

排水機能付き鋼材を用いた液状化対策工法の開発

Countermeasure for Liquefaction Using Steel Sheet Pile with Drain Capability

田中宏征/Hiroyuki Tanaka・建設エンジニアリング事業部 土木技術研究室

喜田 浩/Hiroshi Kita・建設エンジニアリング事業部 建設技術部 次長

飯田 毅/Takeshi Iida・建設エンジニアリング事業部 建設技術部 次長 工博

才村幸生/Yukio Saimura・建設エンジニアリング事業部 東京土木建材技術室 担当課長

要 約

液状化対策用部材として開発された排水機能付き鋼材を共同溝等の地中構造物および河川堤防や道路盛土などの盛土構造物の液状化対策工法に適用した場合を取りあげ、模型振動台実験によって対策効果とそのメカニズムに関する検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。(1)地中構造物を排水機能付き鋼矢板で締め切ることにより、液状化時に生じる浮上り変位を大幅に低減できる。これは、矢板による周辺地盤の構造物下への回り込み防止の他に、構造物周辺の水圧低減、矢板周辺地盤の強度保持による矢板の変形の低減および矢板-構造物間の土粒子の構造物下への回り込み防止効果が期待できるためである。(2)盛土を排水機能付き鋼矢板で締め切ることにより、液状化時に生じる沈下量を大幅に低減できる。これは、矢板の曲げ剛性による地盤流動への抵抗および周辺地盤の液状化抑止による矢板の変形の低減効果のためである。

Synopsis

Steel piles with drain capability have been developed as a countermeasure against liquefaction of sand layers. This paper reports applicability of some of these sheet piles to countermeasures for buried structures and embankments, investigated through model tests using a shaking table. The main results are as follows:(1)Enclosing the buried structure with the sheet pile walls was effective in preventing uplift displacement due to liquefaction. This reason is that the sheet pile with drain capability was able to prevent the surrounding soil from losing its strength, so that the bending deformation of the sheet pile was reduced and soil between the sheet pile wall and the structure was prevented from flowing into the area below the structure. (2)Enclosing the embankment with the sheet pile walls was effective in protecting it from the settlement due to liquefaction. The effect of this method is to prevent the soil underlying the embankment from spreading out and to reduce the bending deformation of the sheet pile by retaining the soil strength around it.

1. 緒 言

昭和 39 年の新潟地震で地盤の液状化現象が広く認識されて以来、発生メカニズムや対策技術に関して精力的な研究が行われ、現在では各種構造物の設計基準において液状化の影響を考慮することが明記されている¹⁾²⁾。しかし、我が国では河川流域の沖積平野や埋立地等の元来液状化しやすい緩い砂質地盤上に生活圏が形成されているため、大地震のたびに液状化による被害が発生しており、対策の必要な箇所が各地に多く残されているのが現状である。そこで、構造物の特性や立地環境に配慮して液状化対策を施す必要性から、多種多様な対策工法の開発・整備への要求は根強く、従来の締固め工法の他に、杭・矢板による構造的対策工法や砕石柱、樹脂性ドレーンを使った間隙水圧低下工法

等の技術が開発・実用化されてきている³⁾。

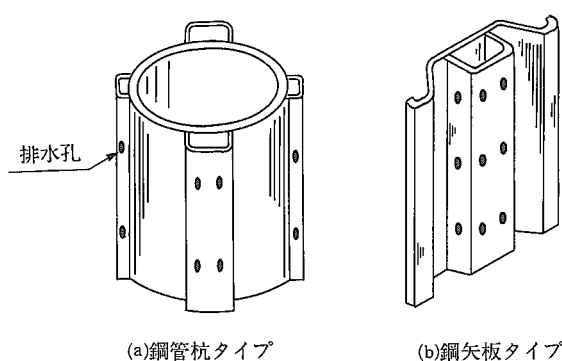
このような背景のもと、著者らは構造的対策工法と間隙水圧低下工法の効果をあわせ持つ排水機能付き鋼管杭・鋼矢板の開発を進め、振動台を用いた模型実験や現場での実大実験によって排水性能、水平抵抗等を確認し、その有効性を実証してきた⁴⁾⁵⁾⁶⁾。また、本鋼材の各種構造物の液状化対策への適用性および設計法に関する検討も実施してきている⁶⁾⁷⁾⁸⁾。ここでは、共同溝等の地中構造物および河川堤防や道路盛土等の盛土構造物の液状化対策に本鋼材を適用した場合の対策効果とそのメカニズムに関する検討結果を報告する。

2. 地中構造物の液状化対策への適用

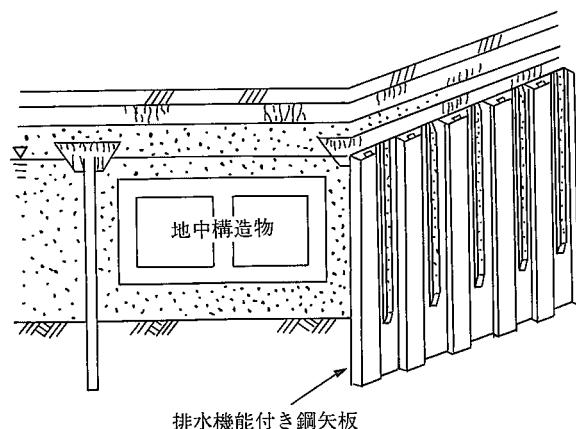
2-1 工法の概要と既往の研究成果

共同溝等の見かけ比重の小さな地中構造物が軟弱な飽和砂地盤中に埋設されている場合、地震時に周辺地盤の液状化によって浮上りなどの被害を生じる可能性がある。これは、上載圧の小さな構造物直下部に周辺の液状化地盤が回り込むためである。著者らは、その対策として第1図に示す排水機能付き鋼材の鋼矢板タイプを用いて第2図のごとく構造物を両側から締切る工法(排水機能付き鋼矢板締切り工法)に関する検討を実施している。これは、排水機能によって構造物周辺地盤の液状化を抑止するとともに、矢板壁によって土粒子の構造物直下への回り込みを防止するものである。本工法に関するこれまでの検討から以下のことが明らかになっている⁸⁾。

- (1)液状化対策として普通鋼矢板による締切りを施すと、周辺地盤の回り込み防止によって構造物の浮上りが無対策時より低減され、排水機能付き鋼矢板締切りでは構造物周辺地盤の液状化抑止効果も加わり、浮上り量は普通矢板の場合の数分の一まで低減される。
- (2)鋼矢板壁の曲げ剛性が大きいほど、周辺地盤が構造物直下へ回り込もうとする力に対する抵抗が大きく、浮上り防止効果も大きくなる。



第1図 排水機能付き鋼材



第2図 地中構造物に対する排水機能付き鋼矢板締切り工法

2-2 地中構造物への適用性に関する振動台実験

2-2-1 実験目的

液状化時の地中構造物の浮上りに影響を及ぼす要因である液状化層厚および加振加速度を変化させて模型振動台実験を行い、様々な条件下における本工法の対策効果を検証し、その有効性を確認する。

2-2-2 実験方法

実験模型と主な計測位置の例を第3図に、実験ケースを第1表に示す。模型地盤は、上層緩詰め層と下層締詰め層(目標相対密度90%)の2層構造で、いずれも千葉県産山砂($G_s=2.678$, $D_{50}=0.38$ mm, $U_c=3.21$)を用いて砂箱(幅0.5×高1×長2 m)内に水中落下させて作成した。緩詰め層の平均単位体積重量は1.86 gf/cm³(18 KN/m³)である。第3図は緩詰め層厚55 cm、締詰め層厚35 cmの場合であるが、緩詰め層厚が大きい場合には締詰め層厚を小さくし、両層厚の和を90 cmに固定した。矢板模型は、板厚1.2 mm、幅410×長900 mmの鋼板の締切り内側(構造物側)に面積開孔率4.2%で多数の孔を配した排水部材を取付けた排水機能付き矢板(以下、排水矢板)とその孔を塞いだ普通矢板の2種類である。矢板の下端は砂箱底面に固定した。構造物模型は幅500×高250×長400 mmの高剛性な鋼製中空 box で、みかけの単位重量は0.88 gf/cm³(8.6 KN/m³)である。加振は3 Hzの正弦波30波で、目標台加速度が150, 200, 300 galの3段階加振であり、主な計測項目は矢板の曲げひずみ、地盤の加速度・過剰間隙水圧、構造物の加速度・浮上り量などである。

第1表 実験ケース

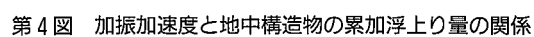
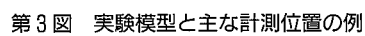
No.	矢板	板厚	層厚*	Dr*	加振条件
1	無対策	t 1.2 mm	55 cm	47.6 %	3 Hz 正弦波 30 波
2	無対策	t 1.2 mm	70 cm	41.5 %	
3	無対策	t 1.2 mm	90 cm	41.5 %	
4	普通矢板	t 1.2 mm	55 cm	47.8 %	
5	普通矢板	t 1.2 mm	70 cm	52.7 %	150, 200, 300 gal の 3 段階加振
6	普通矢板	t 1.2 mm	90 cm	57.9 %	
7	排水矢板	t 1.2 mm	55 cm	57.3 %	
8	排水矢板	t 1.2 mm	70 cm	55.6 %	
9	排水矢板	t 1.2 mm	90 cm	57.6 %	

*層厚：緩詰め層の層厚 Dr：緩詰め層の相対密度

2-2-3 実験結果および考察

(1)加振加速度と累加浮上り量の関係

加振加速度と累加浮上り量の関係を第4図に示す。第4図(a)は緩詰め層厚55 cm、(b)は70 cm、(c)は90 cmに対する結果である。これらの図より、無対策時には緩詰め層厚が大きくなるにつれて構造物の浮上り量が急増すること、普通矢板締切りでも無対策時に比べて浮上り量が低減されているが、緩詰め層厚が大きい場合や加振加速度が大きい



場合に比較的大きな浮上りが認められること、排水矢板締切りでは、緩詰め層 70 cm までは加振加速度にかかわらず、また緩詰め層 90 cm でも 200 gal まではほとんど浮上りが見られないことがわかる。以上のことから、構造物下方の液状化層の厚さが浮上り量に大きく影響すること、これが大きく、かつ加振加速度が大きい場合には緩詰め層のかなり深いところまで液状化が進行するため、普通矢板締切り時には対策効果が不十分になる可能性があること、などがわかる。

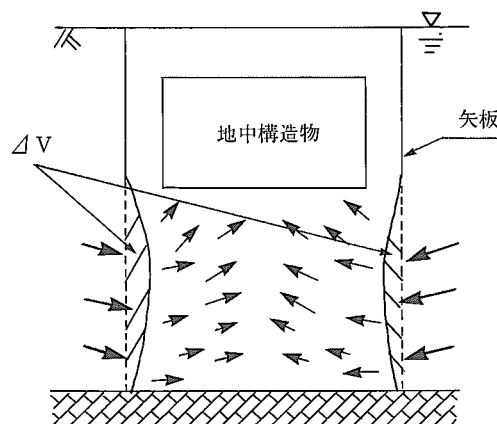
(2)排水機能付き鋼矢板締切り工法のメカニズム

第 5 図に締切り内側の矢板から 5 cm 位置での過剰間隙水圧と矢板の曲げひずみの経時変化を、緩詰め層厚 90 cm の実験 No.6 (普通矢板)、No.9 (排水矢板) の 150 gal 加振について示す。水圧、ひずみともに加振につれて漸増する平均的な成分とその周りを振動する振動成分が見られる。ひずみの振動成分では普通・排水両矢板の間に差は見られないが、平均成分の絶対値では排水矢板の方が小さい。これは、締切り内側の過剰間隙水圧が普通矢板より小さいことから、排水機能による矢板周辺地盤の強度保持効果によると考えられる。このひずみの平均成分は第 6 図に示すように構造物下部での矢板の内側への曲げ変形を示し、これによる体積変化 ΔV は構造物の浮上り変位の原因となる。したがって、ひずみの平均成分が小さいことは、構造物周りの水圧低減⁹⁾と並んで、排水機能付き矢板締切りが地中構造物の浮上り防止に効果的な理由の一つである。

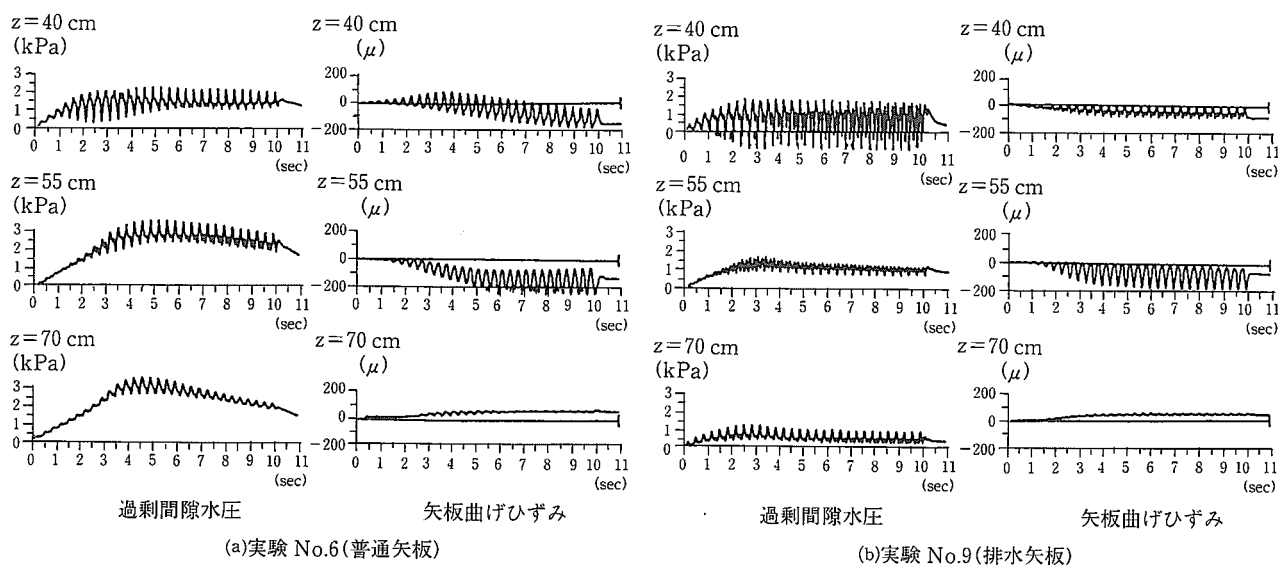
(3)構造物浮上り量の予測方法

鋼矢板締切り時の構造物の浮上りは矢板の曲げ変形と関係が深いと考えられることから(第 6 図)、構造物下部の体積変化量 ΔV を構造物底面積で除すことによって、浮上り

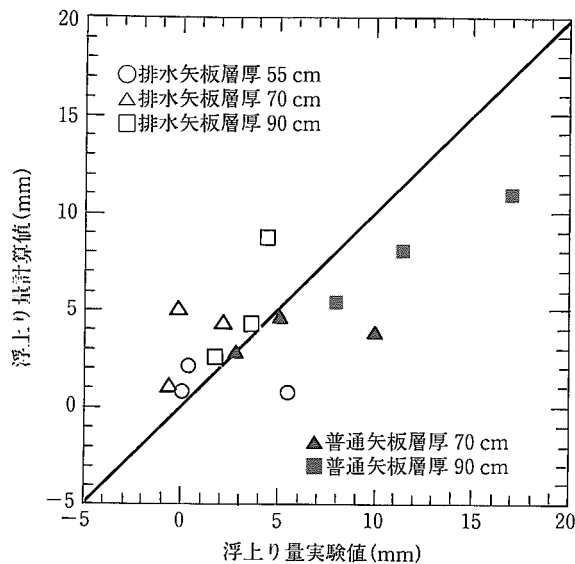
量の算定を試みた⁹⁾。 ΔV の計算にはひずみの実測値から求めた矢板の変形量を用いた。浮上り量の実験値と計算値の比較を第 7 図に示す。なお、普通矢板の緩詰め層厚 55 cm はひずみ計測不良のため計算対象から外した。図より、計算値と実験値は概ね対応しているが、緩詰め層厚によらず、普通矢板では実験値の方が、排水矢板では計算値の方が大きくなる傾向が見られる。この原因として、普通矢板では矢板-構造物間の土粒子の構造物下部への回り込みによる浮上りを考慮していないこと、一方、排水矢板では矢板-構造物間の土粒子が保持されていることに加え、構造物下部地盤中の間隙水を排水するため体積変化が全て浮上に寄与しないことなどが考えられる。このことから、矢板-構造物間の土粒子の保持も排水機能付き矢板締切りが地中構造物の浮上り防止に効果的な理由の一つと考えられる。



第 6 図 矢板の曲げ変形による地中構造物の浮上り



第 5 図 過剰間隙水圧と矢板曲げひずみの経時変化例



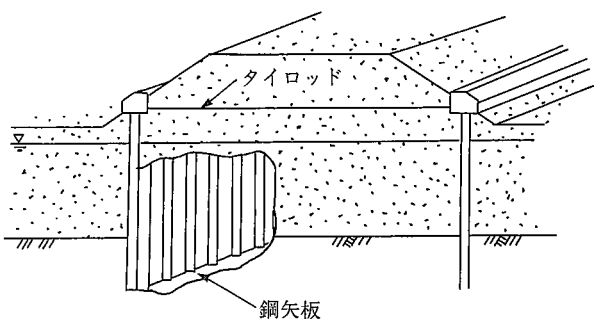
第7図 地中構造物の浮上り量の実験値と計算値の比較

3. 盛土構造物の液状化対策への適用

3-1 工法の概要

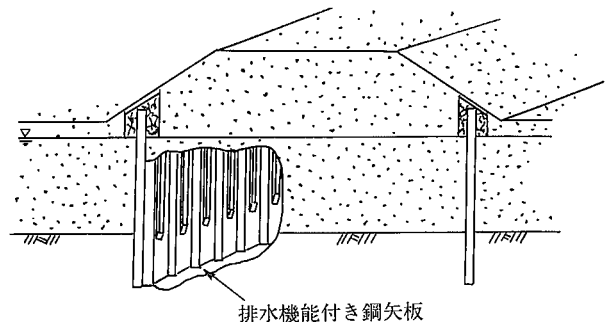
軟弱地盤上の盛土構造物が地震によって被災した例が過去に数多く報告されている。これらは、軟弱地盤内での加速度増幅による慣性力の増大や、基礎地盤の液状化による支持力の低下などが原因で発生したものである。ここでは、後者の基礎の液状化による盛土の被災防止を目的とした対策工について報告する。

盛土構造物の基礎地盤部が液状化して支持力を失うと、盛土の重みによって直下地盤が側方へ流動し、堤体の沈下や斜面崩壊等の被害が生じる。その対策工の一つに、第8図に示すように、盛土の両側の尻部に矢板壁を打設し、それらの頭部をタイロッドで結合したものが¹⁰⁾。タイロッドは地盤の流動力による矢板壁の曲げ変形の低減が目的であるが、河川堤防ではこれが水みちを形成すること、既設盛土では施工が困難であること等から適用に制限を受ける



第8図 鋼矢板とタイロッドによる盛土の液状化対策

ことも多い。そこで、タイロッド無しの自立矢板壁による対策として、第9図に示すように、周辺地盤の強度保持効果を利用した排水機能付き鋼矢板締切り工法が考えられる。



第9図 盛土に対する排水機能付き鋼矢板締切り工法

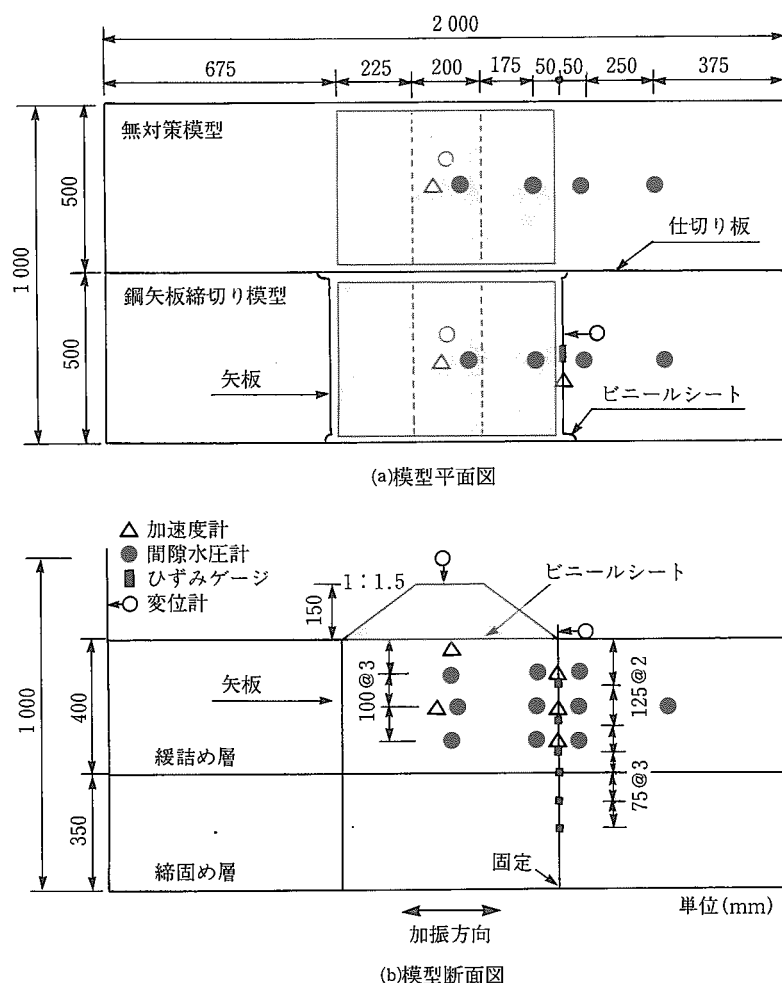
3-2 盛土構造物への適用性に関する振動台実験

3-2-1 実験目的

盛土の液状化対策として、排水機能付き(自立)鋼矢板締切りに加え、タイロッド付きの普通鋼矢板締切り、自立普通鋼矢板締切りを取りあげ、対策効果とメカニズムに関して模型振動台実験による検討を行う。

3-2-2 実験概要

実験模型と主な計測位置を第10図に、実験ケースを第2表に示す。地盤は千葉県産山砂($G_s=2.678$, $D_{50}=0.38$ mm, $U_c=3.21$)を用いて砂箱(長 $2 \times$ 高 $1 \times$ 奥行 0.5 m)内に水中落下にて作成した。上層が緩詰め、下層が締め固め(目標相対密度90%)の2層構造で、緩詰め地盤の平均単位体積重量は 1.86 gf/cm³(18 KN/m³)である。盛土部は遮水のため基礎地盤上にビニールシートを敷き、同じ砂を用いて含水比20%、単位体積重量が約 1.6 gf/cm³(15.7 KN/m³)となるよう作成した。模型矢板は板厚 $t=3.2$ mm、高 $780 \times$ 幅 410 mmの鋼板で、排水機能付き矢板(以下、排水矢板)の場合は、表面に開孔率16%の通水孔をもつ曲げ剛性の小さい蛇腹式のパイプ(外径15 mm)にステンレスメッシュを巻付けた排水部材を鋼板の両面に3本ずつ鉛直方向に取付けた。盛土部に排出水が浸透し悪影響を及ぼさないように排水処理として、実験No.3では締切り内側の排水部材頭部に、実験No.4では締切り内外全ての排水部材頭部に長さ20 cm、外径5 mmのビニールパイプを連結しており、後者の方が排水能力が小さくなっている。タイロッドは $\phi 3$ mmの鋼線で、事前に緊張力は導入していない。計測項目は、盛土天端の沈下量と加速度、矢板の加速度・曲げひずみ・頭部の水平変位、地盤の加速度・間隙水圧である。加振は振動数3 Hzの正弦波30波で、目標台加速度は200 galである。



第 10 図 実験模型と主な計測位置の例

第 2 表 実験ケース

No.	矢板種類	Dr [*]	台加速度
1	無対策	49.3 %	228 gal
2	自立普通矢板	66.3 %	213 gal
3	自立排水矢板	52.7 %	222 gal
4	自立排水矢板(能力小)	53.9 %	214 gal
5	普通+タイロッド	53.6 %	218 gal

*) 緩詰め層の相対密度

3-2-3 実験結果および考察

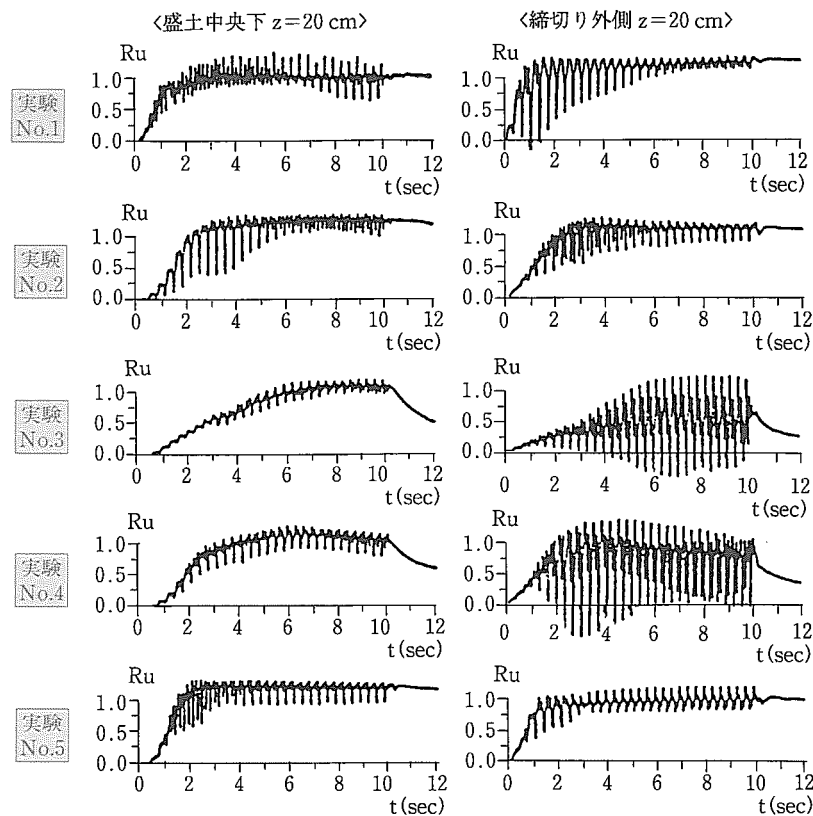
(1) 過剰間隙水圧の経時変化

盛土中央および締切り外側(矢板から 5 cm 位置)の深さ $z=20$ cm における過剰間隙水圧の経時変化を第 11 図に示す。図の縦軸は過剰間隙水圧比 $Ru = \Delta u / \sigma_{v0}$ で示している (Δu : 過剰間隙水圧, σ_{v0} : 有効上載圧)。締切り外側では実験 No.3 を除き 2~3 sec で液状化に達している。盛土下部でも上載圧の効果が小さいため液状化に至っている。排水矢板に着目すると、締切り内外とも排水能力が小さい実験 No.4 では締切り外側で若干の水圧低減が見られるに

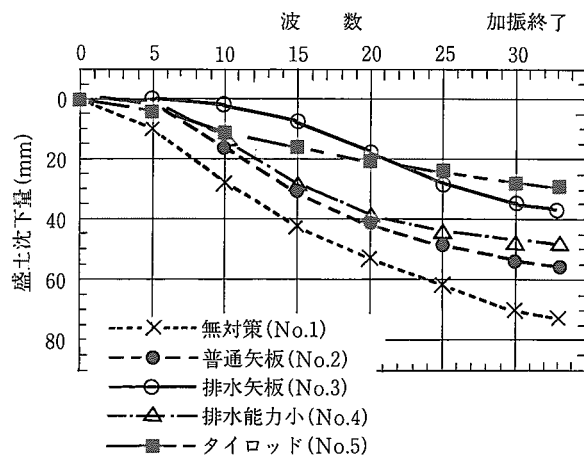
過ぎないが、実験 No.3 では水圧の上昇が遅いため排水能力が高い締切り外側では加振終了まで液状化に至らず、排水能力が小さな内側でも 5~6 sec まで水圧抑制効果が認められる。これは締切り外側地盤の強度保持によって締切り内側地盤のせん断変形拘束効果が生じたためと考えられる。

(2) 各対策工の効果比較

加振波数に対する盛土天端沈下量の変化を第 12 図、実験 No.1,2,3,5 における盛土の最終変形状態を第 13 図に示す。第 12 図によれば盛土の沈下は実験 No.3 を除き 5 波目以降に、No.3 では 15 波目以降に急増している。これは、第 11 図においてそれぞれの地盤が液状化する時刻とほぼ対応しており、排水矢板の水圧低減効果が沈下防止に有効に機能したことがわかる。また、22 波目以降では No.3 と No.5 で沈下量が逆転している。これは、締切り内側地盤の液状化後には、タイロッドによる矢板の変形拘束の方が効果を発揮するためと考えられる。なお、排水能力の小さい実験 No.4 は普通矢板 (No.2) との差が小さいことから、地盤・加振条件に見合った適切な排水能力の設定が必要なが

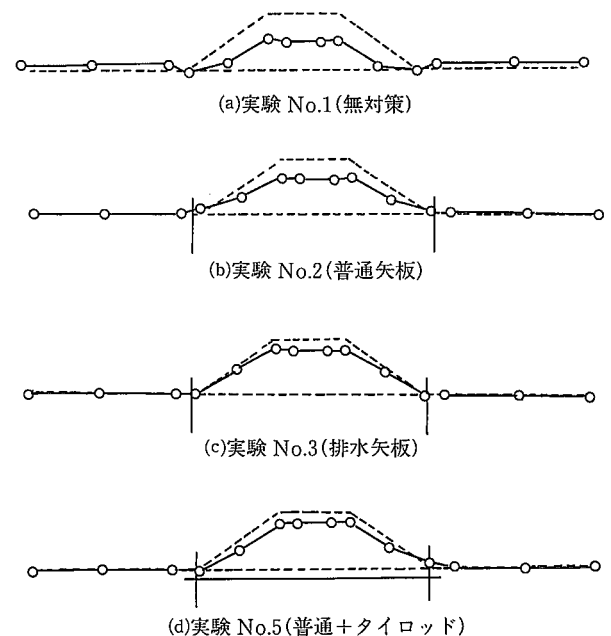


第11図 過剰間隙水圧の経時変化



第12図 盛土の沈下量の経時変化

第13図より天端中央が若干陥没するがすべり等は見られず、盛土がほぼその形状を保ったまま沈下したことがわかる。これは、今回の実験では盛土基礎地盤の液状化によって盛土部に伝達される加速度が低減され、斜面崩壊などを生じることなく盛土が自身の重みによって基礎中に沈み込んだためと考えられる。図(a)の無対策では盛土の沈下が大きく周辺地盤が隆起しており、盛土の沈下によって直下地盤が側方へ流動したことがわかる。(b), (c), (d)では盛土の



第13図 盛土の最終変形状態

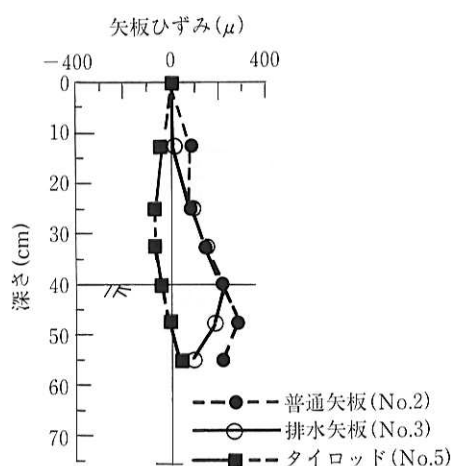
沈下が低減され、側方地盤の隆起も見られない。これは、矢板が直下地盤の側方への流動を抑止したためと考えられ、地盤が液状化した後も矢板の変形を確実に拘束するタイロッドの場合には天端中央の陥没も見られない。

技術報文

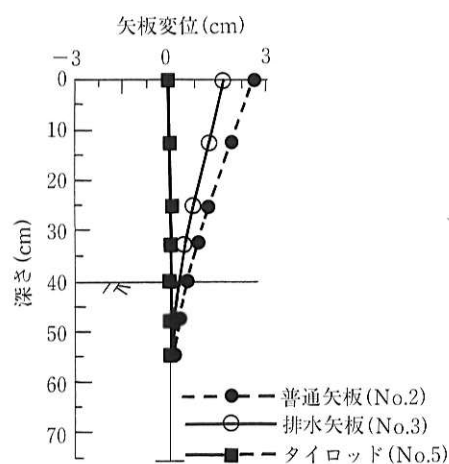
(3)各対策工法のメカニズム

加振後の矢板の残留ひずみとそれから求めた残留変形を実験 No. 2, 3, 5 について第 14 図に示す。普通矢板の No. 2 と排水矢板の No. 3 では矢板が片持ち梁状に締切り外側へ変形しているが、変位量は No. 3 の方が小さい。これは、排水機能によって矢板周辺地盤の強度が保持されていたためと考えられ、実際に液状化抑止効果が顕著な 5 sec までは

ほとんどひずみが生じていなかった。No. 5 ではタイロッドの拘束により矢板頭部の変位はほとんどなく、液状化層内で外側へはみ出す変形状態である。以上より、盛土の沈下に対する各対策効果は、普通矢板ではその曲げ剛性、排水矢板では曲げ剛性と周辺地盤の強度保持、タイロッドでは矢板頭部の変位拘束による締切り外側への矢板の変形の低減に起因することがわかる。



(a) 矢板の残留ひずみ



(b) 矢板の残留変形

第 14 図 矢板の残留ひずみと残留変形

4. 結 言

排水機能付き鋼矢板を用いた共同溝等の地中構造物および河川堤防や道路盛土などの盛土構造物の液状化対策工法について対策効果とそのメカニズムに関する検討を行った。主な結果を以下に示す。

(1)地中構造物を排水機能付き鋼矢板で締め切ることにより、液状化による浮上り変位が抑止される。これは、矢板壁による周辺地盤の構造物直下への回り込み防止に加え、排水機能による構造物および矢板周辺地盤の液状化抑止、それによる矢板の変形の低減、矢板-構造物間の土粒子の構造物下への回り込み防止のためである。

(2)盛土の液状化対策に関しては、自立普通鋼矢板締切りでは十分な沈下抑止効果を得られにくいのに対し、排水機能付き鋼矢板締切りでは、盛土の沈下量を大幅に低減できる。これは、前者では地盤の液状化抑止効果を期待できず、地盤の流動力に対し矢板の曲げ剛性だけで抵抗するのに対し、後者では排水機能による周辺地盤の液状化抑止効果と、それによる矢板の変形の低減を期待できるためである。

なお、上記の他に、著者らは鋼矢板に作用する外力の定式化、設計用力学モデル等設計法に関する検討や¹¹⁾¹²⁾¹³⁾、排

水機能付き鋼管杭の各種構造物への適用性についての検討も実施している¹⁴⁾。これら排水機能付き鋼材を用いた液状化対策のいくつかは実用化段階に入っており、今後は、施工実績を積み重ねて適用性の実証に努めるとともに、より合理的な新しい対策工法の提案に向けて検討を実施してゆく予定である。

最後に、本研究は建設省土木研究所との共同研究「液状化対策工法」に関する研究の一環として実施したものであり、貴重な御助言を賜った関係各位に謝意を表します。



田中宏征/Hiroyuki Tanaka

建設エンジニアリング事業部
土木技術研究室

(問合せ先: 0479(46)5128)

参考文献

- 1) 財団法人道路協会, 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編(平成2年2月)
- 2) 財団法人道路協会, 共同溝設計指針(昭和61年3月)
- 3) 安田進, 液状化の調査から対策工まで(昭和63年11月), 鹿島出版会
- 4) 西谷, 才村, 水田他, 排水機能付き鋼杭の液状化抑止効果に関する現場実験(その1, その2), 第27回土質工学研究発表会(平成4年), p.1167~1170
- 5) 喜田, 飯田, 飯村, 孔あき杭の排水効果に関する模型実験, 土木学会第43回年次学術講演会講演概要集, 第III部門(昭和63年10月), p.426~427
- 6) 財団法人地震予知総合研究振興会, 排水機能付き鋼材を用いた液状化対策としての設計ガイドライン(平成4年3月)
- 7) H.Kita, N.Nishitani & S.Noda, Experimental study on countermeasures for liquefaction by steel piles with drain, Proceedings of the 10th world conference on Earthquake engineering(1992), pp.1701~1706
- 8) 建設省土木研究所, 軟弱地盤耐震対策工法に関する共同研究報告書(平成5年5月), p.123~136
- 9) 吉見, 森他, 止水壁を用いた地中構造物の浮上り対策, 地盤の液状化対策に関するシンポジウム発表論文集(平成3年2月), p.263~268
- 10) 那須: 盛土の地震被害例と変状対策, 鉄道技術 44-3(昭和62年)
- 11) 建設省土木研究所, 軟弱地盤耐震対策工法に関する共同研究報告書(その2)(平成6年6月), p.192~207
- 12) 田中, 喜田, 飯田, 才村, 鋼矢板締切りによる埋設構造物の液状化対策に関する検討, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集(平成6年), p.1345~1350
- 13) 喜田, 田中, 排水機能付き鋼矢板締切りによる埋設構造物の液状化対策, エネルギー施設の液状化対策シンポジウム講演概要集(平成6年4月), pp.43~44
- 14) 野田, 喜田, 飯田, 排水機能付き鋼杭による盛土の変状抑止に関する模型実験, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, 第III部門(平成2年9月), p.668~669