

地中構造物の液状化時浮上がり抑制工に関する重力場振動台実験

廣岡 明彦¹・新井 章太²・永瀬 英生³・清水 恵助⁴

¹正会員 工博 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 (〒804 北九州市戸畑区仙水町 1-1)
²学生会員 九州工業大学大学院 工学研究科 (〒804 北九州市戸畑区仙水町 1-1)
³正会員 工博 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 (〒804 北九州市戸畑区仙水町 1-1)
⁴正会員 工博 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

締固め工法は、液状化抵抗の増加により地震時の液状化に伴う地盤災害を抑制することを目的として従前より実施されている工法であり、締切り工法は、地震時の地盤のせん断変形抑制並びに周辺地盤からの浸透による構造物近傍地盤の過剰間隙水圧上昇の抑制を目的とした工法である。両工法ともに、地震時の液状化に伴う地中構造物の浮上がりに対し抑止効果を期待し得る工法であるが、その効果および設計法については不明確な点が多く残されている。そこで本研究は、地盤内に地中構造物を埋設し、矢板による締切り工法、締固め工法並びに両者を併用した場合の重力場模型振動台実験を実施し、地中構造物の浮上がり防止効果に対し、諸条件が与える影響について調べた。

Key Words : Liquefaction, Underground structure, Compaction, Sheet pile wall, Deformation, Shaking Table Test, Earthquake resistant

1. 研究の目的並びに背景

締固め工法は、液状化抵抗の増加により地震時の液状化に伴う地盤災害を抑制することを目的として従前より実施されている工法であり、締切り工法は、地震時の地盤のせん断変形抑制並びに周辺地盤からの浸透による構造物近傍地盤の過剰間隙水圧上昇の抑制を目的とした工法である¹⁾。両工法ともに、地震時の液状化に伴う地中構造物の浮上がりに対し抑止効果を期待し得る工法であるが、その効果および設計法については、不明確な点が多く残されている。締固め工法においては、締固め領域の相対密度、液状化層厚並びに地中構造物の深さ等の条件に対する合理的な締固め範囲の決定方法について、締切り工法においては、構造物周辺地盤性状に対する締切り部材剛性の決定に関して、また両工法を併用した場合についてはその耐振性向上の評価方法に関して調べた定量的研究が少ないというのが現状である。そこで本研究では、緩い飽和砂地盤内に地中構造物を埋設し、矢板による締切り工法、締固め工法並びに両者を併用した場合の重力場模型振動台実験をそれぞれ実施し、地中構造物の浮上がり抑制効果に対し、締固め工法においては締固め範囲と地中構造物の埋設深さが、締切り工法においては

締切り矢板の有無並びに両工法の併用が与える影響について調べた。

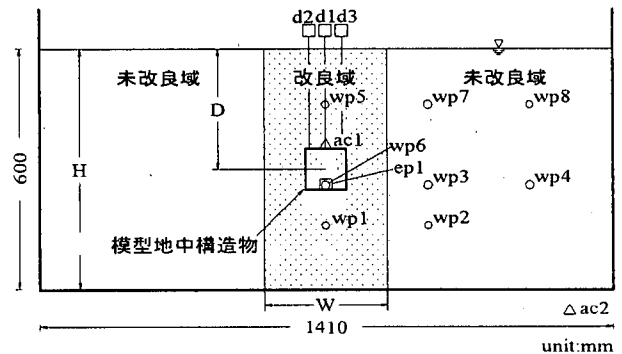


図-1 実験システム (締固め)

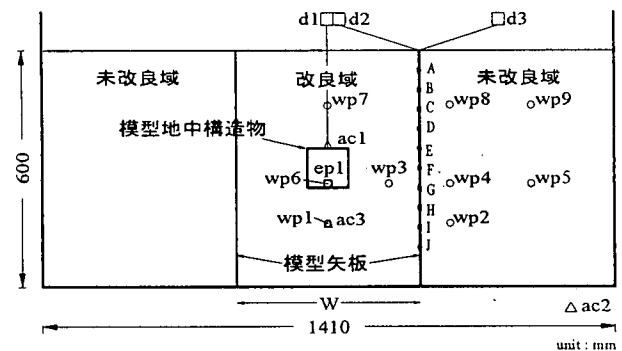


図-2 実験システム (締切り)

表-1 各物理量に対する相似則

	λ	0.1
透水性	$\lambda^{0.75}$	0.178
時間	$\lambda^{0.75}$	0.178
加速度・密度	1	1
歪	$\lambda^{0.5}$	0.316
曲げ剛性	$\lambda^{3.5}$	3.16×10^{-4}
変位	$\lambda^{1.5}$	0.032

表-2 実験条件

実験コード	模型設置深さ D (cm)	改良幅 W (cm)	入力加速度振幅 (gal)
D15W0	15	—	270
D15W30	15	30	300
D15W60	15	60	300
D30W0	30	—	280
D30W30	30	30	360
D30W60	30	60	360

表-3 実験条件

実験コード	対策工	改良幅 W(cm)	入力加速度振幅 (gal)
W45	締固め工	45	290
SW0	締切り工	—	290
SW45	締固め工 締切り工	45	300

2. 実験方法並びに条件

本研究で用いた模型の縮尺は想定した実物の 1/10 であり、その概要を図-1, 2 に示す。表-1 は井合の相似則²⁾における各物理量の比 λ (模型/実物) を表しており、本実験の各種模型寸法等の決定に際してはこれを適用した。ここで地中構造物模型は W100×H100×D440mm, $\rho=0.986\text{g/cm}^3$ の中空アクリル製躯体とし、模型地盤は豊浦珪砂を用いて内寸 W1410×H700×D450mm のせん断土槽内に不飽和砂締固め法により作製し、その相対密度を未改良域では 20%、改良域では 70% に設定した。また、間隙流体には水の約 6 倍の粘性を持つメチルセルロース溶液を使用し、振動実験前後の砂の地盤の流動変形が観察できるように、せん断土槽前面内側と模型地盤内にはヌードルターゲットを埋設した。締固め工法に関する一連の実験の実験条件を表-2 に、締切り工法に関する一連の実験の実験条件を表-3 に示す。図-3 に示した振幅約 300gal, 周波数 3Hz の正弦波を約 10 秒間入力し、加振実験を実施した。これは、実物において周波数 0.5Hz の正弦波振動が 1 分程度持続したことに相当する。加振実験中、模型構造物の鉛直変位・加速度応答、模型構造物底面での間隙水圧・鉛直土圧、模型地盤の加速度応答・間隙水圧をそれぞれ測定した。尚、模型矢板は、実物での曲げ剛性が $1.21(\text{kN} \cdot \text{m}^2)$ となる様にモデル化した。

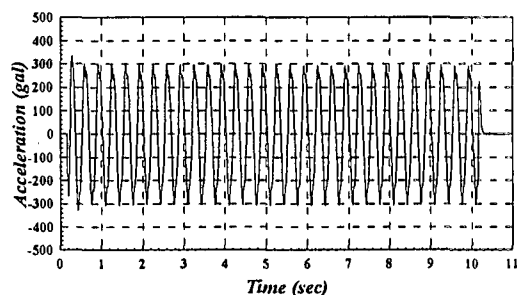


図-3 入力加速度破波形

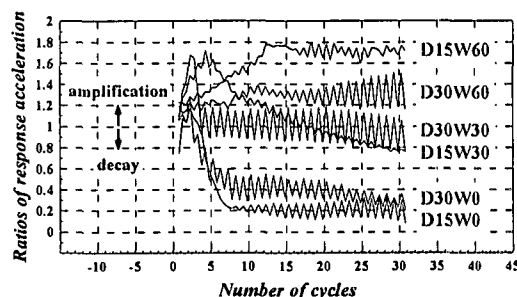


図-4 加速度応答倍率の経時変化

3. 実験結果および考察

(1) 締固め工法に関する一連の実験について

入力加速度振幅(ac2)に対する構造物加速度振幅(ac1)の比を加速度応答倍率と定義し、この経時変化を図-4 に示す。改良域を設けていない W0 での応答加速度振幅は入力加速度振幅に対し振動開始直後から著しく減衰し、その値は共に約 0.2 まで低下する。改良域を設けた W30 においては途中から緩やかに減衰が生じ、W60 では入力加速度より大きな振幅を持つ加速度が振動中構造物に作用していた様子が観察される。改良域を設けていない場合に構造物での応答の減衰が顕著となることから、振動による模型周辺の地盤剛性の低下が構造物の応答特性に大きな影響を与えていることが推察される。また、D15 での応答は、減衰する場合においても増幅する場合においても、D30 と比べ顕著である。これより振動に伴う地中構造物の応答特性変化は、埋設深さが浅い程大きいことが指摘できる。

図-5 に D15 における振動中での過剰間隙水圧比の最大値をプロットしたものを示す。グラフ縦軸は地表面からの深さを表わし、鉛直方向に並んだ間隙水圧計を同一のシンボルで表記した。また、図-6 は、D15 において改良域を設けた場合の間隙水圧の上昇開始時刻と改良域中心部からの距離との関係を整理したものである。図-4,5,6 を比較すると、D15W30 では模型構造物の応答加速度に減衰が生じる時刻と過剰間隙水圧の上昇時刻がほぼ一致しており、構造物での過剰間隙水圧比の値が大きい程、加速度の減衰が著しい。これより、過剰間隙水圧の上昇は地盤剛性の低下を促し、それに伴い構造物の

応答に減衰が生じていることが推測できる。一方、D15W60 においては構造物での過剰間隙水圧比の値が小さく、応答加速度が振動開始から増幅している様子が観察されることから、改良幅を広げることにより過剰間隙水圧の発生と、それに伴う地盤剛性の低下を抑制する効果が増大することが推察される。図-6 より、間隙水圧の上昇開始時刻は、締固め範囲が広く、さらに改良域中心に近くなる程、遅くなることを指摘できる。

図-7 は各実験における模型構造物の浮上り量と締固め範囲の関係をまとめたものである。これより、埋設深さに関わらず、浮上り量の減少傾向は締固め幅の増加と共に顕著に現れていることが理解でき、D15、D30 とともに液状化層厚 H に対する締固め幅 W の比 W/H が 1.0 になる時、地盤全域を改良した場合と同程度の浮上り抑制効果を得られたことがわかる。これより、模型埋設深さ D に関わらず W/H が 1.0 程度であれば構造物の十分な浮上り抑制効果が得られると考えられる。また、 W/H が 1.0 より小さい場合には D15 は D30 より大きな浮上りが生じていることから、 W/H が 1.0 以下に

おいては、埋設深さ D が構造物の浮上り量により大きな影響を与えるものと考えられる。

変位ベクトル図を図-8 に示す。改良域を設けた W60 では共に構造物周辺の地盤流動が顕著に抑制されている様子が観察されるのに対し、W30 では改良域内においても模型側方の地盤が模型底部へ大きく流動している様子が観察され、その流動は D15 が大きいことがわかる。

(2) 締切り工法に関する一連の実験について

図-9 に示したこの実験シリーズの加速度応答倍率の経時変化より、全ての実験ケースで模型構造物の応答加速度振幅は加振開始直後に増幅し、その後、締固め工を施していない D30W0、SW0 では減衰が生じ、締固め工を施した W45、SW45 では入力加速度より大きな振幅を持つ加速度が振動中模型構造物に作用していた事が観察される。また、締切り工を施していない D30W0、W45 において、D30W0 では SW0 に比べ急激な模型構造物応答加速度の減衰が観察され、W45 では SW45 に対し振動初期は応答加速度挙動が類似していたものの、振動終了

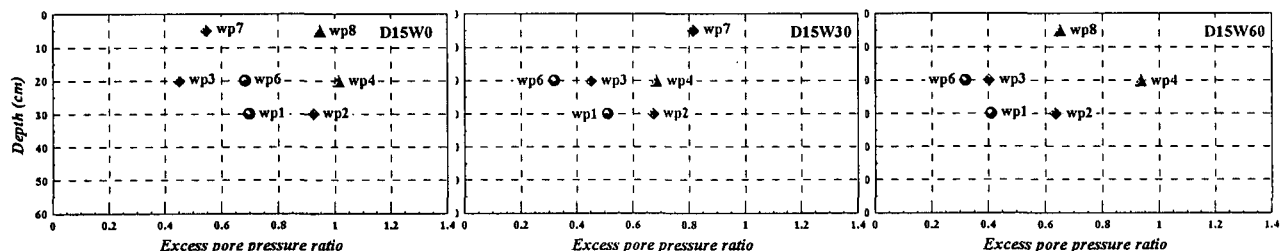


図-5 過剰間隙水圧比の最大値

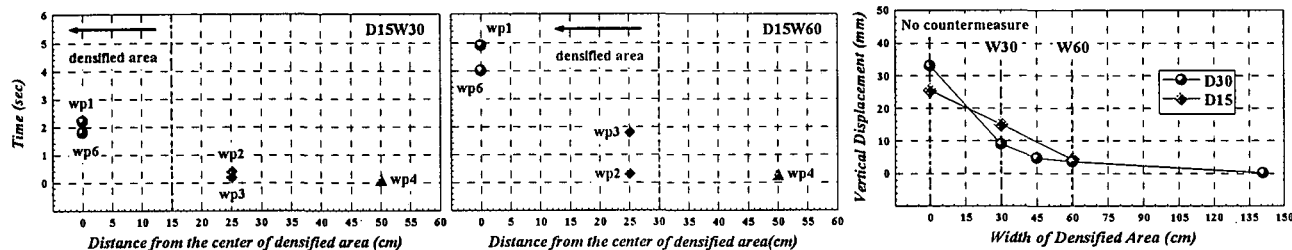


図-6 過剰間隙水圧上昇開始時刻

図-7 締固め幅と浮上り量の関係

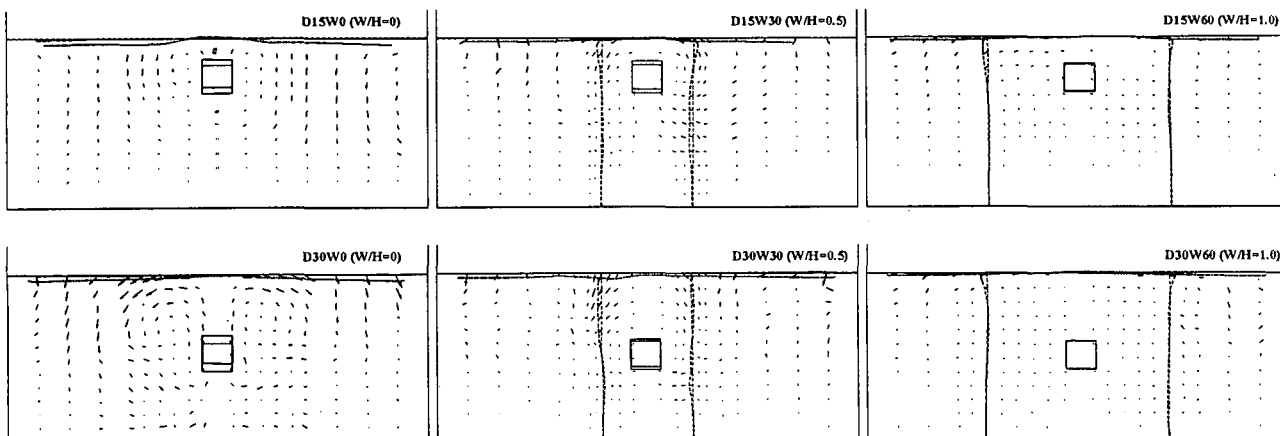


図-8 変位ベクトル図

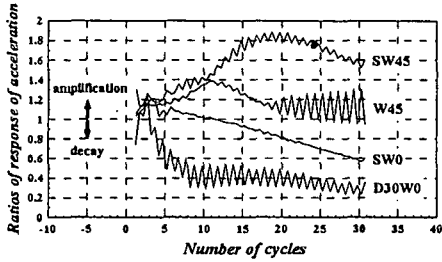


図-9 加速度応答倍率の経時変化

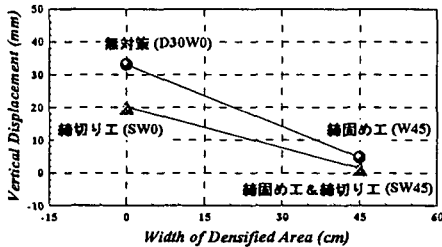


図-10 対策工と浮上り量の関係

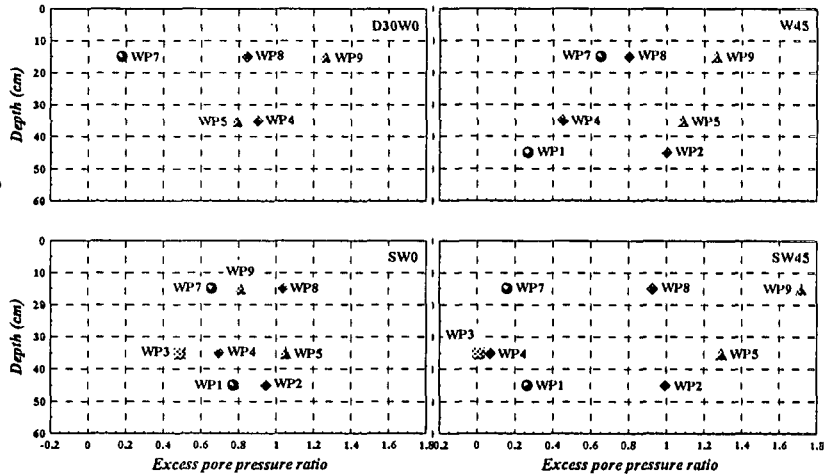


図-11 過剰間隙水圧比の最大値

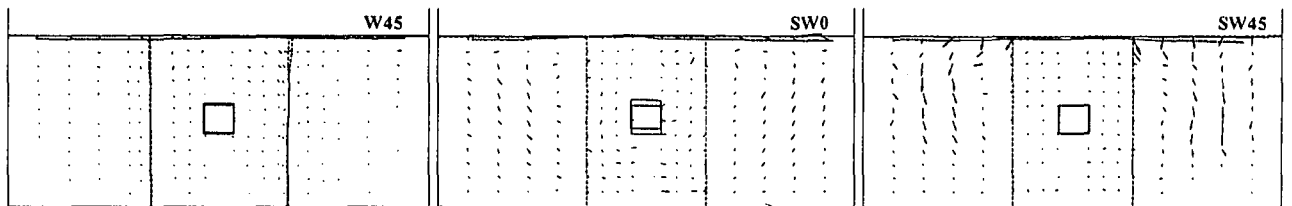


図-12 変位ベクトル図

寺には両者の加速度応答倍率はSW45で大きい。

各実験ケースにおける振動終了時の模型構造物浮上がり量と、地盤の締固め範囲の関係を示したものが、図-10である。各実験ケースにおける振動終了時の模型構造物浮上がり量を、無対策であるW0での振動終了時における浮上がり量で除した値を比較すると、矢板を埋設したSW0では5/8、締固め工法を適用したW45では1/7、締切り工と締固め工の両対策を施したSW45においては、1/23となった。

図-11に振動終了時までの各実験ケースにおける過剰間隙水圧比の最大値を図-5と同様にプロットしたものを示す。まず、無対策であるD30W0では模型構造物上部に位置するWP7を除くと、過剰間隙水圧比が1付近に集中していることから、模型地盤全体の剛性が低下している様子が推察される。締切り工を適用したSW0では、模型構造物と矢板に挟まれ拘束を受けたことが考えられるWP3を除き、過剰間隙水圧比はW0とほぼ等しい。これは今回使用した矢板の剛性が小さく、締切り工法の適用により矢板で締切られた地盤のせん断変形を、振動終了まで間隙水圧の蓄積を抑えるほど、十分には抑制できなかったためと考えられる。締固め工法を適用したW45では、締固め領域内に設置したWP1、7及び締固め領域境界部に設置したWP4、8において締固めによる過剰間隙水圧の発生が抑制されていることが観察できる。これに対し、締切り工法と締固め工法を併用した場合は、矢板で囲まれた締固め領域内に埋設したWP1、7で過剰

間隙水圧の発生が著しく抑制され、未改良域での過剰間隙水圧比の最大値が締固め工法適用時のW45に比べ大きいことが観察される。未改良域内で発生した過剰間隙水圧が不透水性の矢板のため改良域内に浸透することができないため、矢板で囲まれた締固め領域内ではより小さく、未改良域ではより高くなったことが推測できる。

図-8のD30W0では模型構造物側方の地盤が構造物底部へ流動し、構造物上部の地盤が構造物側方へ流動し、地盤が模型構造物を押し上げている様子が観察される。これに対し、図-12のSW0では矢板壁内で模型構造物側方の地盤が構造物底部へ流動しているが、矢板により構造物浮上がりに伴う地盤流動が抑制され、より狭い領域により小さな絶対量の流動変形が観察されるのみである。W45では地盤上部において改良域が未改良域に倒れ込むような地盤変形が観察され、締固め工の適用により全体的に小さな地盤変位となった。SW45では矢板壁内での地盤変位は小さいものの、未改良域では矢板が大きく振動し、かつ高い過剰間隙水圧が発生したため、SW0よりも大きな地盤変形が観察された。

参考文献

- 1) 田中幸久ら：2. 対策工法，地盤の液状化に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，pp.15～pp.40，1990
- 2) 井合進：lg 場での地盤-構造物-流体系の模型振動実験の相似則，港湾技術研究所報告，第27巻，第3号，1988