

鋼材による液状化抑止工法 (NS ハイドレーン) の開発

Development of Engineering Method for Deterring Liquefaction (NS-Highdrain)

川 端 規 之^{*⁽¹⁾} 河 原 繁 夫^{*⁽¹⁾} 川 上 圭 二^{*⁽¹⁾} 久 我 昂^{*⁽²⁾}
Noriyuki KAWABATA Shigeo KAWAHARA Keiji KAWAKAMI Takashi KUGA

原 田 典 佳^{*⁽³⁾} 龍 田 昌 毅^{*⁽⁴⁾}
Noriyoshi HARADA Masataka TATSUTA

抄 録

阪神大震災で神戸のポートアイランドの全域が液状化し、周囲の港湾施設に多大な被害を与えた。また、大阪淀川の堤防が液状化により陥没する等、1964年の新潟地震以来の液状化による地震被害が発生し、液状化に対する地震防災への社会的関心が高まっている。新日本製鐵は、建設省との共同研究である“軟弱地盤の液状化対策工法の開発”を1992年度から着手しており、鋼管杭・鋼矢板を用いた液状化抑止工法であるNSハイドレーン工法を商品化している。NSハイドレーン工法の確立のために実施している建設省との共同研究及び東京工業大学に委託して実施した遠心力模型実験を中心に、NSハイドレーン工法の液状化抑止効果に関する実験的な研究の一部を報告するものである。

Abstract

Great Hanshin Earthquake disaster resulted in the liquefaction throughout the Kobe Port-Island and damaged tremendously its surrounding port facilities. The damage was also done to settlement of the bank of the Yodo river in Osaka due to the liquefaction. These earthquake damages caused by the liquefaction have been experienced since Niigata Earthquake in 1964, which take a growing social interest in prevention against the liquefaction. Nippon Steel Corporation has embarked on the “development of engineering methods to counter the liquefaction of soft ground” since 1992 which is a joint research with the Ministry of Construction, and has commercialized “NS-highdrain” which is an engineering method for deterring the liquefaction with using steel pipe piles and sheet piles. In this report, described are parts of experimental and analytic researches in the effect of the NS-highdrain on deterring the liquefaction, mainly on the basis of results from the said joint research made to establish the NS-highdrain and centrifugal model tests experiment which was contracted and carried out by Tokyo Institute of Technology.

1. 緒 言

地震時の液状化現象に対する研究は、世界的には1964年のアラスカ大地震において、アンカレッジの市街が壊滅的な被害を受けたことにより、カリフォルニア大学のH.B.Seed¹⁾が初めてその社会的な重要性を指摘し、土質力学的な観点から考察を加えた時点で端を発する。その後、日本でも新潟地震(1964年)が発生し、東京工業大学の石原らが、被害データの分析を中心にH.B.Seedらの研究をしのぐ成果²⁾を発表している。

これらの研究の初期段階は、液状化の発生メカニズムに対する研究であった。アラスカ・新潟地震以前でも、砂地盤の流動化現象(砂粒子間の有効応力の減少による強度の低下)は知られていたが、地震振動によって急激な流動化現象が発生し、構造物に甚大な被害をもたらすことが社会的に認識されたのは、初めてのことであった。

以来、地震振動に伴う砂地盤の流動化現象を液状化と呼ぶようになった。本報告は、液状化現象の概要について述べた上で、液状化現象から構造物の安全性を確保するために、開発された鋼材による液状化抑止工法(NSハイドレーン)の特長と性能確認実験の概要を報告するものである。

2. 液状化の発生メカニズムに関する既往の研究

2.1 液状化の発生メカニズム

飽和したゆるい砂質土を非排水状態で剪断変形させると、砂粒子間の空隙水に過剰空隙水圧が発生することが知られている。地震時の地盤振動は一般には水平方向の振動が卓越しているが、振動により砂粒子には繰返しの剪断応力が発生することとなる。この繰返し剪断応力が砂質土の剪断強度以下であっても、繰返しの影響によって、過剰空隙水圧が蓄積して、有効応力が減少し破壊に至る現象が

⁽¹⁾ 建材営業部門 建材開発技術部 部長代理⁽²⁾ 建材営業部門 建材開発技術部 担当部長*⁽³⁾ 建材営業部門 建材開発技術部*⁽⁴⁾ 技術開発本部 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター

主任研究員

液状化現象である。この関係を吉見³⁾は図1のように説明している。

一方、近年はゆるい砂の他に密な砂に関する液状化現象も研究されている。一般に相対密度が大きな密な砂は、剪断変形によって体積膨張が発生し(ダイレイタンスー) 過剰間隙水圧が負となるために瞬間的に有効応力がゼロとなっても、ゆるい砂のような破壊的な液状化状態には至らず、強度を維持することとなる。図2は密な砂の繰返し剪断状況と間隙水圧の変化である³⁾。このような現象はサイクリックモビリティと呼ばれるが、有効応力がゼロとなることから、広義の液状化として検討される場合がある。

2.2 液状化による被害

液状化による構造物の被害の特徴を分類すると主に以下のように分類される。

2.2.1 橋梁・建築の被害

新潟地震における昭和大橋の落橋は液状化による橋梁基礎の被害として有名である。新潟地震では、信濃川沿いに堆積したゆるい砂地盤が、液状化の発生によって信濃川に向かって側方流動し、橋梁の基礎杭や建築の基礎杭を変形させて、橋桁の落橋や建築物の倒壊に至っている。

また、兵庫県南部地震においても液状化が発生し、橋梁の落橋や建物の崩壊につながっている。写真1は落下した阪神高速道路の西宮港大橋の側径間を示す。このような被害から構造物の安全性を確保するためには、基礎杭周辺の液状化を防ぐための地盤改良や、液状化地盤の側方流動を考慮した基礎杭の設計等が必要となる。

このように、傾斜地盤上の砂地盤が液状化し、流動化状態となって杭基礎に側方土圧を作用させる設計の考え方として、流動化速度を仮定し、その流れによる基礎杭の抵抗力を側方土圧として作用させる方法が海外では提案されている。国内ではこのような設計手法はなく、今後の検討が必要となろう。

2.2.2 港湾構造物の被害

液状化による港湾構造物の被害は、1968年の十勝沖地震において護岸背面が液状化し、ケーソンが滑动した事例や、鋼矢板護岸が変形した事例がよく知られている(図3参照)。

港湾構造物の耐震設計に関しては、港湾技術研究所の震災事例調査結果によって、港湾構造物に作用する地震震度が他の構造物と比較して小さめに設定されている。これは、護岸背面の土が地震加速

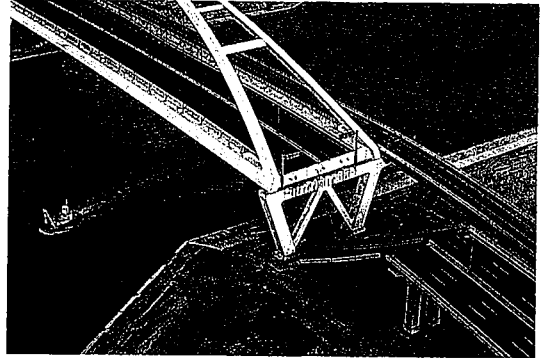


写真1 西宮港大橋の落橋(「日経コンストラクション」1995年2月24日号 撮影:三島叔氏)

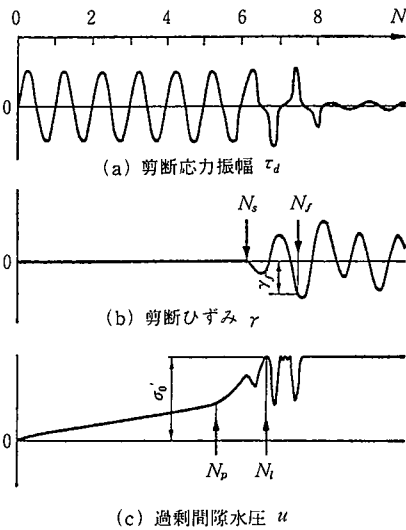


図1 ゆるい飽和砂に対する非排水繰返し剪断試験結果の一例

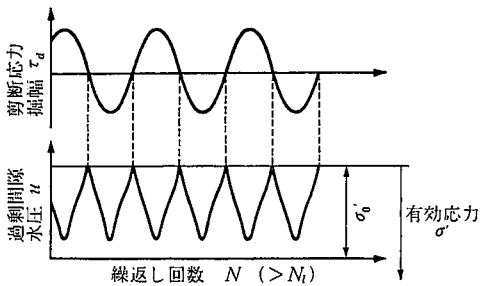


図2 密な飽和砂の繰返し単純剪断試験において、間隙水圧比が100%に達した後の過剰間隙水圧の変化(模式図)

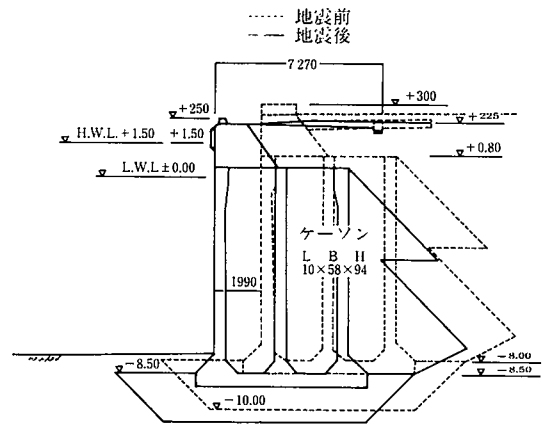


図3 岸壁の変形

度の増大に従い、塑性変形して応答値としての水平震度が低下することや、ケーソンのロッキング振動等のモードにより、構造物の減衰が極端に増大したことによるものと考えられる。

しかしながら、上記の結果は港湾構造物の背面土が液状化していない場合の検討であり、背面土が液状化した場合の護岸に作用する動土圧の設計での評価に関しては、十分な評価法が確立していない。護岸背面が液状化した場合には、次の二つの要因で、護岸に作用する土圧が急激に上昇するものと思われる。

- (1) 広義の液状化状態では、過剰間隙水圧の増加によって、瞬間的に土被り圧と同等の水圧が、護岸に作用することとなり、設計土圧である主動土圧よりも大きな圧力が作用することとなる。(液状化水圧の平均成分)

(2)流動化に至る狭義の液状化状態では、上記の水圧のほかに、流動体中で振動する壁体に作用する動水圧を考慮しなければならない。(液状化水圧の振動成分)

2.2.3 盛土構造物の被害

河川堤防や道路盛土も地震による被害事例の多い構造物である。このような盛土構造の地震による被害状況はおおむね図4のようなパターンに分類される。写真2は、兵庫県南部地震における淀川左岸堤防の崩壊状況である。

盛土構造物の被害パターンIは盛土の応答による破壊パターンであるが、パターンIIとIIIとIVは、盛土基部の地盤の液状化による強度低下や側方流動が、被害の原因になっていることが多い。

盛土構造物の耐震設計に関しては、最近の研究成果によって、過剰間隙水圧の上昇を考慮した有効応力モデルによるすべり安全率の計算⁹⁾や、液状化による側方流動に基づく盛土沈下量の解析手法等が提案されており、種々の建設プロジェクトに適用されている。

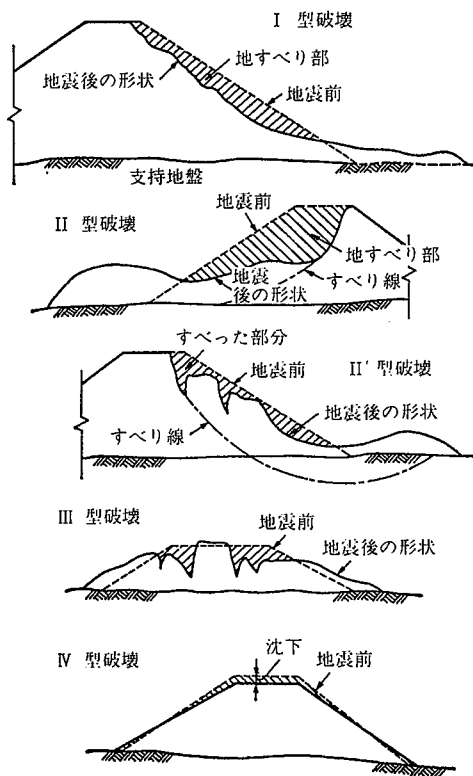


図4 盛土の震害の形式

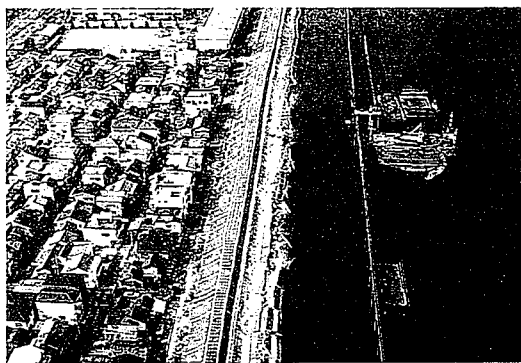


写真2 淀川下流部左岸の崩壊 (「日経コンストラクション」1995年4月14日号 撮影：三島 毅氏)

国内には、このような地盤の液状化に対する十分な耐震解析手法が、確立する前に建設されている盛土も多く、盛土の耐震性の再検討による補強工事に着手する事例も多く、より簡易な盛土の液状化対策工法に関する技術ニーズが高まっている。

2.2.4 地下構造物の液状化被害事例

地盤中の地下構造物の地震時の被害は、埋設配管や共同溝等の線状構造物と、地下タンクやトンネル立坑等の面状構造に分類して考えると、次のようなパターンに分類できる。

・線状構造物の被害パターン

- (1)液状化による浮き上がり現象 (埋設配管, 共同溝等)
- (2)埋設配管の継手部の破断 (ねじ継ぎ手, 溶接継ぎ手) など

・面状構造物の被害パターン

- (1)液状化による浮き上がり現象 (マンホール, 地下タンク, 貯水池など)
- (2)地下構造物の上下振動による中間柱の剪断 など

これらの被害パターンの中で液状化の影響による被害は、面状構造物と線状構造物に共通する被害パターンとなっている、浮き上がり現象である。液状化時の地下構造物の浮き上がりに対する設計手法として、建設省の作成した“共同溝の設計施工指針”¹⁰⁾がある。盛土構造物と同様に設計施工指針の作成以前に建設された構造物の液状化被害を抑止するための補強工法に対する技術ニーズが高まっている。

3. 排水機能付き鋼材による液状化抑止工法の概要

3.1 液状化抑止工法の概要

前述したように、液状化現象は、比較的ゆるい状態で堆積している砂地盤が地震振動に伴う過剰間隙水圧の上昇によって、流動化する現象である。液状化現象が社会活動と関連しない部分で発生しても、特に工学的に重要な課題とはならない。また、社会基盤施設の近隣で液状化が発生しても、若干の沈下を伴う程度で構造物の機能に影響を与えない範囲であれば、これも設計上の対策を検討する必要はない。しかしながら、多くの場合の構造物周辺の液状化は、構造物の本来の機能に支障をきたし、何らかの対応が必要となる。以下に液状化抑止工法を分類して説明しておく。

3.1.1 締固め工法 (φ増大工法)

地盤の液状化による構造物の被害を防ぐために最初に提案された工法として“締固め工法”がある。締固め工法は土地造成のために埋め立てた土砂 (特に粘土地盤) の沈下を圧密抑止するために考案された工法である。ゆるい砂地盤の密度を高めることによって液状化を抑止することも可能であり、近年は液状化対策工法としても活用されている。一般にはサンドコンパクションパイル工法(SCP)が液状化対策工法として適用される場合が多い。

締固め工法による液状化抑止工法は、ゆるい砂地盤に砂杭を打設することによって、砂地盤の相対密度を増加させて、地盤が液状化しない程度にまで地盤改良を行う工法である。従って、設計では液状化抑止効果が、十分となる地盤改良範囲の設定と改良率が主な検討課題となる (図5参照)。

3.1.2 固化工法 (C増大工法)

軟弱地盤の地盤改良工法として、種々の固化工法が近年提案されている。固化工法とは軟弱な地盤中にセメントミルクをオーガード

リルによって攪拌注入する工法であり、地盤中に固化体を形成する工法である。改良された固化体によって周辺地盤が液状化しても、構造物に被害を与えないような固化体の強度と範囲が設計上の課題となる。固化工法として一般的なものに、関西空港の地盤改良において大規模に適用された深層固化工法 (DCM 工法) がある。

3.1.3 排水工法

締固め工法と固化工法は、砂地盤の強度を増大させることによって液状化を抑止する工法であるが、地盤の強度増加は期待せずに発生す過剰間隙水圧を即時に消散させることによって液状化の被害を防ぐ工法が排水工法である。この工法として代表的なものが碎石ドレーン工法 (GD 工法) である。

碎石ドレーン工法は地盤中に透水性の高い碎石の柱状体を施工することによって、構造物周辺の地盤の液状化に伴う過剰間隙水圧を消散させる工法である。排水工法の設計においては、他の抑止工法と同様に、碎石ドレーンによる地盤改良範囲と柱状体の配置が、検討課題となる。碎石柱の透水性能の評価と液状化時の間隙水圧の挙動に関しては、地震時の過剰間隙水圧の発生と消散という複雑な現象ゆえの技術課題も多い(図6参照)。また、地震発生によって碎石柱に流入した間隙水による碎石柱の目詰まりの発生と強震による碎石柱の崩壊を防ぐための強度確保が技術上の課題となっている。

3.1.4 排水機能付き鋼材による抑止工法

鋼管杭と鋼矢板は、建築物・橋梁等の構造物基礎や地中構造物建設のための土留め工法として、広く普及している工法である。鋼管杭・鋼矢板工法は、鋼材の持つ大きな強度と変形性能ゆえに、耐震的な工法として種々の構造物の耐震対策に適用されている。この鋼材が元来保有している耐震性能に加えて、液状化時の間隙水圧を消散させるための排水機能を付加した工法として“排水機能付き鋼材による液状化抑止工法”が開発されている。本工法は住友金属工業(株)によって開発され、新日本製鐵が技術導入し、設計・施工法の確立を狙い建設省との共同研究を進めている工法である。

図7に排水機能付き鋼材の概形を示す。鋼管杭、鋼矢板に排水性能を有する排水部材を取り付けたものである。“排水機能付き鋼材による液状化抑止工法”(以下ハイドレール工法と呼ぶ)の抑止効果として次の3点が上げられる。

- (1)鋼材の持つ強度によって、液状化時に発生する種々の外力から構造物を安全に支持する工法である。
- (2)排水部材の透水性により、液状化時に発生する過剰間隙水圧を早期に消散する工法である。
- (3)鋼材の変形性能によって、液状化時の動的な土圧・水圧を低減する工法である。

他の抑止工法に対しては、以下のような特長を有している。

- (1)鋼材の製造品質信頼性から、材料強度の評価が確実である。
- (2)排水部材の流入孔に土砂流入防止フィルターを取りつけてあるので、排水部材の目詰まりがない。
- (3)大きな強度と大きな透水性を同時に保有している工法であり、他の工法よりも施工面積が小さく経済的である。

以下に、ハイドレール工法の性能確認のために実施した模型実験の概要を記す。

4. 遠心力模型実験による液状化抑止効果の確認

土木、建築構造物の特徴としてそのスケールの大きさがある。超高層ビルのスケールは300mに至り、長大橋の場合には2000mに達しようとしている。このような巨大構造物の構造強度の確認は相似則に基づく模型実験によって実施され、建設が可能となっている。建築や橋梁の上部構造の場合には構造材料の特性(強度と剛性)が十分に把握されており、振動台実験や風洞実験等の模型実験により大部分の耐震挙動、耐風挙動の解明が可能となっている。

一方で土構造物の挙動は、土の特性(土の強度と剛性と透水性)が、スケールに依存するために完全な模型実験が確立されていない。遠心力载荷模型実験はこの課題に対応するために提案された模型実験手法であり、近年多くの研究機関に導入されている模型実験装置である。

土構造物の特徴は前述したように、土材料の特性(強度、剛性、透水性)がその拘束応力に依存する点にある。拘束応力は土圧と水圧で表現されるが、この両者は構造物のスケールによって生じているものであり、一般に土構造物の縮小模型では十分に土の挙動の再現は不可能である。土質力学の創始者である K. Terzaghi は、杭の支持力に関する模型実験を実施するために、ゼラチンを用いている。その破壊機構が十分に解明できてはおらず、杭の支持力はいまだ実

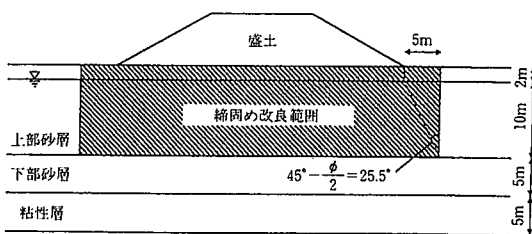


図5 締固め改良範囲

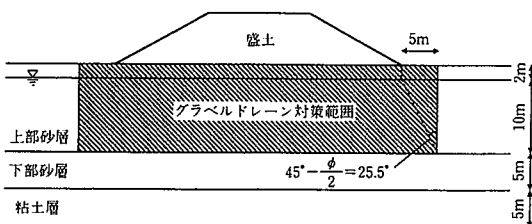


図6 グラベルドレーンの改良範囲

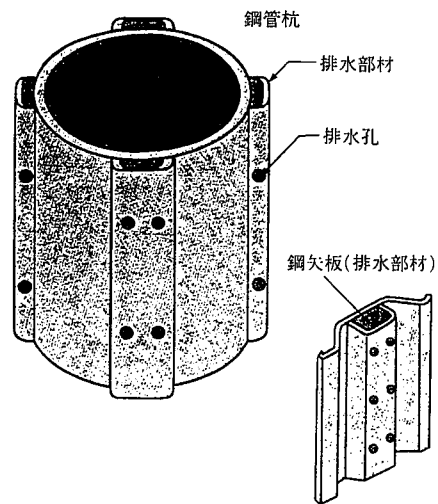


図7 ハイドレールパイル

大サイズの荷重実験によって検討される場合が多い。

更に、土構造物の模型実験の困難さは、土自体が構造物の外力となつて挙動する点にある。特に液状化問題においては、流動化地盤の構造物への作用力を評価することが重要な課題であるが、作用土圧は地盤深さと土圧係数に依存しているために、この意味でも土構造物の模型実験は更に困難なものとなる。

遠心力模型実験は、1/n の土構造物の縮小模型に原型と同一の拘束応力を発生させるために、模型土槽に遠心力を与え、模型作用する重力加速度を nG (重力加速度の n 倍) とすることによって、相似則の確保を狙った手法である。

4.1 遠心力模型実験装置の概要

図8は東京工業大学の遠心力模型実験装置である。ハイドレール工法の性能確認実験は本装置を用いて東京工業大学に委託して実施した。遠心力荷重装置は半径1mのアームによって最大150Gの加速度場を発生することができる。すなわち、遠心力荷重装置に載せる模型を20cmの土構造物とすれば、最大30mの造物の模型実験が可能となる。

図9は遠心力荷重装置に載せた振動土槽である。模型土槽の振動台実験では、側壁を固定した土槽を用いると模型地盤の振動が境界面で反射して、圧縮波が過大に発生する場合がある。これにより、地盤の液状化挙動が、自然堆積地盤の液状化状態と異なってくる場合があるために、剪断土槽を用いている。

遠心力荷重実験装置による模型実験では、長さスケールを重力加速度と遠心力加速度の比で縮小することによって、土粒子に発生している応力と歪みの大きさを実大スケールの現象と一致させている。地震振動現象は運動方程式と土の構成方程式によって支配されてい

る。構成方程式は、土の応力と歪みのレベルを一致させることで模型と原型の相似性を確保できる。運動方程式に関しては、地盤の固有周期を一致させることにより、応答特性の相似性を確保できる。地盤の固有周期に関する相似則は、おおむね次式で代表される。

$$T_m = \frac{L_m}{V_m} = \frac{L_p \times \frac{1}{n}}{V_p} = \frac{1}{n} \times T_p \quad \dots\dots(1)$$

ここに、T:時間スケール、L:長さスケール、V:剪断波速度
ただし、添字の p, m はそれぞれ、原型と模型を表している。

(1)式によって、模型の時間スケールを原型の1/n とすることで、応答に関する相似性を確保できることが分かる。

一方、液状化現象を規定する支配方程式として、透水方程式も重要な要素であり、この相似性を保つことも必要である。このためには透水時間に関する時間スケールを一致させておく必要がある。模型地盤中の透水時間は次式で記述される。

$$t_m = \frac{L_m}{v_m} = \frac{L_m}{k_m \times i_m} = \frac{L_m}{k_m \times \frac{P_m}{\rho_m g_m} \times \frac{1}{L_m}} = \frac{L_p \times \frac{1}{n}}{k_p \times \frac{P_p}{\rho_p} \times \frac{1}{n^3} \times \frac{1}{ng_p} \times \frac{1}{L_p \times \frac{1}{n}}} = \left(\frac{1}{n^2}\right) \times L_p \times \frac{1}{v_p} = \left(\frac{1}{n^2}\right) \times t_p \quad \dots\dots(2)$$

ここに、t:透水時間、k:透水係数、i:動水勾配、v:透水速度、P:水圧、ρ:密度、g:重力加速度の各代表値である。

(2)式によって、透水時間のスケールの相似性を確保するためには、時間スケールを n² で縮小する必要があることが分かる。このことは、応答に関する時間スケールの相似率との不一致となり、遠心力模型実験において、液状化現象の相似性を完全に確保することは不可能であることを示している。

これまでに実施された遠心力模型実験における液状化研究では、透水の相似性を確保する観点から、実験に使用する土中水としてグリセリン等を用いて、透水係数を 1/n に低減する等の方法で、相似則を確保している。

ハイドレール工法の開発においては、排水部材の透水抵抗における相似性を確保する観点から、排水部材中の水の流れについては、レイノルズ相似が成立する必要がある。グリセリンによってレイノルズ相似則を確保するための試算を行うと、模型排水部材の断面積が鋼矢板部材よりも大きくなり、現実的でないと結論を得た。そこで、土中水として通常の水を用いて、透水係数を低減する方法として、平均粒径を縮小する方法をとった。本実験では、豊浦標準砂よりも粒径が1/20の A8 砂を用いて実験を行い、透水時間の相似性を確保した。

4.2 地下構造物の浮き上がり対策工法の実験

4.2.1 実験概要

地下構造物の浮き上がり対策としてのハイドレール工法の効果を確認する目的で、表1の実験ケースについて実験を行った。振動加

表1 実験条件

実験コード	実験条件	相対密度 Dr (%)	入力加速度 (G)
DEC 1	無対策	41	10.6
DEC 2	普通矢板	51	10.8
DEC 3	排水矢板	46	10.6

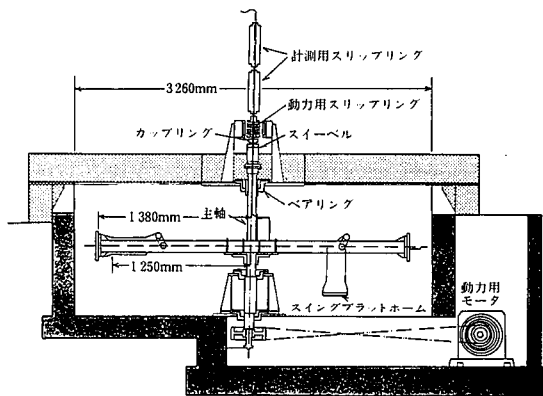


図8 遠心模型実験装置概要

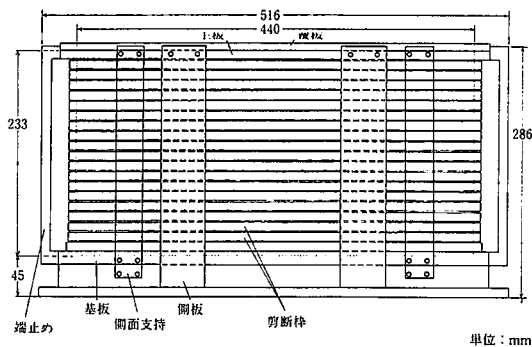


図9 剪断土槽

速度として200Gを標準とした。実験模型の状況を図10に示す。遠心加速度は50Gで、模型は1/50の縮尺となっているので、実大の地下構造物のスケールは、3m×5mの共同溝が土被り2mで埋設されているモデルとなっている。

測定項目は、地盤の加速度分布と間隙水圧分布及び、構造物の浮き上がり量である。

4.2.2 実験結果

図11に各ケースにおける共同溝の浮き上がり量の変化を示す。無対策の実験では、共同溝に200mm程度の浮き上がりが発生しており、ハイドレール工法によってこの浮き上がりが抑止できている。また、普通鋼矢板で締切りをした場合には、浮き上がり量は100mm程度であり、普通矢板であっても浮き上がり抑止効果はある程度認められる。

図12に地盤中の過剰間隙水圧の変化を示す。無対策のケースと鋼矢板締切りのケースではほぼ同様の間隙水圧の発生が認められる。ハイドレールによる対策工の有る場合には、過剰間隙水圧の発生が、1/3程度になっており、排水機能の効果が周辺地盤に現れているこ

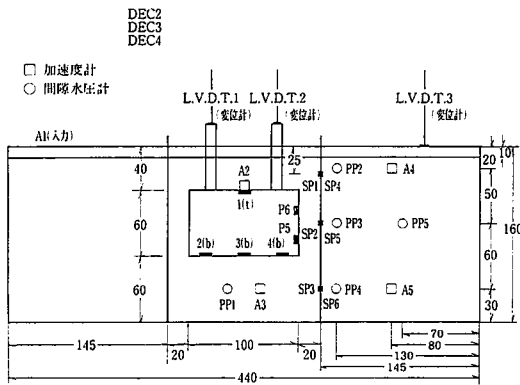


図10 計測機器及び構造物等の配置及び模型地盤の寸法

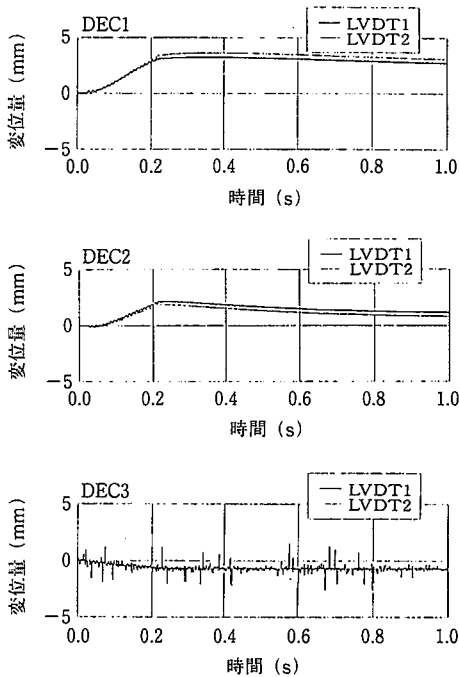


図11 構造物の変位量の経時変化

とを示している。

図13は実験地盤中に設置した鉛散弾の実験前後の位置の変化を示している。土槽は金属枠で覆われているので、鉛散弾の撮影はX線撮影で行っている。実験前後の散弾位置の変化によって、液状化による地盤の変形状態が理解できる。無対策で振動した場合には、共同溝の浮き上がりに伴い、周辺地盤の土粒子が共同溝下へ移動する状況が現れている。

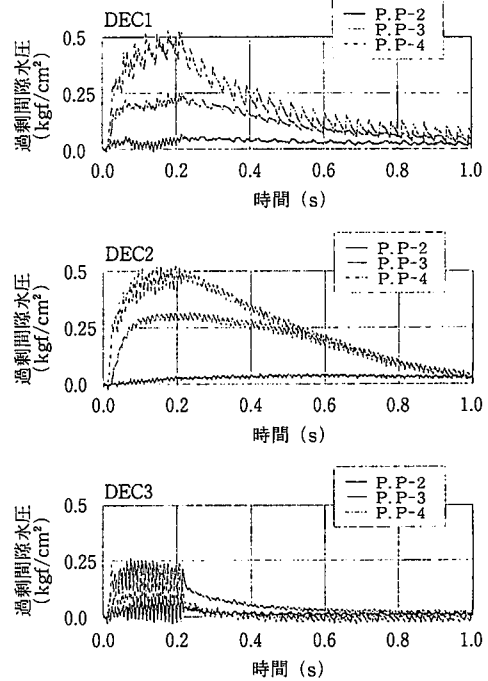


図12 過剰間隙水圧の経時変化

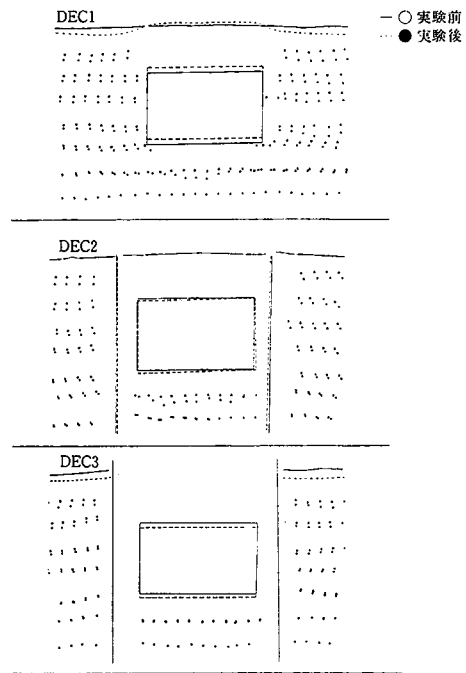


図13 X線写真による鉛散弾ターゲットの変位

4.3 盛土の沈下対策実験

4.3.1 実験概要

盛土構造物の液状化対策効果の確認をする目的で、ハイドレールによる遠心模型実験を実施した。比較工法として、無対策の場合、普通矢板で締切りを行う場合、ハイドレールで締め切る場合、タイロッド付き鋼矢板で締め切る場合、採石ドレール工法を列状に配置する場合の各ケースについて対策効果を比較した。実験ケースを表2に示す。盛土模型は上載圧による効果を引き出すために、鉛散弾によって模型を製作した。盛土模型の寸法は、実大スケールで幅7.5m、高さ5m程度の盛土を対象としている。測定項目は、地盤内の加速度及び間隙水圧の分布、盛土の沈下量である。各ケースにおける測定点を図14に示す。

4.3.2 実験結果

図15に各ケースの盛土中央部の沈下量の変化を示す。無対策のケースで大きな沈下量(150mm程度)が発生しているが、対策工の沈下量に関しては、各ケースで大きな差異はなかった。(100mm程度)盛土の沈下量に関しては各対策工による差異は少なかったが、液状化層の変形の状況を見ると、その差異が確認できる。図16に盛土端部付近の水平変位の深さ方向分布を示してある。盛土周辺地盤の水平変位は、周辺構造物に悪影響を与えるばかりでなく、盛土のすべり破壊(本実験では、鉛散弾を使用しているため破壊しない)につ

表 2 実験条件

対策	未改良	未改良	普通矢板	排水機能付き矢板	グラベルドレール(1列)	タイロッド付き矢板
実験コード	DLM1	DLM2	DLM3	DLM4	DLM5	DLM6
相対密度(%)	47	49	51	45	51	49
飽和度(%)	99.5	99.8	99.7	99.9	98.1	99.6
入力加速度(G)	8.7	11.5	11.5	8.8	9.5	11.8
震度(gal)	170	225	225	170	190	230
備考		LVDT2不良	A4~9不良	pp4不良		pp5不良

*ここで震度は原型の時のものである。

ながる変形である。水平変位が小さいほど液状化対策の効果の大きい工法と考えられる。この水平変位の抑止効果は、次の順番で大きくなっており、対策工の効果の順位を示している。

タイロッド式締切り>ハイドレール>鋼矢板締切り>砕石ドレール
既設盛土の耐震補強に関しては、上記のような順で液状化対策の効果期待できるが、概略この順位で施工費用が必要となる。既設盛

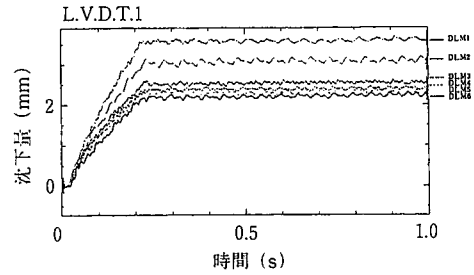


図15 沈下量の経時変化

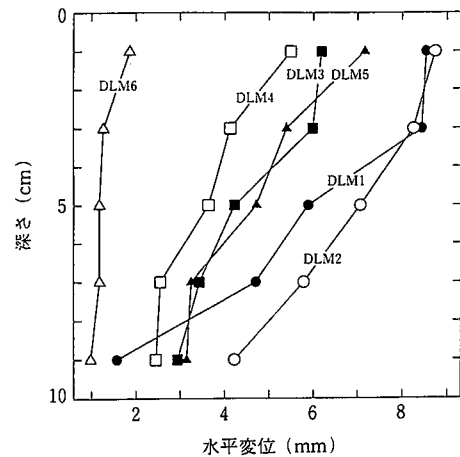


図16 盛土のり先付近の地盤中にある鉛散弾ターゲットの水平変位

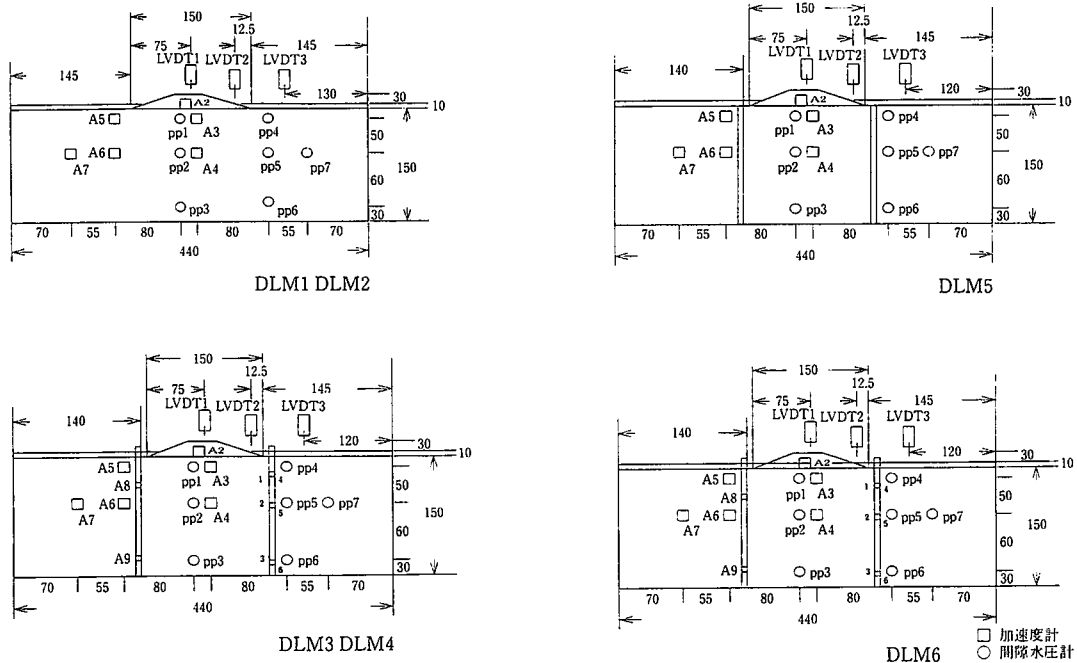


図14 計測機器の配置及び模型地盤の寸法

土の耐震補強を実施するに当たり、補強設計震度の設定と、工法の選定、想定される被害規模等をバランスさせることが重要であろう。

5. 結 言

遠心力模型実験によって、ハイドレール工法の地中構造物と盛土構造物に関する性能確認実験を実施し、その効果を明らかにできた。各種の液状化対策工法の性能は一般には1G下の振動台実験によって評価されている。相似則の成立している遠心力模型によってその効果が確認できたことにより、ハイドレールの実質的な効果を証明したことになる。

今後は、解析的な研究によって、ハイドレール工法のシュミレーション手法を確立し、設計に反映させていく必要がある。地盤の液状化を再現できる解析手法として、有効応力解析による動的FEM

解析法があるが、いまだに開発途上の解析法であり、種々の研究機関でプログラム開発が進められている。今後は、有効応力解析FEMにより、本論文にて紹介した遠心力模型実験結果のシュミレーションを実施して、プログラムの適用性を検証した後に、実設計に適用していくことが必要であろう。

参 照 文 献

- 1) Seed H.B.: J.SMFD, 94(SM5), pp.1055-1122(1968)
- 2) 石原研而 ほか: 土質工学会論文報告集, 15(1), pp.29-44(1975)
- 3) 吉見吉昭: 砂地盤の液状化. 技報堂出版, 1981, 159p
- 4) 久保慶三郎: 地震と土木構造物. 鹿島出版会, 1983, 279p
- 5) 道路協会: 共同溝設計指針. 1986