

管理型廃棄物埋立護岸の地震時変形挙動に関する模型振動実験

EXPERIMENTAL STUDY ON THE BEHAVIOR OF SEAWALLS FOR CONTROLLED WASTE DISPOSAL DURING EARTHQUAKE USING UNDERWATER SHAKING TABLE

狩野真吾¹・小田勝也²・吉田誠³・三藤正明⁴

Shingo KANO, Katsuya ODA, Makoto YOSHIDA and Masaaki MITOH

¹正会員 博士(工学) 国土技術政策総合研究所 研究官(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工修 国土技術政策総合研究所 沿岸防災研究室長(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 工修 五洋建設株式会社 技術研究所(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

⁴正会員 工博 五洋建設株式会社 土木部門 部長(〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

In this study, we discussed a seismic behavior of caisson type seawalls for controlled waste disposal site using water proof sheets as seepage. Underwater shaking table tests with a scale of 1 to 15 model seawall were performed to examine the displacement of the caisson, the soils behind the caisson and the water proof sheet during earthquake. Long-period and long duration wave was used as an input waveform. The waterproof sheet was fixed on backfilling slope by concrete block. The results show that the behavior of the water proof sheet during shaking was closely related with the displacement of the caisson, and the residual strain in the sheet was the largest at the upper side of slope, in which the soil displacement was significant.

Key Words : Seawalls for controlled waste disposal site, Water proof sheet, Shaking table test

1. はじめに

現在、遮水シートを用いた遮水工を有する管理型廃棄物埋立護岸の耐震設計法は確立されていない。これは、地震動作用時の護岸変位が遮水工の遮水機能に及ぼす影響が明らかでないためである。地震動作用による護岸変位が遮水シートの変形挙動に与える影響について、重力式護岸構造を対象とした模型振動実験¹⁾を行った結果、護岸変位後の遮水シートには場所によって異なる程度のひずみが発生することが明らかとなった。しかし、これは卓越周期が比較的短周期かつ継続時間が数十秒程度の地震動を対象とし、東海地震や東南海・南海地震等で想定される長周期かつ継続時間の長い地震動に対する護岸変位と遮水シートの変形挙動の関係については明らかでない。さらに、上述した実験では遮水シートの上端部は護岸に固定していない。実際の処分場では施工の確実性から遮水シートは天端において護岸あるいは裏込層天端に固定する場合が多い。たとえば、日本埋立浚渫協会発行「廃棄物海面処分場の施工要領(案)」²⁾では、コンクリート方塊や屯袋による天端固定の方法が示されている。遮水シートの端部

固定条件は護岸変位と遮水シートの変形挙動との関係を検討する上で重要な要因であるため、固定条件を考慮した実験は不可欠である。

そこで本研究では、長周期かつ継続時間の長い地震波が護岸に作用し、かつ、遮水シートの端部を現場で見られるコンクリート方塊の押さえ荷重によって固定した場合について、護岸および地盤変位と遮水シートの変形挙動との関係を明らかにすることを目的として、遮水シートを用いた遮水工を有する重力式護岸を対象とした模型振動実験を行った。なお、比較対照のため、入力地震波には港湾構造物に対する地盤の地震応答計算の入力地震波形として標準的に使用されている八戸波、ポートアイランド波も使用した。

2. 模型振動実験概要

(1) 実験概要

模型振動実験には、水深2 mの水槽の底面に振動台が設置されている水中振動台を使用した。実験で想定した護岸断面を図-1に示す。模型の長さの縮尺は1/15である。

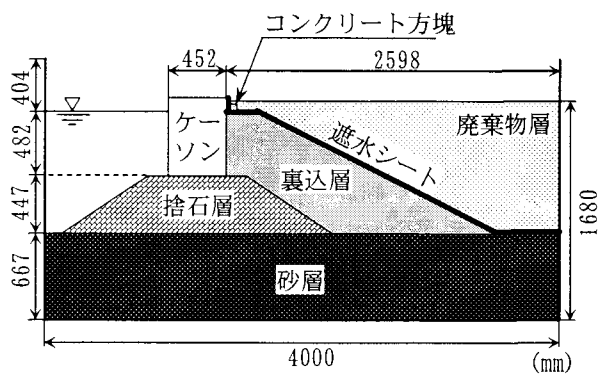
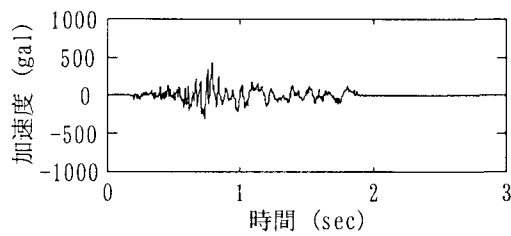
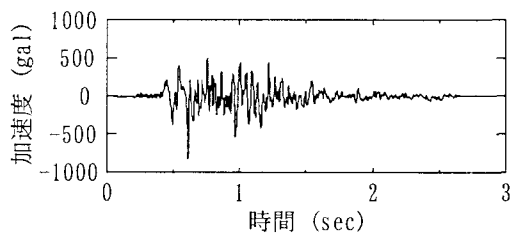


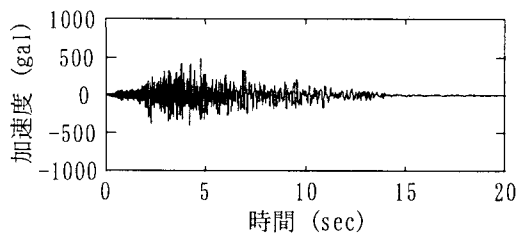
図-1 実験模型断面図



(a) 八戸波



(b) ポートアイランド波



(c) 模擬波

図-2 振動台入力波形

表-1 適用相似則

パラメータ	実物/モデル	縮尺
長さ	λ	15
密度	1	1
時間	$\lambda^{0.75}$	7.62
応力	λ	15
間隙水圧	λ	15
変位	$\lambda^{1.5}$	58.1
速度	$\lambda^{0.75}$	7.62
加速度	1	1

(2) 入力波形の選定

本実験では、図-2に示す3種類の入力波形を使用

した。これらは、「港湾の施設の技術上の基準・同解説（社）日本港湾協会」の中に記載されている八戸波（S252 NS Base, 最大432 gal）およびポートアイランド波（PI-79 NS Base, 最大817 gal），並びに、半経験的な強震動予測手法である経験的グリーン関数法³⁾を用いて、工学的基盤において模擬的に作成された地震波（模擬波）である。なお、八戸波については最大加速度をsmac波350 gal相当に調整した。

(3) 実験に用いた相似則

相似則には種々の提案がなされているが、対象とする現象が地震時の地盤-構造物の挙動であることから、地盤を間隙水と土粒子骨格から成る2層系飽和材料と仮定した時の波動方程式を支配方程式とした井合⁴⁾の提案する相似則を採用した。表-1に本実験で採用した相似則を示す。

(4) 実験に使用した材料

ケーソン模型はアルミニウム製のものを三函用意し、中詰砂を入れて実験に使用した。また、基盤層には相馬硅砂5号にセメントを3%混合したものを使用し、砂層には相馬硅砂5号を使用した。捨石には4号碎石（粒径：20~30 mm）を、裏込石には6号碎石（粒径：5~13 mm）を使用し、廃棄物には7号碎石（粒径：2.5~5 mm）を使用した。

遮水シートは、管理型廃棄物埋立護岸遮水工に敷設されるものと同じポリ塩化ビニル（PVC）製のものを使用した。シートの厚さは実験模型の相似則により決定すべきであるが、PVCのような粘弾性物質に適用される厳密な相似則は存在しない。そのため、遮水シートの厚さは実験模型とほぼ同等の縮尺とし、実際の遮水工で使用される厚さ（3 mm）の1/15である0.2 mm厚のものを使用した。

また、遮水シートの変形、損傷に対する保護緩衝材として、本実験では1 mm厚の長繊維不織布を2枚使用した。

(5) 模型作成手順

実験に用いた土槽は長さ4 m、幅1.2 m、高さ2 mの箱型の鋼製枠である。側面から土および護岸の変形状態を観察するため、鋼製枠の一側面にはアクリル板を使用した。模型の作製は次の通りに行った。まず水中落下法により相馬硅砂5号を枠内に投入して相対密度約40%の砂層を作成し、その上に捨石層を作成し、さらにその上にケーソン模型を設置した。裏込層を1:2.0の法面勾配で作成した後、裏込層上に不織布、遮水シート、不織布をこの順で敷設した。廃棄物層を作成した後、最後に所定の高さまで注水を行った。なお、遮水シートと不織布の上端部は断面が33 mm四方のコンクリート方塊によって押さえ、下端部は鋼製枠にボルトで固定した。また、遮水シートのひずみを測定するため、シートにひずみゲージ（KLM線超大ひずみゲージ：20%までのひずみを計測可能）を貼付した。

(6) 実験ケース

ケース1は八戸波とポートアイランド波をこの順に加振した。ケース2は模擬波のみの加振を行った。

(7) 計測項目

計測項目は、応答加速度、ケーソン前背面および地盤内の水圧、ケーソン変位、地盤変位、遮水シートのひずみである。

3. 模型振動実験結果

(1) 応答加速度について

図-3に、ケース1の八戸波による加振時の土槽底版(AH1)、砂層中央(AH4)、ケーソン前面上端(AH8)、廃棄物層表面(AH21)における水平方向の応答加速度時刻歴を示す。一方、図-6は砂層中央(AH17)から廃棄物層の表面(AH21)にかけての応答加速度の最大値の分布を表したものである。これらの結果より、土槽底版から入力された加速度は砂層で大きく減衰し、砂層より上側では若干増幅するものの、地表面の加速度は入力加速度に対して小さくなった。同様の傾向はポートアイランド波でも見られ、砂層でいったん減衰した加速度は地表面に近づくに従って徐々に増加した。模擬波についても同様の傾向が見られるが、特徴的なのは、砂層より上側では入力波の主要動以降も振動が持続し、振動の大きさがほとんど減衰していない点である。

(2) 水圧について

図-7にケース2のケーソン背面部における加振前後の水圧の深度分布を示す。水圧分布は加振前後でほとんど変化していないが、加振中の最大値は砂層中央(W3およびW4)で大きい。

ケース1の八戸波加振中における砂層の過剰間隙水圧比について見てみると、土槽底版加速度の増加に伴い、過剰間隙水圧比は上昇し始め、加振中に最大値に達した(図-3)。最大値を見るとケーソン前面側では過剰間隙水圧比は約1.0で完全に液状化し、ケーソン直下では約0.4で地盤はやや軟化し、ケーソン背後側では約0.7でほぼ液状化したと考えられる。一方、ケース2については、ケーソン前面側の過剰間隙水圧比は約1.0に達しており完全に液状化したが、ケーソン直下および背後での値は0.3~0.5であり、軟化しているものの完全液状化には達しなかった(図-4)。

(3) ケーソン変位について

ケース1およびケース2において、ケーソンは加振が主要動に達するあたりから大きく変位し、これは過剰間隙水圧の上昇時期と一致している(図-3、図-4)。このことから、ケーソンは地盤の軟化に伴い大きく変位したと考えられる。加振後も変位は継続し、水圧の消散とともに変位の増加が終了したことから、ケーソン変位が地盤変位に依存していたと考えられる。

ケース1およびケース2におけるケーソンの残留変位を表-2に示す。ケース1の加振後のケーソンは、海側への移動と沈下が主な変形モードであり、前傾の程度は小さい。一方、ケース2の加振後のケーソンは、海側へ移動、前傾しながら沈下した。ケーソン上端の水平残留変位を実スケールに換算すると、八戸波では約96 cm、ポートアイランド波では約127 cm、模擬波では約543 cmであった。

(4) 地盤変位について

図-5に、ケース1の八戸波加振後およびケース2の加振後のケーソン変位と地盤内ターゲットの移動量を基に作成した地盤変位ベクトルを示す。変位の基準は加振前の状態とした。ケース1とケース2で変位の大きさは異なるものの、変形の形態は類似しており、ケーソンの海側への変位に伴い、捨石層、裏込層、廃棄物層は全体として海側へ移動、沈下した。特に、砂層前面、捨石層、裏込層天端および法肩部、廃棄物層表面の変位が大きい。

廃棄物層に設置した地表面ターゲットの加振後の沈下量の計測結果を図-8に示す。加振後、地表面は全体的に沈下し、沈下量はケーソンに近いほど大きく、ケーソンから離れるに従って小さくなった。最大沈下量は、八戸波加振後で約4 cm、ポートアイランド波加振後で約7 cm、模擬波加振後で約11 cmであった。以上は、地盤がケーソンの前面側への変位に追従して変形した結果であると考えられる。

(5) 遮水シートのひずみについて

ひずみゲージによる遮水シートのひずみ計測結果を図-3および図-4に示す。なお、図中のひずみは、ひずみゲージの読み値と実際の遮水シートの変形量との関係を一軸引張試験により測定し、その結果を基にひずみゲージの読み値を実際の遮水シートの変形量に補正した値を示している。加振中、遮水シートには振動に伴うひずみが発生し、加振後は残留ひずみが発生した。また、それらの値はケーソンの変位が大きいほど大きな値を示した。なお、実験後遮水シートを撤去する際に目視により観察した結果、遮水シートの表面には不陸の影響による凹凸は見られたものの、損傷は認められなかった。

a) 加振中の動的変形挙動

ケース1の八戸波加振中におけるひずみの時刻歴波形(図-3)を見ると、加振中のひずみの最大値は裏込層天端(ST2)において最も大きく、法尻に向かうに従って減少した。裏込層天端(ST2)におけるひずみは加振終了後も増加している。これはケーソン前面部における砂層の水圧消散が遅いために地盤変形が継続し、そのためケーソン付近のひずみが増加したためと考えられる。また、法尻(ST16)におけるひずみは加振中、負の値である。これは同箇所において加振前にすでに1%未満のひずみが発生しており、加振に伴う地盤変形によって遮水シートが圧縮側の変形を被った結果であると推察される。

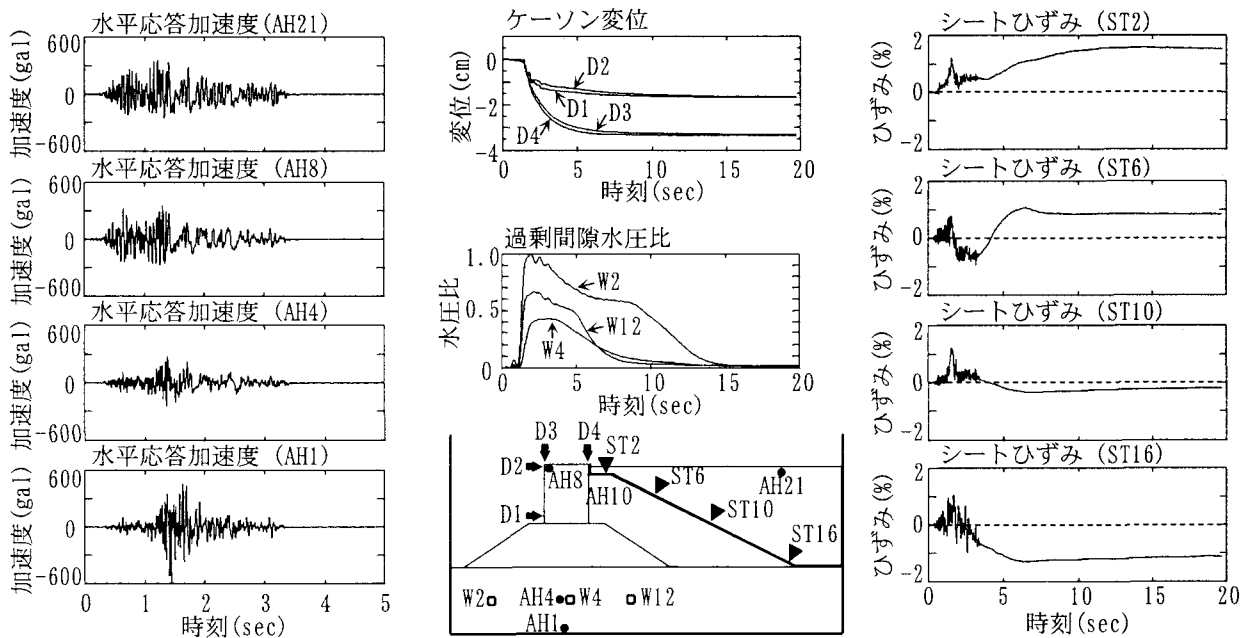


図-3 実験結果時刻歴 (ケース1, 八戸波)

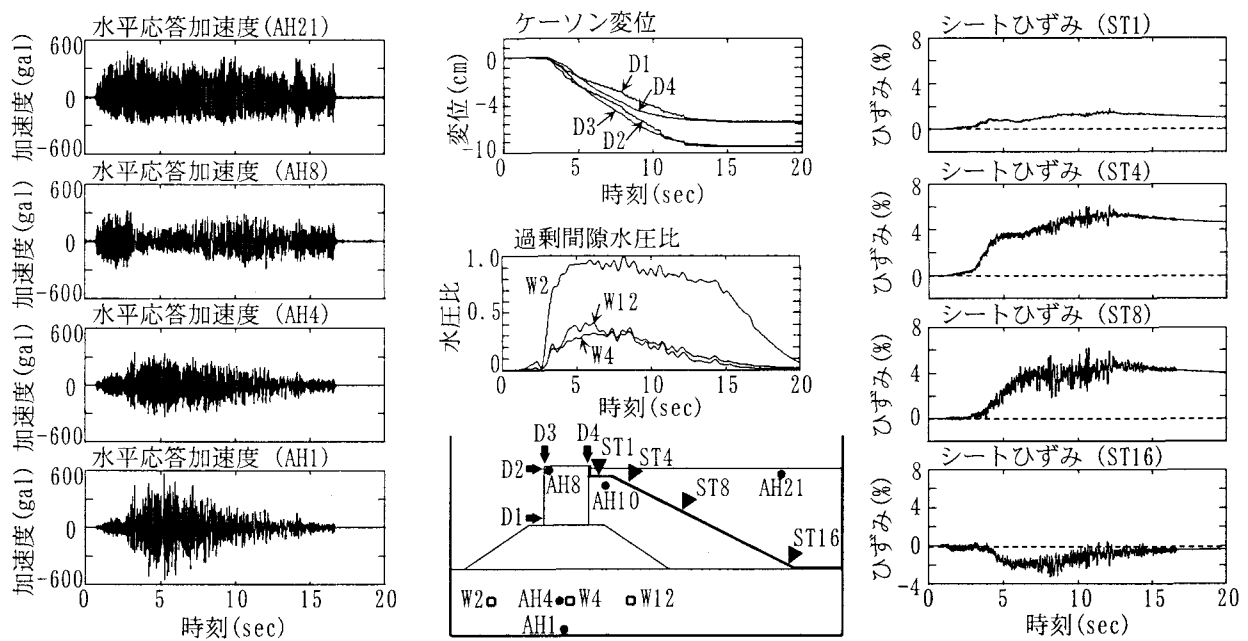
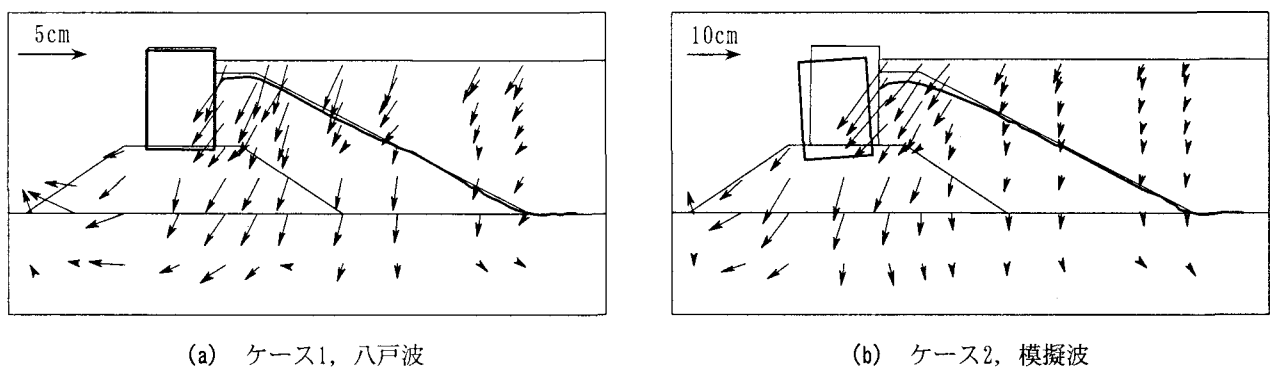


図-4 実験結果時刻歴 (ケース2, 模擬波)



(a) ケース1, 八戸波

(b) ケース2, 模擬波

図-5 ケーソン変位および地盤変位ベクトル

ケース2のひずみの時刻歴波形（図-4）では、ひずみの最大値は裏込層法面上部（ST4～ST6）において最も大きく、約6%のひずみが発生した。また、ひずみの発生時期はケーソンの変位発生とほぼ一致し、さらにケーソンの変位終了後はひずみの増加がほとんど見られないことから、遮水シートのひずみはケーソンの変位に影響されたものと考えられる。

b) 加振後の残留変形状態

遮水シートの加振後の累積ひずみ分布とひずみ増分分布を図-9～図-12に示す。図-9の累積ひずみ分布は、模型作成直後を基準として、加振前、加振後それぞれの段階で発生したひずみを累積加算して得られた分布である。図-11における加振中最大値および加振後残留値は、加振中の最大値と加振後の残留値をそれぞれ加振前の値に加算して得られた値である。また、図-10のひずみ増分分布は、加振前を基準とし、八戸波、ポートアイランド波それぞれの加振によって発生したひずみの分布を示したものであり、図-12のひずみ増分分布は、加振前を基準とし、加振中の最大値および残留値の分布をそれぞれ示したものである。加振前、遮水シートにはすでにひずみが発生し、その大きさは法面下部から法尻にかけて顕著である。そのため、ケース1では加振後の累積ひずみは法肩部や法面上部に比べて法面下部や法尻の方が大きい。一方、加振によるひずみの増分が大きいのは法肩部や法面上部であり、法尻におけるひずみの増分は小さかった。

図-5の地盤変位ベクトル図から、遮水シート敷設近傍において最も変形が顕著なのは、ケーソン直背後の廃棄物層および裏込層法肩部であった。加振後における遮水シートの残留ひずみが最も顕著なのは法肩部や法面上部付近であったが（図-10、図-12）、これは同箇所における地盤変位が遮水シートの変形に影響を及ぼした結果であると考えられる。

4. 遮水シートの地震時挙動に関する考察

(1) 模擬波作用時のケーソン変位と遮水シートの変形挙動との関連性

本実験結果により、模擬波のような長周期かつ継続時間の長い地震動に対しても、遮水シートの変形挙動は、八戸波やポートアイランド波と同様、ケーソン変位と地盤変位に深く関連することがわかった。模擬波の入力により、ケーソンは実スケール換算で海側に約5.4 m水平変位し、同量だけ沈下した。その際に発生した遮水シートのひずみは裏込層法面上部で最も大きく、約6.7%だった。ここで、ひずみは変位と長さの比で定義されることから、表-1の相似則における変位と長さの縮尺の比からひずみの縮尺を求めると、約3.9倍となる。これを用いてひずみの計測値を実スケールに換算すると、約26%となる。相似則がPVCのような粘弾性物質に適用できるかについては不明であるが、この程度のひずみであれば、地震動作用時の護岸変形が原因で遮水シートが破断する可能性は小さいと考えられる。

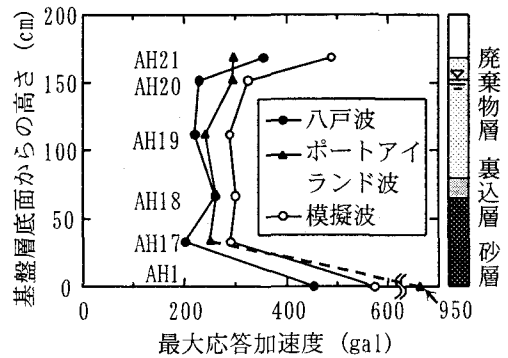


図-6 水平方向最大加速度分布

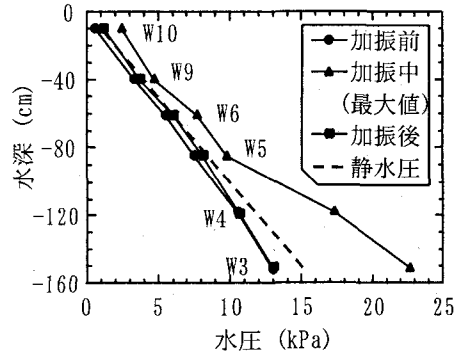


図-7 ケース2の水圧分布（ケーソン背面部）

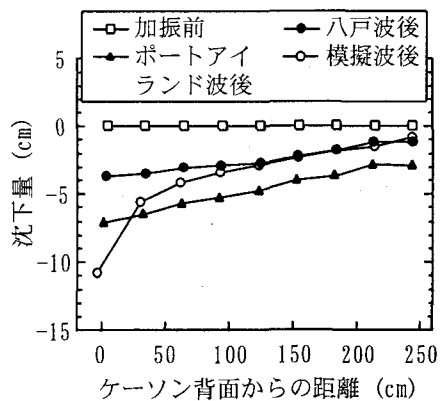


図-8 地表面沈下量

表-2 ケーソンの残留変位

入力波	実験値 (cm)				実スケール換算値 (cm)			
	水平変位		鉛直変位		水平変位		鉛直変位	
	上端	下端	前面	背面	上端	下端	前面	背面
八戸波	1.7	1.7	3.3	3.4	96	98	193	195
ポートアイランド波	2.2	2.0	3.0	2.9	127	116	175	167
模擬波	9.4	6.7	9.3	6.8	543	390	539	393

(2) 遮水シートの端部固定条件が遮水シートの変形挙動に及ぼす影響

遮水シートの上端部をコンクリート方塊を用いて固定した結果、遮水シートの残留ひずみは法面上部付近で最も大きく、天端および法尻に向かうにつれ

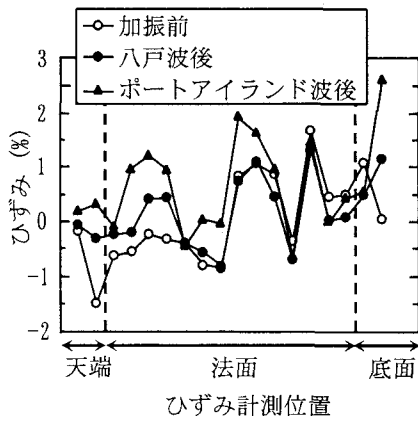


図-9 累積ひずみ分布 (ケース1)

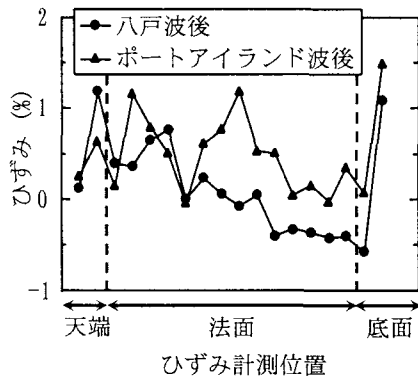


図-10 ひずみ増分分布 (ケース1)

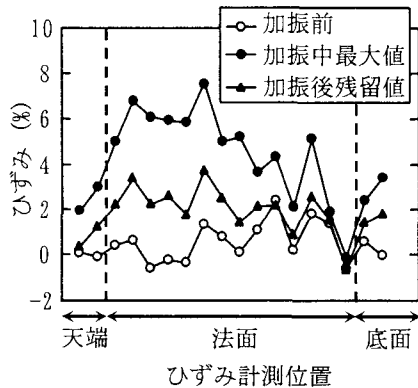


図-11 累積ひずみ分布 (ケース2)

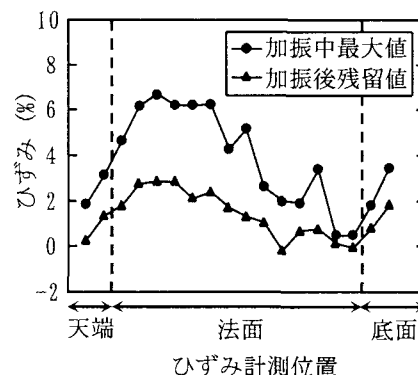


図-12 ひずみ増分分布 (ケース2)

て減少する傾向が見られた。加振後の背後地盤は法

面上部で大きく変形しており、このことが遮水シートのひずみに影響を及ぼしたと考えられる。

一方、遮水シートの上端部をケーソンにボルトで固定した場合、遮水シートはケーソンの変位によって引張られ、残留ひずみは法肩部で最も顕著であった⁵⁾。このことを考慮すると、遮水シートをケーソンに固定せずコンクリート方塊を用いることにより、地震動作用時には遮水シートに大きな引張力を作用させることなく地盤変形への追随性を高める結果になったことが本実験結果によって示唆された。

5. まとめ

本研究では、長周期かつ継続時間の長い地震波が護岸に作用し、かつ、遮水シートの上端部をコンクリート方塊を用いて固定した場合について、護岸および地盤変位と遮水シートの変形挙動との関係を明らかにするため、遮水シートの遮水工を有する重力式護岸を対象とした模型振動実験を行った。その結果、以下に示す事項が明らかになった。

- ① 模擬波による加振の結果、遮水シートに発生したひずみは裏込層法面上部において最大約6.7%であり、天端および法尻に向かうにしたがって減少する傾向が見られた。このような遮水シートの変形挙動は、ケーソン変位および地盤変形と密接に関連したものであることが明らかになった。
- ② 遮水シートの上端部をコンクリート方塊を用いて固定した結果、遮水シートの地盤変形への追随性が向上したことが明らかになった。

今後は、地震動作用時の護岸および遮水シートの変形挙動を評価するための動的解析を行い、管理型廃棄物埋立護岸の耐震性能照査手法を構築する予定である。

謝辞：本研究の遂行にあたり、独立行政法人港湾空港技術研究所 構造振動研究室 野津厚主任研究官には適切なるご指導を頂きました。記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 狩野真吾, 小田勝也, 吉田誠, 三藤正明: 管理型廃棄物埋立護岸遮水シートの地震時変形特性, 第15回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.1131-1133, 2004.
- 2) (社) 日本埋立浚渫協会: 廃棄物海面処分場の施工要領(案), 216p, 2001.
- 3) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's functions, Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp., pp.151-156, 1986.
- 4) Iai, S.: Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field, Report of the Port and Harbour Res. Inst., Vol.27, No.3, pp.3-24, 1988.
- 5) 狩野真吾, 小田勝也, 吉田誠, 三藤正明: 管理型廃棄物埋立護岸の地震時変動に伴う遮水シートの変形特性, 海岸工学論文集, Vol.51, pp.796-800, 2004.