

3.3.6 地盤・基礎実験における三次元数値シミュレーションによる実験の予測解析
(側方流動解析、その1)

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 2か年の年次実施計画
- (e) 平成18年度業務目的

(2) 平成18年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
- (c) 業務の成果
 - 1) 解析手法
 - 2) 解析ケース
 - 3) 解析条件
 - 4) 解析結果
- (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

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

地盤・基礎実験における三次元数値シミュレーションによる実験の予測解析（側方流動解析、その1）

(b) 担当者

所 属	役 職	氏 名
東北大学 大学院 工学研究科	教授	風間 基樹
	助教授	渦岡 良介
	助手	仙頭 紀明
	博士前期課程 1 年	樺沢 祐樹
	4 年生	神谷 研志
京都大学 大学院 工学研究科	教授	岡 二三生
岐阜大学 工学部	教授	八嶋 厚
名古屋工業大学 大学院工学研究科	教授	張 鋒

(c) 業務の目的

E-ディフェンスにおける大型振動台実験を効率的に行うため、三次元数値解析手法による事前予測を実施する。また、実験後の事後解析も行い、実験値と解析値の比較検討の過程で、護岸背後における群杭基礎近傍の液状化地盤の三次元的挙動を明らかにする。さらに、必要に応じて、提案する三次元数値解析手法の改良を実施する。

(d) 2 か年の年次実施計画

- 1) 平成17年度：当該年度に実施される地盤・基礎実験（側方流動実験）を対象とした事前予測を行う。地盤 - 基礎の有限要素モデル作成、地盤の材料パラメータの設定（室内土質試験含む）、三次元数値シミュレーション、解析結果の整理および考察を行う。
- 2) 平成18年度：当該年度に実施される地盤・基礎実験（側方流動実験）を対象とした事前予測を行う。地盤 - 基礎の有限要素モデル作成、地盤の材料パラメータの設定（室内土質試験含む）、三次元数値シミュレーション、解析結果の整理および考察を行う。また、2年間の成果および今後の課題のとりまとめを行う。

(e) 平成 18 年度業務目的

現有の三次元有効応力解析手法を用い、当該年度実施予定の側方流動に対する基礎の破壊メカニズム解明のための模型実験の事前予測を行う。地盤-基礎の有限要素モデル作成、地盤の材料パラメータの設定、三次元数値シミュレーション、解析結果の整理および考察を行う。

また、2年間の成果および今後の課題のとりまとめを行う。

(2) 平成18年度の成果

(a) 業務の要約

E-ディフェンスにおける大型振動台実験を効率的に行うため、三次元数値解析手法による事前予測を実施する。また、必要に応じて、二次元解析も実施し、入力地震動の設定方法などを検討する。さらに、実験後の事後解析も行い、実験値と解析値の比較検討の過程で、護岸背後における群杭基礎近傍の液状化地盤の三次元的挙動を明らかにする。

(b) 業務の実施方法

平成18年度にE-ディフェンスで実施予定の側方流動実験を対象として、LIQCAによる事前予測を実施した。模型実験での境界条件、アルバニー砂の材料特性、模型実験での振動台波形を入力条件として三次元解析を実施した。

また、E-ディフェンスでの実験条件を検討するため、ケーソンの変形の概略予測として、杭基礎を考慮しない二次元事前解析を実施した。さらに、模型地盤材料であるアルバニー砂の室内土質実験を実施し、材料パラメータの見直しを行い、事後解析を実施した。

(c) 業務の成果

1) 解析手法

解析にはOkaら(1999)の砂の繰返し弾塑性モデル¹⁾を組み込んだ3次元有効応力解析コードLIQCAを用いた。場の方程式の定式化には、二相混合体理論に基づいた土骨格の変位と間隙水圧を未知数とするu-p formulation(Okaら、1994)²⁾を用いており、力のつりあい式と連続式が連成したものとなっている。有限要素法(固相の変位)と有限体積法(要素重心での過剰間隙水圧)を適用し、空間離散化を行う。また、時間積分にはNewmarkの法を用いる。

筆者らは、本解析手法を用いて護岸背後の飽和地盤中の杭基礎を対象として流動直交方向に加振した模型振動台実験のシミュレーション(渦岡ら、2005)³⁾や、護岸背後の杭基礎建物の被災シミュレーション(渦岡ら、2002)⁴⁾を実施しており、本解析手法が実験値を概ね再現できることを確認している。

2) 解析ケース

はじめにケーソンの変形の概略予測として実施した二次元解析(杭基礎なし)の検討ケースを表1に示す。二次元解析では表に示すように異なる入力地震動および異なる地盤の材料パラメータを用いた4ケースについて報告する。これらは全て事前解析である。ケース1は基本ケースであり、昨年度と同じ入力地震動および材料パラメータ⁵⁾を用いている。ケース2は入力加速度振幅をケース1の1/2としたケースである。ケース3はアルバニー砂(相対密度60%)の材料パラメータの一つである規準ひずみ(弾性および塑性)を半分にしたケースであり、ケース1よりもやや柔らかい材料を想定したものである。ケース4は昨年度の矢板護岸の側方流動実験において震動台で観測された加速度を入力加速度としたケースである。

次に杭基礎を考慮した三次元解析の検討ケースを表2に示す。三次元解析においては表

に示すように異なる地盤の材料パラメータを用いた 2 ケースについて報告する。ケース 1 は事前解析、ケース 2 は事後解析である。また、入力動としては、昨年度の矢板護岸の側方流動実験において震動台で観測された加速度を用いる。用いた材料パラメータの詳細については後述する。

表 1 解析ケース（二次元解析）

ケース	杭本数 (本)	材料パラメータ	入力動
1	-	昨年度と同様	JR 鷹取 (NS, UD 成分)
2	-	昨年度と同様	JR 鷹取 (NS, UD 成分) 振幅 1/2
3	-	規準ひずみを半分	JR 鷹取 (NS, UD 成分)
4	-	昨年度と同様	昨年度の実験での震動台加速度

表 2 解析ケース（三次元解析）

ケース	杭本数 (本)	材料パラメータ	入力動
1	6	昨年度と同様	昨年度の実験での震動台加速度
2	6	液状化強度を調整	昨年度の実験での震動台加速度

3) 二次元解析

a) 解析モデル

E-ディフェンスで実施予定の側方流動実験の実験模型を図 1 に示す。解析モデルは図 1 に基づき作成した。この土層構成をもとに、作成した二次元有限要素モデルを図 2 に示す。二次元解析では杭基礎は考慮せず、奥行き方向は平面ひずみ条件としている。アルバニー砂からなる地盤、ケーソン、マウンドのいずれもアイソパラメトリック平面要素でモデル化した。また、水位以下の地盤要素については、過剰間隙水圧を考慮したが、ケーソン前面の水は考慮していない。側壁付近の矢板も考慮していない。

b) 材料パラメータの設定

i) 地盤材料

模型地盤を構成しているアルバニー砂について、砂の弾塑性モデルを適用した。設定したアルバニー砂の材料パラメータを表 3 に示す。表に示すパラメータは昨年度実施した室内試験結果をもとに設定したものであり、設定方法の詳細については昨年度の報告書⁵⁾を参照されたい。昨年度実施された矢板の側方流動実験結果に対して、解析は矢板水平変位を 2 倍程度過大に、フーチング水平変位をほぼ同程度に評価したことから、昨年度設定した材料パラメータは概ね妥当と判断し、今年度の事前解析でも昨年度と同様の材料パラメータを用いている。

なお、ケース 3 においては、表 3 に示す規準ひずみ(弾性および塑性)の値を半分の 0.020 として、材料パラメータの違いがケーソンの変形に与える影響を検討する。

マウンドについては密度を 1.78 t/m^3 としたが、その他のパラメータについては室内土質試験が実施できなかったため、アルパニー砂 ($D_r > 70\%$) と同じパラメータを用いた。また、ソイルセメントについても十分な室内土質試験が実施できなかったため、アルパニー砂 ($D_r > 70\%$) と同じパラメータを用いた。

ii) ケーソン

鋼製ケーソンは線形弾性体でモデル化し、ヤング率は 206 GPa 、ポアソン比は 0.3 、密度は 2.1 t/m^3 とした。

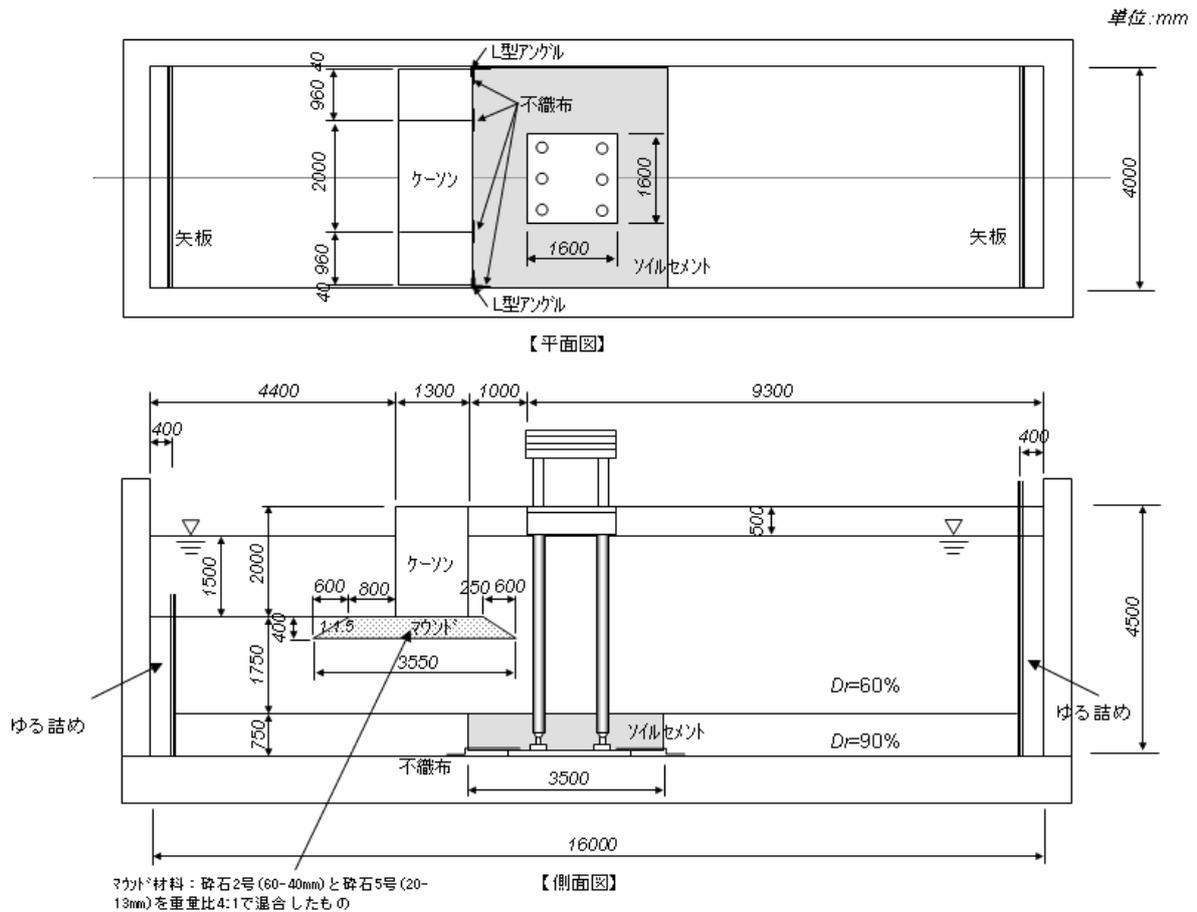


図 1 実験模型

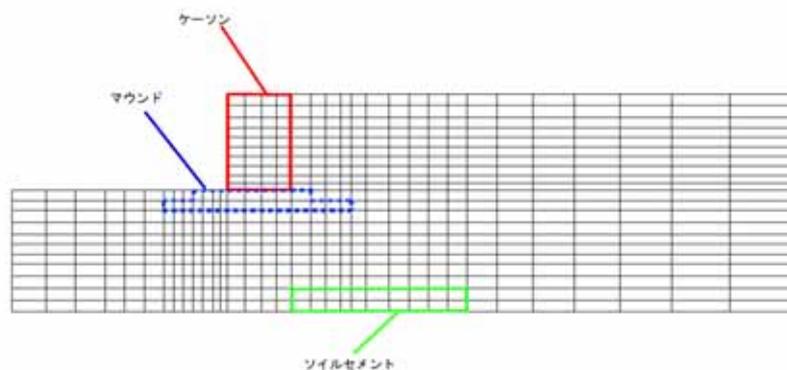


図 2 有限要素モデル(二次元解析)

表 3 アルバニー砂の材料パラメータ（二次元解析）

土層名		飽和 Dr>70%	飽和 Dr=70%	乾燥 Dr=70%
密度	ρ (t/m ³)	2.060	2.060	1.703
透水係数	k (m/s)	8.5×10^{-5}	8.5×10^{-5}	-
初期間隙比	e_0	0.558	0.558	0.558
せん断波速度	V_s (m/s)	120	120	120
圧縮指数	λ	0.0009	0.0009	0.0009
膨潤指数	κ	0.0005	0.0005	0.0005
擬似過圧密比	OCR	1.2	1.2	1.2
初期せん断係数比	G_0/σ'_m	1250	1250	1250
破壊応力比	M_f	1.308	1.308	1.308
変相応力比	M_m	0.800	0.800	0.800
硬化関数中のパラメータ	B_0	4000	4000	4000
"	B_1	100	100	100
"	C_f	1000	1000	1000
規準ひずみ（塑性剛性）	γ_r^p	-	0.040 0.020 (ケース 3 のみ)	0.040 0.020 (ケース 3 のみ)
規準ひずみ（弾性剛性）	γ_r^e	-	0.040 0.020 (ケース 3 のみ)	0.040 0.020 (ケース 3 のみ)
ダイレイタンス係数	D_0	0.75	0.75	0.75
ダイレイタンス係数	n	3.0	3.0	3.0

c) 初期条件、境界条件およびその他の数値解析条件

土骨格に対する境界条件として、底面は水平・鉛直方向を固定、側方は土槽壁面法線方向を固定した。ケーソン背面と背後地盤との境界は、鉛直方向のすべり（水平成分は同一節点で同一変位）を考慮した。また、ケーソン底面のすべりは考慮していない。

間隙水に対する境界条件として、水位面を水頭 0 の排水境界、その他の要素面は全て流量 0 の非排水境界とした。また、ケーソンの背面および底面も非排水境界とした。

地盤の初期有効応力状態を算定するため、動的解析と同一の有限要素モデルを用いて静的排水自重解析を実施した。二次元解析における静的排水自重解析では、簡易的に 1 ステップで全要素の有効重量を作用させた。地盤は簡易な弾完全塑性モデルでモデル化している。初期応力解析の結果、得られた地盤内の(a)平均有効応力および(b)偏差応力比（偏差応力の二次不変量を平均有効応力で除した値）の分布図を図 3 に示す。ケーソン背後地盤では大きな偏差応力比が発生している主働崩壊領域がみられる。

入力動として、1995 年兵庫県南部地震において JR 鷹取駅の地表面で観測された加速度

波形(ケース1~3)および昨年度の矢板護岸の側方流動実験において震動台で観測された加速度(ケース4)を用いた。検討に用いたNS成分およびUD成分の加速度の時刻歴を図4に示す。なお、ケース2では振幅を1/2として、入力加速度の大きさがケーソンの変形に与える影響を検討した。

数値解析上の解析条件として、計算時間増分は0.00125秒、Newmark法の係数は $\alpha=0.3025$ 、 $\beta=0.6$ とした。Rayleigh減衰として、初期剛性比例型を用いた。その係数は、ケーソン背後地盤の1次固有周期0.11秒に減衰定数2%を仮定して、0.001とした。動的解析時間は加振後の変形の継続も考慮して、30秒とした。

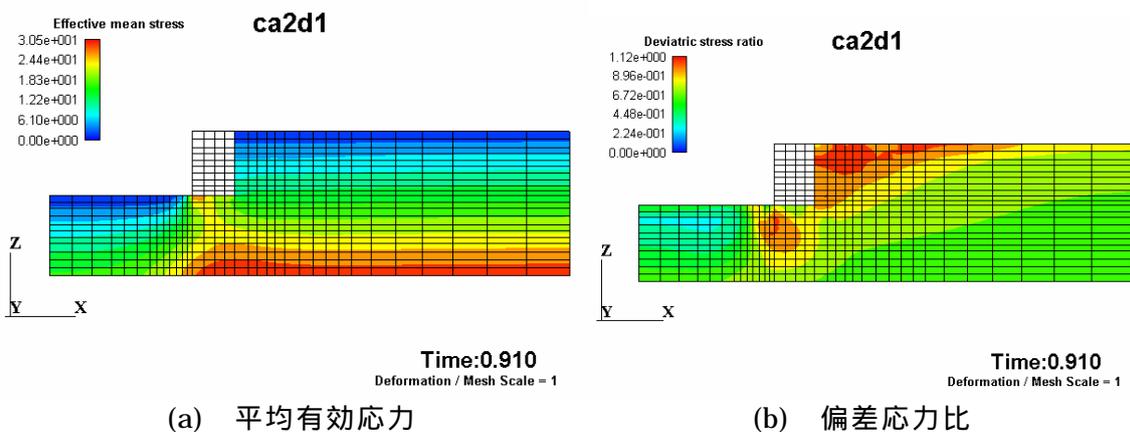


図3 初期応力解析の結果

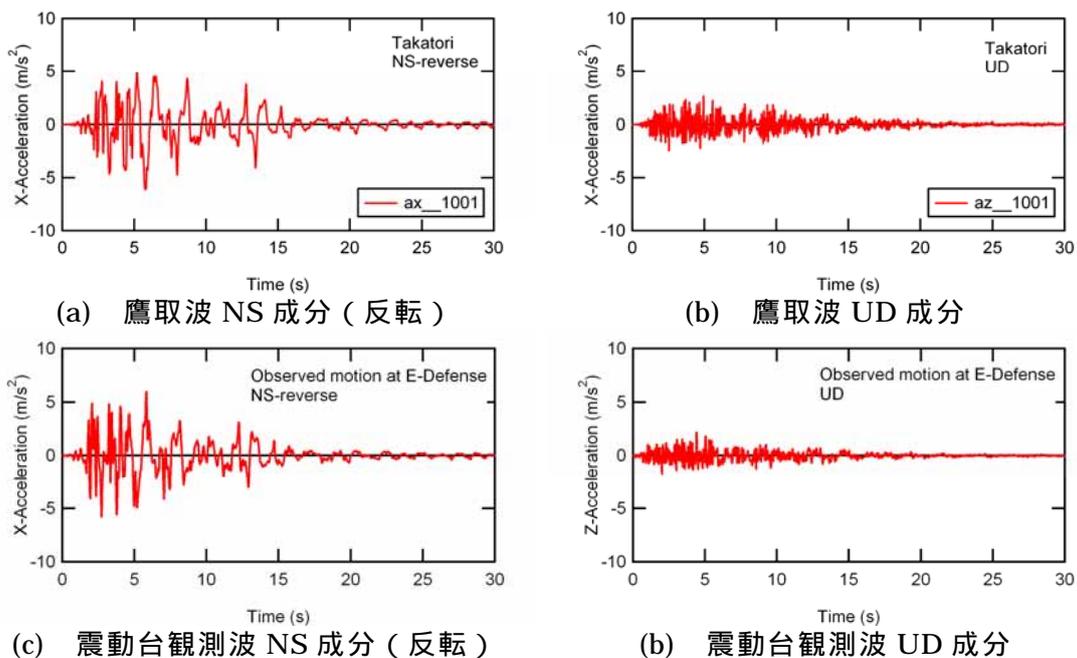


図4 検討に用いた入力加速度の時刻歴

d) 解析結果

上記の4ケースで得られたケーソン天端の水平変位の時刻歴を図5に、ケース4の加振後の変形および過剰間隙水圧比の分布を図6に示す。この結果以下のことがわかった。

- ・ケース1とケース4において、ケーソンの水平変位の差は小さいことから、ケーソンの変形に寄与する成分に関して、震動台はターゲット波である鷹取波を良く再現していると考えられる。
- ・入力加速度振幅を半分としたケース2では、ケース1の水平変位の約60%となっている。
- ・規準ひずみを半分としたケース3では、ケース1の水平変位の約130%となっている。このように材料パラメータによってケーソンの変形量が大きく異なることから、後の三次元解析では、アルバニー砂の材料パラメータについて再度検討する。

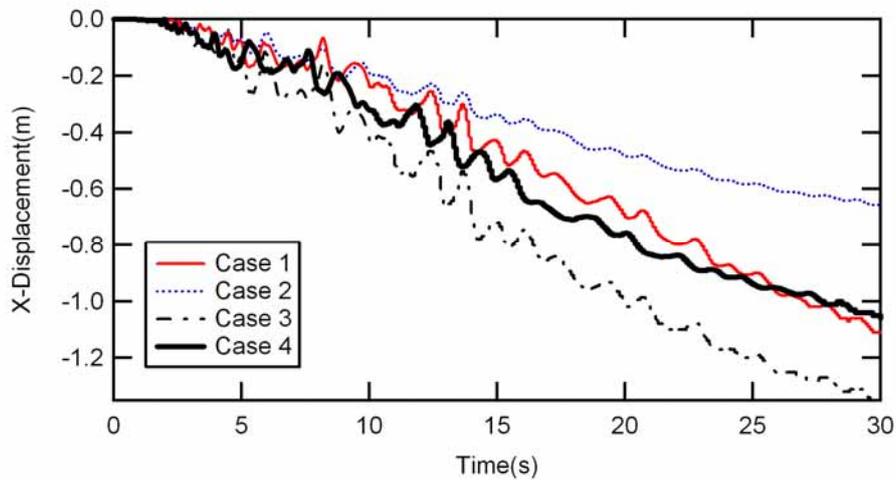


図5 二次元解析で得られたケーソン天端の水平変位の時刻歴

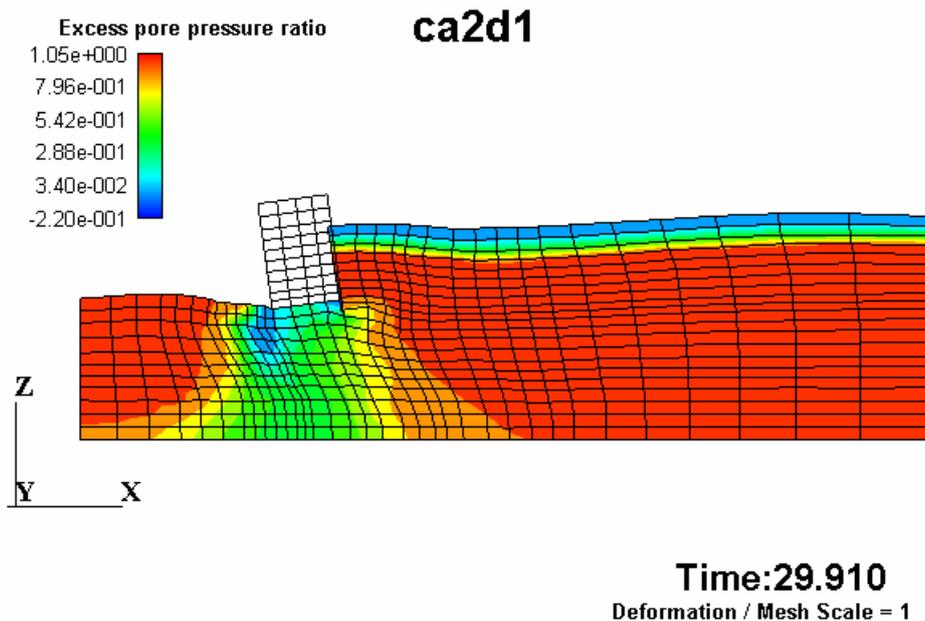
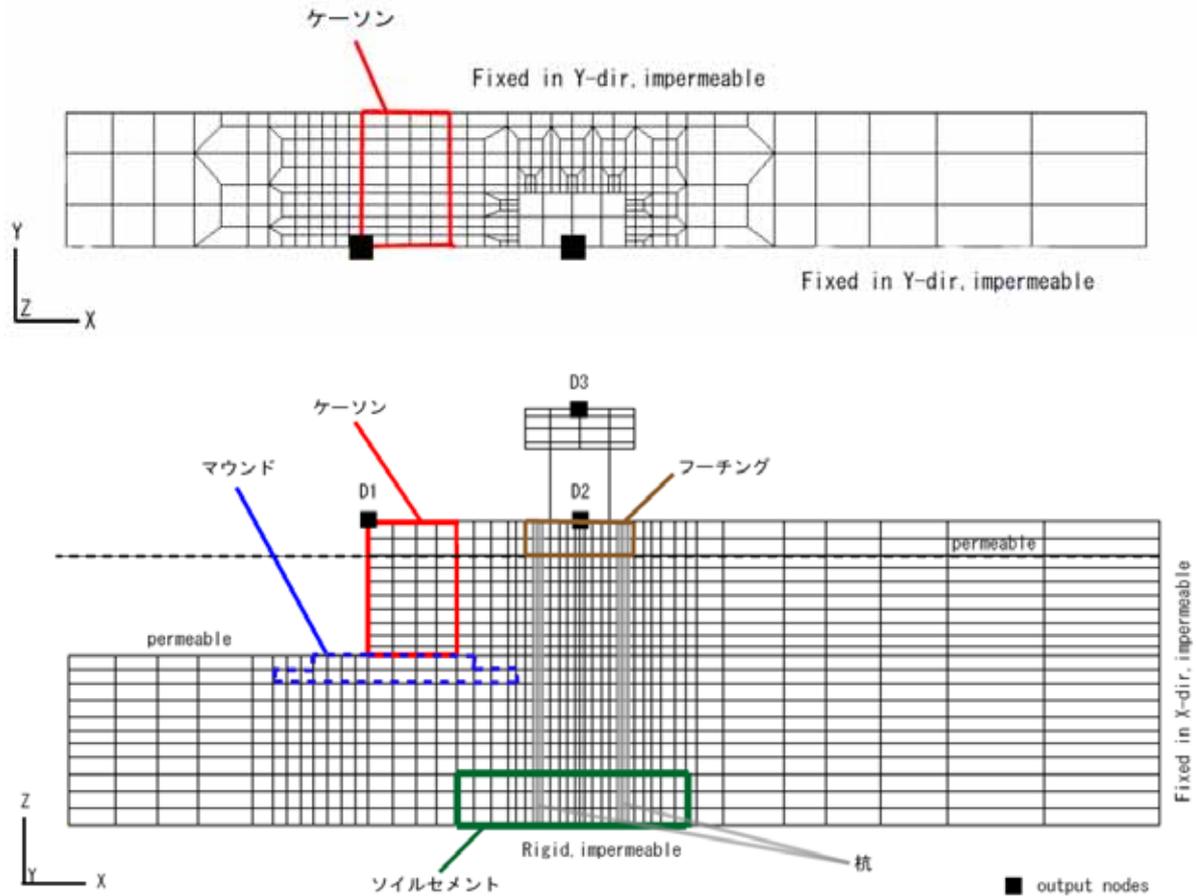


図6 加振後の変形図(ケース4)

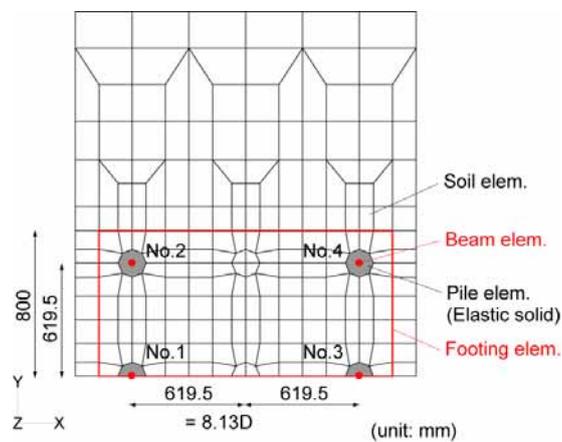
3) 三次元解析の解析条件

a) 解析モデル

解析モデルは図 1 に基づき作成した。作成した有限要素モデルを図 7 に示す。なお、流動方向加振に限定して、奥行き方向の対称性を考慮している。アルバニー砂からなる地盤、マウンド、ソイルセメントおよびケーソンはアイソパラメトリックソリッド要素、杭はビ



(a) 全体図



(b) 杭周辺の拡大平面図

図 7 有限要素モデル

ーム要素とソリッド要素からなるハイブリッド要素、フーチングおよびウェートはソリッド要素、柱はビーム要素でモデル化した。また、水位以下の地盤要素については、間隙水圧を考慮したが、ケーソン前面の水は考慮していない。側壁付近の矢板も考慮していない。

杭のハイブリッド要素は杭体自体の体積を再現するための一手法（Zhang ら、2000）⁶⁾であり、図 7(b)の拡大平面図に示すように杭のヤング率の 9 割をビーム要素に 1 割をその周辺のソリッド要素（弾性）に持たせている。杭のヤング率は地盤のそれに比べて 3 オーダー程度大きいことから、ビーム要素周辺のソリッド要素のヤング率は地盤のそれより 2 オーダー程度大きくなる。これによって、ビーム要素周辺のソリッド要素は杭の曲げ変形にさほど影響を与えないと同時に、杭体積を表現することが可能となる。

b) 材料パラメータの設定

i) 地盤材料

模型地盤を構成しているアルパニー砂、マウンドおよびソイルセメントについて、砂の弾塑性モデルを適用した。事前解析であるケース 1 では昨年度設定した表 3 に示す材料パラメータを使用した。事後解析であるケース 2 として、新たに設定したパラメータを表 4 に示す。昨年度の材料パラメータ設定に際して、等方圧密除荷試験、等方圧密後のひずみ漸増型排水繰返しせん断試験および等方圧密後のひずみ漸増型非排水繰返しせん断試験を

表 4 モデルパラメータ（三次元解析、ケース 2）

土層名		下部 Dr=70%	上部（飽和） Dr=60%	上部（乾燥） Dr=60%
密度	ρ (t/m ³)	2.060	2.060	1.703
透水係数	k (m/s)	8.5×10^{-5}	8.5×10^{-5}	-
初期間隙比	e_0	0.558	0.558	0.558
せん断波速度	V_s (m/s)	120	120	120
圧縮指数	λ	0.0009	0.0009	0.0009
膨潤指数	κ	0.0005	0.0005	0.0005
擬似過圧密比	OCR	1.2	1.2	1.2
初期せん断係数比	G_0/σ'_m	1250	1250	1250
破壊応力比	M_f	1.308	1.308	1.308
変相応力比	M_m	0.800	0.800	0.800
硬化関数中のパラメータ	B_0	4000	3000	3000
"	B_1	100	100	100
"	C_f	1000	1800	1800
規準ひずみ（塑性剛性）	γ_r^p	0.040	0.020	0.020
規準ひずみ（弾性剛性）	γ_r^e	0.040	0.020	0.020
ダイレイタンス係数	D_0	0.75	0.75	0.75
ダイレイタンス係数	n	3.0	7.0	7.0

実施したが、これらの試験においてアルバニー砂の相対密度は約 70%であった。ところが、昨年度の矢板の側方流動実験結果では、液状化対象層であるアルバニー砂の上部層の相対密度は約 60%、下部層は約 70%であった。昨年度実施した室内試験では相対密度を 70%に設定しており、構成モデルは実際の模型地盤よりもややかため・強めにキャリブレーションされている可能性がある。また、先に示したように二次元解析の結果でも材料パラメータの違いがケーソンの変形量に大きく影響することがわかっている。そこで、今年度は新たに、等方圧密後の応力振幅一定型非排水繰返しせん断試験（液状化時のせん断変形特性およびダイレイタンスー特性の設定に使用）を実施した。昨年度と同様に中空ねじりせん断試験機を使用した。アルバニー砂の相対密度は約 60%とし、拘束圧は 20kPa とした。なお、今年度は他の機関での室内試験結果と比較するため、応力振幅一定型とした。

表 4 に示すパラメータのうち、室内試験結果から直接設定できるパラメータは昨年度と同様であるが、それ以外のパラメータ（硬化パラメータ、規準ひずみ、ダイレイタンスーパラメータ）については、液状化強度曲線を目標として、中空ねじり試験のシミュレーションにより試行錯誤で設定した。下部層（相対密度 70%）については、昨年度の上部層の材料パラメータを適用した。また、マウンドおよびソイルセメントについては十分な室内土質試験ができなかったため、二次元解析と同様に昨年度の下部層の材料パラメータを適用した。

ケース 2 で用いたアルバニー砂（相対密度 60%）の要素シミュレーション結果を図 8 に示す。図 8 においては、(a)液状化強度曲線、(b)せん断剛性と減衰定数のひずみ依存性（動的変形特性）、(c)繰返しせん断応力比 0.3 におけるせん断応力とせん断ひずみの関係、(d)繰返しせん断応力比 0.3 における有効応力経路をそれぞれ示している。図 8(a)の液状化曲

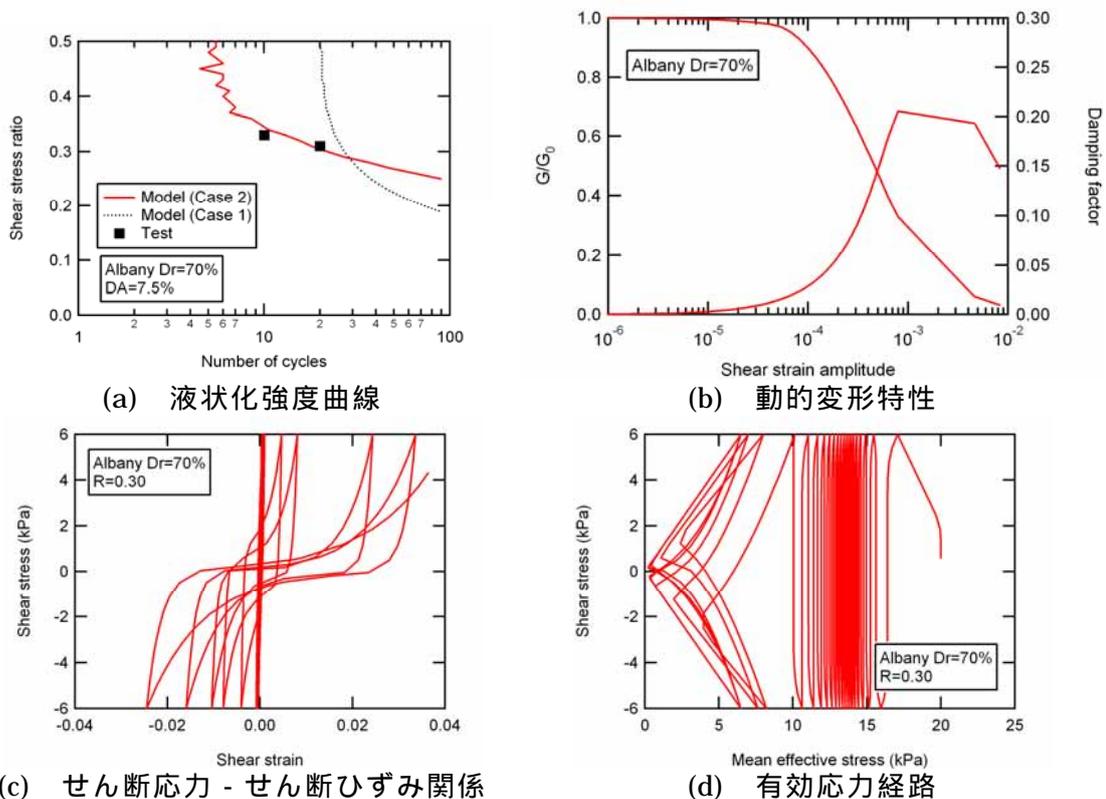


図 8 応力制御試験の仮想シミュレーション結果（アルバニー砂 Dr=60%、ケース 2）

線には、室内試験（ここでは安田らの室内試験結果を参照している）から得られた液状化強度（DA=7.5%で、RL10=0.33、RL20=0.31）も示している。また、昨年度設定した材料パラメータ（ケース 1、表 3）による液状化強度曲線も示している。ケース 1 の材料パラメータによる液状化強度はこれらよりやや大きいものとなっているが、ケース 2 の液状化強度曲線は概ね室内試験結果を再現している。

ii) 杭、ケーソン、フーチング、上部工材料

杭は、パイリニア型の M - 関係を有する非線形材料とした。杭の材料パラメータを表 5 に示す。なお、杭の M - 関係を有する非線形特性については常時の軸力を考慮した。

ケーソン、フーチング、柱および上部工は弾性材料(SS400)とし、ヤング率は 206GPa、ポアソン比は 0.3 とした。また、ケーソンの密度は 2.1t/m³、その他の密度は 7.9t/m³ とした。なお、柱の材料パラメータは表 5 に併せて示している。

c) 初期条件および境界条件

土骨格に対する境界条件として、底面は水平・鉛直方向を固定、側方は土槽壁面法線方

表 5 杭および柱の材料パラメータ

		杭	備考
外径	D (mm)	152.4	
肉厚	t (mm)	2	
断面積	A (m ²)	9.450×10 ⁻⁴	
断面二次モーメント	I (m ⁴)	2.672×10 ⁻⁶	
密度	ρ (t/m ³)	7.9	SS400
ヤング率	E (GPa)	206	SS400
ポアソン比	ν	0.3	
降伏応力	(MPa)	240	SS400
降伏曲げモーメント	(kNm)	7.1	常時軸力 (35.9kN) を考慮
降伏曲率	(1/m)	0.0129	常時軸力 (35.9kN) を考慮
全塑性曲げモーメント	(kNm)	10.5	常時軸力 (35.9kN) を考慮
全塑性曲率	(1/m)	0.0191	常時軸力 (35.9kN) を考慮

		柱	備考
外径	D (mm)	267.4	
肉厚	t (mm)	5.8	
断面積	A (m ²)	4.767×10 ⁻³	
断面二次モーメント	I (m ⁴)	4.080×10 ⁻⁵	
密度	ρ (t/m ³)	7.9	SS400
ヤング率	E (GPa)	206	SS400
ポアソン比	ν	0.3	

向を固定した。杭のビーム要素、周辺の杭体積を表すソリッド要素および周辺地盤のソリッド要素との境界は、それぞれ鉛直方向のすべり（水平成分は同一節点で同一変位）を考慮した。また、フーチング要素と周辺地盤の境界についても、鉛直方向のすべり（水平成分は同一節点で同一変位）を考慮した。ケーソン背面については、鉛直方向のすべり（ケーソン背面法線方向は同一節点で同一変位）を考慮し、最下端のみ鉛直方向を地盤変位と同一とした。ケーソン底面については、マウンド上面と結合し、すべりは考慮していない。なお、初期応力解析においては、模型作成時のストラット位置（なお、ストラット位置が不明のためケーソン前面の全節点を対象とした）で水平方向を固定した。

ハイブリッド要素である杭のビーム要素については、下端の土槽底面との結合部は水平・鉛直方向を固定した。杭のビーム要素はフーチングを、柱のビーム要素はフーチングおよびウェートを貫通しており、フーチングおよびウェートの内部では、水平・鉛直方向を結合している。

間隙水に対する境界条件として、水位面を水頭 0 の排水境界、その他の要素面は全て流量 0 の非排水境界とした。また、ケーソンの背面および底面も非排水境界とした。

地盤の初期有効応力状態を算定するため、動的解析と同一の有限要素モデルを用いて静的排水自重解析を実施した。静的排水自重解析では、模型実験での模型作成手順をできるだけ忠実に模擬するため、以下の二段階で初期応力解析を実施した。

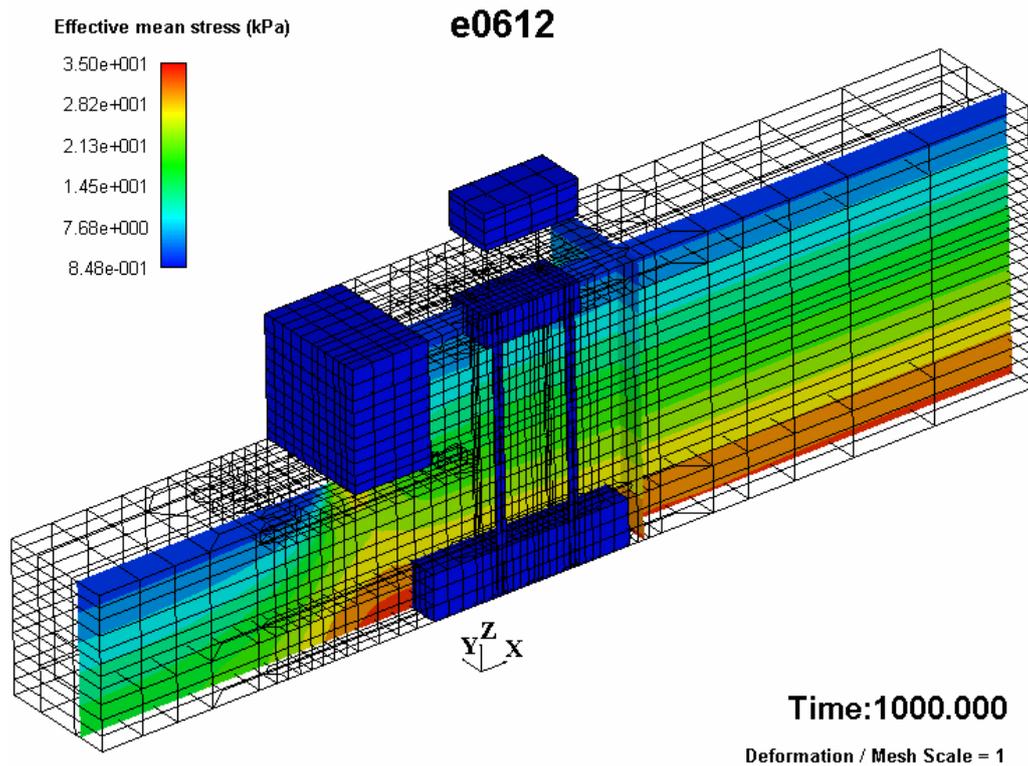
ケーソン前面のストラット位置（なお、ストラット位置が不明のためケーソン前面の全節点を対象とした）の水平成分を固定し、地盤の有効重量を考慮して、自重解析を行った。解析後にケーソン前面で固定した水平成分の節点力を得た。

ケーソン前面のストラット位置の水平成分を自由とし、の応力状態のもと、で得た節点力を作用させ、加振前の応力状態を算定した。

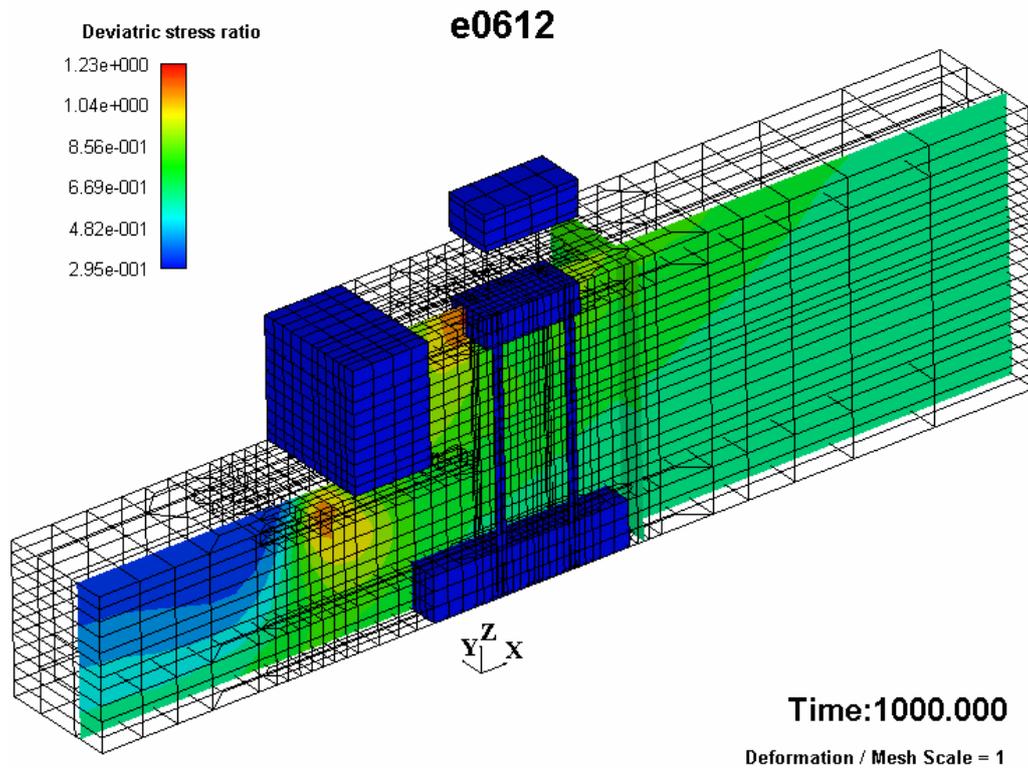
上記のステップでは地盤は簡易な弾完全塑性モデルとし、のステップでは動的解析と同じ弾塑性モデル（表 3 あるいは表 4 に示したパラメータを使用）とした。初期応力解析の結果、得られた地盤内の(a)平均有効応力および(b)偏差応力比（偏差応力の二次不変量を平均有効応力で除した値）の分布図をケース 1 および 2 について、それぞれ図 9、図 10 に示す。いずれのケースについても、偏差応力比の分布図に示すように、杭前面から矢板背後地盤では大きな偏差応力比が発生している主働崩壊領域がみられる。

入力動として、昨年度の矢板護岸の側方流動実験において震動台で観測された加速度（1995 年兵庫県南部地震において JR 鷹取駅の地表面で観測された加速度波形をターゲットとしたもの）を用いた。検討に用いた NS 成分および UD 成分の加速度の時刻歴は図 4 に示した通りである。二次元解析の結果より、ターゲット波と震動台観測波を用いた際のケーソンの変形量には大差がないことがわかっている。

数値解析上の解析条件として、計算時間増分は 0.00125 秒、Newmark 法の係数は $\alpha=0.3025$ 、 $\beta=0.6$ とした。Rayleigh 減衰として、初期剛性比例型を用いた。その係数は、ケーソン背後地盤の 1 次固有周期 0.11 秒に減衰定数 2%を仮定して、0.001 とした。動的解析時間は加振後の変形の継続も考慮して、30 秒とした。

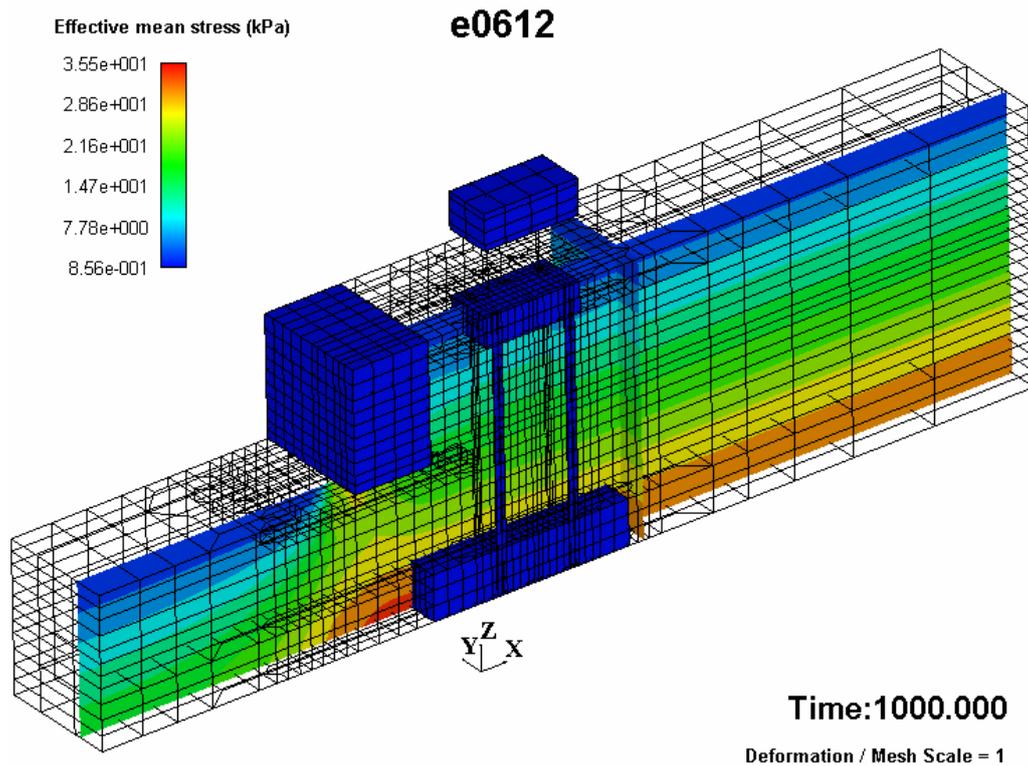


(a) 平均有効応力

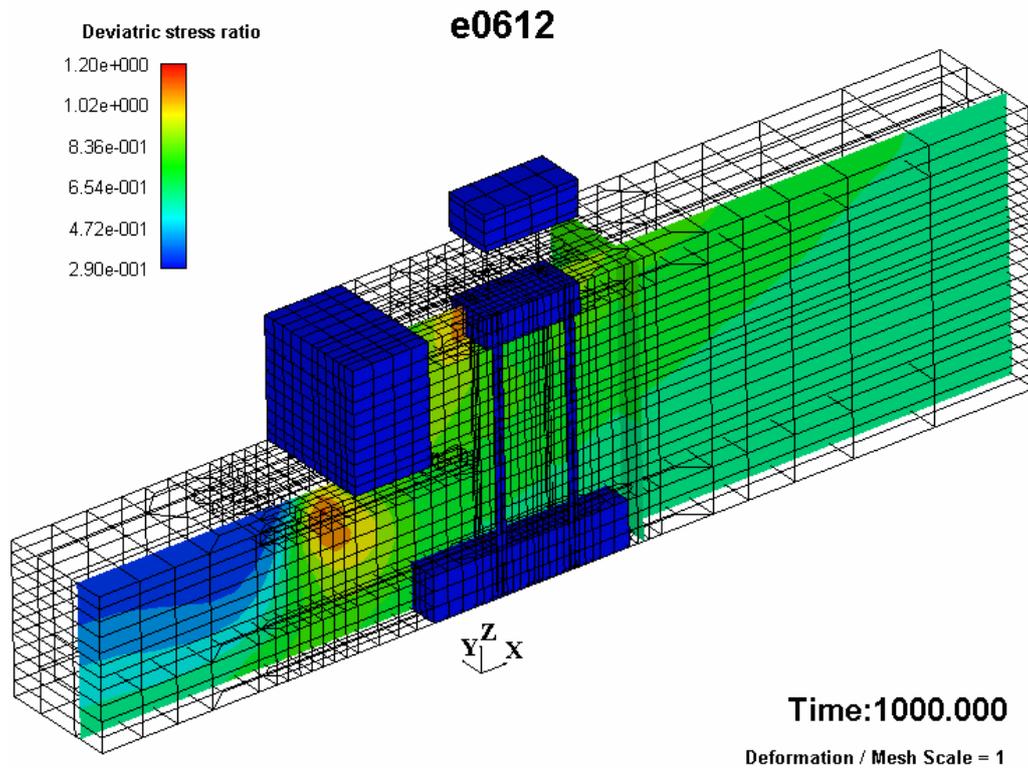


(b) 偏差応力比

図 9 初期応力解析の結果 (ケース 1)



(a) 平均有効応力



(b) 偏差応力比

図 10 初期応力解析の結果 (ケース 2)

4) 解析結果

a) ケース 1

事前解析であるケース 1 について、加振後(30 秒後)の変形図および過剰間隙水圧の分布図を図 11 に示す。また、入力加速度(流動方向)、ケーソン天端変位(流動方向)、フーチング加速度(流動方向)、フーチング変位(流動方向)、上部工天端加速度(流動方向)、上部工天端変位(流動方向)の時刻歴を図 12 に、杭の曲げモーメントおよび曲率の深度分布(加振開始後 30 秒後)を図 13 に、最大曲げモーメントが発生する位置(水側:高さ=3.1m、陸側:高さ=3.7m)の曲げモーメントの時刻歴を図 14 に示す。なお、ケーソン天端、フーチングおよび上部工の出力位置は図 7(a)の D1、D2 および D3 に対応している。符号は図 7 の座標軸に対応しており、流動方向は X 軸の負の方向となる。杭の曲げモーメント深度分布の出力位置を示す図中の No.は、図 7(b)の杭番号に対応している。これらより、以下のことが分かる。

- ・ケーソン前面および背面で液状化が発生する。ただし、ケーソン直下ではせん断破壊により過剰間隙水圧比は小さい。
- ・ケーソンの最大水平変位は 65cm 程度である。昨年度の解析⁵⁾では矢板の水平変位を過大評価したが、今年度の解析ではケーソン水平変位の実験結果(速報値)を過小評価した。
- ・フーチングおよび上部工の最大水平変位は 40cm 程度であるが、フーチング周辺地盤の鉛直変位はフーチング下面を下回っており、フーチングに作用する土圧を過大に評価している可能性がある。
- ・ケーソン、フーチングおよび上部工の水平変位の時刻歴に着目すると、入力の最大加速度発生時刻(6 秒)を過ぎても、変位が増加する傾向がみられる。フーチングおよび上部工は主要動の終了する時刻(15 秒)で変位が終息しているが、ケーソンは 30 秒程度まで変形が継続している。
- ・いずれの杭においても、杭頭部付近およびソイルセメント境界部で曲率が大きくなっており、杭の曲げモーメントは全塑性曲げモーメント(10.8kNm)に到達している。ただし、加振開始後 30 秒後ではソイルセメント境界部の曲げモーメントはやや減少し、全塑性曲げモーメントを下回っている。
- ・加振開始後 30 秒後の杭の曲げモーメント分布に着目すると、水側の杭では土槽底面から約 3m の位置でピークがみられるが、山側の杭では杭頭部にピークがみられる。これは、杭位置での地盤の変位分布の違いの影響を受けたものと考えられる。
- ・杭の曲げモーメントの時刻歴に着目すると、水側(高さ=3.1m)では約 10 秒で、山側(高さ=3.7m)では約 2.5 秒で全塑性曲げモーメントに達している。

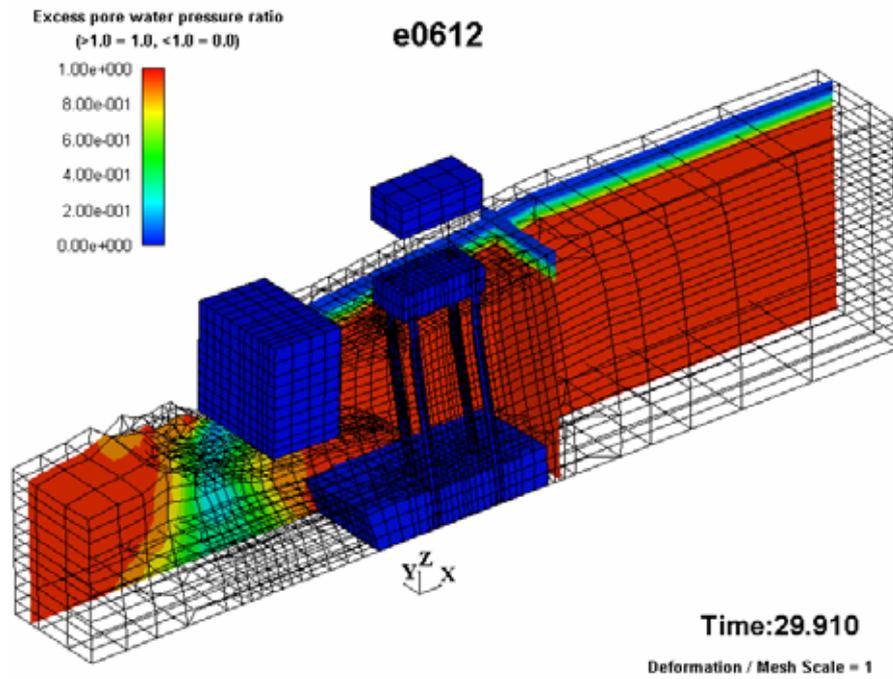


図 11 加振後（30 秒）の変形図と過剰間隙水圧の分布（ケース 1）

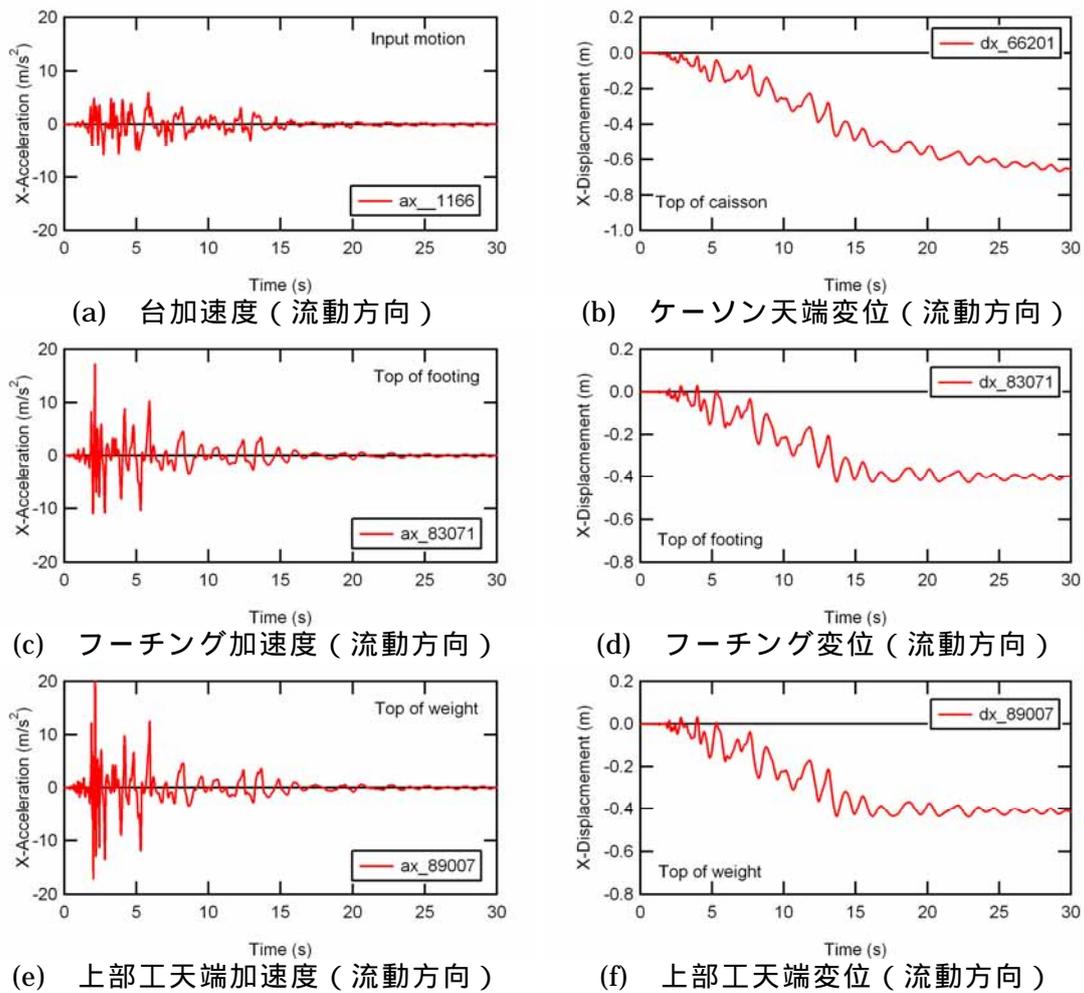
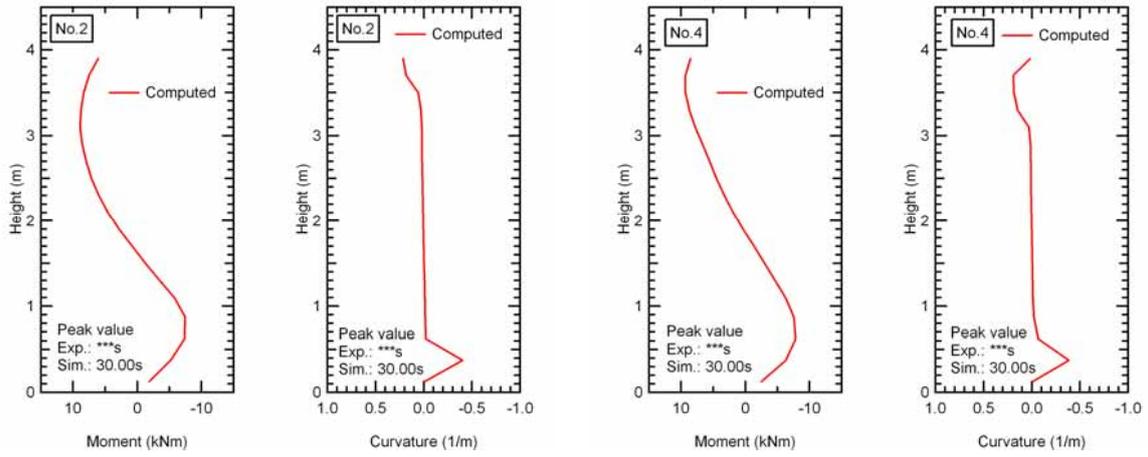
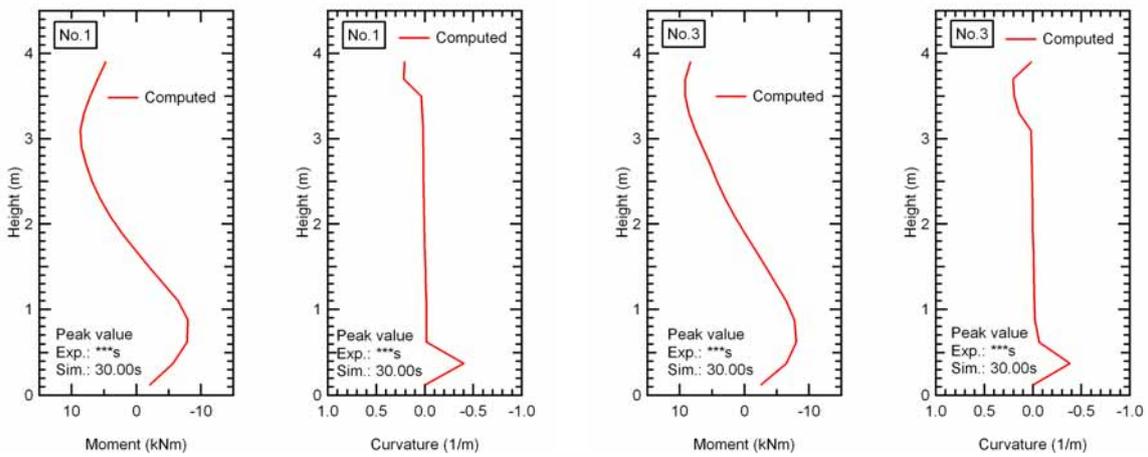


図 12 構造物の応答の時刻歴（ケース 1）



(a) 側方、水側 (No.2)

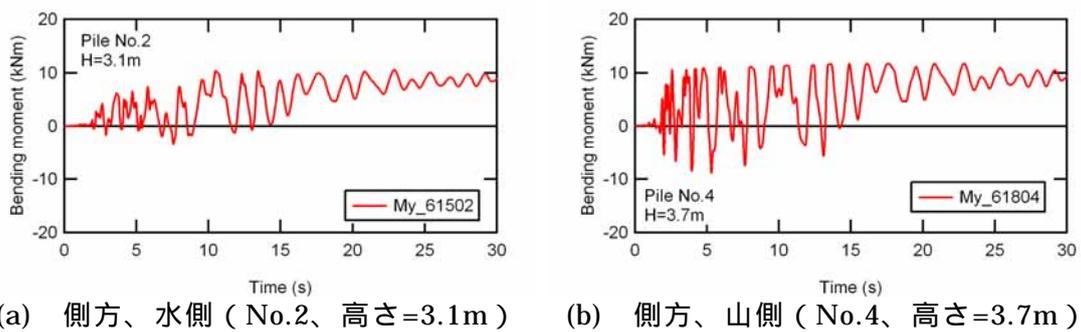
(d) 側方、山側 (No.4)



(c) 中央、水側 (No.1)

(d) 中央、山側 (No.3)

図 13 加振開始後 30 秒後の杭の曲げモーメントと曲率の深度分布 (ケース 1)



(a) 側方、水側 (No.2、高さ=3.1m)

(b) 側方、山側 (No.4、高さ=3.7m)

図 14 杭の曲げモーメントの時刻歴 (ケース 1)

b) ケース 2

事後解析であるケース 2 について、加振後 (30 秒後) の変形図および過剰間隙水圧の分布図を図 15 に示す。また、入力加速度 (流動方向)、ケーソン天端変位 (流動方向)、フーチング加速度 (流動方向)、フーチング変位 (流動方向)、上部工天端加速度 (流動方向)、上部工天端変位 (流動方向) の時刻歴を図 16 に、杭の曲げモーメントおよび曲率の深度分布 (加振開始後 30 秒後) を図 17 に、最大曲げモーメントが発生する位置 (水側: 高さ=2.9m、陸側: さ=3.7m) の曲げモーメントの時刻歴を図 18 に示す。なお、ケーソン天端、フーチングおよび上部工の出力位置は図 7(a) の D1、D2 および D3 に対応している。符号は図 7 の座標軸に対応しており、流動方向は X 軸の負の方向となる。杭の曲げモーメント深度分布の出力位置を示す図中の No. は、図 7(b) の杭番号に対応している。これらより、以下のことが分かる。

- ・ケーソン前面および背面で液状化が発生する。ただし、ケーソン直下ではせん断破壊により過剰間隙水圧比は小さい。
- ・ケーソンの最大水平変位は 90cm 程度である。ケース 1 よりは大きな水平変位となっており、ケーソン水平変位の実験結果 (速報値 1.3m) により近い値となっている。しかしながら、ケーソンの変形モードに着目すると、実験ではケーソン反時計回りに回転しているが、解析では時計回りに回転しており、変形モードについてはさらに検討が必要である。
- ・フーチングおよび上部工の最大水平変位は 60cm 程度であるが、フーチング周辺地盤の鉛直変位はフーチング下面を下回っており、フーチングに作用する土圧を過大に評価している可能性がある。
- ・ケーソン、フーチングおよび上部工の水平変位の時刻歴に着目すると、入力の最大加速度発生時刻 (6 秒) を過ぎても、変位が増加する傾向がみられる。フーチングおよび上部工は主要動の終了した後 (20 秒) で変位が終息しているが、ケーソンは 30 秒程度まで変形が継続している。
- ・いずれの杭においても、杭頭部付近およびソイルセメント境界部で曲率が大きくなっており、杭頭部付近およびソイルセメント境界部で杭の曲げモーメントは全塑性曲げモーメント (10.8kNm) に到達している。また、ケース 2 では水側の杭では土槽底面から約 3m の位置でも曲率のピークがみられる。実験ではフーチング下面から約 1.5m (土槽底面から 2.5m) の位置で水側の杭が座屈し、その上部は反時計回りに回転している。実験での座屈点がこのピークに相当する可能性もあるが、杭の曲げ方向が逆向きであり、さらに検討が必要である。
- ・加振開始後 30 秒後の杭の曲げモーメント分布に着目すると、水側の杭では土槽底面から約 3m の位置でピークがみられるが、山側の杭では杭頭部にピークがみられる。これは、杭位置での地盤の変位分布の違いの影響を受けたものと考えられる。
- ・杭の曲げモーメントの時刻歴に着目すると、水側 (高さ=2.9m) では約 5 秒で、山側 (高さ=3.7m) では約 2.5 秒で全塑性曲げモーメントに達している。

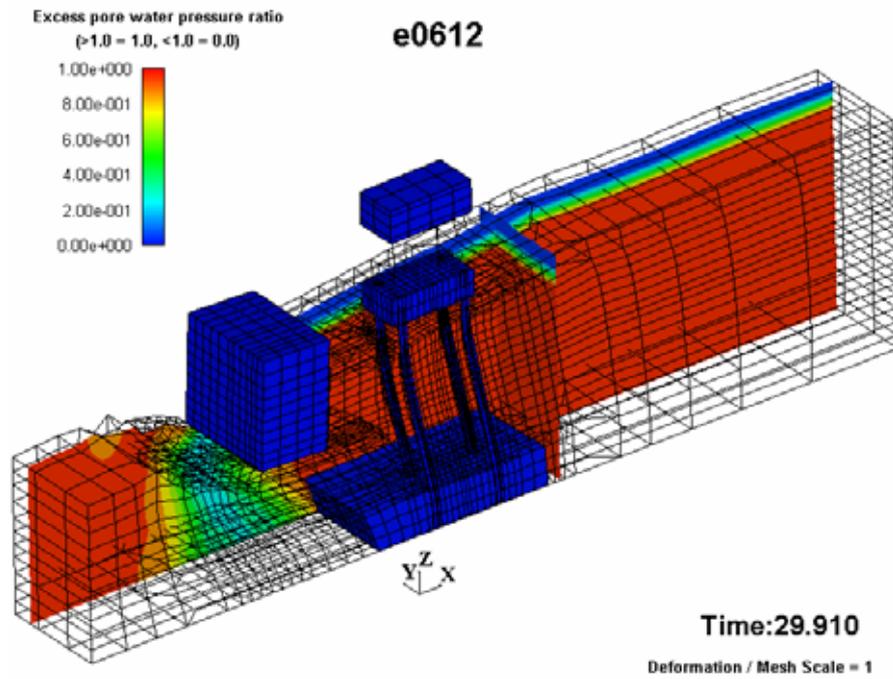


図 15 加振後（30 秒）の変形図と過剰間隙水圧の分布（ケース 2）

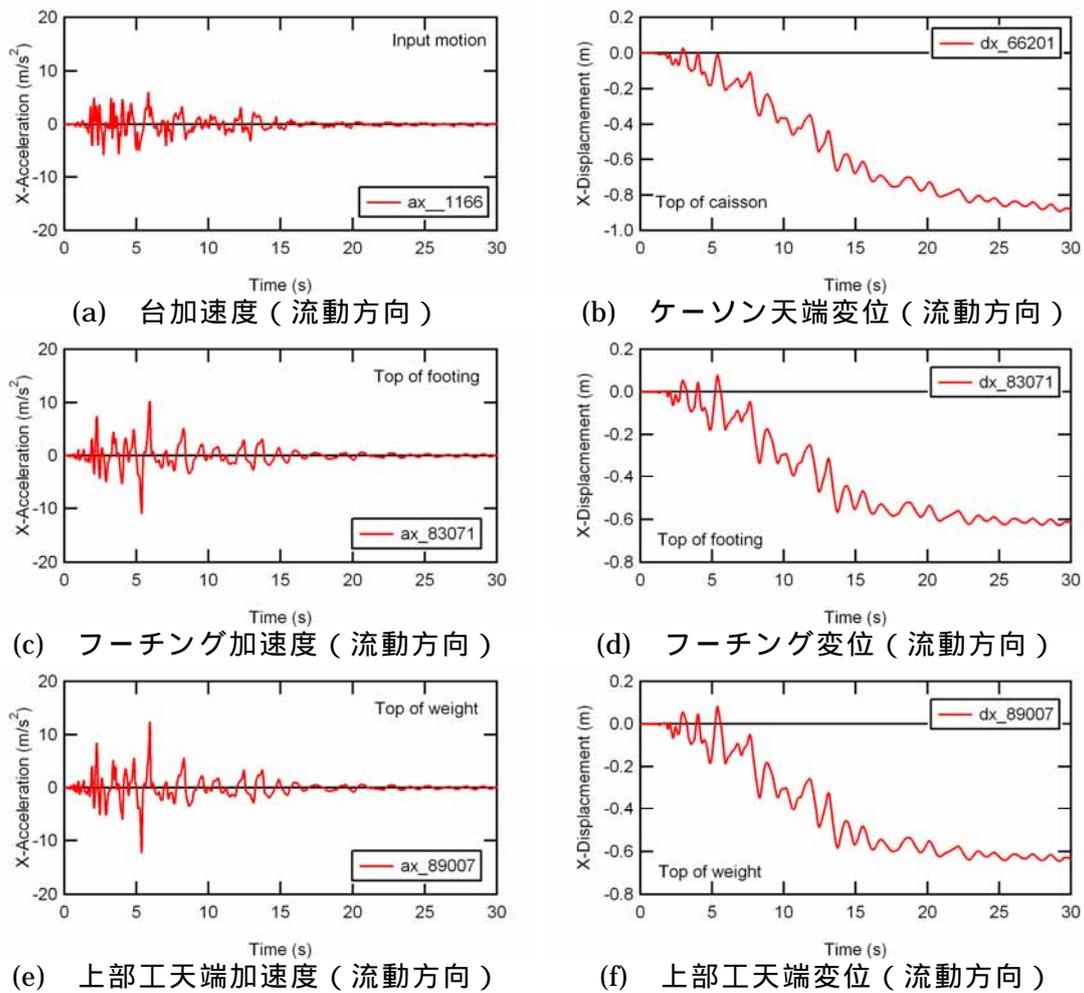
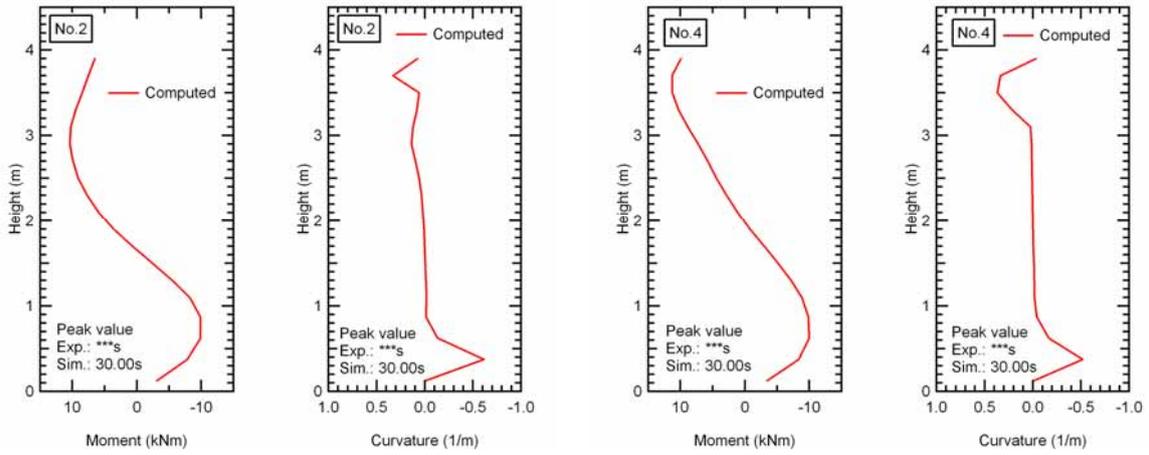
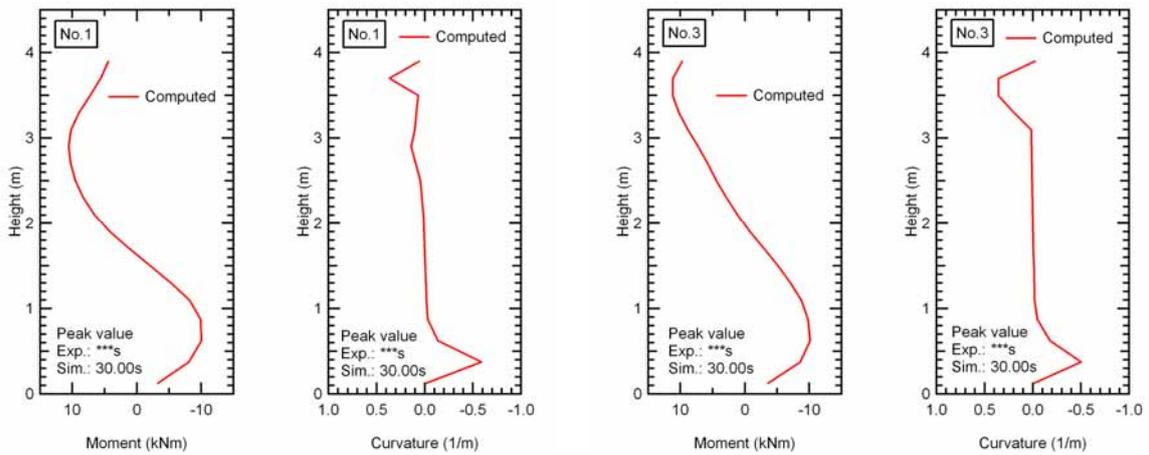


図 16 矢板およびフーチングの応答の時刻歴（ケース 2）



(a) 側方、水側 (No.2)

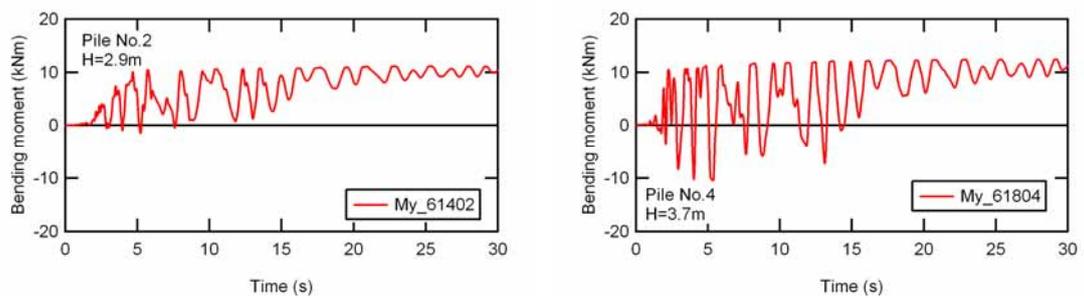
(d) 側方、山側 (No.4)



(c) 中央、水側 (No.1)

(d) 中央、山側 (No.3)

図 17 加振開始後 30 秒後の杭の曲げモーメントと曲率の深度分布 (ケース 2)



(a) 側方、水側 (No.2、高さ=2.9m)

(b) 側方、山側 (No.4、高さ=3.7m)

図 18 杭の曲げモーメントの時刻歴 (ケース 2)

c) ケース 1 および 2 の比較

ケース 1 および 2 について、ケーソン天端加速度（流動方向）、ケーソン天端変位（流動方向）、フーチング加速度（流動方向）およびフーチング変位（流動方向）の時刻歴を図 19 に、杭の曲げモーメントおよび曲率の深度分布（加振開始後 30 秒後）を図 20 に示す。なお、出力位置および符号はこれまでの図と同様である。これらより、以下のことが分かる。

- ・ケーソン天端およびフーチングの水平加速度については、加振初期においてケース 2 の方がケース 1 より小さくなっている。これは液状化に至る際のサイクリックモビリティが液状化強度の大きいケース 1 で顕著であることが一因である。
- ・ケーソン天端およびフーチングの水平変位については、振幅および残留値ともケース 2 の方が大きくなっており、液状化強度の違いを反映した結果となっている。
- ・加振開始後 30 秒後の杭の曲げモーメント分布については、フーチング変位の違いを反映して、ケース 2 の曲げモーメントがケース 1 よりピーク値が大きくなっている。また、水側の杭の杭頭付近に着目すると、ケース 2 の最大曲げモーメントが発生する深度がケース 1 よりやや深くなっていることがわかる。
- ・加振開始後 30 秒後の杭の曲率分布については、両ケースとも杭頭付近およびソイルセメント境界部でピークがみられ、曲げモーメント同様にケース 2 のピークが大きくなっている。また、ケース 2 では土槽底面から約 3m の位置でもピークがみられる。

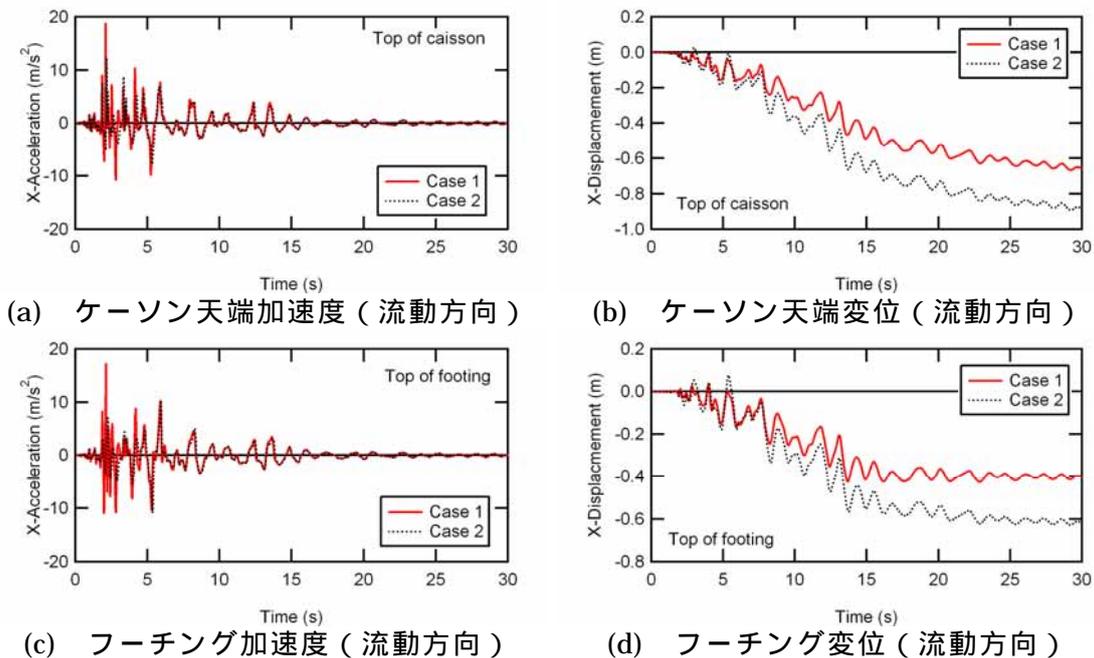
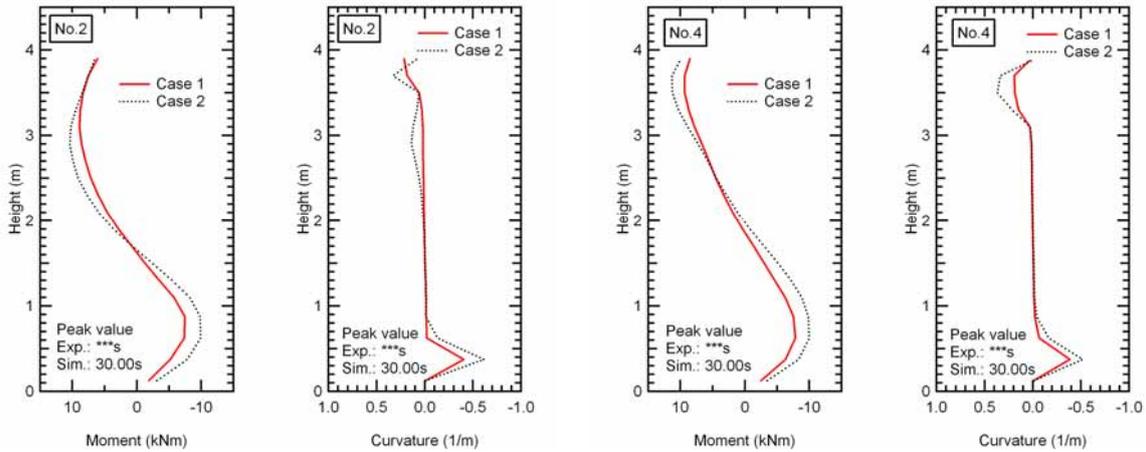
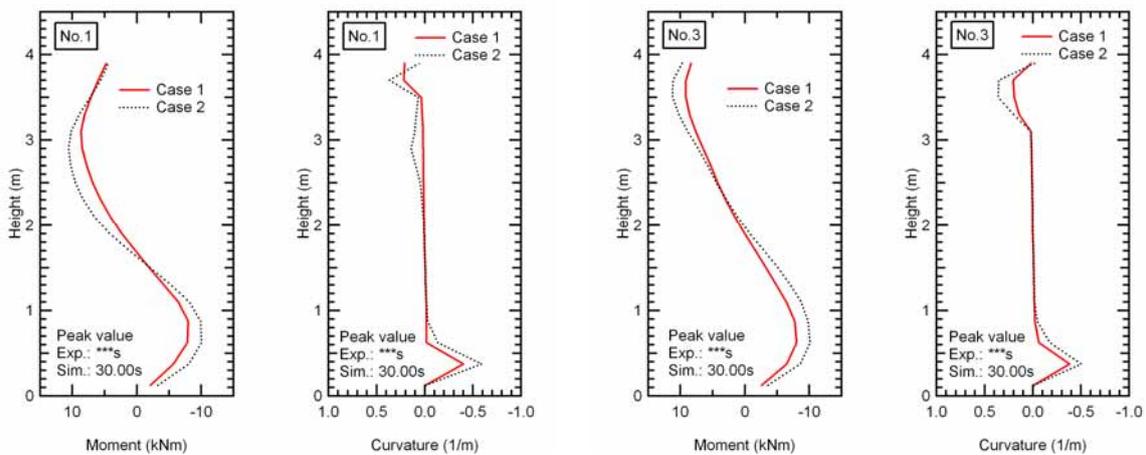


図 19 ケーソンおよびフーチングの応答の時刻歴の比較



(a) 側方、水側 (No.2)

(d) 側方、山側 (No.4)



(c) 中央、水側 (No.1)

(d) 中央、山側 (No.3)

図 20 加振開始後 30 秒後の杭の曲げモーメントの深度分布の比較

(d) 結論ならびに今後の課題

E-ディフェンスで実施された側方流動実験を対象として、既存の三次元有効応力解析による事前予測および事後シミュレーションを行った。また、ケーソンの変形の概略予測のため二次元事前解析も実施した。その結果、以下のことがわかった。

- ・ケーソン前面および背後地盤において液状化が発生する。昨年度の震動台加速度を入力動に用いた結果、二次元事前解析によるケーソンの水側への最大水平変位は 100cm 程度である。また、三次元事前解析によるケーソンおよびフーチングの水側への最大水平変位はそれぞれ 65cm、40cm 程度である。この結果、杭は杭頭付近およびソイルセメント境界部で曲げ降伏に至ることが予想される。
- ・材料パラメータを変更した事後解析の結果、ケーソンおよびフーチングの水側への最大水平変位はそれぞれ 90cm、60cm 程度となった。また、水側杭の杭頭付近の最大モーメント発生深度がやや深くなった。

現時点では、実験結果との詳細な比較はできていないが、実験結果の速報によると、ケーソンは反時計回りに回転し、100cm を越える水平変位が発生した。また、水側の杭は杭頭から 1.5m で

座屈し、陸側の杭はソイルセメント境界部で破壊した。ケーソンの変形について、事後解析であるケース 2 では実測に近い変形量が発生しているものの、解析では時計回りにケーソンが回転した。杭の曲げモーメントについて、事後解析であるケース 2 では水側の杭の杭頭付近の最大曲げモーメント発生位置がケース 1 より深く実測値に近い傾向を示したが、変形モードについてはさらに検討が必要である。

今後の課題として以下が挙げられる。

- ・実験で得られた計測結果との比較を通じて、設定した材料パラメータ、FEM モデルおよび境界条件・初期条件等の妥当性を確認する必要がある。
- ・現状の解析手法では護岸（矢板、ケーソン）の残留変位を正確に予測することは困難であり、幾何学非線形性や構造物と背後地盤との境界部のモデル化などが課題である。
- ・フーチングの変位および杭基礎の断面力について、破壊発生位置などの破壊以前の予測は可能であるが、大変形後の残留値の予測は困難であり、上記と同様の課題がある。

(e) 引用文献

- 1) Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y. and Yamashita, S.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, *Geotechnique*, pp.661-680, 1999.
- 2) Oka, F., Yashima, A., Shibata, T., Kato, M. and Uzuoka, R.: FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-plastic model, *Applied Scientific Research*, Vol.52, pp.209-245, 1994.
- 3) 東北大学：3.3.6 側方流動に対する基礎の三次元数値シミュレーションの研究(その1)、大都市大震災軽減化特別プロジェクト、震動台活用による構造物の耐震性向上研究、平成 16 年度成果報告書、文部科学省研究開発局、独立行政法人防災科学技術研究所、2005.
- 4) 渦岡良介, 仙頭紀明, 八嶋厚, 張鋒: 護岸近傍に位置する杭基礎建物の 3 次元有効応力解析, *日本地震工学会論文報告集*, Vol.2, No.2, pp.1-14, 2002.
- 5) 東北大学：3.3.6 地盤・基礎実験における三次元数値シミュレーションによる実験の予測解析（側方流動解析、その1）、大都市大震災軽減化特別プロジェクト、震動台活用による構造物の耐震性向上研究、平成 17 年度成果報告書、文部科学省研究開発局、独立行政法人防災科学技術研究所、2006.
- 6) Zhang, F., Kimura, M., Nakai, T. and Hoshikawa, T.: Mechanical behavior of pile foundations subjected to cyclic lateral loading up to the ultimate state, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.5, pp.1-17, 2000.

(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
Uzuoka, R., Cubrinovski, M., Zhang, F., Yashima, A. and Oka, F.	VALIDATION OF 3-D DYNAMIC SOIL-WATER COUPLED ANALYSES FOR LIQUEFACTION-INDUCED EARTH PRESSURE ON A PILE GROUP	International Workshop on New Frontiers in Computational Geotechnics, Xian, China	2006.10
Uzuoka, R., Cubrinovski, M., Zhang, F., Yashima, A. and Oka, F.	Accuracy of prediction with effective stress analysis for liquefaction-induced earth pressure on a pile group	Proc. of New Zealand Workshop on Geotechnical Earthquake Engineering, Christchurch, New Zealand, pp. 120-132	2006.11

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

