



巨大地震に備える広域廃棄物処分のための の海面処分場の設計と構造に関する研究

広島大学大学院工学研究院
社会環境空間部門 教授
土田 孝

発表の内容

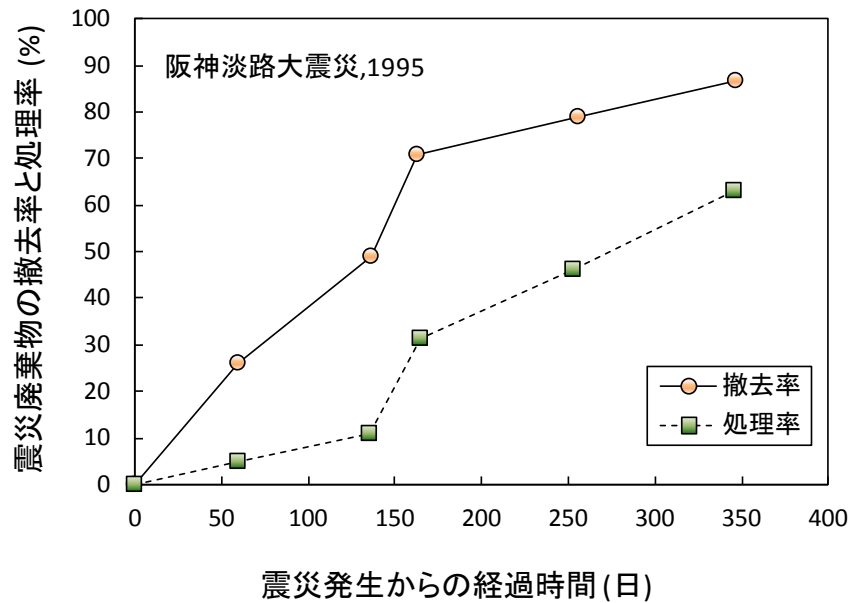
1. 巨大地震の災害廃棄物のための海面廃棄物処分場の必要性和必要性能
2. 巨大地震に備える海面廃棄物処分場の護岸断面の検討
3. 巨大地震に備える海面廃棄物処分場への津波の影響に関する検討
4. まとめと今後の課題

1. 巨大地震の災害廃棄物のための海面廃棄物処分場の必要性和必要性能

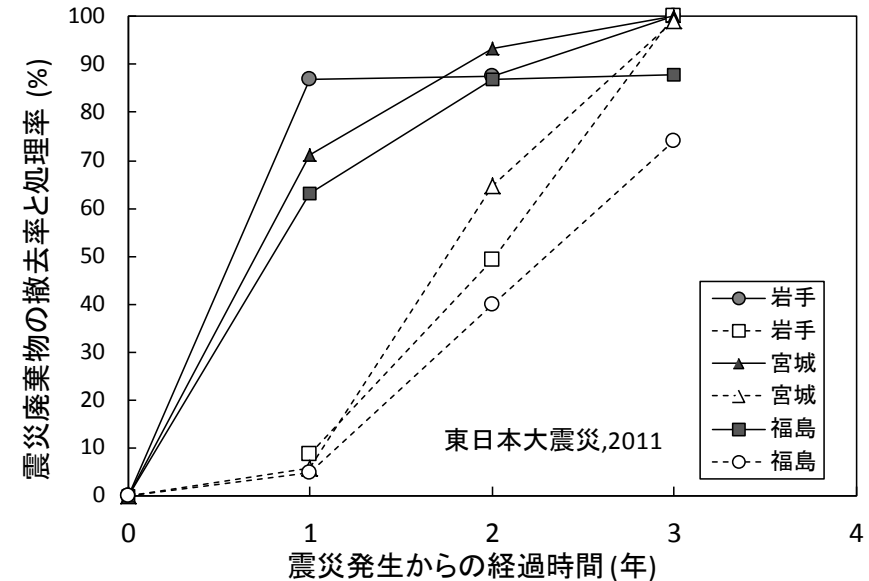
2つの巨大地震で発生した災害廃棄物とその処分速度

阪神淡路大震災: 災害廃棄物約**2000万トン**

東日本大震災: 災害廃棄物が約**2,000万トン**, 津波堆積物約**1,000万トン**, 計約**3,000万トン**の災害廃棄物が発生.



阪神淡路大震災



東日本大震災

震災ガレキの撤去率と処分率の推移

東日本大震災では震災ガレキを撤去して仮置き場に搬入する速度は阪神淡路大震災と同様であったが、仮置き場の**廃棄物の処分に大きな時間を要した**.

巨大地震発生時の災害廃棄物発生量と処理相当年数の試算結果

*環境省巨大地震発生時における災害廃棄物対策検討委員会2014年3月
<https://www.env.go.jp/recycle/waste/disaster/earthquake/conf01.html>

南海トラフ巨大地震

地域 ブロック	要焼却量 (万トン)	処理相当年数 (年)	要埋立処分量 (万m ³)	処理相当年数 (年)
東北地方	0	0年	0	0年
関東地方	30～38	0年	30～60	0年
中部地方	1,239～1,548	10～13年	887～1897	16～35年
近畿地方	1,160～1,449	12～15年	889～2295	17～46年
中国地方	225～282	3年	147～313	6～14年
四国地方	1,132～1,415	25～31年	782～1660	67～145年
九州地方	320～400	5～6年	236～486	5～11年
全国総計	4,106～5,133	6～8年	2970～6711	8～20年

首都圏直下型地震

地域 ブロック	要焼却量 (万トン)	処理相当年数 (年)	要埋立処分量 (万m ³)	処理相当年数 (年)
関東地方	482～603	3～4年	698～2213	8～26年

巨大地震のための海面処分場と必要性能

(環境省巨大地震発生時における災害廃棄物対策検討委員会の間とりまとめ)

- ・中部地方, 近畿地方, 四国地方では, 既存の廃棄物処理施設のみの対応では大きな処理相当年数を要する.
- ・仮設の処理施設や広域連携による廃棄物処理を検討する必要がある.
- ・膨大な廃棄物の円滑な処理に向けた処理体制の確保のための必要な方策として以下の点が指摘されている.
 - 1) 分別の徹底, 積極的な再利用, 仮置き場の確保
 - 2) 既存施設の早期復旧および受入量の最大限の確保
 - 3) 仮設処理施設の整備
 - 4) **最終処分場の確保**
- ・「最終処分場の確保」については, 「膨大な廃棄物の処理を受け入れることのできる**最終処分場をあらかじめ確保しておくことが必要**」と指摘し、国は「**災害廃棄物処理するための大規模な海面最終処分場の整備**について関与する」とともに, 跡地利用管理のために事業主体への財政支援等を行うべき、と指摘している.
- ・今後発生が予想される「**巨大地震の災害廃棄物のための海面処分場**」は、新しい視点であり、この観点から技術的にも検討を行う必要があると考えられる。

巨大地震に備える海面処分場の必要性能

- ・処分場として必要な容量を空けた状態で巨大地震の地震と津波に耐え、発災直後から災害廃棄物処分場として機能できる。

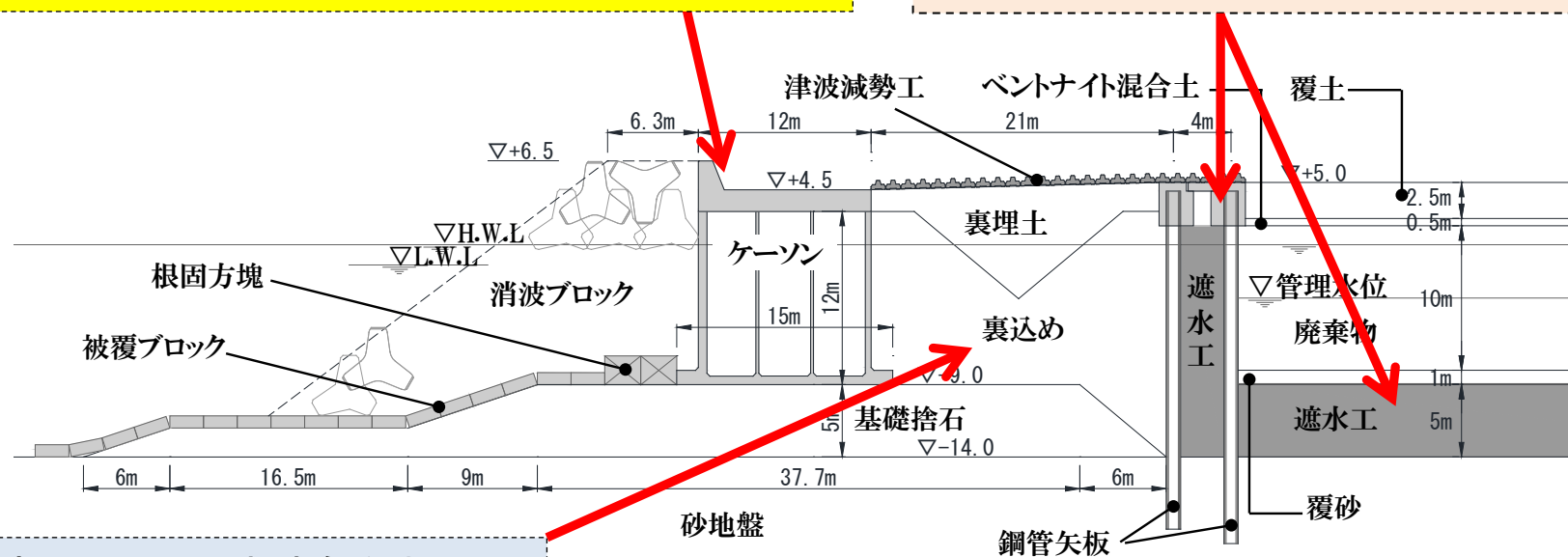
2. 巨大地震に備える海面廃棄物処分場の 護岸断面の検討

巨大地震に備える海面処分場の護岸および遮水工について考えられる断面を想定し、遠心載荷模型実験と水中振動台実験の実験結果に基づく検討と数値解析を行って、レベル2地震動に対して安全な廃棄物護岸の構造について検討を行った。

護岸工：海面処分場の施工で多くの実績を持つ重力式護岸のケーソンとした。ケーソン前壁は漂流物衝突による破損を考慮して前壁厚を600mmとした。

遮水工：廃棄物埋立て箇所^①の底面および側面に設ける。底面遮水工は埋立て箇所の直下に土質系遮水材を敷設。

側面遮水工は鋼管矢板(φ1,000mm)による二重締切り内部に土質系遮水材を充填。



裏込め工は、崩壊角を求めた上で影響範囲に余裕代を見込み、その幅を21mとした

検討に用いた海面廃棄物処分場の断面

現行設計法による安定検討結果一覧 (耐力作用比, 仕様)

検討項目	防波堤	控え矢板式護岸	遮水護岸
滑動(変動)	1.163	—	1.110
転倒(変動)	1.160	—	2.031
基礎の支持力(変動)	1.038	—	1.082
円弧すべり(永続)	1.645	—	1.340
矢板の根入れ長	—	6.0m	—
矢板の仕様	—	$\phi 1,000\text{mm} \times t16\text{mm}$	—
タイ材の仕様	—	SS490, $\phi 100\text{mm}$	—
控え版の仕様	—	H=5.0m	—

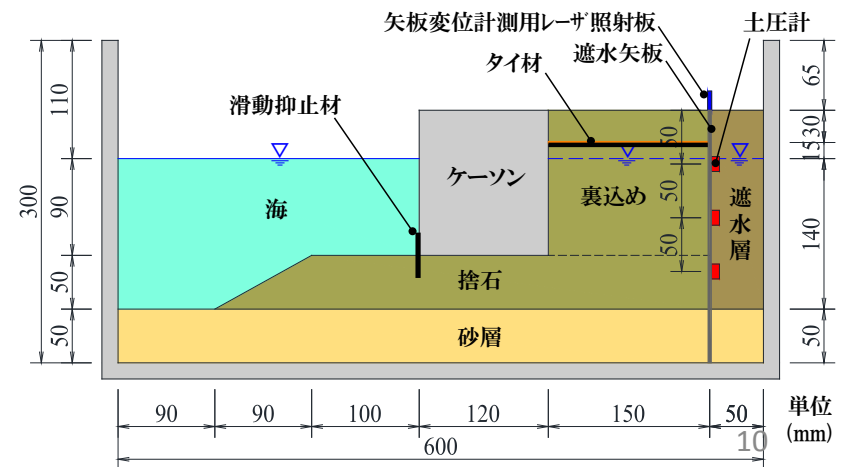
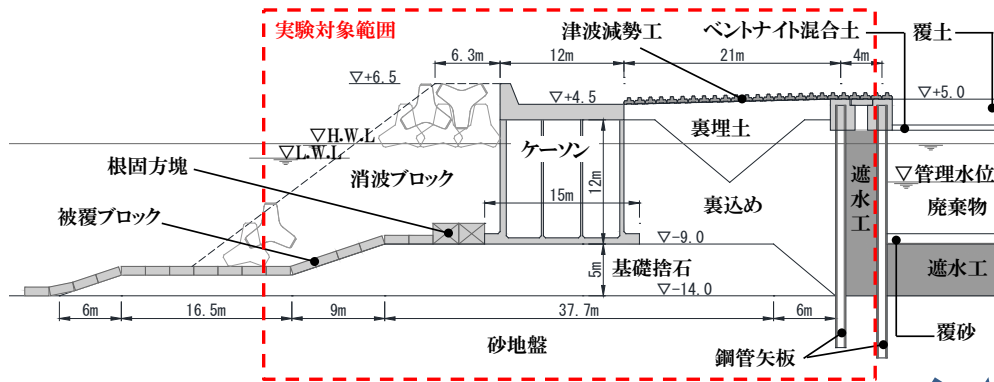
設計した処分場護岸の巨大地震に対する安定性を検討するため、静的震度として岸壁などに用いられる値として最大クラスの $k_h=0.25$ を用いて地震時の安定検討を行った。レベル2地震動については水中模型振動台実験と地震応答解析によって検討した。

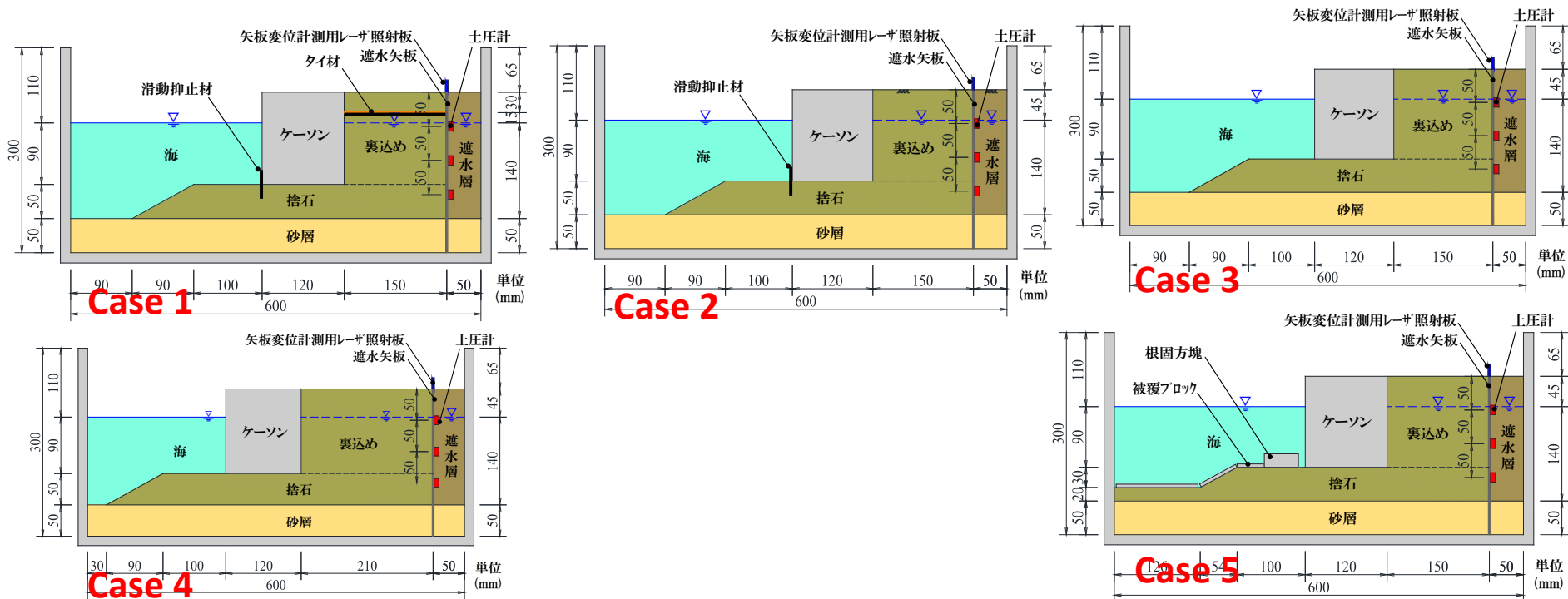
護岸構造と遮水構造の分離に関する 遠心載荷模型実験による検討

幅広の裏込めとタイ材の切断により護岸被災時の遮水工への影響を低減することが本研究の遮水護岸構造の特徴である。

この効果を遠心模型実験で確認した。実験では震度法で静的深度0.25に相当する水平力を模型に静的載荷した。

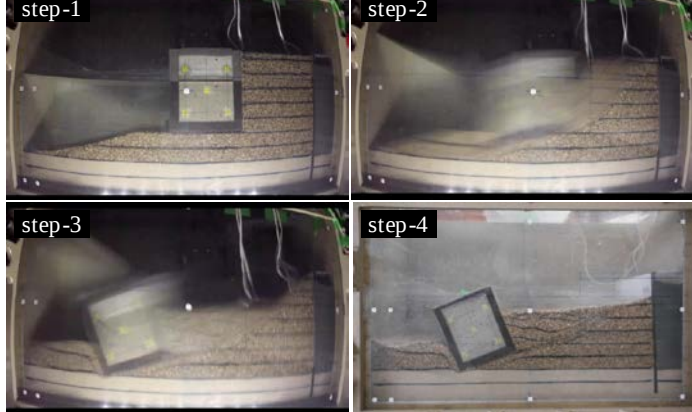
遮水護岸全体の変形特性、タイ材の有無が矢板変形量に及ぼす影響、裏込め幅の大小が矢板変形量に及ぼす影響、被覆ブロックおよび根固方塊が護岸変形を調べた。



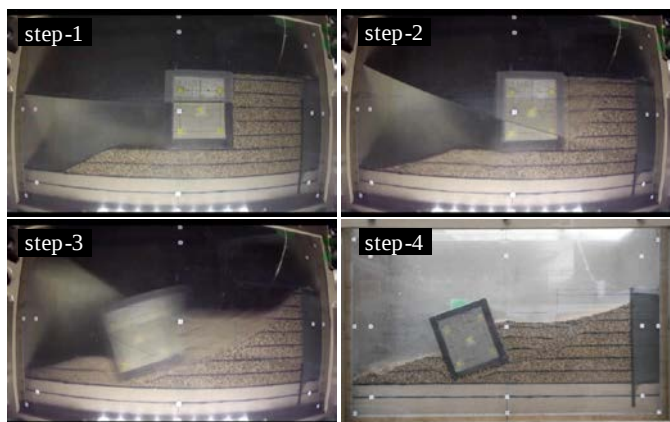


項 目	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5
破壊時傾斜角(°)	18.8	14.3	15.6	14.1	17.6
破壊時傾斜角(°)	18.8	14.3	15.6	14.1	17.6
見かけの水平震度	$k_h=0.322$	$k_h=0.247$	$k_h=0.269$	$k_h=0.244$	$k_h=0.302$
矢板天端変位(cm)	85.9	25.2	36.5	13.8	22.8
ケーソン水平変位(cm)	1296	1008	1072	912	952
ケーソン鉛直変位(cm)	536	448	440	328	224
裏込め水平変位(cm)	1232	928	1008	776	912
裏込め鉛直変位(cm)	544	520	520	400	416

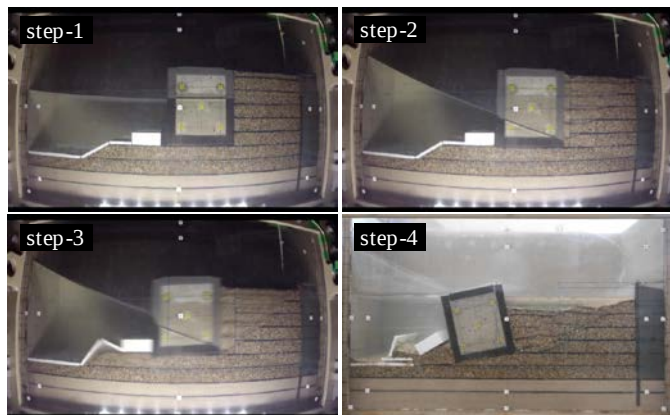
Case 1



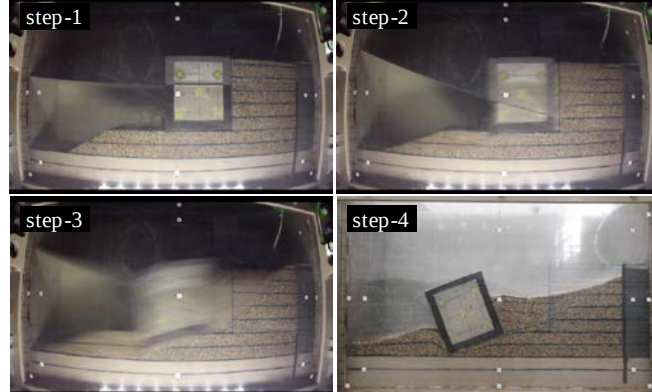
Case 3



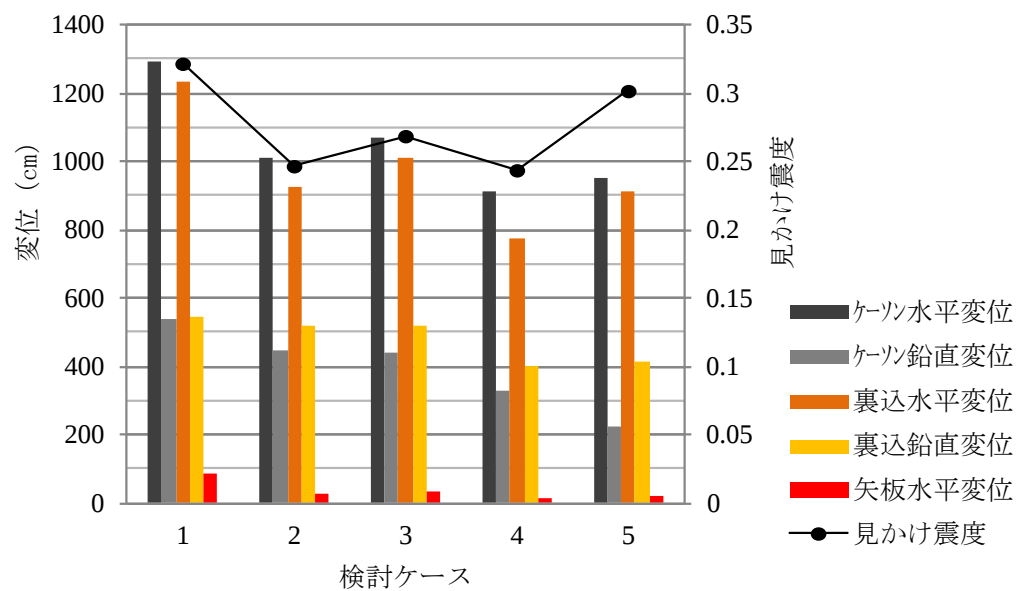
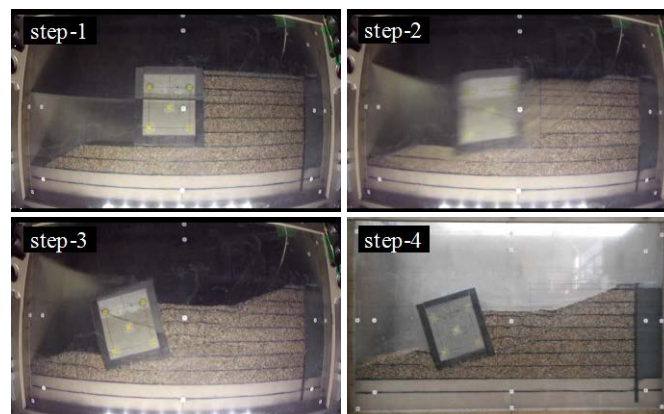
Case 5



Case 2



Case 4

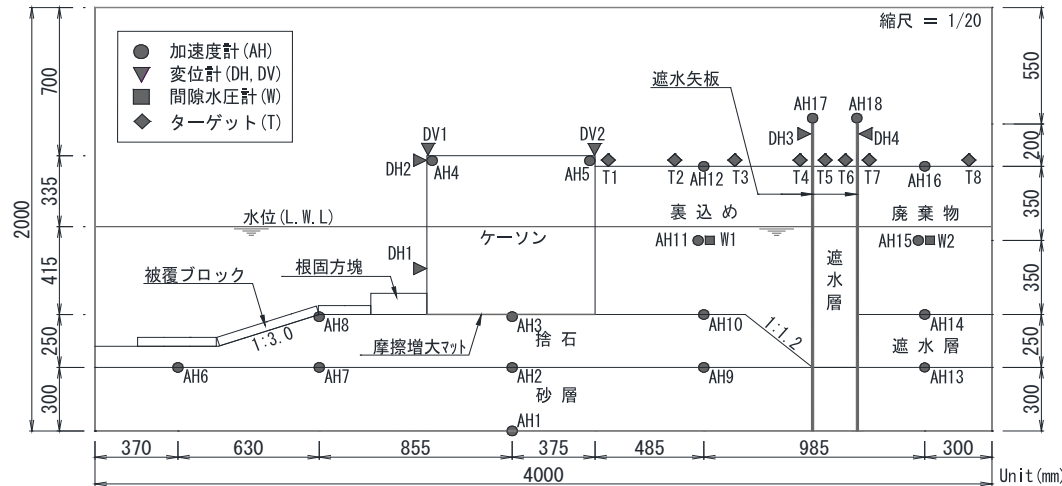


遠心載荷模型実験結果のまとめ

ケース1～5により遠心載荷実験で求めたケーソン護岸と背後の遮水矢板の天端に発生する残留変位をまとめると、以下ようになる。

- 1) ケーソンと遮水矢板を結ぶタイ材により護岸の安定性は向上するが、大きな加速度が作用して護岸が破壊に至った際には遮水矢板の変位はより大きくなる。よって、**タイ材は施工中の遮水矢板を安定させる効果はあるが、構造上不要となった状況ではタイ材を切断して遮水構造を独立させることが有効である。**
- 2) ケーソン背後の**裏込めの幅を広くすることにより**、地震によって護岸周りに発生するすべり面が矢板に達することがなく、矢板の変形量を低減することができる。
- 3) すべりの発生を抑制するカウンターウェイトとしての効果を有する**被覆ブロックと根固方塊は、護岸の安定性向上効果と矢板の変形量低減効果を持つ。**

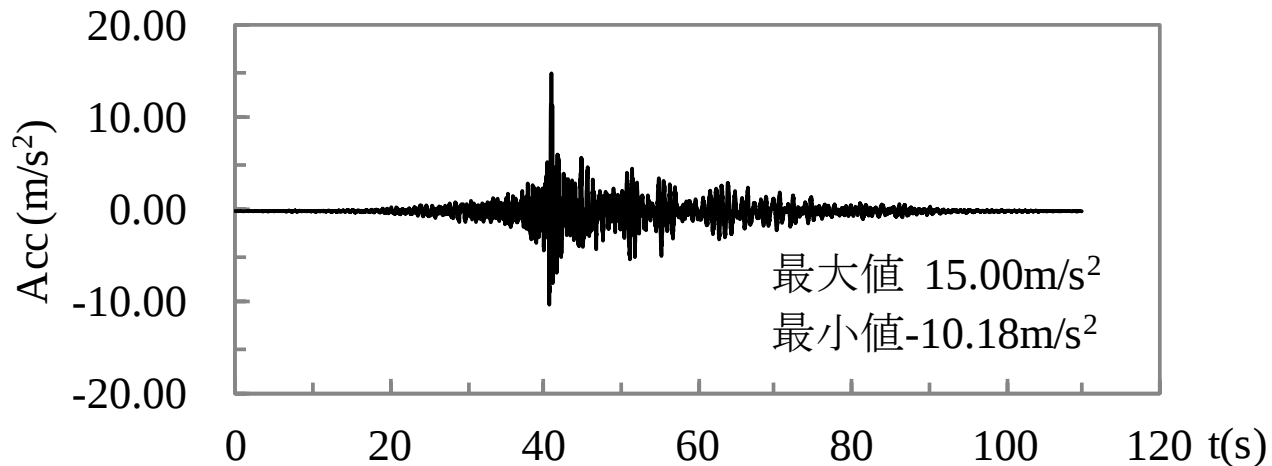
水中振動台実験結果の検討



模型断面および計測機器配置

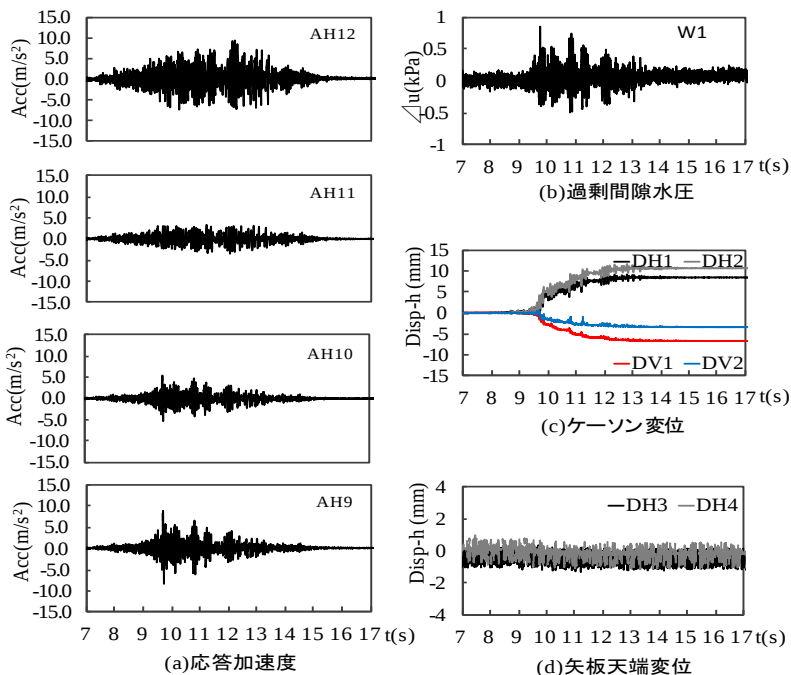
実験の目的

護岸工と遮水工を繋ぐタイ材を切断し、幅広の裏込めにより両者を構造上分離する構造において、レベル2地震動に対して廃棄物(遮水)護岸が示す変形特性を評価する。

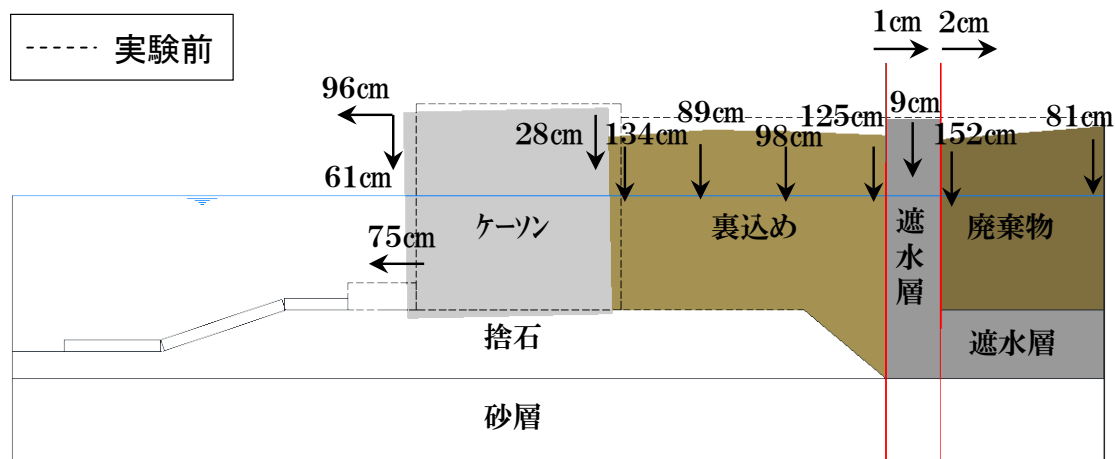


入力波形2 (レベル2地震相当)
最大加速度振幅15.00m/sec²

レベル2地震動に対する処分場模型の応答



----- 実験前



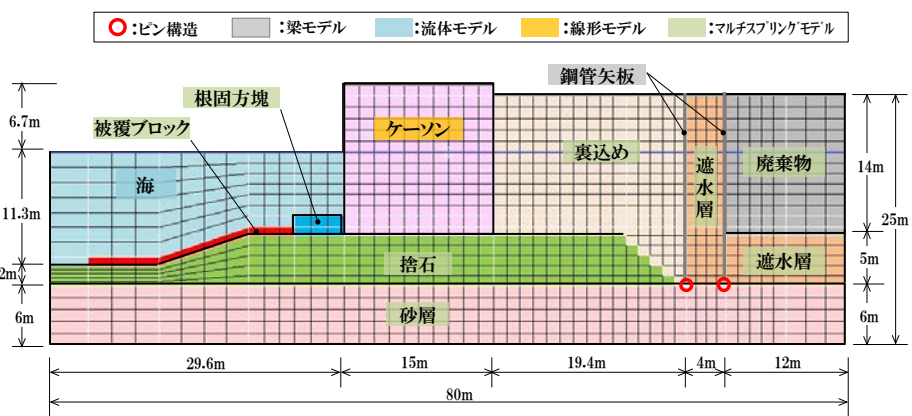
レベル2地震動を加震したときの残留変位(実物換算値)

レベル2地震動を加震したときの試験結果時刻歴

ケーソン残留変位は水平方向に最大96cm, 鉛直方向61cm
遮水矢板の残留変位は2cmであった。

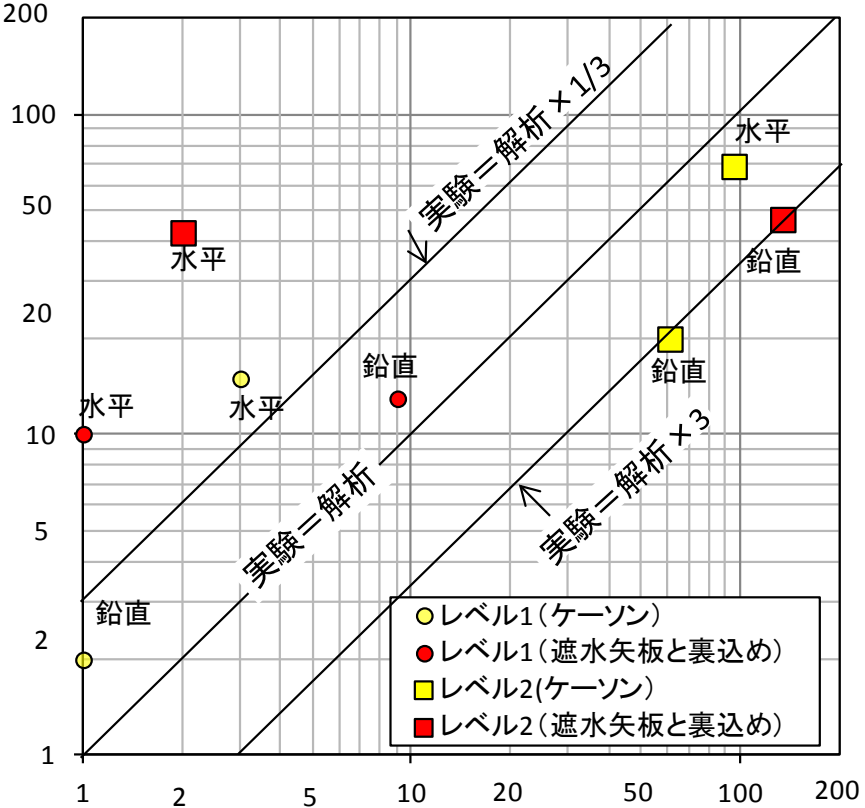
(社)鋼管杭協会・鋼矢板技術委員会によると, 矢板長の1.5%程度が水平変位の許容値としている。仮に, 1.5%を用いると海側で36cm, 陸側で37.5cmが許容値の目安。これらより判断すると, 提案した構造はレベル2地震波相当において遮水工の残留変位を抑え構造安全性を確保できたと考えられる。

FLIPによる解析値と実験値の比較



FLIPモデル要素および要素分割

FLIPによる計算変形量(cm)



振動台実験による変形量(cm)

	密度 ρ (t/m^3)	有効拘束圧 $\sigma_{ma'}$ (kN/m^2)	基準せん断剛性 G_{ma} (kN/m^2)	基準体積弾性係数 K_{ma} (kN/m^2)	m_G	m_K	ポアソン比 ν	間隙率 n	粘着力 c (kN/m^2)	内部摩擦角 $\phi_r(^{\circ})$	最大減衰定数 h_{max}
砂層	1.90	143	122,700	319,800	0.5	0.5	0.33	0.45	0	35	0.20
捨石	1.97	139	96,800	252,500	0.5	0.5	0.33	0.41	20	35	0.20
裏込め	2.00	58	16,200	42,300	0.5	0.5	0.33	0.41	20	35	0.20
廃棄物層	1.94	55	29,100	75,800	0.5	0.5	0.33	0.45	0	39	0.20
側面遮水層	1.60	56	32,900	85,600	0.5	0.5	0.33	0.55	20	10	0.20
底面遮水層	1.60	94	37,300	97,200	0.5	0.5	0.33	0.55	20	10	0.20
根固方塊	3.30	98	180,000	469,000	0.5	0.5	0.33	0.50	20	35	0.20
被覆ブロック	1.65	98	180,000	469,000	0.5	0.5	0.33	0.50	20	35	0.20

水中振動台試験結果に関するまとめ

1. 現行の港湾の基準を用い静的水平震度としてこれまでの港湾構造物に適用された最大値に近い0.25を用いて設計した重力式護岸構造に対して、水中模型振動台実験によりレベル1およびレベル2の地震動を載荷したところ、**護岸先端での水平変位量はそれぞれ海側に3cm, 96cmであった**。港湾基準では耐震強化岸壁のレベル2地震に対する変形許容値が30～100cm程度とされており、**静的震度の最大値0.25を用いて設計することで、変形量のうえでレベル2地震に対しても概ね許容範囲におさまった**。
2. レベル1およびレベル2地震動相当の地震波形に対して、鋼管矢板の二重締切り構造である遮水工の挙動を水中模型振動台実験で確認したところ、遮水矢板天端の変位量は前者が陸側に1cm、後者が陸側に2cmであった。このことから、本研究で提案する**護岸構造と遮水工は、レベル1およびレベル2地震動に対して遮水工の安定性を確保できる**と考えられる。
3. 水中模型振動台実験における観測値と地盤の有効応力解析プログラムFLIPで計算した変形特性および変形量を比較した結果、**変形性状は全体として類似していた**。しかし、変形量に関してはレベル2地震におけるケーソンの鉛直変位、裏込めの鉛直変位において解析値が実験値の1/3程度であった。

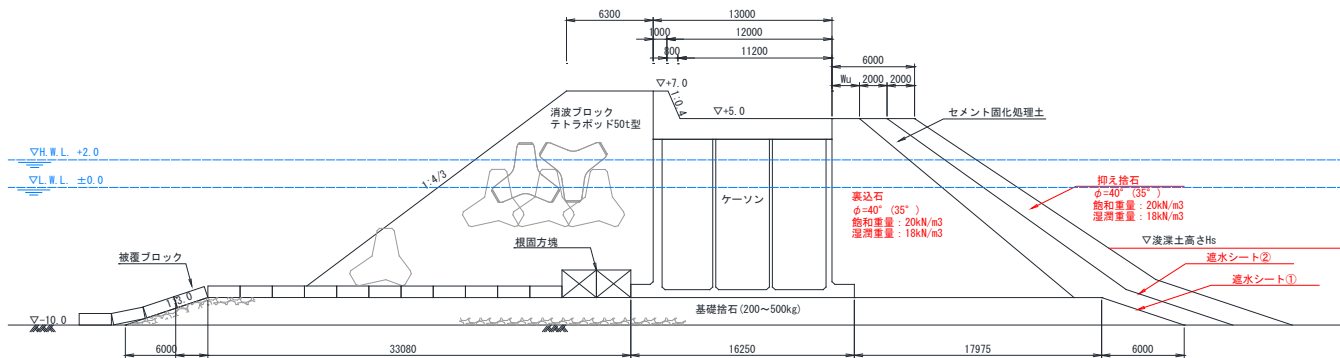
3.巨大地震に備える海面廃棄物処分場への 津波の影響に関する検討

内部が空なときの遮水シート式廃棄物護岸の津波に対する安全性の検討

巨大地震に備える管理型処分場は、巨大地震発生直後に震災廃棄物処分場としての機能を発揮することが求められる。

海面処分場護岸の遮水方法として実績の多い、遮水シートタイプの護岸を対象に、内部が空の状態での津波が来襲したときの遮水機能の安全性を数値解析によって検討した。

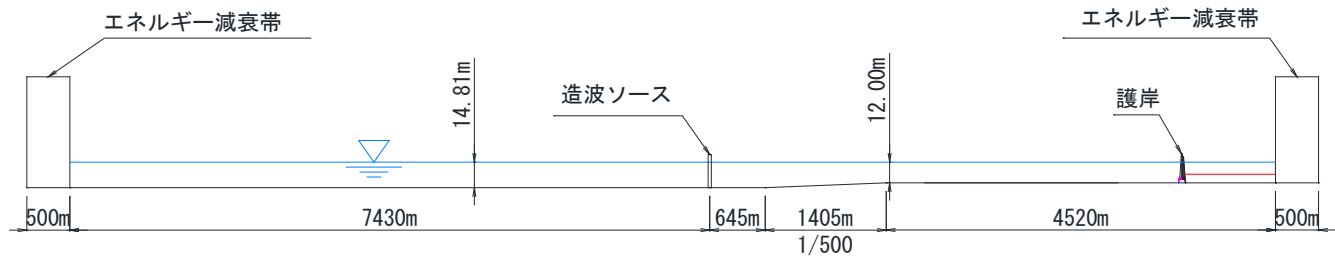
*本検討には五洋建設技術研究所前田勇司氏の協力を得た。



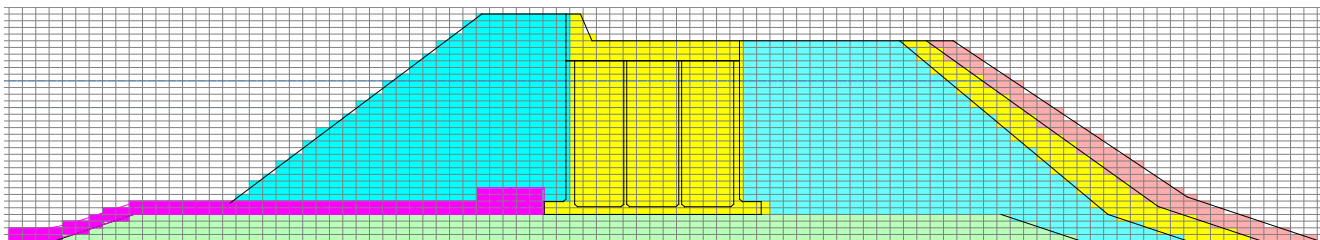
評価項目

- ・遮水シートの耐圧性能に対する評価
- ・裏込石の流出に対する評価
- ・抑え捨石の流出に対する評価

項目	内容
計算モデル	CADMAS-SURF/2D
津波入力条件	L2津波非線形長波解析結果（2013年度既実施図-4.1参照）
計算期間	625s



地形モデル(全体)



地形モデル(護岸近傍)

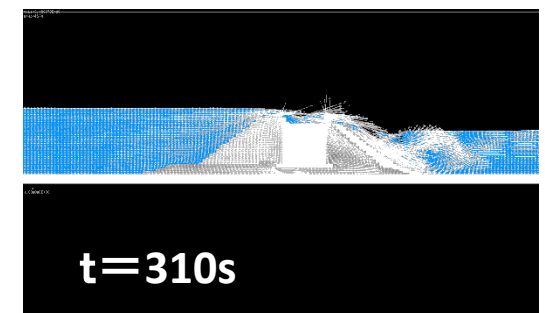
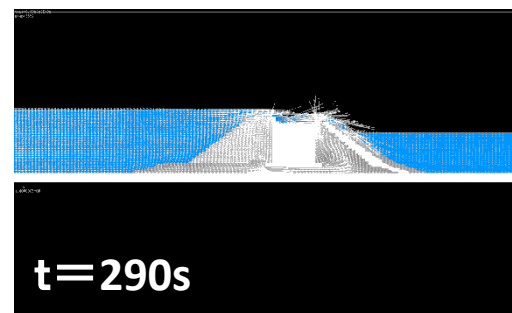
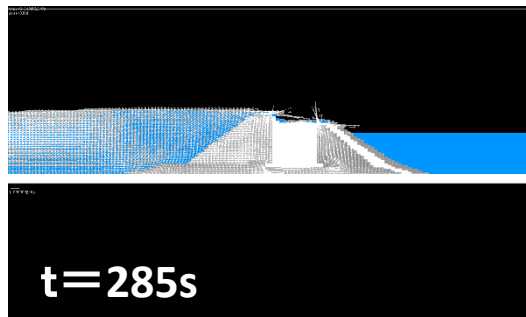
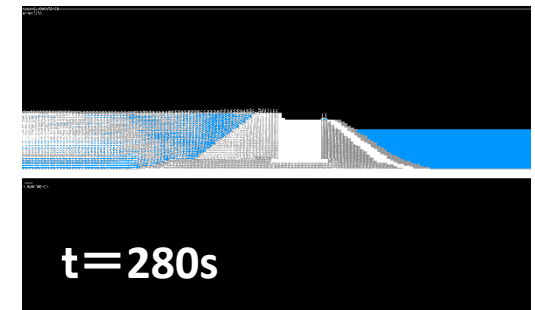
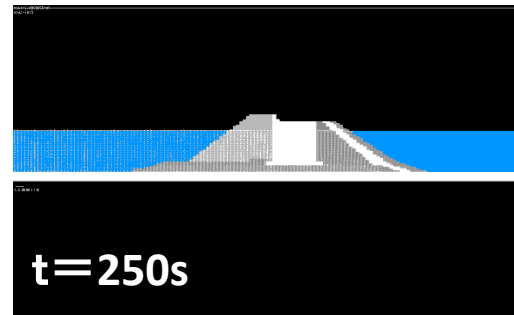
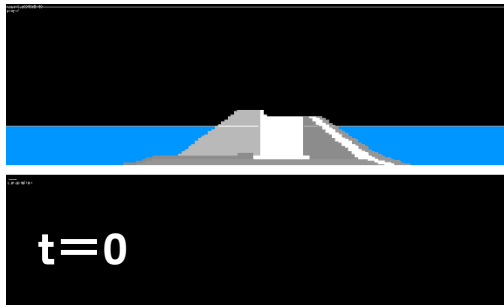
計算条件

項目	潮位	裏込天端幅	浚渫土高さ	裏込圧抜き	合計
内容	H.W.L.※	2m,12m	-10m,-5m,0m	あり、なし	—
ケース数	1	2	3	2	12



動画.w

内部が空のときに津波が作用したときの海面処分場の数値波動水槽Cadmas-Surf/2Dによる計算結果



285秒後から護岸の越波が始まり、越波した水塊が護岸背後の捨石、遮水シートおよび抑え捨石の上部に落下しこの範囲が大きく攪乱されている

遮水シート①の健全性評価

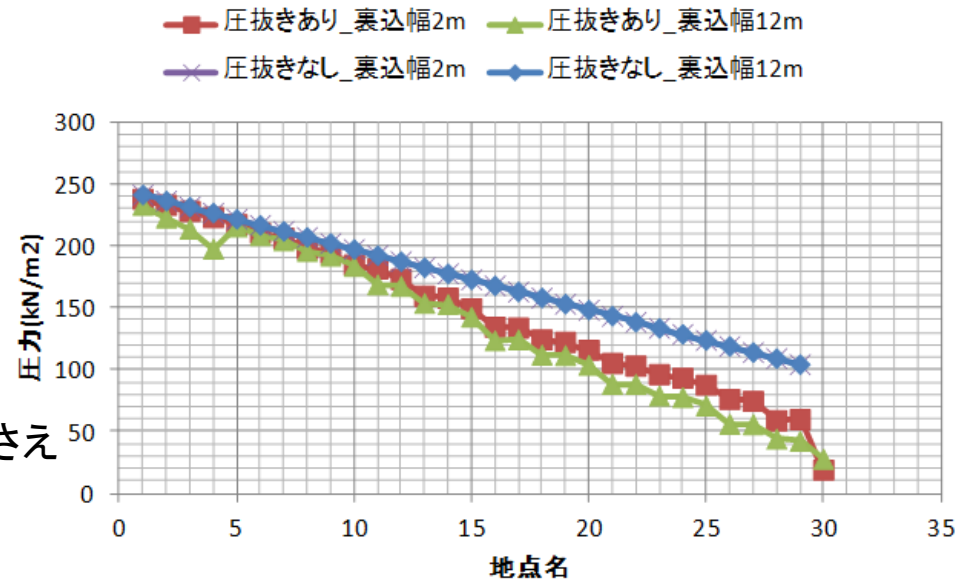
- ・水圧は線形に推移し、最も下端(地点番号1)で
最大値約240kN/m²となる。
- ・圧抜きなしのケースでは上端(地点番号29)に
おける圧力が圧抜きありのケースと比較し、約
50kN/m²大きい
- ・遮水シートに作用する静水圧と波圧の合力と押さえ
荷重(安全率考慮)の関係から安全性を検討

$$F_1 + F_2 < \frac{1}{f} P$$

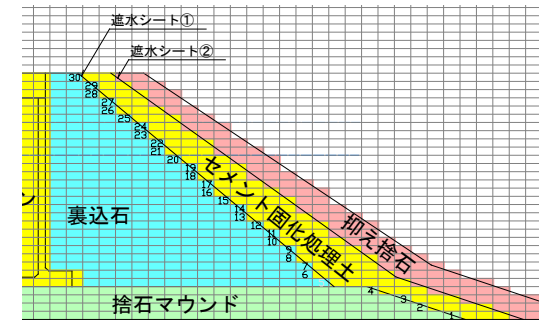
F1: 静水圧の合力、F2: 波圧の合力、f: 安全率(2.5)、
P: 押さえ荷重の合力(試行くさび法)

遮水シート安全性評価

裏込天端幅 (m)	圧抜き	浚渫土高さ (m)	F1+F2-F3 (kN)	P (kN)	判定
2	あり	0	2388	473	NG
2	あり	5	2388	481	NG
2	あり	10	2388	507	NG
2	なし	0	2915	473	NG
2	なし	5	2915	481	NG
2	なし	10	2915	507	NG
12	あり	0	2177	473	NG
12	あり	5	2177	481	NG
12	あり	10	2177	507	NG
12	なし	0	2915	473	NG
12	なし	5	2915	481	NG
12	なし	10	2915	507	NG



圧力最大値の分布図

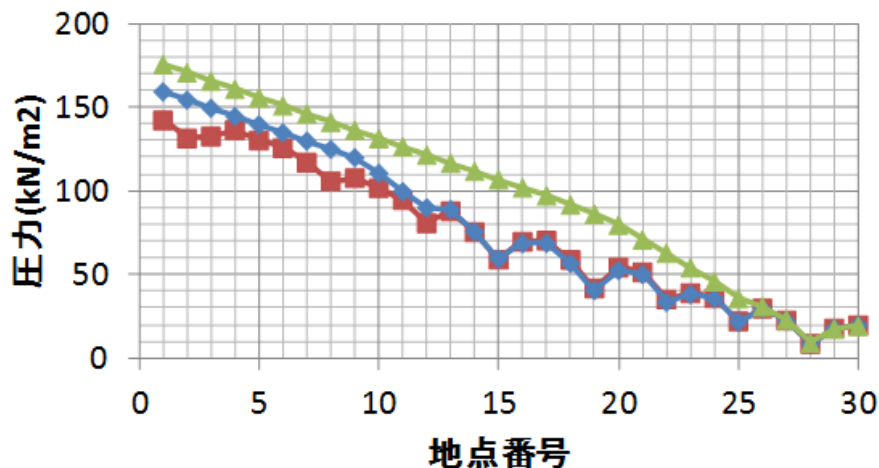


いずれのケースにおいてもNG。
抑え捨石の幅を大きくしても、
浚渫土を入れても効果は小さ
い。 押さえ捨石の高さを大き
くするか全く別の構造とする必要
がある。

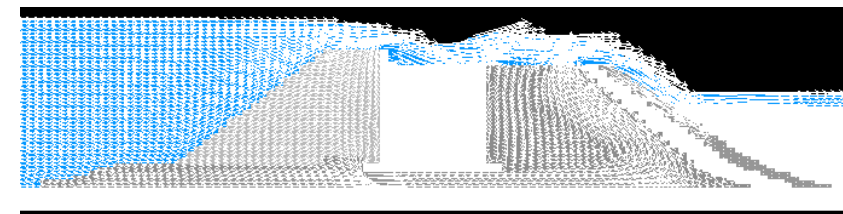
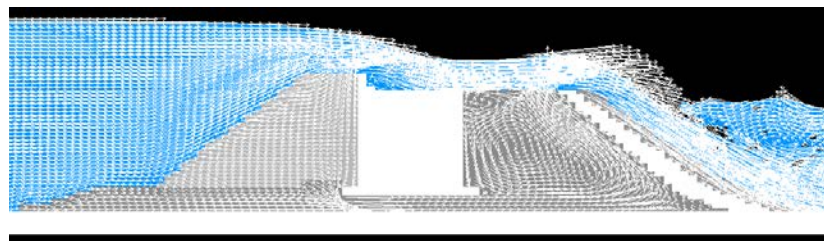
遮水シート②の健全性評価

浚渫土砂の高さが大きくなるほど作用する圧力が大きくなっている。浚渫土砂がない場合は抑え捨石として設定した範囲に流入した後、そのまま流出するのに対し、不透過として設定した浚渫土砂が存在する場合は流れの逃げ道がなくなるためである。浚渫土高さ10mのケースの地点1で最大約175kN/m²となる。ただし、遮水シート②に作用する圧力は鉛直下向きであるため、基本的には圧力が増大しても安全である。

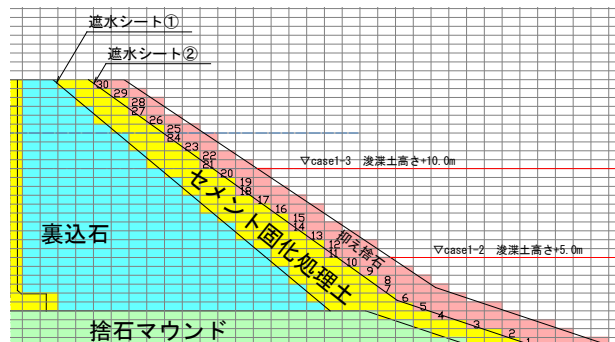
■ 浚渫土高さ0m ◆ 浚渫土高さ5m ▲ 浚渫土高さ10m



圧力最大値の分布図



流速分布スナップショット
(上段: 浚渫土なし、下段浚渫土あり)



裏込石の健全性評価

消波ブロックから流入した流れが裏込石天端から流出することで、裏込石には鉛直上方への流れが働いている。裏込石の浮き上がりについて考えると、鉛直下方には重力、鉛直上方には浮力と流れによる力が働いている。浮き上がりは、以下の式で評価できる。

$$\rho_s V g - \rho_w V g - \frac{1}{2} \rho_w v^2 S C_D > 0$$

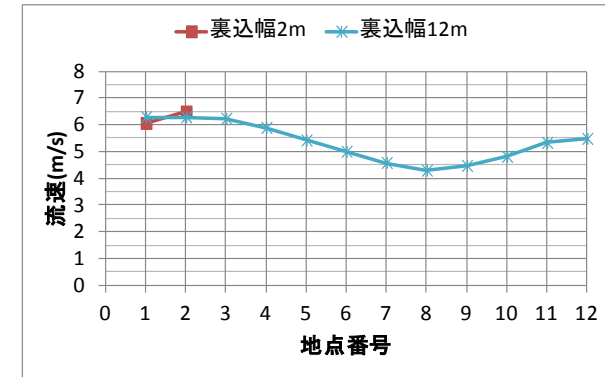
ここに、 ρ_s は石の密度、 V は石1個あたりの体積、 g は重力加速度、 ρ_w は海水の密度、 v は鉛直上方向きの流速、 S は断面積、 C_D は抗力係数。 $(C_D=0.18)$

次に、水平方向流速による裏込石の流出について考える。流れに対する石の所要質量は下式で表されるイスバッシュ式で評価することができる。

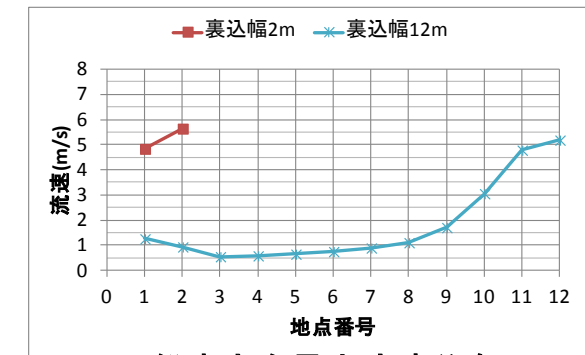
$$M_d = \frac{\pi \rho_r U_d^6}{48 g^3 (y_d)^6 (S_r - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3}$$

ρ_r は石の密度、 U_d は石上面の水平方向流速、 g は重力加速度、 y_d はイスバッシュの定数、 S_r は石の水に対する比重、 θ は水路床の勾配である。

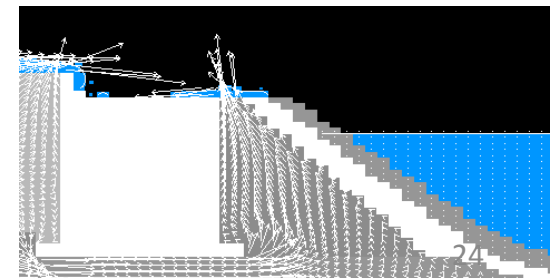
以上から求められる石の所要重量は2.1t(直径約1.15m)。これだけの大きさの石を使用する場合、施工性が非常に悪くなる。



水平方向最大流速分布



鉛直方向最大流速分布



まとめ

●遮水シート①に作用する圧力

安全性評価では、**いずれのケースでも安全を確保できなかった。特に、押え捨石の幅を増大させた場合、**内部に浚渫土を海面まで埋めた場合も安定を確保できなかったことから、構造全体を大きく見直す必要がある。

●遮水シート②に作用する圧力

浚渫土高さが大きくなるほど圧力が増大し、浚渫土高さ±0mのときに最大圧力175kN/m²の台形分布となる。ただし、これは浚渫土による土圧を考慮していない**鉛直下向きに圧力が作用することから、**基本的には圧力が増大しても安全である。

●裏込石の健全性評価

流出しないための所要質量は2.1tである。**裏込部分全てをこの質量の石で充填することは難しい**ため、天端付近のみ大きい石あるいはブロックを採用するなどの方策が必要である。

巨大地震に備えた海面処分場の護岸構造では、処分場内部に廃棄物のための空間を空けておく必要があることが、津波に対して構造上の弱点になることに十分留意すべきである

4. まとめと今後の課題

環境省の「巨大地震発生時における災害廃棄物対策検討委員会」の中間とりまとめ」は、膨大な廃棄物の処理を受け入れることのできる最終処分場をあらかじめ確保しておくこと、さらには、国が「災害廃棄物処理するための大規模な海面最終処分場の整備に関与することの必要性を指摘している。

「巨大地震の災害廃棄物に備える海面処分場」について技術的な検討を行った結果をまとめると以下のようなになる。

- 1) 幅広の裏込めによって**護岸(ケーソン)と遮水工(遮水矢板)の離隔を確保**し両者を結ぶタイ材を切断して護岸と遮水工を独立させた廃棄物護岸の断面は、遮水工の変形量を低減する効果を有する。
- 2) 現行の港湾の基準を用い静的水平震度として0.25を用いて設計した重力式護岸構造に対して水中模型振動台実験によりレベル2の地震動を載荷した実験結果では、護岸先端での水平変位量はそれぞれ海側に3cm, 96cmであった。港湾基準では耐震強化岸壁のレベル2地震に対する変形許容値が30～100cm程度とされており、**静的震度の最大値0.25を用いて設計することでレベル2地震に対しても概ね許容範囲におさまる断面を設計できる。**

- 3) レベル2地震動相当の地震波形に対して、鋼管矢板の二重締切り構造である遮水工の挙動を水中模型振動台実験で確認したところ、遮水矢板天端の変位量は前者が陸側に1cm、後者が陸側に2cmであった。提案した護岸構造と遮水工は、レベル2地震動に対して遮水工の安定性を確保できると考えられる。
- 4) 水中模型振動台実験における観測値と地盤の有効応力解析プログラムFLIPで計算した変形特性および変形量を比較した結果、両者の変形性状は全体として類似していた。しかし、変形量に関してはレベル2地震におけるケーソンの鉛直変位、裏込めの鉛直変位において解析値が実験値の1/3程度になっており、変形量の解析値を設計に用いる場合にはこの点を注意する必要がある。
- 5) 海面処分場護岸の遮水方法として実績の多い、遮水シートタイプの護岸を対象に、内部が空の状態で津波が来襲したときの遮水機能の安全性を数値解析によって検討した。この結果、遮水シートに大きな水圧が作用するため、津波に対して安全性を確保することはきわめて困難であること、裏込石も安定の確保が難しいことがわかった。巨大地震に備えた海面処分場の護岸構造では、処分場内部に廃棄物のための空間を空けておく必要があることが津波に対して構造上の弱点になることに十分留意すべきである。