

混成式防波堤の地震時変状に関する基礎的実験

北 勝利¹・金 夏永²・関口秀雄³

¹正会員 工博 東海大学講師 海洋学部海洋土木工学科 (〒424-8610 静岡県清水市折戸 3-20-1)

²正会員 工修 東洋建設株式会社 鳴尾研究所 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜 3-17-6)

³正会員 工博 京都大学教授 防災研究所災害観測実験センター (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

本報告では、小型模型震動台実験を通して、混成式防波堤の地震時沈下に及ぼす基礎地盤の変形性状や、基礎地盤～マウンド間の物質収支の影響について検討を加えている。その結果、以下の知見を得た：①防波堤本体の沈下は、直下地盤の過剰間隙水圧の急激な変動とともに進行し、加振終了とともに収束する。②マウンド直下浅部地盤においては残留間隙水圧が比較的小さな時点より変相が生じている。③上記より防波堤沈下の主たるメカニズムとして基礎地盤の「揺れ込みせん断変形」が挙げられる。④地盤材とマウンド材の粒径コントラストが大きい場合、振動载荷によりマウンド材が地盤中に埋没する「物質移動」が生じた。本実験結果によると、「物質移動」による沈下寄与分は防波堤天端沈下量に対し数 10%に及んだ。

Key Words: Composite breakwater, Settlement, Pore water pressure, Rubble mound, Mass transport

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震では、神戸港内の混成式防波堤が、堤軸に沿ってほぼ一様に最大 2.5m 程度沈下した。著者らは、地震後実施した水中音響学的探査において、捨石マウンド法肩や端部付近に比べ、ケーソン近傍でマウンド表面沈下量が大きくなる変形性状や、マウンド外側の基礎置換砂地盤面が露出している地域における液状化の徴候を観測した¹⁾。その後、砂の繰返しねじりせん断試験や遠心力場振動実験を通じて、混成式防波堤の主たる沈下メカニズムとして、揺れ込みせん断変形が挙げ

られることを示した²⁾³⁾。一方粗粒盛土の遠心力場振動実験結果によると、盛土材が基礎地盤内に埋没することにより、著しい盛土変状を生じることが指摘されている⁴⁾。以上の知見を総合して、混成式防波堤の地震時変状に関連する影響因子や変状機構を図-1 にまとめる。

本報告は、混成式防波堤の沈下メカニズムとして「揺れ込みせん断変形」と捨石マウンド～基礎地盤間の「物質移動」に着目し、通常重力場における小型模型振動台実験を通じてこれら変形機構の発現状況について検討を加えるものである。

2. 実験概要

振動台実験における模型の概略形状および計器の配置を図-2 に示す。土槽は幅 59.9cm, 奥行き 19.4cm, 深さ 29.9cm (共に内寸) であり、土槽前面の透明板を通して実験における模型地盤の変状が観察できる構造となっている。土槽両端部は剛であり、地盤の水平方向変形の拘束に対する軽減措置を施していない。土槽外壁には、模型への入力加速度を計測するための加速度センサを貼付している (図-2 中 0)。

地盤材料として珪砂 7 号 (土粒子比重 2.65, 平均粒径 0.15mm, 最小間隙比 0.65, 最大間隙比 1.09) を用い、水

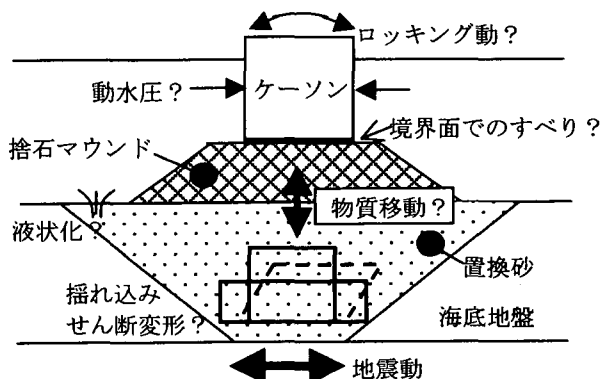


図-1 混成式防波堤の地震時変状に関連する諸因子とメカニズム

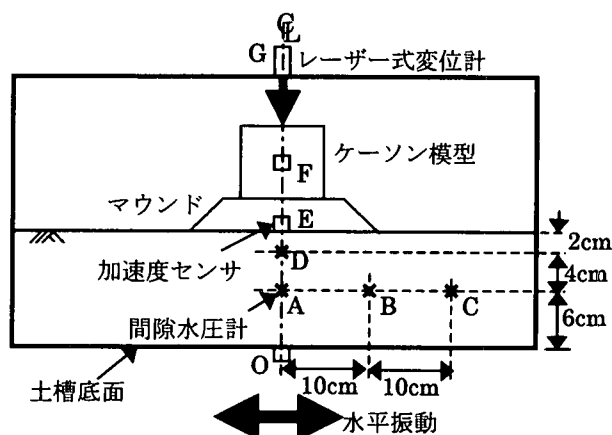


図-2 模型概略とセンサ配置

表-1 マウンド諸元

	底面幅 (cm)	天端幅 (cm)	高さ (cm)	平均湿潤密度 (kg/m^3)
玉石	22	12	3.4	2.07×10^3
砂 4 号	23	14	4.0	2.06×10^3

中落法により層厚 12cm の水平地盤を作成した。地盤作成途中、実験による地盤の変形を観察するため、砂 7 号を炒ることにより着色した色砂をラインおよびスポットマーカーとして配置した(後出写真-1 参照)。また、図-2 の A~D の 4 点に間隙水圧センサを静置した。

マウンド材料として、玉石(土粒子比重 2.62, 平均粒径 12mm)および砂 4 号(土粒子比重 2.64, 平均粒径 1.2mm)を用いた。玉石マウンド模型の場合は砂 7 号地盤上に玉石を一つずつ静置しながら、また砂 4 号マウンドの場合には型枠を用いて砂を地盤上に流し込みながら軽く締め固めることにより、台形マウンドを作成した。玉石マウンドおよび 4 号砂マウンドの諸元を表-1 にまとめる。マウンド作成途中においてマウンド中央部に振動台振動方向の水平動を感知するための加速度センサを設置した(図-2 中 E)。

マウンド作成後、マウンド天端中央にケーソン模型を設置した。ケーソン模型はステンレス製で高さ 8.0cm, 幅 8.0cm, 奥行き 19.0cm, 質量 1.25kg である。ケーソン模型内部には、振動台振動方向の加速度を検知するための加速度センサを貼付している(図-2 中 F)。ケーソン模型設置後水位をケーソン中央深度に調節する。またケーソン天端の沈下量を計測するために、土槽上縁部にレーザー式変位計を設置している(図-2 中 G)。

玉石マウンド模型、4 号砂マウンド模型それぞれに 3 回の加振実験をステージテスト形式で行った。加振波形は卓越周波数 5Hz の振幅漸増正弦波形、継続時間は約 2sec である。

振動中における各センサからの計測信号は、デジタル動ひずみ測定器に収録の後、RS-232C 回線を通じてデジ

表-2 実験条件とケーソン天端累積沈下量

マウンド材		玉石	4 号砂
初期間隙比 e_0		0.79	0.78
1 回目加振	$\alpha_{\max}$ (gal)	60	70
	$\Sigma \delta$ (mm)	0	0
2 回目加振	$\alpha_{\max}$ (gal)	130	170
	$\Sigma \delta$ (mm)	0	4
3 回目加振	$\alpha_{\max}$ (gal)	320	250
	$\Sigma \delta$ (mm)	15	14

タルデータとしてパーソナルコンピュータに転送される。本実験ではサンプリングレート 5 msec, 1 チャンネルあたりのサンプル数 10000 データの条件で計測した。

振動実験前後において、土槽前部の透明板を通した模型形状を、デジタルカメラを用いて撮影した。

3. 実験結果とその検討

玉石マウンド模型および 4 号砂マウンド模型における地盤の初期間隙比 e_0 、各ステージにおける振動台最大加速度 $\alpha_{\max}$ と、当該ステージ終了後におけるケーソン天端の累積沈下量 $\Sigma \delta$ を表-2 に示す。

(1) 時刻歴応答

玉石マウンド模型の 3 回目加振時において計測した振動台、マウンド、ケーソンそれぞれの水平加速度、ケーソン天端沈下量、および図-2 中 A 点 D 点における過剰間隙水圧の時刻歴を図-3 に示す。加振時最大加速度は 320gal である。

マウンドにおける加速度記録に着目すると、時刻 3.2sec 以降振動台加速度に対し位相が遅れ始めるとともに波形がスパイク状となり、マウンドにおける最大加速度は 480gal に達している。対照的にケーソンの加速度応答は、ケーソン・マウンド間の相対すべりなどによって振幅減衰が生じ、最大 160gal に留まっている。ケーソン天端沈下量の時刻歴に着目すると、マウンドでの加速度波形がひずむ時刻 3.2sec より沈下が急激に進行している。また振動载荷が終了する時刻 4.5sec において沈下もほぼ収束していることがわかる。

一方ケーソン直下における過剰間隙水圧の時刻歴に着目すると、地盤浅部(D 点) 深部(A 点) 共に、時刻 3.2sec 以降大きく振動しつつ残留間隙水圧が徐々に蓄積していることがわかる。また両点における過剰間隙水圧の振動成分は加振周波数の倍周波数となっており、土要素が変相状態に至っていることが伺える。ここで A 点および D 点における初期鉛直有効応力を弾性論に基づき計算する

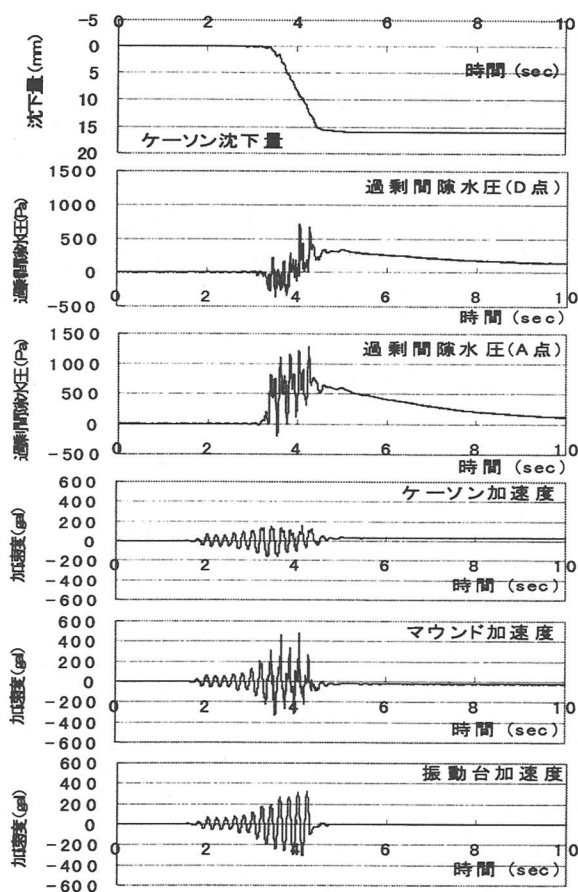


図-3 計測結果 (玉石マウンド, 3 回目加振)

と、それぞれ 1060Pa, 820Pa と推定できた。つまり、地盤深部 (A 点) に比べ地盤浅部 (D 点) では、上部荷重 (ケーソンとマウンド) により大きな初期せん断応力が動員されていることから、低い過剰間隙水圧比で変相状態に至っていることが推察できる。

4 号砂マウンドの 3 回目加振時における計測波形を図-4 に示す。なお本ケースにおいては、マウンドに埋設した加速度センサと A 点の間隙水圧計が不調のため当該の図を割愛している。振動台加速度、ケーソン沈下量、および D 点における過剰間隙水圧の計測結果を相互比較すると、以下のように整理できる。時刻 2sec 以降 D 点における過剰間隙水圧が大きく振動しながら残留蓄積するとともに、ケーソン沈下が急速に増大する。ケーソンの沈下は、時刻 4sec において振動载荷の終了と共に停止する。D 点における過剰間隙水圧の振動成分の周波数は加振周波数の 2 倍であり、マウンド直下浅部においては比較的初期から変相状態に至っていることがわかる。

(2) 変状観察

玉石マウンド模型の実験において振動载荷前、および第 3 回加振後における地盤の変状を写真-1(a) (b) に示

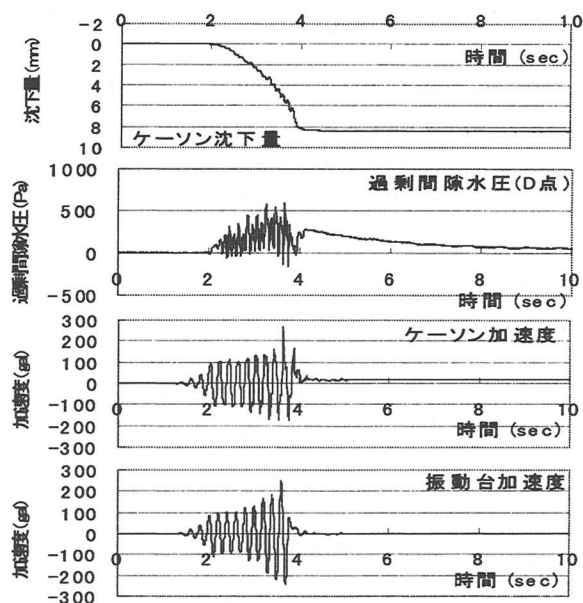


図-4 計測結果 (4 号砂マウンド, 3 回目加振)

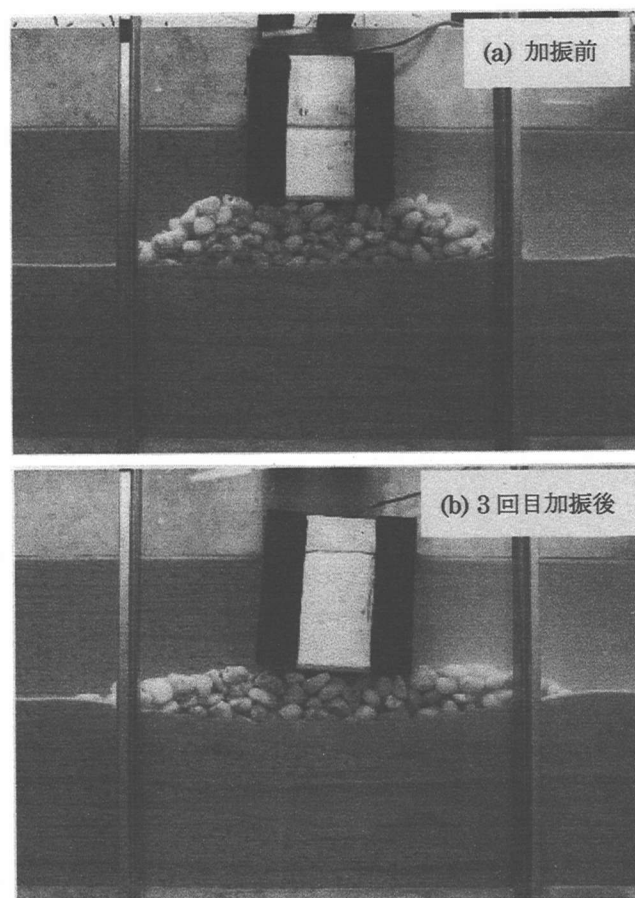


写真-1 地盤変状 (玉石マウンド)

す。また、写真-1(a) (b) より防波堤本体近辺の変状をトレースしたものを図-5(a) (b) に示す。写真-1 および図-5 より、本実験で得られた防波堤変状の特徴を整理すると次のようになる。

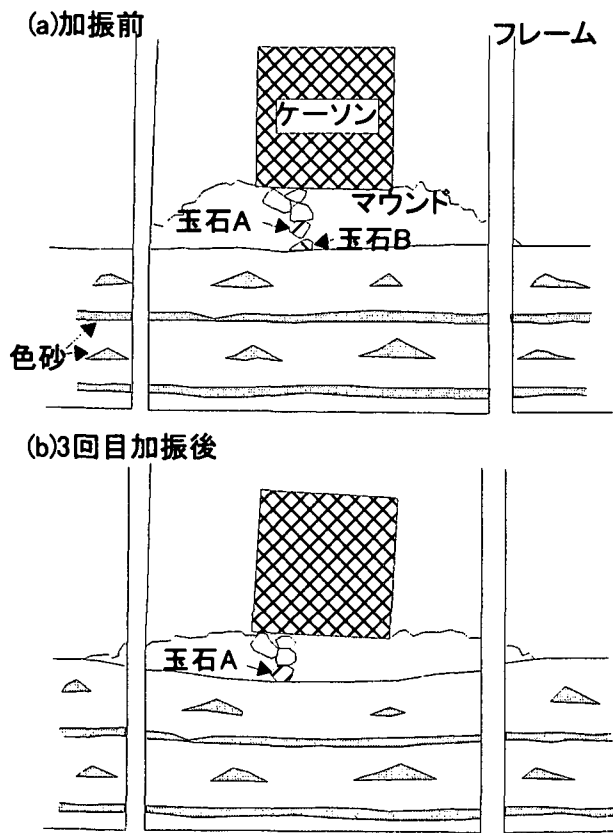


図-5 地盤変状 (トレース図, 玉石マウンド)

- ①マウンド直下地盤表面がケーソン中心軸に対しほぼ対称に沈下している、
- ②写真-1(b)より読み取ったマウンド直下地盤表面(ケーソン中心軸上)から上部帯状色砂マーカー上端までの鉛直距離は、実験前(写真-1(a))に比べ3mm程度小さくなっている。写真-1(a)より実験前の当該部分の層厚は約3.6cmと読み取れるので、見かけ上10%弱程度の鉛直ひずみが生じている。一方当該層のスポットマーカー(特に左側)が外側に移動していることから、当該層は水平方向に伸張ひずみを生じており、揺れ込みせん断変形が発生していることがわかる。マウンド法尻直下のスポットマーカーでは水平移動がより顕著に認められる。なお上部層スポットマーカーの移動量に比べ下部層のマーカーの移動量は小さい。
- ③第3回加振後においてマウンド底幅が3cm程度拡幅している。
- ④図-5においてマウンド材玉石Aは、振動载荷前にはマウンド下部に位置していたが、第3回加振後には基礎地盤表面上に位置している。同様に玉石Bは振動载荷前には基礎地盤表面より上のレベルにあるが、第3回加振後には基礎地盤内に埋没している。そこで実験後、マウンドの玉石を基礎地盤表面が現れるまで注意深く取り除いた後、埋没している玉石を回収し乾燥重量を計測したところ435gであった。これは加振前のマウンド体積250cm³に相当する。よって加振前のマウ

ンド底面積22cm×19.4cm～427cm²より、玉石マウンドの埋没深さは250cm³/427cm²～0.6cm程度と推定できる。玉石マウンド実験で計測したケーソン天端における最終累積沈下量を1.5cmとすると、全沈下量の40%程度が玉石の埋没、すなわち物質移動による寄与分となる。

4号砂マウンド実験における基礎地盤およびマウンドの変形性状は、玉石マウンドの場合とほぼ同様であった。本ケースにおいても、実験終了後にマウンド材料の埋没状況を調べたが、マウンドと基礎地盤間での物質収支は境界の極薄層部分に限られていた。

4. まとめ

- ①マウンド直下地盤浅部においては、初期せん断応力の影響で、過剰間隙水圧比が比較的低い状態に変相に至った。
- ②振動载荷においてケーソンの沈下はマウンド直下地盤の過剰間隙水圧挙動と密接に連携している。また加振終了と共に沈下もほぼ収束することから、揺れ込みせん断変形がケーソン沈下の主メカニズムと考えられる。
- ③基礎地盤材料とマウンド材料の粒径コントラストが大きい場合、振動中にマウンド材が基礎地盤中に埋没しうる。本実験では、このような基礎地盤とマウンド間の物質移動によるケーソン沈下への寄与は、全体沈下量の約40%に至った。揺れ込みせん断変形はマウンドの水平方向伸張を伴うため、粗粒材料間の接触が弱くなり、マウンド材の埋没沈下を助長することとなる。

謝辞：本実験を行うにあたり、元東海大学海洋学部学生金澤智也、加納礼滋両氏にご協力いただいた。記して謝意を表する次第です。

参考文献

- 1) Sekiguchi, H., Kita, K., Hashimoto, K. and Katsui, H.: Deformation of Composite Breakwater due to Ground Shaking, Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, pp.169-177, 1996.
- 2) Sekiguchi, H., Tanaka, K., Sassa, S. and Kita, K.: Performance of Undrained Cyclic Torsional Shearing of Saturated Sands, Proc. 1st JSPS-NUS Seminar on Integrated Engineering, pp.50-59, 1996.
- 3) 金 夏永・関口秀雄・武部篤治: 混成式防波堤の地震時動的挙動に関する遠心力場振動台実験, 第33回地盤工学研究発表会講演集, 2分冊の1, pp.953-954, 1998.
- 4) Peiris, L.M.N., Madabhushi, S.P.G. and Schofield, A.N.: Dynamic Behaviour of Gravel Embankments on Loose Saturated Sand, Proc. Int. Conf. CENTRIFUGE 98, Vol.1, pp.263-270, 1998.