

既設杭基礎構造物の合理的な液状化対策

岐阜大学大学院工学研究科	学生会員	田辺晶規
岐阜大学大学院工学研究科	学生会員	余川弘至
岐阜大学工学部	国際会員	八嶋 厚
岐阜大学流域圏科学研究センター	国際会員	沢田和秀
岐阜大学工学部	国際会員	原 隆史
(独)水資源機構	正会員	加藤智雄
(株)大林組技術研究所		江尻讓嗣
(株)大林組技術研究所	正会員	樋口俊一

1. はじめに

東海・東南海連動型地震の発生が懸念されており、既設構造物の耐震対策は急務となっている。特に、東海地域平野部には、飽和した緩い砂質地盤が広範囲に厚く堆積している¹⁾。長い揺れを伴う当該地震の特性から、甚大な液状化被害の発生も予測されており、早期対策が望まれる。しかし、これまで液状化対策の主流とされてきた液状化の発生を防止する方法や増し杭といった構造的な対策は、以下のような理由で適用は困難である。(1)対象構造物の範囲があまりにも広く膨大な費用と時間を要する(2)十分な施工用地が確保できない(3)周辺構造物との関係上設置することができない

そのため、合理的な液状化対策の開発は緊急課題となっている。

以上から本研究では、既設構造物の合理的な液状化対策として、これまで地中構造物(直接基礎)の対策として用いられてきた排水機能付き矢板の杭基礎構造物への適用について検討している。ここでは、本研究の一環として実施した動的遠心実験の結果とともに、今後設計法を提案するために実施している、二次元動的有効応力解析による実験結果の再現状況について報告する。

2. 遠心模型実験

大規模構造物の液状化対策にあたっては、対策効果に不明な点が多い。そのため、事前に実験や解析によって、その効果を確認することが望ましい。本研究では、「排水機能付き矢板の液状化対策としての効果を確認すること」と、「液状化時に既設構造物が有する杭の挙動を確認すること」を目的としている。特に、本研究で対象とする排水機能付き矢板は、構造物周辺に矢板を設置することで、せん断変形の拘束効果を期待するものである。経済性に優れる反面、大規模杭構造物へ適用した事例が少ないことから、対策効果の事前確認は非常に重要である。

本研究では、排水機能付き矢板による液状化対策を検討する。具体的には、1g 場の振動台実験では、地盤内の応力状態を実地盤と同じように表現できないため、50g 場で遠心模型振動実験を行う。計測器では測れない詳細は、解析によって把握する。

2.1. 遠心模型実験装置

遠心模型実験は、模型地盤に遠心力を作用させることにより、地盤材料の力学挙動の拘束圧依存性を満足させることができる実験手法である。本研究では、世界最大級の遠心模型実験装置²⁾³⁾⁴⁾を用いて、遠心重力 50 g 場において遠心模型振動実験を実施した。図-1 には、遠心重力を発生させる回転装置を示した。写真-1 には、遠心模型実験装置の全体図を示す。

装置は、回転アーム、駆動装置、アーム内に設置した計測器および、映像収録装置により構成される。回転アームには、静的バケットと振動台バケットを装備し、遠心による左右のバランスをとるために、振動台と同じ重さの重量物を静的バケットに設置した。表-1 には、遠心模型実験装置の性能を示す。図-2 には、地震動を再現する振動台バケットを示した。振動台は、支持機構・テーブル・油圧機構・アクチュエータ・振動検出

Reasonable liquefaction countermeasure for existing piled structure :

Akinori TANABE(Gifu University),Hiroshi YOKAWA(Gifu University),Atsusi YASHIMA(Gifu University),Kazuhide SAWADA(Gifu University),Tomoo KATOU(Japan Water Agency),Jouji EJIRI(Obayashi Corporation),Shuniti HIGUTI(Obayashi Corporation)

器で構成させる。主な性能は、表-2 に示す。振動台は振動台バケット内に設置し、加振方向は遠心力場での振動台から見て、水平一方向とした。加振力は、電気油圧式アクチュエータにより加えられた。

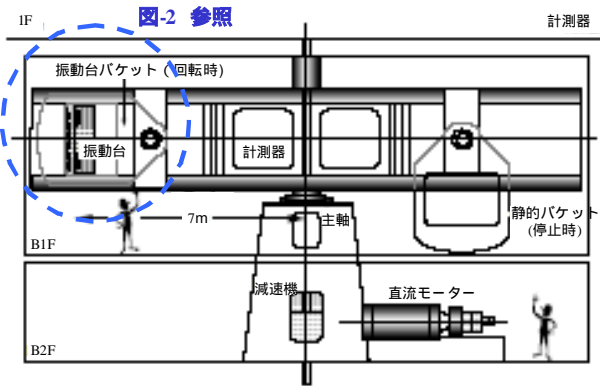


図-1 回転装置³⁾

表-1 遠心模型実験装置の性能³⁾

装置	項目	使用	
回転装置他	最大回転半径	7.01m	
	搭載容量	700tonf* g	
	搭載重量	静的バケット	7tonf
		振動台バケット	3tonf
	搭載面積	静的バケット	L2.2m x W2.20m
		振動台バケット	L2.2m x W1.07m
振動台	載荷高さ	2.5m	
	バケット数	静的、動的各1	
	最大加振加速度	50g	
	最大加振力	120tonf	

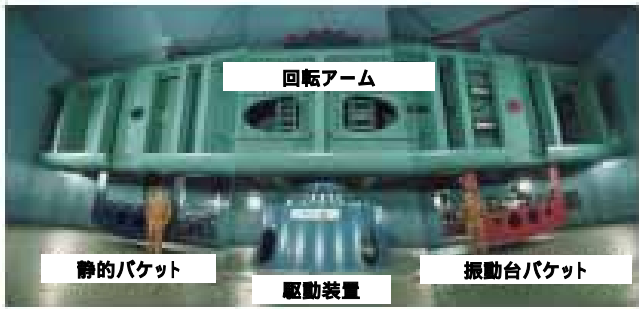


写真-1 遠心模型実験装置⁴⁾

表-2 遠心振動台の性能²⁾

項目	使用
振動台搭載質量	3ton
振動台面積	2.2m x 1.07m
最大加速度	50000cm/s ²
最大速度	90cm/s(kine)
最大変位	5mm
最大加震推力	1.176kN(120tonf)

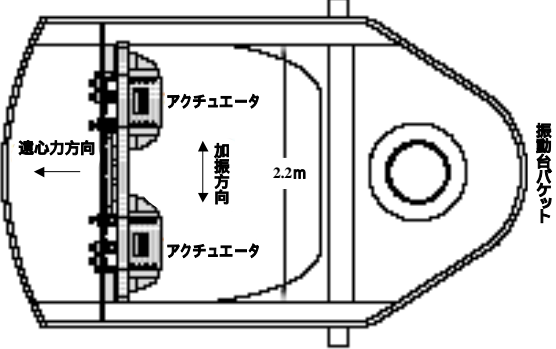


図-2 振動台バケット³⁾

表-3 50g 場の相似則³⁾

項目	記号	相似率
長さ	L	1/50
密度		1
ひずみ		1
加速度	a	50
速度	v	1
変位	d	1/50
応力		1
剛性	D	1
時間	t	1/50
振動数	F	50

2.2. 相似則

遠心模型実験では、実大規模の応力状態を表現できることや、長期間かかる圧密などの現象を短時間で再現できる利点がある。すなわち、遠心模型実験では、縮小模型地盤の応力状態が実地盤と同じになるために、拘束圧に依存する地盤剛性が実物と同じになり、結果的にひずみも実物と1対1に表現することが出来る。表-3には、50g場で成立する相似則を示す。模型実験では、この相似則に従い、模型寸法や加速度などを調整した。

2.3. 実験模型

本実験では、液状化対策なしのケース A と排水機能付き矢板を設置したケース B の 2 ケースを同時に遠心実験した。2 ケースを同時に行うために、写真-2 に示したせん断土槽(内寸：幅 1790mm x 奥行 800mm x 高さ 565mm)内部に中仕切り鋼板(寸法：幅 1790mm x 厚さ 19mm x 高さ 565mm)を設置した(写真-3)。また、せん断土層内部には、上部構造物(寸法：幅 400mm x 奥行 380mm x 高さ 260mm、重さ 0.9 kN)、板杭(寸法：幅 4mm x 厚さ 25mm x 高さ 300mm)、矢板(寸法：幅 1mm x 厚さ 380mm x 高さ 460mm)を、図-3、図-4 に示すように設置した。図-3、図-4 には、ケース A とケース B の断面図を示し、計測器の設置場所と上部の液状化層と下部の非液状化層の深さを示す。既設構造物と同じ杭・矢板の曲げ剛性を表現するために、杭・矢板の厚さによって調整した。材質は、上部構造物と杭、矢板に、ヤング率 $2 \times 10^8 \text{KN/m}^2$ の鉄を使用した。モデル地盤は、層

厚 155mm のサンドモルタル(非液状化層)と層厚 375mm の飽和砂地盤の二層地盤とした。砂地盤には、珪砂 7号を使用した。表-4 には、珪砂 7号の粒度試験結果を示す。モデル地盤作成方法は、砂地盤では、珪砂 7号を空中落下法により、相対密度 60%を目標に作成した。モデル地盤作成後、真空土槽内に入れて、大気圧と土槽内の空隙を真空にした。その後、土槽内を二酸化炭素で満たし、圧力差を使い、水の 50 倍の粘性をもつ粘性流体(セルローズ)を注入し、地盤を飽和した。粘性流体(セルローズ)を使用したのは、時間の相似則を合わせるためである。図-5 には、杭に設置したひずみゲージの設置場所を示す。

杭基礎は、4×4 の 16本の群杭で、図-5 に示した x 方向に 120mm 間隔で設置し、y 方向に 115mm 間隔で構造物に剛結した。pile1 から 4 の杭頭部から杭下端にかけて、ひずみゲージ番号を pile(1~4) - (1~5) とつけた。杭も矢板も非液状化層の根入れ 70mm で設置した。鉄製の矢板に排水機能を持たせるために、GT フィルター⁵⁾を接着させて、排水機能を追加した。JIS A1218 に準拠すると GT フィルターの横透水係数は $1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 、縦透水係数は 1.0cm/sec であり、縦透水係数の速さで、間隙流体が地表に排水する方向に設置した。

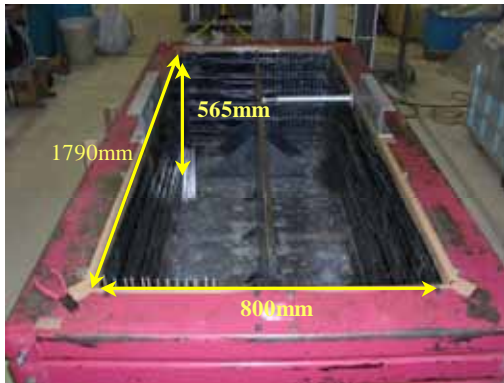


写真-2 せん断土層

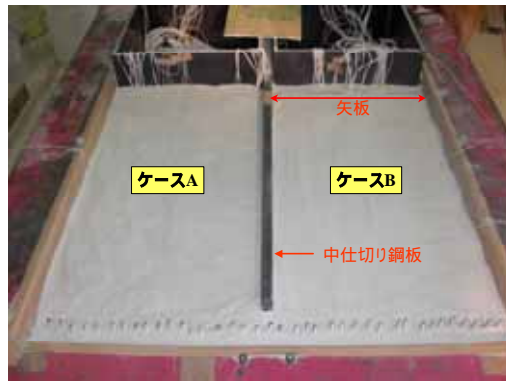


写真-3 モデル地盤

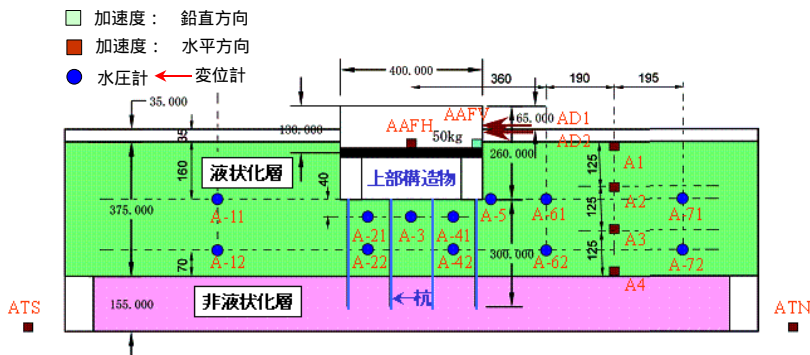


図-3 ケース A(対策なし)の断面図

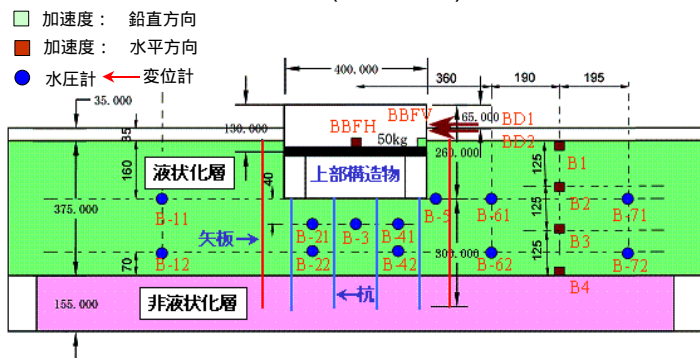


図-4 ケース B(排水機能付き矢板)の断面図

表-4 7号珪砂の粒度試験結果

土粒子密度Gs (g/cm ³)	2.645
最小密度 _{max} (g/cm ³)	1.184
最大密度 _{min} (g/cm ³)	1.529
最大間隙率 _{e_{max}}	1.234
最小間隙率 _{e_{min}}	0.73

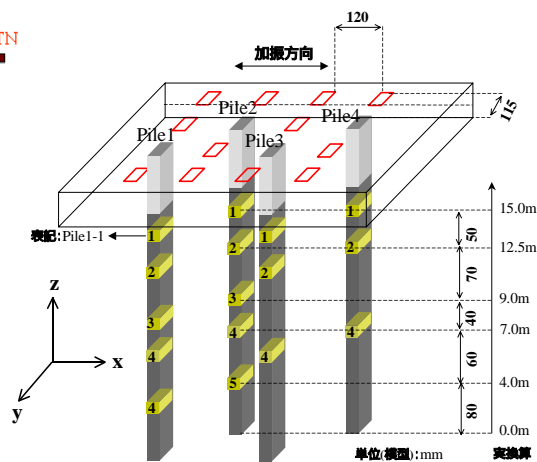


図-5 杭の配置図

2.4. 入力地震動と計測項目

入力地震動は、中央防災会議で発表された想定東海・東南海連動型地震動を当該地域の地盤特性を考慮し、FDEL⁶⁾で作成した。FDEL による当該地域の最大振幅は 145gal と計算されたが、矢板による顕著な効果を得るため、約 2 倍の地震動を入力した。図-6 には、振動台から計測した地震動(実物換算した)の結果を示す。

計測項目は、図-3~5 に示すとおり、構造物・地盤・振動台の加速度および地盤の間隙水圧、杭の曲げと軸のひずみとした。

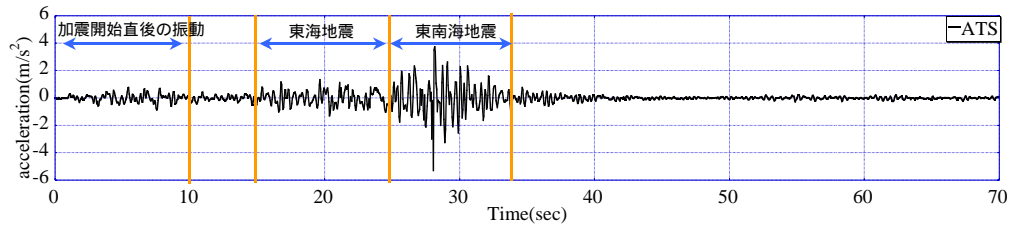


図-6 振動台 (ATS) の加速度

2.5. 実験結果

実験結果は、実大規模に換算した値で示す。なお、遠心実験では、排水機能付き矢板の有無によって、液状化地盤が杭にどのような影響を与えるかを確認することを目的としているため、ここでは矢板や杭周辺のデータを中心に報告する。

2.5.1. 間隙水圧の計測結果

図-7には、A-11とA-12の過剰間隙水圧比(u'/σ'_{y0})を示す。A-11ではA-12より、過剰間隙水圧比の上昇が早いという結果であった。図-8には、矢板と構造物の間に設置したA-5とB-5の水圧計の結果を示す。ケースAでは、ケースBに比べて早く液状化していることが確認でき、水圧の上昇過程において、水圧が振動しているのが、サイクリックモビリティが起きていると考えられる。また、ケースBでは過剰間隙水圧の消散開始時刻が早かった。遠心実験によって、排水機能付き矢板は、過剰間隙水圧の消散を促進する効果があった。実験において、有効応力経路を確認できていないが、サイクリックモビリティを抑えていると考えられる。

2.5.2. 曲げモーメントの計測結果

杭に取り付けたひずみゲージから、杭に働く曲げひずみを計測し、曲げモーメントを計算した。ここでは、杭頭曲げモーメントが、設計上特に問題となるので、杭頭に注目して示す。図-9は、杭毎の杭頭曲げモーメントをピーク値でプロットした結果である。図-9より、ケースAもケースBどちらのケースも、pile1、4のピーク値が大きくなった。特に、ケースAの外側の杭(pile1、4)で曲げモーメントが大きくなったのは、外側の杭によって、曲げモーメントが受け持たれているためと考えられる。これに対し、ケースBでは、杭頭の曲げモーメントが、すべての杭によって受け持たれているので、ケースAに比べて、曲げモーメントのピーク値に差異がなかった。図-10には、曲げモーメントのピーク時におけるpile1とpile2の曲げモーメントの深度分布を示す。以上より、本対策が杭頭の発生曲げモーメントの平均化という観点で有効であると考えられる。

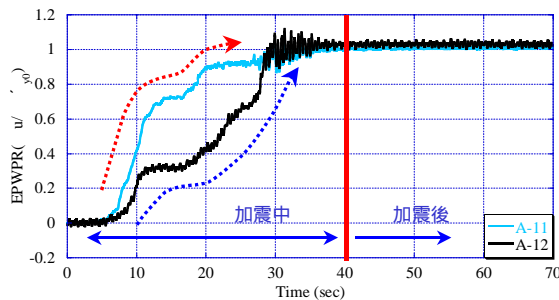


図-7 A-11とA-12の過剰間隙水圧比

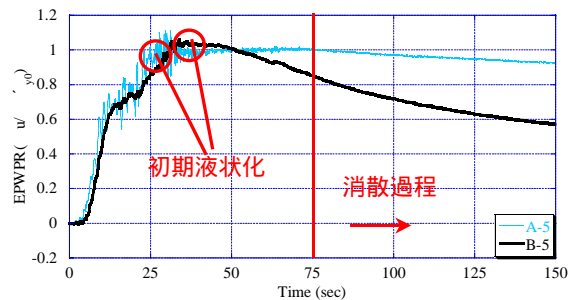


図-8 A-5とB-5の過剰間隙水圧比

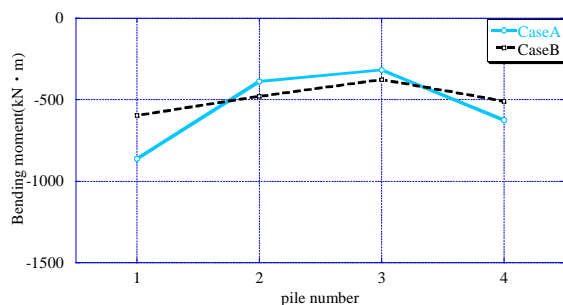
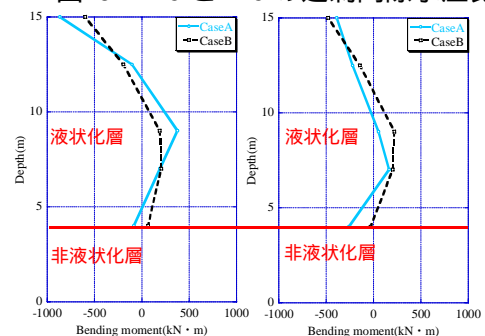


図-9 杭頭曲げモーメントのピーク値



(a) pile1 (b) pile2

図-10 pile1,2の深さ毎の曲げモーメント

3. 数値シミュレーション

3.1. 数値シミュレーション概要

数値シミュレーションは、計測結果の再現を通じて、計測器が設置できない場所のデータを推定することができる。より詳細なデータを知る上で、数値シミュレーションは重要な役割を担っている。実験では、排水機能付き矢板の設置により、外側の杭頭曲げモーメントを抑制できることを確認したが、詳細なメカニズムを推定することは困難である。そのため、詳細なメカニズムを確認することが、本解析の目的である。

3.2. 解析プログラムとパラメータ

本解析では、二次元動的有効応力解析プログラム LIQCA⁷⁾を使用した。地盤の物性値は、過去に大林組技術研究所で行われた7号珪砂の種々の試験から決定した。表-5に解析で用いたパラメータを示す。この中から、砂の液状化に関するパラメータは、繰返し三軸試験から得られた液状化強度曲線にフィッティングさせて決定しており、この結果を図-11に示す。せん断波速度は、微小加震による地盤加速度の伝達速度の違いから決定した。

図-12には、微小加震を入力し、二次元解析を行って求められた地盤の固有周波数の特性とA2の実験で得られた地盤の固有周波数の特性を示す。この地盤の特性は、地盤(A2)と振動台(ATS)の加速度をフーリエ変換し、地盤のフーリエ加速度スペクトルを、振動台のフーリエ加速度スペクトルで除したものである。これを用いて、増幅率や固有周波数を把握した。微小加震は、最大加速度24Galで行い、15秒間加震した。計測は、サンプリング速度が0.025秒で行った。図-13には、微小加震の加速度波形を示す。

表-5 解析で用いたパラメータ

項目	物性パラメータ	砂層	項目	数値パラメータ	砂層
間隙比	e_0	0.930	硬化パラメータ	B_0	3600
透水係数	k (cm/s)	7.0×10^{-3}	硬化パラメータ	B_1	10
相対密度	D_r (%)	64.9	fading memory	C_d	2000
湿潤密度	ρ_w (g/cm ³)	1.564	ダイレイタンス係数	D_0	4
乾燥密度	ρ_s (g/cm ³)	1.360	ダイレイタンス係数	n	2
圧縮指数		0.0073	基準ひずみ(塑性)	P_r	0.005
膨潤指数		0.0029	基準ひずみ(弾性)	E_r	0.010
粘着力	c' (kN/cm ²)	0			
内部摩擦角	ϕ' (度)	32.208			
せん断波速度	V_s (cm/sec)	137			

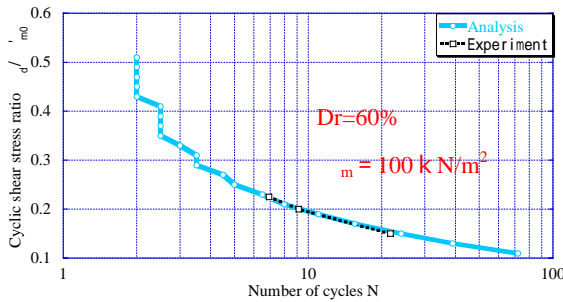


図-11 液状化強度曲線

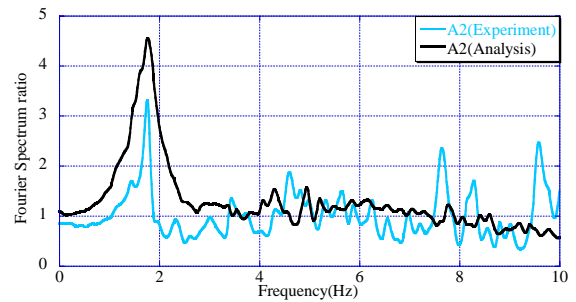


図-12 A2(解析・実験)の固有周波数特性

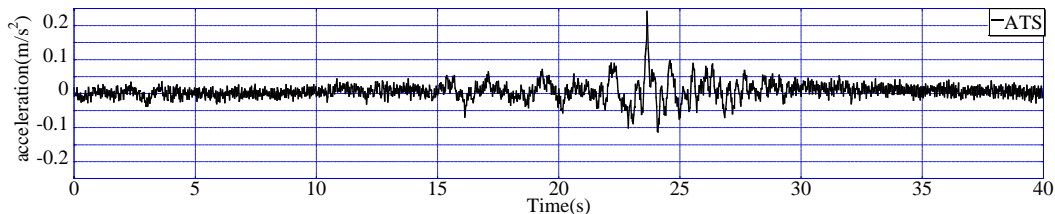


図-13 微小加震の加速度波形

3.3. 解析条件

解析メッシュは、要素数1868、節点数1960で構成される。図-14、15には、本解析で用いるケースA(対策なし)とケースB(排水機能付き矢板)の解析メッシュを示す。材料モデルは、サンドモルタルと構造物では弾性モデルとし、7号珪砂は、繰返し弾塑性モデル⁷⁾とした。杭と矢板は、ビーム材料でモデル化した。動的解析での拘束条件は、地盤底面をx-y固定の剛基盤とした。解析領域の両端には等変位境界を設けた。入力した地震動は、実験時に得られた振動台の加速度波形(図-6)を用いた。

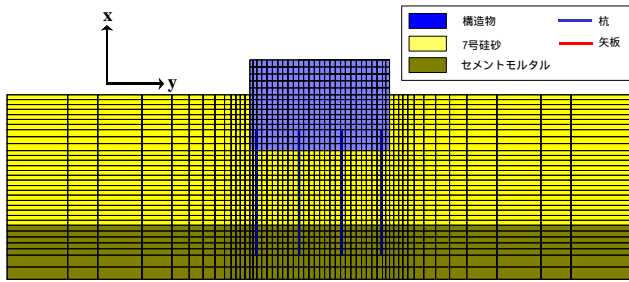


図-14 ケース A の解析対象メッシュ

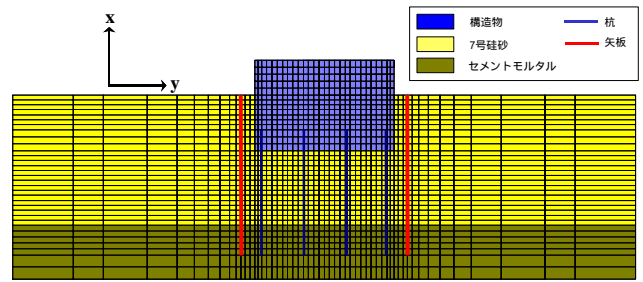
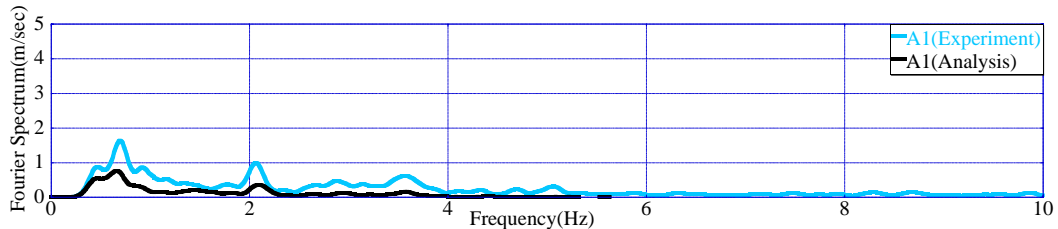


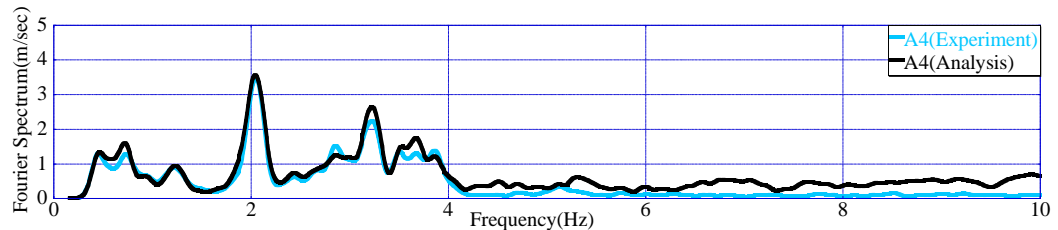
図-15 ケース B の解析対象メッシュ

3.4. フーリエ加速度スペクトルの解析状況

微小加震で調査した、初期状態のフーリエ加速度スペクトル比では、実験と解析ともに 4Hz で大きく増幅していた。図-16 の(a)と(b)には、本加震での A1 と A4(実験：赤線、解析：青線)のフーリエ加速度スペクトルを示す。本加震における実験と解析のフーリエ加速度スペクトルを比較すると、A1 では、実験に比べて小さくなった。これは、解析が液状化に伴う加速度の減衰を、より大きく評価しているものと考えられる。A4 では、高周波成分で値の差はあるものの、ほぼ同じであった。



(a) A1(地表面)



(b) A4(基盤面)

図-16 フーリエ加速度スペクトル

3.5. 過剰間隙水圧比の解析結果

図-17 と図-18 には、A-11 と A-12 の実験と解析の結果を示す。A-11 では、過剰間隙水圧比の上昇過程に差があるものの、液状化発生のタイミングをある程度表現することができた。また、A-12 では液状化発生が解析のほうが早かったが、過剰間隙水圧比が 1.0 に達した以降の過剰間隙水圧比の振動と完全液状化した後の傾向を表現することができた。しかし、液状化過程については、再現しきれていない。

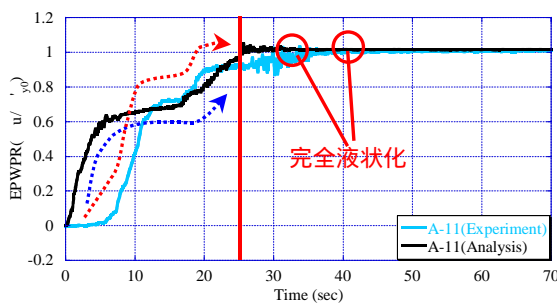


図-17 A-11(実験・解析)の過剰間隙水圧比

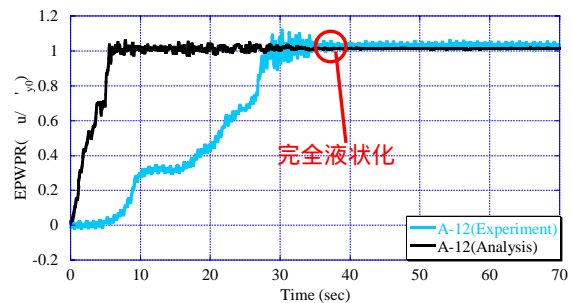


図-18 A-12(実験・解析)の過剰間隙水圧比

3.6. 杭の曲げモーメントの解析状況

図-19 には、解析から求めた杭頭曲げモーメントのピーク値を示す。これによると、実験で確認した対策効果を、解析で再現しきれていない。すなわち、図-9 で示した対策による杭頭曲げモーメントの平均化から、無

対策時の端部の杭頭曲げモーメントを減じる効果を再現できていない。しかし、pile2 と 3 では、ほとんど曲げモーメントが変化しないことを再現している。図-20 には、ケース A とケース B における曲げモーメントの深度分布を示す。この結果によると Pile1、pile2 どちらにおいても、図-10 で示した実験の深度分布の特徴はうまくとらえているものの、対策効果については再現しきれしていない。

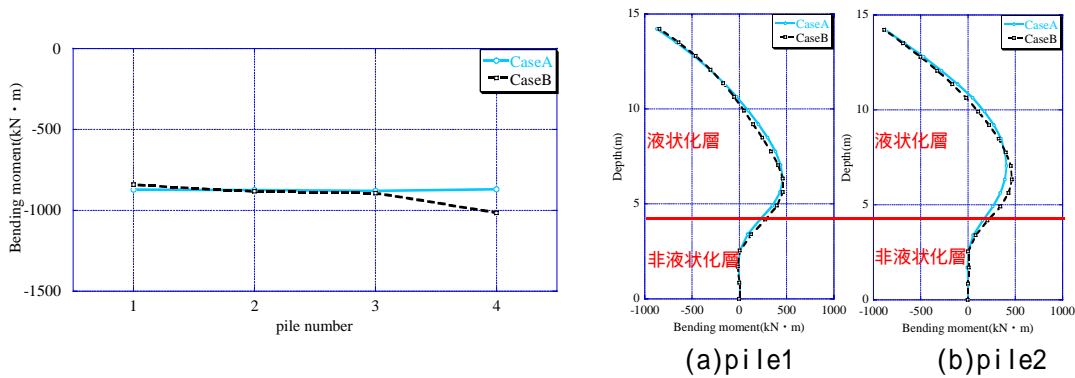


図-19 杭頭曲げモーメントのピーク値(解析) 図-20 曲げモーメントの深度分布(解析)

4. 対策効果の数値シミュレーションにあたっての考察

実験と解析の比較より、対策効果を数値シミュレーションしていく上でのポイントについて考察する。

図-21 の(a)～(d)には、杭頭の曲げモーメント(pile1-1)、加速度(shaking table)、過剰間隙水圧比(A-5・B-5)の時刻歴を示す。それぞれ、(a)は実験でのケース A、(b)は実験でのケース B、(c)は解析でのケース A、(d)は解析でのケース B を示す。

(a)では、過剰間隙水圧比の上昇過程における過剰間隙水圧比の振動によって、地盤の加速度が小さい(加震直後の振動・東海地震動)にもかかわらず、大きな曲げモーメントが発生した。東南海地震動のピーク時点では、地盤が液化化しているため、東海地震動における杭の曲げモーメントのピークに比べて、小さいという結果となっている。

(b)では、過剰間隙水圧比の上昇過程で、矢板の効果によって過剰間隙水圧比の振動が発生しなかった。そのため、加震直後の振動・東海地震動・東南海地震動のピークで、杭頭の曲げモーメントは、(a)と比較して大きくならなかった。

(c)では、加震直後の振動によって地盤が液化化している。また、液化化に至る過程でサイクリックモビリティ(解析では、有効応力経路から過剰間隙水圧比の振動が、サイクリックモビリティであることを確認した)が発生し、加震直後の振動で大きな曲げモーメントが生じている。なお、液化化後に東南海地震動を受けるので、東南海地震における曲げモーメントのピークは、(a)の加震直後の振動のピーク値とほぼ同じくらいであった。

(d)では、矢板の効果によって地震動を受けても液化化に至らなかった。その理由は、排水機能付き矢板の排水性の過大評価より、過剰間隙水圧比が減少し、剛性が回復する傾向にあったものと考えられる。また、過剰間隙水圧比が大きく振動しているのは、矢板と地盤の相互作用により、地盤の全応力が振動するため、過剰間隙水圧比も振動したと考えられる。

(a)～(d)の結果、実験では排水機能付き矢板の効果によって、液化化の進行を遅らせるとともに過剰間隙水圧比の振動を抑制したので、杭に生じる曲げモーメントが小さくなった。解析では、液化化と過剰間隙水圧比の上昇過程をうまく表現できなかった。対策なしの(a)と(c)より、(a)では過剰間隙水圧比の振動が、東海地震動で発生しており、(c)ではサイクリックモビリティが、加震直後の振動で発生していた。そのため、それぞれ別の地震動によって大きな曲げモーメントが発生した。また、排水機能付き矢板の(b)と(d)より、解析では排水性を過大評価してしまい、実験と同じ排水機能のモデル化がうまくできなかった。それらの影響で、対策効果を再現できなかったと考えられる。

今後は、適切な排水機能のモデル化と液化化過程の再現により、実験で得られた対策効果の再現について、さらに検討していきたいと考えている。

ここでの報告は、以下のようにまとめることができる。

- 1) 大規模杭構造物の合理的な対策として、排水機能付き矢板を用いるにあたり、対策効果の確認事例が少ないことから、遠心模型実験と数値シミュレーションの両面より、その効果の確認を試みた。
- 2) 実験の結果によると、排水機能付き矢板の設置により、過剰間隙水圧比の上昇を遅らせること、過剰間隙水圧比の振動抑制、過剰間隙水圧比の早期消散により、杭頭曲げモーメントを減じることと、杭の発生曲

げモーメントに対する平均化効果があることを確認した。

- 3) 解析結果によると、排水機能のモデル化や、過剰間隙水圧比の上昇過程、矢板による杭頭曲げモーメントの抑制という点で、実験結果を再現しきれていない。

今後は、上記の観点で検討を進め、実験結果を再現して対策効果の確認を行うとともに、当該解析を用いたパラメトリックスタディにより、合理的な液状化対策の設計方法を提案していきたいと考えている。

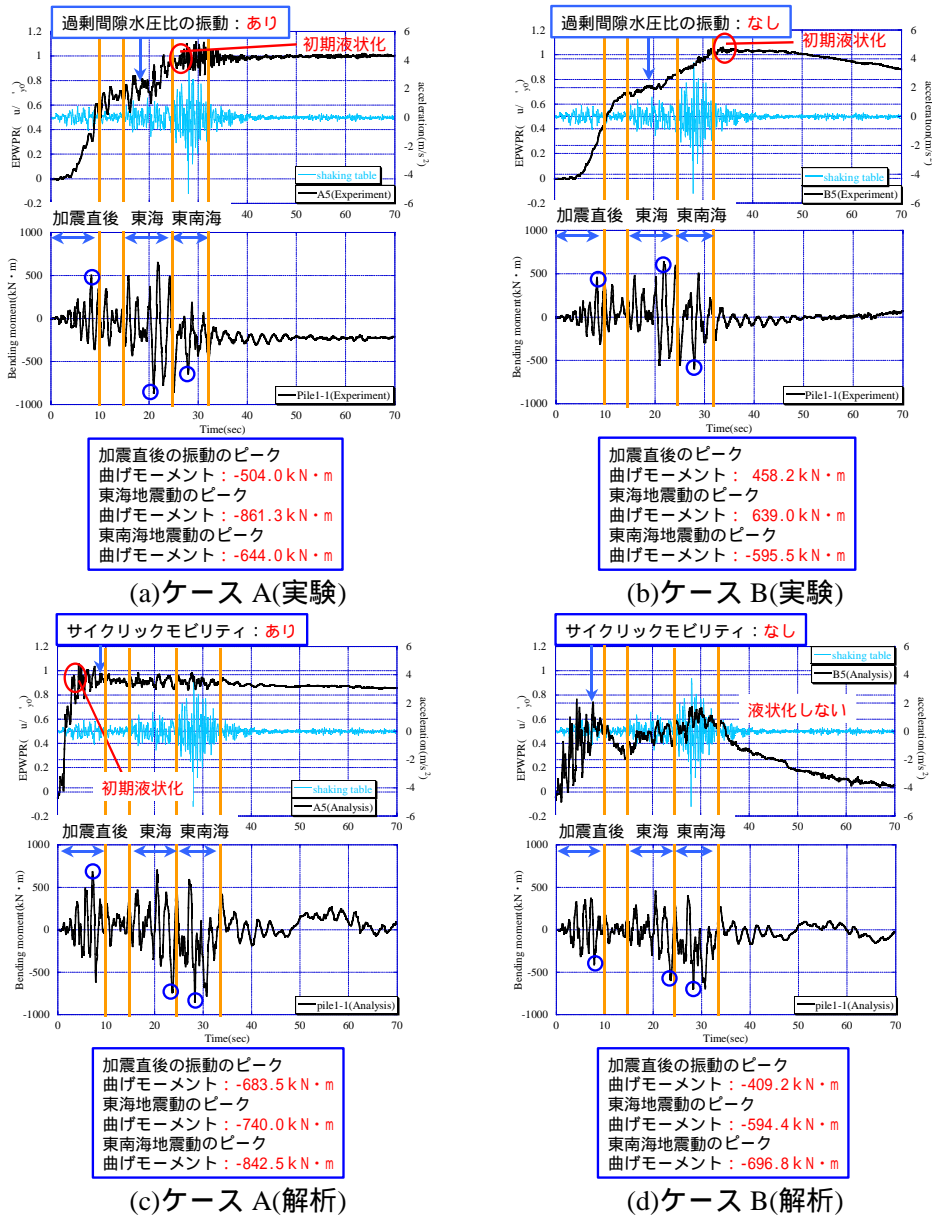


図-21 実験結果と解析結果の比較

参考文献

- 1) 財団法人国土技術研究センター - :木曾三川下流部河川堤防、水門・樋門耐震性評価手法ガイドライン、2006.
- 2) 大林組遠心模型実験グループ：遠心模型実験装置の活用事例、大林組技術研究所報、No.66、pp.121-124、2003.
- 3) 佐藤清、松田隆：護岸背後地盤の側方流動と埋設管に関する遠心模型振動実験、大林組技術研究所報、No.63、pp.33-40、2001.
- 4) 高橋真一、森拓雄、鳥井原誠：軟弱地盤上線状構造物の不同沈下予測法に関する研究、大林組技術研究所報、No.66、pp.71-76、2003.
- 5) 三喜産業株式会社：<http://www.mikisangyou.co.jp/jp/lob/ecoBU/gtfi/index.html>
- 6) 杉戸真太、合田尚義、増田民夫：周波数依存性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察、土木学会論文集、No.493/II-27、pp.49-58、1994.
- 7) 液状化解析手法 LIQCA 開発グループ：LIQCA2007 (2007年公開版) 資料、2007.