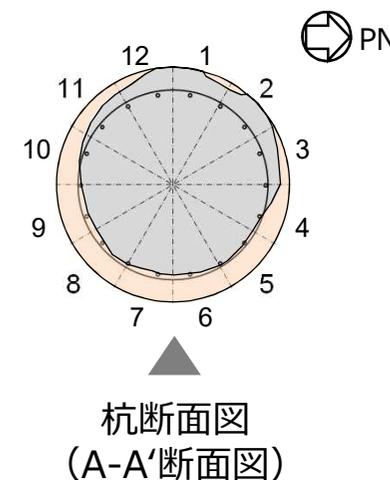
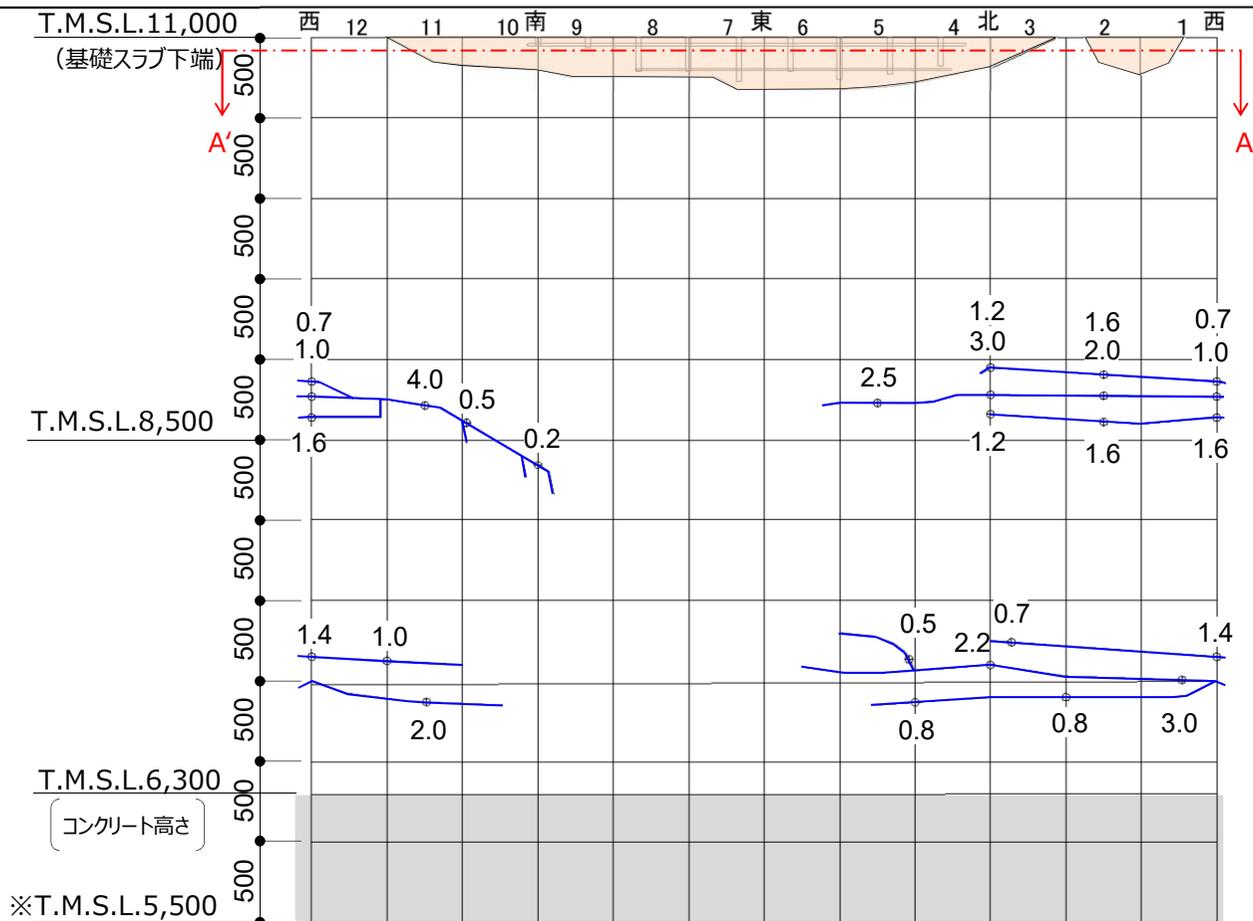


図10 No.6杭上部 展開図（コンクリートはつり取り前）（単位：mm）

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、**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11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。



凡例

- : 鉄筋
- : ひび割れ (数値：ひび割れ幅)
- : 浮き (コンクリートはつり取り部)
- ▲ : 展開図の中心位置

※ 基礎スラブ下5.5mは、T.M.S.L.5,500

図11 No.6杭上部 展開図 (コンクリートはつり取り後) (単位：mm)
 ©Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. All Rights Reserved. 無断複製・転載禁止 東京電力ホールディングス株式会社



1.3 杭上部の調査結果

➤ 基礎スラブ下約5.5m※まで掘削し、**杭表面に浮きを確認した範囲のコンクリート**をはつり取った後のNo.1～5・7杭上部の調査結果を図12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。

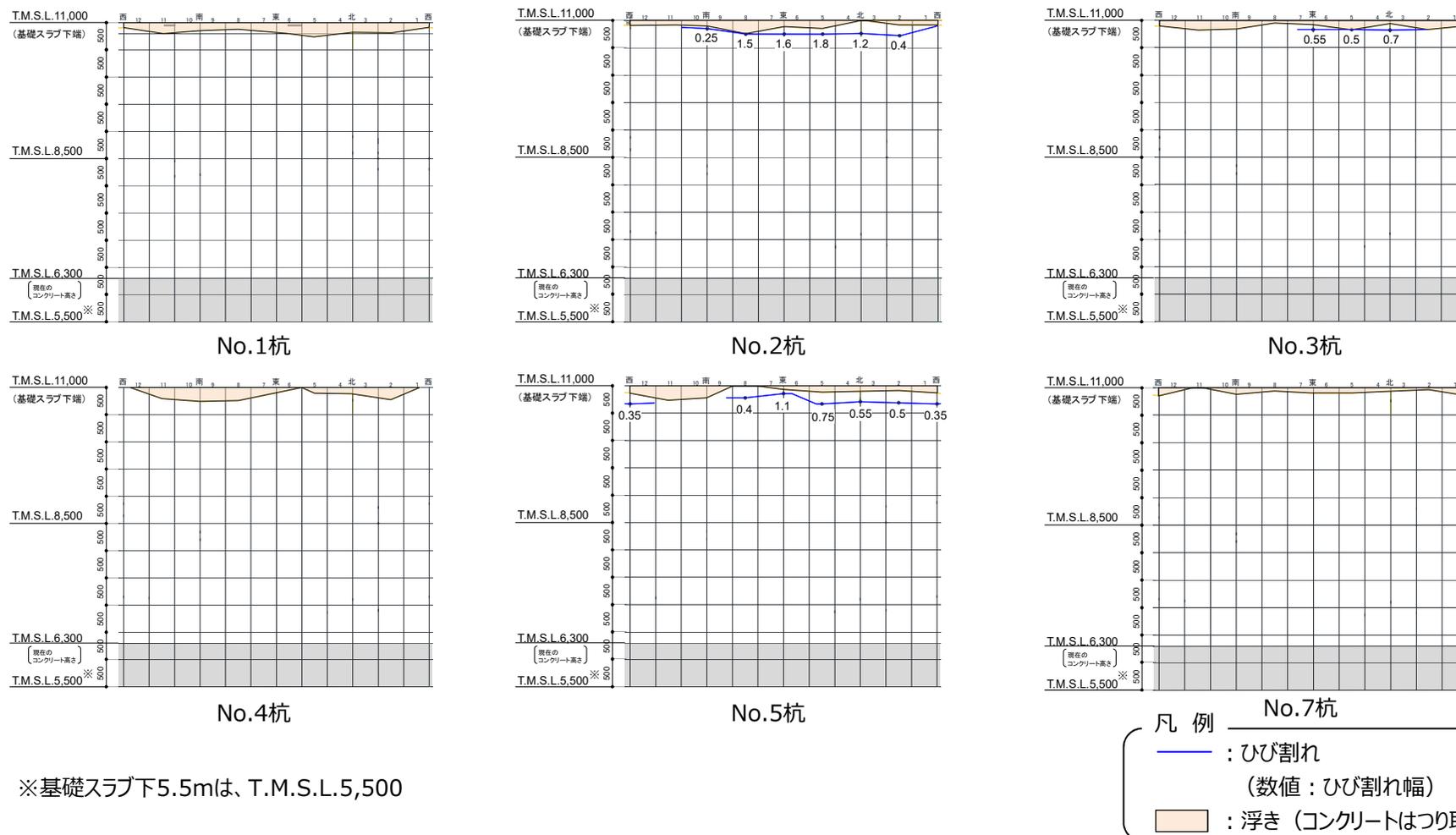


図12 No.1～5・7杭上部の調査結果 (コンクリートはつり取り後) (単位: mm)

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ため、図13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、全ての杭下部で「健全性が高い」と判定した。
- 判定基準例を図14に示す。
- 次ページ以降の図15にNo.1～4杭の結果を、図16にNo.5～8杭の非破壊試験結果を示す。

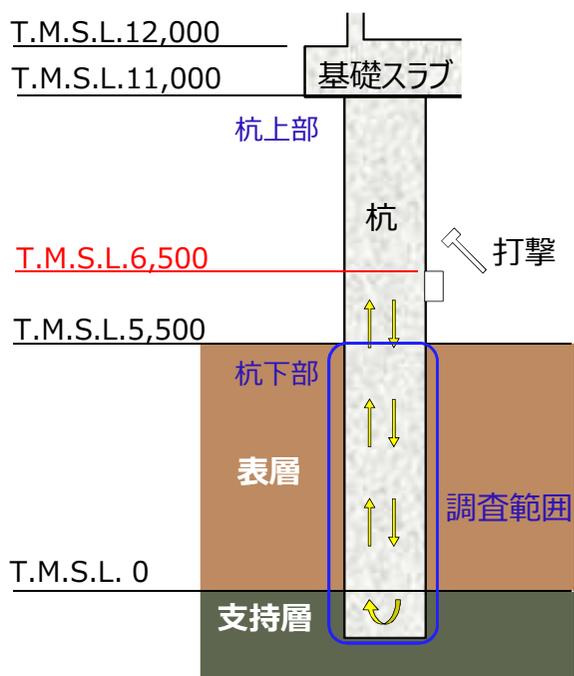
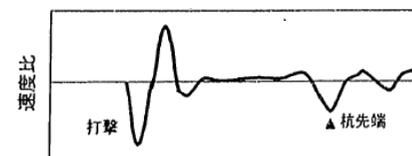
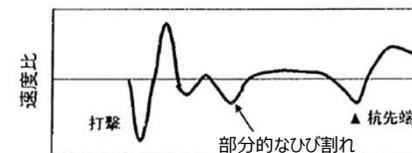


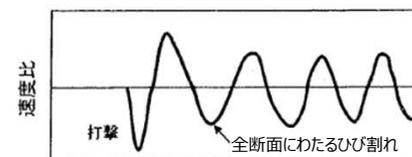
図13 非破壊試験概要図（単位：mm）



杭長
A：健全性が高い



杭長
B：部分的な損傷の疑いあり



杭長
C：杭の全断面に及ぶ損傷の疑いあり

図14 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15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、先端反射以浅（手前）に下向きのピークがみられないため、健全性は高いと判断した。

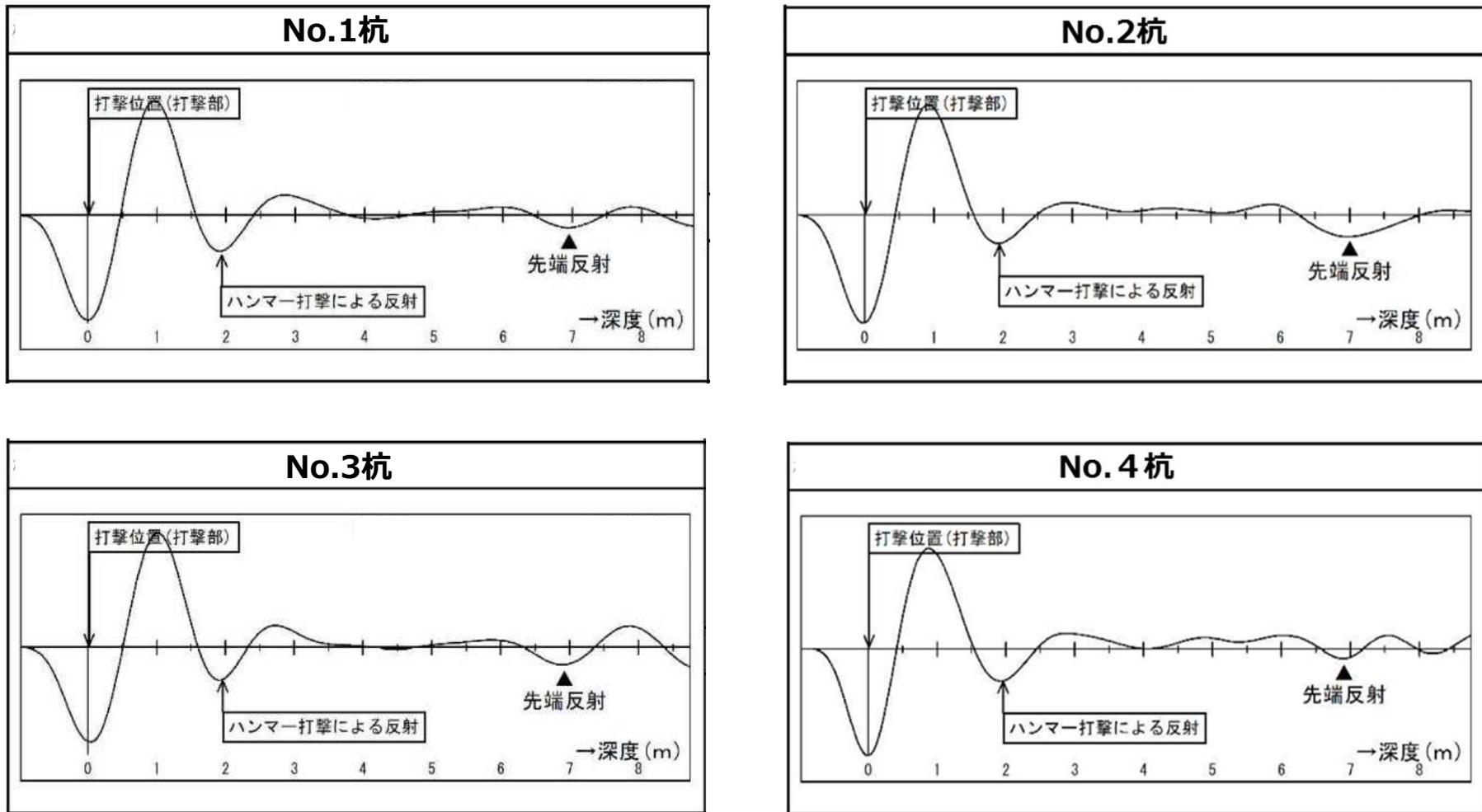


図15 No.1～4杭下部の非破壊試験結果

1.4 杭下部の調査結果

➤ 図16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、先端反射以浅（手前）に下向き（負）のピークがみられないため、健全性は高いと判断した。

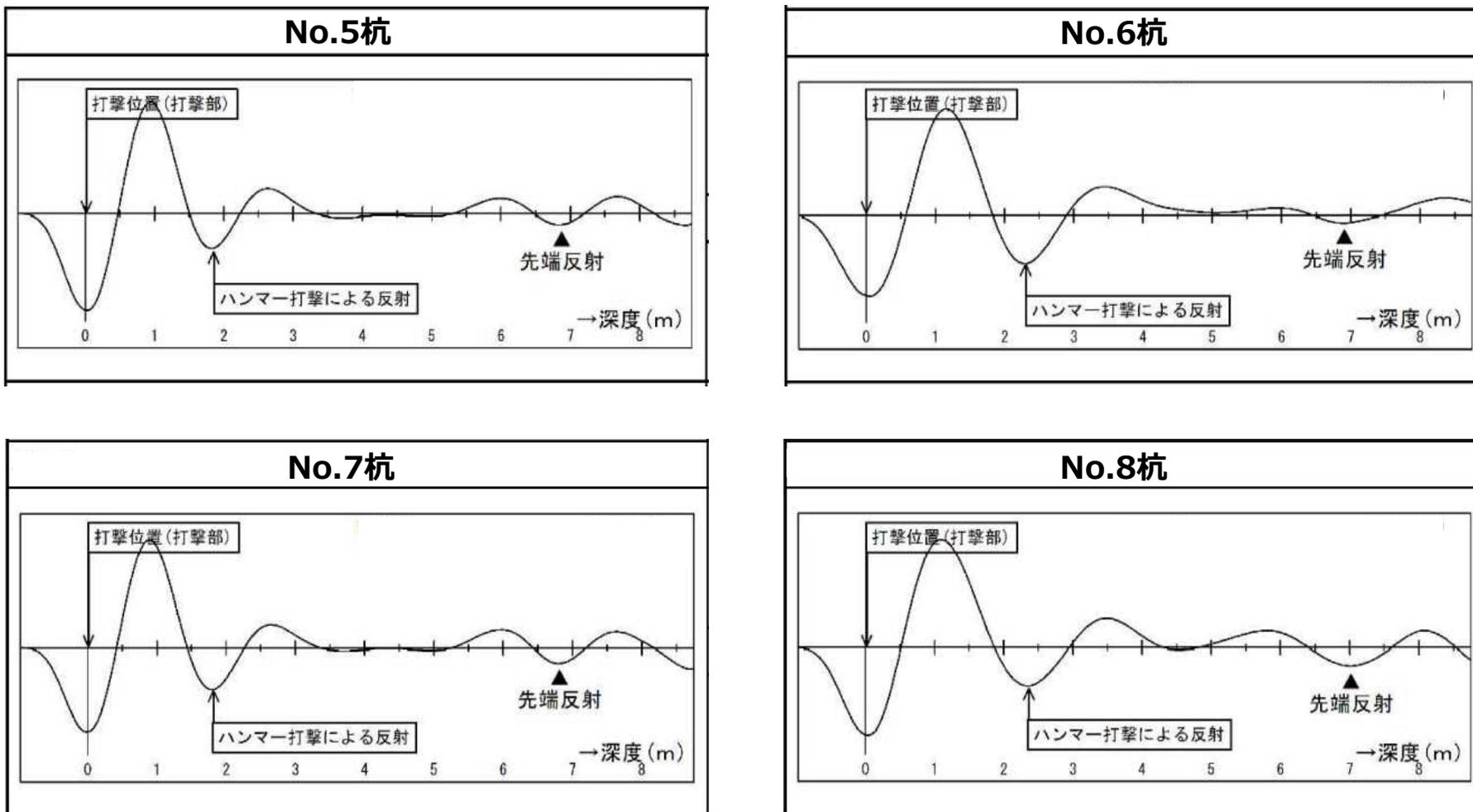


図16 No.5～8杭下部の非破壊試験結果

1.5 杭の健全性調査結果

【No.8杭の損傷状況】

- 杭頭部の西側の7本の鉄筋が破断し、**それ以外の**11本の鉄筋は、杭を基準に西から東の方向に変形している。
- 基礎スラブ下端から約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。

【No.6杭の損傷状況】

- 基礎スラブ下端から約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。
- 基礎スラブ下端から約0.3mの範囲に主筋内側まで浮きを確認しているものの、コンクリートはつり取り後の目視確認により、鉄筋の損傷はないことを確認した。

【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。
- No.1・4・7杭は、ひび割れが発生していない。

以上から**杭の健全性調査結果の概要をまとめると**

- No.8杭の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**水平**ひび割れが発生している。
- No.1～5・7杭は**耐震**性能に影響を与えるような損傷がない。

1.6 杭の原設計の内容

(1)基本方針

- 大物搬入建屋は、**建設時**、耐震ノンクラスの施設であるが、自主的に耐震設計審査指針※の耐震Aクラス相当で耐震設計を行い、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)解析方法

- 地震応答解析は、図17に示すように、建屋～杭～地盤の相互作用を考慮したモデルとし、地盤は水平成層地盤、杭は8本の杭を集約してモデル化し、薄層要素法により杭と地盤の相互作用ばねを評価している。
- 入力地震動は、T.M.S.L.-155mの解放基盤表面において定義された基準地震動 S_1 から、一次元波動論により杭頭の応答波形を算定し、これを基礎スラブ下端に入力している。
- 杭の断面算定は、スウェイ・ロッキングモデルの地盤ばね反力より算定した上部構造からの慣性力による応力及び一次元波動論による**地盤応答解析**により算定した地盤変位による杭の応力を足し合わせて、杭の応力を算定し、断面の設計を実施している。(図18)



図17 地震応答解析モデルおよび地盤モデル

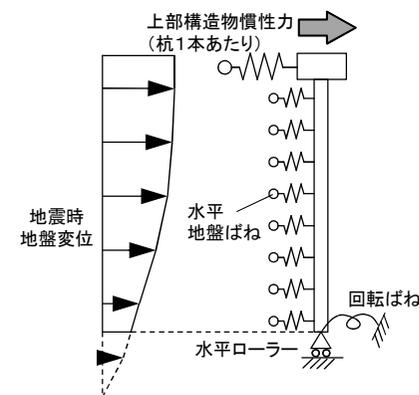


図18 杭の応力評価方法

※発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針（原子力安全委員会，昭和56年7月20日）

1.6 杭の原設計の内容

(3)解析結果

- 杭は8本の杭を集約したモデルで解析しており、同一断面の設計である。
- 杭頭部のせん断力の解析結果を表2に、杭頭部の曲げモーメントの解析結果を表3に示す。
- 杭の最大応力は杭頭部で発生し、せん断力は検定比が0.736（短期）、曲げモーメントは設計配筋比に対する必要鉄筋比の比率が0.958である。
- 断面算定の結果、曲げモーメントはせん断力に比べ設計裕度（許容値に対する発生応力の余裕）が小さい結果である。

表2 杭頭部のせん断力の解析結果

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	慣性力による 応力	設計応力:Q	Qa (kN)	Q/Qa
	28	1,252	1,280	1,740	0.736

表3 杭頭部の曲げモーメントの解析結果

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

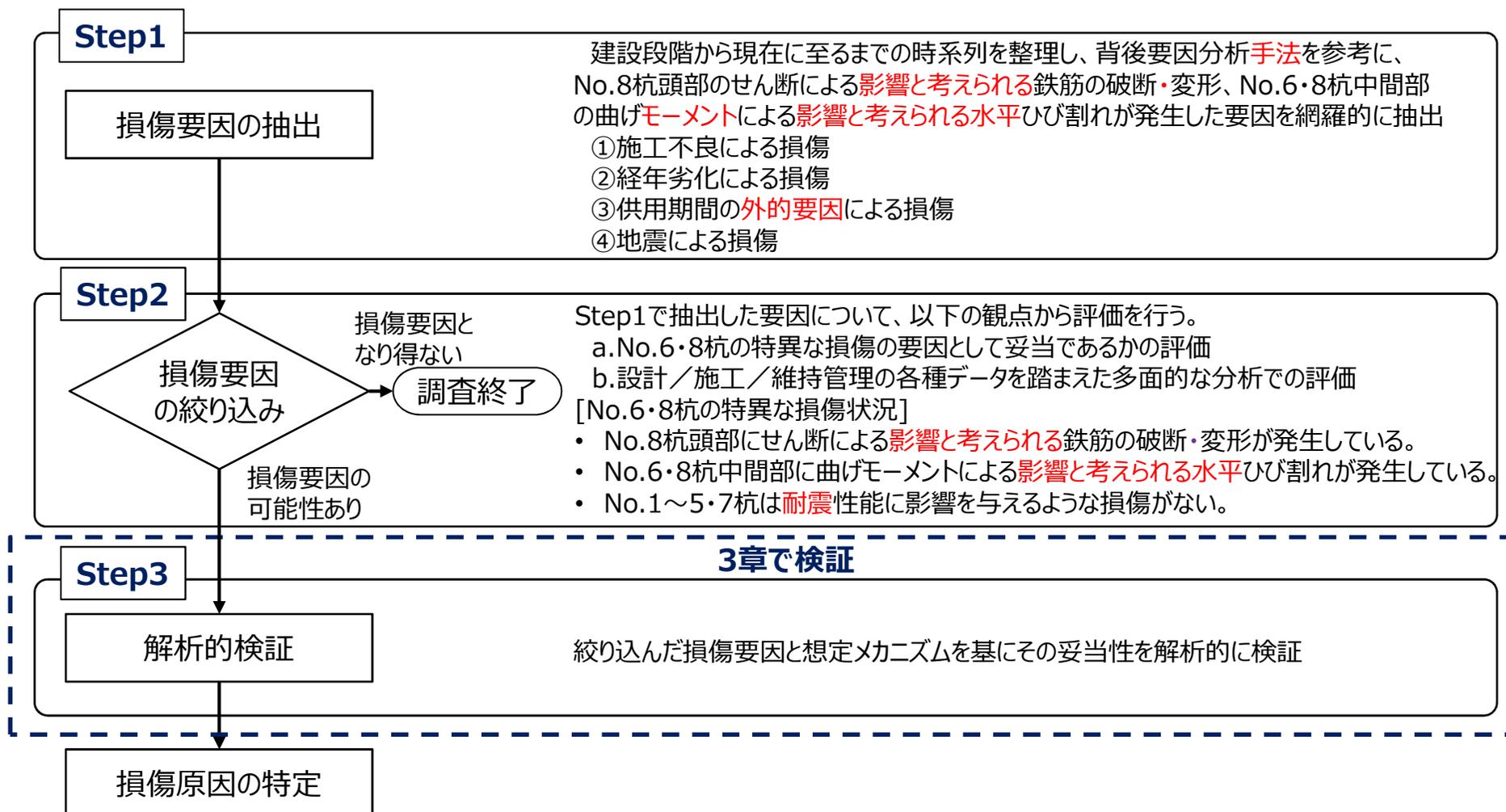
【調査結果及び原設計データに基づく考察】

- 杭の断面算定結果では、曲げモーメントがせん断力に比べ設計裕度（許容値に対する発生応力の余裕）が小さいため、杭頭部がせん断により損傷することは考えにくいですが、調査結果では、No.8杭頭部にせん断による影響と考えられる鉄筋の破断・変形が発生しており、設計での応力状態と実際の損傷状況に差異が見られる。
- 杭に発生する曲げモーメントの最大値は、杭頭部で発生しているが、調査結果では、No.6・8杭中間部に曲げモーメントによる影響と考えられる水平ひび割れが発生しており、設計での応力状態と実際の損傷状況に差異が見られる。

このことから、No.6・8杭の特異な損傷は、設計上考慮されていない要因により損傷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で「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。



➤ Step 1として、No.8杭頭部のせん断による**影響と考えられる鉄筋の破断・変形**、No.6・8杭中間部の曲げ**モーメントによる影響と考えられる水平ひび割れ**を引き起こす要因について、①～④項目で整理し要因を抽出した。

(なお時系列を整理し、背後要因分析手法を参考に、以下に示す主たる要因以外についても要因抽出を実施しているが、本資料においては、特に重要な要因を対象に記載している。)

① 施工不良による損傷

- | | | |
|----------|--------------|--------------|
| (1)使用材料 | (2)鉄筋かご組立・建込 | (3)コンクリート打込み |
| (4)杭頭処理 | (5)杭位置 | (6)掘削 |
| (7)杭鉛直精度 | (8)スライム処理 | |

② 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 | |

③ 供用期間の**外的要因**による損傷

- | | |
|-----------|-------------|
| (1)重機等の衝突 | (2)重車両の走行影響 |
|-----------|-------------|

④ 地震による損傷

- | | |
|---------------------------|-----------------|
| (1)地盤の液状化・揺すり込み沈下 | (2)上部構造の慣性力・ねじれ |
| (3)水平2方向入力 | (4)地盤変位 |
| (5)過去経験した最大の地震 (新潟県中越沖地震) | |
| (6)杭周辺地盤の状況 | |

➤ 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杭頭部にせん断による影響と考えられる鉄筋の破断・変形が発生している。
- No.6・8杭中間部に曲げモーメントによる影響と考えられる水平ひび割れが発生している。
- No.1～5・7杭は耐震性能に影響を与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

2.3 損傷要因の絞り込み

Step2 ①施工不良による損傷

- 施工不良によるNo.6・8杭の特異な損傷要因の評価結果を表4及び表5に示す。
- 杭の品質管理項目のうち、表4に示す項目が杭の耐力に影響を及ぼすと考えられ、No.6・8杭の特異な損傷を引き起こす可能性が高いため、品質管理内容を詳細に確認した。その結果を次項に示す。

表4 施工不良によるNo.6・8杭の特異な損傷要因の評価結果（詳細確認対象）

品質管理項目	No.6・8杭の特異な損傷を引き起こす可能性	工事記録等に基づく評価結果	判定※
(1)使用材料	コンクリート・鉄筋材料の不良により、杭の耐力が低下し、地震によってNo.6・8の特異な損傷に繋がる可能性がある。	コンクリートの設計基準強度・性状、鉄筋の材質等が設計図書通りであることを圧縮強度試験成績表、鋼材検査証明書、配筋検査報告書より確認でき、使用材料の不良は確認されなかった。	○
(2)鉄筋かご組立・建込	鉄筋かごの組立・建込の不良により、杭の耐力が低下し、地震によってNo.6・8の特異な損傷に繋がる可能性がある。	鉄筋径、本数、継手・定着長さ、鉄筋かご傾斜・設置高さ等が設計図書通りであることを施工計画書及び配筋検査報告書より確認でき、鉄筋かご組立・建込の不良は確認されなかった。	○
(3)コンクリート打込み	コンクリート打込みの不良により、杭の耐力が低下し、地震によってNo.6・8の特異な損傷に繋がる可能性がある。	打設中はケーシング、トレミー管共2m以上入っており、余盛高さが管理値以上であること等を施工計画書より確認でき、コンクリート打込の不良は確認されなかった。	○
(4)杭頭処理	杭頭処理位置により、杭頭部の耐力が低下し、地震によってNo.6・8の特異な損傷に繋がる可能性がある。	余盛コンクリートの脆弱部分が撤去されていることを杭頭処理検査報告書より確認でき、杭頭処理の不良は確認されなかった。	○

表5 施工不良によるNo.6・8杭の特異な損傷要因の評価結果

品質管理項目	No.6・8杭の特異な損傷を引き起こす可能性	工事記録等に基づく評価結果	判定※
(5)杭位置	杭位置の不良により、No.6・8杭の特異な損傷に繋がる可能性は低いと考えられるものの、工事記録等により不備がなかったことを確認する。	杭芯の位置ずれが管理値を満足していること杭芯検査報告書より確認でき、杭位置の不良は確認されなかった。	○
(6)掘削	掘削の不良により、No.6・8杭の特異な損傷に繋がる可能性は低いと考えられるものの、工事記録等により不備がなかったことを確認する。	杭径が管理値を満足していること、支持層（西山層）に定着されていることをケーシング内径寸法検査報告書及びコンクリート打設前検査報告書より確認でき、掘削の不良は確認されなかった。	○
(7)杭鉛直精度	杭鉛直精度の不良により、No.6・8杭の特異な損傷に繋がる可能性は低いと考えられるものの、工事記録等により不備がなかったことを確認する。	ケーシングの鉛直度が管理値を満足していることをケーシング建入検査報告書より確認でき、杭鉛直精度の不良は確認されなかった。	○
(8)スライム処理	スライム処理の不良により、No.6・8杭の特異な損傷に繋がる可能性は低いと考えられるものの、工事記録等により不備がなかったことを確認する。	掘削完了後にスライムが除去されていることをコンクリート打設前検査報告書より確認でき、スライム処理の不良は確認されなかった。	○

※ ○：施工不良なし

2.3 損傷要因の絞り込み

Step2 ①施工不良による損傷

- No.6・8杭の特異な損傷を引き起こす可能性が高い品質管理項目の重点確認結果を表6に示す。
- 元請会社は、総合品質保証計画書に基づき、要求品質を満足するよう施工計画を定め、施工管理及び社内検査を実施しており、一連の品質管理の中で施工不良は確認されていない。
- また、当社は、要求品質が確保されていることを立会又は記録等により確認しており、この品質管理の中で施工不良は確認されていない。

以上から、施工不良により杭が損傷に至ったとは考えにくい。

表6 品質管理項目(1)～(4)の詳細な確認結果

品質管理項目		管理項目	管理方法/基準	当社の確認方法	判定※
(1)使用材料	鉄筋	規格、径、長さ、本数	設計図書通りであること JIS G 3112に適合すること	立会又は記録（鋼材検査証明書）にて確認	○
	コンクリート	セメント種類、スランプ、強度等	設計図書通りであること JASS 5 N(1991年度版)に適合すること	立会又は記録（生コンクリート製造関係工事記録・コンクリート圧縮強度試験成績表）にて確認	○
(2)鉄筋かご組立・建込	鉄筋かご組立	鉄筋径、本数、継手長さ、定着長さ、間隔等	主要部分の実測により設計図書通りであること 鉄筋本数が均等に分布していること 鉄筋あきが所定の数値以上確保されていること 設計図書通りの継手方法が用いられていること	立会又は記録（配筋検査報告書）にて確認	○
	鉄筋かごの建込み精度	鉄筋かごの傾斜 鉄筋かごの設置高さ	垂直性を2方向から確認 鉄筋かご天端をスケールで計測	杭工事施工計画書に基づき、要求品質を満足するよう施工されていることを確認	○
(3)コンクリート打込み	トレミー管・ケーシング引き抜き	初期コンクリート分離防止	ブランジャーを使用していること	杭工事施工計画書に基づき、要求品質を満足するよう施工されていることを確認	○
		コンクリート中への挿入長さ	コンクリート中に所定の深さ以上入っていること		
	コンクリート余盛高さ	余盛高さ	所定の高さ以上余盛されていること		
(4)杭頭処理	杭頭処理状況	余盛コンクリートの除去	JASS 4 (1988年度版)に準拠すること	立会又は記録（杭頭処理検査報告書）にて確認	○

※ ○：施工不良なし

2.3 損傷要因の絞り込み

Step2 ②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

- 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

- 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

- 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。

2.3 損傷要因の絞り込み

Step2 ②経年劣化による損傷

(4)熱及び(5)放射線照射

- 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

- 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

- 中性化及び塩分浸透の劣化メカニズムは、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に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供用期間の外的要因による損傷

(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いことを工事記録により確認している。
- 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、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

- 過去走行した重車両の荷重は、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、供用期間の外的要因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 ④地震による損傷

(1)地盤の液状化・揺すり込み沈下

- 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・大きな地盤の鉛直変動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や揺すり込み沈下が発生しておらず、これらの事象により杭が損傷に至ったことは考えにくい。(図19及び図20)



図19 中越沖地震後の亀裂・噴砂分布図

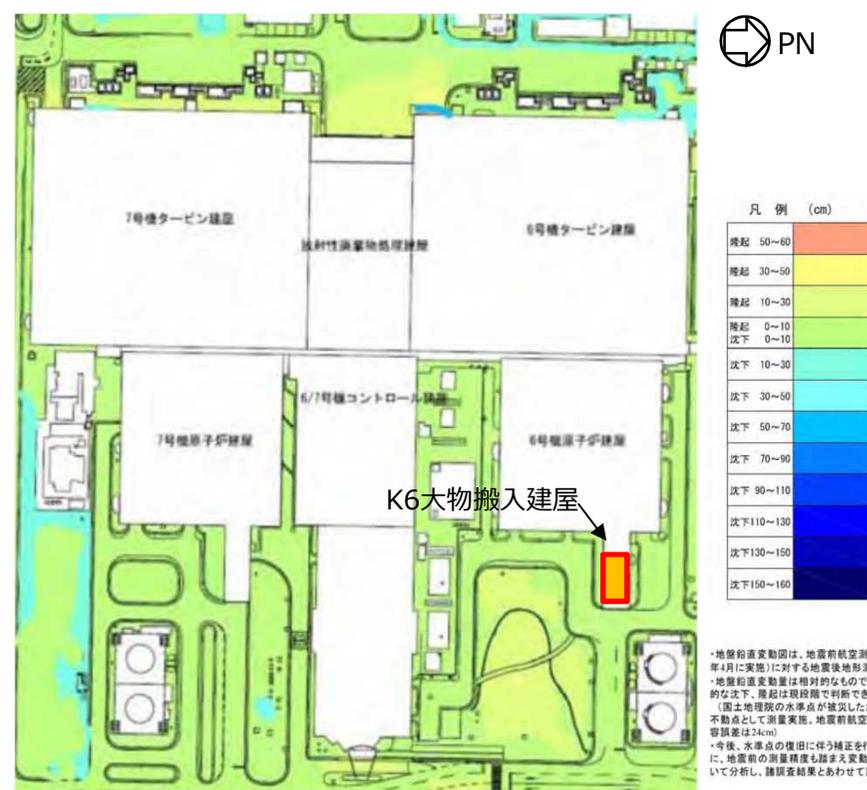


図20 中越沖地震後の地盤鉛直変動図

Step2 ④地震による損傷

(2)上部構造の慣性力・ねじれ

- K6大物搬入建屋は、**建屋形状が左右対称で、かつ、杭配置がほぼ均等であることから、地震時の上部構造からの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21及び図22）

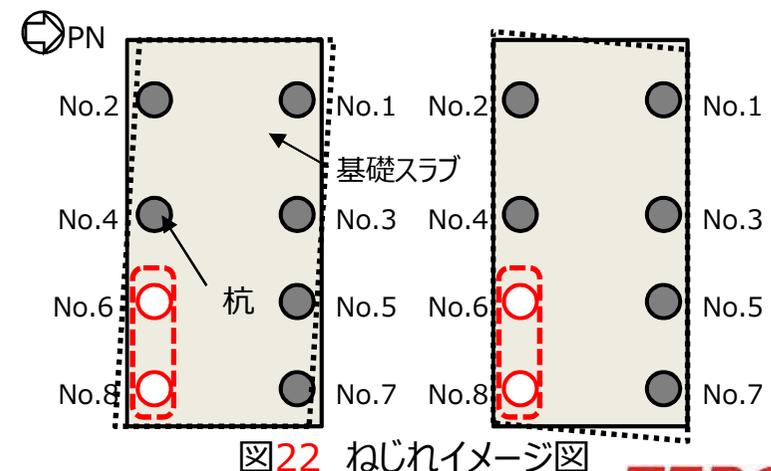
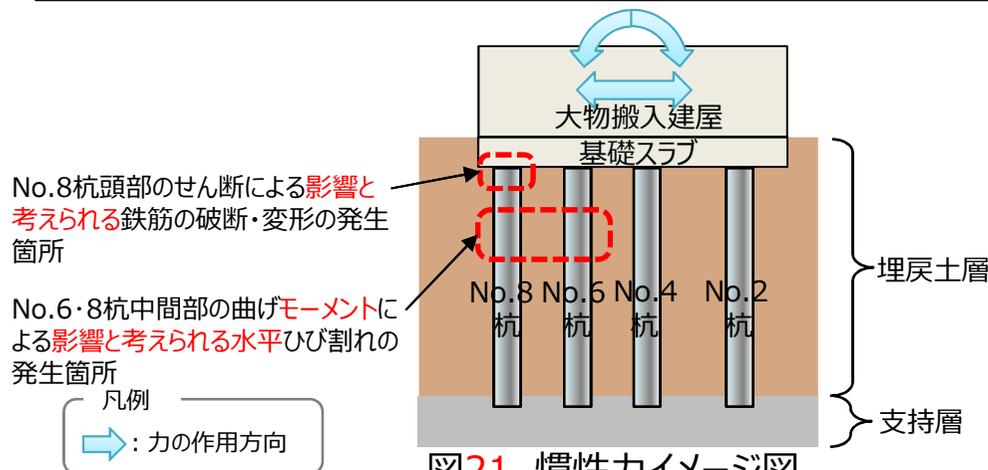
(3)水平2方向入力

- No.8杭は隅杭のため、直交する2方向の荷重が応力集中することが考えられるが、**同様にNo.1・2・7杭も隅杭であることから、No.8杭の損傷は、水平2方向入力の影響による要因ではないと考えられる。**

(4)地盤変位

- 杭の配置状況及び杭周辺の地盤が一様に埋戻土層であることから、地盤変位がNo.6・8杭のみに大きく作用して、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。No.6・8杭周辺地盤の状況によっては、杭に応力集中を発生させる要因となる可能性がある。

次ページ以降で、過去経験した最大の地震である新潟県中越沖地震を対象に、原設計モデルに基づくシミュレーション解析を行い、杭に発生する応力状態を確認する。



2.3 損傷要因の絞り込み

Step2 ④地震による損傷

(5) 過去経験した最大の地震（新潟県中越沖地震）

1) 目的

- ・ 供用期間に経験した最大の地震である、2007年新潟県中越沖地震の観測記録を用いたシミュレーション解析を行い、No.8杭頭部の鉄筋の破断を引き起こすような応力状態であったかを確認する。

2) 解析方法

- ・ 地震応答解析は、図23に示すように、原設計と同様の建屋～杭～地盤の相互作用を考慮したモデルとし、地盤は水平成層地盤、杭は8本の杭を集約してモデル化し、薄層要素法により杭と地盤の相互作用ばねを評価した。（参考資料48ページ参照）
- ・ 入力地震動は、6号機原子炉建屋基礎版上での観測記録を基に算定した解放基盤波を用いた。
- ・ 地盤条件（埋戻土層及び西山層）は、追加の地盤調査結果を踏まえ、原設計時からの地盤の層厚と物性値を見直し、7号機設工認の地盤の支持性能に基づき、設定した。（表7）
- ・ 杭の応力解析においては、原設計と同様に、スウェイ・ロッキングモデルの地盤ばね反力より算定した上部構造からの慣性力による応力および一次元波動論による地盤応答解析により算定した地盤変位による杭の応力を足し合わせて、杭に生じる応力を評価した。（図24）

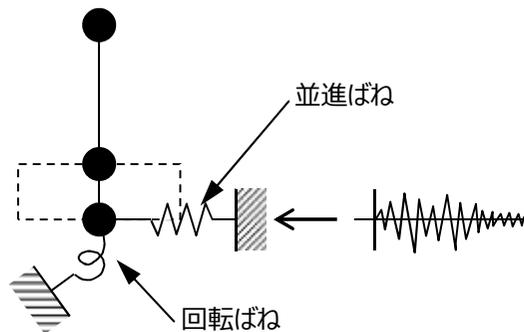


図23 地震応答解析モデル

表7 地盤条件

層深 T.M.S.L (m)	地層	初期中心層厚 (m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	初期中心層弾性係数 G_0 (kN/m ²)	剛性低下率 G/G_0	平均層弾性係数 G (kN/m ²)	剛性低下後 S波速度 V_s (m/s)	減衰定数 h (%)
12	埋戻土	152	19.0	0.483	44,800	0.40	17,900	96	9
8		192	19.0	0.483	71,800	0.16	11,400	76	15
4		215	19.0	0.483	89,400	0.16	14,300	85	16
0	西山層	490	17.0	0.451	416,000	0.96	399,000	479	3
-33		530	16.6	0.446	475,000	0.93	441,000	510	3
-90		590	17.3	0.432	614,000	0.92	564,000	565	3
-136		650	19.3	0.424	832,000	0.94	782,000	630	3
-155		解放基盤	720	19.9	0.416	1,050,000	1.00	1,050,000	720

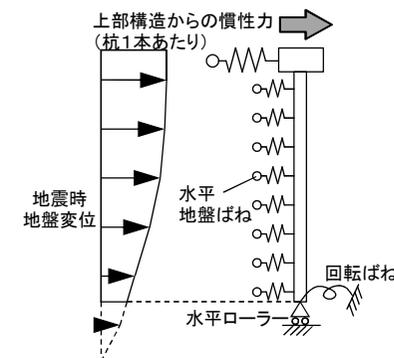


図24 杭の応力解析方法

2.3 損傷要因の絞り込み

Step2 ④地震による損傷

3)解析結果

- 図25及び図26に示すように、杭に発生するせん断力及び曲げモーメントの最大値は杭頭部で発生し断面評価の結果、せん断力及び曲げモーメントは終局耐力以下である。
- 本解析は、基礎の柔性を考慮していないこと及び上部構造からの慣性力と地盤変位による応力の最大値をそれぞれ静的に算定し、その結果を足し合わせて評価していることから、一定の保守性を持ったものと想定され、解析結果とNo.6・8以外の杭の損傷状況を比較しても、解析結果が保守的なものとなっている。

以上から、中越沖地震の観測記録を用いたシミュレーション解析の結果、一定の保守性を持った解析結果であることが想定されるものの、No.8杭頭部の鉄筋破断を引き起こすような応力状態には至らず、杭に応力集中を発生させる設計上考慮されていない要因があったと考える。

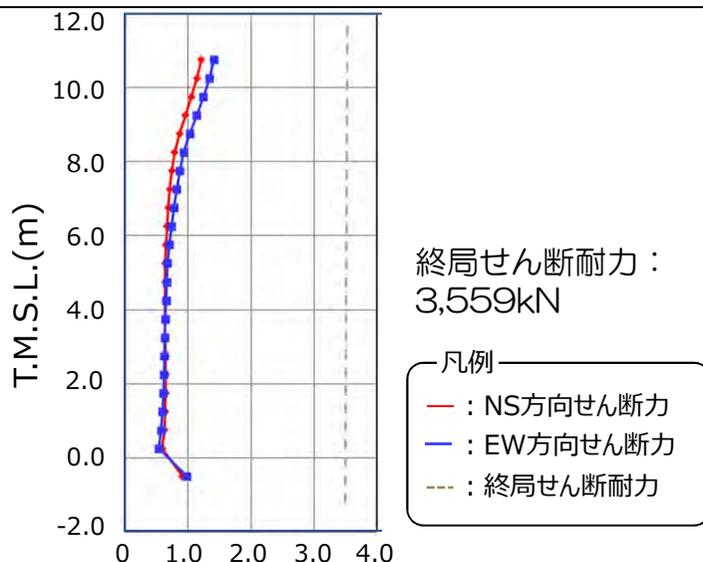


図25 せん断力分布
(単位： $\times 10^3$ kN)

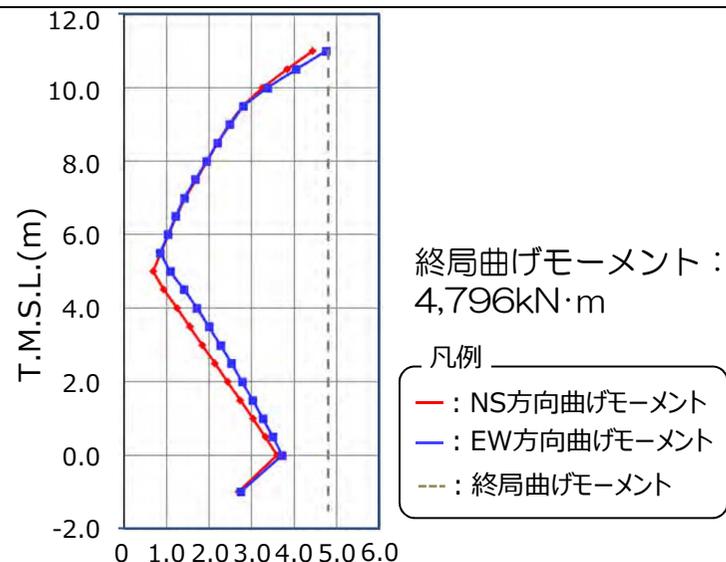


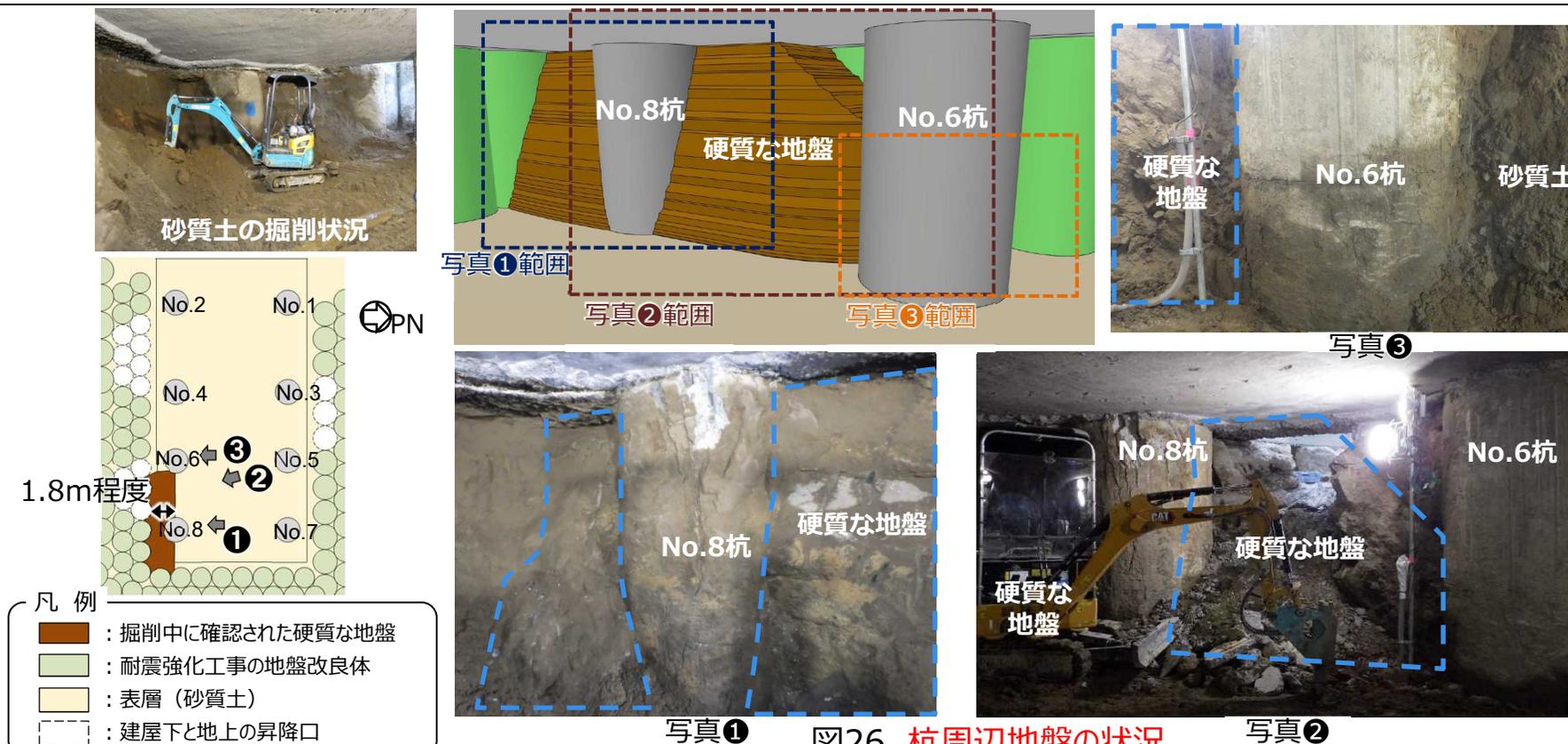
図26 曲げモーメント分布
(単位： $\times 10^3$ kN・m)

2.3 損傷要因の絞り込み

Step2 ④地震による損傷

(6)杭周辺地盤の状況

- (4),(5)に基づき、No.6・8の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、杭に応力集中を発生させる設計上考慮されていない要因の有無について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26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。



2.3 損傷要因の絞り込み

Step2 ④地震による損傷

- 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27にセメント改良土配置図を示す。
- **これにより**、地震が発生した際にセメント改良土の影響でNo.6・8杭に応力が集中する可能性がある。

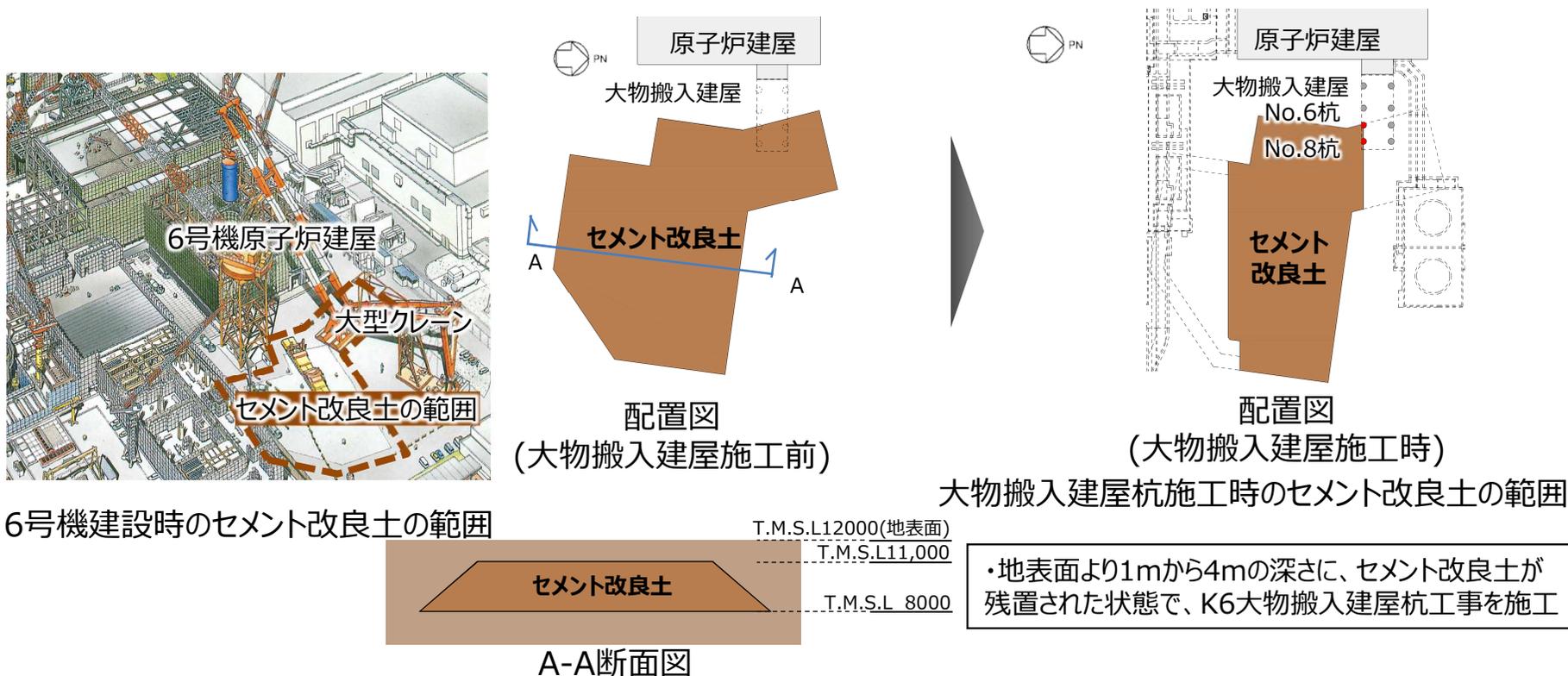


図27 セメント改良土配置図

- 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8に示す。
- ①～③は、No.6・8杭の特異な損傷要因となる可能性は考えにくい。
- ④は、No.6・8杭の周辺地盤状況により、杭に応力集中を発生させる設計上考慮されていない要因がある場合は、地震によって、No.6・8杭の特異な損傷を引き起こす可能性が考えられる。
- 杭周辺地盤の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。これにより、地震が発生した際にセメント改良土の影響で、No.6・8杭に応力集中する可能性がある。

以上から、「セメント改良土による応力集中」を推定要因として絞り込み、Step3で解析的検証を行う。

表8 損傷要因評価結果

分類	要因	評価結果
①	施工不良による損傷	施工不良によりNo.6・8杭が損傷に至ったとは考えにくいと判断した。
②	経年劣化による損傷	経年劣化によりNo.6・8杭が損傷に至ったとは考えにくいと判断した。
③	供用期間の 外的要因 による損傷	供用期間の 外的要因 によりNo.6・8杭が損傷に至ったとは考えにくいと判断した。
④	地震による損傷 ・杭周辺地盤の状況 →セメント改良土による応力集中	地震が発生した際にセメント改良土の影響でNo.6・8杭に応力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、推定要因として絞り込んだ「地震による損傷（セメント改良土による応力集中）」について、「杭の損傷状況」と「杭周辺地盤の状況」から以下の損傷メカニズムを推定した。

「杭の損傷状況」

- ① No.8杭頭部にせん断による影響と考えられる鉄筋の破断・変形が発生している。（図28）
- ② No.6・8杭中間部に曲げモーメントによる影響と考えられる水平ひび割れが発生している。

「周辺地盤状況」（図29）

・No.6・8杭の周辺には、基礎スラブ下約3mの範囲でセメント改良土が中越沖地震時に存在した。
上記より、

- ① No.8杭頭部がセメント改良土に拘束されたため、主に上部構造からの慣性力によるせん断力の影響で損傷した。
- ② No.6・8杭中間部がセメント改良土に拘束されたため、主に埋戻土との境界部の地盤変位による曲げモーメントの影響で損傷した。

と推定した。

杭頭部がせん断による影響と考えられる損傷



はつり後の拡大写真
(鉄筋変形)

図28 No.8杭頭部の損傷状況

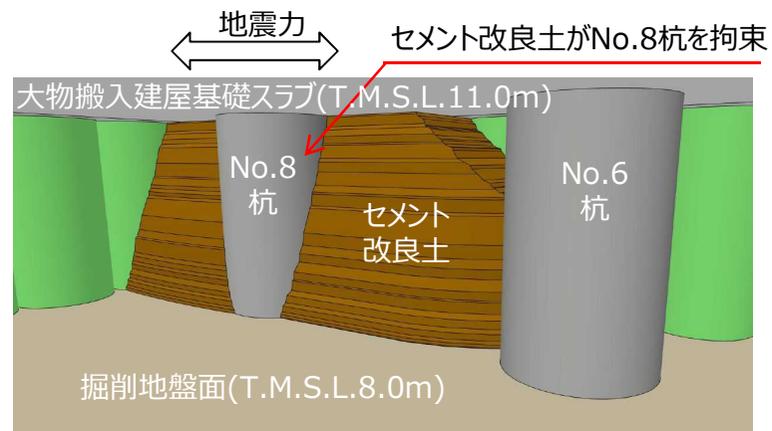


図29 杭とセメント改良土の位置関係

3.2 No.8杭のせん断力に着目した解析

(1)基本方針

- 杭の損傷状況、推定要因、推定される損傷メカニズム（図30）に基づき、次ページ以降で、3次元FEMモデルを用いた静的応力解析を行い、セメント改良土がNo.8杭に及ぼす応力集中の傾向分析を行う。

(2)解析の前提条件

- No.8杭頭部にせん断による影響と考えられる鉄筋の破断・変形が発生していることから、杭頭部のせん断力に着目した解析とする。
- セメント改良土がNo.6・8のみに干渉していることが確認されたため、地震時にセメント改良土が杭を拘束した条件で解析を行う。
- 杭頭部のせん断力は、地震時の上部構造からの慣性力が支配的であり、地盤変位の影響は小さいと考えられるため、上部構造からの慣性力に着目した解析とする。

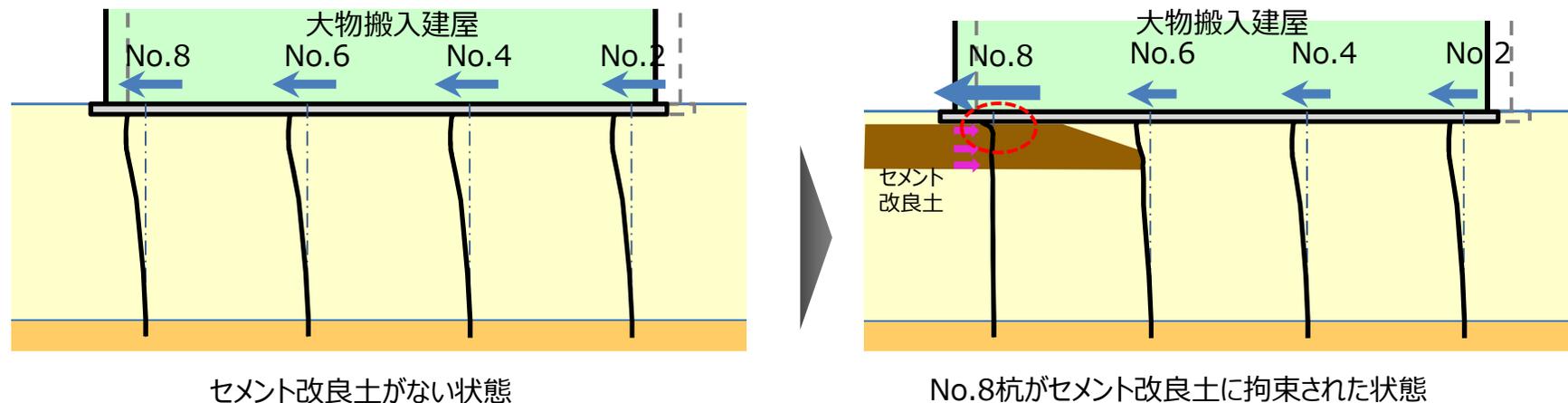


図30 地震力伝達状態（イメージ）

3.2 No.8杭のせん断力に着目した解析

(3)解析目的・条件

- 周辺地盤を考慮した3次元FEMモデルを作成し、基礎を水平方向に仮定の慣性力として単位荷重で加力した場合の静的応力解析を行い、セメント改良土によるせん断力の応力集中傾向を確認する。
- 加力方向は、杭の損傷状況及び中越沖地震の観測記録等よりEW方向の揺れが卓越していたことから西から東方向とする。またせん断力の応力集中の傾向把握を目的としているため1方向加力とする。
- 3次元FEM静的応力解析のイメージを図31に、建屋周辺の解析モデル図を図32に示す。
- 解析ケースは「セメント改良土なし」と「セメント改良土あり」の2ケースとする。

大物搬入建屋の基礎を水平方向に仮定の慣性力として単位荷重で加力し、杭頭部のせん断力の最大値の比率を算出し、応力集中の傾向を確認する。

Case1 : セメント改良土なし

Case2 : セメント改良土あり

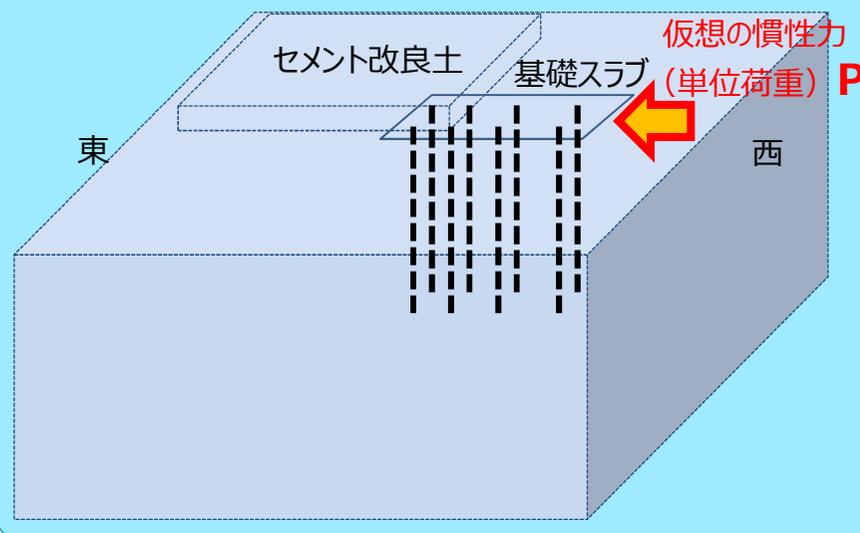


図31 3次元FEM静的応力解析のイメージ

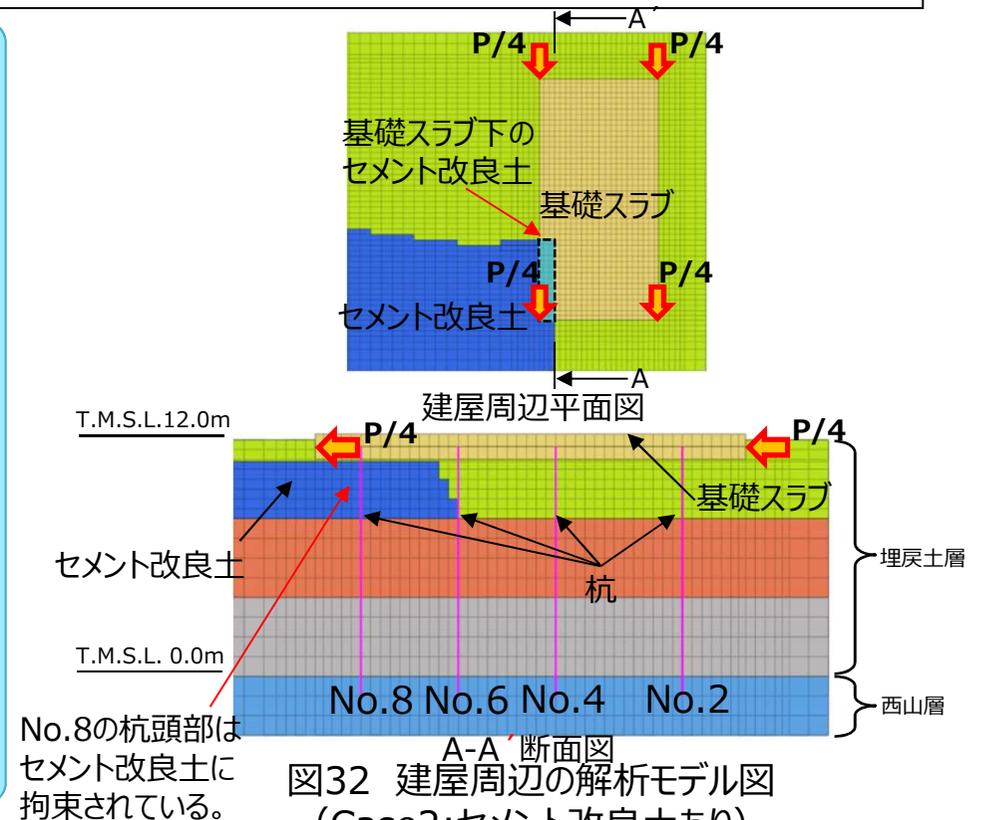


図32 建屋周辺の解析モデル図 (Case2:セメント改良土あり)

3.2 No.8杭のせん断力に着目した解析

(4)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33に示す。

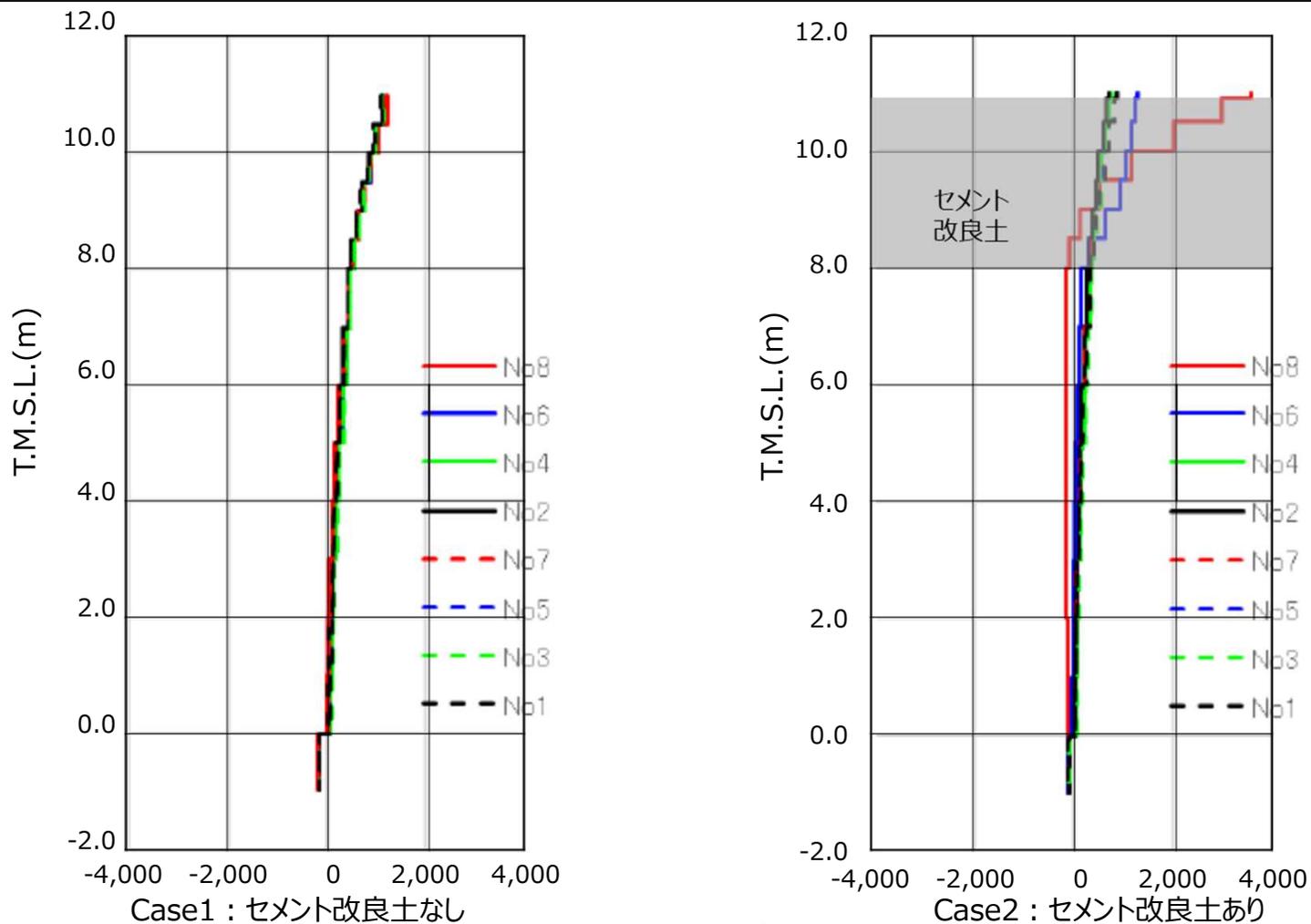


図33 杭のせん断力 (単位: kN)

3.3 No.8杭のせん断力に着目した解析のまとめ

(5) 解析的検証の結果

- 杭頭部のせん断力の最大値の比率を図34に示す。
- 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、杭頭部のせん断力が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。
- なお、NS方向に加力した場合もEW方向と同様にNo.8杭頭部に応力集中する傾向は同じであるが、EW方向の方がより集中度が大きいことから、No.8杭頭部の鉄筋の損傷状況と整合することを確認した。(参考資料52ページ参照)

以上から、No.8杭がセメント改良土に拘束されていたことが、No.8杭頭部の鉄筋の破断・変形が発生した要因と考えられる。

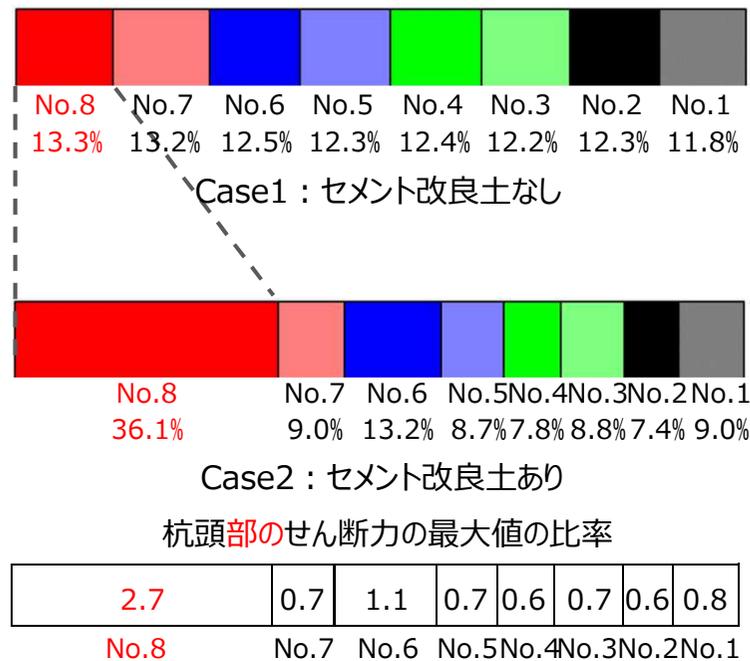
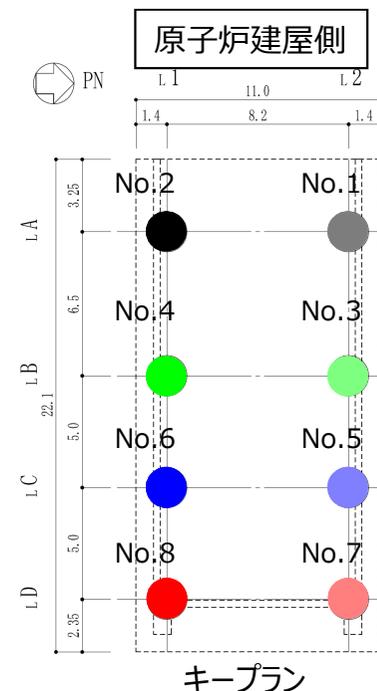


図34 Case2/Case1の比率



3.4 No.6・8杭の曲げモーメントに着目した解析

(1)基本方針

- 杭の損傷状況、推定要因、推定される損傷メカニズム（図35）に基づき、次ページ以降で、3次元FEMモデルを用いた静的応力解析を行い、セメント改良土がNo.6・8杭に及ぼす応力集中の傾向分析を行う。

(2)解析の前提条件

- No.6・8杭中間部に曲げモーメントによる影響と考えられる水平ひび割れが発生しているため、杭中間部の曲げモーメントに着目した解析とする。
- 地震時にセメント改良土がNo.6・8杭を拘束した条件で解析を行う。また、併せてNo.8杭頭部がせん断により損傷した場合の応力状態を確認するため、No.8杭頭部が基礎スラブと接合していない条件も併せて検証する。
- 上部構造からの慣性力による曲げモーメントは杭頭部が支配的であり、杭中間部に与える影響は小さいと考えられるため、杭中間部の曲げモーメントに影響を与える可能性が考えられる地盤変位に着目した解析とする。

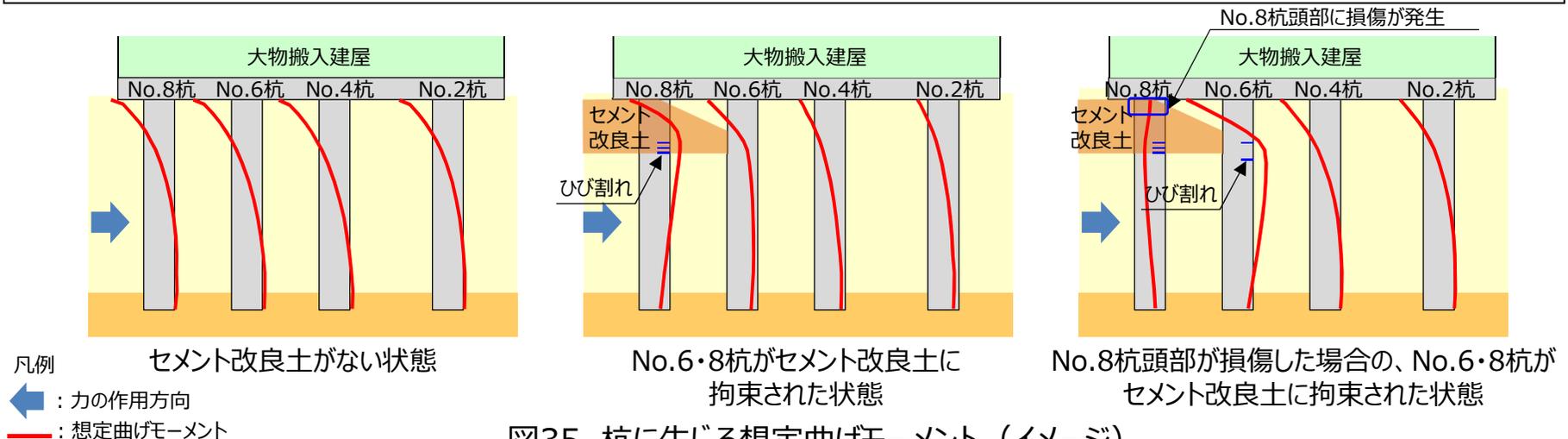


図35 杭に生じる想定曲げモーメント（イメージ）

3.4 No.6・8杭の曲げモーメントに着目した解析

(3) 解析目的・条件

- 周辺地盤を考慮した3次元FEMモデルを作成し、地盤に対して**仮想の慣性力を単位荷重として与えた場合の静的応力解析を行い、セメント改良土と埋戻土の境界部の曲げモーメントを確認する。**
- 3次元FEM静的応力解析のイメージを図36に、建屋周辺の解析モデル図を図37に示す。
- 解析ケースは、「セメント改良土なし」、「セメント改良土あり」に加え、No.8杭頭部がせん断により損傷している場合の応力の応力状態を確認するため、No.8杭頭部が基礎スラブと接合していない条件「セメント改良土あり（No.8杭頭部の損傷を模擬）」の3ケースとする。

地盤に対して**仮想の慣性力として単位荷重**を与え、杭中間部の曲げモーメントの影響を確認する。

Case1：セメント改良土なし

Case2：セメント改良土あり

Case3：セメント改良土あり(No.8杭頭部の損傷を模擬)

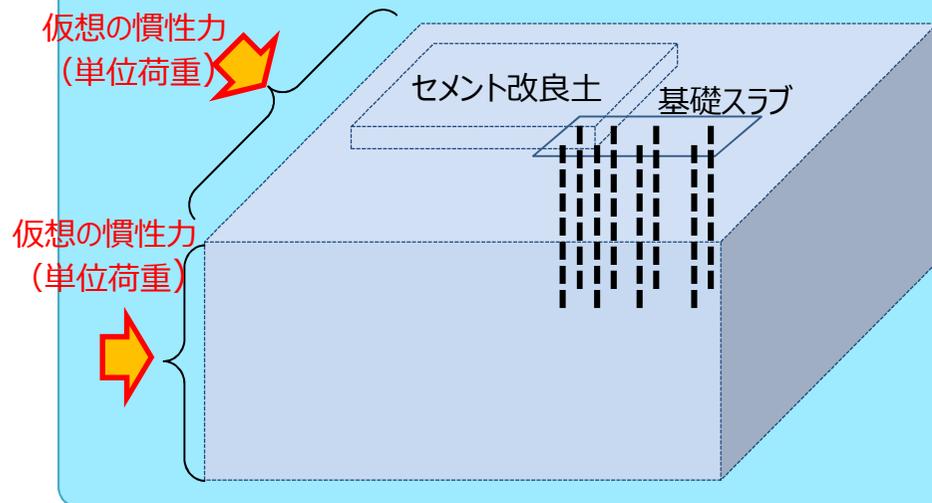


図36 3次元FEM静的応力解析のイメージ

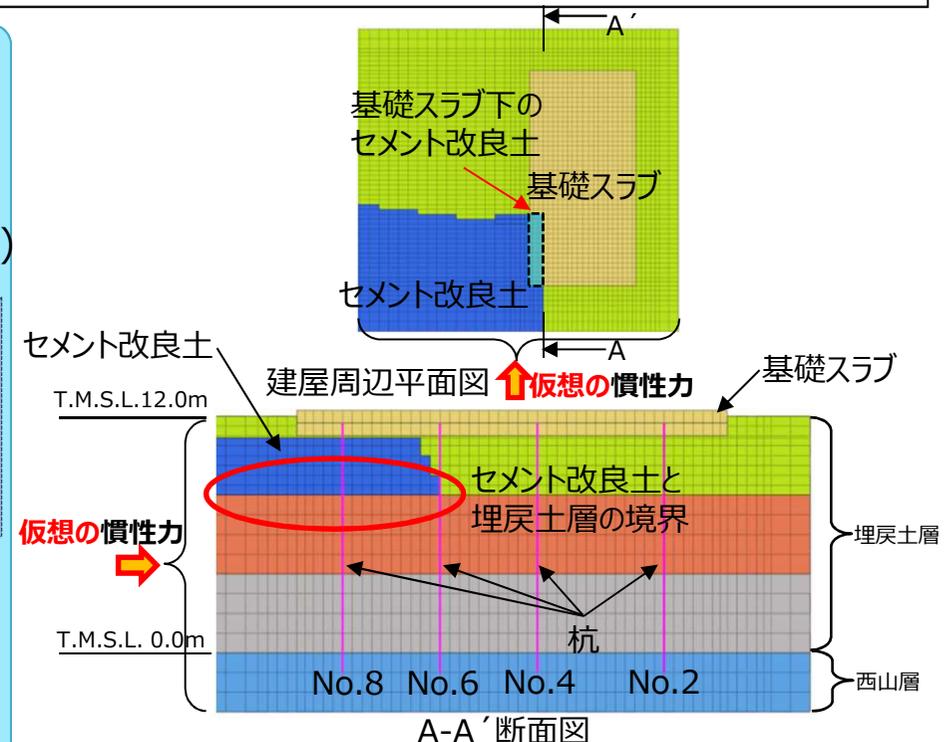


図37 建屋周辺の解析モデル図 (Case2:セメント改良土あり)

3.5 No.6・8杭の曲げモーメントに着目した解析のまとめ

(4) 解析的検証の結果

- Case1~3における曲げモーメントの解析結果を図38に示す。
- セメント改良土なしの場合、全ての杭で曲げモーメントの発生状況に大きな差は見られない。
- セメント改良土ありの場合、No.8杭中間部のT.M.S.L.8m付近で曲げモーメントが大きくなっている。
- No.8杭頭部の損傷を模擬した場合、No.6杭中間部のT.M.S.L.8m付近で曲げモーメントが大きくなっている。
- 今回の解析結果とNo.6・8杭の健全性調査で確認されたひび割れ位置（T.M.S.L.8m前後）は概ね整合している。

以上から、No.6・8杭がセメント改良土に拘束されていたことが、No.6・8杭中間部に水平ひび割れが発生した要因と考えられる。

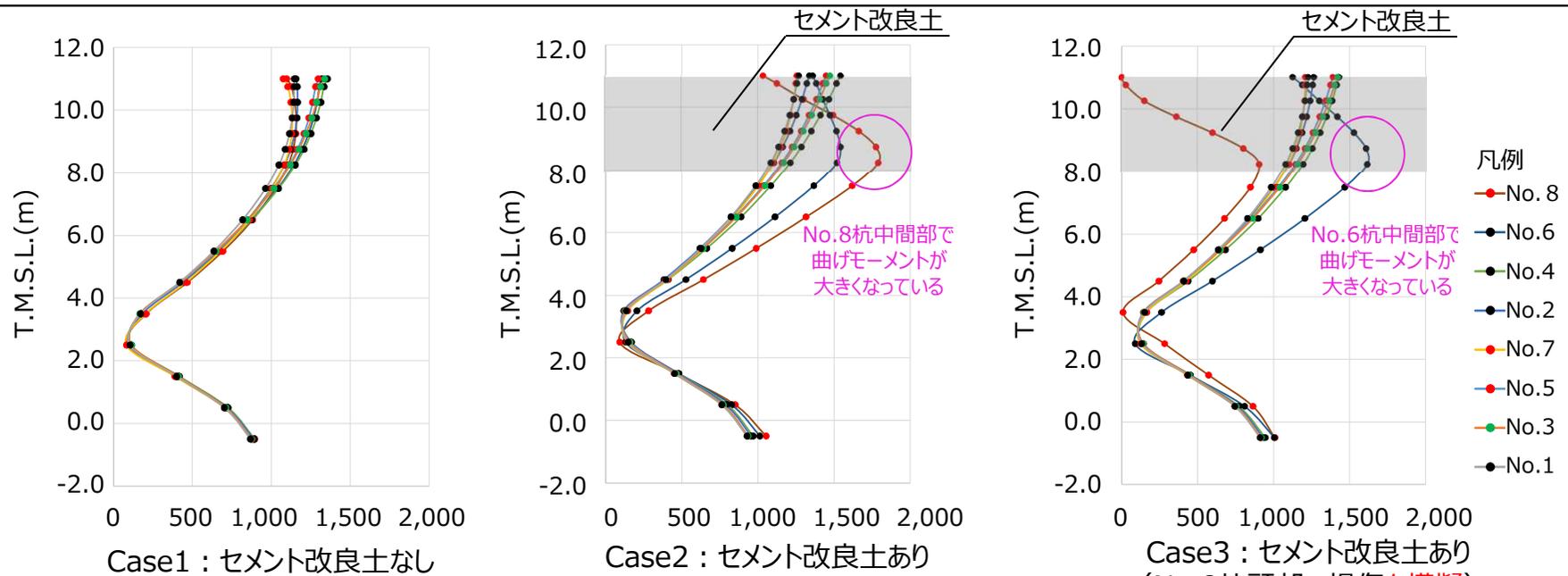


図38 杭の曲げモーメント (単位: kN・m)

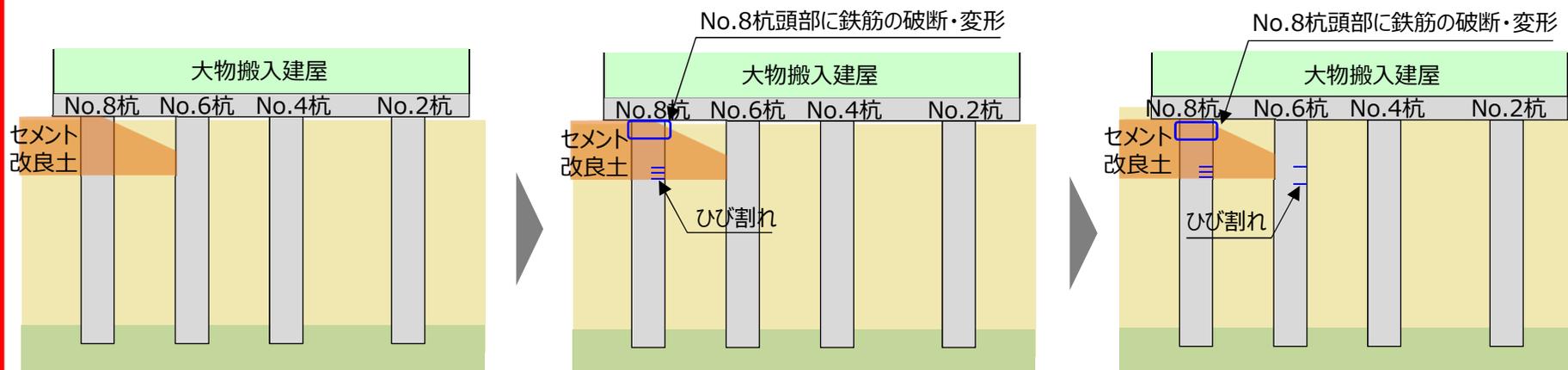
4.1 まとめ

背景	<ul style="list-style-type: none">➤ 新規制基準を踏まえたK6大物搬入建屋の耐震強化工事に伴い、建屋下の掘削作業を進める中、南東側のNo.8杭に損傷を確認した。
1.杭の健全性調査結果	<ul style="list-style-type: none">➤ 杭の健全性調査の結果、南東側のNo.6・8杭に損傷が集中していることを確認した。<ul style="list-style-type: none">✓ No.8杭頭部にせん断による影響と考えられる鉄筋の破断・変形が発生✓ No.6・8杭中間部に曲げモーメントによる影響と考えられる水平ひび割れが発生➤ No.6・8杭の特異な損傷は、設計上考慮されていない要因によるものと推定した。
2.杭の損傷要因の絞り込み	<ul style="list-style-type: none">➤ No.6・8杭の特異な損傷を引き起こす要因を網羅的に抽出し、「施工不良」、「経年劣化」、「供用期間の外的要因」、「地震」の項目に整理して、要因の絞り込みを実施した。➤ その結果、損傷が集中しているNo.6・8杭に、6号機建設時に施工されたセメント改良土が干渉していたことを確認した。➤ これにより、地震が発生した際、杭に応力集中する可能性があるかと推定した。
3.杭の損傷要因の検証	<ul style="list-style-type: none">➤ No.6・8杭周辺のセメント改良土と杭の損傷状況から損傷に至るメカニズムを推定した。<ul style="list-style-type: none">✓ No.8頭部の鉄筋の破断・変形は、セメント改良土がNo.8杭を拘束したため、主に上部構造からの慣性力によるせん断力の影響で損傷したものと推定✓ No.6・8杭中間部の水平ひび割れは、セメント改良土がNo.6・8杭を拘束したため主に埋戻土との境界部の地盤変位による曲げモーメントの影響で損傷したものと推定➤ 推定した損傷メカニズムの妥当性について、3次元FEM静的応力解析による傾向分析を実施した結果、セメント改良土の影響でNo.6・8杭に応力集中する傾向を確認した。

以上から、No.6・8杭の特異な損傷は、セメント改良土が杭を拘束している状況のもとで、地震力が作用し、No.6・8杭に応力集中したことによるものと推定した。

【参考】No.6・8杭の推定される損傷メカニズム

- No.6・8杭の推定される損傷メカニズムを図39に示す。
- No.6・8杭の特異な損傷は、セメント改良土が杭を拘束している状況のもとで、地震力が作用し、No.6・8杭に応力集中したことによるものと推定した。



• No.6・8杭がセメント改良土に拘束された状態で地震力が作用

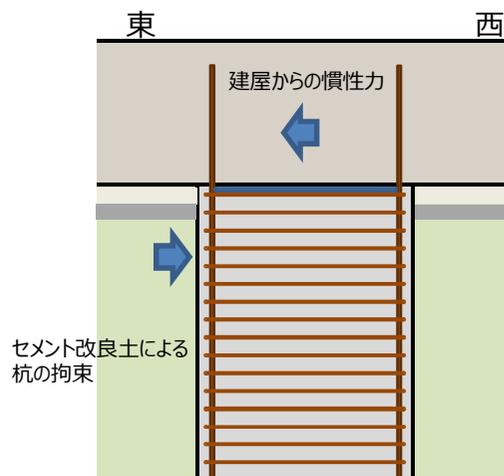
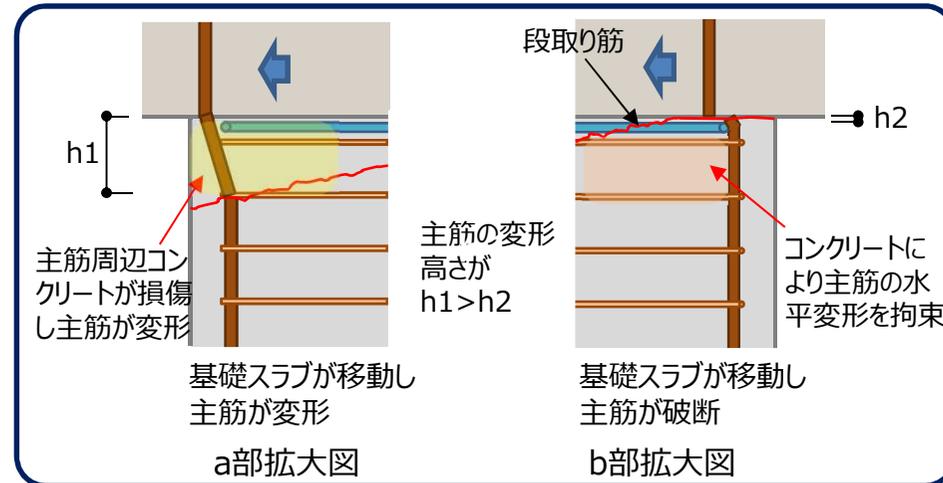
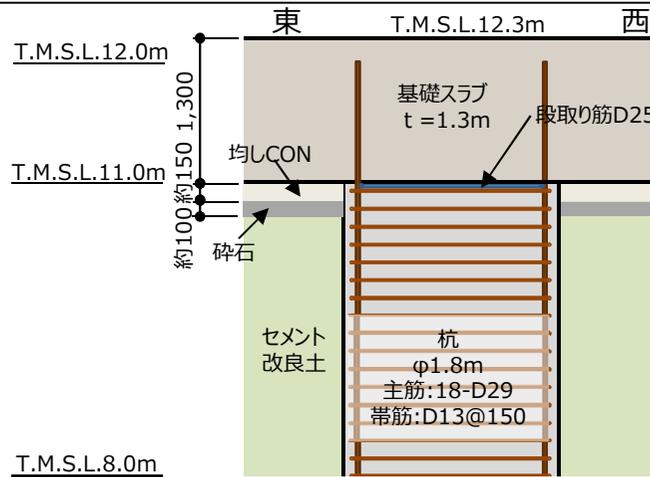
• No.8杭頭部に応力集中したせん断力が作用したことが主要因となり、鉄筋の破断・変形が発生
• No.8杭中間部にセメント改良土と埋戻土の境界部で発生した曲げモーメントが作用したことが主要因となり、水平ひび割れが発生

• No.8杭頭部の損傷後、No.6杭中間部にセメント改良土と埋戻土の境界部で発生した曲げモーメントが作用したことが主要因となり、水平ひび割れが発生

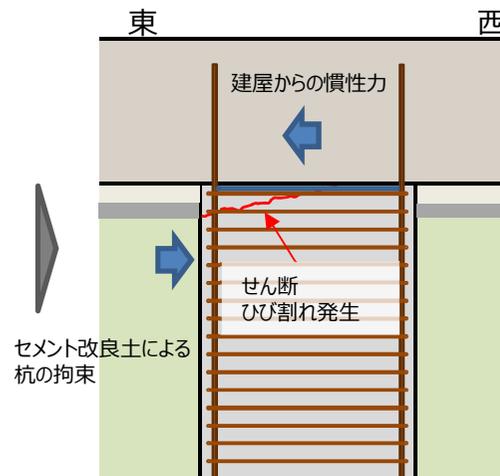
図39 No.6・8杭の想定される損傷メカニズム

【参考】No.8杭頭部の推定される鉄筋破断・変形のメカニズム

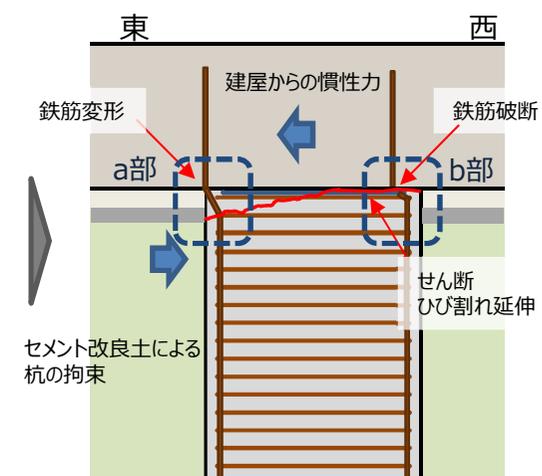
➤ No.8杭頭部の鉄筋破断の概念図を図40に示す。杭頭部に発生したせん断ひび割れにより、基礎スラブと杭頭部にズレが生じ、東側は主筋周辺コンクリートが損傷したことにより主筋が変形し、西側は主筋周辺コンクリートが水平変位を拘束したことにより、主筋が破断したものと考えられる。



ステップ1



ステップ2



ステップ3

図40 No.8杭頭部の鉄筋破断のメカニズム (イメージ)

- 原設計の杭の地震荷重に対する設計フローを図41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42）

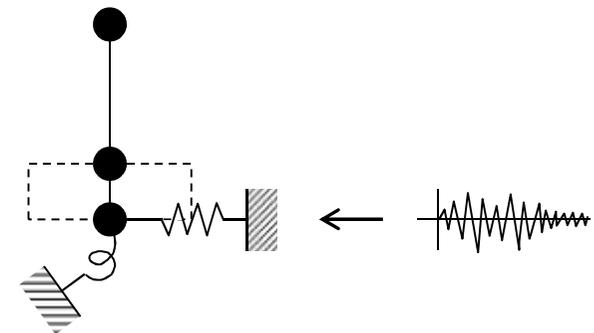
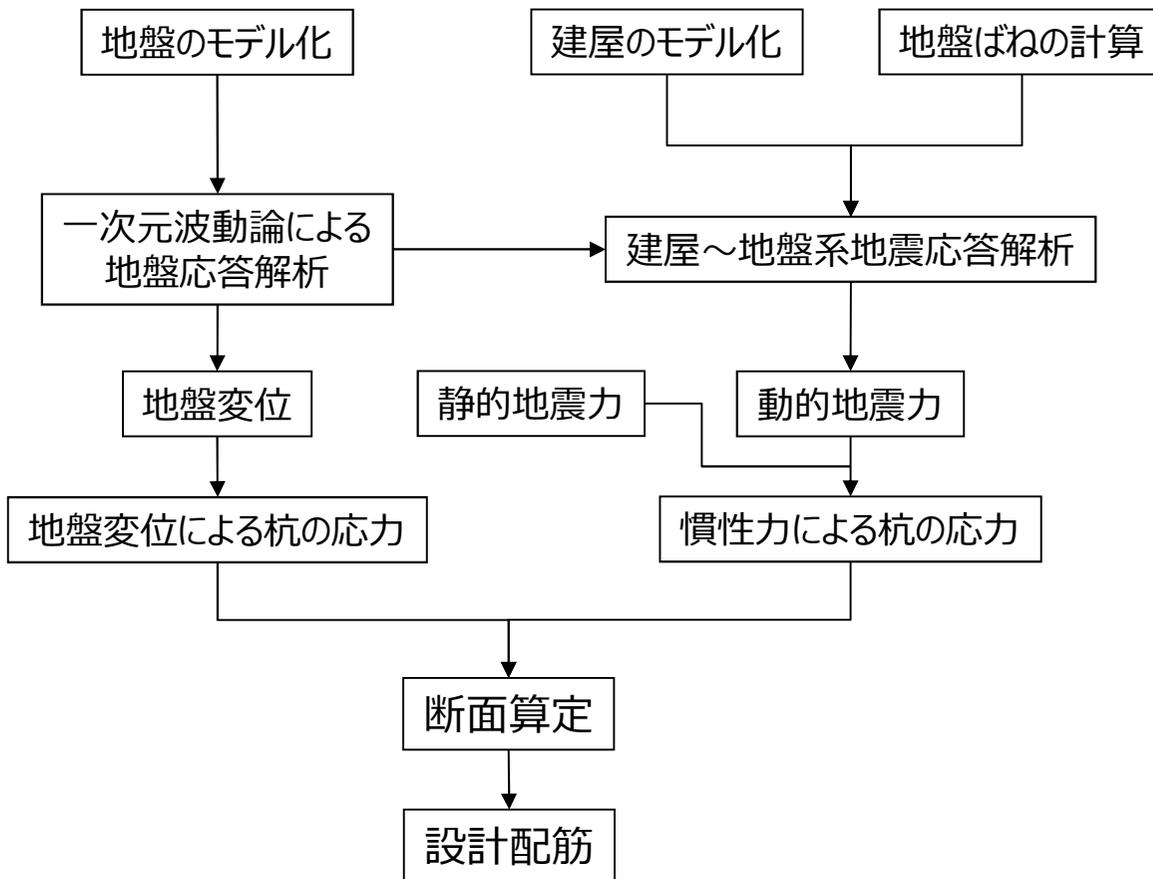


図42 地震応答解析モデル

図41 杭設計フロー

【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部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9～11に示す。

表9 せん断力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10 杭頭部のせん断力の解析結果

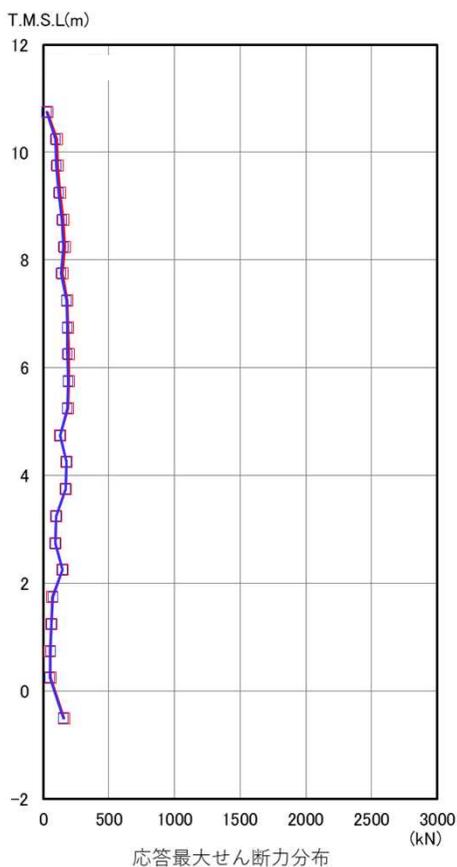
せん断力 (kN)	発生応力			短期許容応力との比較	
	地盤変位による 応力	慣性力による 応力	設計応力:Q	Qa (kN)	Q/Qa
	28	1,252	1,280	1,740	0.736

表11 杭頭部の曲げモーメントの解析結果

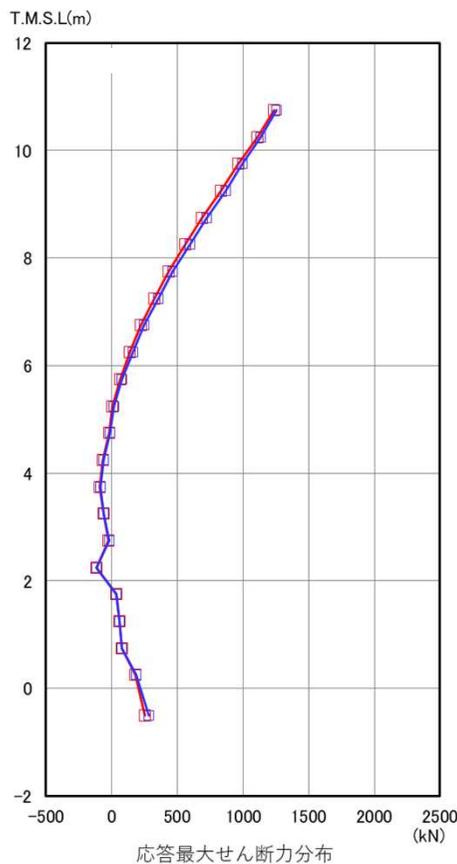
曲げモーメント (kN・m)	発生応力			設計配筋比に対する必要鉄筋比の比較		
	地盤変位による 応力	慣性力による応力	設計応力	必要鉄筋比reqPt	設計配筋比dPt	reqPt/dPt
	929	2,346	3,275	0.435%	0.454%	0.958

【参考】基準地震動S1による杭の発生応力（せん断力）

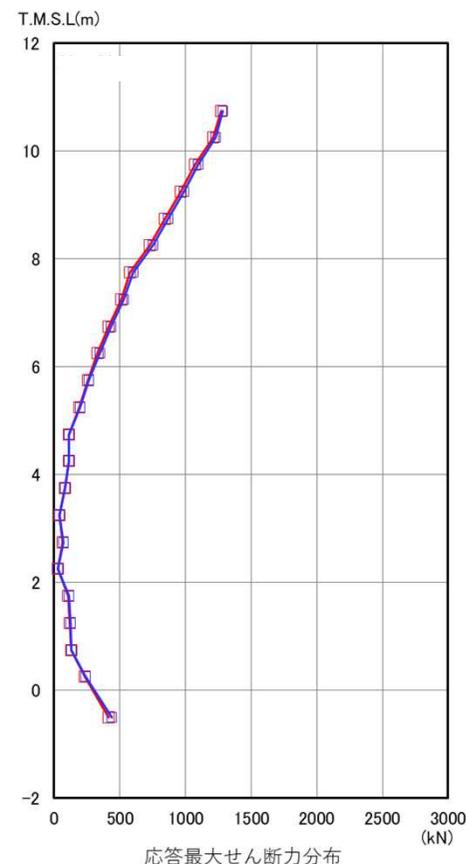
➤ 基準地震動S₁による杭の発生応力（せん断力）を図43に示す。



— S1杭応答解析地盤 NS_X(地盤変位のみ)
— S1杭応答解析地盤 EW_Y(地盤変位のみ)
地盤変位によるせん断力



— S1杭応答解析地盤 NS_X(慣性力分)
— S1杭応答解析地盤 EW_Y(慣性力分)
上部構造の慣性力によるせん断力

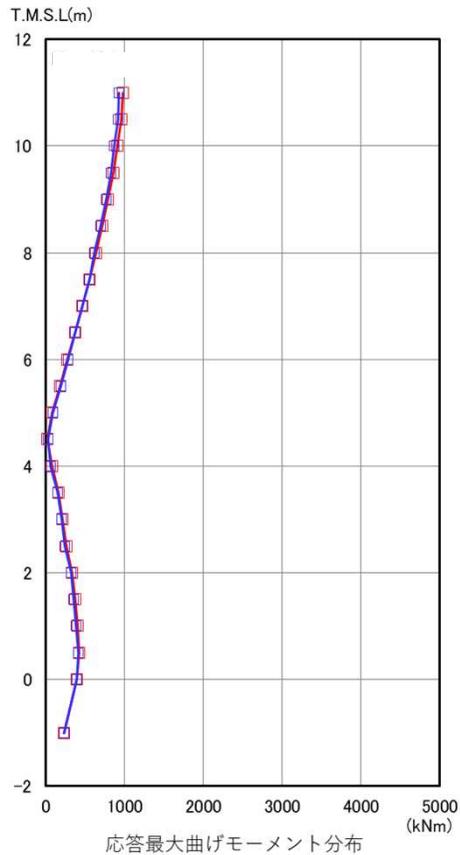


— S1杭応答解析地盤 NS_X(慣性力+地盤変位)
— S1杭応答解析地盤 EW_Y(慣性力+地盤変位)
地盤変位によるせん断力 +
上部構造の慣性力によるせん断力

図43 杭のせん断力（静的解析）

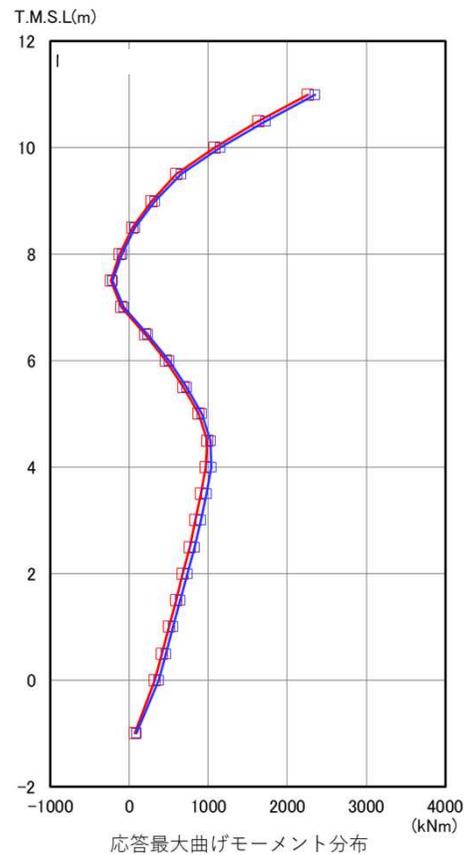
【参考】基準地震動S1による杭の発生応力（曲げモーメント）

➤ 基準地震動S₁による杭の発生応力（曲げモーメント）を図44に示す。



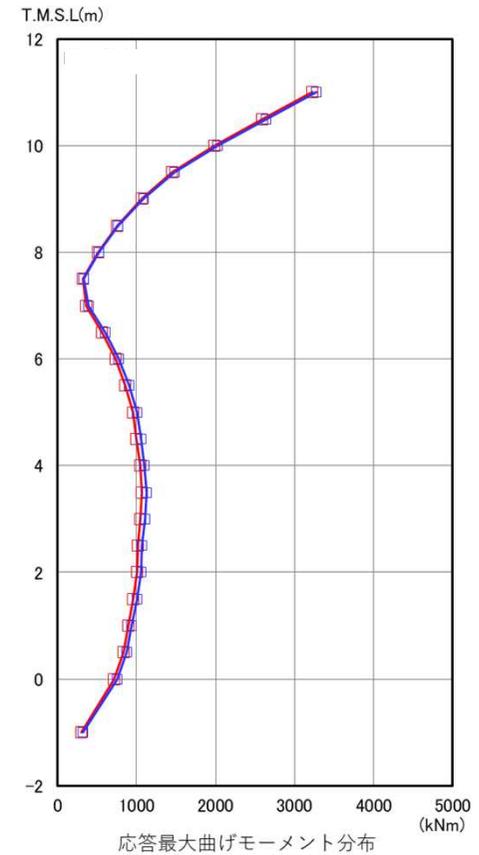
— S1杭応答解析地盤 NS_X(地盤変位のみ)
 — S1杭応答解析地盤 EW_Y(地盤変位のみ)

地盤変位による曲げモーメント



— S1杭応答解析地盤 NS_X(慣性力分)
 — S1杭応答解析地盤 EW_Y(慣性力分)

上部構造の慣性力による曲げモーメント



— S1杭応答解析地盤 NS_X(慣性力+地盤変位)
 — S1杭応答解析地盤 EW_Y(慣性力+地盤変位)

地盤変位による曲げモーメント+
 上部構造の慣性力による曲げモーメント

図44 杭の曲げモーメント（静的解析）

【参考】中越沖地震シミュレーション解析の地盤ばね

▶ P.29～30に示す中越沖地震シミュレーション解析の地震応答解析に用いた地盤ばねを表12に、応力解析に用いた地盤ばねを表13に示す。

表12 地震応答解析に用いた地盤ばね
(中越沖地震シミュレーション解析)
(a) NS方向

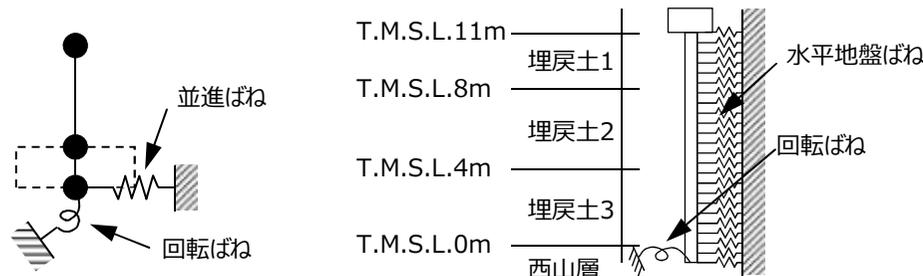
標高T.M.S.L. (m)	地盤ばね成分	ばね定数 Kc※1	減衰定数 Cc※2
11.0	底面・並進	1.61E+06	1.25E+05
11.0	底面・回転	3.91E+08	2.33E+06

(b) EW方向

標高T.M.S.L. (m)	地盤ばね成分	ばね定数 Kc※1	減衰定数 Cc※2
11.0	底面・並進	1.45E+06	1.26E+05
11.0	底面・回転	1.18E+09	1.25E+07

※1 並進成分はkN/m, 回転成分はkN・m/rad

※2 並進成分はkN・s/m, 回転成分はkN・m・s/rad



(a)地震応答解析

(b)応力解析

図45 解析モデル図 (中越沖地震シミュレーション解析)

表13 応力解析に用いた地盤ばね
(中越沖地震シミュレーション解析)
(a) 水平地盤ばね定数

節点番号	標高 T.M.S.L.(m)	地層区分	ばね定数 Kh(kN/m)	
			NS方向	EW方向
1	11.0	埋戻土 1	1.25E+05	9.98E+04
2	10.5		1.85E+05	1.59E+05
3	10.0		1.65E+05	1.47E+05
4	9.5		1.57E+05	1.42E+05
5	9.0		1.49E+05	1.35E+05
6	8.5		1.38E+05	1.25E+05
7	8.0		9.78E+04	8.82E+04
8	7.5	埋戻土 2	9.27E+04	8.24E+04
9	7.0		1.01E+05	8.87E+04
10	6.5		1.06E+05	9.28E+04
11	6.0		1.12E+05	9.75E+04
12	5.5		1.19E+05	1.03E+05
13	5.0		1.28E+05	1.10E+05
14	4.5		1.40E+05	1.20E+05
15	4.0	埋戻土 3	1.74E+05	1.50E+05
16	3.5		1.90E+05	1.62E+05
17	3.0		2.00E+05	1.69E+05
18	2.5		2.15E+05	1.81E+05
19	2.0		2.35E+05	1.97E+05
20	1.5		2.59E+05	2.18E+05
21	1.0		2.87E+05	2.44E+05
22	0.5	西山層	3.27E+05	2.87E+05
23	0.0		7.89E+06	7.25E+06
24	-1.0		1.88E+07	1.71E+07

(b) 回転地盤ばね定数

節点番号	標高 T.M.S.L.(m)	地層区分	ばね定数 Kr(kN・m/rad)	
			NS方向	EW方向
24	-1.0	西山層	1.13E+07	1.13E+07

①モデル化及び境界条件

- 3次元静的FEM解析モデル図を図46に示す。
- 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。
 - ・基礎スラブ
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。
 - ・杭
支持層面：接点共有
他、いずれも接点共有

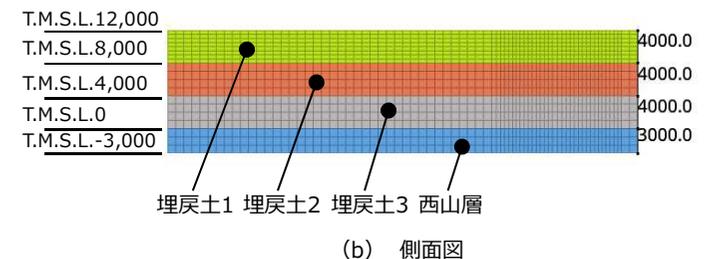
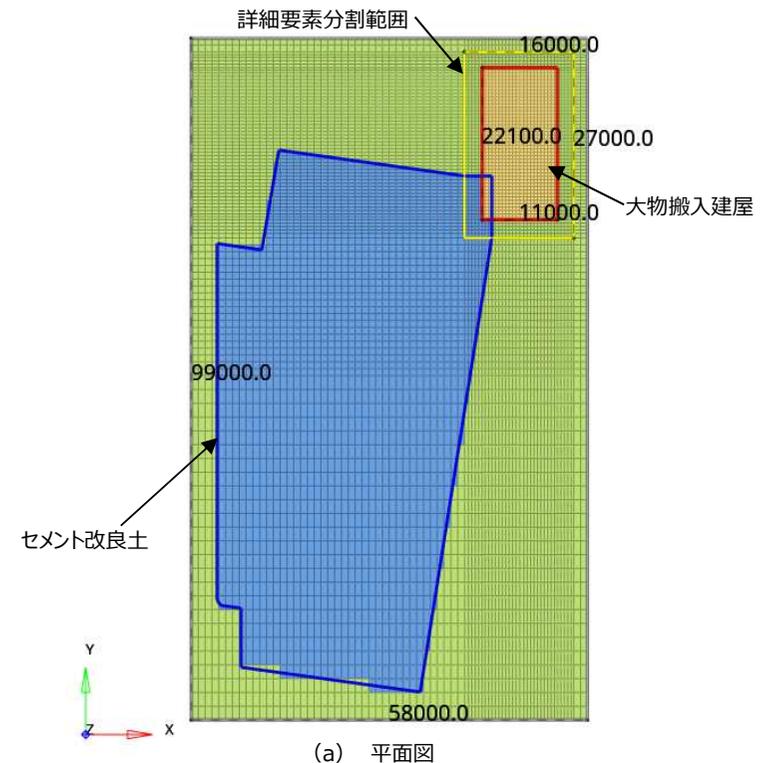


図46 解析モデル図（セメント改良土あり）
（単位：mm）

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47に、地盤の物性値、材料物性値及び杭の断面性能を表14～表16に示す。

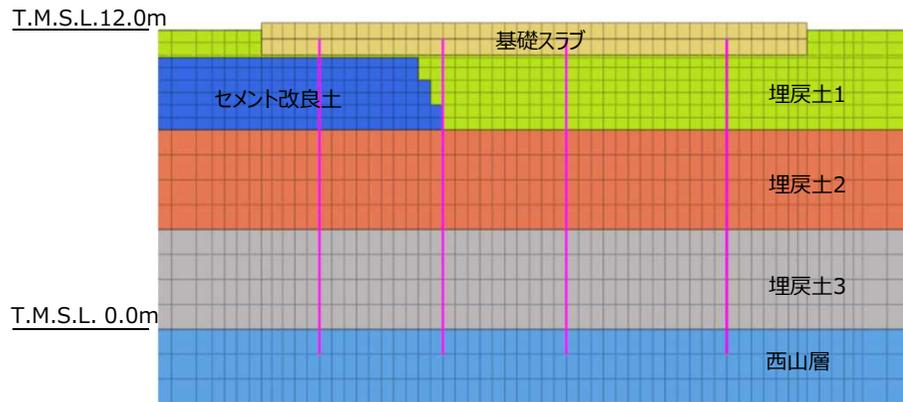


図47 大物搬入建屋周辺の解析モデル図
(Case2:セメント改良土あり)

表14 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

※ボーリングコア2か所の実強度の平均値により物性値を設定

表15 大物搬入建屋（基礎スラブ及び杭）の材料物性値

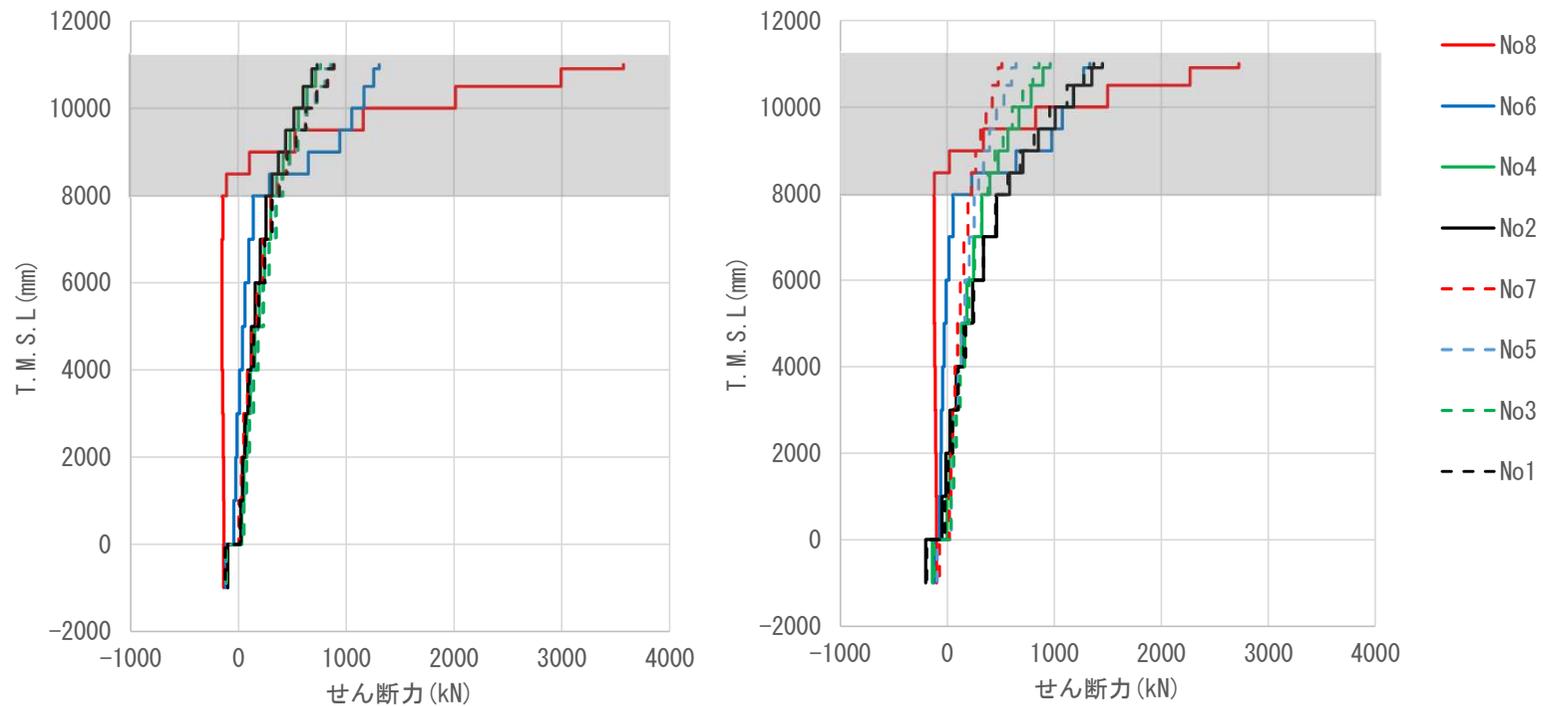
	ヤング係数 (kN/m ²)	ポアソン比
基礎スラブ	2.88×10 ⁷	0.2
杭	2.50×10 ⁷	0.2

表16 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

【参考】No.8杭のせん断に着目した解析（EW方向とNS方向）

- 「セメント改良土あり」のケースにおけるK6大物搬入建屋の基礎をEW方向に加力した場合とNS方向に加力した場合の杭のせん断力分布を図48に示す。
- NS方向に加力した場合もEW方向と同様にNo.8杭頭部に応力集中する傾向は同じであるが、EW方向の方がより集中度が大きいことから、No.8杭頭部の鉄筋の損傷状況と整合することを確認した。



(a)EW方向に加力した場合のせん断力分布
(セメント改良土あり)

(b)NS方向に加力した場合のせん断力分布
(セメント改良土あり)

図48 せん断力分布の比較（単位：kN）

➤ K6大物搬入建屋は、オールケーシング工法により杭を設置しており、施工手順を図49に示す。

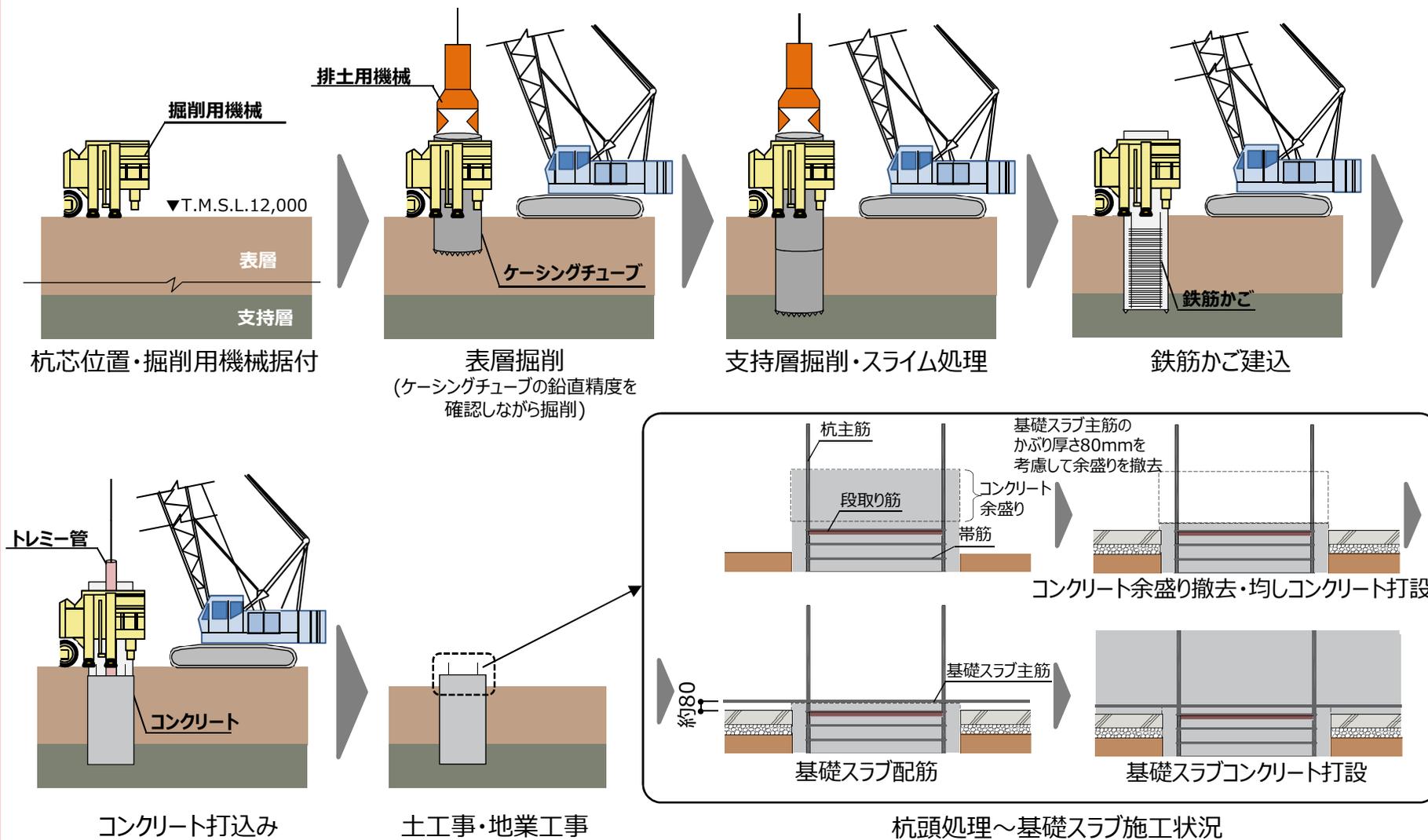


図49 杭工事の施工手順