

3.3.3 地盤 - 杭基礎 - 構造物の三次元数値シミュレーションの研究

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 3カ年の年次実施計画
- (e) 平成16年度業務目的

(2) 平成16年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
 - 1) 解析対象の三次元有限要素法 (FEM) によるモデル化
 - 2) 解析対象の地盤のモデル化
 - 3) 固有値解析
 - 4) 地震応答解析
- (c) 業務の成果
- (d) 結論ならびに今後の課題
- (e) 引用文献
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
- (g) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定

(3) 平成14～16年度業務のまとめ

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 地盤 - 基礎 構造物系の三次元数値シミュレーションの研究

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
(株)竹中工務店 技術研究所	主任研究員	鬼丸 貞友
先端研究開発部	研究主任	吉澤 睦博

(c) 業務の目的

液状化地盤中の杭基礎構造物の動的挙動に関して、現状の三次元数値シミュレーションが実験結果をどの程度予測できるかのデータを得ることを目的に、せん断土槽を用いた杭基礎構造物の模型振動台実験について、実験実施に先立ち数値シミュレーションによる予測解析を行う。解析結果と実験結果の対応をもとに評価手法の妥当性と課題を明確にする。

(d) 3 ヶ年の年次実施計画

1)平成14年度：

農工研で実施するせん断土槽を用いた地盤-杭基礎-構造物の振動台実験を対象に3次元有限要素法の解析モデルの作成と材料定数の設定を行う。

固有値解析等により作成した解析モデルの基本的な特性を把握する。

本年度実施される実験の内、乾燥地盤・緩詰めモデルと飽和地盤・緩詰めモデルを選びシミュレーション解析を実施する。

2)平成15年度：

平成14年度に実施した解析結果と実験結果の対応を確認し、差異が見られる場合にはその原因を分析する。

平成14年度に実施した解析結果と実験結果の対応を確認し、差異が見られる場合にはその原因を分析する。

上記の結果に基づき、3次元FEMモデル及び材料定数の設定に関する見直しを実施する。

平成15年度に実施する振動台実験から代表的なケースを選び、シミュレーション解析を実施する。

解析結果から多方向入力の影響に関して整理し、実験との対応を調べる。

3)平成16年度：

平成15年度の結果を踏まえ、必要に応じ解析条件等の見直しを実施する。

平成16年度に実施する振動台実験から代表的なケースを選び、シミュレーション解析を実施する。解析結果から群杭の場合における多方向入力の影響に関して整理し、実験との対応を調べる。

液状化地盤における杭基礎構造物の地震時挙動に関して、平成14年～平成16年の解析結果及び実験結果の対応を基に、多方向入力の影響やその際の群杭効果に関して得られた知見を整理する。合せて、数値解析手法の適用性と課題を明確にし、今後の研究課題を整理する。

(e) 平成16年度業務目的

農工研で実施するせん断土槽を用いた地盤-杭基礎-構造物の振動台実験を対象に、実験結果を適切にシミュレーションできるように3次元有限要素法の解析モデルの作成と材料定数の設定を行う。

固有値解析等により作成した解析モデルの基本的な特性を把握し、適切なモデルとなっていることを確認する。

本年度実施される実験の内、飽和地盤・密詰めモデルを選びシミュレーション解析を実施し、作成した3次元モデルによりせん断土槽を用いた地盤-杭基礎-構造物系の地震挙動を適切に評価できることを確認する。

(2)平成 1 6 年度の成果

(a) 業務の要約

平成 1 6 年度は次の各項目を実施した。

1) 解析対象の三次元有限要素法 (FEM) によるモデル化

実験に用いるせん断土槽および杭基礎、上部構造物を三次元 FEM でモデル化した。

2) 固有値解析

三次元 FEM モデルの固有値解析を行い実験モデルの振動特性の予測を行った。

3) 地震応答解析

三次元 FEM モデルの地震応答解析を実施し、実験結果の予測を行った。行った解析ケースは以下の通りである。

- ・飽和地盤 密詰めモデル 基礎埋め込み無し 最大 250Gal 水平一方向加振
- ・飽和地盤 密詰めモデル 基礎埋め込み無し 最大 250Gal 水平二方向加振
- ・飽和地盤 密詰めモデル 基礎埋め込み無し 最大 250Gal 水平二方向 + 鉛直方向加振
- ・飽和地盤 密詰めモデル 基礎埋め込み 20cm 最大 250Gal 水平一方向加振
- ・飽和地盤 密詰めモデル 基礎埋め込み 20cm 最大 250Gal 水平二方向加振

(b) 業務の実施方法

1) 解析対象の三次元有限要素法 (FEM) によるモデル化

三次元 FEM で用いる解析モデルの作成では次の点に留意した。

- ・平成 1 5 年度の検討結果を踏まえ、杭の排除体積分を考慮して地盤のモデル化を行った解析モデル相当の杭の応力分布を与えるメッシュを用いた。

2) 固有値解析

株式会社竹中工務店技術研究所保有の三次元非線形有限要素法解析プログラム MuDIAN¹⁾の固有値解析機能を用い、同研究所の EWS を用いて行った。

3) 地震応答解析

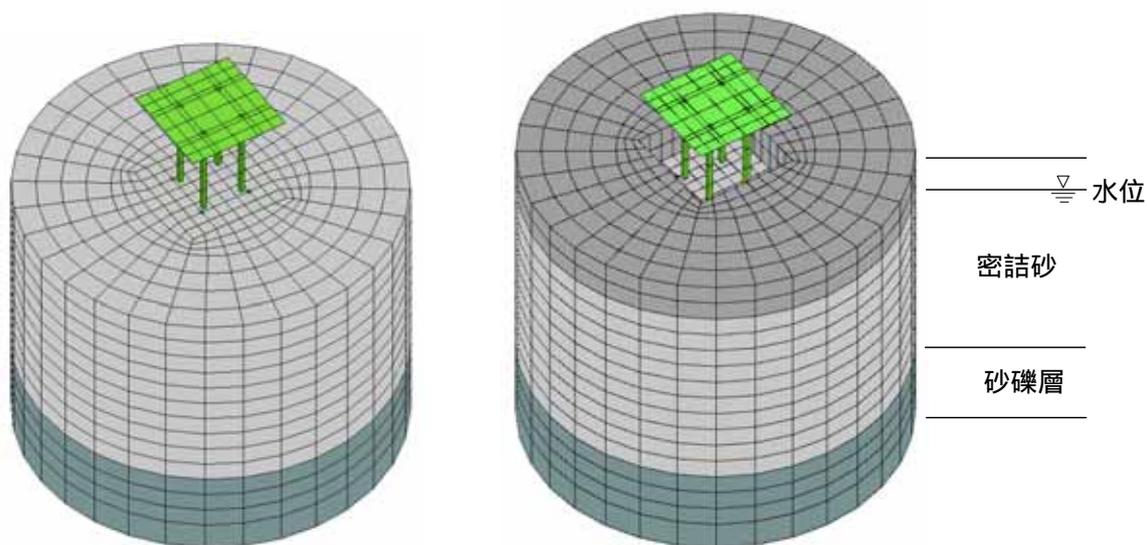
株式会社竹中工務店技術研究所保有の三次元非線形有限要素法解析プログラム MuDIAN の地震応答解析機能を用い、同研究所の EWS を用いた並列計算処理を行った。

(c) 業務の成果

1) 解析対象の三次元有限要素法 (FEM) によるモデル化

三次元 FEM によるモデル化は杭を線形の梁要素でモデル化し、地盤を六面体のソリッド要素でモデル化した。杭による地盤の排除体積分のモデル化を行わないモデルとしたため、平成 15 年度の検討結果を踏まえ、杭近傍地盤の平面方向分割を杭径の 2.5 倍に分割した解析メッシュを用いた。杭径と同程度に平面方向を分割した場合には杭径による載荷幅を考慮した力の伝達がモデル化できず、集中応力による局所非線形化が進んでしまうためである。

図 1 に本検討で用いた解析モデルのメッシュ図を示す。基礎の埋め込みがあるモデルの場合は埋め込み部の側面は水平方向変位は剛とし、鉛直方向はローラー条件とした。



(1)基礎部分の埋込みが無い場合

(2)基礎部分の埋込みが20cmの場合

図 1 三次元 FEM による解析モデル

2) 解析対象の地盤のモデル化

平成 15 年度の振動実験は、より実際の構造物挙動に近づけるために土層の地盤を液状化層と非液状化層の二層地盤からなるモデルが採用された。液状化地盤は相対密度が 75 ~ 85% 程度の密な砂地盤とし、非液状化地盤は碎石を締め固めた砂礫層となっている。

a) 液状化層

密な砂地盤をモデル化するために豊浦砂相対密度 80% の土質試験結果を用いた。表 1 に土質試験結果から設定した物性値を示す。

表 1 設定した地盤物性のパラメータ

	単位体積重量 (kN/m ³)	せん断剛性 (MPa)	内部 摩擦角	透水係数 (m/s)
砂層	18.2	75.9	42	1.65×10 ⁻⁴

有効拘束圧72.5kPaの場合

砂地盤の液状化挙動のモデル化は Zienkiwicz らの MC-Densification モデル²⁾を用いた。MC-Densification モデルはせん断特性を非関連流れ則を用いた Mohr-Coulomb 型の降伏基準でモデル化し、ダイレイタンスー特性を繰り返しせん断によるせん断歪みから算出される累積損傷度によりモデル化した三次元にも適用可能な簡便な構成式である。

MC-Densification モデルでは累積せん断により発生するダイレイタンスー量をコントロールするモデルパラメータ A, B, を、単純せん断試験や繰り返し三軸試験結果等の要素シミュレーションより求める。ここでダイレイタンスー特性を表す損傷パラメータがせん断歪みの累積値の関数になっているため、歪みの大きな範囲で有効応力が回復するサイクリックモビリティ挙動はモデル化していない。図 2 に今回の要素シミュレーションの結果と有効応力経路、応力歪み関係、および Densification モデルのパラメータを示す。

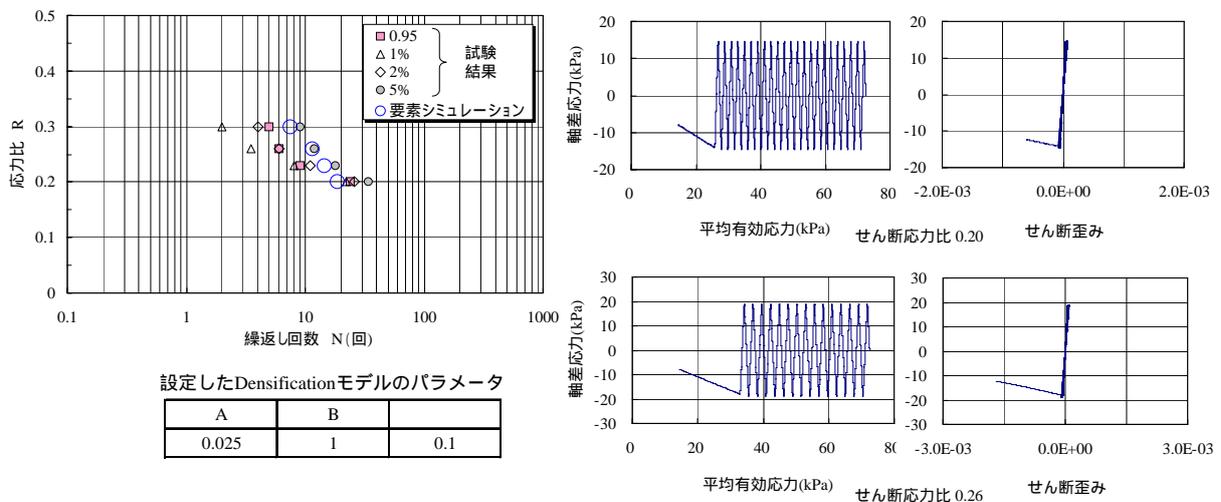


図 2 設定した液状化強度と試験結果の比較

b)非液状化層

非液状化層は締め固めた砕石により作られている。そこで田中らの研究³⁾で提案されているせん断剛性の設定法を用いてせん断剛性をモデル化した(図 3 参照)。砕石層のせん断剛性は次式で表される。

$$G_0 = 563.5 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_{m0})^{0.434} \quad \sigma'_{m0} = \frac{1 + 2K_0}{3} \sigma'_v \quad (\text{ただし単位はkg/cm}^2)$$

砕石層は線形材料とし、実験装置で想定される土被り圧から表 2 の値を設定した。

表 2 設定した砕石層のパラメータ

	乾燥密度 (g/cm ³)	せん断剛性 (MPa)
砂礫層	1.896	52.2

有効拘束圧14.9kPaの場合

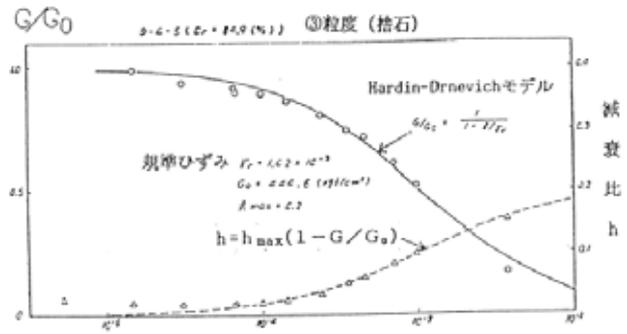
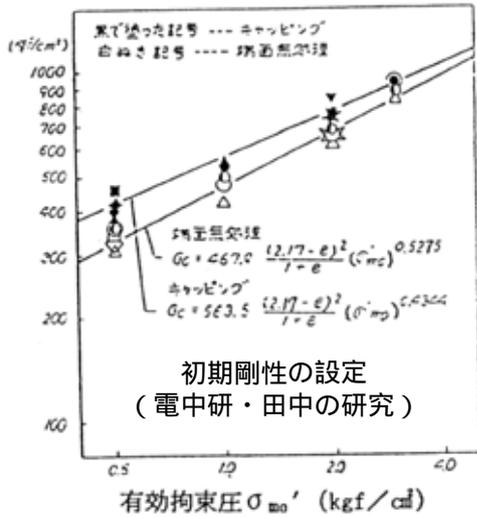


図 3 砕石層のモデル化³⁾

c) 構造物のモデル化

杭、および上部構造物の形状を図 4 に示す。柱要素は実験体のプロポーシオンを持つ梁材として、柱以外の上部構造物及び基礎版は剛な板要素でモデル化した。板要素の質量密度は、鋼板部分の重量に柱の重量を上下に等分して振り分けて算出した。柱及び杭の材料定数を表 3 に、板要素で用いた質量を表 4 に示す。

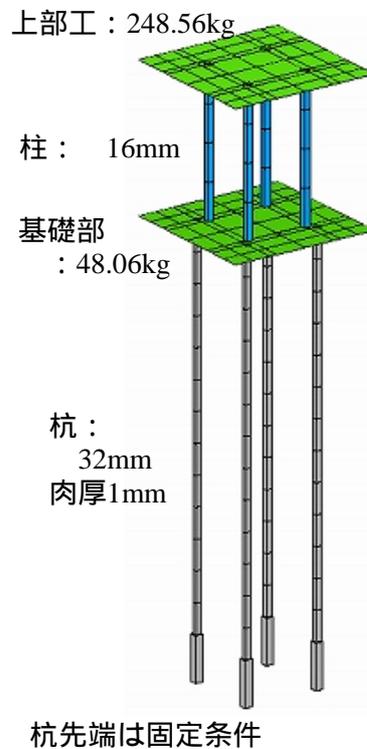


図 4 構造物模型の形状

表 3 設定した構造物のパラメータ

	外径 (m)	内径 (m)	断面積 (m ²)	断面二次モー メント (m ⁴)	E (kN/m ²)	
杭	0.032	0.03	9.7389E-05	1.1711E-08	1.9320E+08	0.3
柱	0.016	0	2.0106E-04	3.2170E-09	2.0580E+08	0.3

表 4 構造物模型の質量

	質量(kg)	高さ(m)
基礎側	48.06	0
上部構造物	248.56	0.49

d)せん断リングのモデル化

解析モデルの深さ方向の分割は 1) の三次元 FEM モデル化の検討結果より、深さ方向の分割がせん断リングの厚さ (50mm) の 1 倍と 2 倍とで結果が大きく変わらないと判断出来たので、深さ方向の分割は 100mm 毎とした。せん断リングは解析モデルの外周の節点に水平方向にのみ作用する集中質量としてモデル化した。集中質量はリング 1 枚の質量 (17.8kg) の 2 倍を外周の節点数で等分して設定した。

また埋め込みのあるモデルでは埋め込み部の 200mm を剛なリングで囲っているため、今回はその分の重量をせん断リングの最上層に集中質量として加えた。

3) 固有値解析

地震応答解析で用いる数値減衰のレイリー減衰のパラメータを設定するために、解析モデルの固有値解析を行った。固有値解析は解析モデルの底面の変位を固定条件として行った。表 5 に解析結果を示す。図 5 は振動実験結果から得られた建物モデルの伝達関数と固有 1 次周波数の比較である。解析モデルは建物の振動数特性をほぼ評価しているといえる。また、図 6 は実験モデル全体と土槽部分をモデル化した場合の水平 1 次の固有モード図である。

地震応答解析用いるレイリー減衰の係数 α と β は、表 5 に示した水平の 1 次および 2 次の固有振動数から、(1)式より算出した。

$$h_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \quad (1)$$

添字の i は i 次モードを意味し、 h_i は各要素ごとに i 次モードで設定する減衰である。今回は全ての要素で $h=0.02$ として α と β を設定した。ただしモード図より、建屋は建屋のみが卓越する 1 次と土槽部分の水平 1 次 (全体で 2 次) から、土槽部分は土槽部分の水平 1 次と 2 次 (全体の 2 次と 5 次) から設定した。

表 5 固有値解析結果

(1) 基礎の埋め込みが無いモデルの場合

(a) 実験解析用モデル

次数	周波数 (Hz)	周期 (sec)	刺激係数 h(x)	刺激係数 v(y)	刺激係数 h(z)
1	4.76	0.2100	1.540E+0	-1.397E-12	1.540E+0
2	19.00	0.0526	2.470E+0	4.132E-14	2.470E+0
3	39.10	0.0256	-9.041E-7	-1.710E+0	-9.041E-7
4	40.10	0.0250	1.336E-8	4.126E-5	3.211E-8
5	44.00	0.0227	2.840E+0	1.236E-12	2.840E+0

(b) 自由地盤のモデル

次数	周波数 (Hz)	周期 (sec)	刺激係数 h(x)	刺激係数 v(y)	刺激係数 h(z)
1	19.50	0.0513	9.300E-1	8.712E-13	9.300E-1
2	36.30	0.0276	6.020E-1	1.540E-6	6.020E-1
3	38.90	0.0257	9.748E-7	1.860E+0	9.748E-7

(2) 基礎の埋め込み 20cm モデルの場合

(a) 実験解析用モデル

次数	周波数 (Hz)	周期 (sec)	刺激係数 h(x)	刺激係数 v(y)	刺激係数 h(z)
1	3.46	0.2890	7.942E-7	7.294E-13	8.218E-7
2	4.84	0.2060	1.580E+0	1.406E-6	1.580E+0
3	18.20	0.0550	2.230E+0	3.152E-5	2.160E+0
4	48.80	0.0205	5.470E-1	-1.504E-3	2.510E+0
5	50.50	0.0198	8.128E-6	2.502E-7	8.191E-6

(b) 自由地盤のモデル

次数	周波数 (Hz)	周期 (sec)	刺激係数 h(x)	刺激係数 v(y)	刺激係数 h(z)
1	19.50	0.0513	9.300E-1	8.712E-13	9.300E-1
2	36.30	0.0276	6.020E-1	1.540E-6	6.020E-1
3	38.90	0.0257	9.748E-7	1.860E+0	9.748E-7

刺激係数の添字 v が上下方向

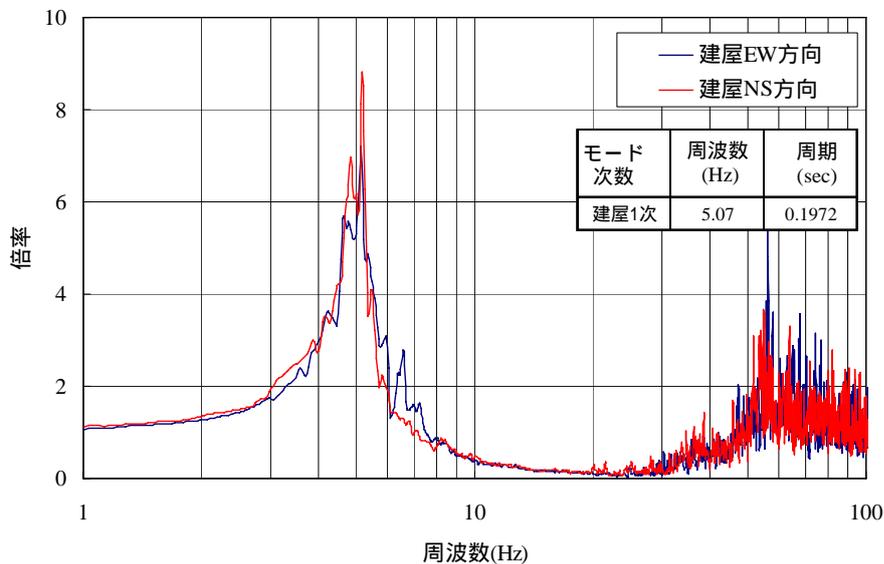
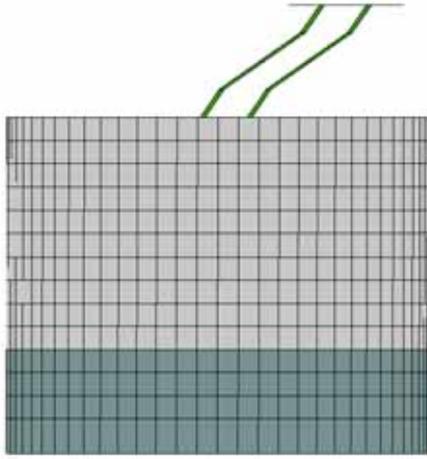
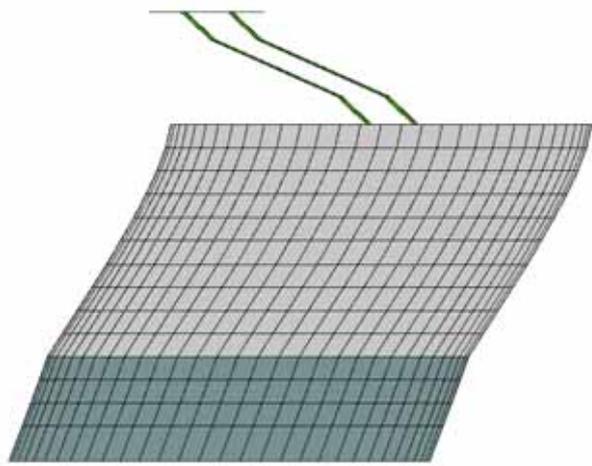


図 5 建屋の伝達関数 (HCXYW33c1) と固有値解析結果

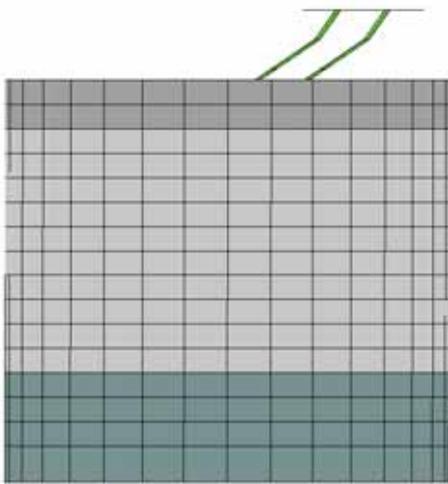


建屋 1次

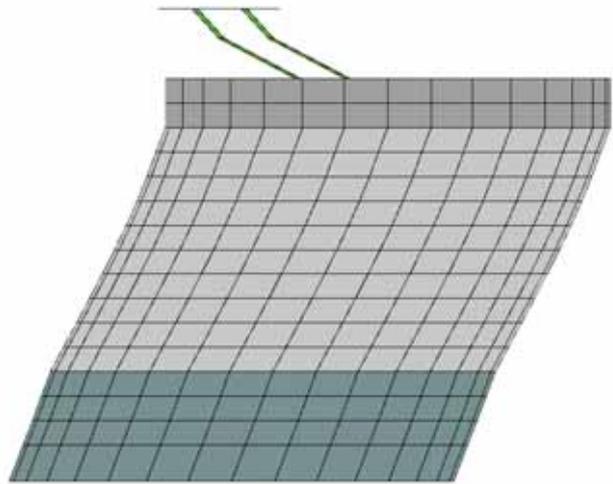


建屋・土層連成

(1) 基礎の埋め込みが無いモデル



建屋 1次



建屋・土層連成

(2) 基礎の埋め込み 20cm モデル

図 6 固有モード図 (水平 1次モード)

4) 地震応答解析

地震応答解析は3次元有効応力解析コード MuDIAN を用いた。入力地震動は実験で用いられたテール波を用いた。実験での入力波形は時間刻み(0.002sec)であるが、解析では時間刻みはさらに2分割(0.001sec)して行った。時間積分はNewmarkの法を用いた。平成16年度に実施した解析ケースを表6に示す。また入力地震動(HC3DW34c1)の波形を図7に示す。

表6 解析ケース

実験ケース	埋め込み	入力動
HCNSW31c1	なし	NS成分+EW成分
HCNSW32c1	なし	NS成分のみ
HCXYW33c1	なし	NS成分+EW成分
HC3DW34c1	なし	NS成分+EW成分+UD成分
HCEWW35c1	なし	EW成分のみ
HCNSW53c1	20cm	NS成分のみ
HCXYW55c1	20cm	NS+EW成分

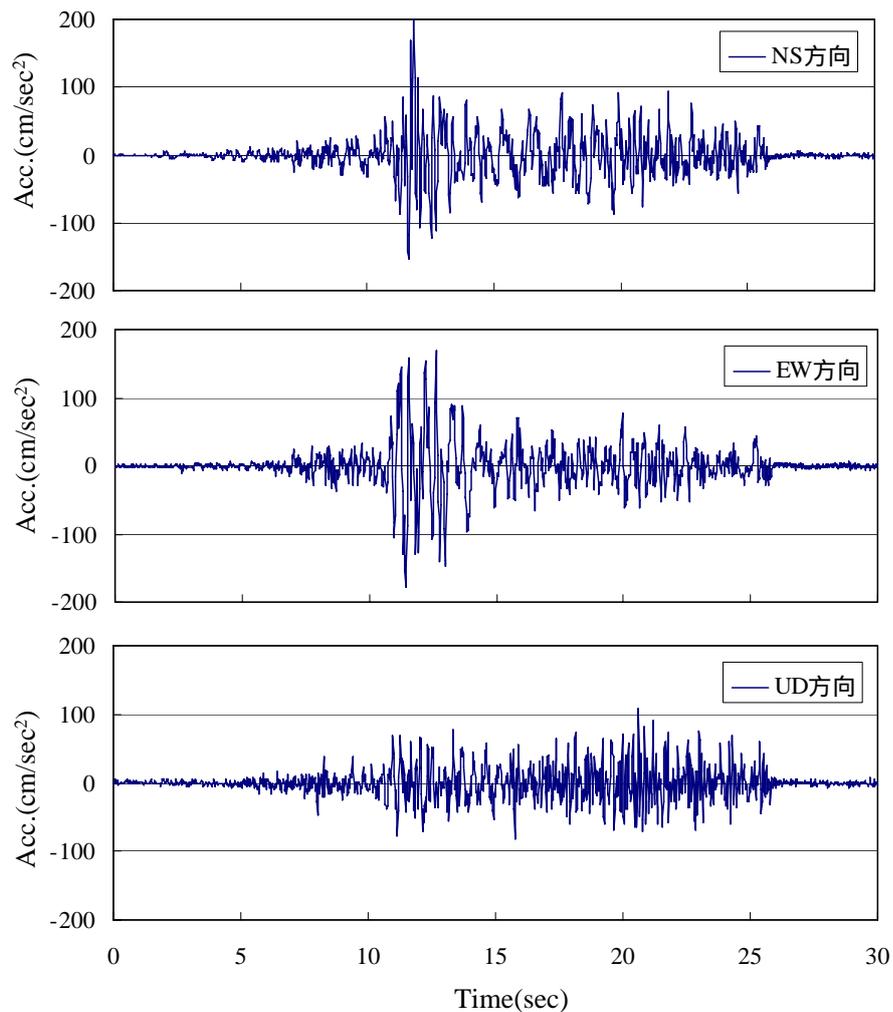


図7 入力波形(実験:HC3DW34c1)

a) 液状化パラメータの見直し

平成 15 年度に検討した実験ケース (HCXYW31c1) のシミュレーション解析では過剰間隙水圧の深度分布が実験と解析とで悪かった。そこで自由地盤をモデル化した場合の応答解析及び構造物が無くせん断リングと土層のみのモデルの応答解析を行い、水圧の立ち上がりを見直しを行った。その結果を平成 15 年度の解析結果と比較して図 8 に示す。

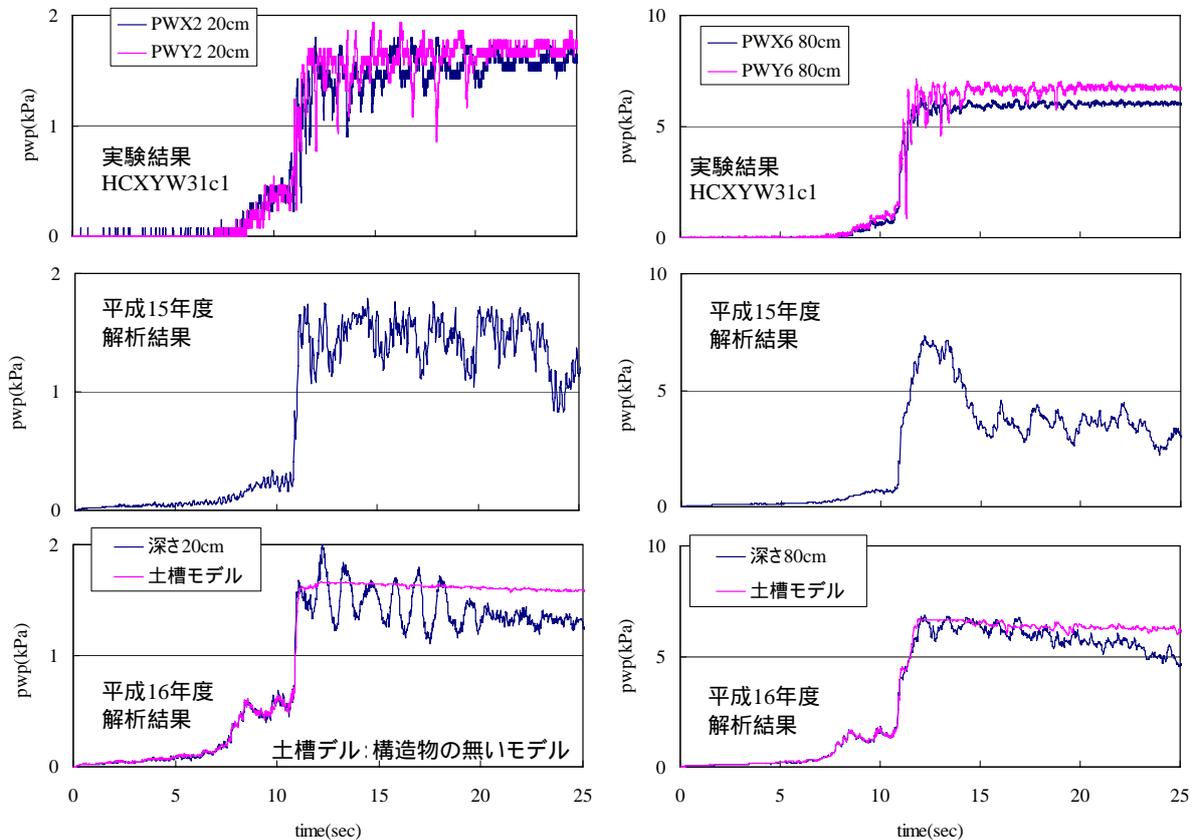


図 8 液状化パラメータの見直しによる水圧比の時刻歴の比較 (HCXYW31c1)

b) 埋め込みが無い場合

埋め込みが無い場合の解析結果を実験結果と比較して NS 方向の応答結果を図 9 ~ 図 13 に、EW 方向の応答結果を図 14 ~ 図 18 に示す。せん断リングの最大応答加速度、最大応答変位の分布の対応は NS 方向、EW 方向とも余り良くない。また最大曲げモーメント分布を比較すると解析結果では GL-100cm の砂礫層との層境界で大きな値を取るが、実験結果では解析レベルの大きな値は発生していない。

一方、杭頭の曲げモーメント、建屋の応答加速度、応答変位の時刻歴波形を比較すると、12 秒付近の主要動第 1 波を解析は表現しているが、12 ~ 15 秒の主要動第 2 波 ~ 第 3 波は解析が追従出来ていない。しかし 15 秒以降では曲げモーメント、建屋の応答変位ともほぼ実験結果を再現していることが判る。これは今回の解析で用いた液状化地盤モデルがサイクリックモビリティ効果を表現していない簡便なモデルであることが理由であると考えられる。

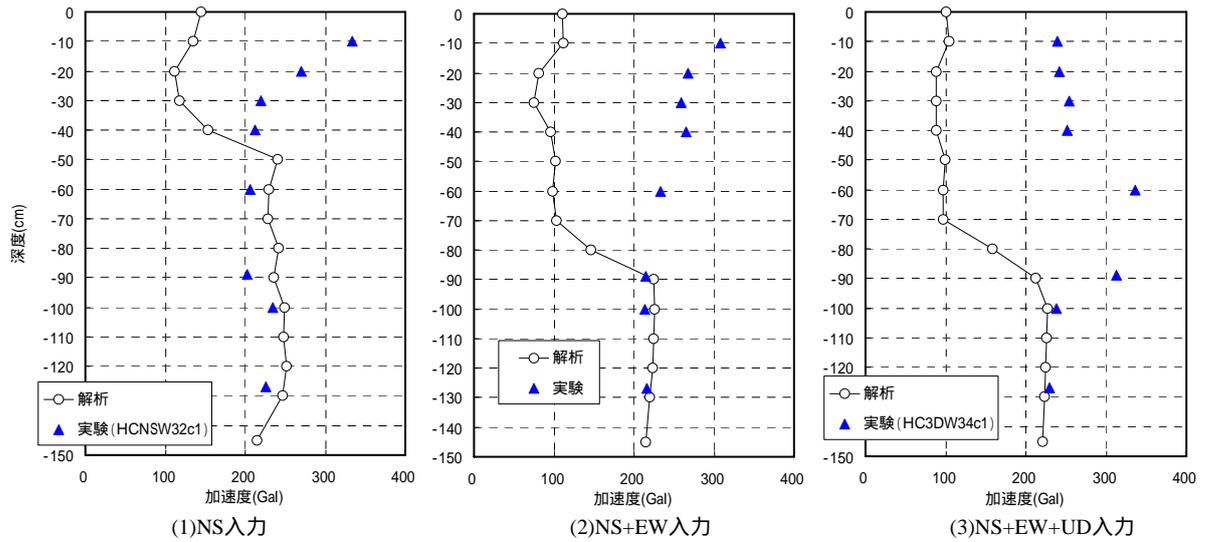


図 9 セン断リングの NS 方向最大応答加速度の深度分布 (埋め込みの無い場合)

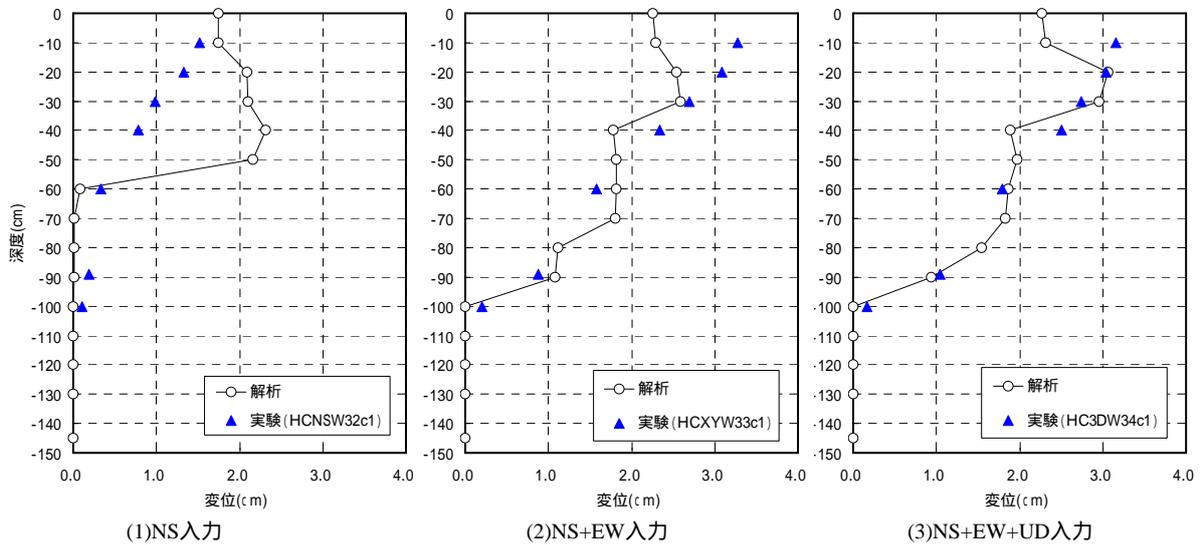


図 10 セン断リングの NS 方向最大応答変位の深度分布 (埋め込みの無い場合)

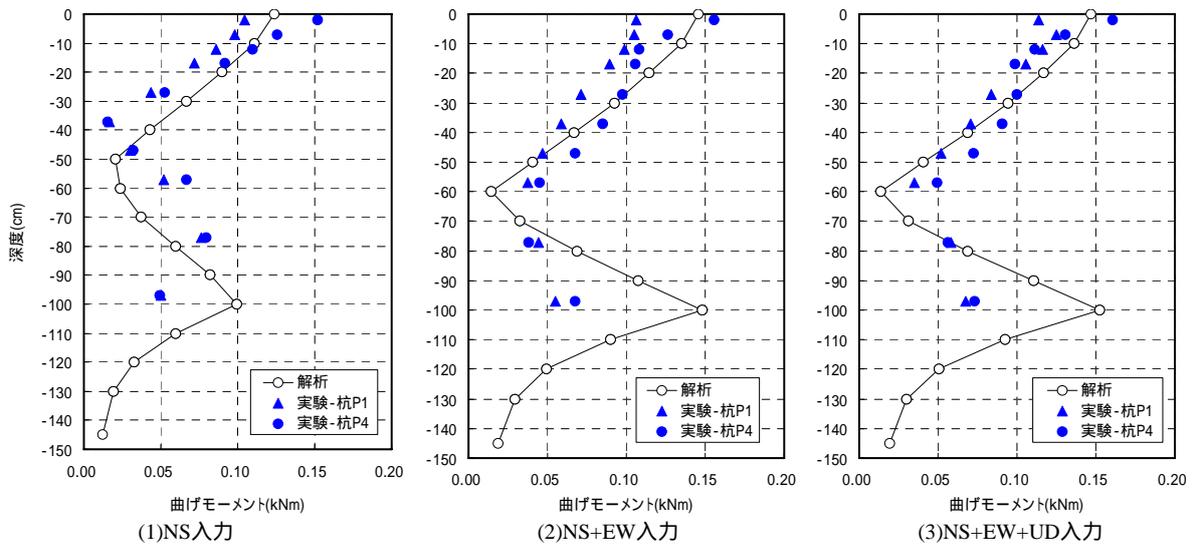


図 11 杭の NS 方向最大モーメントの深度分布 (埋め込みの無い場合)

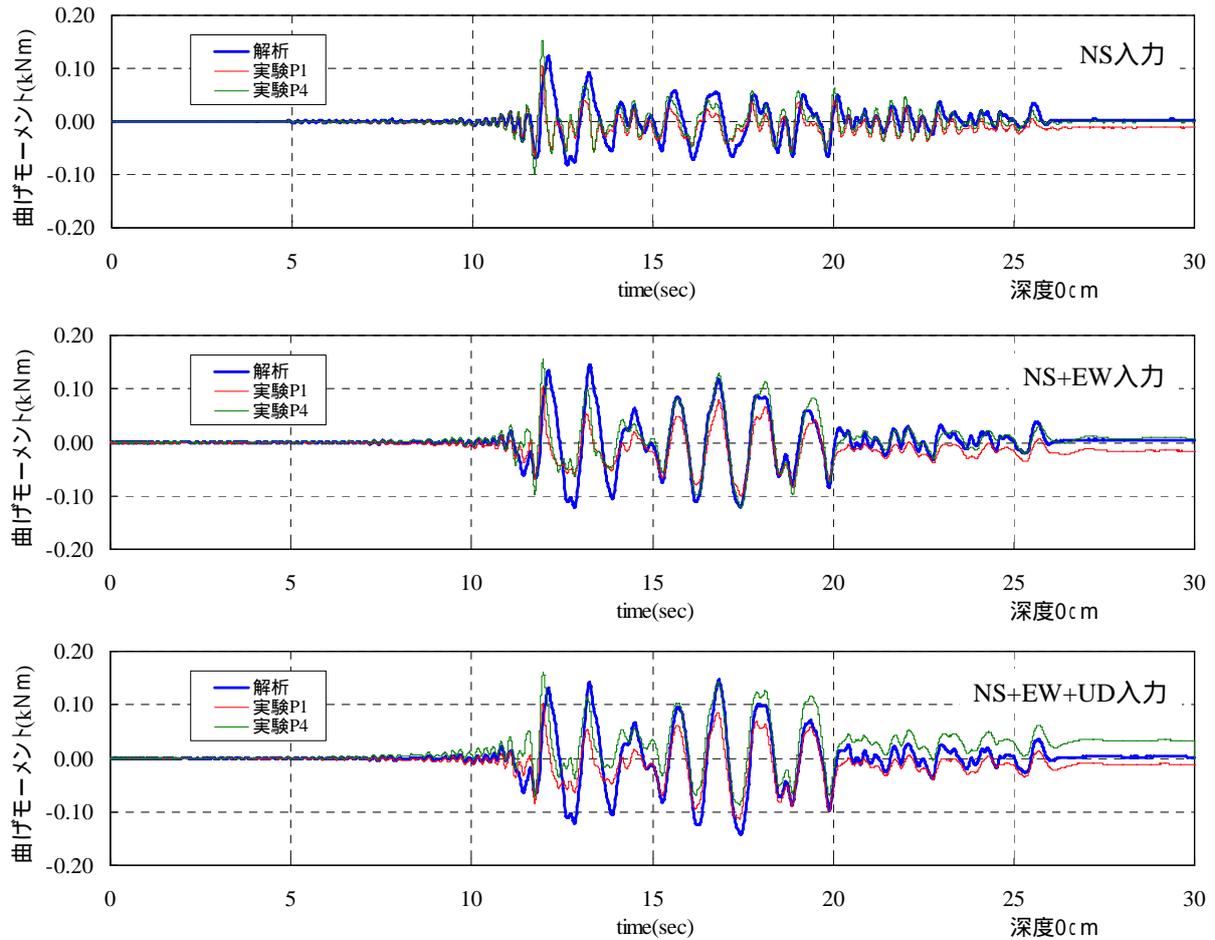


図 12 NS 方向の杭頭曲げモーメントの時刻歴 (埋め込みの無い場合)

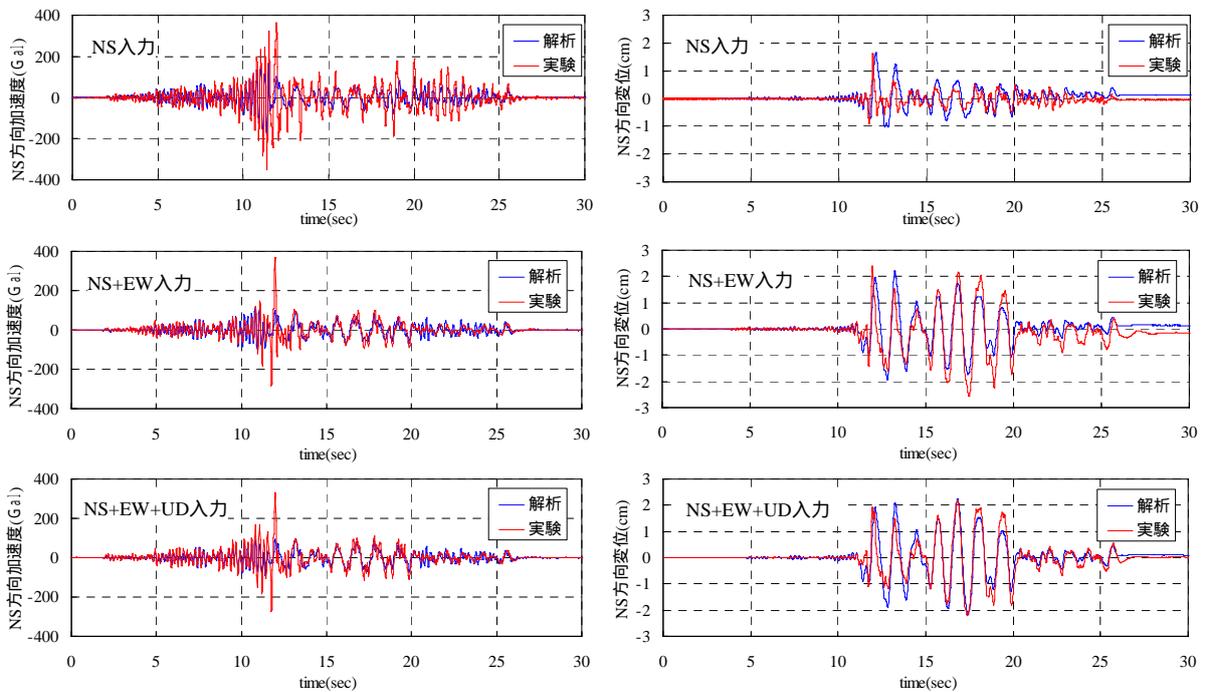


図 13 NS 方向の建屋応答の時刻歴 (埋め込みの無い場合)

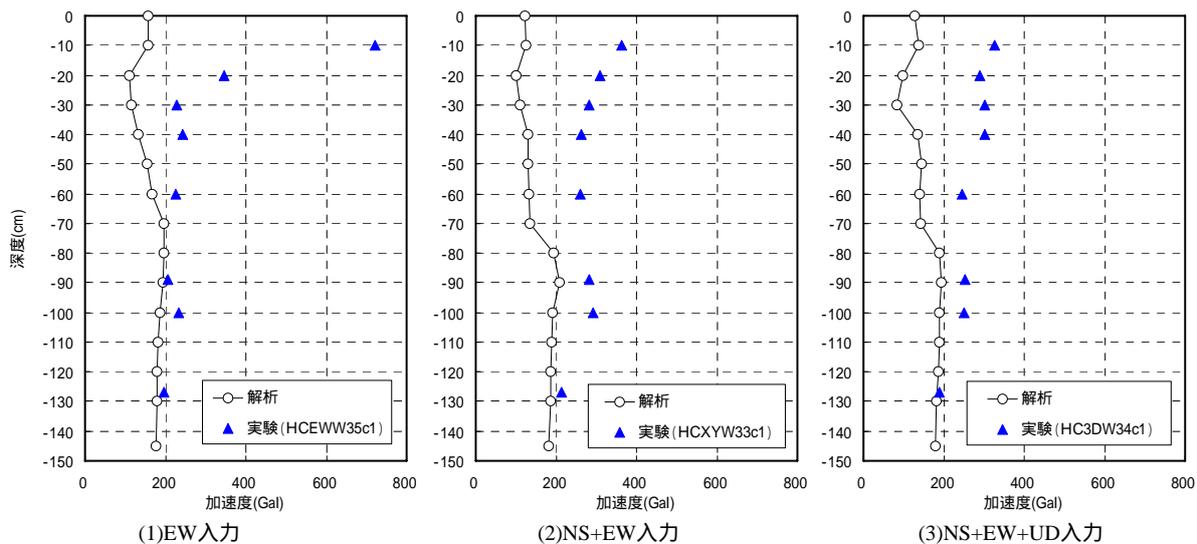


図 14 せん断リングの EW 方向最大応答加速度の深度分布 (埋め込みの無い場合)

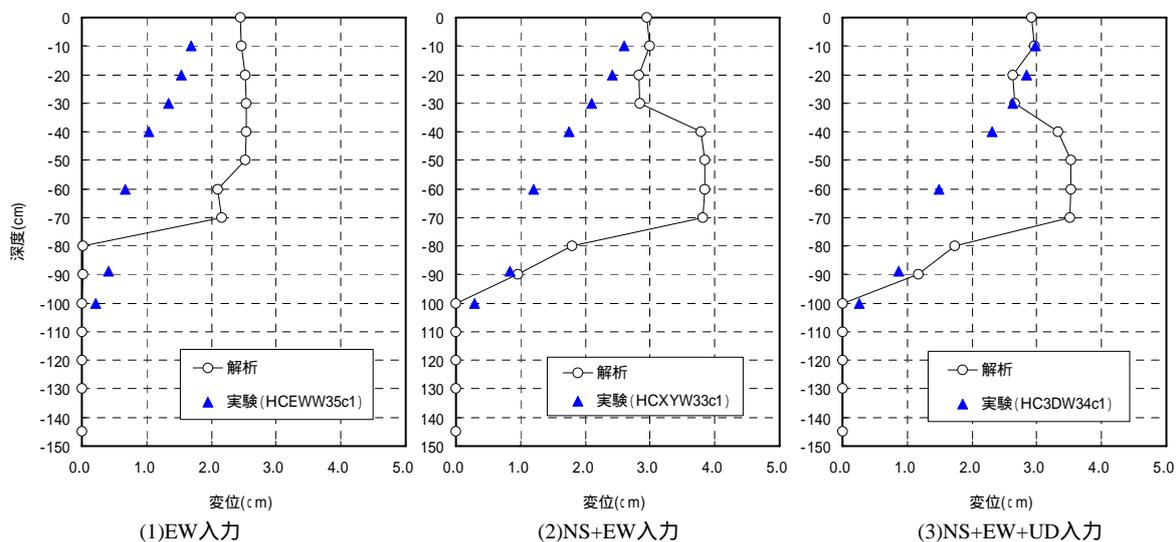


図 15 せん断リングの EW 方向最大応答変位の深度分布 (埋め込みの無い場合)

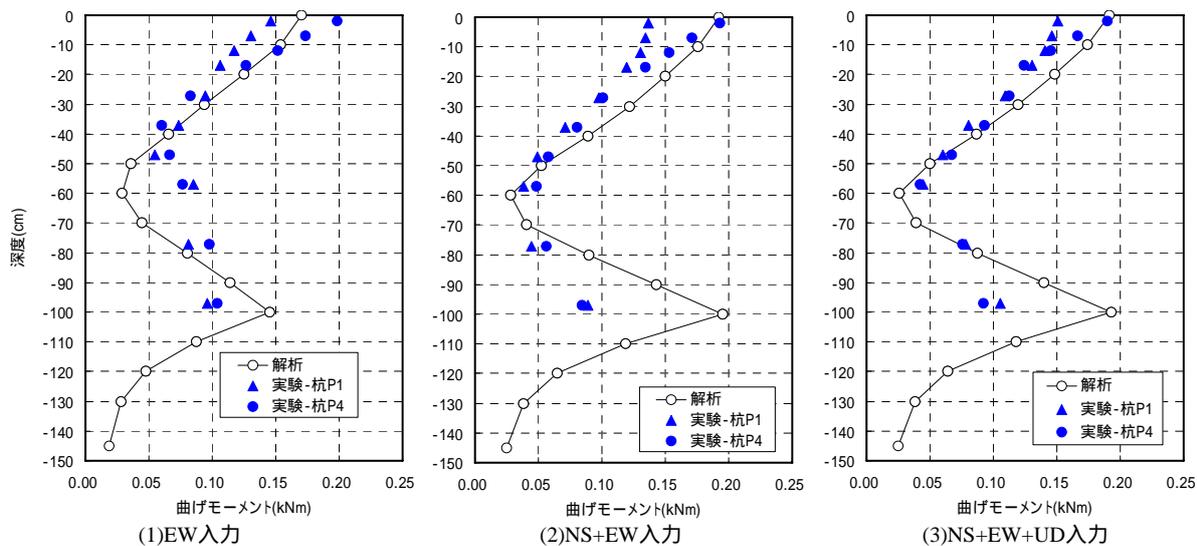


図 16 EW 方向最大曲げモーメントの深度分布 (埋め込みの無い場合)

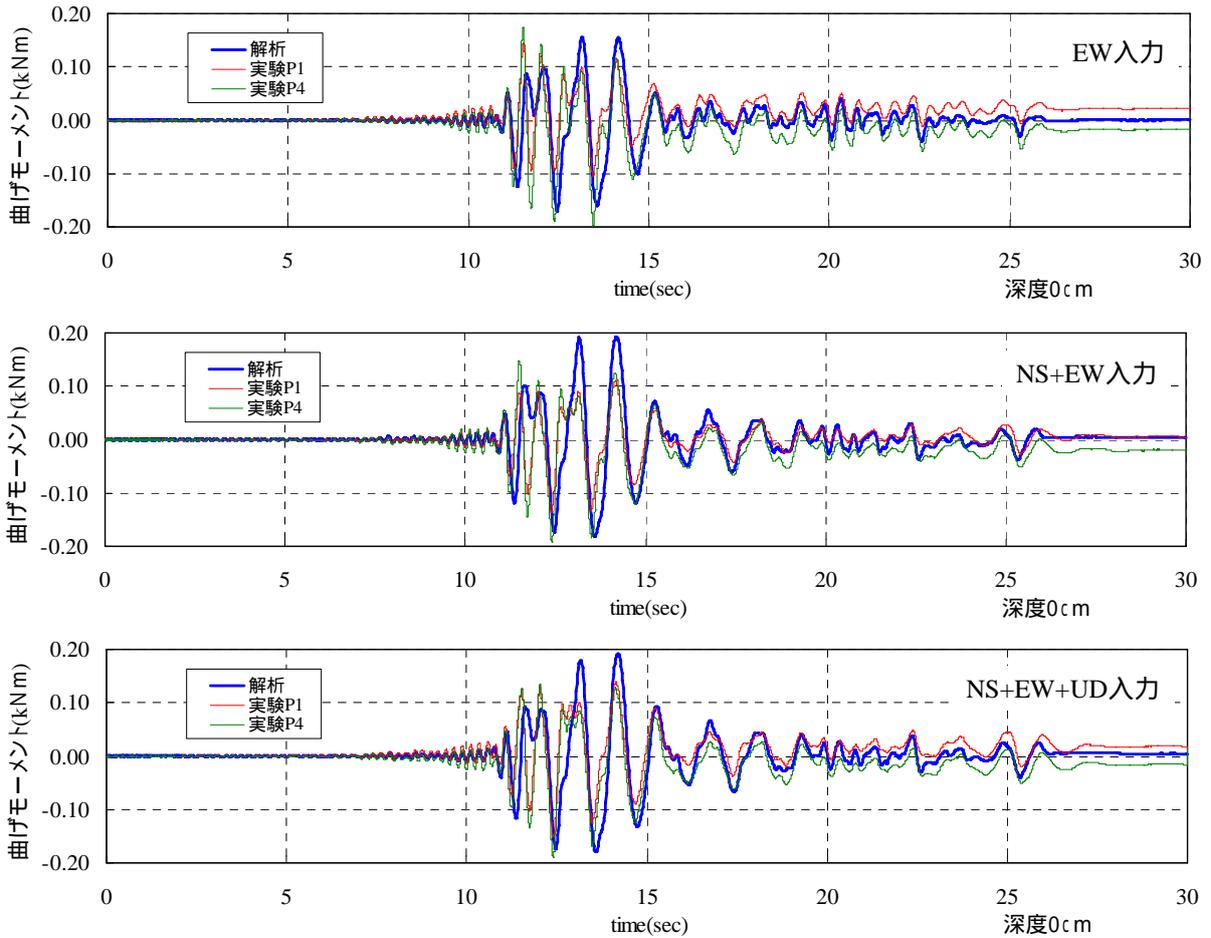


図 17 EW 方向の杭頭曲げモーメントの時刻歴の比較（埋め込みの無い場合）

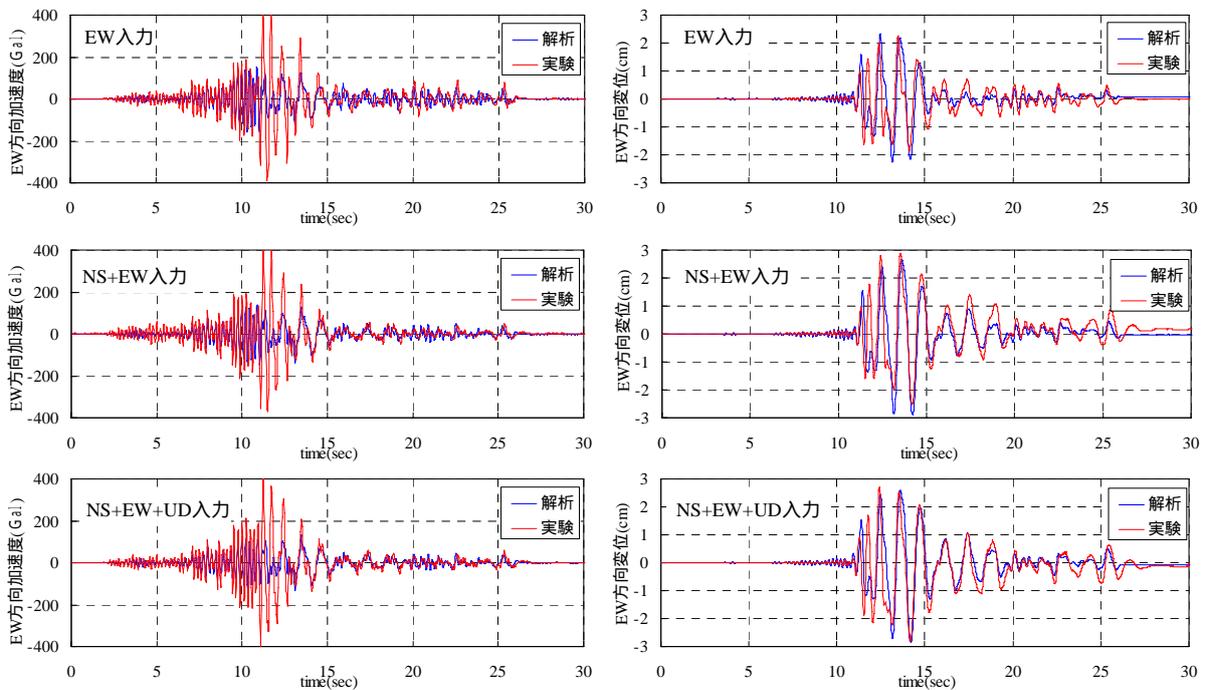


図 18 EW 方向の建屋応答の時刻歴（埋め込みの無い場合）

図 19 に NS+EW+UD 入力の場合の杭の軸力の時刻歴を実験結果と比較して示す。実験結果は杭で計測した歪みの平均値に弾性係数を乗じた値である。軸力は実験の深度 0m では建物の影響による違いが見られるが、解析も実験も深さ方向にほぼ同じ値をとっており増幅などは見られない。

解析では底面で杭先端を回転固定で設定しておりそのまま線形で UD 方向は応答していることが確認された。また杭の鉛直方向の振動に対しては杭の周面摩擦の評価が必要となるが、今回は杭による地盤の排除体積分を考慮していないモデルによる解析を行っている。液状化するような地盤では杭の圧縮剛性が地盤剛性に比べて軸力の応答には支配的であることが確認できた。

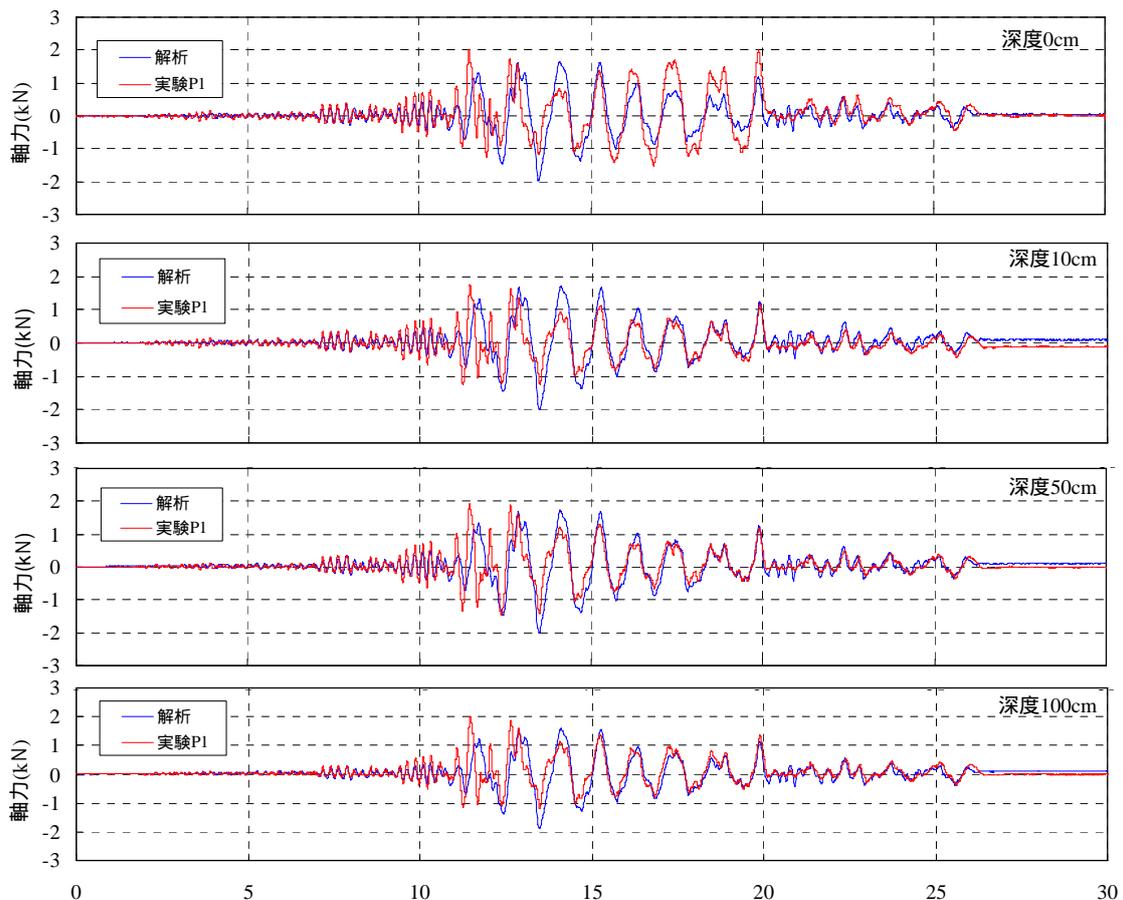


図 19 NS+EW+UD 入力時の杭の軸力の時刻歴（埋め込みの無い場合）

次に過剰間隙水圧の上昇過程を図 20 及び図 21 に示す。図中、左側が解析結果を入力地震動別に重ね書き、実験結果の同様の重ね書きを右側に示している。PWX 列は NS 方向加振時に建物中心から加振方向線上で計測している観測点で、PWY は直交する線上の観測点である。モーメントや建屋応答の対応の悪い 10~15 秒は水圧の上昇過程であり、対応の良い 15 秒以降は水圧の上がり方が定常状態に近い状態である。今回の解析で用いた液状化地盤のモデルは累積せん断歪みにより水圧の発生をモデル化しているため、応答の 5 秒付近から水圧が徐々に上がっていく。一方で実験結果は 10 秒付近の主要動で一気に水圧が上がる形状を示している。この塑性化の進行の違いが建屋や杭の初期応答の違いを表

れていると考えられる。

一方で 15 秒以降は建物の応答が実験結果と良い対応を示していることは（図 12 や図 17）、サイクリックモビリティの応答に与える効果は水圧の立ち上がり付近だけで、水圧が定常状態になってからはあまり影響がないと言える。これは水圧が上がった以降の入力成分が小さくなって大きな歪み領域に入らないことも理由の一つと考えられるが、室内要素試験と違い実際の地盤系の応答では液状化の進行により入力伝わりにくくなるため、サイクリックモビリティも発生しにくくなる事も考えられる。この点は入力地震動を変えた実験結果などを踏まえて検討する必要がある。

多方向入力の特徴を比較すると、深度の深い 80cm 付近では一方向入力の水圧上昇が多方向入力より小さい状況が解析と実験との結果で確認できる。また UD 成分を入力した場合には水の剛性により上下動の加振成分が水圧波形に生じるが、この傾向は解析と実験とで発生していることが判る。また解析結果では加振中に杭が地盤を押し引きする効果により水圧の波形に構造物の応答の成分が乗っているが、実験結果ではその効果は深度の浅い領域でしか発生していない。

図 22 および図 23 は杭の曲げモーメントの時刻歴を 3 深度で比較したもので、左側に解析結果、右側に実験結果を示している。波形の対応は全体的に EW 方向の対応が良いが、深度 100cm の層境界での曲げモーメントは実験よりも解析が過大評価である。これは解析モデルでは材料区分により明瞭な物性の差異が出てくるが、実験では液状化層と砂礫層の間には透水性をカットするためのゴムシートが設置されていること、また杭近傍の砂礫の局所的な非線形の発生の可能性などがあり、固い支持地盤と液状化層の境界付近に緩んだ領域が発生するためではないかと考えられる。この点は解析での支持層モデル化の改良（例えば図 3 の歪み依存特性を入れる）が考えられる。

モーメントに関して多方向入力の効果を比較すると、応答前半の 15 秒付近までは一方向入力も多方向入力も同程度のモーメントが発生しているが、応答後半の 15 秒以降では多方向入力の方が大きくなる傾向がある。この傾向は実験、解析ともに見られる。

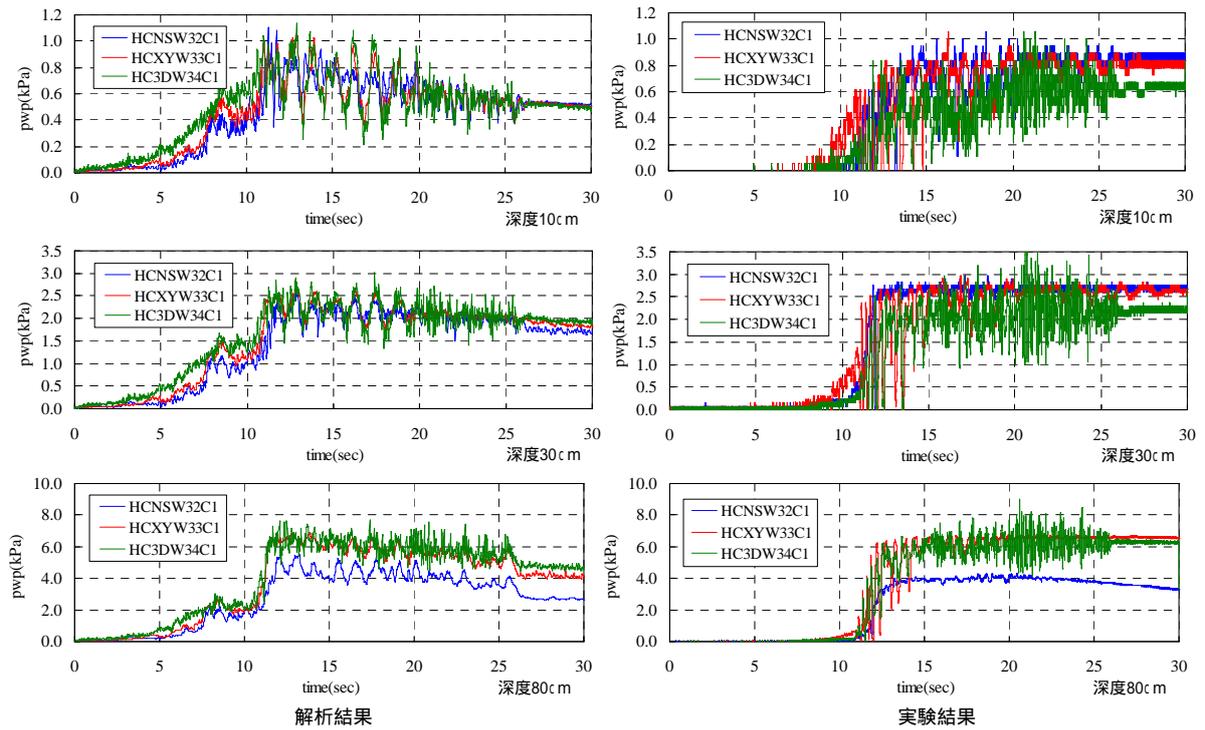


図 20 PWX 列の過剰間隙水圧の時刻歴（埋め込みの無い場合）

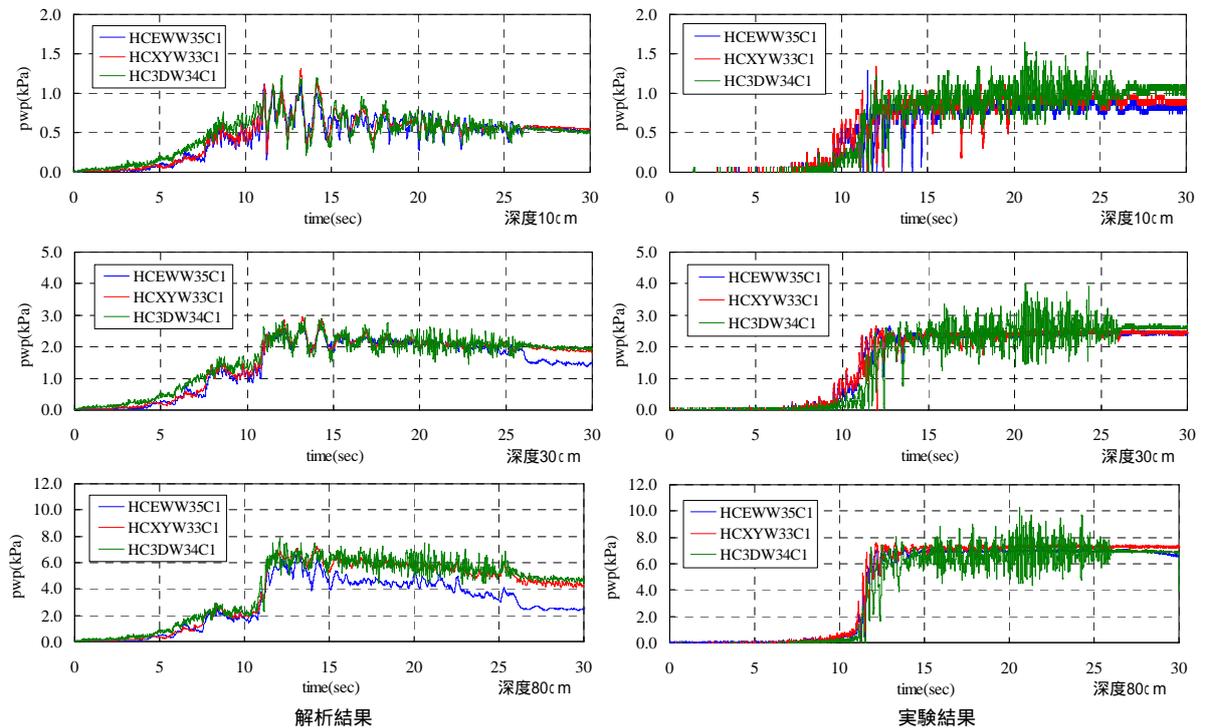


図 21 PWY 列の過剰間隙水圧の時刻歴（埋め込みの無い場合）

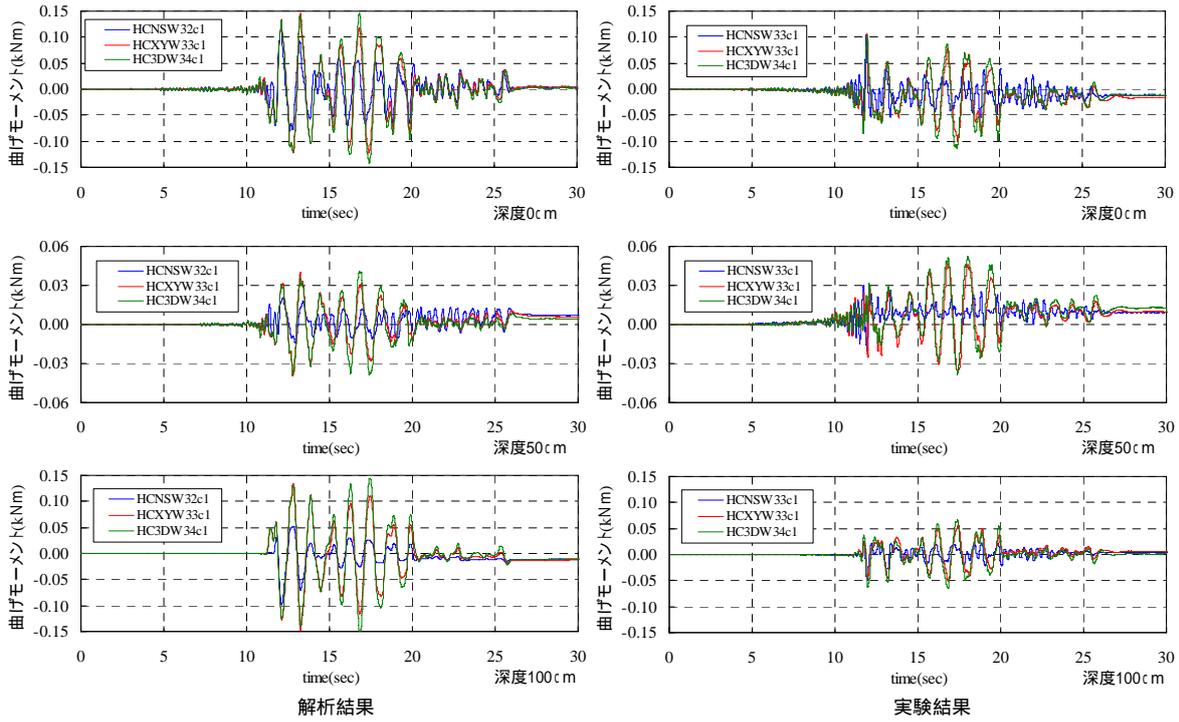


図 22 NS 方向曲げモーメントの時刻歴 (埋め込みの無い場合)

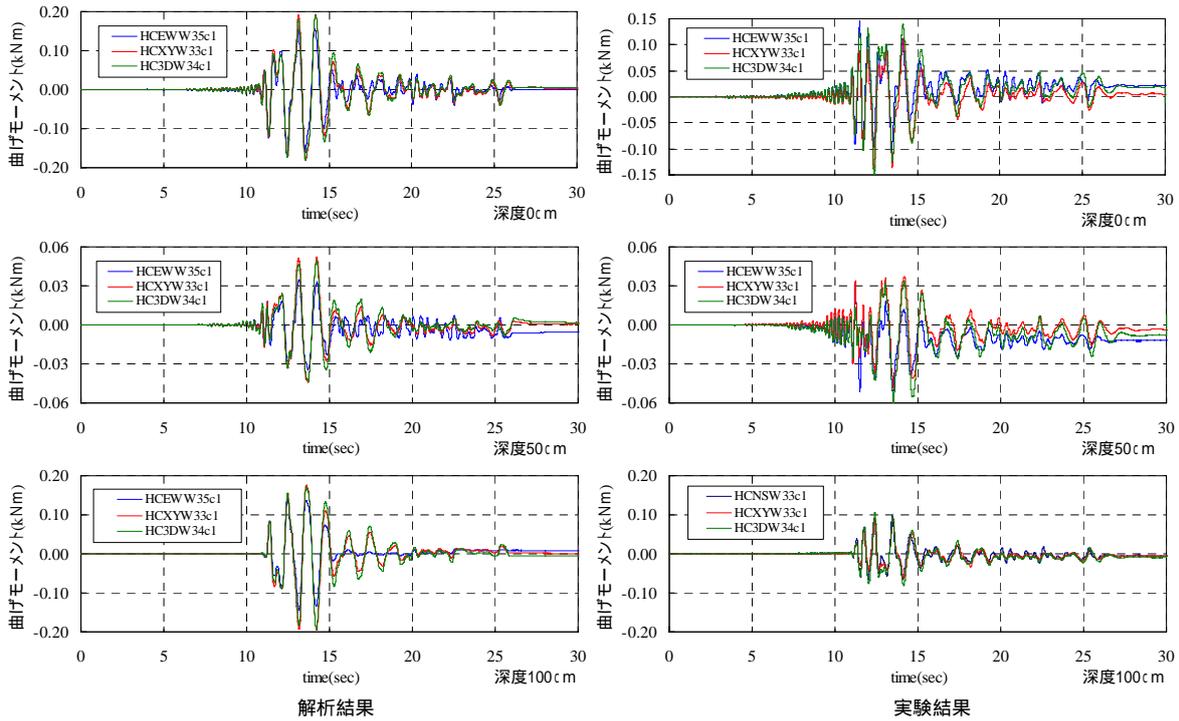


図 23 EW 方向曲げモーメントの時刻歴 (埋め込みの無い場合)

c) 埋め込みがある場合

埋め込みのある場合の解析では埋め込みの無い場合のモデルの表層に乾燥砂をモデル化した 1 相系のソリッド要素を追加してモデルを作成した。地下水位の境界条件は埋め込みのない場合同様に自由水面となるが、実際には表層に乾燥砂があるため、地下水位のモデル上方への移動には抵抗が生じる。これをモデル化するために今回は液状化層の一番上層の要素の透水係数を 1/10 倍して地震応答解析を行った。

液状化層の上に乾燥砂が 20cm 設置された場合の応答解析結果を図 24～図 28 に示す。図 24 はせん断リングの最大応答加速度、最大応答変位、杭の最大曲げモーメントの震度分布の比較である。せん断リングの応答は深度 80cm 以深ではある程度対応しているが、それ以浅の対応が悪い。最大曲げモーメント分布は NS+EW 方向入力ほぼ対応したが、NS 方向入力では地中部での対応が悪い。

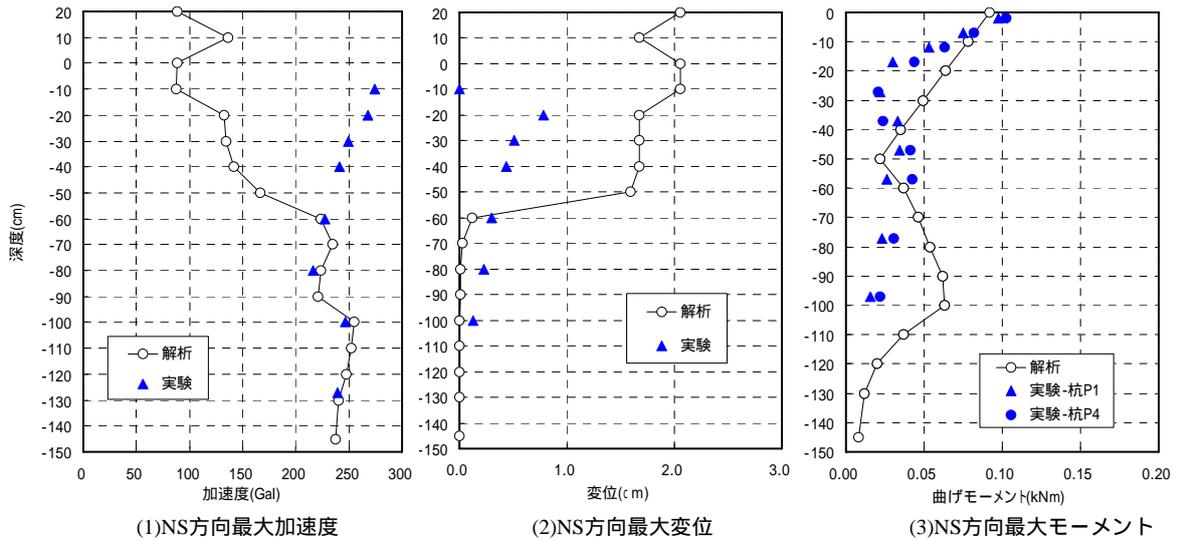
図 25 は杭頭の曲げモーメントの時刻歴の比較である。NS 入力では解析側では地盤の塑性化の進行が早いので、応答前半の主要動が解析では再現出来ない傾向は埋め込みが無い場合と同様である。NS+EW 入力の場合は良い対応を示した。

図 26 は建屋の応答加速度、応答変位の時刻歴の比較である。NS 入力の場合の実験結果の加速度波形では 15 秒以降も大きな応答を示しており、サイクリックモビリティ現象で現れるスパイク状の波形となっている。

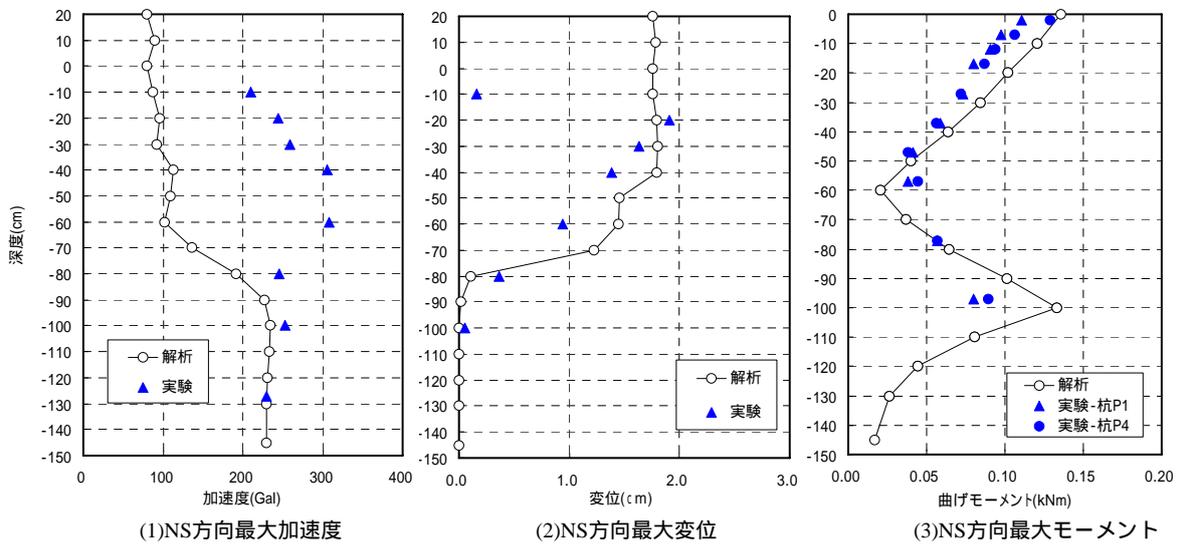
図 27 は過剰間隙水圧の時刻歴で、左が解析結果で右が実験結果である。NS+EW 方向入力の場合は水圧比の立ち上がりは NS 入力に比べて実験・解析結果ともに早いことが分かる。やや解析結果の水圧が実験結果より値が小さいが、これは解析で用いた単位体積重量が実験値よりも小さかった可能性がある。

図 28 は NS 方向曲げモーメントの時刻歴の比較である。実験では応答 15 秒以降から NS+EW 入力の地中部のモーメントが NS 入力に比べて大きい値をとる。埋め込みの無い場合の図 22 と比較すると同様の傾向である。解析では杭頭と層境界では同様の傾向が出ている。

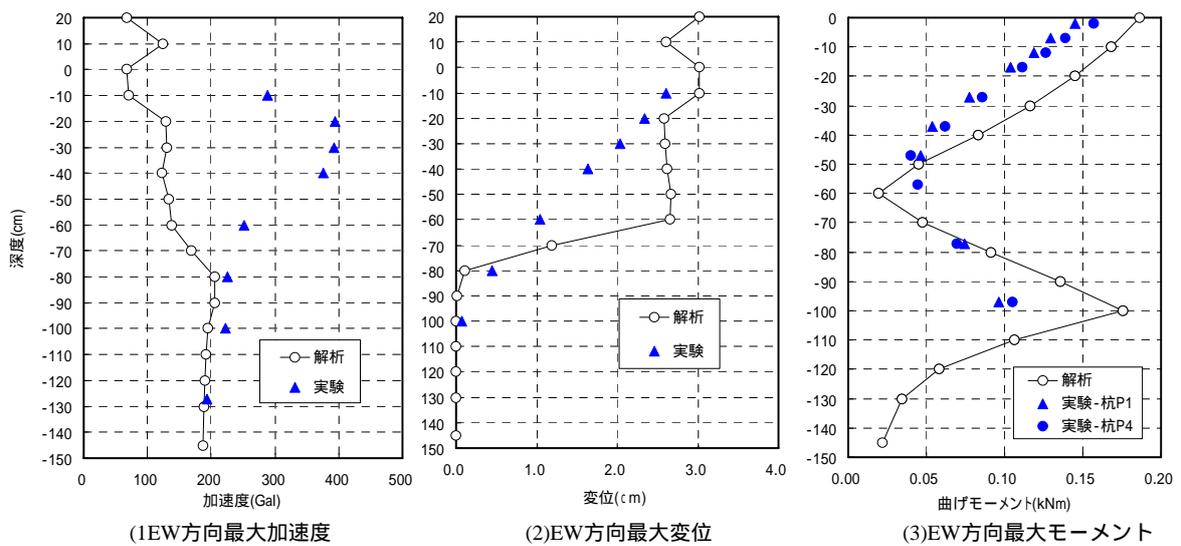
埋め込みのある場合と無い場合のモーメントの時刻歴の比較を図 29～図 31 に示す。図 29 は NS 方向入力の場合、図 30 および図 31 は NS+EW 入力の場合の比較である。解析では埋め込みのある場合と無い場合の大きな差異は無く、埋め込みの無い場合の応答の方がやや大きくなっている。実験では NS 入力の場合に応答の傾向がやや異なるが、NS+EW 入力の場合は大きな違いは無い。やや NS+EW 入力の結果が大きくなっている。全体的には埋め込みのある場合と無い場合とのモーメントの応答に大きな違いは無かったことが、解析及び実験から確認された。



(1)埋め込み 20cm NS 方向入力



(2)埋め込み 20cm NS+EW 方向入力 NS 方向最大応答



(3)埋め込み 20cm NS+EW 方向入力 EW 方向最大応答

図 24 せん断リングの応答の最大値と杭の最大モーメント

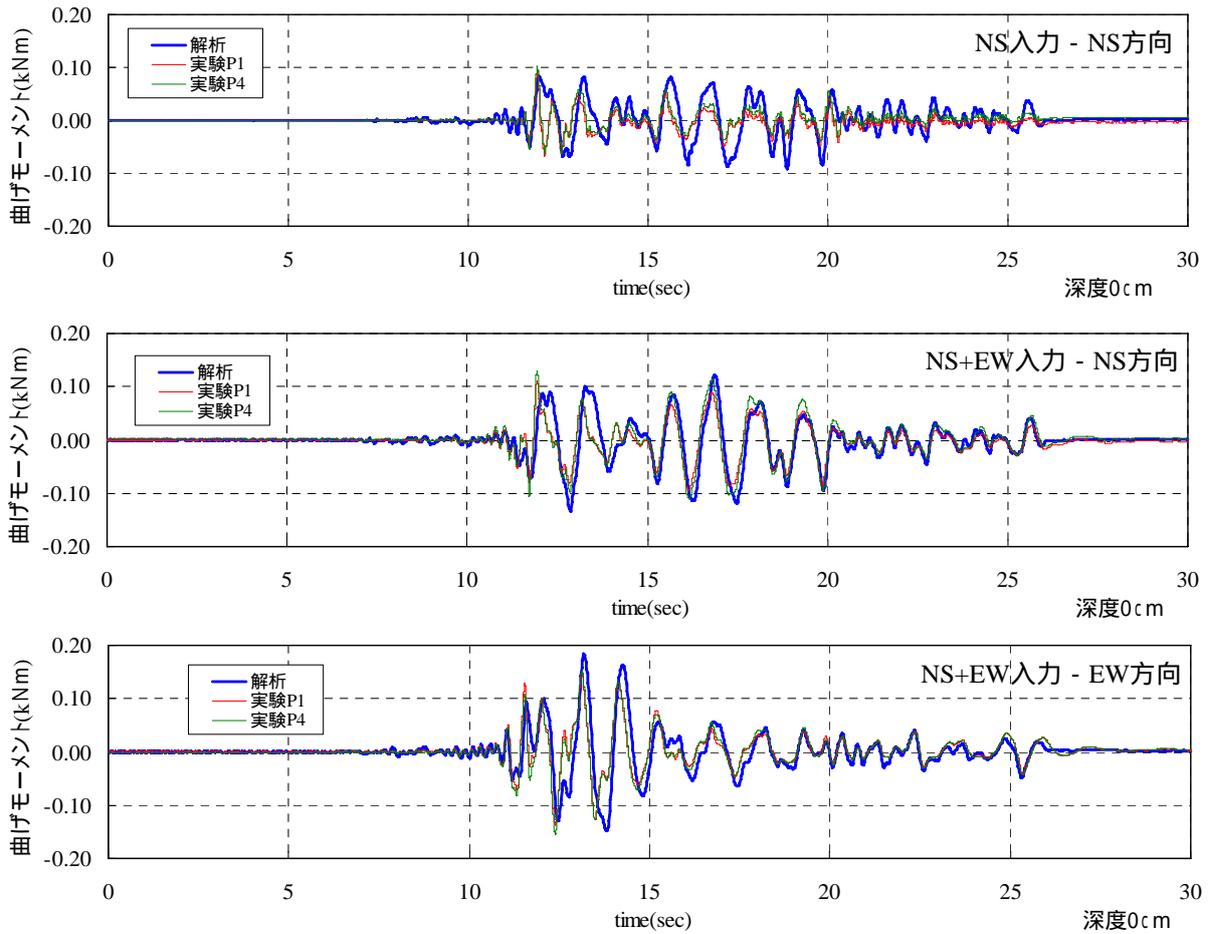


図 25 杭頭曲げモーメントの時刻歴 (埋め込み 20cm)

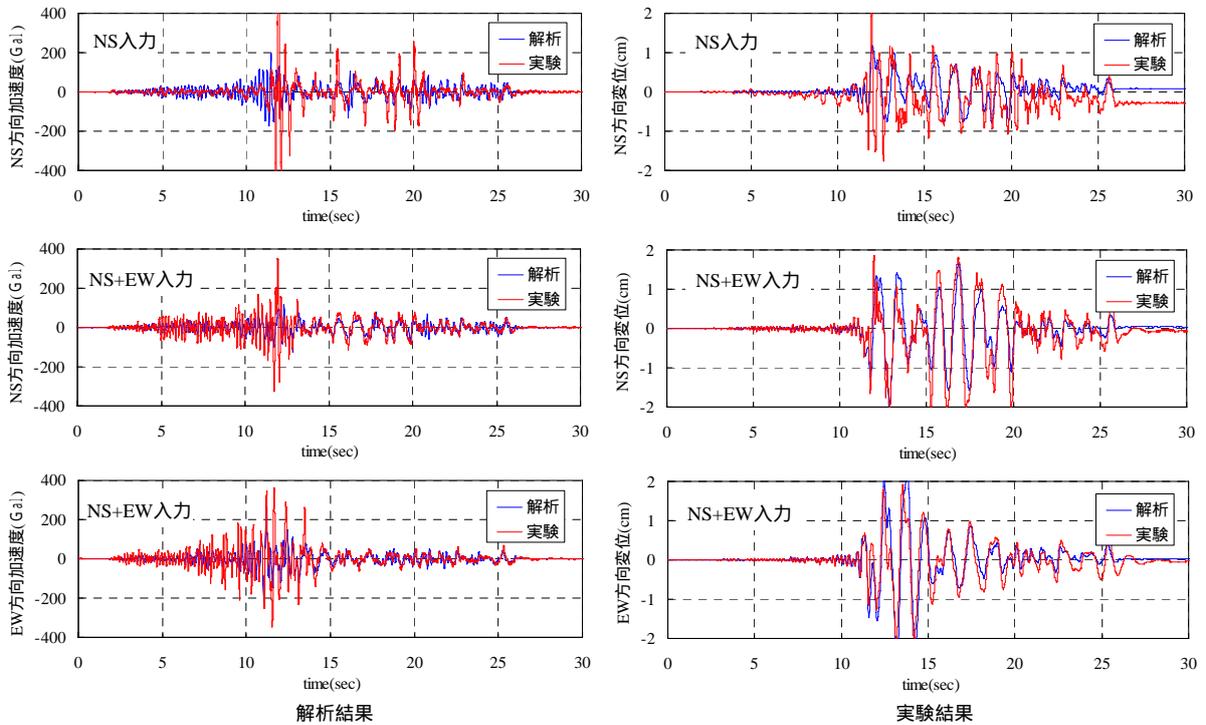


図 26 建屋応答の時刻歴 (埋め込み 20cm)

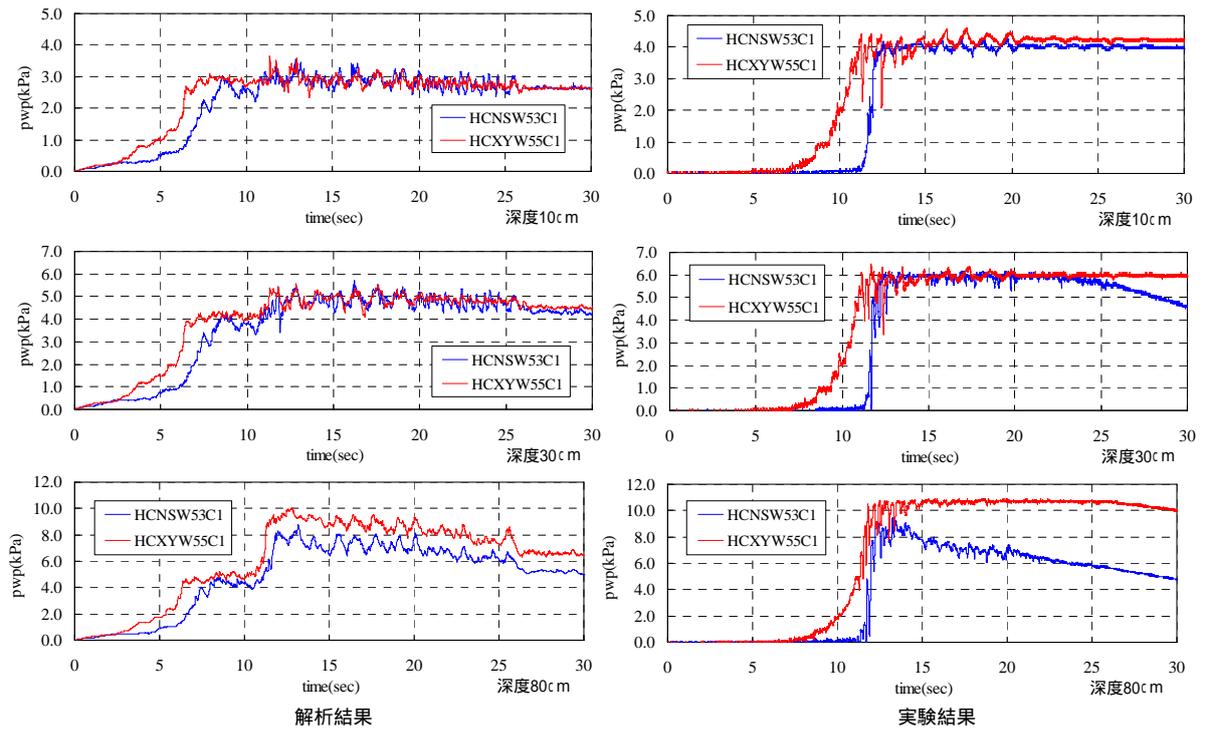


図 27 過剰間隙水圧の時刻歴 (埋め込み 20cm)

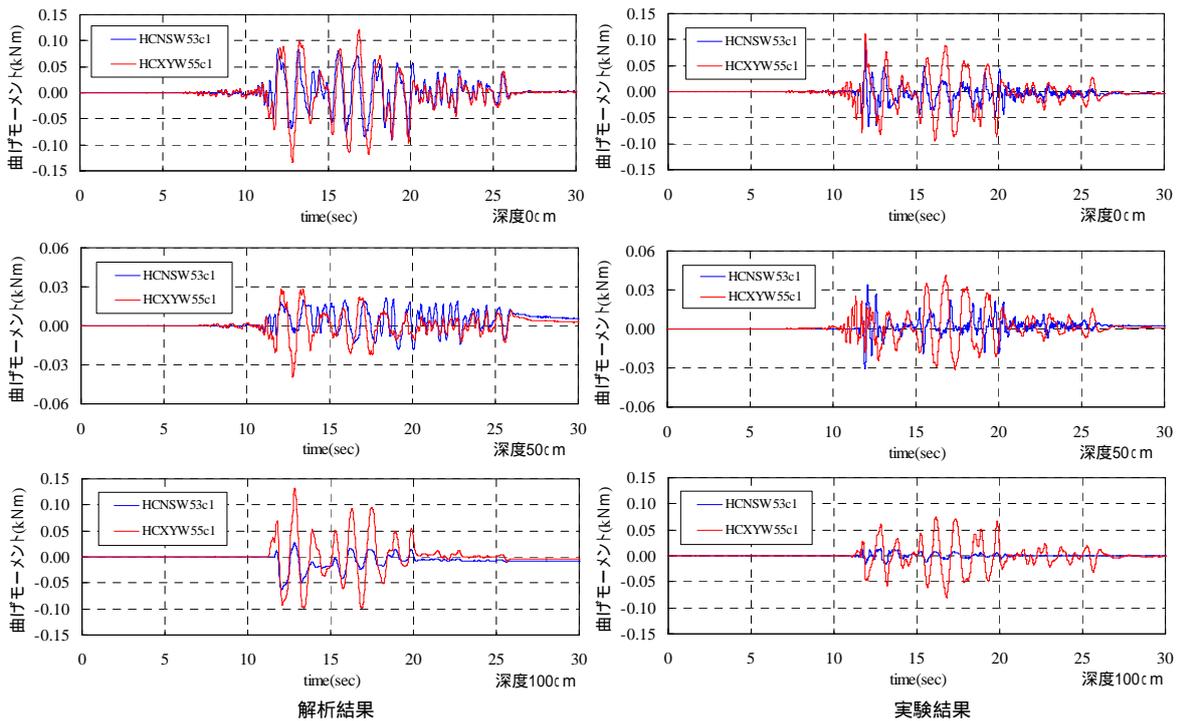


図 28 NS 方向曲げモーメントの時刻歴 (埋め込み 20cm)

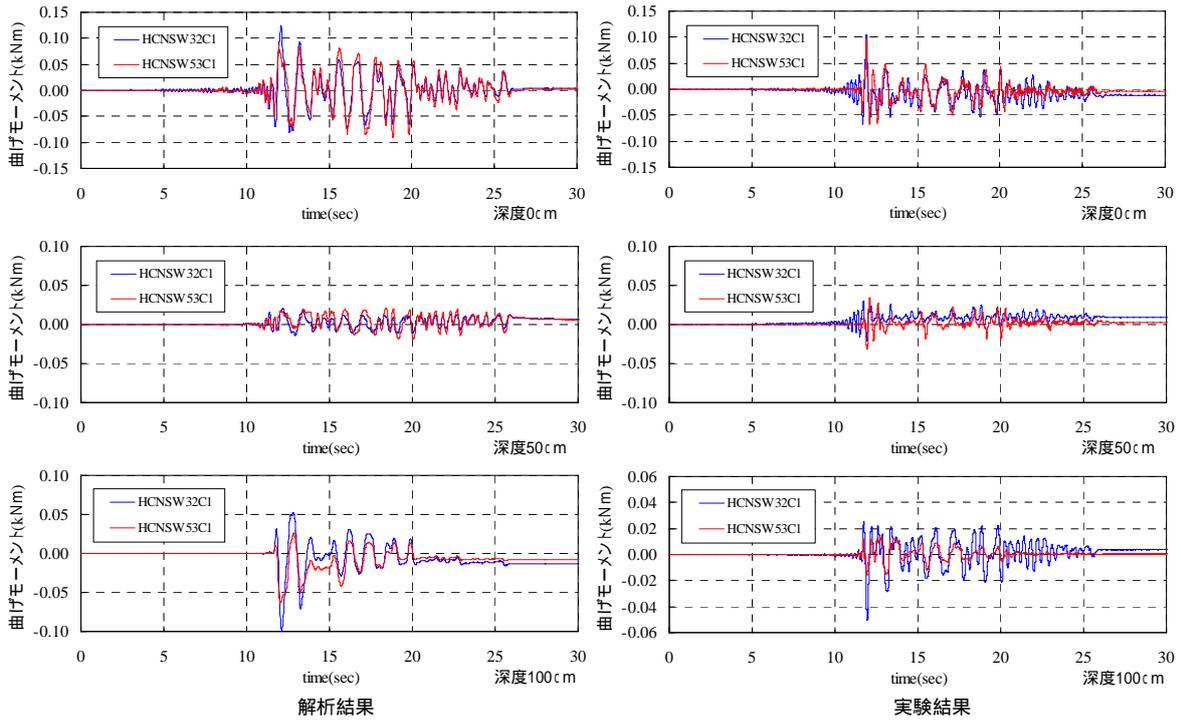


図 29 埋め込みの有無による NS 方向曲げモーメント (NS 方向入力)

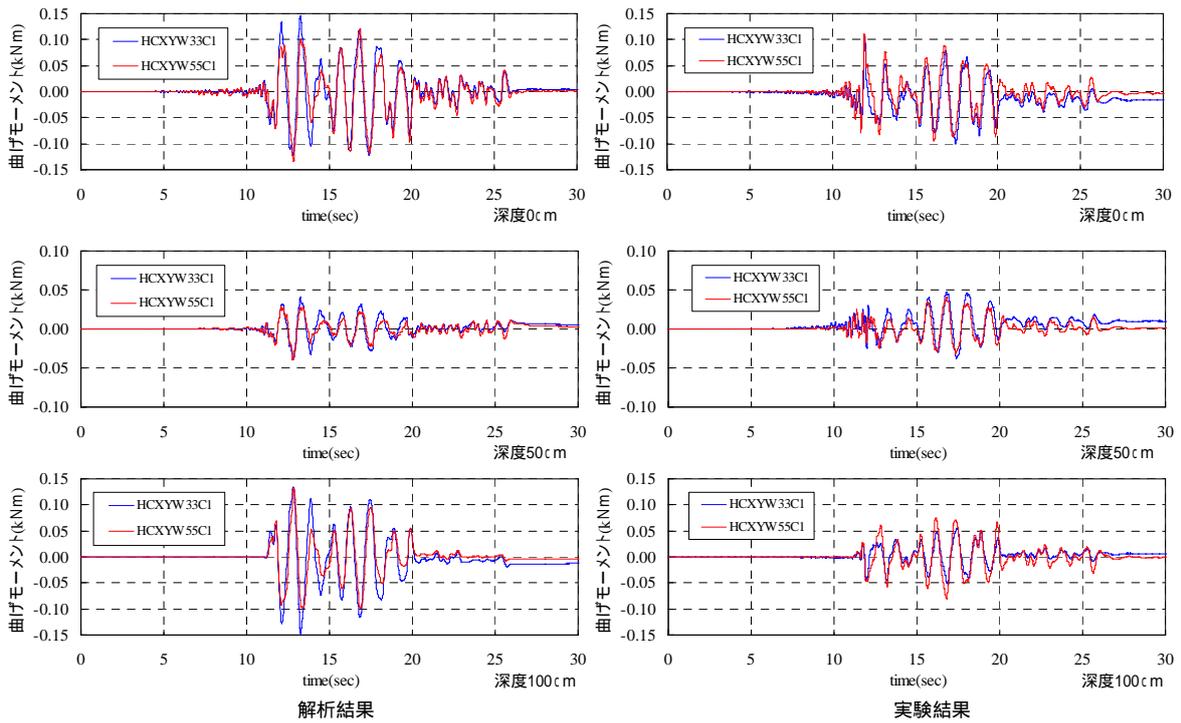


図 30 埋め込みの有無による NS 方向曲げモーメント (NS+EW 方向入力)

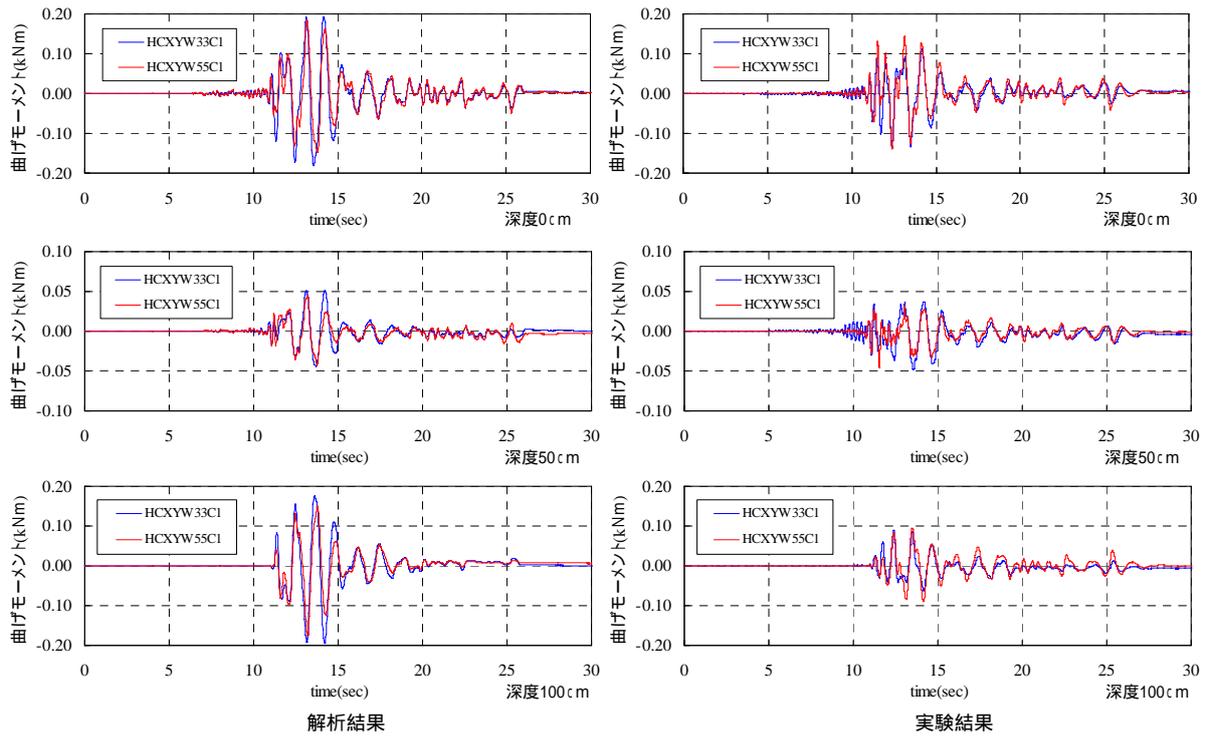


図 31 埋め込みの有無による EW 方向曲げモーメント (NS+EW 方向入力)

(d) 結論ならびに今後の課題

平成 14 年度～16 年度の研究を通して得られた結論および課題を以下に示す。

- 1) 農業工学研究所で実施された振動実験のうち、モデル M の実験結果のシミュレーション解析を行い、主に構造物の応答に与える地盤の液状化程度の影響、多方向入力の影響に着目して検討した。
- 2) 液状化程度が構造物に与える影響の評価では、主に杭の断面力について検討した。過剰間隙水圧が上昇する過程でのモーメントの応答評価は最大値を評価できる程度であったが、過剰間隙水圧が定常状態になる領域では、振幅・位相とも良い予測結果が解析できた。
- 3) 建物の応答加速度や杭頭付近でのモーメントの最大応答は慣性力による影響が支配的であるため、今回の実験モデルの条件では過剰間隙水圧が上昇する過程で、建物や杭頭付近での最大応答が発生した。これは過剰間隙水圧が上昇する過程では大きなせん断力が複数回地盤に作用するため、サイクリックモビリティの影響により大きな加速度が伝達されたためである。
- 4) 一方、杭の地中部の応答は過剰間隙水圧が定常になった状態での応答が大きくなり支配的であった。そのため杭の地中部の応答は地盤の液状化程度がより進行した二方向入力の場合の応答が一方入力よりも大きくなった。
- 5) 今回の解析で用いた液状化地盤の構成モデルはサイクリックモビリティを考慮しない簡便なものを用いたが、サイクリックモビリティの影響が強くなる過程は入力の前半の主要動部分だけであったため、杭のモーメントの挙動は概ね評価できた。しかし入力特性で液状化が進行してからも大きな入力成分がある場合（例えば継続時間が長く長周期成分が乗った海溝型の地震動など）には適用性の検討が必要である。
- 6) 上下動成分の入力が杭のモーメントの応答に与える影響は小さかった。また地盤の応答に上下動成分が与える影響では、過剰間隙水圧の値に水の剛性により伝播する上下動の振動成分が乗るが、液状化程度が大きく変えることは無かった。
杭に発生する軸力に杭周面の地盤の摩擦力が与える影響は小さく、今回の解析モデルで十分評価できることが確認できた。
- 7) 表層に埋め込み部分を設定した振動実験結果のシミュレーションを実施した。今回の解析モデルでは埋め込み部分が杭の応答に与える影響は比較的小さかった。また地下水位の境界条件に関して、埋め込み部の浸透に対する抵抗の効果を表層の透水係数を小さくして模擬した。その結果、概ね実験結果で発生する過剰間隙水圧を模擬することが出来た。
- 8) 非線形解析では解析モデルに用いる FEM 解析のメッシュ形状により解析結果に違いが生じる。今回のような 1G 場での有効土被り圧が小さい実験では特に表層近くの杭周辺地盤の非線形性が違ってくる。これを適切に評価するためには、杭による地盤の排除体積分を考慮した FEM のモデル化が必要である。
今回の検討では静的な杭頭載荷シミュレーションにより、杭の体積を考慮しない梁要素のモデルを用いる場合には杭周辺の地盤の平面方向メッシュ分割を杭径の 2.5 倍とすることで同等の杭の応力分布が得られることを確認して解析モデルを作成した。

(e) 引用文献

- 1) 塩見忠彦, 吉澤睦博, 鬼丸貞友, 津國正一: 地盤と構造物の非線形挙動を考慮した構造解析システムの開発, 竹中技術研究報告 No.54, 1998
- 2) Zienkiewicz, O.C. and et al. Non-linear seismic response and liquefaction, Int. J. Num. and Anal. Meth. in Geomech., Vol.2, No.4, pp381-404, 1978
- 3) 田中幸久: 礫の工学的性質と液状化地盤への適用に関する研究

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
吉澤睦博・ 鬼丸貞友・ 毛利栄征	地盤 - 杭基礎 - 構造物系の多方向入力による振動実験の三次元シミュレーション解析	日本建築学会大会(近畿)学術講演会	2005年9月(投稿中)

(g) 特許出願, ソフトウエア開発, 仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウエア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成14～16年度業務のまとめ

農業工学研究所で実施されたせん断土槽を用いた地盤-杭基礎-構造物の振動台実験のシミュレーションを行い、以下の知見を得た。

平成14年度:

- ・平成14年度に実施され振動台実験のうち、緩詰め砂(相対密度 50%程度)の乾燥砂および飽和砂の実験の予測解析を行った。
- ・予測解析の結果、緩詰め砂・飽和砂地盤の場合は、液状化の影響により杭の水平抵抗が非常に低減するため、安定した解析結果が得られなかった。そのため基礎と建物の構造耐震性に対して、平成14年度の実験モデルのままでは、定量的な知見が得られにくいと判断された。
- ・平成14年度の実験モデルの改良として、より現実に近い地震時の杭基礎の状態を再現する提案として、非液状化層を杭先端や表層部に設けることを提案した。

平成15年度:

- ・平成15年度に非液状化層と液状化層の二層構造に見直しされた実験モデルによる結果の中から、密詰め砂（相対密度 80%程度）の飽和砂の動的応答解析を行った。解析は1方向入力と2方向入力との場合を実施した。
- ・平成14年度の解析モデルの見直しを行い、杭径による砂の排除体積分、及びメッシュ形状が応答解析結果に与える影響を検討した。
- ・杭径による砂の排除体積分、及びメッシュ形状の違いが応答結果に与える影響は非線形化が強く進む領域で顕著に表れる。特に杭周辺では局所非線形が強くなるため、杭の体積効果を考慮しないモデル化を用いる場合には杭近傍の平面方向のメッシュ分割は杭径の2倍程度とれば良いことが解った。

平成16年度：

- ・平成15年度の実験モデルに対して、モデルパラメータ及びメッシュ形状の見直しを行い、建物の応答(加速度、変位時刻歴)や杭のモーメントをある程度の精度で評価できることを確認した。
- ・平成16年度に密詰め砂（相対密度 80%程度）に対して実施された実験結果および実験のシミュレーション結果を用いて、地震波の多方向入力の与える影響および土層構成が与える影響を確認した。
- ・杭に発生するモーメント評価では、過剰間隙水圧が上昇する過程では最大値を評価できる程度であったが、過剰間隙水圧が定常状態になる領域では、振幅・位相とも良い予測結果が解析できた。
- ・杭の地中部の応答は過剰間隙水圧が定常になった状態で大きくなった。そのため杭の地中部の応答は地盤の液状化程度がより進行した二方向入力の場合の応答が一方向入力よりも大きくなった。この傾向は実験および解析で確認できた。
- ・上下動成分の入力が杭のモーメントに与える影響は小さかった。また液状化するため杭周面の地盤の摩擦力は小さくなるので、上下動入力が軸力の応答に与える影響は、今回の解析モデルで十分評価できた。
- ・上下動成分の入力が地盤の応答に与える影響は、過剰間隙水圧の値に水の剛性により伝播する上下動の振動成分が乗るが、液状化の進行程度が大きく変えることは無かった。
- ・今回のモデルで、埋め込み部分が杭の応答に与える影響は実験および解析とも比較的小さかった。

