

3.3.11 E - ディフェンスによる実大土槽振動実験計画

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14年度業務目的

(2) 平成14年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
 - 1) 実験計画グループ1
 - 2) 実験計画グループ2
 - 3) 実験計画グループ3
- (c) 業務の成果
 - 1) 実験計画グループ1の検討結果
 - 2) 実験計画グループ2の検討結果
 - 3) 実験計画グループ3の検討結果
- (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

(3) 平成15年度業務計画案

- (a) 業務計画
- (b) 実施方法
- (c) 目標とする成果

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 E - ディフェンスによる実大土槽振動実験計画

(b) 担当者

所 属	役 職	氏 名
独立行政法人防災科学技術研究所 特定プロジェクトセンター 実大三次元震動破壊実験施設利用プロジェクト	プロジェクトリーダー	佐藤 正義
独立行政法人 農業工学研究所	室長	毛利 栄征
鹿島建設(株)技術研究所	主管研究員	八幡 夏恵子
㈱竹中工務店 技術研究所 先端研究開発部	主任研究員	鬼丸 貞友
大成建設(株)技術センター 建築技術研究所	室長	真島正人
東京電機大学 理工学部	教授	安田 進
東京大学大学院 工学系研究科	教授	東畑 郁生
東京工業大学	教授	時松 孝次
信州大学	助教授	田村 修次

(c) 業務の目的

平成 17 年度から E - ディフェンスが稼働するが、最初の 5 年程度の間どのような実験から初めて、どのような実験研究の成果を挙げて行くかを検討する必要がある。E - ディフェンスを使用した実大土槽振動実験を中心にした研究を行うため、ワーキンググループ(WG)を結成して実験を中心とした研究計画を作成する。E - ディフェンスによる実大土槽振動実験は、現状の地盤地震工学において大きな課題となっているもの対象とする。具体的には、護岸の側方流動実験と水平地盤中の杭基礎実験の 2 タイプの実験計画を作成する。

(d) 3 カ年の年次実施計画

1) 平成 14 年度：

E - ディフェンスによる実大土槽振動実験に向けてワーキンググループ(WG)を結成して、護岸の側方流動実験と水平地盤中の杭基礎実験の 2 タイプの概略の実験計画を作成する。

2) 平成 15 年度：

E - ディフェンスによる実大土槽振動実験に向けて結成されたWGにおいて、H14年度に実施した中小規模振動実験の結果と数値解析をふまえ、さらにH14年度に作成した概略の護岸の側方流動実験と水平地盤中の杭基礎実験の 2 タイプの概略の実験計画をブラッシュアップする。

3) 平成 16 年度：

E - ディフェンスによる実大土槽振動実験に向けて結成されたWGにおいて、H14年度とH15年度に実施した中小規模振動実験の結果と数値解析をふまえ、さらにH14年度とH15年度に作成した概略の護岸の側方流動実験と水平地盤中の杭基礎実験の 2 タイプの概略の実験計画を見直

しH17年度から実施するE - ディフェンスでの実験が可能な実施計画とする。

(e) 平成14年度業務目的

今年度は、E - ディフェンスを使用した実大土槽振動実験を中心にした研究を行うため、ワーキンググループ(WG)を結成して実験計画を作成し、E - ディフェンスによる実大土槽振動実験として、護岸の側方流動実験と水平地盤中の杭基礎実験の2タイプの概略実験計画を作成する。

(2) 平成14年度の成果

水平地盤中の杭基礎実験計画作成グループ(2チーム)と護岸の側方流動実験グループ(1チーム)により、それぞれ概略計画書を作成した。

(a) 業務の要約

平成14年度は次の各項目を実施した。

- 1) ワーキンググループ(WG)を結成した。
- 2) WGの活動として、水平地盤中の杭基礎実験計画作成グループ(2チーム)と護岸の側方流動実験グループ(1チーム)により、それぞれ計画を作成しWGを開催して討論した。

(b) 業務の実施方法

WGでの協議により、下記のメンバーとテーマにわけて実験計画を作成することにした。

- 1) 実験計画グループ1として「地盤 - 杭基礎 - 構造物の三次元振動実験 実験計画(その1)」をまとめた。

メンバー：鹿島建設 八幡夏恵子、竹中工務店 鬼丸貞友、農工研 毛利栄征

- 2) 実験計画グループ2として「地盤 - 杭基礎 - 構造物の三次元振動実験 実験計画(その2)」をまとめた。

メンバー：信州大 田村修次、東工大 時松孝次、大成建設 真島正人

- 3) 実験計画グループ3として「側方流動の実験計画」をまとめた。

メンバー：地盤工学会研究グループ

(c) 業務の成果

WGによる検討結果として、3つのグループにより以後に示す実験計画を作成した。

- 1) 実験計画グループ1の検討結果

地盤 - 杭基礎 - 構造物の三次元振動実験 実験計画 (その1)

- a) 実大3元震動台の実験研究計画時の方針

目的は将来発生であろう大地震時における杭支持構造物の耐震性能を高い水準で評価できる手法を確立する事である。3元震動台の特徴を反映した実験研究計画とする。

兵庫県南部地震の液状化地域の杭被害概要が明らかにされ、被害解明を目的として実験的・解析的研究が意欲的に実施されてきている。これ等の研究活動を通じ、被害再現技術は目覚ましい発展を遂げたといえるが、ハード・ソフトの制限のために大地震の基礎

構造物の被害再現技術は高度化されていない。

大地震の地中構造物の被害情報が急速に蓄積されたので、基礎研究から被害再現までの研究状況の展開も急速であったと言える。従って中間的な研究面の充実が必要な部分も少なくないので、実大3元震動台を利用して重要な基礎研究を取り入れた研究計画を考える。

計画を具体化するために、既往研究の成果概要を把握し、問題点を抽出し、はじめに合理的なフローを作成する。

本研究の目的は被害再現技術を高度化し、信頼性・汎用性の高い評価・予測手法を確立する事であり、次のような研究概要を考える。

- 既往研究成果の把握
- 大地震時の杭基礎構造物の被害再現の研究フローの作成
- 3元震動台の利点を活用した実験研究の特徴

実大実験 相似則の制限小

3方向又は6自由度の大型震動台

大きい入力振幅

パラメトリックスタディが可能

2次元・3次元土槽の利用可能

再現性が高い

- 解析再現技術の高度化 実験結果との照査
- 研究成果を耐震研究の新分野の課題に展開・活用
- 地震動の入力評価技術と基礎構造物の被害低減技術との相互補完研究

研究のフェーズを実大の被害再現実験研究とその基礎的研究の大別して考える。既往の被害を再現できる実験・解析技術を高度化・汎用化を直近の目的とし、その成果を未着手の新しい課題の解決に活用してゆく構成になる。

b) 研究の全体構成

被害低減のための実験研究の構成を図1に示す。

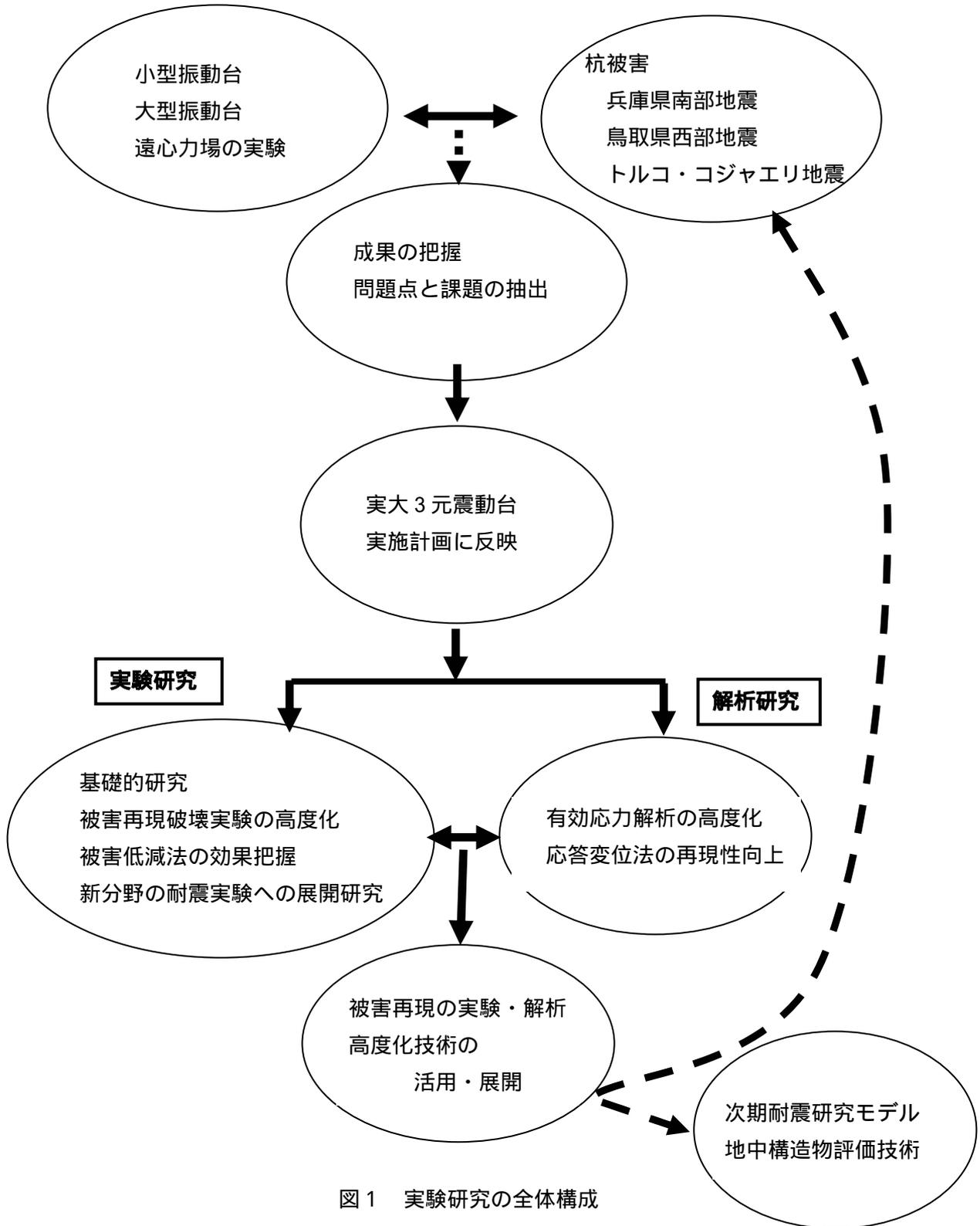


図1 実験研究の全体構成

c) 研究計画

検討結果としてまとめた研究計画を図2～5に示す。

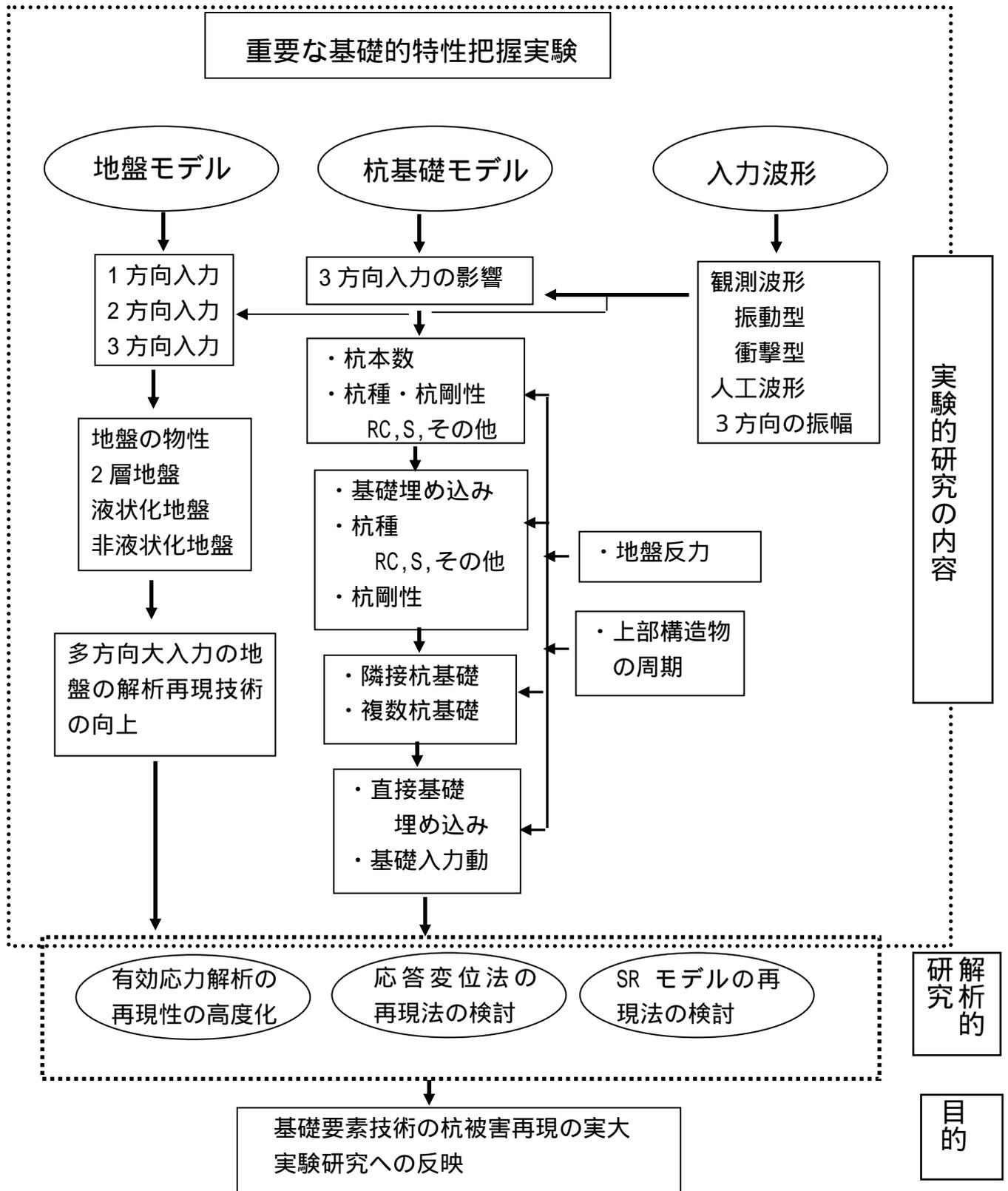


図2 研究計画1 (基礎的実験概要)

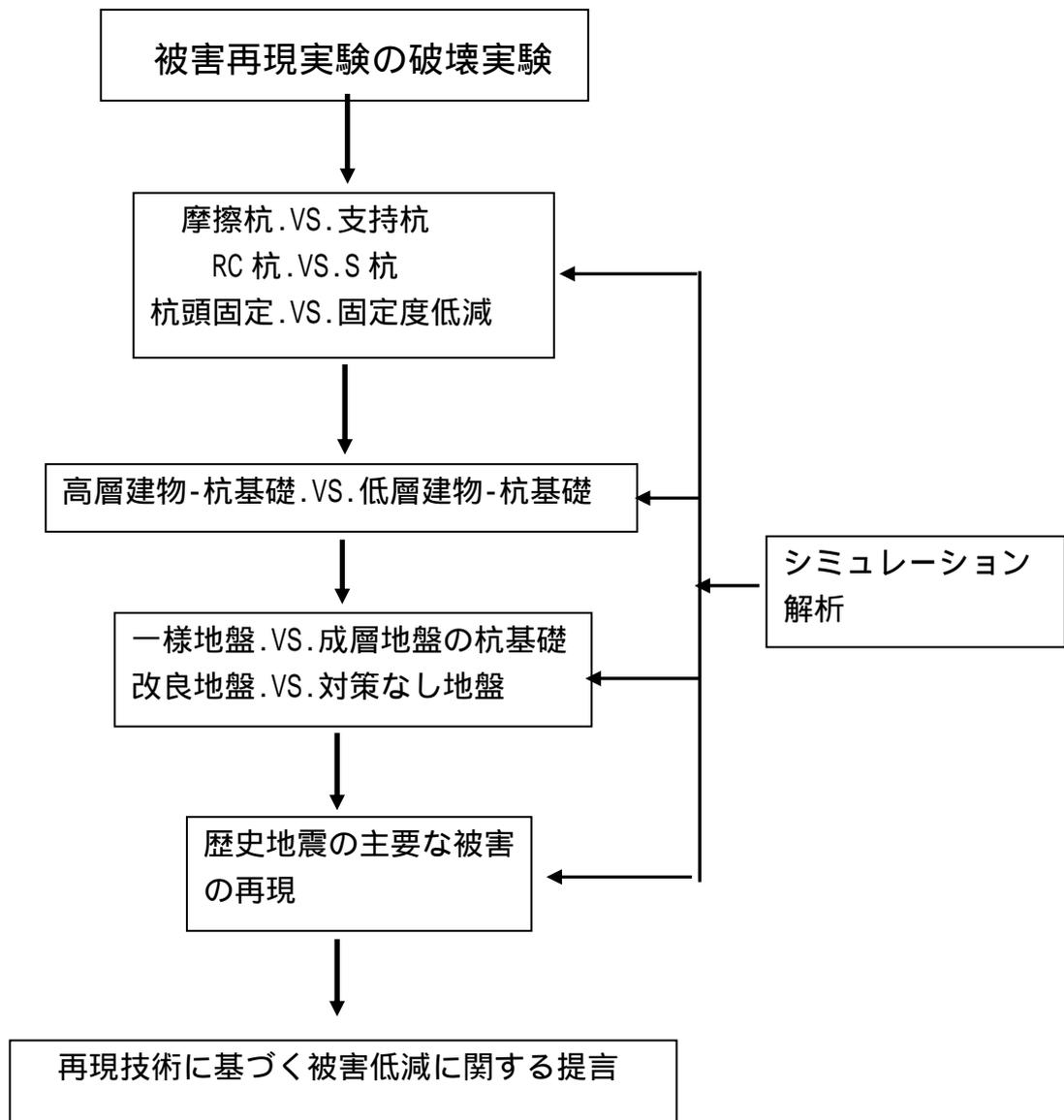


図3 研究計画2（被害再現実験概要）

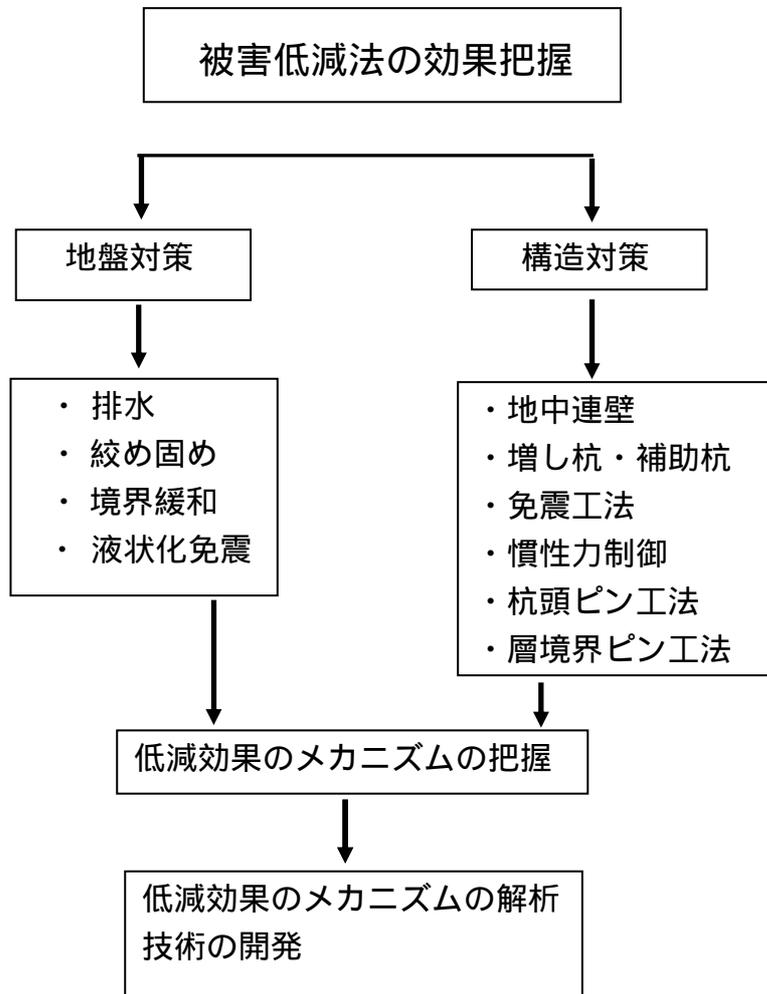


図4 研究計画3(被害低減工法の実験概要)

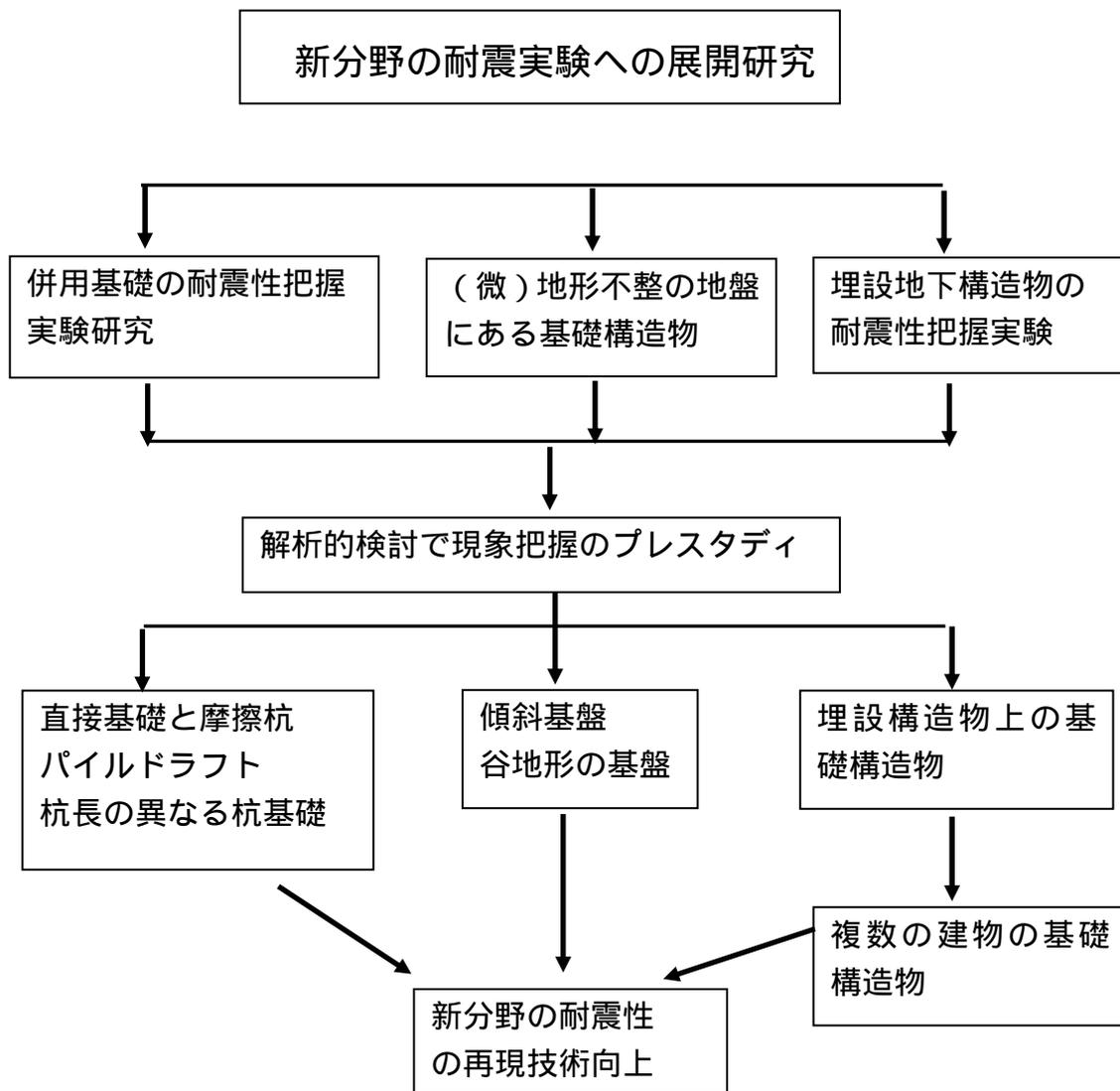


図5 研究計画4(新分野の実験概要)

d) 実験研究計画の内容 (図1, 図2 参照)

重要な基礎的特性把握

2方向、3方向の入力時の地盤、杭、入力波形については実験データ例が少ないので図2に示した内容の基礎的特性を把握する必要がある。

実験的研究

地盤： 2方向、3方向時の地盤物性（相対密度、液状化強度）の影響
地盤の層序の影響

杭基礎モデル：液状化地盤・杭の特性把握の研究は線形の地盤・(杭)基礎の相互作用研究の実施内容に比較すれば、現状では非常に少ないので図2に示した重要な基本的特性について把握し、破壊実験に反映する。

図2に示したように検討すべき項目が多いので、相互作用特性の評価に関しては優先順序を考えて行っていく。本数、埋め込み、隣接モデルになるであろう。いずれのモデルの場合についても地盤反力を求め相互作用における外力特性を明らかにする。

2方向入力、3方向入力における杭応力に対する慣性力の影響を地盤反力を求め時刻歴の外力を評価する。

入力波形： 強非線形・液状化地盤では簡潔な地盤の評価手法の確立が最重要事項であり、図2に示した内容であるが、水平2方向入力時におけるX,Y方向の振幅と地盤の応答変位・杭の応答との相関性は議論されていないので、採用した。

解析的研究

有効応力解析：2方向、3方向入力の地盤応答の再現性を向上させる。相互作用実験では杭・基礎と周辺地盤の応答の再現性を向上させる手法を検討する。解析データを補間できるように高度化する。コンピュータ環境が急速に進捗している現状から、自由度の高いFEMモデルは汎用の手法になっていくので高度化と汎用化の整備開発を行う。解析から杭への外力を逐次評価する。

有効応力解析ではFEMの一体モデルを主とするが、分離モデルも対象に考える。

応答変位法：信頼性の高い杭基礎の応答変位法の提示が本研究の目的の一つであり、液状化地盤 - 杭の再現性を向上する方法を検討する。
実験で求めた知見を反映した精度のある手法を検討する。

S Rモデル：モデルの適用性は制限されると考えるが、メカニズムの再現手法として利点があるので、対象モデルとする。

被害再現の破壊実験の高度化（図1，図3参照）

被害再現の破壊実験の目的は液状化地盤における杭基礎構造物の破壊過程の把握である。兵庫県南部地震の杭被害調査で明らかにされた現象を実大3元震動台実験で再現する事が有効性の高い方法である。現在までに得られた知見を反映して、図3に示した内容を考えた。

異なる2つのモデル実験の比較をする計画は甚大な被害と軽微な被害の対比が得られ、被害過程をより理解できる。

破壊実験の着目点は

- ・破壊までの地盤反力評価
- ・破壊と入力波形の関係
- ・破壊と杭頭条件の関係
- ・地盤層序の関係
- ・慣性力の影響と軸力変動の影響

1方向、2方向、3方向入力の場合について着目点を把握する。

異なる杭基礎の破壊実験

摩擦杭.VS.支持杭：

被害に優位な差が存在する可能性が高い。

RC杭.VS.S杭：

破壊過程の差が顕著であり、地盤反力はS杭で評価できる。

杭頭固定.VS.固定度低減

両者の利点と弱点が明らかになる。

異なる建物の杭基礎の破壊実験

高層建物-杭基礎.VS.低層建物-杭基礎：

埋め立て地域の高層建物の被害は軽微であったので、杭被害調査は実施されなかった。甚大な被害の生じた低層建物のいくつかは被害調査が実施された。

2つの被害再現実験より、情報の少ない高層建物の地中構造の健全性を評価できる。

高層と低層では軸力変動が大きく異なるので、破壊に与える影響直接評価できる。

異なる地盤の杭基礎の破壊実験

改良地盤.VS.対策なし地盤：

改良工法の有効性が認められているが、有効性のメカニズムは不明であり、今後の被害低減方法の採否に有効な情報となる。

歴史地震の主要な被害の再現

県南部地震の杭基礎被害の貴重な情報は充実しているが、関東大震災、新潟地震の被害再現例は非常に少ない。被害再現手法を歴史地震について行う事は検証実験として有効性が高いと考える。

シミュレーション解析

の研究で高度化した解析手法により実大破壊実験をシミュレーションし解析的再現手法を確立する。

被害低減法・補強法の効果の検討（図1，図4参照）

実大3元震動台活用研究の主要目的は被害を低減し、耐震性の高い基礎構造物の実現である。被害低減法は建設予定の構造物と既存構造物の場合があるが、対策法の効果の技術的観点からすれば同じように考えてよい。

被害低減を具体化する工法の効果を把握するための研究概要を図4に示した。地盤対策と構造対策に大別できる。

両者は既往の技術であるが大地震の液状化地盤の対策工法としての効果は未知の部分が多い。

被害再現の高度化技術により対策工法の有効性を明らかにする実験研究は被害低減の近道になるので重要である。

ここでは工法の詳細を具体化するのではなく、工法に共通する特性に着目して実大3元震動台実験を実施し効果のメカニズムを明らかにする事である。

地盤対策効果

地盤対策工法の例を図4に示したが、全面的固化工法の有効性は非常に高いのでここでは対象としない。

水圧低減の排水工法、締め固め工法は一般的に採用されているので、液状化地盤対策の定量的な評価を行い、適用範囲を明らかにする。

液状化地盤は入力低減効果があるので、免震工法の性質を有する。この性質を効果的に活用する地盤モデルを考え、定量的に評価する。

構造対策効果

構造対策方法は範囲が広いので、現在注目されているモデル又は重要度が高いモデルを対象とした。

対策効果が顕著に期待できるデバイスを使用する工法が今後発展すると考えられる。基礎構造のデバイス利用の対策工法の実績も少なく、大地震時の効果の検証実験は殆どないのが現状であり、被害低減に直結する対策の効果把握する。

図4の中の慣性力制御、層境界ピン工法は具体例がないが、今後発展する分野と推定されるので採用した。

構造補強の対策の中では、地中連壁工法は効果的と考えられているが、大きい剛性による増幅効果もある。使用実績もあるが、液状化時の特性はまだ不明な点も多いので対象とする。

構造補強の対策の増し杭は既存構造物に対しては有力な方法であり、異種杭の組み合わせ基礎構造でもある。大地震の補強効果を定量的に評価する事が重要であり、対象とした。

低減効果のメカニズムの解析技術の開発

従来の有効応力解析コードにデバイス（制御システム、免震）の非線形のメカニズムを一部組み込む必要があり、適用例も少ない。構造対策を再現できるコードに改良し、その再現性と有効性を向上させる。

新分野の耐震実験への展開研究（図1，図5参照）

新しい分野の基礎構造物の耐震性の問題を図5に示した。

基盤不整の基礎構造物の被害例は少なくない。しかし実験研究は土槽寸法の制限から実施例は殆んどないが、重要性は高い。

また、性能規定型になり、併用基礎構造の採用が増加していく状況にある。その他、都市の再開発では複数の大型の建物を支持する基礎構造物が建設される。大都市に地下にはインフラ関係の埋設物があり、その上に建物が存在している。これ等の問題の耐震性を検討するために振動台実験研究を考える。

この分野では、既往研究が散見される程度なのでプレスタディを解析で行い、主要な現象を把握しておく事が必要である。

併用基礎の耐震性実験研究

図5に主なモデルの例題を示した。

モデルによっては現象把握を行うためには、実験に使用する土槽は矩形の大きい方がよい。

（微）地形不整の地盤と基礎構造物の関係

地形不整は大きい寸法であれば、地震動にも密接に関係するが、ここでは基礎構造の支持基盤と周辺地盤の微地形効果とする。

不整の形状は山地形、谷地形、斜面があり、地表の場合と支持地盤の場合がある。

この内傾斜基盤、谷地形の基盤の場合に基礎構造は大きな影響を受けると考えられる。

地形の効果は2次元と3次元の場合があるので、矩形の大きい2次元タイプの土槽を用いた振動台実験をはじめに行なった方が良好であろう。

埋設地下構造物の耐震性把握実験

都市にはインフラ関係の埋設構造物が多い。その上地盤に基礎構造物が設置される場合もある。埋設構造物の耐震性も不明であるが、地中に埋設物があれば、大地震時には基礎構造物の入力波形は大きな影響を受ける。この影響を実験で把握し、今後の方針の資料とする。

又、大型ターミナル構造物では複数の建物を大型基礎で支持している。建物群を支持する基礎の地震時の問題は検討されていないが、重要な問題と考える。

解析研究の内容（図1参照）

解析的研究の目的は被害再現技術の高度化である。

解析法はF E Mの有効応力解析コードを主とする。現在、解析コードは再現性に関してある程度のレベルに達しているが、実大3次元震動台実験でキャリブレーションを行い、予測手法としての有効なツールを目指す。

実験研究の ~ の各ステップで再現性の向上を行うので、広い範囲の問題に適用可能になる。又、3次元解析を実施する事で、耐震解析の既往レベルを向上できる。

は新分野であり、解析機能を追加して解析システムに改良する必要がある。

液状化地盤 杭基礎の相互作用解析を迅速化し、必要な情報を容易に入手できるように解析環境を整備する。

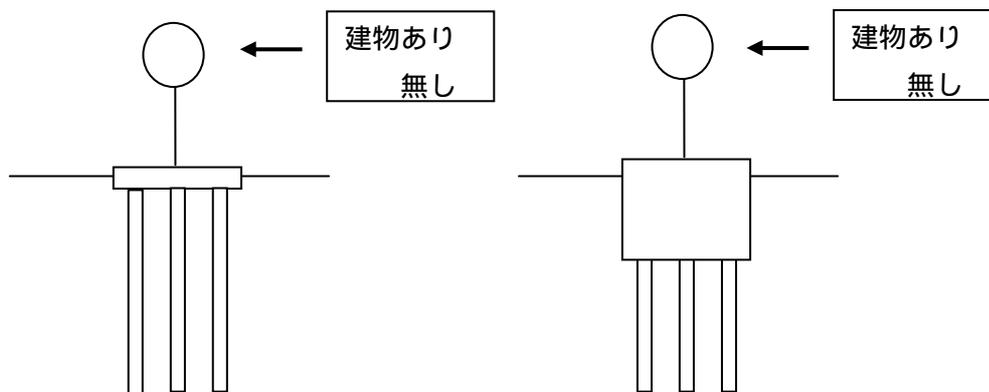
本研究の主要な目的の一つの応答変位法の高度化との整合を図り、実証データ、有効応力解析、応答変位法の3者の相互関係に矛盾が生じないようにする。

e) 実験モデルとその効果の把握

a) ~ d)までに中期的な計画概要を述べたので、ここでは具体的なモデルと考察対象を説明する。

() 基礎的特性把握について

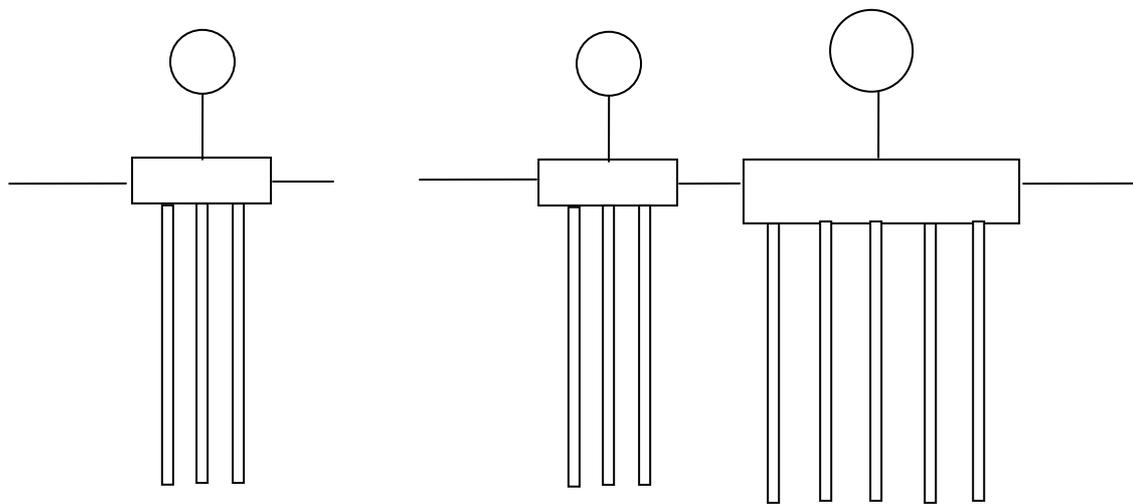
埋め込み基礎深さの影響



- 杭頭の応力
- 杭の最大モーメント位置
- 建物慣性力 埋め込み基礎の慣性力 杭応力の関係
- 水圧上昇 埋め込み深さ 杭に作用する外力の関係
- 杭の軸力変動

図6 埋め込み基礎モデル

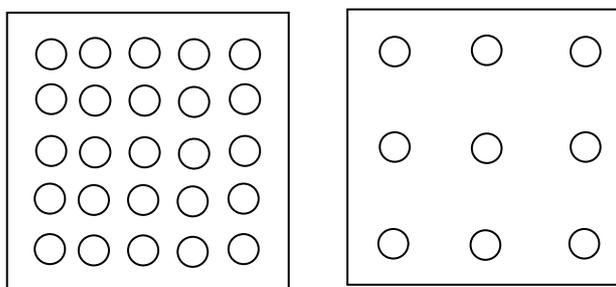
隣接杭基礎の影響



単独杭基礎と隣接基礎の相違
 杭応力、杭の外力
 基礎の応答変位
 近傍地盤の応答

図7 隣接基礎モデル

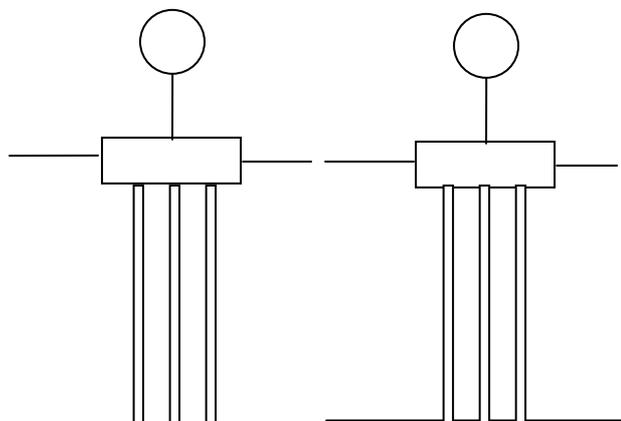
群杭基礎の特性



群杭係数の評価
 水圧消散時に起振機で正弦波加振をする
 杭位置の慣性力分担率
 水圧消散時に振動台の微小加振をする
 杭頭せん断力から分担率
 SRモデルでの評価方法
 応答変位法での評価方法

図8 群杭基礎モデル

杭・地盤の相互作用の柔性係数と地盤反力の関係



RC 杭、S 杭による地盤反力評価
RC 杭、S 杭の履歴特性と終局強度の把握
高い靱性材料（アクリル他）の杭による
完全液状化状態近傍の地盤反力の捕捉
支持杭と摩擦杭の応力分布

図9 地盤 - 杭柔性係数と地盤反力評価のモデル

() 被害再現破壊実験について

被害再現モデル案1

摩擦杭と支持杭、RC 杭と S 杭、一様地盤と成層地盤の比較は () に含まれるので、再現実験モデルでは次のようなパラメータを採用したモデルを考える。地盤は、ポートアイランドを参考に一般的な液状化の層序とする。

- 杭頭固定度
- 軸力変動（高層建物、低層建物）
- 地盤対策効果

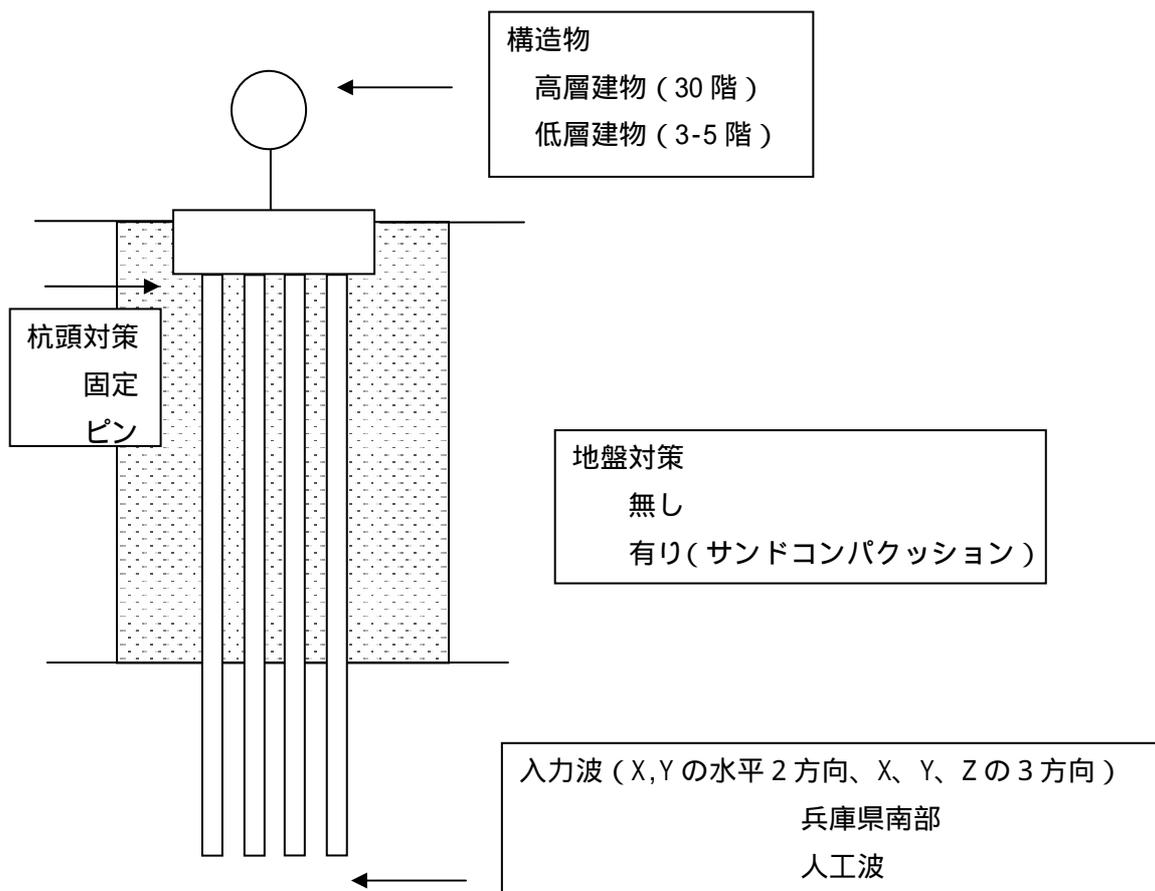


図 10 被害再現モデル 1

被害再現の具体的モデル案 2

建物のライフサイクルを想定したより現実的な杭基礎の地震時耐力

臨海部(東京)に建つ典型的な建物を想定し、サイト位置を仮定して、断層モデル等から算定されるサイトに到来する地震波を計算する。小地震、中地震、大地震、余震をその発生頻度に応じて入力し、杭基礎の耐力の変化を実験的に検討する。

- 臨海部(砂地盤)の中層(高層)建物を想定、建物モデルは3質点(以上)程度
- 入力は断層モデル等から計算した想定サイトの地震動(3成分)
- 5×5本杭程度のRC模型杭

被害再現の具体的モデル案 3

軸力変動が大きい杭基礎の地震時耐力

中層マンション(10階程度)は壁方向に関しては1スパンの建物となり、転倒モーメントに対し、押し込み側と引抜き側各1本の杭で支持するような場合が見られる。場所打ちコンクリート杭では軸力によって杭の非線形特性は大きく変化することから、このような杭基礎が大地震時(液状化地盤)に対してどのような耐力を有するかを実験的に検

証する。

- 中層マンション(10階程度)を想定、建物模型は3質点(以上)程度とし転倒モーメントが大きくなるように設定
- 2×(4)本杭程度のRC模型杭
- 設計用地震波を想定した地震動(2成分)

歴史地震の被害の再現モデル案4

関東地震の軟弱地盤地域の被害の再現又は新潟地震の川岸町アパート近くの杭基礎のモデルを選ぶ。実験研究の利点は現象の再現性なので、現在までの問題点を把握する必要がある。焦点の絞込みと入力波の作成を解決しなければならない。

() 被害低減法について

低減法は一部(基礎構造の断面変更)を除いて殆どが対策工法なので、メカニズムの把握と効果を定量的に評価する事が目的である。

地盤対策のモデル案

排水効果、締め固め効果の実験は()の実験モデルに採用できるので、ここで図は省略する。

液状化地盤免震は液状化地盤と固化工法の組み合わせであり、その図を示した。

全面改良と組み合わせ形式で下記の項目を比較する。

- ・地盤変位
- ・地表加速度
- ・建物加速度
- ・杭の応力分布
- ・地盤反力係数

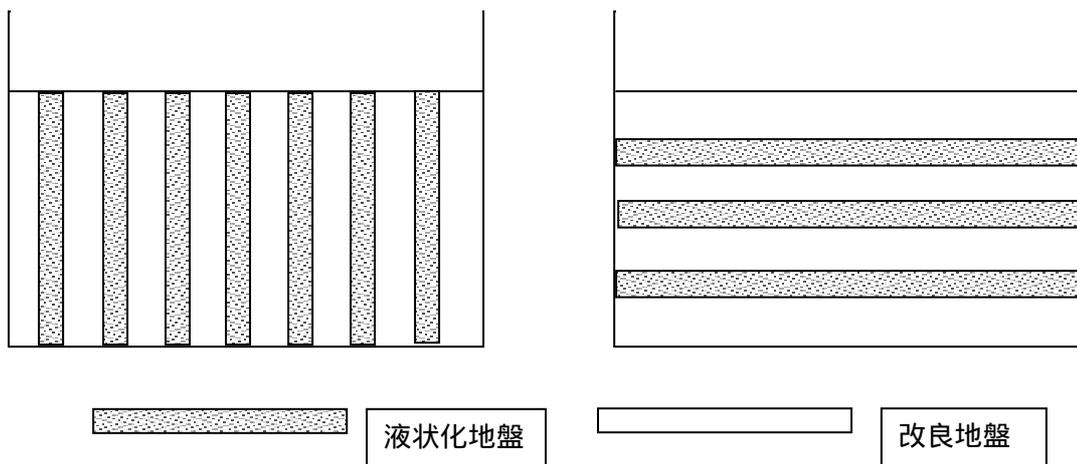
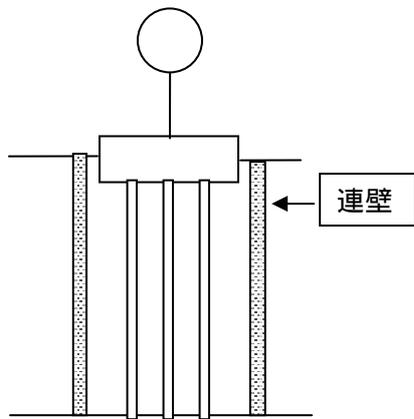


図 11 液状化地盤免震モデル

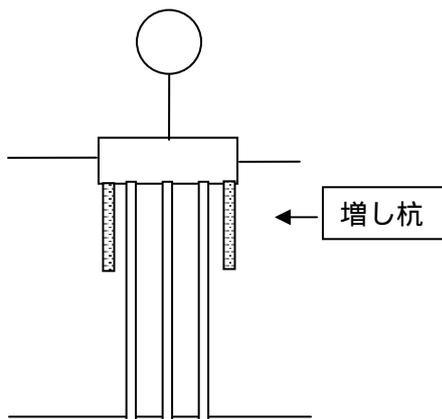
構造対策のモデル案 1



- ・地盤変位
- ・地表加速度
- ・建物加速度
- ・杭の応力分布
- ・地盤反力係数

図 12 連壁モデル

構造対策のモデル案 2



- ・建物加速度
- ・杭の応力分布
- ・地盤反力係数

図 13 増し杭モデル

構造対策のモデル案 3

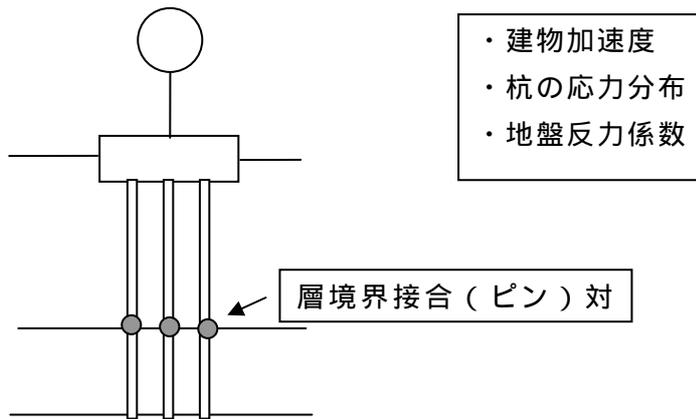


図 14 免震要素対

構造対策のモデル案 4

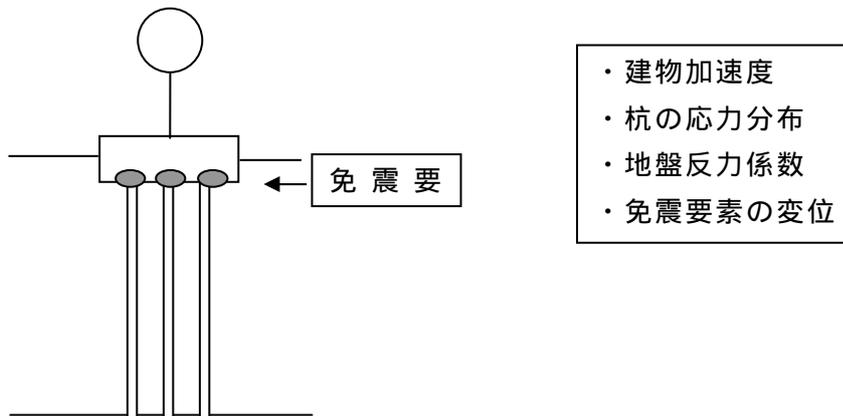


図 15 免震要素対

構造対策のモデル案 5

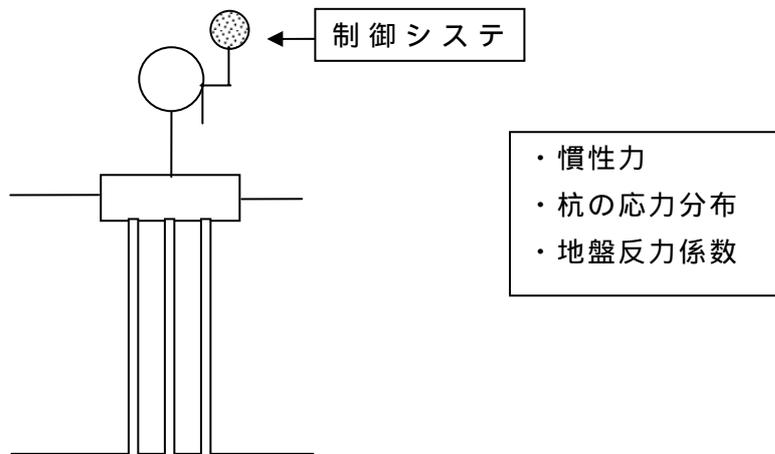


図 16 慣性力制御対策

() 新分野の耐震実験への展開研究

併用基礎のモデル案 1

直接基礎と摩擦杭の組み合わせは汎用的なモデルである。併用基礎では異なるタイプの接合なので、両者の応答が整合する必要がある。又、単独基礎構造に比較して、大きなデメリットが生じない事を確かめる事が目的である。

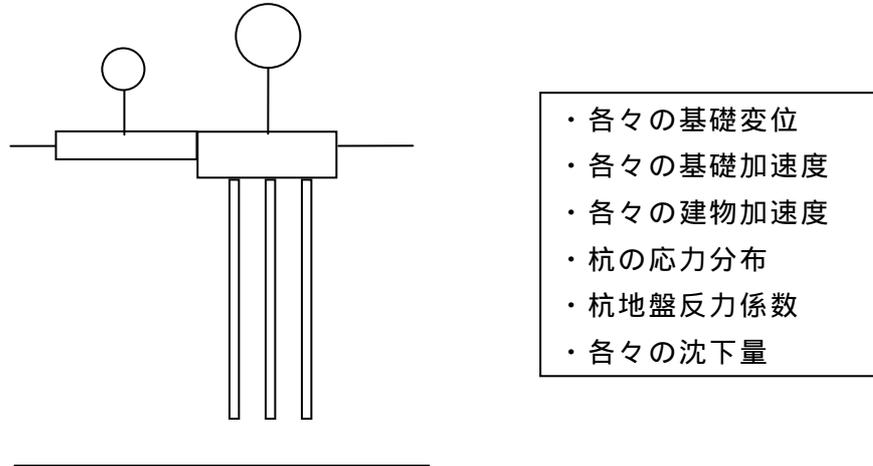


図 17 直接基礎と摩擦杭

併用基礎のモデル案 2

杭長の異なる基礎も汎用的なモデルである。支持基盤の深度が異なる場合に杭長が異なる杭基礎になる。このモデルは複雑な現象が多く含まれる重要性の高いモデルである。矩形の2次元的大型土槽と3次元土槽を用いた実験を順次実施するのが望ましい。

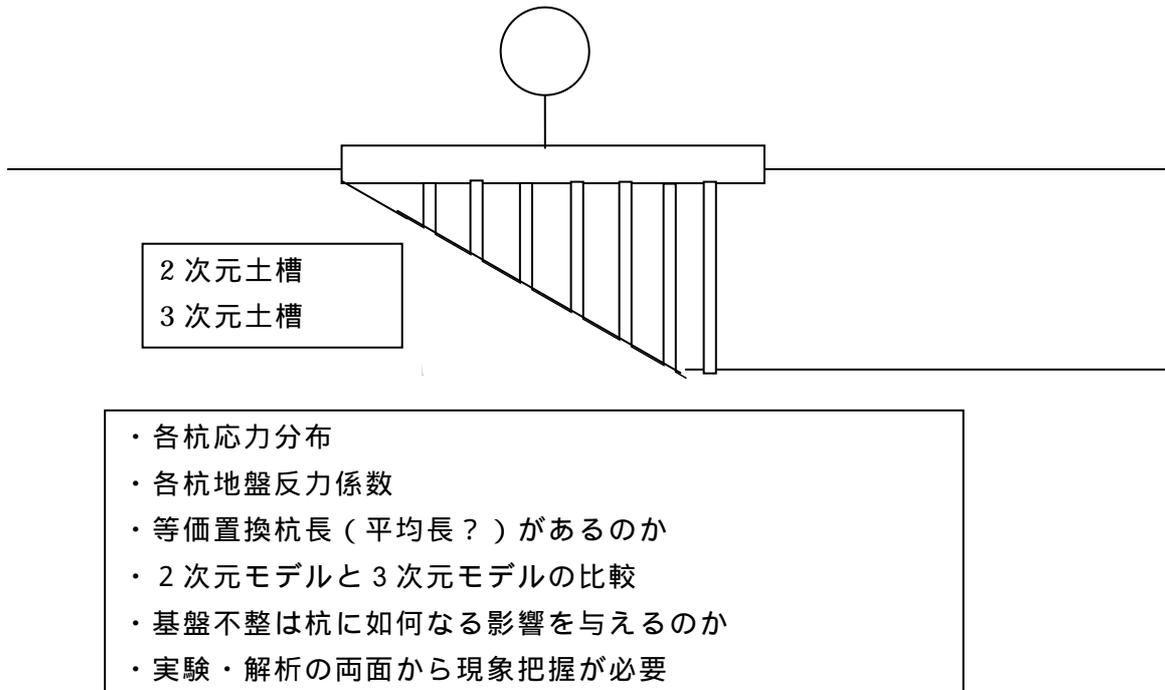


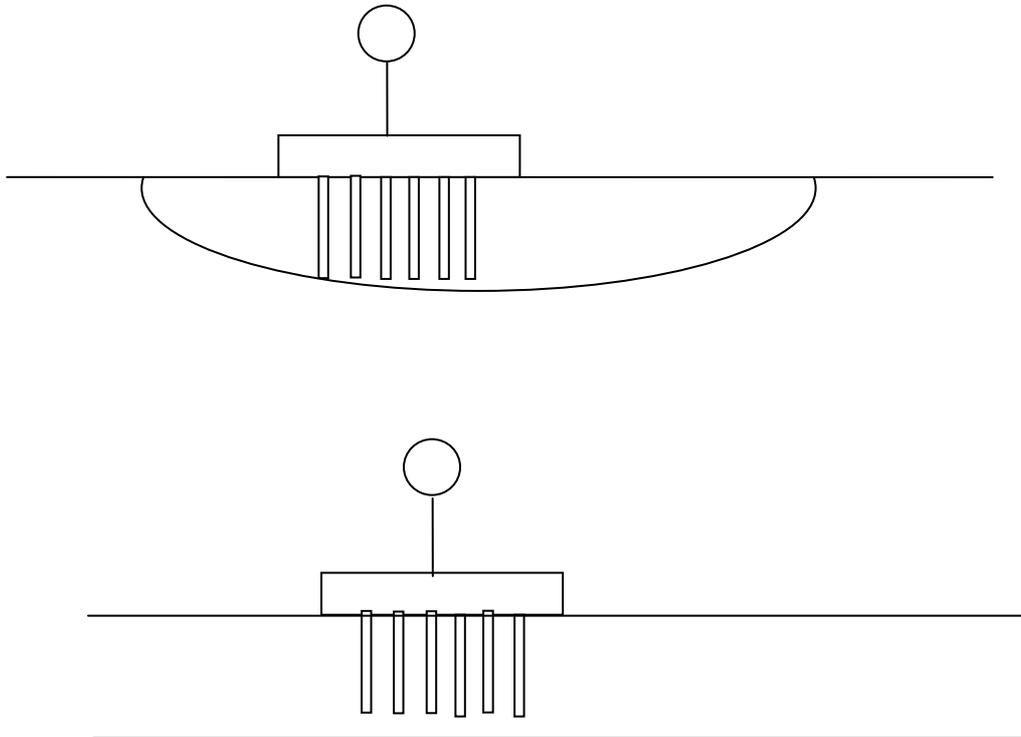
図 18 杭長の異なる基礎

地形不整の地盤にある基礎構造物のモデル案 3

上記の のモデルは併用基礎モデル案としたが、地形不整モデルでもある。

ここでは、支持基盤が谷地形の場合のモデルを考えたが、谷の境界近くでは地盤の応答が攪乱するので、杭基礎にその影響が及ぶと考えられる。

比較的多い事例なので、対象モデルに採用した。平行成層の結果と比較すると、谷地形の境界の影響が把握できる。

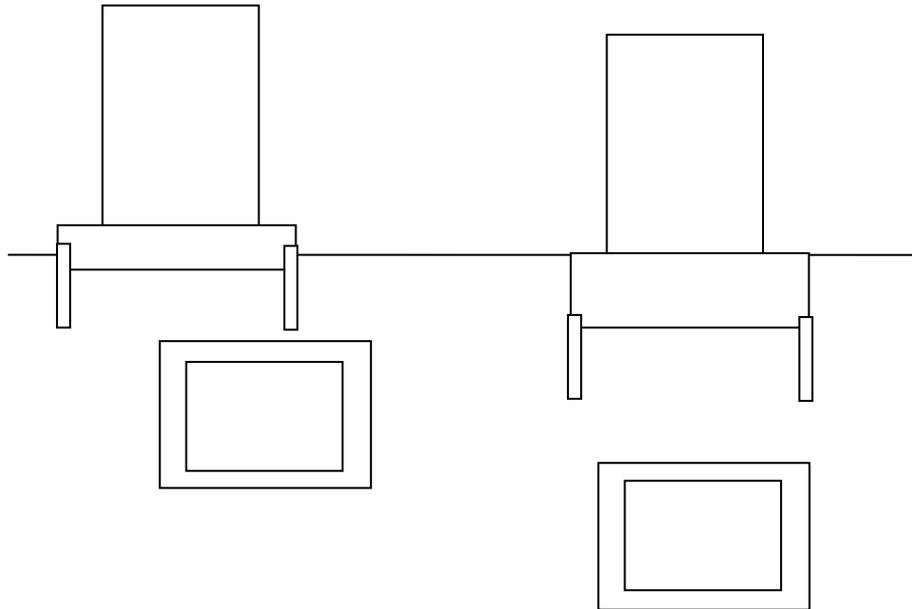


- ・ 杭応力分布の比較
- ・ 杭地盤反力係数の比較
- ・ 等価置換杭長（平均長？）
があるのか
- ・ 2次元モデルと3次元モデルの比較
- ・ 基盤不整は杭に如何なる影響を与えるのか
- ・ 実験・解析の両面から現象把握が必要

図 19 杭基礎に対する基盤不整の影響

埋設地下構造物の耐震性実験モデル4

大型埋設構造物のある地盤の基礎構造物の耐震性の把握は重要度は高いが、埋設物を対象とした研究は少なくないが、その上の基礎構造物の実験研究はない。再開発地域では今後多くなる形式である。



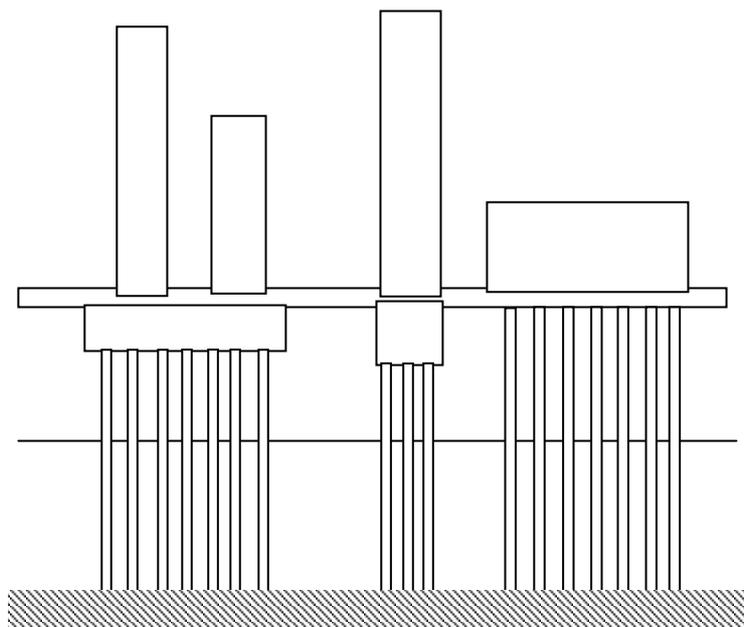
- ・埋設物の深度と位置の影響
- ・埋設物無しの基礎の応答との比較
- ・地下壁に作用する外力評価の比較
- ・基礎下に地盤反力評価の装置を設置する
- ・地盤のひずみの比較
- ・2次元と3次元効果の評価

図 20 埋設構造物のある地盤の基礎

埋設地下構造物の耐震性実験モデル5

建物群が大型杭基礎構造で支持されるモデルは臨海部の開発地域では採用されるモデルである。単体での杭基礎構造物の実験研究から群構造物の特性把握が重要になっていく。

矩形大型土槽を利用して、基礎群構造物の耐震性の実験モデルを考える。



単体の場合との比較

- ・基礎の応答
- ・建物の応答
- ・杭の応力分布
- ・地盤反力
- ・2次元と3次元効果の評価

図 21 建物群を支持する杭基礎

2) 実験計画グループ2の検討結果

地盤 - 杭基礎 - 構造物の三次元振動実験 実験計画 (その2)

a) 目的

杭基礎を合理的に設計するためには、水平地盤反力、杭径や群杭効果等を明らかにする必要がある。しかし、それらに対する三次元振動の影響を検討した例は極めて少ない。また、近年、杭頭接合部の回転性能を高めることで地震時の杭頭部破壊を防止し、併せて基礎梁の断面縮小を目的とした新構法が数多く開発されている。しかし、地震時における挙動は解析的に検討されているものの、実挙動は明らかでない。

E - ディフェンスの大型三次元震動台は、実大スケールの実験が可能、水平1次元(x方向、y方向)、水平2次元(x-y方向)、3次元加振が可能、詳細な計測(最大900ch)が可能という特徴をもつ。そこで本研究では、液状化地盤および乾燥砂地盤において、実大スケールの地盤 - 杭基礎 - 構造物モデルの振動台実験を行い、以下の設計に資するデータを得る。

- ・ 水平2次元振動における水平地盤反力係数の評価
- ・ 3次元振動における水平地盤反力係数の評価
- ・ 上屋の慣性力、転倒モーメントが杭基礎に及ぼす影響の評価
- ・ 群杭効果(杭間隔の影響)
- ・ 杭径の影響
- ・ 杭剛性の影響
- ・ 基礎部と杭頭の接合条件(剛接合と半剛接)の影響

b) 実験内容

() 地盤モデル

せん断土槽は、半径4m、深さ6.5mの円筒形せん断土槽とする。土槽底面から高さ1.5mまでを砂礫層とし、その上部を4.5mの乾燥砂層または飽和砂層とする。根入れ有りの地盤モデルでは、さらに表層に0.5mの乾燥砂層を作製する。

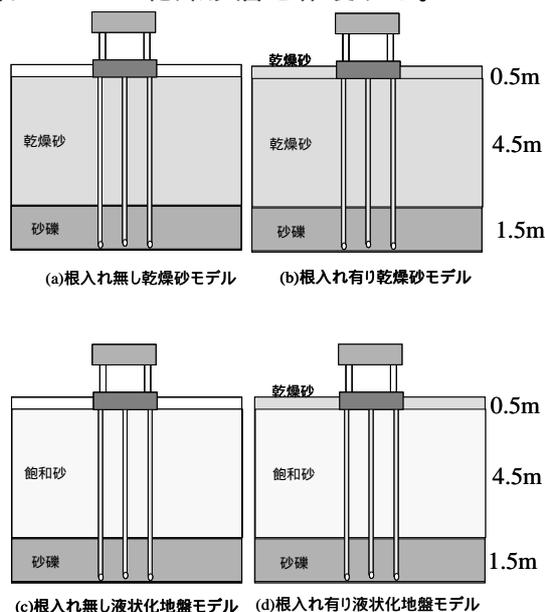


図22 地盤モデル

() 構造物モデル

構造物モデルは、基礎部と上屋からなるモデルおよび基礎部のみのモデルとする。上屋モデルは質量30トン程度とし、上屋慣性力および転倒モーメントが杭基礎に及ぼす影響を検討する。また、上屋の固有周期は、地盤の卓越周期より長い長周期モデル、固有周期が地盤のそれより短い短周期モデルとする。

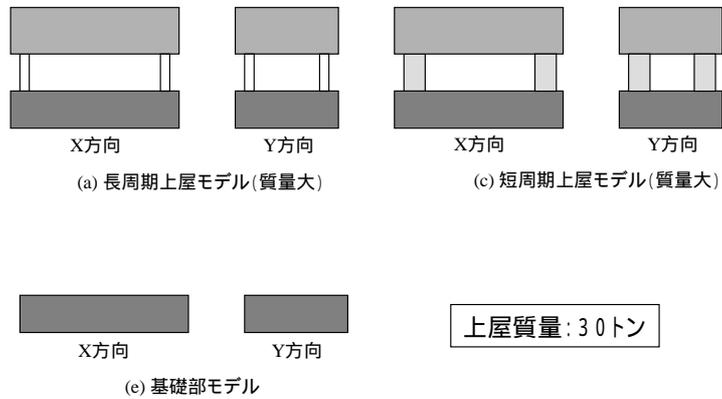


図 23 構造物モデル

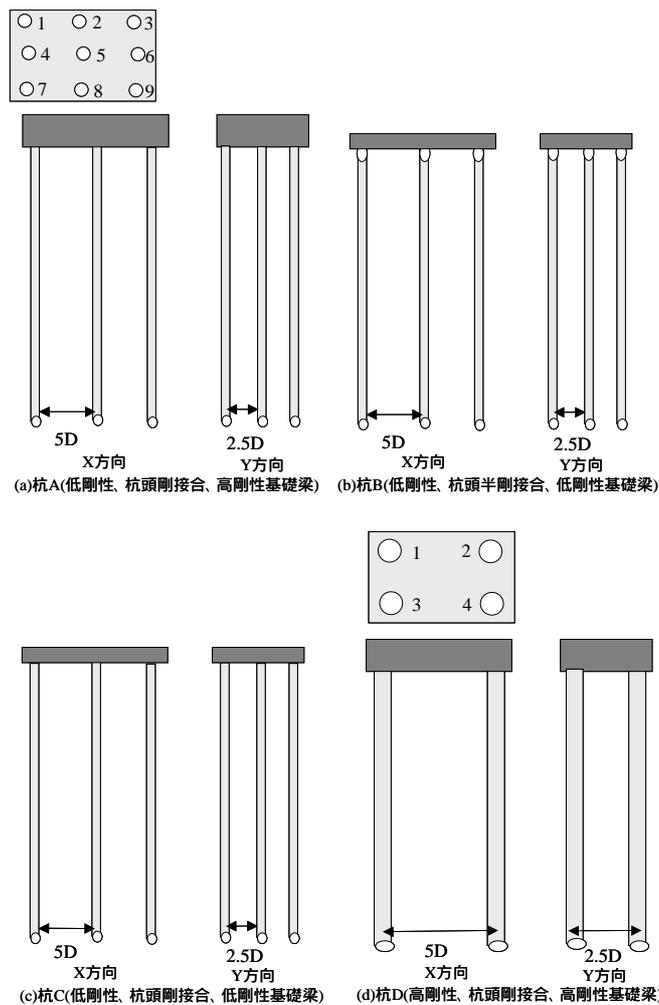


図 24 杭基礎モデル

() 杭基礎モデル

杭は、直径 160mm の低剛性鋼管杭 9 本 (3 × 3) および直径 320mm の高剛性鋼管杭 4 本 (2 × 2) とし、長さは 6 m とする。いずれも、x 方向の杭間隔を 5D、y 方向の杭間隔を 2.5D とする。低剛性杭の杭頭は、剛接合したものと半剛接合したものの 2 種類とする。基礎部は、十分な剛性をもつ高剛性基礎梁 (2.2m × 1.4m × 0.6m) および低剛性基礎梁 (2.2m × 1.4m × 0.3m) とする。高剛性基礎梁では、基礎部根入れの効果を検討する。また、低剛性基礎梁では、杭頭回転性能と基礎梁の曲げモーメントの関係を検討する。

c) 実験パラメータおよび実験年次計画

実験パラメータおよび実験年次計画を、以下に示す。

表 1 実験パラメータ

	条件
加振方向	水平 1 次元加振 (x 方向) 水平 1 次元加振 (y 方向) 水平 2 次元加振 (x y 加振) 3 次元加振 (x y z 加振)
地盤	砂礫層 + 飽和砂層 砂礫層 + 飽和砂層 + 乾燥砂層 (根入れ) 砂礫層 + 乾燥砂層 砂礫層 + 乾燥砂層 + 乾燥砂層 (根入れ)
構造物	長周期上屋モデル 短周期上屋モデル 基礎部モデル
杭間隔	2 . 5 D (x 方向加振) 5 D (y 方向加振)
杭径	1 6 c m 3 2 c m
杭剛性	低剛性 高剛性
杭頭条件	剛接合 半剛接合
基礎部剛性	高剛性 低剛性

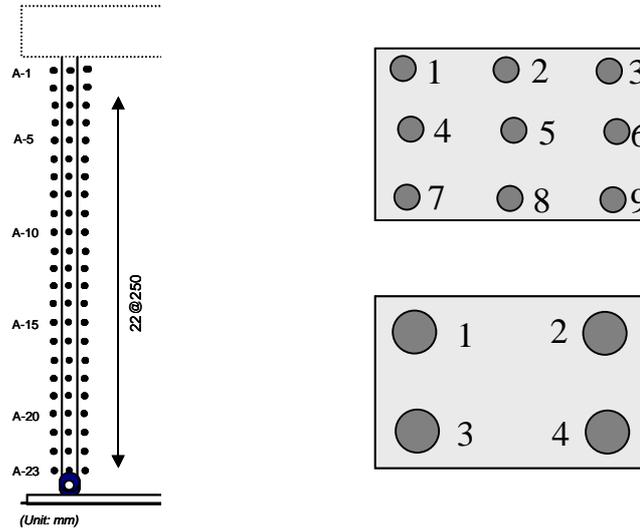
表 2 実験年次計画

初年度	根入れ無し乾燥砂地盤 根入れ有り乾燥砂地盤	杭 A 低剛性 剛接合杭 高剛性基礎梁	長周期上屋モデル 短周期上屋モデル 基礎部モデル
	根入れ無し乾燥砂地盤 根入れ有り乾燥砂地盤	杭 D 高剛性 剛接合杭 高剛性基礎梁	長周期上屋モデル 短周期上屋モデル 基礎部モデル
2 年目	根入れ無し液状化地盤 根入れ有り液状化地盤	杭 A 低剛性 剛接合杭 高剛性基礎梁	長周期上屋モデル 短周期上屋モデル 基礎部モデル
	根入れ無し液状化地盤 根入れ有り液状化地盤	杭 D 高剛性 剛接合杭 高剛性基礎梁	長周期上屋モデル 短周期上屋モデル 基礎部モデル
3 年目	根入れ無し乾燥砂地盤	杭 B 低剛性 半剛接合杭 低剛性基礎梁	長周期上屋モデル 短周期上屋モデル 基礎部モデル
	根入れ無し乾燥砂地盤	杭 C 低剛性 剛接合杭 低剛性基礎梁	長周期上屋モデル 短周期上屋モデル 基礎部モデル
4 年目	根入れ無し液状化地盤	杭 B 低剛性 半剛接合杭 低剛性基礎梁	長周期上屋モデル 短周期上屋モデル 基礎部モデル
	根入れ無し液状化地盤	杭 C 低剛性 剛接合杭 低剛性基礎梁	長周期上屋モデル 短周期上屋モデル 基礎部モデル

d) 計測

() 杭ひずみ

全ての杭の x 軸、y 軸で、曲げ歪みを 250mm 間隔、ひずみ（軸力）を 1000mm 間隔で計測する。計測数は、杭 1 本あたり 58 点となる。



X方向:曲げ歪み 17、軸力(A-1,5,9,13,17,21) 12(6 * 2) = 29
 Y方向:曲げ歪み 17、軸力(A-1,5,9,13,17,21) 12(6 * 2) = 29 計58

図 25 杭の歪みゲージ配置図

() 基礎梁ひずみ

基礎梁に加わる曲げモーメント（曲げひずみ）を、25cm 間隔で計測する。

X 方向： 10*2 =20

Y 方向： 6*2 =12

計 3 2

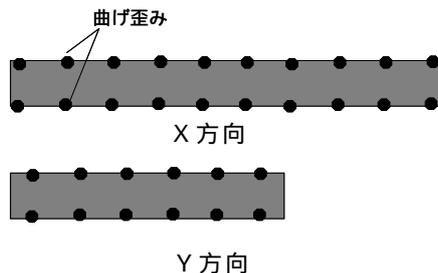


図 26 基礎梁の歪みゲージ配置図

() 加速度計測

地盤および杭基礎については、x、y 方向の加速度を 500mm 間隔で、z 方向の加速度を 1000mm 間隔で計測する。上屋については、中央部および四隅で 3 成分観測を行う。

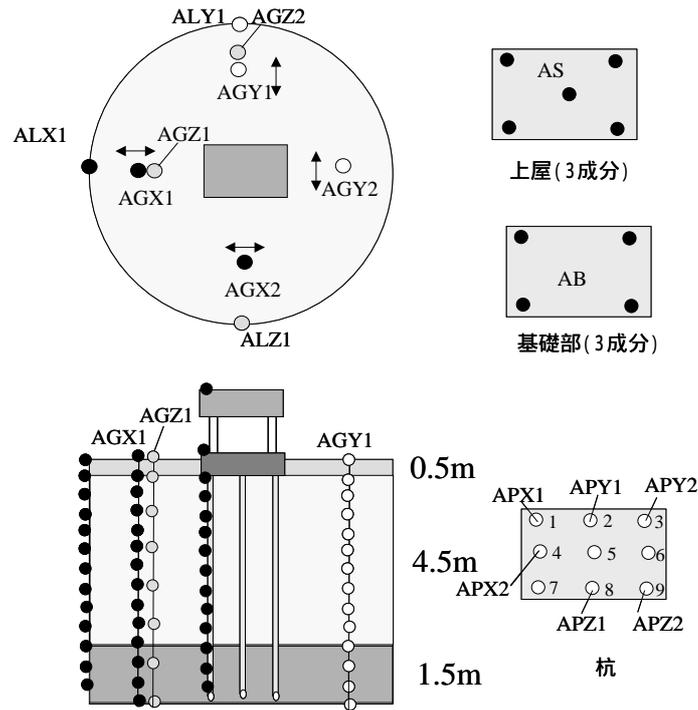


図 27 加速度計配置図

表 3 加速度計の配置表 (低剛性杭)

	設置場所	方向	センサー間隔	センサー数
AGX1	地盤	x	500 (mm)	14
AGX2	地盤	x	500	14
AGY1	地盤	y	500	14
AGY2	地盤	y	500	14
AGZ1	地盤	z	1000	8
AGZ2	地盤	z	1000	8
ABS	基礎部	x、y、z	-	12
AST	上屋	x、y、z	-	15
APX1	杭	x	500	12
APX2	杭	x	500	12
APY1	杭	y	500	12
APY2	杭	y	500	12
APZ1	杭	z	1000	6
APZ2	杭	z	1000	6
ATB	振動台	xyz	-	6
ALX	土槽	x	500	12
ALY	土槽	y	500	12
ALZ	土槽	z	1000	6

() 間隙水圧計測

地盤および杭基礎の間隙水圧を、500mm 間隔で計測する。

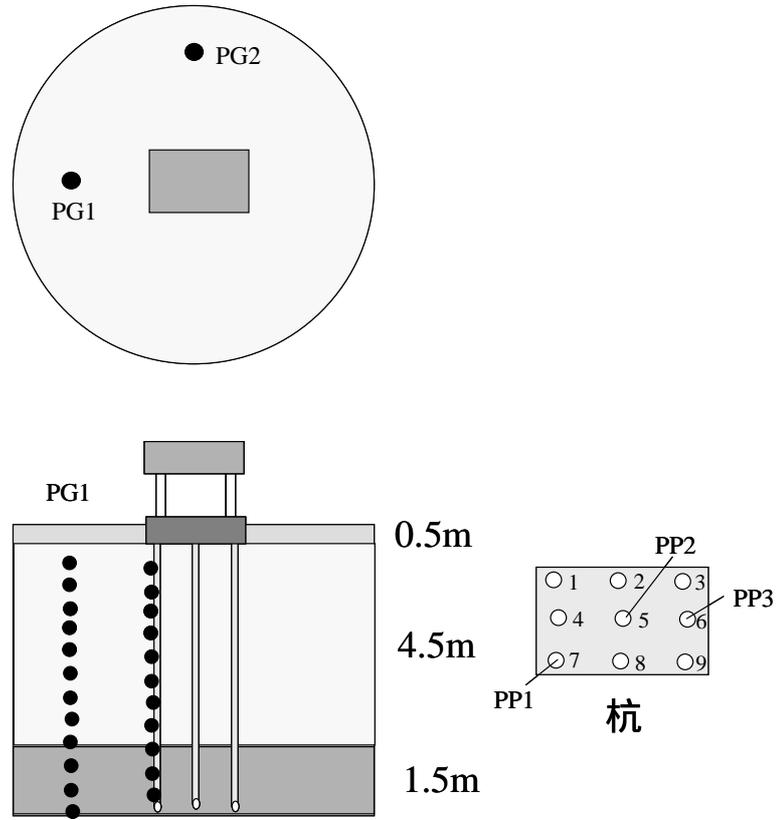


図 28 間隙水圧計配置図

表 4 間隙水圧計の配置表

	場所	センサー間隔	センサー数
PG1	地盤	500	12
PG2	地盤	500	12
PP1	杭	500	12
PP2	杭	500	12
PP3	杭	500	12

() 回転角

杭端の回転角を、X 軸、Y 軸で計測（技術的に可能か？）

$$2 * 9 = 18$$

() その他

- ・基礎部、上屋のレーザー変位計測（不動梁を設置？）
- ・地盤変位（光ファイバー？）計測
- ・飽和度の確認のため、P 波速度計測
- ・杭間地盤で加速度、間隙水圧を計測（センサーの沈下が問題）

e) 総センサー数

総センサー数を表5に示す。

(計測数に余裕がある場合、杭頭の軸力測定を増やす。)

表5 センサー数(低剛性杭)

	加速度計			変位計			間隙水圧計	ひずみ	回転角	合計
	x	y	z	x	y	z				
振動台	2	2	2							6
土槽	1 2	1 2	6	6	6					4 2
地盤	2 8	2 8	1 6				2 4			9 6
杭	2 4	2 4					3 6	5 2 2	1 8	6 2 4
基礎梁	4	4	4					3 2		4 4
上屋	5	5	5							1 5
合計	7 5	7 5	3 3	6	6		6 0	5 5 4	1 8	8 2 7

f) 今後の課題

大型地盤の実験では、地盤モデル作製に最も時間と費用がかかる。そのため、本実験計画は、地盤を作製した後、繰り返し加振実験をすることを前提にしている。その場合、以下の問題点が今後の課題として考えられる。

- ・均一な地盤を作製するために、ボイリングで地盤の再構成は可能か？
ボイリングで飽和度が下がらないか？(ボイリングは脱気水?)
- ・均一な地盤作製が可能でも、計測精度が悪ければ意味がない。加速度計の設置法(or 方向、沈下量の確認法)を、どうするか？
- ・均一な地盤作製が不可能ならば、地盤状態を精密に把握したい。
その地盤調査法を、どうするか？(コーン貫入試験で地盤が乱れるか?)

3) 実験計画グループ3の検討結果

側方流動の実験計画

a) E - ディフェンスにおける側方流動実験の位置付け

E - ディフェンスにおける側方流動実験の計画を検討する前に、本実験の位置付けを整理しておく必要があると考えられる。

E - ディフェンスにおける実物大規模の振動実験では、試験体の製作に要する費用、労力、時間等も莫大なものになり、試験そのものも繰返し実施できるものではない。よって、トライアル的な実験を計画することは非常に難しく、これまでに数多くの機関で実施されてきた小規模振動実験、遠心模型実験、原位置実験等で十分な知見が蓄積され、且つ、成功の見通しが立っている内容に則して実験計画を作成することが重要と考えられる。これは逆に、新規性の高い実験を実施することは非常に難しいことを意味する。そうした意味では、側方流動の軽減手法に関する実験は上記の条件を満たしているものと考えられる。ただし、既にある程度、流動対策としての適用性が証明されているもの、定性的には効果が確認されており定量的検討を残すだけのもの、といった対策手法が対象の中心となり、奇抜なアイデアの対策工法は採用し難い。ただし、平成 16 年度までに実施される大大特プロジェクトで効果が検証されたものは、検討対象になり得る。

従って、この計画書では、主に小規模実験を対象とした側方流動対策に関する実験も検討に加え、既往の工法も含めて、実物大実験で実証することが最も効果的であろう実験について、計画を立案することとする。

b) 実験目的

E - ディフェンスにおける流動実験計画では、2つの大きな目的に分け、実験内容を検討する。

一点は、地盤の流動被害が生じる前提条件を整理すること。もう一点は、実際の流動対策の効果を検証することである。

() 流動の発生条件

図 29 は一般に流動が生じやすいと指摘されている地盤の堆積パターンである。このうち、(a)に示した斜面タイプの流動は、そのメカニズムも明快で、変位量の予測手法についても幾つかの提案がなされている。従って、流動に対処する(液状化そのものを抑止することも含めて)工法を選定することは比較的容易で、その対策効果についても、定量的に検討する余地はあるものの、予測が容易であると考えられている。

一方、(b)に示すような開断面を有するタイプ(護岸タイプ)の場合は、新潟地震や兵庫県南部地震で多くの被害が見られたように、護岸の被害が直接、間接的に流動被害の要因となっていることが多い。護岸の倒壊や変形量が、背後地盤における流動量の大きさに影響を与えていることは明確であるが、その値を定量的に検討した例は少ない。唯一、設計に取込むことが可能な知見として、兵庫県南部地震におけるケーソン護岸、矢板護岸の被災事例を調査し、護岸形式と地震動レベル、背後地盤種別から求められる護岸の変形率が提案されているが、それさえも現行設計法には生かされるまでには至っていない。

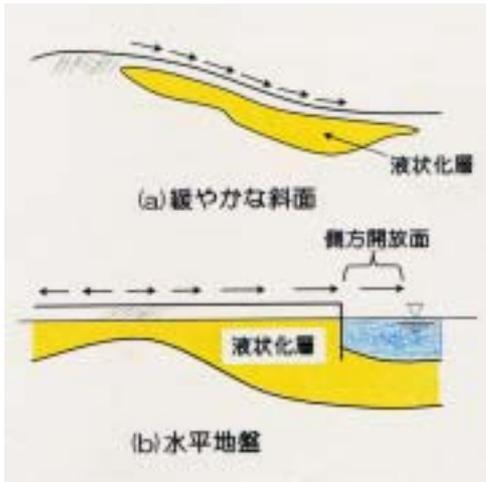


図 29 流動の発生しやすい堆積パターン

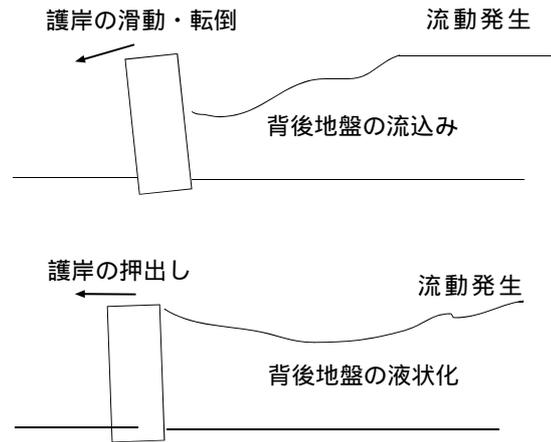


図 30 護岸近傍での流動パターン

特に図 30 に示すように、護岸の変状と背後地盤の液状化発生、さらに流動開始のタイミングは、その後の変形量や背後地盤中の構造物への被害に大きな影響を与える。そもそも護岸が堅牢であれば、背後地盤で液状化が生じても地盤の流動は発生しないと予想されるが、現行設計法は護岸に変状が生じることが前提条件で、構築されている感は否めない。

地盤の流動量を把握したり、流動被害の軽減を考えるうえで、模型実験や遠心実験でのモデル化が難しい護岸変状の定量的把握は非常に重要な検討項目と考えられる。従って、E-ディフェンスにおける実物大実験では、地震時におけるケーソン護岸ならびに矢板護岸の変状量の把握を目的の一つとする。当然のことながら、その際に背後地盤で生じる流動量ならびに流動力の定量的評価も同時に検討することはいうまでもない。

() 流動軽減手法の定量的証明

もう一つの実大流動実験の目的として、流動対策の効果の定量的な把握を挙げる。これまで、多くの機関で流動対策の実験が行われている。加えて、平成 16 年度までの大特プロジェクトにおいて、流動被害軽減に効果的な対策工法の提案が為され、小型振動台実験、遠心模型実験において、対策効果の確認が終了しているはずである。そこで、既往の研究で定性的効果が実証されている対策モデルについて、実物大実験を実施し、流動被害軽減能力の定量的証明を行なうことを目的とする。現時点では、護岸背面の地盤改良タイプ、変形抑制タイプを対象とし、工法の詳細については、大特プロジェクトの成果を活用する。また、排水タイプやその他の有効な工法についても、その対策効果が顕著

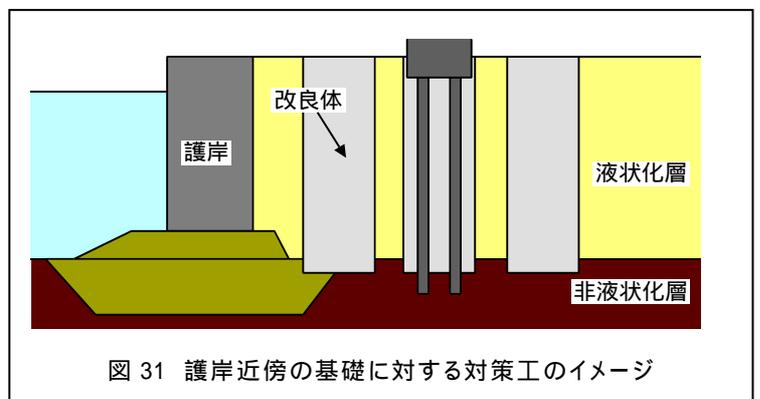


図 31 護岸近傍の基礎に対する対策工のイメージ

であることが今後の研究で明らかになれば、実験計画の検討対象とする。さらに、護岸

形式による効果の違いを考慮するため、ケーソン護岸タイプ、矢板護岸タイプに対して対策実験を実施するほか、流動量の低減効果だけでなく、基礎杭に作用する流動力や基礎杭の変形についても検討できるよう実験計画を策定する。

c) 実験内容

ここではE - ディフェンスにおける流動実験を護岸変状の定量的把握と、流動対策の定量的把握の2つの実験シリーズに分けて、実験内容を示す。ただし、E - ディフェンスにおける実大実験に供する大型土槽のスペックが明らかにされていないため、実物大モデル或いは 1/2 ~ 1/3 程度の大縮尺モデルを想定する。また、同様の理由で模型地盤の作成方法等についても、詳細な手順は論じない。

() 護岸変状に関する実験

モデル (図 32 参照)

- ・断面は埋立地を想定し、基礎地盤、埋土層、護岸、護岸前面地盤および基礎で構成する。
- ・護岸形式は、ケーソン護岸タイプと矢板護岸タイプとし、前面水深 10m 以上を計画する。
- ・ケーソン護岸では置換砂は設けず、比較的良好な基礎地盤上にマウンドを設けて設置する。
- ・矢板護岸は控え工を有するタイプとし、控え工も液状化領域に存在するものとする。
- ・矢板護岸におけるコーピング製作の是非は後の検討課題とする。

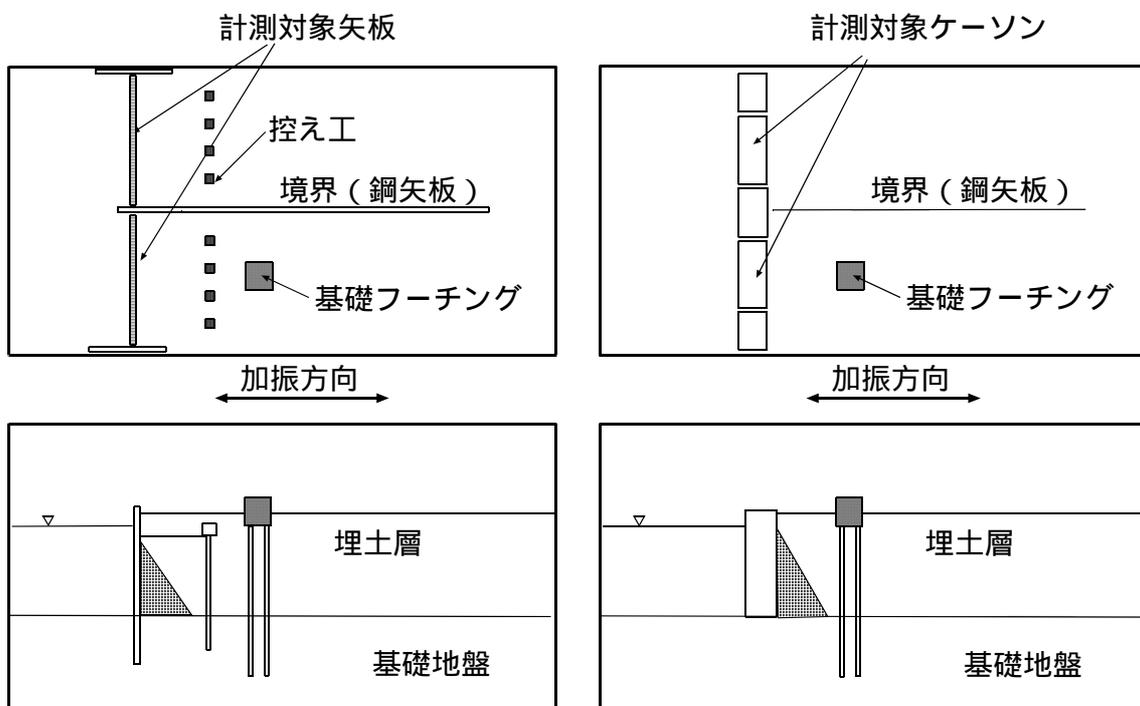


図 32 実験モデル

- ・背後地盤の勾配は 0%とする。
- ・背後地盤の地下水位面は、飽和領域と不飽和領域がある程度区分でき、且つ、液状化に伴う地盤変状が明確に生じる範囲で設定する。
- ・護岸は実際の施工手順に従い、基礎地盤作成後に土槽内で沈設（ケーソン）または打設（矢板）を行ない、その後、背後地盤を作成する。
- ・背後に基礎（杭支持）の存在する領域と、基礎の存在しない領域に分け、同時加振とする。
- ・センサーならびに基礎に関しては、本来は完成地盤に施工するはずであるが、センサーの配置や状態確認上の制約から、埋土層作成前に施工、設置する。
- ・基礎杭の施工方法は、本来は支持層まで根入れするのみであるが、境界条件を明確にするため、土槽下端に剛結或いはピン結合することを考える。ただし、この点に関しては、大大特プロジェクトにおける杭基礎実験グループの成果に従う。

計測項目

- ・地表面における流動変位（平面的に測定）、加速度
- ・不飽和領域における水位上昇（水圧換算）、流動変位、加速度、土圧
- ・液状化領域における間隙水圧、流動変位、加速度、流動圧
- ・ケーソン護岸の変形、加速度、動水圧、土圧
- ・護岸前面部における変形、間隙水圧
- ・矢板護岸の変形、加速度、動水圧、土圧
- ・基礎フーチング部の変形、加速度、土中埋没部での土圧、間隙水圧
- ・基礎杭および矢板控え工の変形、応力、表面での流動圧、水圧
- ・全ての計測は時刻歴データが記録できることとする。また、土水圧、応力については増分値ではなく、加振前、加振後の絶対値が読み取れることを原則とする。

実験条件

- ・実験はケーソン護岸モデル、矢板護岸モデルで各 1 ケースの合計 2 ケースを最低必要数とする。
- ・加振は現段階では、兵庫県南部地震の波形を用いることとするが、必ずしも地盤変状が生じやすい波形とは言えないので、大大特プロジェクトの研究過程の中で最適な波形を検討する。
- ・モデル作成に要する時間と費用を考慮してステップ加振も止むなしとするが、レベル 1 相当、レベル 2 相当の 2 回に留める。
- ・振動台の占有期間に関連して、基礎地盤作成後から計測終了までを振動台テーブル上で実施する。

目標とする成果

- ・ケーソンおよび矢板護岸の液状化時の変形量（率）が地震動の大きさに応じて明らかにする。
- ・ケーソン護岸においては、滑動と背後地盤からの押出しの成分を分離する。
- ・護岸変状の発生と背後地盤の流動発生のタイミングを明らかにする。
- ・流動発生時の護岸近傍から背後地盤にかけての流動圧（力）に分布を明らかにする。
- ・流動対策の実験との比較として、無対策時の流動および基礎に与える影響に関するデ

ータを得る。

- ・基礎の有無が流動に与える影響を明らかにする。

() 流動対策に関する実験

- ・断面は護岸変状の実験を行ったケ - スと同様とする。
- ・護岸等のスペック、護岸モデルおよび地盤の作成方法も前ケ - スと同様とする。
- ・モデル内に対策を施した断面と、無対策の断面を境界を置いて作成する。
- ・対策モデルについては、別の項目で示すが、大きくは護岸背面の地盤改良タイプ、変形抑制タイプの2種類とする。
- ・護岸モデルは、変状量が大きいと予想される矢板岸壁を対象とする。
- ・従って、最低必要ケ - ス数は2ケ - スとなる。
- ・対策工は、地盤作成後に施工する。
- ・計測項目、実験条件等も護岸変状を確認したケ - スと同様とする。
- ・当面想定している対策案は以下のとおりである。ただし、大大特プロジェクトの成果によって、より良いモデルを提案することを前提にしている。

地盤改良タイプ

- ・地盤改良タイプは施工性も考慮して、薬液注入固化とする。
- ・基礎前面側（護岸側）または基礎背面（内陸側）のどちらか、或いは両面に対策工を施工するかについては、大大特プロジェクトの成果に鑑み再検討する。（図 33 参照）
- ・基礎フーチング直下を改良するかどうかについては、大大特プロジェクトの成果に鑑み再検討する。
- ・改良体は目標強度を設定し、モデル地盤内で簡易貫入試験等を実施して確認する。
- ・改良体の変形能については別途検討する。

変形抑制タイプ

- ・流動変形を抑制（防御）するタイプの実験としては、地中矢板壁あるいは鋼管矢板壁による対策工

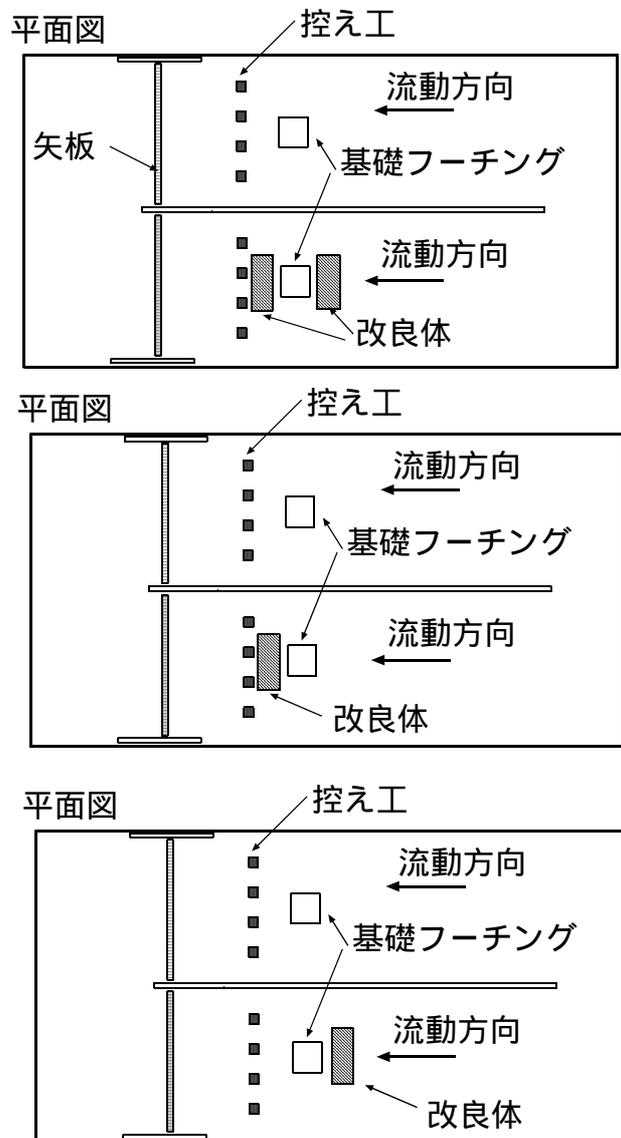


図 33 改良体の施工位置

を提案する。

- ・壁体の施工位置に関して、護岸と基礎の中間部とするか、基礎より内陸側とするかについては、大大特プロジェクトの成果より、より効果的な施工位置を決定する。（図33の改良体モデルと同様）
- ・壁体の形状についても、大大特プロジェクトの成果より、より効果的な形状を提案する。（図34参照）
- ・壁体の変形能については別途検討する。

目標とする成果

上記2種類の対策モデルの実験から、以下の項目を定量的に評価することを目標とする。

- ・対策による流動変位の低減効果
- ・対策による基礎の被害の軽減効果
- ・対策による護岸変状の低減効果

変位の軽減効果の予測手法の証明

上記の流動対策実験は、それ以前の大大特プロジェクトにおける小型振動実験、遠心模型実験で既に十分な成果を収めていることが前提で、その段階で流動被害の軽減量の予測手法が確立されているものとする。従って、実大実験の結果は、流動被害軽減量の予測手法の検証の目的も同時に有している。それによって、様々な地盤条件における流動対策の効果を実大実験を実施することなしに予測し、基礎の設計に資することが可能となることが期待される。

補足事項

現在、大大特プロジェクトにおいて、新しい流動対策工法の開発、および既往の工法も含めて、もっとも効果的な流動対策の工法、工種、施工法を検討している最中である。従って、今回提案する実験計画案は、あくまで暫定的なもので、既往の液

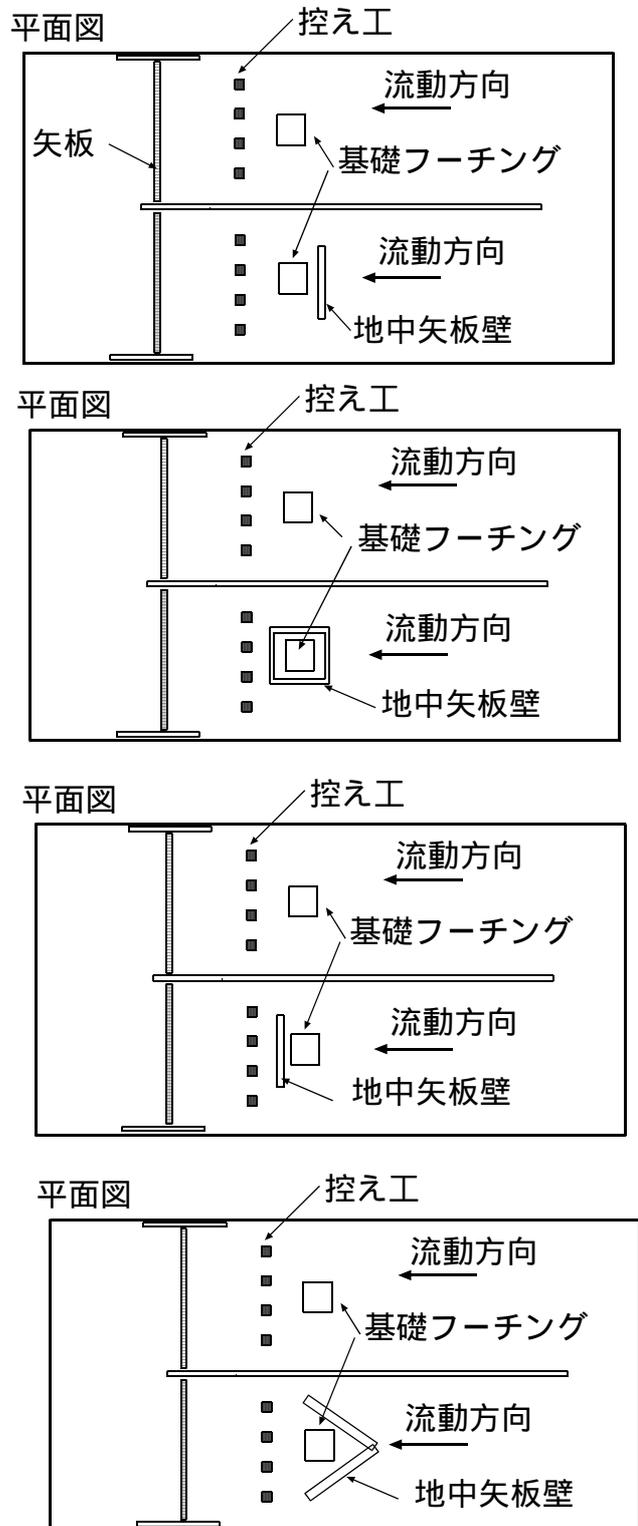


図34 地中矢板壁の施工位置および形状

状化対策の延長線上でしかない。大大特プロジェクト終了時には、全く異なる工法、施工方法が最適な流動対策となり得る可能性があることを指摘しておきたい。

(d) 結論ならびに今後の課題

- 1) 平成 14 年度において 3 つのグループにより、E - ディフェンスで実施するための概略計画書が作成された。実験計画グループ 1 として「地盤 - 杭基礎 - 構造物の三次元振動実験 実験計画 (その 1)」は、杭基礎の耐震性評価のための実験研究を総括的にとらえた計画をまとめられ、実験計画グループ 2 として「地盤 - 杭基礎 - 構造物の三次元振動実験 実験計画 (その 2)」は、E - ディフェンスで考えられるより実際の計画がまとめられた。実験計画グループ 3 として「側方流動の実験計画」は、E - ディフェンスで考えられる実験として側方流動現象の把握からその対策法までについてまとめている。
- 2) 今後は、実験計画として目的・成果の展開をにらんだものにしてゆく必要があるとともに、実験方法として試験体作成方法・運搬、震動台セット、実験、震動台リセット、試験体解体といった項目まで検討し、実施にむけてより具体的計画に仕上げてゆく必要がある。

(e) 引用文献

なし

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 論文発表

著者	題名	発表先	発表年月日
なし			

2) 口頭発表、その他

発表者	題名	発表先、主催、発表場所	発表年月日
なし			

(g) 特許出願，ソフトウェア購入，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア購入

名称	機能
なし	

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 15 年度業務計画案

(a) 業務計画

ワーキンググループの活動として、水平地盤中の杭基礎実験計画作成グループと護岸の側方流動実験グループにより、それぞれ計画を作成し WG を開催して討論する。

(b) 実施方法

下記のメンバーとテーマにわけて実験計画を作成する。

1) H14 年度に実施した実験計画グループ 1 と実験計画グループ 2 は合併して、「地盤 - 杭基礎 - 構造物の三次元振動実験 実験計画」をまとめる。

メンバー：鹿島建設 八幡夏恵子、竹中工務店 鬼丸貞友、農工研 毛利栄征、
信州大 田村修次、東工大 時松孝次、大成建設 真島正人

3) 実験計画グループ 2 として「側方流動の実験計画」をまとめる。

メンバー：地盤工学会研究グループ

(c) 目標とする成果

1) E - ディフェンスによる実大土槽振動実験成に向けて結成されたWGにおいて、H14年度に実施した中小規模振動実験の結果と数値解析をふまえ、さらにH14年度に作成した概略の護岸の側方流動実験と水平地盤中の杭基礎実験の2タイプの概略の実験計画をブラッシュアップする。

2) 実験計画として目的・成果の展開をにらんだものにしてゆくとともに、実験方法として試験体作成方法・運搬、震動台セット、実験、震動台リセット、試験体解体といった項目まで検討し、実施にむけてより具体的計画に仕上げてゆくことを目標にする。