

東海第二発電所

鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の構造成立性について

第520回審査会合(平成29年10月17日)時の
指摘事項に対する回答

平成29年10月24日

日本原子力発電株式会社

指摘事項		説明頁
33	FLIPの相対変位を強制変位として用いる構造成立性評価の方法を説明し、実施結果を示すこと。	1 ~ 7
34	豊浦標準砂による強制的な液状化を仮定した場合の岩盤傾斜部の相対変位量を示すこと。	
35	FLIPによる二次元動的解析結果の杭の断面力とFLIP及びSHAKEを用いた応答変位法による杭の断面力を比較すること。	8 ~ 17

【指摘事項】第520回審査会合(H29.10.17)

33	FLIPの相対変位を強制変位として用いる構造成立性評価の方法を説明し,実施結果を示すこと。
34	豊浦標準砂による強制的な液状化を仮定した場合の岩盤傾斜部の相対変位量を示すこと。

【回答概要】

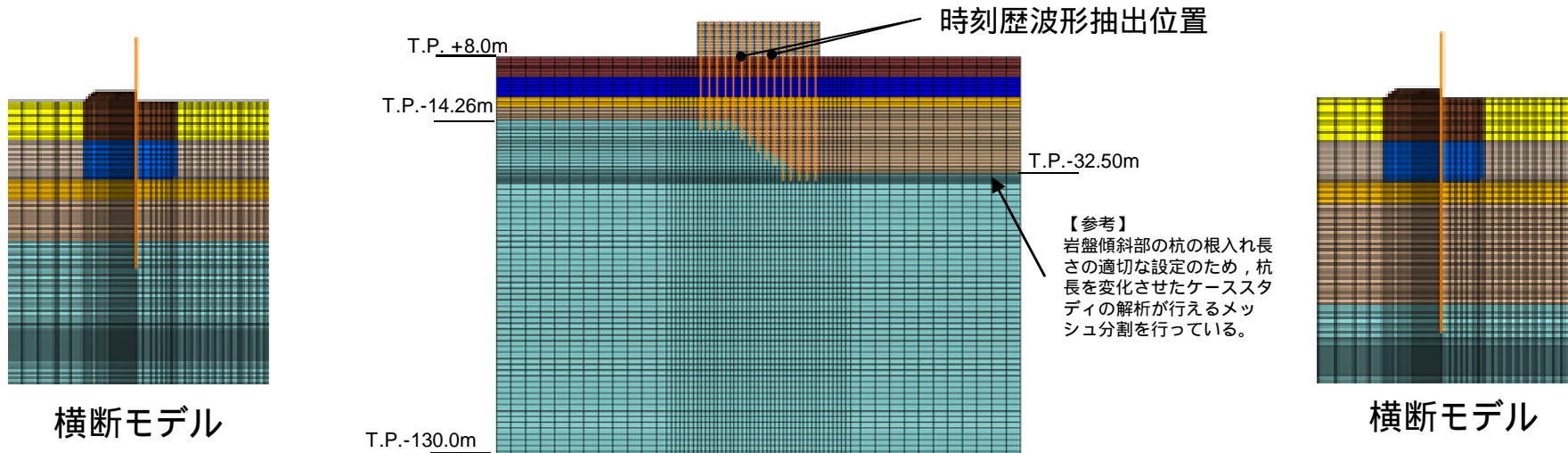
- 岩盤傾斜部の防潮壁1ユニット両端杭位置における2つの横断面の二次元有効応力解析(FLIP)による時刻歴変位差の絶対値の最大値発生時刻に対応する変位を二次元梁バネモデルに作用させる。
- 豊浦標準砂の液状化強度特性により強制的に液状化させることを仮定した場合の岩盤傾斜部の防潮壁1ユニット両端杭位置における2つの横断面の有効応力解析(FLIP)結果より,両端杭位置の変位時刻歴を比較した結果,変位が大きい経過時間における逆位相変位挙動は認められないことから,岩盤傾斜部の防潮壁に有意なねじれ挙動が生じないことを確認した。なお,原地盤の液状化強度特性を用いた有効応力解析(FLIP)でも,同様に,岩盤傾斜部の防潮壁1ユニットに有意なねじれ挙動が生じないことを確認した。
- 岩盤傾斜部の防潮壁1ユニット両端杭位置における2つの横断面の二次元有効応力解析(FLIP)による時刻歴変位差の絶対値の最大値発生時刻における変位を二次元梁バネモデルに作用させた解析の結果,発生応力が許容限界値以下であることを確認した。今後,上部工の鉄筋コンクリート梁壁をモデル化した二次元梁バネモデルでは,上記と同様に,二次元有効応力解析(FLIP)による時刻歴変位差の絶対値の最大値発生時刻における変位を作用させる評価も実施し,上部工について,SHAKEを適用した場合の梁バネモデルによる評価結果と比較して,保守側の結果を採用する。

- 指摘事項30への回答においては、「二次元梁バネモデルに用いる応答加速度および相対変位量については、一次元応答解析(SHAKE)及び二次元有効応力解析(FLIP)によって抽出されるものを用いて断面力を比較し、大きい方を採用して部材照査を行う。」という方針を示した。
- ただし、前回の説明では二次元梁バネモデルに対して、一次元応答解析(SHAKE)による両端杭位置の最大変位差を用いることについてのみ示していたが、今回は、指摘事項33, 34を踏まえ、二次元有効応力解析(FLIP)による両端杭位置の最大変位差も用いた検討も実施した。
- また、豊浦標準砂の液状化強度特性により強制的に液状化させることを仮定した傾斜部両端杭位置の二次元有効応力解析(FLIP)による時刻歴変位差の絶対値の最大値発生時刻の変位を入力した二次元梁バネモデル解析の実施内容と結果が、照査結果が許容限界値以内であることを確認した。

指摘事項30
上部工・下部工のそれぞれの部位における岩盤傾斜を模擬した解析を含むすべての検討について、荷重伝達を踏まえた荷重の受け渡しや検討条件の整合性又は包絡性について、体系的に整理するとともに、部位について厳しい条件となっているか示すこと。

	前回説明	今回説明
方針	二次元梁バネモデルに用いる応答加速度および相対変位量については、一次元応答解析(SHAKE)及び二次元有効応力解析(FLIP)によって抽出されるものを用いて断面力を比較し、大きい方を採用して部材照査を行う。	二次元梁バネモデルに用いる応答加速度および相対変位量については、一次元応答解析(SHAKE)及び二次元有効応力解析(FLIP)によって抽出されるものを用いて断面力を比較し、大きい方を採用して部材照査を行う。
説明内容	二次元梁バネモデルに対して、一次元応答解析(SHAKE)による両端杭位置の最大変位差を用いることについてのみ示した。	二次元梁バネモデルに対して、二次元有効応力解析(FLIP)による両端杭位置の最大変位差を用いた検討を行った。

岩盤傾斜部の防潮壁 1 ユニット両端杭位置における 2 つの横断面の二次元有効応力解析 (F L I P) による時刻歴変位差の絶対値の最大値発生時刻に対応する変位を二次元梁バネモデルに作用させる。



横断モデル

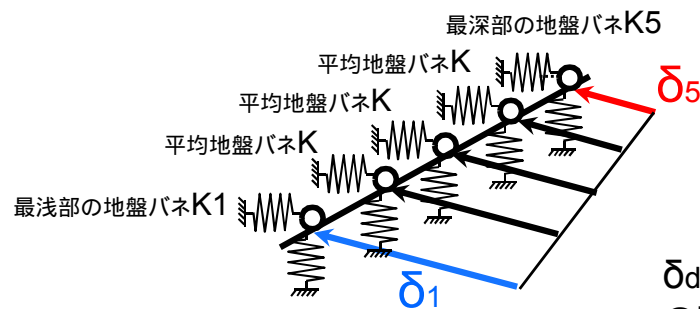
横断モデル



変位 δ_1 の時刻歴
(横断モデルの地表面変位)

二次元梁バネモデルへ応答変位の入力

変位 δ_5 の時刻歴
(横断モデルの地表面変位)



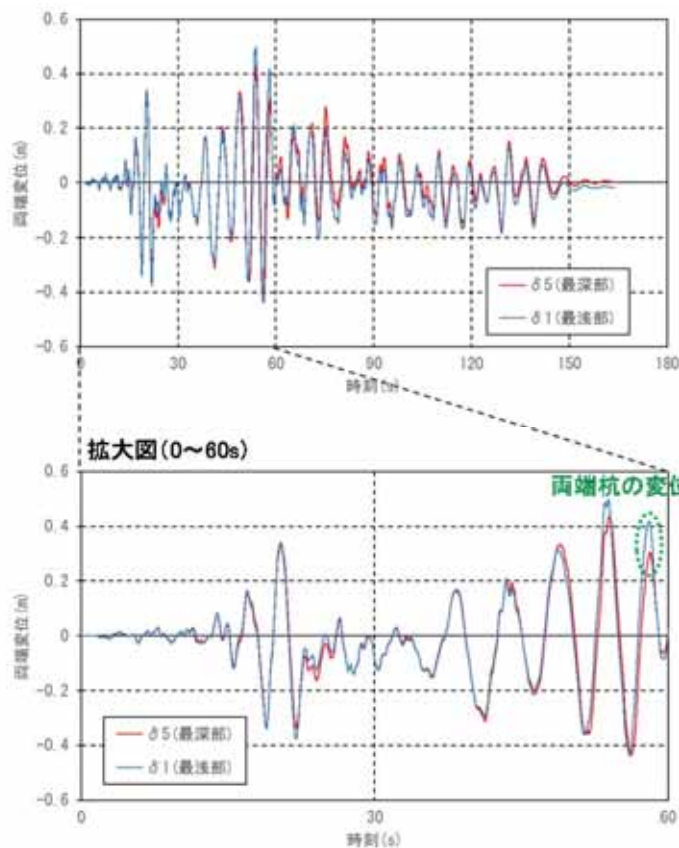
$$\delta_d = |\delta_5 - \delta_1|$$

の時刻歴最大値発生時点における両端杭位置の δ_1 と δ_5 を変位入力する。

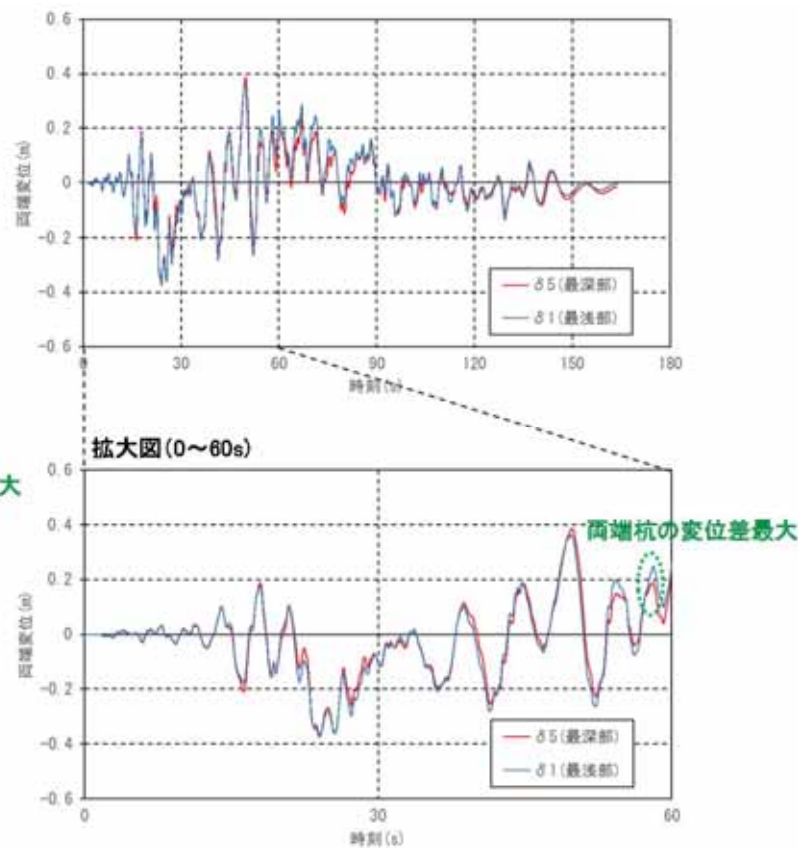
両端杭位置の地表面変位差時刻歴

1ユニット両端杭位置の変位時刻歴を比較した結果、最大変位発生時刻まで両端杭位置の変位はほぼ同様の挙動を呈し、最大変位発生時刻以降に時刻歴変位差が最大となる。その後、地震動の入力の減少とともに時刻歴変位差も小さくなることを確認した。

岩盤傾斜部(地点 , 原地盤モデル)
地表面の両端杭位置の変位時刻歴



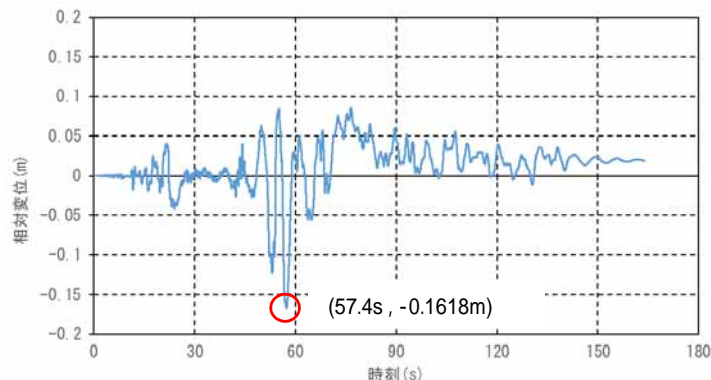
岩盤傾斜部(地点 , 豊浦標準砂を仮定したモデル)
地表面の両端杭位置の変位時刻歴



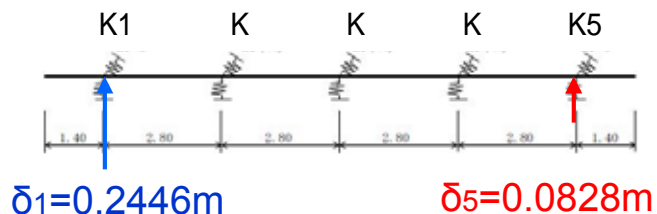
岩盤傾斜部の防潮壁1ユニット両端杭位置における2つの横断面の有効応力解析(FLIP)結果より、両端杭位置の変位時刻歴を比較した結果、変位が大きい経過時間における逆位相変位挙動は認められないことから、岩盤傾斜部の防潮壁に有意なねじれ挙動が生じないことを確認した。

両端杭位置の地表面変位差時刻歴

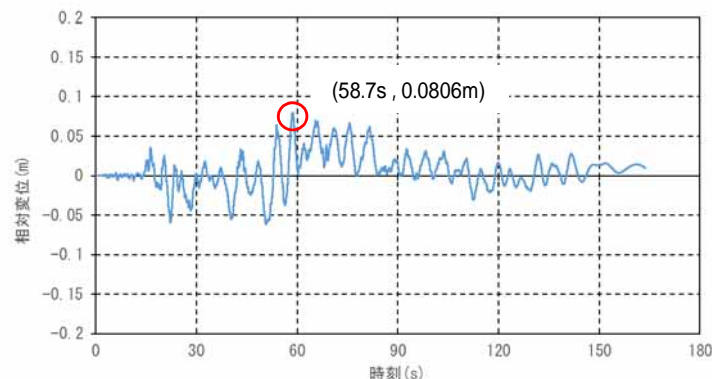
岩盤傾斜部(地点 , 原地盤モデル)
最浅部と最深部の両端変位差時刻歴



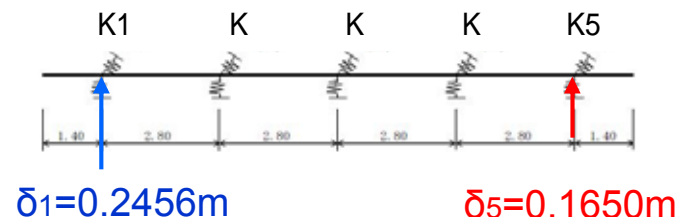
時間(s)	両端変位差時刻歴の最大値(m)	1(m)	5(m)
57.4	-0.1618	0.2446	0.0828



岩盤傾斜部(地点 , 豊浦標準砂を仮定したモデル)
最浅部と最深部の両端変位差時刻歴



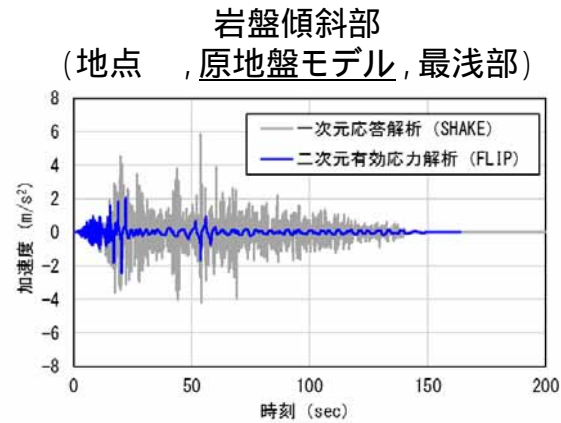
時間(s)	両端変位差時刻歴の最大値(m)	1(m)	5(m)
58.7	0.0806	0.2456	0.1650



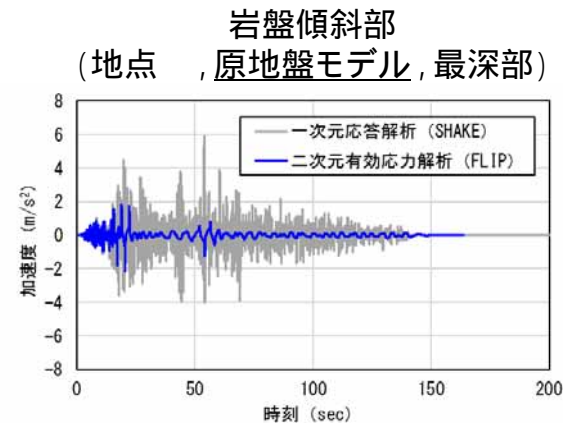
岩盤傾斜部について、防潮壁1ユニット両端杭位置の時刻歴変位差が最大値となる時点の変位を二次元梁バネモデルに入力する検討を行う。

一次元応答解析と二次元有効応力解析の地表面応答加速度の結果

岩盤傾斜部で地表面応答加速度を比較した結果、二次元有効応力解析 (FLIP) より一次元応答解析 (SHAKE) の方が大きくなることを確認した。

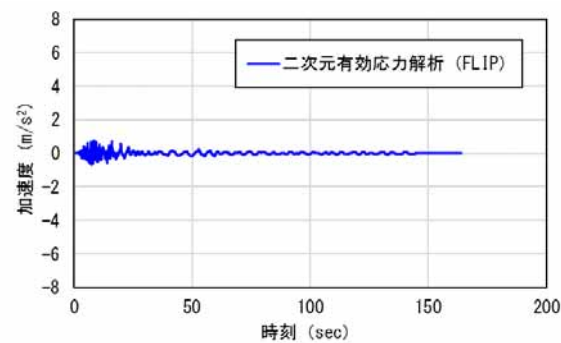


	時間(s)	加速度(m/s ²)
SHAKE	53.86	5.87
FLIP	20.38	-2.41



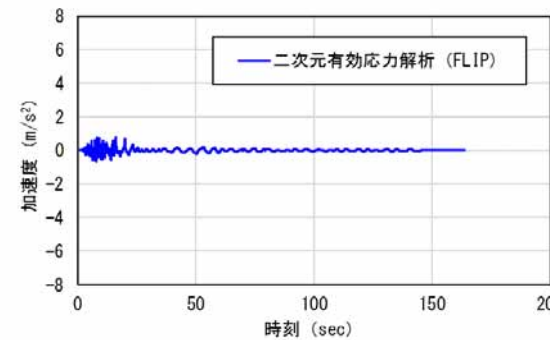
	時間(s)	加速度(m/s ²)
SHAKE	53.88	5.88
FLIP	20.42	-2.15

岩盤傾斜部
(地点, 豊浦標準砂を仮定したモデル, 最浅部)



	時間(s)	加速度(m/s ²)
FLIP	7.42	-0.693

岩盤傾斜部
(地点, 豊浦標準砂を仮定したモデル, 最深部)



	時間(s)	加速度(m/s ²)
FLIP	7.89	-0.698

岩盤傾斜部で豊浦標準砂を仮定したモデルでは、一次元応答解析 (SHAKE) における等価線形化が適切に収束する結果が得られなかった。これは基準地震動Ssに対して、敷地に存在しない極めて軟弱な豊浦標準砂の地盤物性をSHAKEで仮定した結果、豊浦標準砂を仮定したSHAKE地盤モデルに計算上の大きなひずみが局所に集中し、SHAKEの等価線形化法の収束可能な適用限界を超えていることに起因している。

二次元梁バネモデルによる地震時の検討



(二次元有効応力解析の最大時刻歴変位差発生時点の変位を入力したケース(岩盤傾斜部))

二次元有効応力解析より抽出した岩盤傾斜部の1ユニット両端杭位置の時刻歴変位差の最大値発生時点の変位を入力する二次元梁バネモデルで解析を実施した結果、十分な安全率を有していることを確認した。

圧縮に対する照査

	発生応力度 $c(N/mm^2)$	許容応力度 $c_a(N/mm^2)$ ($c_k=40N/mm^2$)	安全率 c_a / c	判定
原地盤の岩盤傾斜部モデル (FLIPに基づく変位入力)	6.8	21	3.08	OK
豊浦標準砂を仮定した岩盤傾斜部モデル (FLIPに基づく変位入力)	5.0	21	4.20	OK

引張に対する照査

	発生応力度 $s(N/mm^2)$	許容応力度 $s_a(N/mm^2)$ (SD490)	安全率 s_a / s	判定
原地盤の岩盤傾斜部モデル (FLIPに基づく変位入力)	150.2	435	2.89	OK
豊浦標準砂を仮定した岩盤傾斜部モデル (FLIPに基づく変位入力)	94.0	435	4.62	OK

せん断に対する照査

	発生応力度 $c(N/mm^2)$	許容応力度 $c_a(N/mm^2)$ ($c_k=40N/mm^2$)	安全率 c_a / c	判定
原地盤の岩盤傾斜部モデル (FLIPに基づく変位入力)	0.36	0.83	2.30	OK
豊浦標準砂を仮定した岩盤傾斜部モデル (FLIPに基づく変位入力)	0.25	0.83	3.32	OK

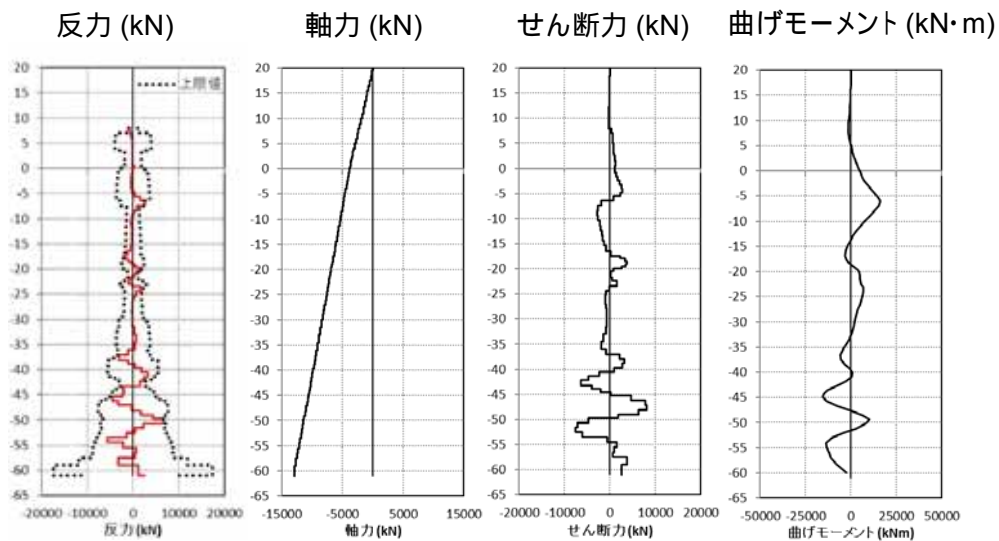
【指摘事項】第520回審査会合(H29.10.17)

FLIPによる二次元動的解析結果の杭の断面力とFLIP及びSHAKEを用いた応答変位法による杭の断面力を比較すること。

【回答概要】

- SHAKEを用いた応答変位法による杭の断面力及びFLIPを用いた応答変位法による杭の断面力並びにFLIPを用いた杭と地盤の動的連成解析により直接得られる杭の断面力を比較した結果、FLIPを用いた杭と地盤の動的連成解析により直接得られる杭の断面力が最も大きいことを確認した。

SHAKEを用いた応答変位法により得られた杭の断面力は以下のとおり
 【バネ値その1(バネ定数:初期剛性, バネ上限値:ピーク強度(平均値))】



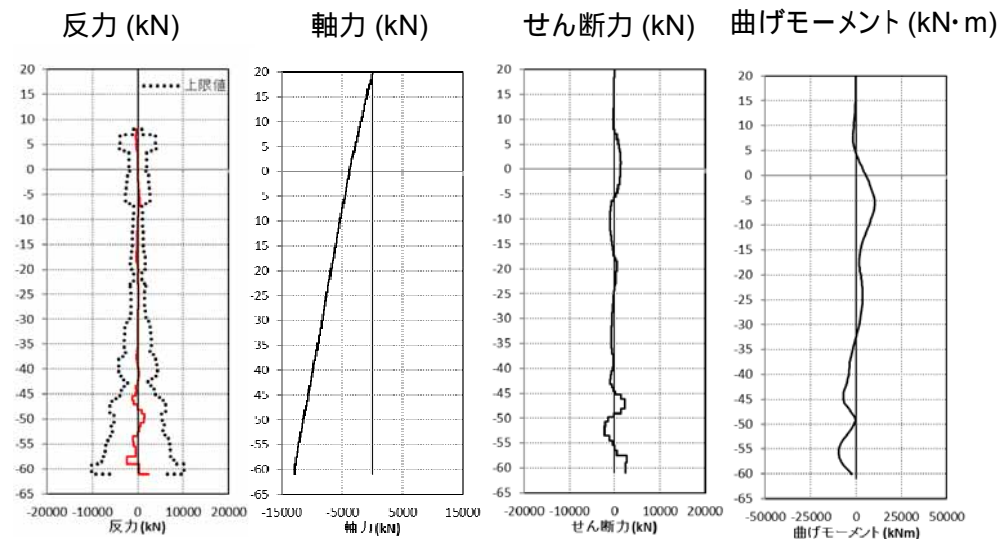
曲げ・軸力に対する照査(バネ値その1の場合)

	発生応力度 (N / mm ²)	許容応力度 sa(N / mm ²) (SM570)	安全率 sa /	判定
地震時	137.9	382.5	2.77	OK

せん断に対する照査(バネ値その1の場合)

	発生応力度 (N / mm ²)	許容応力度 sa(N / mm ²) (SM570)	安全率 sa /	判定
地震時	30.4	217.5	7.15	OK

SHAKEを用いた応答変位法により得られた杭の断面力は以下のとおり
 【バネ値その2(バネ定数:静弾性係数, バネ上限値:残留強度(-1 低減値))】



曲げ・軸力に対する照査(バネ値その2の場合)

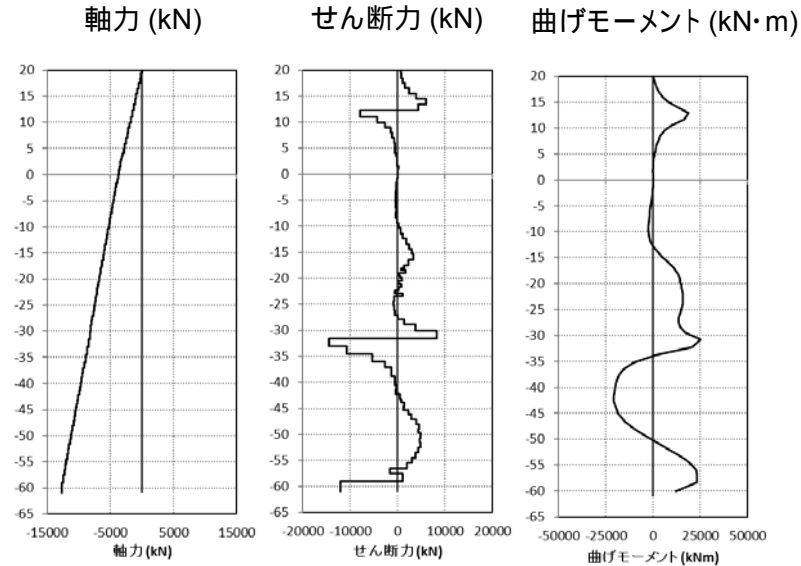
	発生応力度 (N / mm ²)	許容応力度 sa(N / mm ²) (SM570)	安全率 sa /	判定
地震時	106.3	382.5	3.59	OK

せん断に対する照査(バネ値その2の場合)

	発生応力度 (N / mm ²)	許容応力度 sa(N / mm ²) (SM570)	安全率 sa /	判定
地震時	10.6	217.5	20.51	OK

FLIPを用いた応答変位法により得られた杭の断面力は以下のとおり

【FLIPの最大相対変位発生時間断面での杭の相対変位分布を、地盤バネを介さずに応答変位法モデルの杭に強制変位入力】



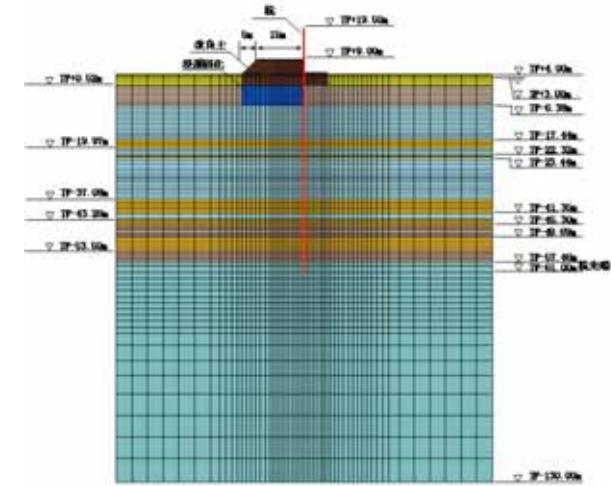
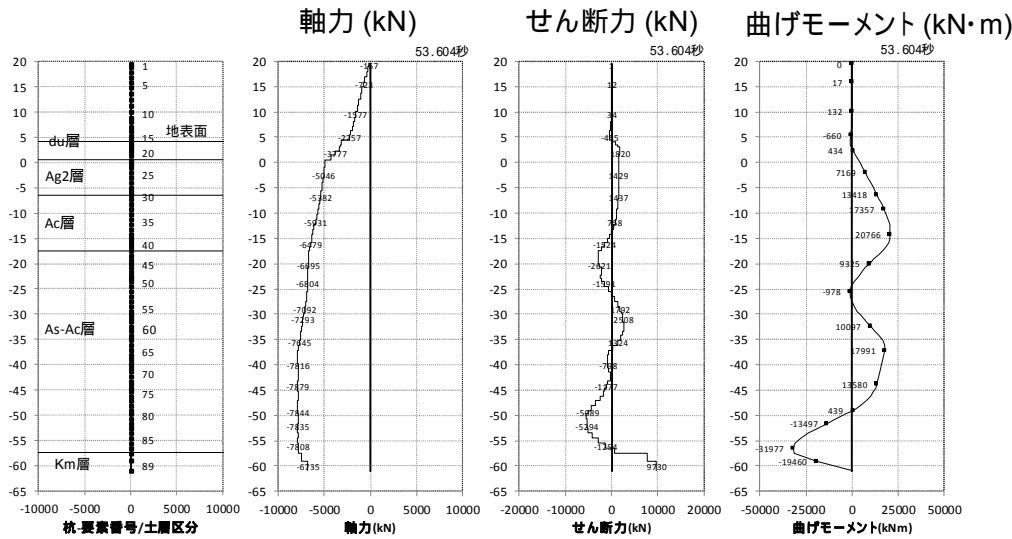
曲げ・軸力に対する照査(上限値その1の場合)

	発生応力度 (N / mm ²)	許容応力度 sa(N / mm ²) (SM570)	安全率 sa /	判定
地震時	192.6	382.5	1.98	OK

せん断に対する照査(上限値その1の場合)

	発生応力度 (N / mm ²)	許容応力度 sa(N / mm ²) (SM570)	安全率 sa /	判定
地震時	54.7	217.5	3.97	OK

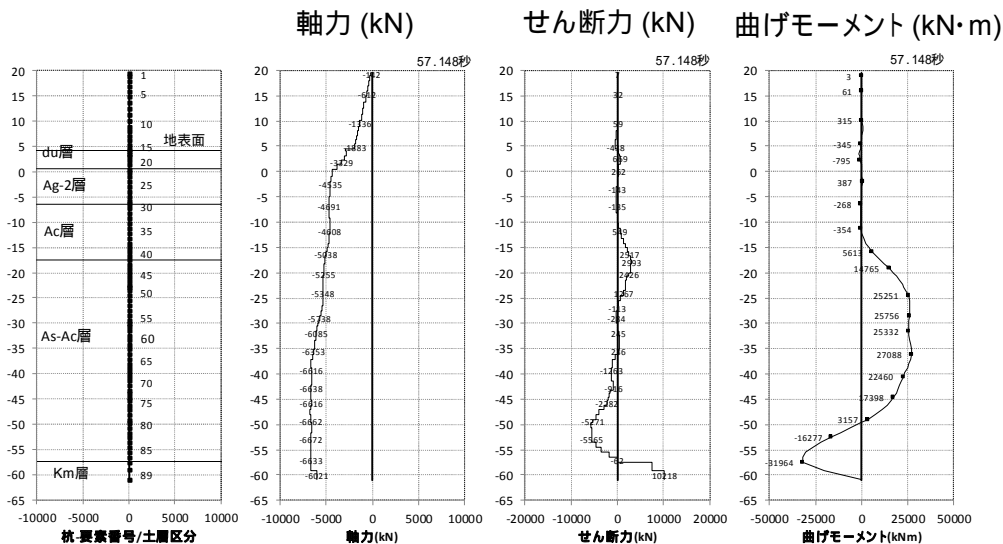
杭と地盤の動的連成解析(FLIP, 原地盤モデル)により直接得られた杭の断面力等を以下に示す。



ケース1: 原地盤モデル 曲げ軸力照査時刻

曲げ・軸力に対する照査

	発生応力度 (N / mm ²)	許容応力度 sa(N / mm ²) (SM570)	安全率 sa /	判定
地震時	229.6	382.5	1.66	OK

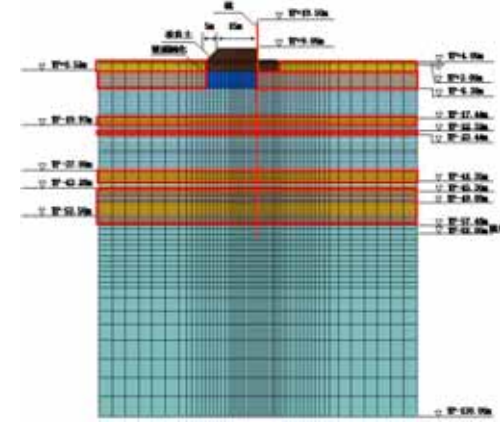
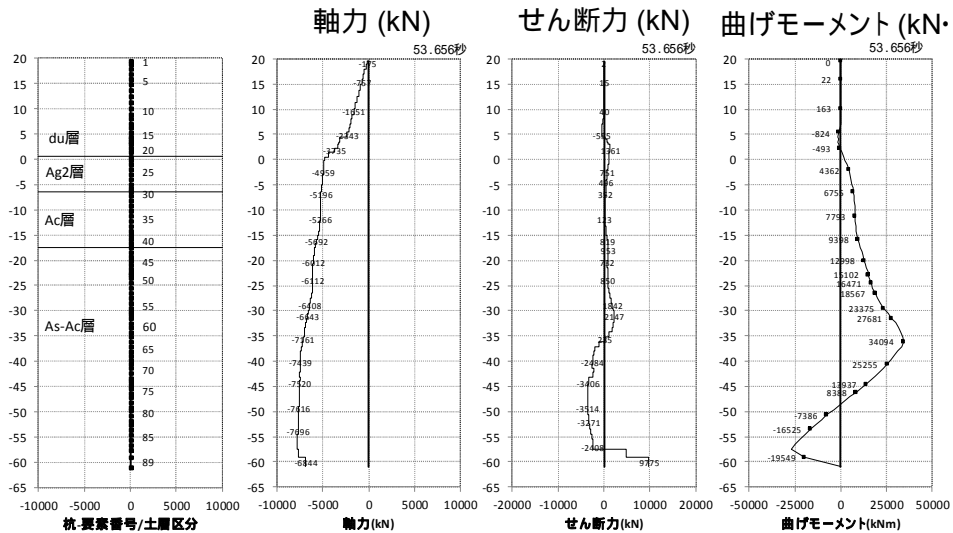


せん断に対する照査

	発生応力度 (N / mm ²)	許容応力度 sa(N / mm ²) (SM570)	安全率 sa /	判定
地震時	38.8	217.5	5.60	OK

ケース1: 原地盤モデル せん断照査時刻

杭と地盤の動的連成解析(FLIP, 豊浦標準砂を仮定した地盤モデル)により直接得られた断面力等を以下に示す。

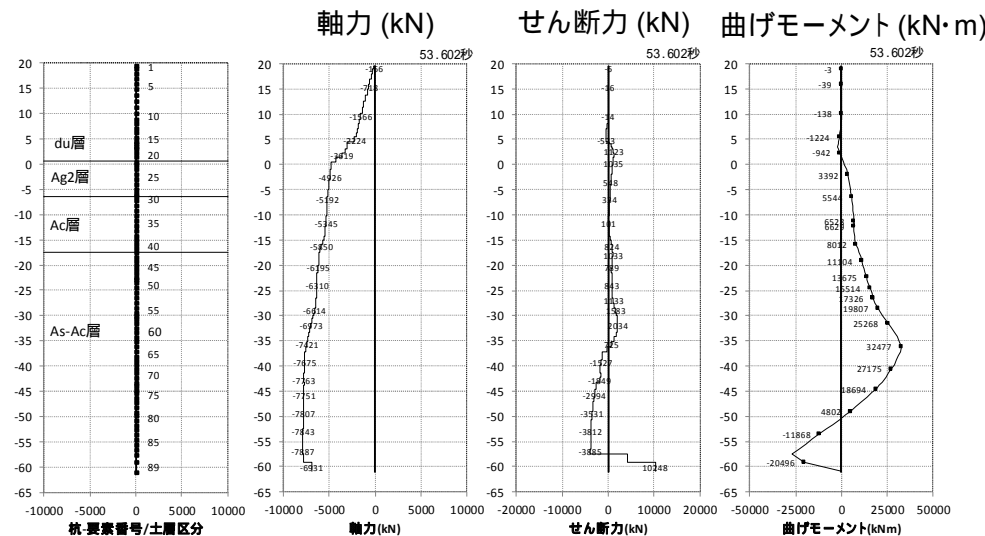


豊浦標準砂を仮定した地盤モデル

豊浦標準砂適用箇所

ケース2: 豊浦標準砂を仮定した地盤モデル

曲げ・軸力に対する照査



曲げ・軸力に対する照査

	発生応力度 (N / mm ²)	許容応力度 sa(N / mm ²) (SM570)	安全率 sa /	判定
地震時	240.8	382.5	1.58	OK

せん断に対する照査

	発生応力度 (N / mm ²)	許容応力度 sa(N / mm ²) (SM570)	安全率 sa /	判定
地震時	38.9	217.5	5.59	OK

ケース2: 豊浦標準砂を仮定した地盤モデル

せん断照査時刻

これまで基礎杭の設計に適用してきた手法の通り, FLIPを用いた杭と地盤の動的連成解析により直接得られる杭の断面力を評価する手法が鋼管杭(特に下部構造)にとって最も厳しい条件となることを再確認した。

曲げ・軸力に対する照査

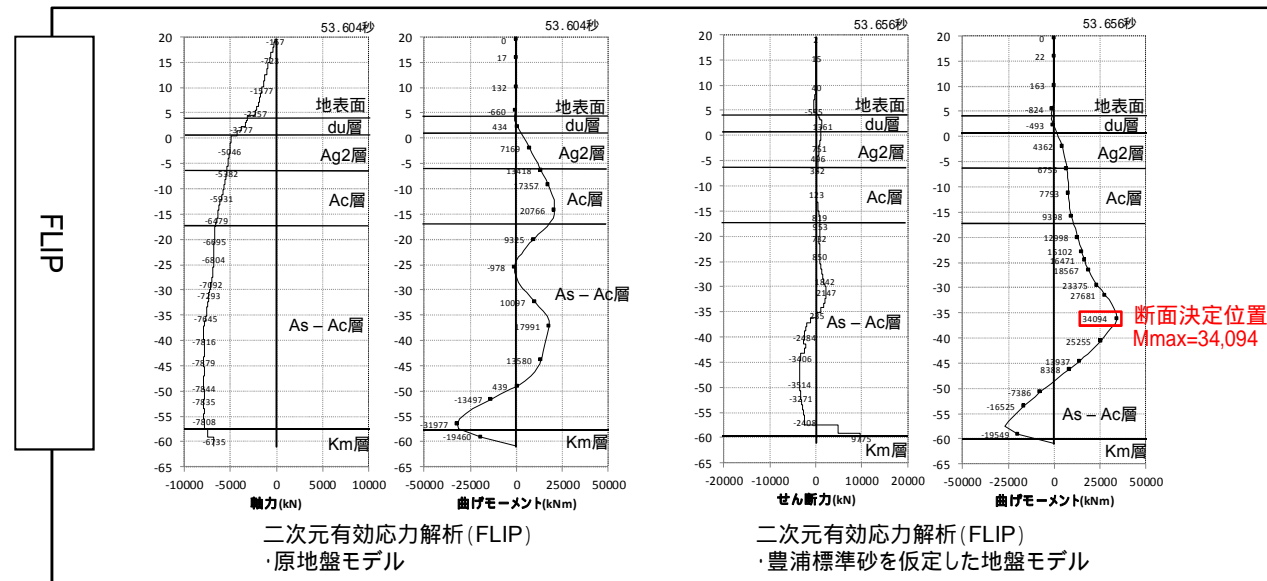
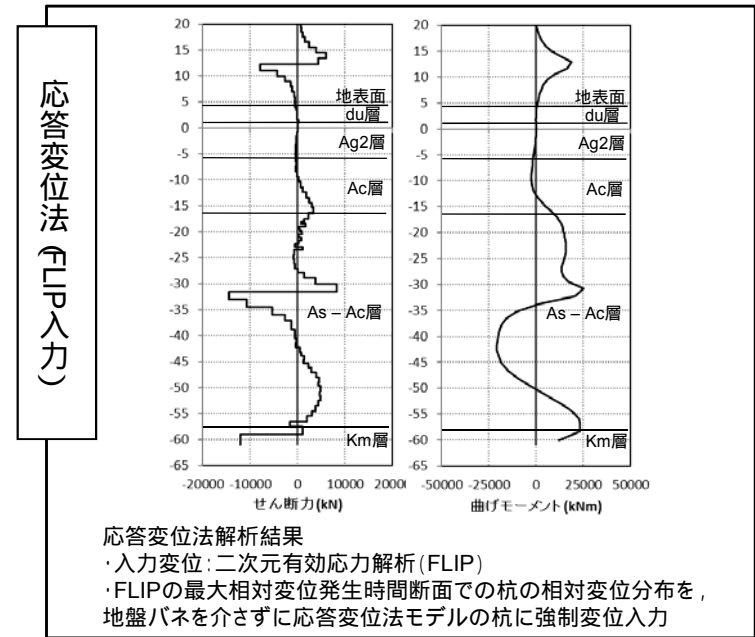
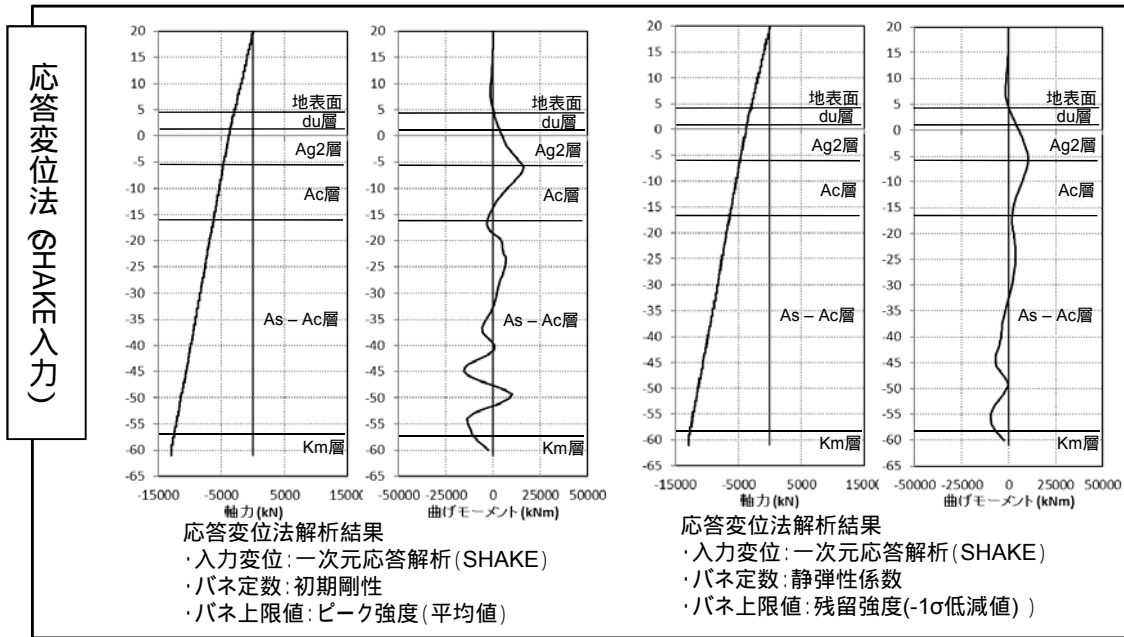
	発生応力度 (N/mm ²)	許容応力度 sa(N/mm ²) (SM570)	安全率 sa/	判定
SHAKEを用いた応答変位法による杭の断面力(バネ1)	137.9	382.5	2.77	OK
SHAKEを用いた応答変位法による杭の断面力(バネ2)	106.3	382.5	3.59	OK
FLIPを用いた応答変位法による杭の断面力	192.6	382.5	1.98	OK
地盤と杭の連成解析FLIPにより直接得られる杭の断面力 (原地盤モデル)	229.6	382.5	1.66	OK
地盤と杭の連成解析FLIPにより直接得られる杭の断面力 (豊浦標準砂を仮定した地盤モデル)	240.8	382.5	1.58	OK

せん断に対する照査

	発生応力度 (N/mm ²)	許容応力度 sa(N/mm ²) (SM570)	安全率 sa/	判定
SHAKEを用いた応答変位法による杭の断面力(バネ1)	30.4	217.5	7.15	OK
SHAKEを用いた応答変位法による杭の断面力(バネ2)	10.6	217.5	20.51	OK
FLIPを用いた応答変位法による杭の断面力	54.7	217.5	3.97	OK
地盤と杭の連成解析FLIPにより直接得られる杭の断面力 (原地盤モデル)	38.8	217.5	5.60	OK
地盤と杭の連成解析FLIPにより直接得られる杭の断面力 (豊浦標準砂を仮定した地盤モデル)	38.9	217.5	5.59	OK

【曲げモーメント図の比較】

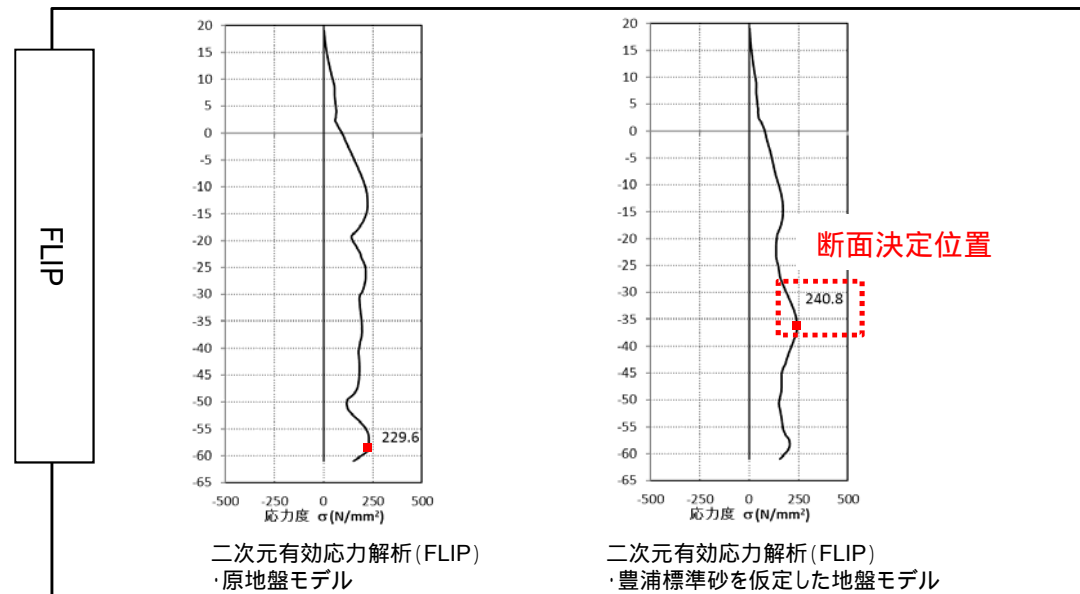
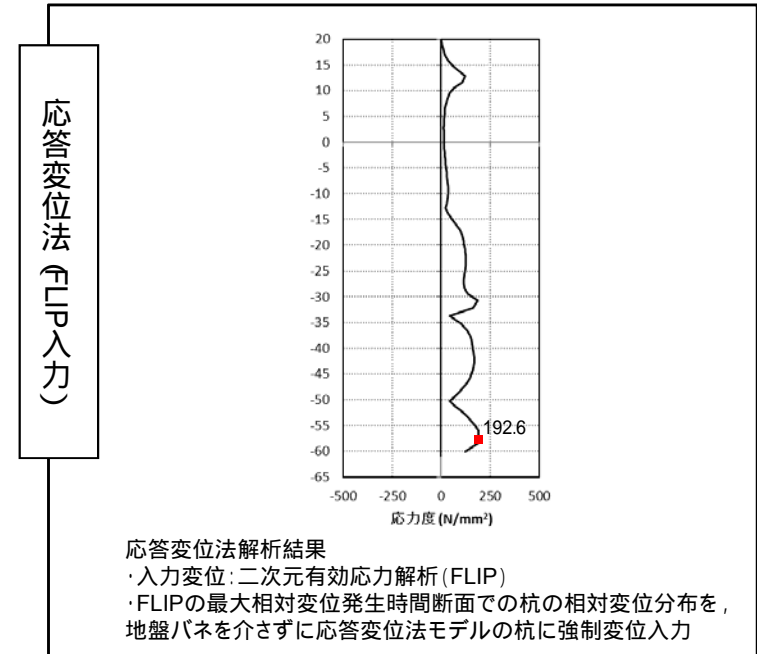
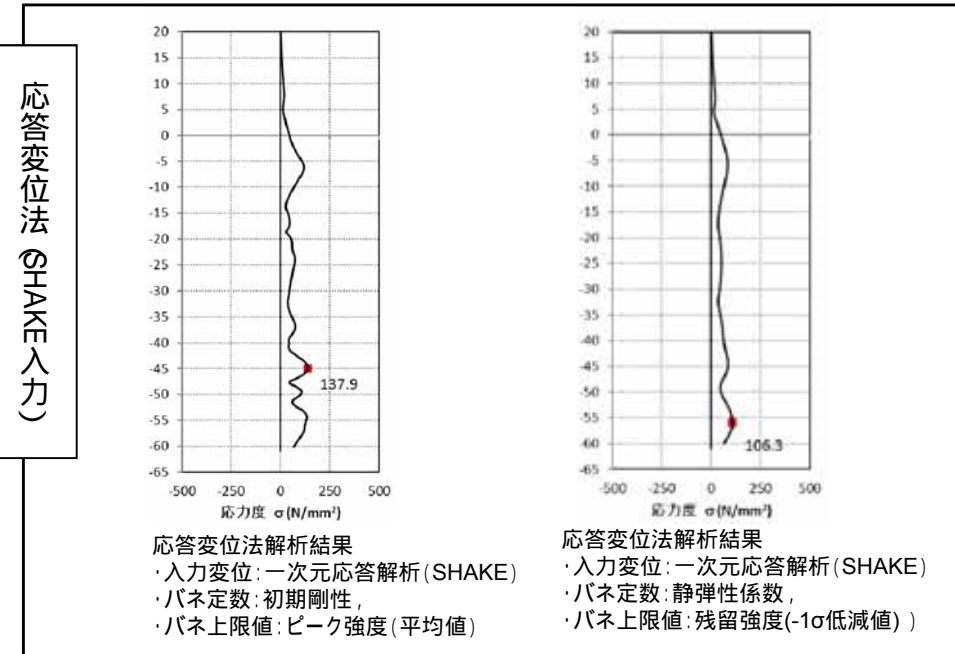
- 杭体の断面は、曲げ及び軸力によって発生する曲げ軸力で決定していることから、曲げモーメント及び軸力分布図を比較した。
- 杭と地盤の動的連成解析 (FLIP) により直接得られた杭の曲げモーメントが最大となることを確認した。



応答変位法と連成解析FLIPによる評価結果の比較 (断面:地点 , 横断面方向) 【曲げ軸力による応力度図の比較】



- 杭体の断面は曲げ及び軸力によって発生する応力で決定していることから, 各ケースの曲げ軸力による応力度分布図を比較した。
- 杭と地盤の動的連成解析 (FLIP) により直接得られた杭の曲げ軸応力 (縁応力) が最大となることを確認した。

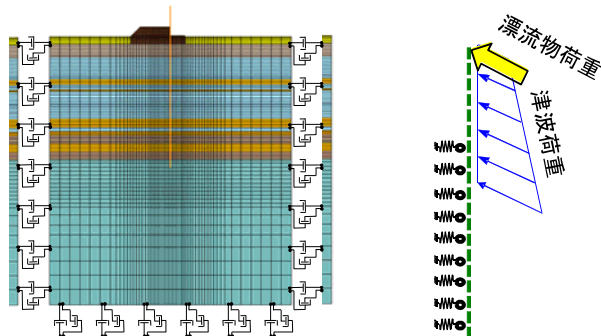


横断面方向の検討

主要な荷重(地震時,津波時,津波+余震時及び漂流物)に対しては,鋼管1本で抵抗する設計とする。

【二次元有効応力解析】
・地震時

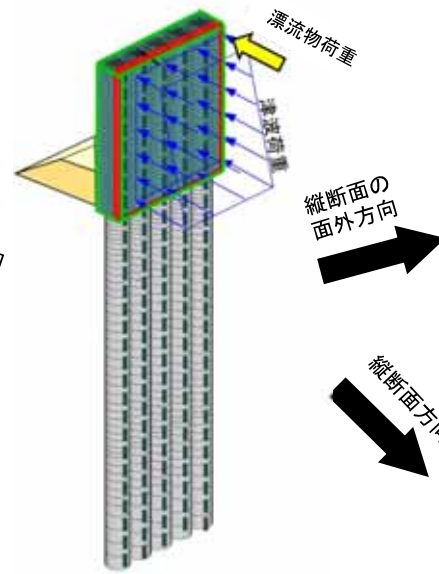
【二次元フレーム解析】
・津波時,津波+余震時



豊浦標準砂を仮定したモデル,層厚のケーススタディ,岩盤傾斜部の検討を実施し,敷地内にある地盤条件を包絡し,保守的な条件下で検討を実施する。

上部工における鉛直方向の曲げに対する影響については,鋼管とコンクリート間に生じるせん断力を発生曲げモーメントから算出し,必要なスタッドの本数を決定する。

【三次元FEM解析】
・地震時
・津波時,津波+余震時



斜め方向の荷重については,三次元FEM解析によりせん断力を算出し,これに対してコンクリートのみで抵抗可能かあるいは,せん断補強筋の要否を確認する。

三次元FEM解析も同様の地盤バネで検討

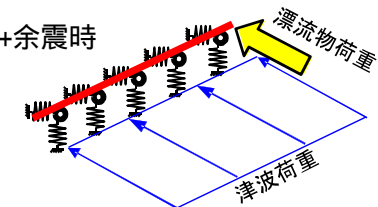
弾塑性地盤バネの保守性
(最も厳しい条件を選定)

地盤バネ定数	上限値
初期剛性	ピーク強度(平均値)
余震時収束剛性	ピーク強度(-1 低減値)
地震時収束剛性	残留強度(平均値)
静弾性係数	残留強度(-1 低減値)

縦断面(上部工)の面外方向の検討

主要な荷重(地震時,津波時,津波+余震時及び漂流物)に対して,上部工の健全性を確保することで止水性能を保持する設計とする。

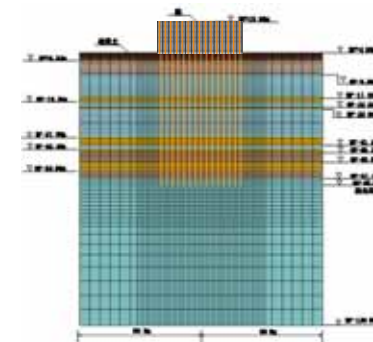
【二次元梁バネ解析】
・地震時
・津波時,津波+余震時



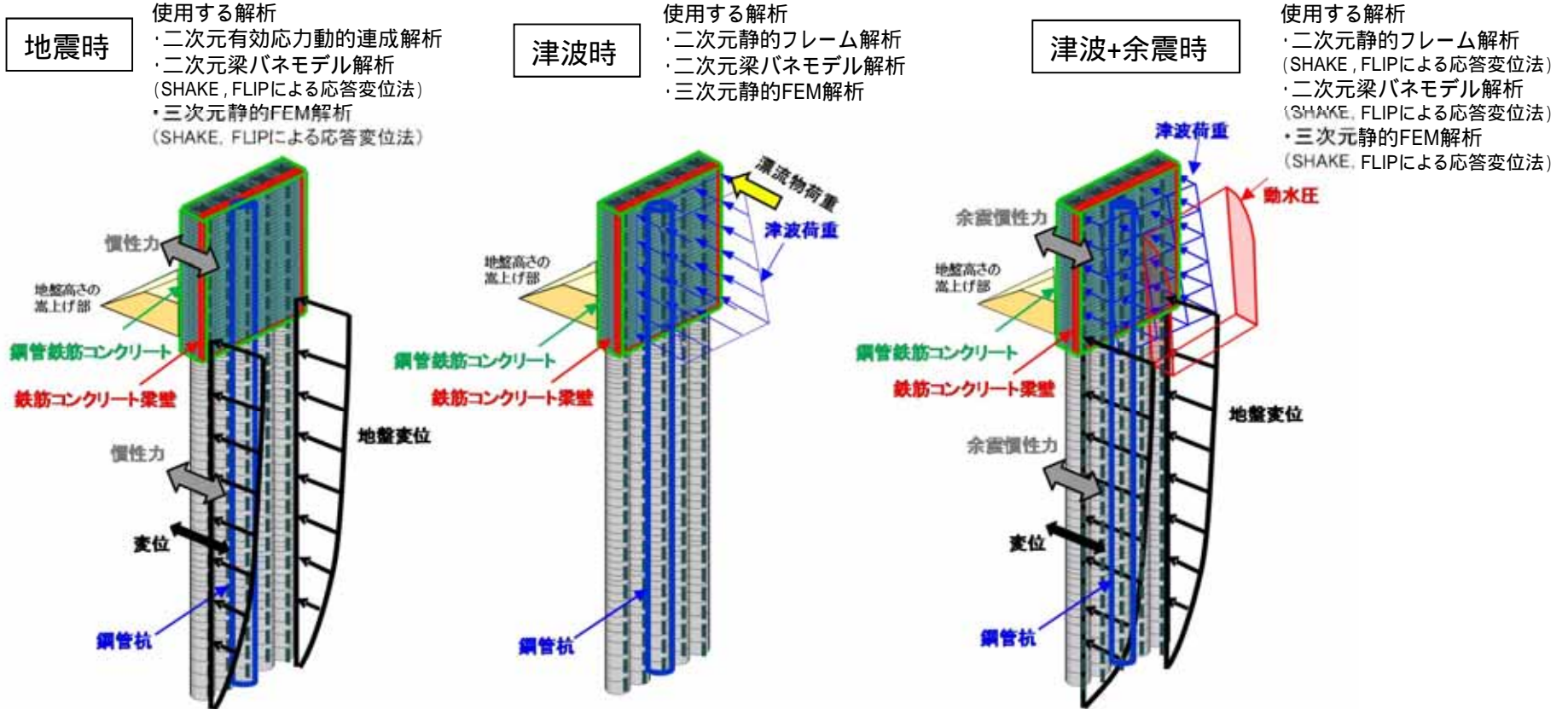
水平方向の曲げについては,鉄筋コンクリート梁壁をモデル化した梁バネモデルを用いて照査を行い,水平方向のせん断補強筋及び主鉄筋を算定する。

縦断面の面内方向の検討

【二次元有効応力解析】
・地震時



1ユニット上部工間の変位量を確認し,水平方向の支圧応力から支圧破壊が生じないことを確認する。



検討ケース	地震時	津波時	津波+余震時
設計対象 鋼管杭, 鋼管鉄筋コンクリートの設計	二次元有効応力動的連成解析により評価	二次元静的フレームモデル解析により評価	一次元地震応答解析, 二次元有効応力動的連成解析の変位と加速度を用いて二次元静的フレーム解析により評価
鉄筋コンクリート梁壁の設計	一次元地震応答解析, 二次元有効応力動的連成解析の変位と加速度を用いて二次元梁バネモデル解析により評価	二次元梁バネモデル解析により評価	一次元地震応答解析, 二次元有効応力動的連成解析の変位と加速度を用いて二次元梁バネモデル解析により評価
鋼管杭, 鉄筋コンクリート梁壁, 鋼管鉄筋コンクリートの設計	一次元地震応答解析, 二次元有効応力動的連成解析の変位と加速度を用いて三次元FEM解析により評価	三次元FEM解析により評価	一次元地震応答解析, 二次元有効応力動的連成解析の変位と加速度を用いて三次元FEM解析により評価

最も厳しい照査値により評価

まとめ 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の構造成立性について



構造成立性の検討にあたっては、構造体に対してより厳しい評価となる解析断面を選定し、その地盤モデルについても地層構成の不確かさや地盤物性値のバラツキなどを安全側に考慮(極端な地層厚の組合せや強制的な液状化を仮定するなど)した評価を行った。

検討結果によれば、全ての検討ケースにおいて、鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の下部工及び上部工とも各照査項目は許容値内に収まっていることを確認した。なお、解析ケースのうち一番厳しい結果となった岩盤傾斜部については、現在実施中の追加地質調査結果(速報)から実際の岩盤の傾斜は想定よりも緩やかであることが判明していることから、保守的な評価結果であったと判断される。

以上のことから、構造成立性の検討としては安全側に包含する条件での評価を行っており、その照査結果も許容限界値以下であることから、防潮壁としては十分な構造強度を有し、止水性能を保持している。なお、今後の詳細設計段階では、検討条件の変化が生じた場合においても、材料仕様の変更等により安全余裕を確保でき、柔軟な設計対応が可能である見通しを得た。

鋼管杭(2,500mm, SM570, t=35mm, 40mm)

照査項目	安全率最小のケース	応答値	許容値	安全率	判定
曲げ・軸力	地点・岩盤傾斜部・豊浦標準砂を仮定したモデル 横断Km層最浅部(T.P.-31.36m)	353.80 (N/mm ²)	382.5 (N/mm ²)	1.08 (水平2方向考慮 1.03)	OK
せん断	地点・岩盤傾斜部・豊浦標準砂を仮定したモデル 縦断1Dケース(最浅部:杭先端T.P.-22.24m)	48.33 (N/mm ²)	217.5 (N/mm ²)	4.50	OK
支持力	地点・粘土層が最も薄く豊浦標準砂を仮定したモデル	819 (kN)	6,288 (kN)	7.67	OK
座屈耐力	地点・岩盤傾斜部・豊浦標準砂を仮定したモデル 縦断1Dケース(最深部:杭先端T.P.-31.36m)	14,160 (kN)	119,036 (kN)	8.40	OK

- 板厚はt = 100mm程度まで厚くする対応が可能である(ただし、工事期間や施工効率を考慮した選定が必要)。

上部工(鉄筋:SD490, D=22mm, 35mm, コンクリート設計基準強度:40N/mm²)

照査項目	安全率最小のケース	応答値	許容値	安全率	判定
圧縮(コンクリート)	二次元梁バネモデル 津波 + 余震時	14.62 (N/mm ²)	21 (N/mm ²)	1.43	OK
引張(鉄筋)	二次元梁バネモデル 津波 + 余震時	277.91 (N/mm ²)	435 (N/mm ²)	1.56	OK
せん断	静的三次元FEMモデル 津波 + 余震時	237.28 (N/mm ²) ¹	435 (N/mm ²) ²	1.83	OK

1 せん断補強鉄筋に作用する応力度 2 せん断補強筋の許容せん断応力度

- コンクリートの設計基準強度は80N/mm²程度まで対応可能である(ただし、ひび割れの発生を防止するためのコンクリート打設時リフト分け等の検討が必要)。
- 鉄筋は、上部工のコンクリート部材厚さを調節し、より強度の大きいD51程度まで鉄筋径を増すことが可能である(ただし、隅角部の鉄筋加工方法等の検討が必要)。