

東海大学海洋学部 正会員 北 勝利
 京都大学大学院 学生会員 山田博志
 京都大学防災研究所 正会員 関口秀雄
 東洋建設鳴尾研究所 正会員 金 夏永

1. はじめに

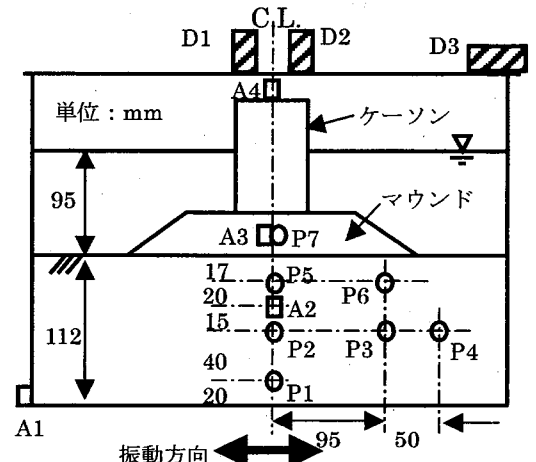
1995年兵庫県南部地震では、神戸港防波堤において最大2.6mに至る沈下が発生した。著者らはこれまでに、現地海底面調査や繰り返しねじりせん断試験および模型振動実験を通して混成式防波堤の沈下メカニズムを検討した結果、以下の知見を得ている^{1)~3)}。

- ① 防波堤側方地盤では液状化の徴候が認められるものの、本体(ケーソンおよび捨石マウンド)直下の基礎地盤では間隙圧の上昇は小さく液状化には至らない。
- ② 異方圧密状態からの飽和砂の非排水繰り返しねじりせん断試験結果によると、応力経路が変相線に達した後、初期液状化に至らない状況下で異方圧密応力の主軸方向変位(最大主応力方向に圧縮、最小主応力方向に伸張)が急速に進展する。これより防波堤本体の沈下の主メカニズムとして「揺れ込みせん断変形」が挙げられる。
- ③ 一方、マウンド材料と基礎地盤材料の粒径コントラストが大きい場合には、マウンド巨粒材料が基礎地盤内に埋没する「物質移動」現象が認められた。

本文では、粒径の異なる2種類のマウンド材料を用いた混成堤模型の遠心力場振動実験を実施し、高速度CCDカメラを用いた振動中の変形観測などを通して基礎地盤の変状過程について検討を加えるとともに、防波堤の地震時沈下に及ぼす「物質移動」現象の影響水準について報告する。

2. 実験概要

本実験で用いた混成堤—基礎地盤模型の概要を図-1および図-2に示す。前面が透明の矩形土槽(内寸幅400mm, 高さ280mm, 奥行100mm)を用いて、脱気したシリコンオイル(動粘性係数30cSt)中に気乾状態の珪砂7号を液中落下させることにより層厚112~114mmの水平基礎地盤を作成した。後述するように4ケースの実験を実施したが、ケース1, 2と3, 4では同じ珪砂7号ながらバッチが異なるため物理特性が異なる(表-1参照)。基礎地盤作成後30G遠心力場にて30分自重圧密した後、粒度調整した珪砂4号もしくはレキ石を用いて高さ31mm~37mm, 天端幅120~125mm, 底面幅230~240mmのマウンドを作成し、その上に幅60mm, 高さ100mm, 奥行き100mmのケーソン模型(質量1.42kg)を静置した。模型作成後30g遠心加速度場において30分間自重圧密した。



A1~A4: 加速度センサ, P1~P7: 間隙圧センサ
 D1, D2: 鉛直変位センサ, D3: 水平変位センサ

図-1 実験概要とセンサ配置

模型作成にあたり、土槽、模型中心線上の地盤中、マウンドおよびケーソン天端の4点に水平加速度セン

Shaking table tests on seismic deformation of composite breakwater systems in a centrifuge; K. Kita (Tokai Univ.), H. Sekiguchi, H. Yamada (Kyoto Univ.) and H. Kim (Toyo Construction Co. Ltd.).

サ(図-1 中 A1~A4)、地盤内中心線上の 3 深度、マウンド法面下の 2 深度、側方部 1 深度およびマウンド中央に間隙圧センサ(P1~P7)、およびケーソン沈下及び水平変位計測のためのレーザー式変位計(D1~D3)を配置した。また土槽前面からの地盤変状観察を目的として、地盤作成途中に色砂を用いてラインおよびスポットマーカを挿入した(図-2)。

基礎地盤の密度およびマウンド材粒径をパラメータとして計 4 ケースの実験を実施した(表-2 参照)。振動条件は遠心加速度 30g の下、加速度振幅 5g, 周波数 30Hz(プロトタイプ換算で 163gal, 1Hz), 波数 20 の規則波加振である。加振時には加速度や間隙圧、沈下量の電氣的計測に加え、高速度 CCD カメラを用いて模型変状を観察した。高速度 CCD カメラの撮影条件は、横 640×縦 480 画素, 250 フレーム/s, 撮影期間 3.256 秒である。

3. 実験結果と検討

3-1 加速度・間隙圧・沈下性状

実験ケース 1(中密地盤, 硅砂マウンド)で計測した、振動台(図-1 中 A1), 地盤(A2), マウンド(A3)およびケーソン(A4)の水平加速度, 地盤内間隙圧(P1, P2, P4~P6)、およびケーソン天端沈下量(D1 と D2 の平均値)の時刻歴を 図-3 に示す。

地盤の加速度応答(A2)に着目すると、時間とともに振幅が減少し振動終期において振動台加速度(A1)に比べて 50%程度まで減衰しているものの、液状化時に見られるような地盤剛性が極端に低下し振幅が大きく減衰した状態には至っていない。一方マウンドの加速度振幅(A3)は地盤の加速度振幅より若干増幅している。従って地盤中層以下に比べて上部では剛性が保持されているものと考えられる。一方でケーソン天端の沈下は振動初期より進展し、振動終了とともにほぼ終息している。実験終了後に計測した本ケースにおけるケーソン天端沈下量は 17mm であり、振動終了後の圧密沈下は無視しうる程度である。

基礎地盤内の過剰間隙圧挙動に注目すると、地盤中央深部(P1)においては振動初期より急激に上昇しているものの、残留間隙圧(過剰間隙圧の平均的推移)としては当該地点の初期鉛直有効応力値(46kPa)まで至っていない。また中央中部(P2)および中央浅部(P5)では、振動载荷中負の残留間隙圧となっている。すなわち防波堤本体直下では、いずれの深度においても液状化に至っていない。一方側方地盤(P4)では振動開始後 2 波で初期鉛直有効応力レベル(15kPa)まで残留間隙圧が上昇しているとともに、法面下浅部(P6)でも振動初期より蓄積傾向にある。よって、周辺地盤の間隙圧上昇により本体直下部地盤の側方拘束が時間とともに低下し、応力の異方性を助長していることが推察できる。

次にゆる詰め地盤の実験ケース 3(硅砂マウンド)で計測した、加速度、地盤内間隙圧およびケーソン天端沈下量の時刻歴を 図-4 に示す。中密地盤の場合(ケース 1)と比較して、地盤(A2)の加速度振幅の減衰が大きく、



図-2 模型正面

表-1 地盤およびマウンド材料の物理特性

場所	材料	粒径 (mm)	土粒子比重	最大間隙比	最小間隙比	実験ケース
基礎地盤	硅砂 7号	0.1 (平均)	2.65	1.15	0.69	1,2
			2.68	1.28	0.76	3,4
マウンド	硅砂 4号	0.85 ~2.0	2.64	—	—	1,3
	レキ	4.76 ~9.5	2.71	—	—	2,4

表-2 実験ケース

ケース	地盤 相対密度	マウンド 材料	ケーソン 沈下量	埋没 寄与分
1	46%	硅砂	17mm	1.3mm
2	50%	レキ	15mm	3.4mm
3	29%	硅砂	35mm	1.2mm
4	37%	レキ	34mm	6.4mm

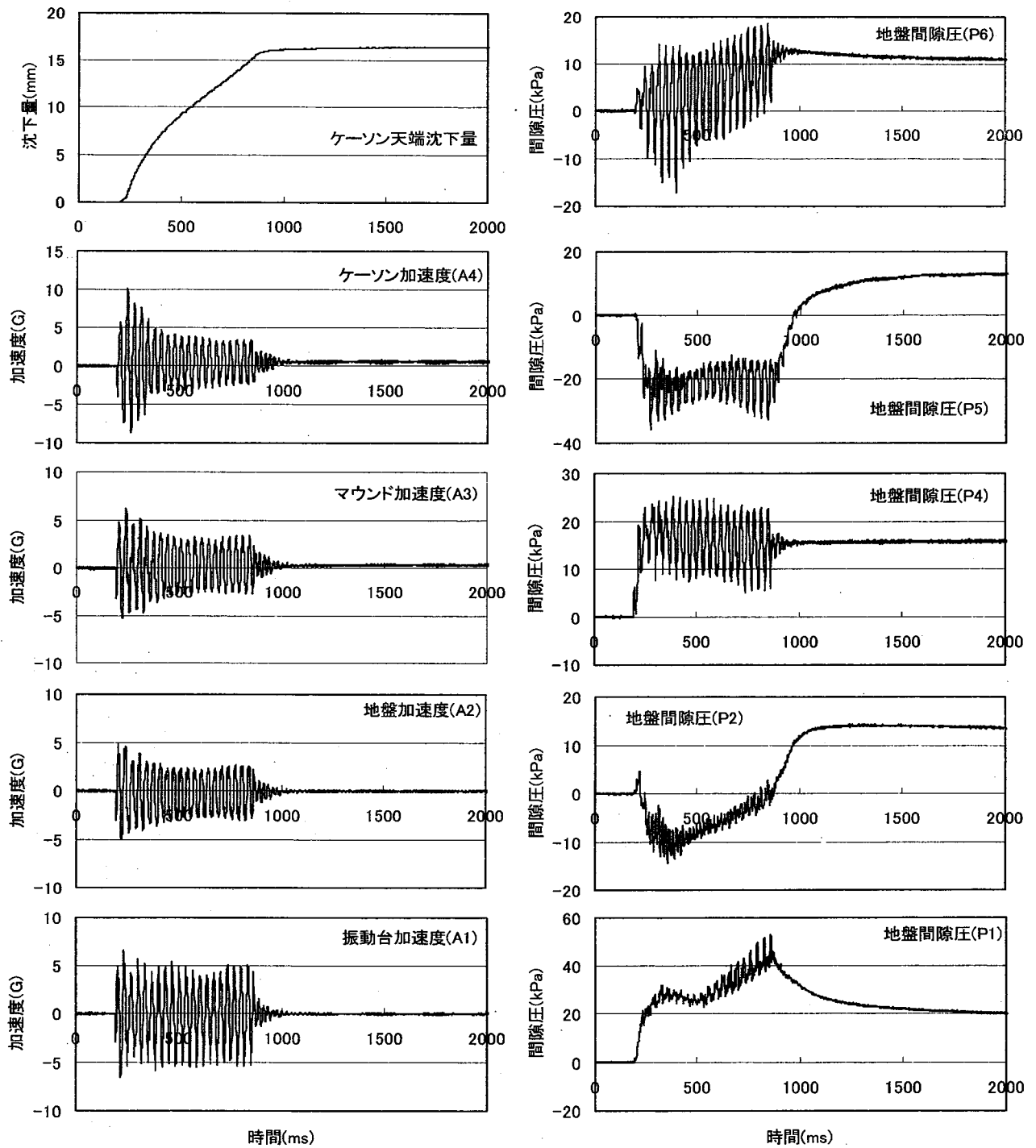


図-3 加速度，間隙圧，沈下量の時刻歴(ケース1，中密，硅砂マウンド)

中層以下の地盤がより顕著に軟化していることがわかる。模型中心線上の地盤内過剰間隙圧応答(P1, P2, P5)と比較すると、ケース1に比べケース3ではいずれの深度においても過剰間隙圧が大きくでており、特に中央深度(P2)では振動载荷期間を通して正の残留間隙圧が発生している。

3-2 地盤変状

実験ケース1(中密地盤，硅砂マウンド)および実験ケース3(ゆる詰め地盤，硅砂マウンド)において、振動载荷前後に撮影した模型形状を図-5に示す。ラインおよびスポットマーカーの変位状況より、防波堤本体直下部の地盤が鉛直方向に圧縮、水平方向に伸張している変形パターンが認められる。またケース1では、

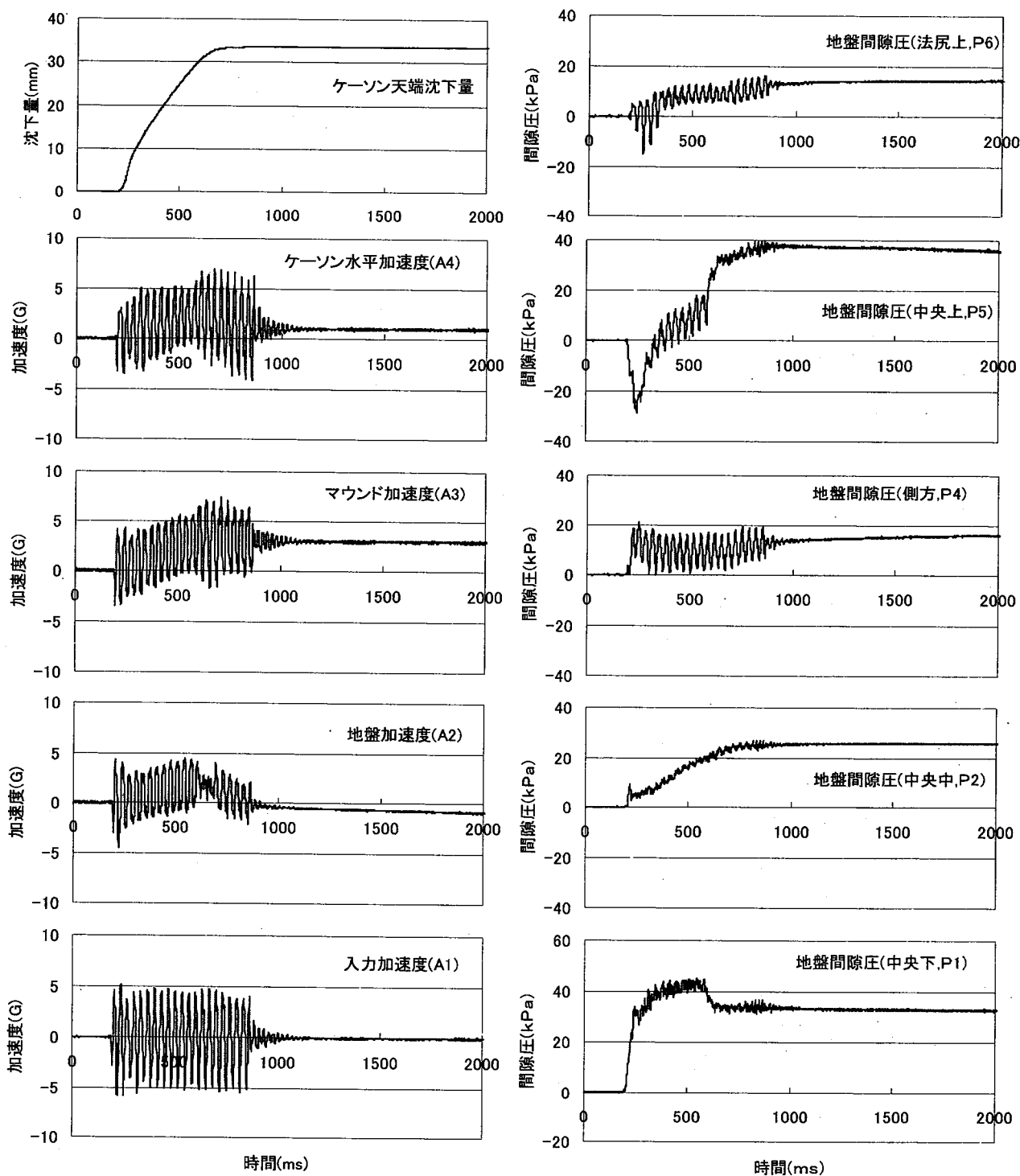


図-4 加速度，間隙圧，沈下量の時刻歴(ケース3，ゆる詰め，硅砂マウンド)

鉛直圧縮ひずみが地盤上層で7%，中層15%，下層21%であり、地盤上層から下層に向けて次第に変形が大きくなるのに対し、ケース3では地盤中層での変形が卓越している。なお両ケースともに振動載荷後においてマウンドと基礎地盤の境界線が明確である。すなわち、マウンド材と基礎地盤材料の粒径コントラストが比較的小さな硅砂マウンドでは、両者間の物質移動は境界付近のごく狭い範囲に限られる。

実験ケース3において高速度 CCD カメラ画像より読み取った、防波堤本体直下部におけるマウンドおよび地盤上・中・下三層の鉛直ひずみと水平ひずみの時刻歴を図-6に示す。マウンド鉛直ひずみを除き、振動開始直後(時刻 $t=200\text{ms}$)よりひずみが蓄積し、振動終了(時刻 $t=900\text{ms}$)とともにひずみの進展が終息し

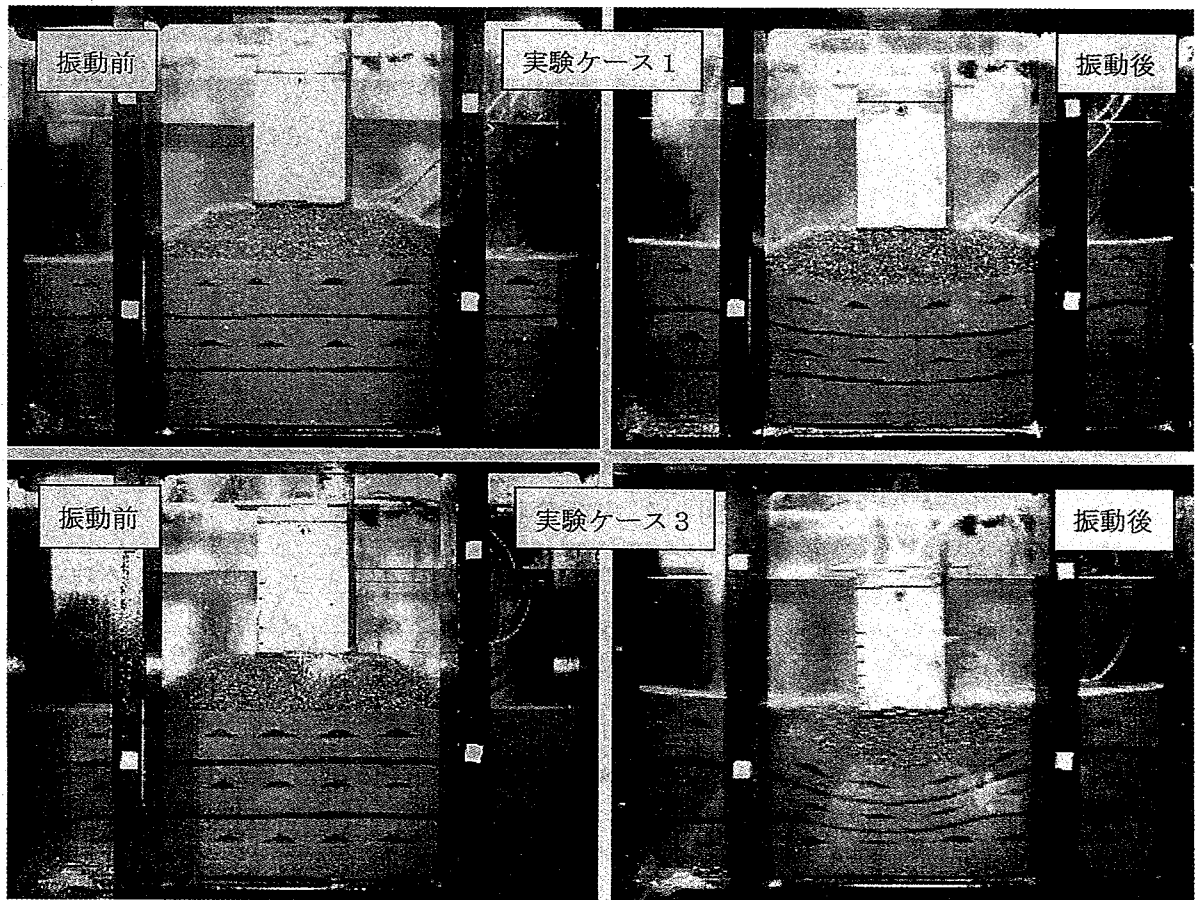


図-5 地盤変状

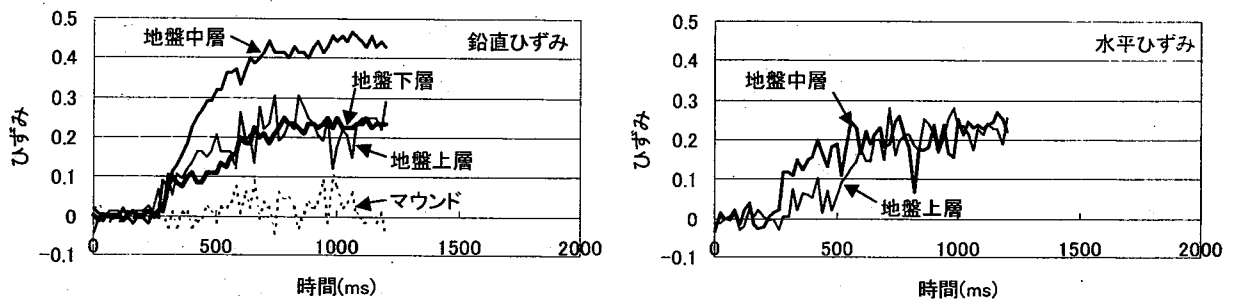


図-6 高速度 CCD カメラより読み取った各層のひずみ

(ケース 3 ; 鉛直ひずみは圧縮を正、水平ひずみは伸張を正)

ている。鉛直ひずみに着目すると、マウンドでは明確なひずみの発達は認められないのに対し、地盤では最終的に上層と下層において共に 25%程度、中層においては 45%程度の圧縮ひずみが発生している。一方地盤上層および中層の水平伸張ひずみは共に 25%程度まで進展している。

次に実験ケース 4(ゆる詰め地盤, レキマウンド)において、振動载荷前後で撮影した模型形状を図-7に示す。振動前(図-7(a))において矢印で示されたレキ石は、振動後にはほぼ全体が基礎地盤中に埋没している。本ケースについて高速度 CCD カメラ画像より読み取った各層ひずみの時刻歴を図-8に示す。硅砂マウンドの場合(図-6)とは異なり、マウンド材の埋没に伴いマウンドの鉛直方向圧縮が有意に生じている。

振動終了後、模型解体時に基礎地盤中に埋没したマウンド材を回収・乾燥重量を計測した。埋没分乾燥重量とマウンドの初期乾燥密度を基にマウンドの地盤中への埋没体積を計算し、マウンド底面積で除することにより埋没による沈下寄与分を求めた。各ケースにおけるケーソン天端位置での最終沈下量と埋没寄与分を表-2に示している。基礎地盤材料とマウンド材料の粒径コントラストが小さい場合(ケース 1, 3)には、埋

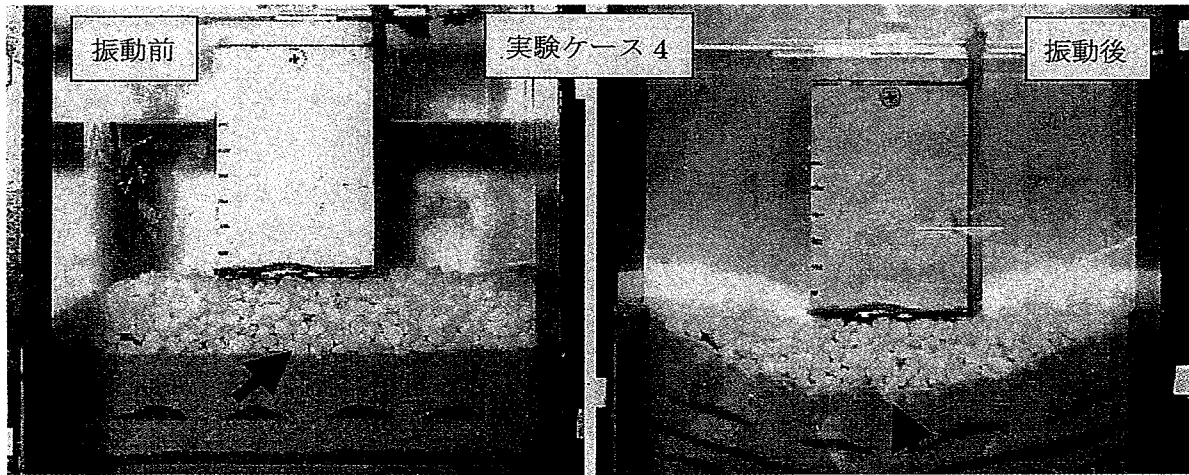


図-7 地盤変状

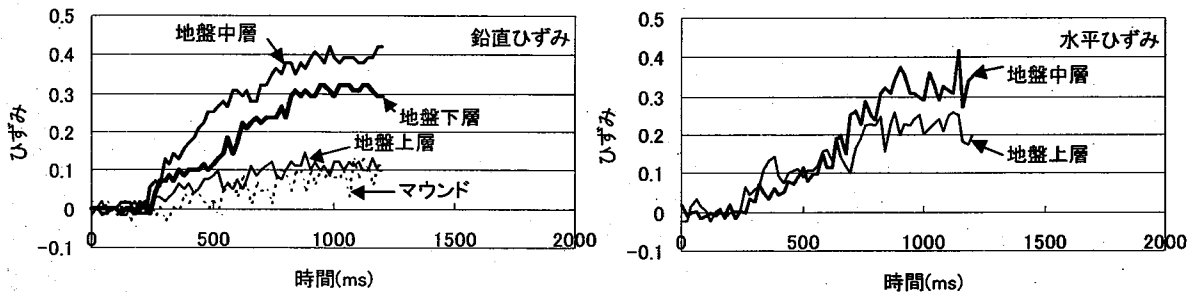


図-8 高速 CCD カメラより読み取った各層のひずみ

(ケース 4 ; 鉛直ひずみは圧縮を正、水平ひずみは伸張を正)

没寄与分はケーソン沈下量の 10% 以下であった。一方粒径コントラストが比較的大きなレキマウンドの場合 (ケース 2, 4) には、埋没寄与分は全体沈下量に対し 20% 程度を占める結果を得た。

4. ディスカッション

前述のように、地盤ひずみは浅層より中層もしくは深層にて卓越する結果を得た。田中によると、異方圧密砂の非排水繰返しねじりせん断試験において、圧密応力比(すなわち初期せん断応力比)が大きい場合変相時の有効拘束圧が小さくなり、変相後の軸ひずみの進展が顕著になる結果が得られている⁴⁾。混成堤-基礎地盤系の地震時挙動に照らすと、ケーソンやマウンドによる局所載荷重直下においては、地盤浅部では初期せん断応力比が大きく変相時の有効拘束圧が大きいため軸(鉛直)ひずみの蓄積が抑制されることになる。

5. まとめ

- ① 混成堤本体直下地盤では、振動載荷に伴い初期液状化に達していない状況でも鉛直方向に層の塑性圧縮が蓄積する「揺れ込みせん断変形」が発生する。揺れ込みせん断変形は振動載荷中に進展・終息する。
- ② 基礎地盤浅部では、深部に比べ初期せん断応力比が大きく、変相到達時の有効拘束圧が大きくなる。このため揺れ込みせん断変形量が深部に比べ小さくなる場合がある。
- ③ マウンド材が粗粒の場合、基礎地盤中に埋没する「物質移動」現象が生じる。

参考文献 1) Sekiguchi et al. (1996) : Soils and Foundations, Special Issue, pp.169-177. 2) Sekiguchi et al. (1996) : Proc. 1st JSPS-NTU Seminar on Integrated Engineering, pp.50-59. 3) 北ら (1999) : 第 25 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1001-1004. 4) 田中 (1996) : 異方圧密された砂質土の非排水繰返し載荷挙動に関する研究, 京都大学修士論文, 71PP.