

管理型廃棄物埋立護岸の耐震性に関する 有効応力解析

小田 勝也¹・吉田 誠²・三藤 正明³・秋本 哲平⁴

¹国土交通省国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部室長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail:oda-k92y2@ysk.nilim.go.jp

²五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)

E-mail:makoto.yoshida@mail.penta-ocean.co.jp

³五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)

E-mail:masaaki.mitou@mail.penta-ocean.co.jp

⁴五洋建設株式会社土木設計部 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail:tepei.akimoto@mail.penta-ocean.co.jp

管理型廃棄物埋立護岸に要求される性能は、常時・異常時（地震時等）を問わず護岸内部の管理型廃棄物を安定的に保管し、護岸内部の廃棄物や保有水等を護岸外部の海域に流出させないことである。遮水シート工法の場合、遮水シート天端の高さが内水位より低くならず、遮水シートが破断しないことである。しかし、耐震性能の照査方法は、岸壁あるいは護岸については動的解析による方法が一般的になりつつあるが、廃棄物護岸についてはまだ確立されていない。本研究では、管理型廃棄物埋立護岸の動的解析による耐震性能照査手法の開発を目的として、有効応力解析プログラムFLIPを用いて、遮水シート工法による管理型廃棄物埋立護岸の地震応答解析を実施し、事前に実施した模型実験の挙動を再現することを試みた。

Key Words : dynamic effective stress analysis, gravity-type seawalls for controlled waste disposal water proof sheet, shaking table test

1. はじめに

管理型廃棄物埋立護岸に要求される性能は、常時・異常時（地震時等）を問わず護岸内部の管理型廃棄物を安定的に保管し、護岸内部の廃棄物や保有水等を護岸外部の海域に流出させないことである。遮水工が遮水シート工法の場合について言い換えれば、遮水シート天端の高さが内水位より低くならず、遮水シートが破断しないことである。しかし、要求性能を満足するかどうかの照査方法は、岸壁あるいは護岸については動的解析による方法が一般的になりつつあるが、廃棄物護岸についてはまだ確立されていない。

本研究では、管理型廃棄物埋立護岸の動的解析による耐震性能照査手法の開発を目的として、有効応力解析プログラムFLIP¹⁾を用いて、遮水シート工法による管理型廃棄物埋立護岸に対する地震応答解析を実施し、事前に実施した模型実験²⁾の挙動を再現することを試みた。実験・解析モデルは、粘性土地盤を有する港湾をモデルとして試設計された管理型廃棄物埋立護岸とし、実際に想

定される管理型廃棄物護岸について、地震時における遮水シートの変形および護岸の変形を評価した。なお、護岸直下の軟弱粘性土地盤はサンドコンパクションパイル工法による改良地盤とし、入力地震動には対象港湾で想定されるレベル2相当の地震動として模擬波を使用した。

2. 実験および解析内容

(1) 対象モデル

実験・解析対象モデルは図-1に示すような、粘性土地盤上に建設された管理型廃棄物護岸とした。遮水工は2重遮水シート工法とし、中間保護層の層厚を3mとした。護岸直下の軟弱粘性土地盤はサンドコンパクションパイル工法による改良地盤とした。実験および対象範囲は図-1の中の破線および一点鎖線で囲まれた部分とした。護岸構造および地盤条件は対象港湾における廃棄物埋立護岸の事例を参考にしてその平均的な構造形式および地盤条件を設定した。地盤条件を図-2に示す。

解析対象範囲

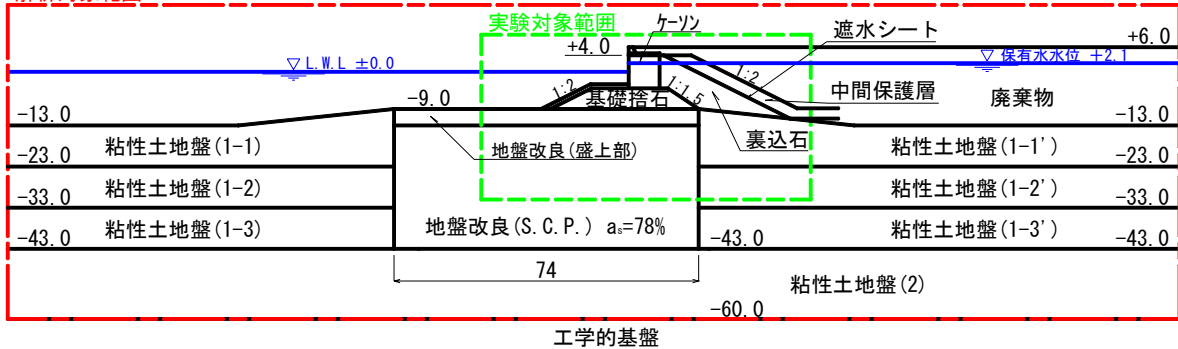


図-1 実験・解析対象モデル

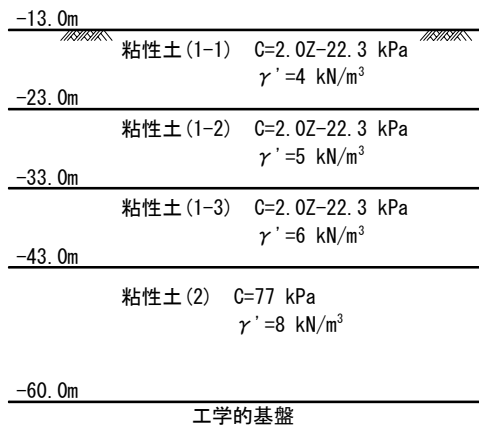


図-2 地盤条件

(2) 実験内容

図-3に実験断面を示す。模型の縮尺は1/20とした。実験土槽には長さ4m、幅0.8m、高さ2mの箱型の鋼製枠を使用した。管理型廃棄物物理立護岸の地震時の実現象を精

度良く再現するために、水中振動台を用いた。始めに土槽内の所定の位置に加速度計および水圧計を設置した後、模型地盤を作製した。改良地盤は、空中落下法により相馬硅砂5号を投入し、高さ約10cm毎に締め固めて相対密度約80%の砂層を作製した。基礎捨石および裏込石には単粒度砕石4号および6号を使用した。また、中間保護層および廃棄物には液状化しない材料でなおかつ入手が容易な単粒度砕石7号を使用した。遮水シートには、予めひずみゲージを貼付した厚さ0.2mmの軟質PVCシートを使用した。遮水シート上端はコンクリートブロック (30mm×30mm×260mm, 3ヶ) を設置することにより固定し、下端はボルトで土槽に固定した。ケーソンの変位を計測するために変位計を所定の位置に設置した。

模型振動実験では井合により提案されている1G場の相似則³⁾を適用した。表-1に相似則を示す。実験結果は、相似則に従って実物スケールに換算した値を使用した。

実験の詳細については文献2)を参照されたい。

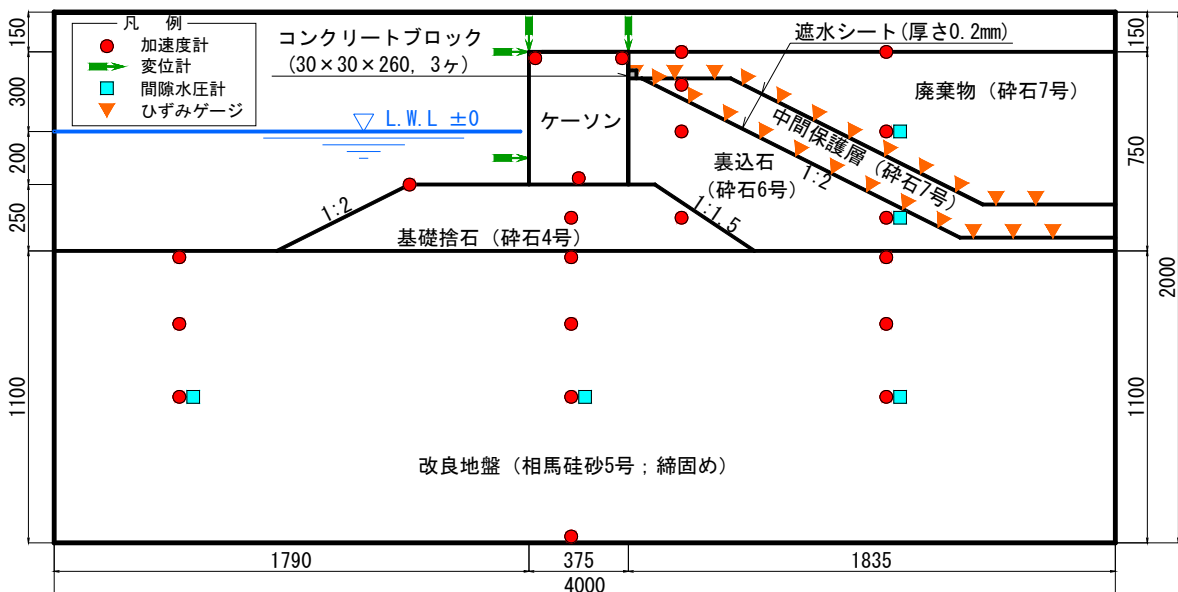


図-3 実験断面図

表-1 1G場の相似則

パラメータ	実物／模型	縮尺
長さ	λ	20
密度	1	1
時間	$\lambda^{0.75}$	9.46
応力	λ	20
間隙水圧	λ	20
変位	$\lambda^{1.5}$	89.4
加速度	1	1
ひずみ	$\lambda^{0.5}$	4.47

(3) 解析内容

本解析における土層分割および有限要素分割図を図-4に示す。地盤要素には、多重せん断バネモデルを実装したFLIPのマルチスプリング要素を使用した。また、ケーソンは線形平面要素とし、底面・背面にはジョイント要素を挿入して接触地盤との滑り・剥離を表現できるようにした。

解析に使用したパラメータを表-2に示す。粘性土層は、粘着力Cから次式によりせん断弾性係数Gma(kPa)を算出した。

$$Gma = 170 \cdot qu = 340 \cdot C \quad (1)$$

ここで、quは一軸圧縮強度(kPa)である。

粘性土(1-1')～粘性土(1-3')では、廃棄物埋立完了直後に圧密を開始して20年経過後の粘着力を算出した。粘性土(1)の圧密特性は、文献3)により塑性指数と圧縮指数の関係から圧縮指数Cvを0.1cm²/minとし、Cvから圧密度Uを求め、下式により強度増加 ΔC (kPa)を算出して粘着力を求めた。

$$\Delta C = 0.35 \cdot \Delta P \cdot U \quad (2)$$

ここで、 ΔP は荷重増分(kPa)である。

廃棄物層および改良地盤は、N値から次式によりせん断弾性係数Gma(kPa)を算出した。

$$Gma = 14100 \cdot N^{0.68} \quad (3)$$

動的解析時の境界条件は底面、側面ともに粘性境界を使用した。また、減衰にはRayleigh減衰を使用した。減衰の大きさはRayleigh減衰剛性比例係数 β の値で与えられ、その設定法として1次元非線形地盤の最大応答変位収斂時の β とする方法が提案されている。本解析では、 β の値を0.001とした場合に1次元非線形地盤の最大応答変位が収斂したため、 β の値を0.001に設定した。

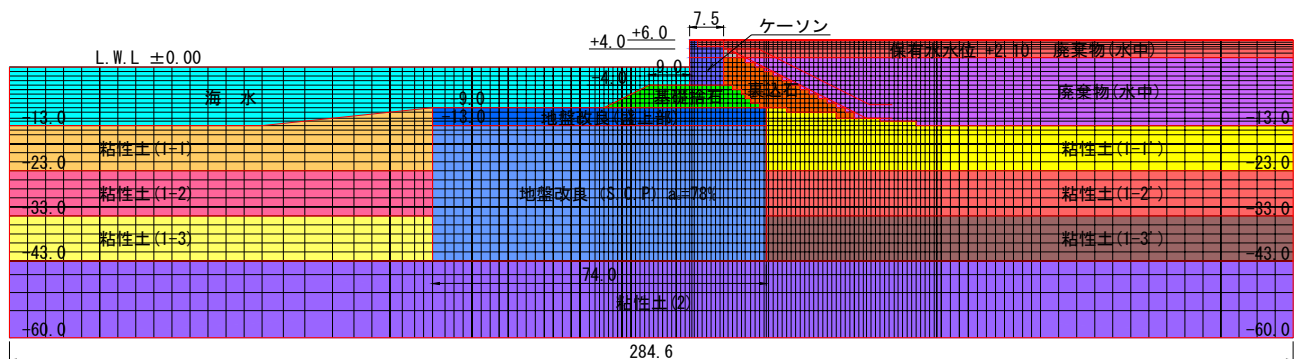


図-4 土層分割および有限要素分割図

表-2 解析に使用したパラメータ

土層名	土層条件および応力状態					単位 体積 重量 (kN/m ³)	N値 N	塑性 指数 IP	ヤング 係数 E (kN/m ²)	ポアソン 比 ν	せん断 波速度 Vs (m/s)	基準 拘束圧 σ _{ma} ' (kN/m ²)	せん断 弾性係数 Gma (kN/m ²)	体積 弾性係数 Kma (kN/m ²)	内部 摩擦角 φ _f (°)	粘着力 c (kN/m ²)	等価内部 摩擦角 φ _f (°)	最大 減衰定数 h max
	上端 (m)	下端 (m)	層厚 (m)	層中央 深度 (m)	層中央 σ _v ' (kN/m ²)													
ケーソン	6.0	-4.0	10.0	1.0	-	21.0	-	-	2.2 × 10 ⁷	0.17	-	-	-	-	-	-	-	-
裏込石(気中)	4.0	2.1	1.9	3.1	53.1	18.0	-	-	-	0.33	225	98.0	1,012,500	2,640,441	40	-	-	0.24
裏込石(水中)	2.1	-9.0	11.1	-3.5	125.7	20.0	-	-	-	0.33	300	98.0	1,800,000	4,694,118	40	-	-	0.24
基礎捨石	-4.0	-9.0	5.0	-6.5	174.0	20.0	-	-	-	0.33	300	98.0	1,800,000	4,694,118	40	-	-	0.24
廃棄物(気中)	6.0	2.1	3.9	4.1	35.1	18.0	3	-	-	0.33	-	109.3	29,762	77,615	25	-	-	0.24
廃棄物(水中)	2.1	-13.0	15.1	-5.5	145.7	20.0	-	-	-	0.33	-	109.3	29,762	77,615	25	-	-	0.24
粘性土(1-1)	-13.0	-23.0	10.0	-18.0	20.0	14.0	-	40	-	0.33	-	15.0	4,760	12,413	-	14	69.0	0.20
粘性土(1-2)	-23.0	-33.0	10.0	-28.0	65.0	15.0	-	40	-	0.33	-	48.8	11,560	30,147	-	34	44.2	0.20
粘性土(1-3)	-33.0	-43.0	10.0	-38.0	120.0	16.0	-	40	-	0.33	-	90.0	18,360	47,880	-	54	36.9	0.20
粘性土(1-1')	-13.0	-23.0	10.0	-18.0	256.2	17.0	-	40	-	0.33	-	192.2	28,900	75,367	-	85	26.3	0.20
粘性土(1-2')	-23.0	-33.0	10.0	-28.0	316.2	15.0	-	40	-	0.33	-	237.2	17,000	44,333	-	50	12.2	0.20
粘性土(1-3')	-33.0	-43.0	10.0	-38.0	371.2	16.0	-	40	-	0.33	-	278.4	18,700	48,767	-	55	11.4	0.20
粘性土(2)	-43.0	-60.0	17.0	-51.5	218.0	18.0	-	-	-	0.33	-	163.5	26,180	68,273	-	77	28.1	0.20
改良地盤(盛上部)	-9.0	-13.0	4.0	-11.0	20.0	20.0	5	-	-	0.33	-	15.0	42,159	109,944	40	-	-	0.24
改良地盤	-13.0	-43.0	30.0	-28.0	190.0	20.0	10	-	-	0.33	-	142.5	67,544	176,145	40	-	-	0.24

(4) 入力地震動

入力地震動を図-5に示す。解析に使用した地震動は、レベル2相当の地震動である模擬波とし、工学的基盤に入力して解析を実施した。また、実験に使用した地震動は、模擬波を工学的基盤に入力して1次元地震応答解析より算定した土槽底版の位置における地震動である。模擬波は、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⁴⁾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である。なお、実験に使用した地震動は、1次元地震応答解析より算定した地震波形を、相似則に従い時間軸を $1/\lambda^{0.75}(=1/9.46)$ に圧縮したものを使用した。

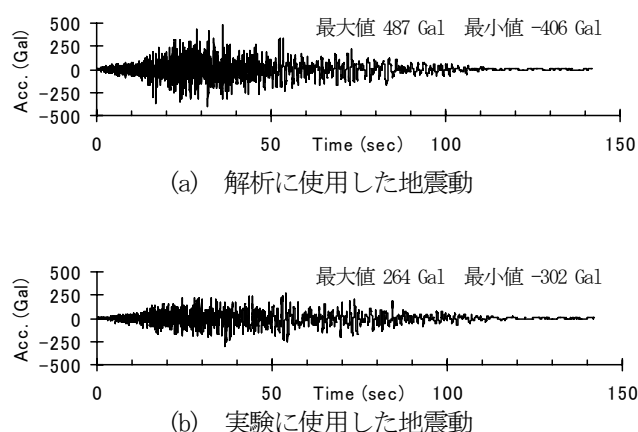


図-5 入力地震動

3. 解析結果

(1) 時刻歴

解析結果および実験結果の時刻歴波形を図-6に示す。

図-7(a), (b)より、水平応答加速度振幅の解析値は、実験値と比較して全体的に小さな値を示していることがわかる。これは実験における入力加速度(AH1)が解析値よりもやや大きかったことによると推察される。解析による加速度は下から上に伝達されるに従って増幅する傾向を示しており、実験結果を良く捉えている。しかし、廃棄物地表面加速度(AH22)の実験値は、解析値と比較して大きな値を示している。これは、廃棄物地表面の加速度計(AH22)が土槽の影響を若干受けたためと推察される。

図-7(c), (d)より、ケーソンの水平変位(D2)および鉛直変位(D3)の実験値は、加振開始直後から変位し始めて漸増し、入力加速度が大きくなる27秒、46秒、64秒および80秒付近で変位が大きくなる傾向を示している。一方、解析値は67秒および94秒付近で変位が大きくなって

おり、局所的には実験結果と異なっているが、全体的には実験による加速度時刻歴の増加傾向を概ね捉えている。実験結果によると、ケーソンは最終的に海側へ2.0m水平変位し、0.8m沈下した。一方、解析結果によると、ケーソンは最終的に海側へ3.1m水平変位し、1.2m沈下しており、実験値と概ね一致している。

図-7(e), (f)より、上側の遮水シートのひずみS23および下側のひずみS4は、ケーソン変位と同様に、実験値は加振開始直後から漸増し、入力加速度が急増する時刻付近で大きくなる傾向を示している。一方、解析値は入力加速度が急増する時刻とはやや異なる時刻においてひずみが大きくなっているが、全体的な増加傾向は実験値を概ね捉えている。上側の遮水シートの最大ひずみの解析値および実験値はそれぞれ16%および21%、下側はそれぞれ24%および20%であり、解析値と実験値は概ね一致している。解析結果および実験結果とも、ケーソン変位と遮水シートのひずみの時刻歴波形が良く似た形状を示しており、遮水シートのひずみがケーソン変位に依存する様子を本解析により良く捉えている。

(2) ひずみ分布

図-6に遮水シートのひずみの最大値分布の解析値と実験値の比較を示す。遮水シートのひずみは、実験値および解析値ともに裏込法肩付近に集中しており、解析結果は実験結果を良く捉えている。しかし、解析では遮水シートは地盤変形に追従するものと仮定しているのに対して、実験では遮水シートと地盤に滑りが生じているため、解析によるひずみは発生分布が比較的狭くなり最大値は大きくなる傾向を示している。このことから、解析により算定される遮水シートのひずみは、設計上安全側の結果になる可能性が高いことが示唆される。本解析結果から算定した遮水シートの最大ひずみは約30%で弾性範囲内であるため、今回の想定地震動作用時において遮水シートは破断しないものと判断される。

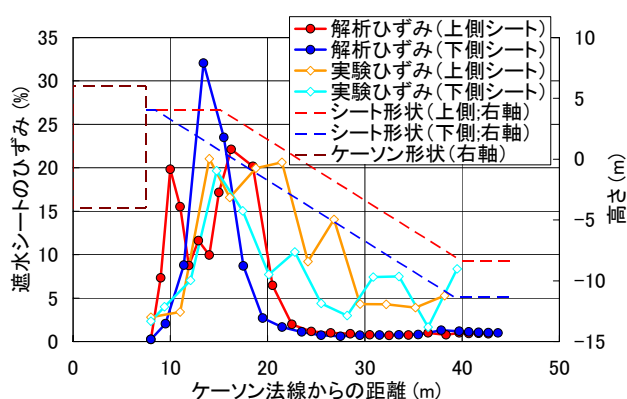
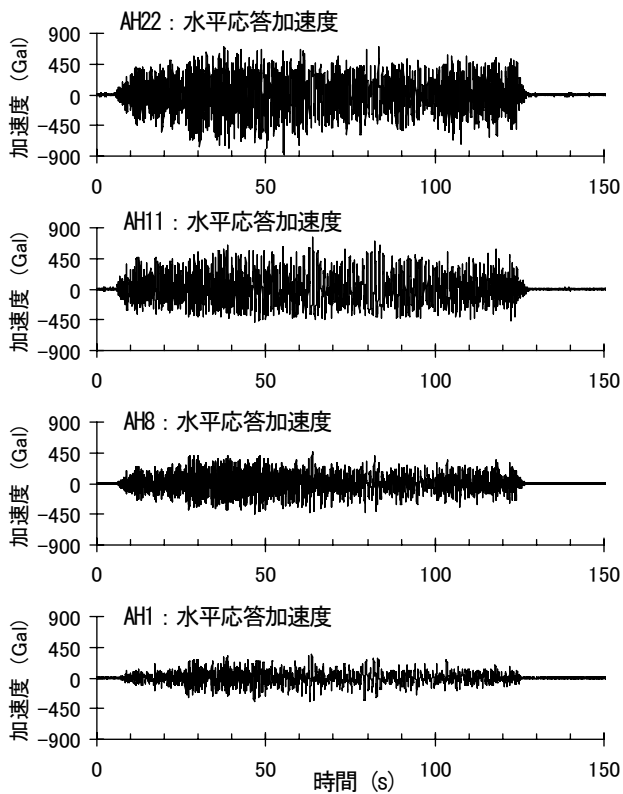
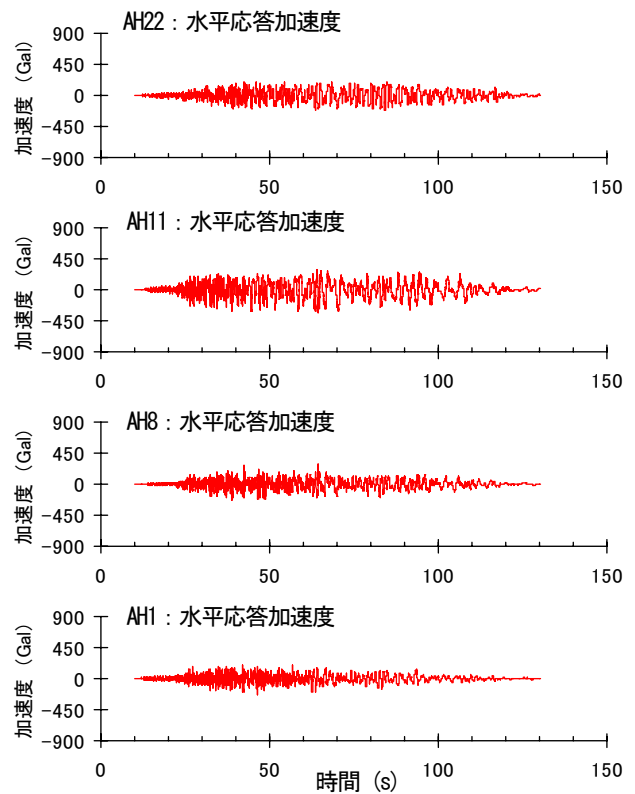


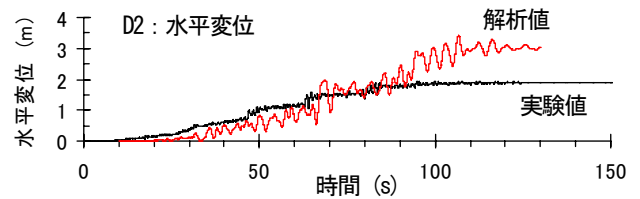
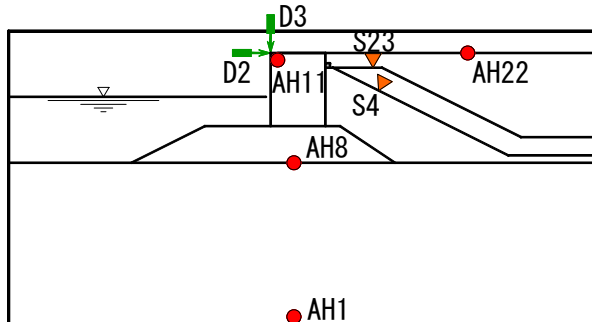
図-6 遮水シートひずみ分布



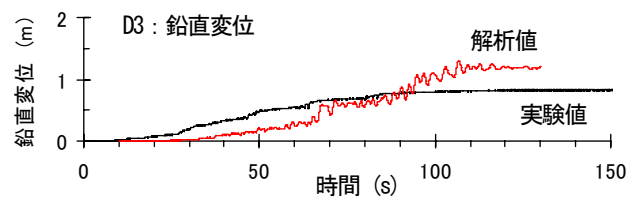
(a) 水平応答加速度(実験値)



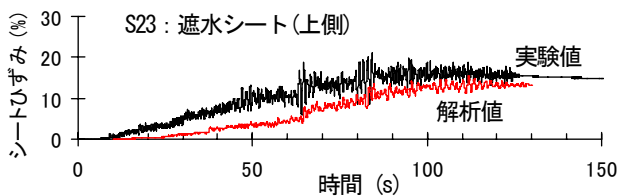
(b) 水平応答加速度(解析値)



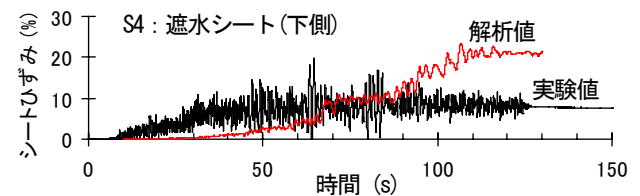
(c) ケーソン水平変位



(d) ケーソン鉛直変位



(e) 遮水シート(上側)ひずみ



(f) 遮水シート(下側)ひずみ

図-7 時刻歴波形

(3) 廃棄物地表面形状

図-8に廃棄物地盤の地表面形状の解析結果および実験

結果を示す。解析結果によるとケーソン直背後における廃棄物地盤の地表面変位は、水平変位が約3.0m、鉛直

変位が約2.2mであり、一方、実験結果によると水平変位が約1.7m、鉛直変位が約2.1mだった。ケーソン前面からの距離が12m付近において、解析値は実験値より地表面が若干低くなったが、解析による廃棄物地盤の地表面形状は、実験結果と概ね一致している。

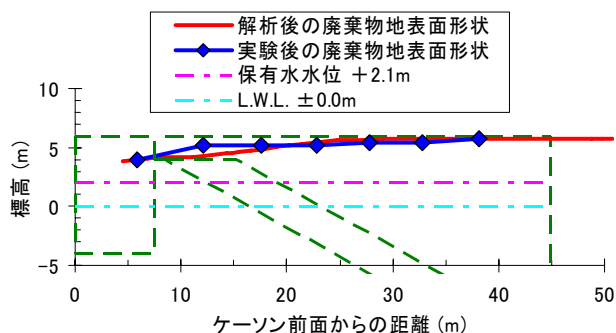


図-8 廃棄物地表面形状

(4) 遮水シート形状

図-9に遮水シートの形状の解析結果を示す。地震後、遮水シート天端の標高は+1.0mまで低下し、保有水水位+2.1mより低くなってしまったため、護岸内部の保有水が浸出すると判断される。このため、本解析ケースでは、遮水シート天端の標高を高く設定しなおす必要があると考えられる。

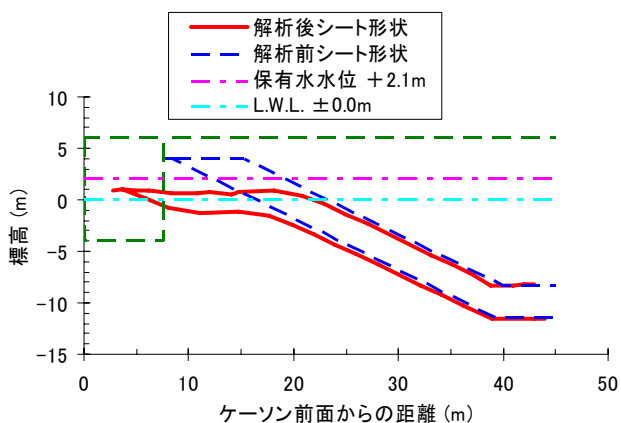


図-9 遮水シート形状

4. まとめ

有効応力解析プログラムFLIPを用いて、粘性土地盤を有する港湾をモデルとして設計した管理型廃棄物埋立護岸に対する地震応答解析を実施し、事前に実施した模型実験の挙動を再現することを試みた。

本解析結果から得られた知見を以下に示す。

- ①水平応答加速度、ケーソンの変位および遮水シートのひずみの時刻歴波形によると、地震動が基盤から上に伝達されるに従って増幅する様子や、ケーソンの変位および遮水シートのひずみの時刻歴波形形状について、解析結果は実験結果を概ね再現することができた。
- ②遮水シートのひずみの最大値分布によると、遮水シートのひずみが裏込法肩付近に集中している様子について、解析結果は実験結果を良く捉えている。しかし、解析では遮水シートは地盤変形に追従するものと仮定しているのに対して、実験では遮水シートと地盤に滑りが生じているため、解析によるひずみは発生分布が比較的狭くなり最大値は大きくなる傾向を示している。このことから、解析によるひずみは、設計上安全側の結果になる可能性が高いことが示唆される。
- ③本解析結果から算定した遮水シートの最大ひずみは約30%で弾性範囲内であるため、今回の想定地震動作用時において遮水シートは破断しないものと判断される。
- ④解析による廃棄物地盤の地表面形状は、実験結果と概ね一致している。
- ⑤本解析結果によると、地震後の遮水シート天端は保有水水位より低くなってしまったため、護岸内部の保有水が浸出すると判断される。このため、遮水シート天端の標高を高く設定し直す必要があると考えられる。

以上より、有効応力解析プログラムFLIPを用いた、遮水シート工法による管理型廃棄物埋立護岸の地震応答解析により、事前に実施した模型実験の挙動を概ね再現することができた。

参考文献

- 1) Susumu IAI, Yasuo Matsunaga, and Tomohiro Kameoka : ANALYSIS OF UNDRAINED CYCLIC BEHAVIOR OF SAND UNDER ANISOTROPIC CONSOLIDATION, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.32, No.2, pp.16-20, 1992.
- 2) 吉田誠, 小田勝也, 狩野真吾, 三藤正明, 秋本哲平: 管理型廃棄物埋立護岸の耐震性に関する模型振動実験, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.606-609, 2006.
- 3) Susumu IAI : Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1g Gravitational Field, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol.27, No.3, 1988.
- 4) K. Irikura : Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's functions, Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp., pp.151-156, 1986.

(2007.06.29 受付)