

袋詰め軽量モルタル材を用いた水中盛土地盤に関する振動台実験 — 袋詰め材の投入時期 (材令) が水中盛土地盤の地震時挙動に与える影響 —

吉田隆治¹・高橋 浩¹

¹正会員 工修 前田建設工業株式会社 技術本部技術研究所研究第3グループ (〒179-8914 東京都練馬区旭町 1-39-16)

著者らは海底軟弱地盤上の水中盛土工法として軽量モルタルを袋詰めにして用いる袋詰め投入工法を提案している。本工法は変形追随性を有し、未硬化の状態で水中投入すれば締め固めを必要としないことが水中投入実験から確認されている。しかし、盛土材の軽量化に伴う拘束圧の低下により地震時の変形や沈下が懸念された。そこで、本工法による水中盛土地盤の耐震安定性を確認するため、振動台実験および簡単な解析的検討を行った。その結果、未硬化の状態で袋詰め材を投入すれば地震時の水中盛土地盤の沈下は抑制でき、今回の実験の範囲では L2 相当の地震動に対して安定であることが確かめられた。本工法による水中盛土地盤の強度定数は確認できていないが、静的震度法による検討結果から未硬化の状態で袋詰め材を投入すればかなり強度の高い地盤が構築できたことが推測される。

Key Words: shaking table test, settlement, pore water pressure, submerged filling, packed light-weight mortar, EPS

1. はじめに

軟弱な海底地盤上に埋め立て工法による大規模な土地造成を行う場合、盛土荷重による基礎地盤の不同沈下や側方変位、あるいは既設構造物の連れ込み沈下が問題となる。この対策として盛土材を軽量化し、基礎地盤への荷重を軽減する方法が考えられる。従来、軽量盛土工法¹⁾は陸上での軟弱地盤に対する荷重軽減対策や抗土圧構造物に対する土圧軽減対策に用いられてきたが、最近では水中盛土への適用²⁾も検討されており、著者ら^{3)~8)}も開発を進めてきた。

著者らが当初開発を進めてきた礫状の軽量モルタル (発泡スチロールビーズ (EPS) を混入) を用いた水中盛土工法^{3)~5)}は基礎地盤の沈下に追随する特徴を有するが、振動台実験の結果、水中投入後に盛土地盤そのものを締め固める必要があることがわかった。次に、変形追随性は保持しながらも水中投入後に締め固めを必要としない工法として軽量モルタルを袋詰めにして用いる袋詰め投入工法^{5)~8)}を提案し、検討を進めた。水中投入実験からは未硬化の状態で袋詰め材を投入することで密度増加を図ることができることを確認した。

そこで、この袋詰め投入工法により構築された水中盛土地盤の地震時の挙動を把握するため、袋詰め材の材令を変化させた振動台実験と簡単な解析的検討を行った。

ここではこれらの結果について報告する。

2. 袋詰め投入工法による水中軽量盛土地盤の模型振動台実験

実験は、水深約 20m の海域に造成された埋め立て地盤を想定し、せん断土槽内に小型の袋詰め軽量モルタル材 (以下袋詰め材と呼ぶ) で作製した模型地盤に L2 相当の地震動を作用させて行った。

(1) 軽量モルタルの配合と袋詰め材の寸法

EPS を混入した軽量モルタルの配合を表 2.1 に示す。以前実施した礫状モルタル材に関する振動台実験⁵⁾の結果を参考に、今回は設計比重を $G_s = 1.5$ とした。実験に用いた袋詰め材は、縦 14cm、横 8cm のポリエチレン製の袋に軽量モルタルを 150cm³詰め、作製した。

表 2.1 軽量モルタルの配合 (設計比重 $G_s = 1.5$)

	単位量 (Kg/m ³)
セメント	291
フライアッシュ	291
水	250
細骨材	672
EPS (90 倍発泡)	4.95

(2) 模型地盤の製作および計測項目

模型地盤の寸法はせん断土槽の大きさ（高さ 100cm，幅 120cm，奥行き 80cm）から高さ 80cm，幅 120cm とし，奥行きは振動時の地盤の挙動をビデオで記録できるようにアクリル板で仕切り，30cm とした．模型地盤の製作は振動台上に設置されたせん断土槽に水を張り，水中落下法にて行った．所定の高さまで袋詰め材を投入の後，水位を模型地盤表面に一致させた．計測は振動台の加速度のほか，模型地盤内の加速度，過剰間隙水圧および模型地盤表面の沈下量とした．図 2.1 に模型地盤および計測の概要を示す．

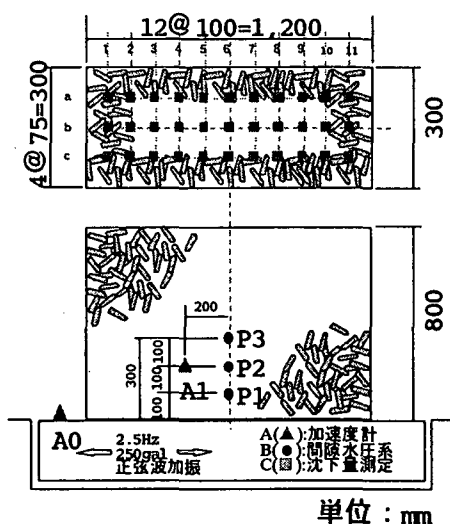


図 2.1 模型地盤および計測の概要

(3) 相似則

想定地盤と模型地盤の盛土高さおよび単位体積重量の比率から相似則は表 2.2 のようになる．今回の実験では盛土地盤に強い非線形性が現れ，表 2.2 は厳密な相似比とは言えないが，大ひずみ領域ではせん断剛性が拘束圧の 1 乗に比例するという研究⁹⁾とも整合がとれており，大ひずみ時の相似比として用いることができよう．

表 2.2 相似比

長さ	(L_m/L_p)	1/25
単位体積重量	(γ_m/γ_p)	1
せん断弾性係数	(G_m/G_p)	1/25
時間	(T_m/T_p)	1/5
加速度	(A_m/A_p)	1

(4) 入力地震動

L2 相当の地震動を想定し，1995 年兵庫県南部地震のときに神戸ポートアイランドの地中（GL-16.4m）で記録された加速度記録¹⁰⁾を参考に，正弦波で簡略化した加速度波形を入力地震動とした（最大加速度 250gal，主要動の継続時間 3 秒，振動数 2.5Hz の正弦波）．図 2.2 に入

力地震動を示す．ここで，振動台の性能から初期の立ち上がりに時間を要し，地震動の継続時間は初期の立ち上がりの時間も含め約 18 秒とした．

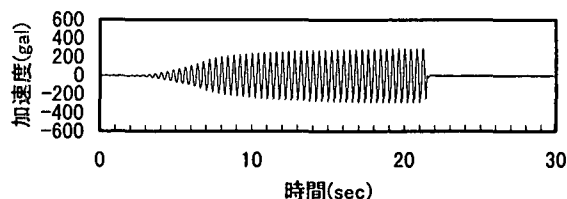


図 2.2 入力地震動

(5) 実験ケース

実験は袋詰め材の材令を変えた 3 ケース（練り上がり直後投入，練り上がり 3 時間後投入，硬化後投入）と，アクリル板によるせん断土槽の拘束の影響を確認するためにアクリル板を撤去して土槽全体を用いた 1 ケース（硬化後投入）の合計 4 ケースとした．表 2.3 に実験ケースを示す．この 4 ケースに対して図 2.2 の入力地震動を模型地盤の沈下が収束するまで数回作用させた．

表 2.3 実験ケース

ケース番号	袋詰め材の投入時期	土槽奥行き
1	練り上がり直後	30cm
2	練り上がり 3 時間後	30cm
3	硬化後	30cm
4	硬化後	80cm

(6) 実験結果と考察

a) 地表面沈下量

図 2.3 に加振回数と盛土高さ（模型地盤表面の 33 計測点の平均値）の関係を示す．練り上がりから投入までの時間が短いほど，盛土高さの変化が小さく，練り上がり直後の投入（ケース 1）ではほとんど模型地盤に沈下が生じていない．硬化後投入（ケース 3）では 1 回目の加振で大きく模型地盤が沈下し，その後の沈下は小さい．1 回目の加振による締め固め効果によって沈下が抑えられた様子が伺える．また，土槽の奥行き 30cm（ケース 3）と 80cm（ケース 4）の結果にほとんど差がないことからアクリル板によって仕切った影響は小さいこともわかる．

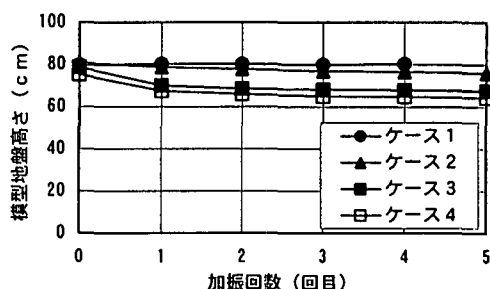


図 2.3 模型地盤高さと加振回数の関係

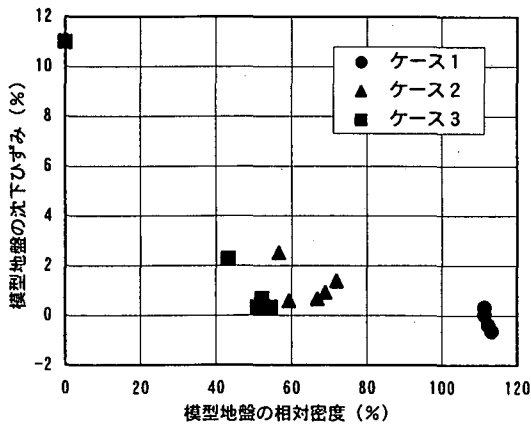


図 2.4 模型地盤の沈下ひずみと相対密度の関係

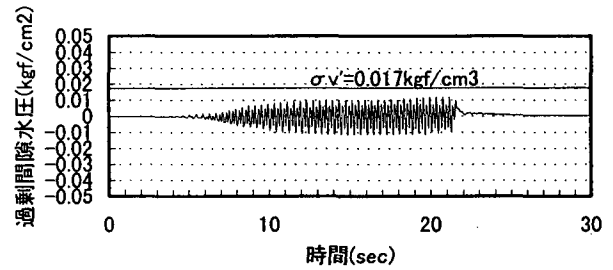
図 2.4 に各加振ごとの模型地盤の沈下ひずみとそのときの相対密度 D_r との関係を示す。ここで、 D_r は硬化後の袋詰め材を用いた時の最小および最大間隙比を用いて求めた。全体的には D_r が大きいくほど沈下ひずみは小さく、 $D_r=60\%$ で沈下ひずみが2%以下に抑えられることがわかる。個々には、硬化後投入の場合、1回目の加振で11%の沈下ひずみが生じ、先に実施した礫状モルタルの場合³⁾、⁵⁾とほぼ同じ結果となった。また、練り上がり3時間後の投入では約2%、練り上がり直後の投入では0である。練り上がり3時間後の投入の初期地盤では D_r は約60% (間隙比 $e=0.74$)、練り上がり直後の投入では D_r は約100% ($e=0.44$)であることを考えると、未硬化の状態で袋詰め材を投入することによってそれぞれの D_r まで締め固めたのと同等の効果が現れたと理解できる。

b) 過剰間隙水圧

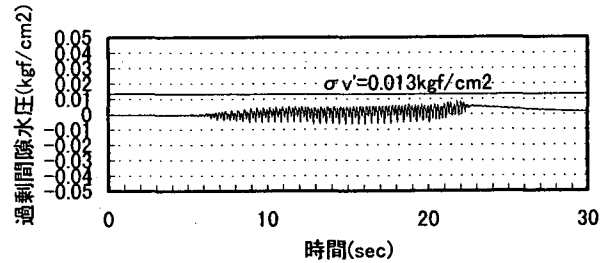
図 2.5 に1回目の加振における過剰間隙水圧の経時変化 (図 2.1 の P2) を示す。いずれのケースも過剰間隙水圧は有効拘束圧 σ_v' を下回り、また過剰間隙水圧が蓄積される様子も見られず、振動成分のみが記録されている (一部後半に過剰間隙水圧の上昇が見られるが、これはアクリル板を境にして水位差が生じてしまったことが原因している)。この過剰間隙水圧の振動成分は練り上がりから投入までの時間が短いほど大きな振幅を示し、よく見ると入力地震動の倍の振動数で振動していることがわかる。この入力地震動に対して倍の振動数となる応答は礫状モルタルを用いた振動台実験⁵⁾でも観測されており、模型地盤のせん断変形に伴い負のダイラタンシーが生じようとする結果と考えられる。また、練り上がりから投入までの時間が短いほど過剰間隙水圧の振幅が大きい理由として、投入までの時間が短いほど密な地盤が造成され、力の伝達率が高くなっていることも原因していると考えられるが、詳しいことはまだ良くわからない。

3. 水中盛土地盤の耐震安定性に関する解析的検討

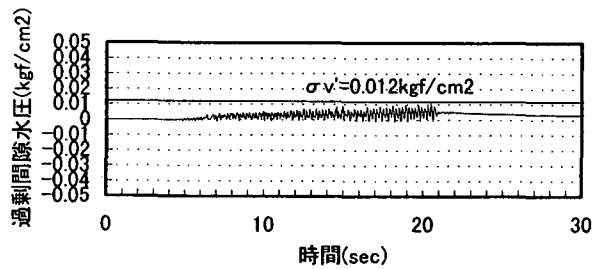
水中盛土地盤の耐震安定性と盛土材の単位重量、強度



(1) ケース 1



(2) ケース 2



(3) ケース 3

図 2.5 1 回目の加振における過剰間隙水圧(P2)の経時変化

および地震力の関係を把握することを目的に静的震度法による検討を行った。

(1) 解析方法

水中盛土地盤の耐震安定性と地震動強度との関係を盛土地盤が地震時に滑動安定性を保つことのできる限界の震度 (限界震度) として求め、水中盛土地盤の単位重量 (飽和重量) および地盤強度をパラメータとして検討した。図 3.1 に検討モデルの概念図を示す。ここで、検討は以下の仮定のもと行った。

- ① 地震力は水平方向のみとする。
- ② 盛土地盤の地震時挙動は土水一体とする。
- ③ 耐震安定性は盛土地盤内の水平面内の滑動安定性で評価する。
- ④ 盛土地盤のある深さにおける地震時の水平方向せん断応力はそれより上の土塊の質量と加速度の積で評価できる。
- ⑤ 盛土地盤は水平方向に半無限に広がる一様地盤とする。
- ⑥ 盛土材はゆ材とする (粘着力は零)。
- ⑦ 地下水位は盛土天端高さとする。

以上の仮定から滑動に対して安定であるための水平震度の上限 (限界震度) は (3.1) 式で表せる。

$$k_{hu} = (\gamma_{sat} - 1) \tan(\phi) / \gamma_{sat} \quad (3.1)$$

k_{hu} : 限界震度

γ_{sat} : 盛土地盤の飽和重量 (t/m^3)

ϕ : 盛土地盤の内部摩擦角 (度)

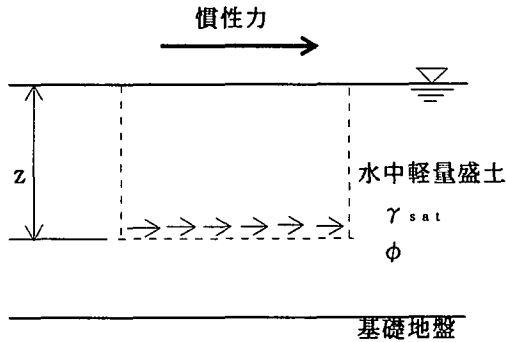


図 3.1 水中盛土地盤の地震時滑動安定性の検討モデル

(2) 解析結果と考察

(3.1)式を用いて求めた限界震度 k_{hu} と水中盛土地盤の飽和重量 γ_{sat} および内部摩擦角 ϕ の関係を図 3.2 に示す。水中盛土地盤は γ_{sat} が小さいほど k_{hu} も小さくなること、また γ_{sat} が小さいほど ϕ を大きくしても k_{hu} の増分量がそれほど大きくなることがわかる。

袋詰め材による水中盛土地盤の γ_{sat} は $1.2 \sim 1.3 \text{ t/m}^3$ で、硬化後投入の場合の ϕ は約 30° 度である。図 3.2 から硬化後投入の場合は耐震性が高いとは言えず、振動台実験の結果と対応する。練り上がり直後および練り上がり 3 時間後投入の場合の ϕ は確認できていないが、振動台実験ではほとんど沈下が生じなかったことを考えると、図 3.2 からこれらの ϕ は 45° 度以上であることが推測できる。

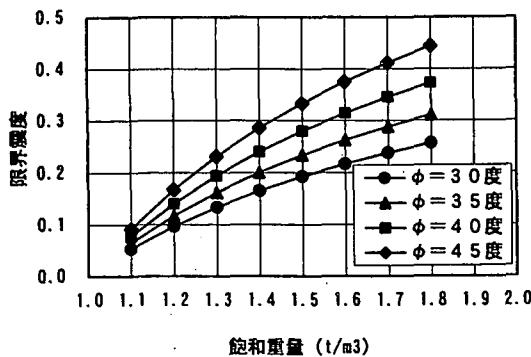


図 3.2 水中盛土地盤の地震時滑動安定性に関する限界震度と飽和重量の関係

4. まとめ

以上の結果をまとめると以下のとおりとなる。

- ① 振動実験の結果から、袋詰め材（モルタルの比重 $G_s = 1.5$ ）の練り上がりから投入までの時間が短かほど地盤の地震時の沈下量は小さくなる。練り上がりから 3 時間後に投入すれば、L2 相当の地震動に対して水中盛土地盤の沈下ひずみは硬化後投入の場合の約 11% が約

2% に抑えられる。

- ② 振動実験の結果から、L2 相当の地震動に対して過剰間隙水圧の蓄積的な上昇は見られない。

- ③ 本工法で構築された水中盛土地盤の強度定数は確認できていないが、未硬化の状態で袋詰め材を投入することによってかなり強度の高い地盤が構築できることが解析的検討結果から推測される。

5. おわりに

袋詰め材による水中盛土地盤の地震時挙動について振動台実験および簡単な理論解析によりに検討したが、

- ① 袋詰め材を未硬化の状態で水中投入した場合の地盤の強度の確認

- ② 上下動の影響の確認

など課題も残されており、今後検討する必要がある。

参考文献

- 1) 三木博史：軽量盛土工法の種類と特徴，基礎工，Vol.22，No.10，pp.2-7，1994.10.
- 2) 例えば 松井創，湯川雅之，掛橋隆晴，塩坂健，森晴夫：発泡ビーズ混合処理土の水中打設実験，第 29 回土質工学研究発表会講演集，pp.2385-2386，1994.6.
- 3) 高橋浩，清水英樹，石黒健，白澤眞：水中軽量盛土の地震時沈下に関する振動台実験，第 32 回土質工学研究発表会講演集，pp.1032-1024，1997.7.
- 4) 柳澤太一，佐藤文則，香山康晴，出頭圭三：礫状モルタルによる水中軽量盛土工法の概要と軽量盛土材の基本物性，土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集，第 VI 部門，pp.368-359，1997.9.
- 5) 柳澤太一，佐藤文則，高橋浩，清水英樹，石黒健：軽量モルタルを用いた水中軽量盛土工法の開発と適用に関する研究，前田技術研究所報，Vol.38，pp.91-98，1997.
- 6) 高橋浩，吉田隆治，佐藤文則，柳沢太一，小川朗二：袋詰め軽量モルタル材を用いた水中軽量盛土の密度特性に関する水中投入実験，土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集，第 VI 部門，pp.524-525，1998.10.
- 7) 吉田隆治，佐藤文則，高橋浩，柳沢太一：袋詰め軽量モルタル材を用いた水中盛土地盤の地震時沈下挙動に関する振動台実験，土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集，第 VI 部門，pp.522-523，1998.10.
- 8) 松井幹雄，井上淳一，吉田隆治：個別要素法による袋詰め材水中盛土の振動解析，土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集，第 III 部門，pp.514-515，1998.10.
- 9) 石原研一：土質動力学の基礎，p.141，鹿島出版会，1979.
- 10) 吉田望，中村晋，末富岩雄：1995 年兵庫県南部地震における地盤の非線形挙動とその予測，第 23 回地盤振動シンポジウム，pp.39-52，1995.10.