

ハイブリッド重力式栈橋の開発と耐震性の検討

五洋建設（株）技術研究所	正会員	○池野 勝哉
五洋建設（株）名古屋支店	正会員	原 基久
五洋建設（株）技術研究所	正会員	吉田 誠
（独）港湾空港技術研究所	正会員	小濱 英司
同上	正会員	菅野 高弘

1. はじめに

近年、世界的に輸送船舶の大型化が進み、アジア圏において大水深岸壁が整備されている。我が国においては、国際物流のアジア圏における相対的地位の低下を防ぎ、国際競争力を高めるための方策の一つとして、岸壁の大水深化が急務である。このような状況を背景に著者らは、従来の構造形式と比較して経済的で、かつ大水深岸壁として最適な「ハイブリッド重力式栈橋」の技術開発^{1)~4)}を行っている。

本稿では、著者らが提案するハイブリッド重力式栈橋について概説した後、本構造の地震時安定性を大型の水中振動台実験結果から考察する。また、有効応力解析による模型実験の再現解析を通じて、本構造が現行基準⁵⁾による変形照査が可能な形式であることを示す。

2. ハイブリッド重力式栈橋の概要

ハイブリッド重力式栈橋は、基礎マウンド上に設置された底版と上部工を柱体で連結した栈橋部と背後の土留護岸で構成され、慣性力や土圧および水圧等の水平方向の作用に対して自重により抵抗するものである。図-1 にハイブリッド重力式栈橋のイメージを示す。基礎捨石による護岸マウンドを底版上に構築することで、その有効重量を栈橋部の抵抗力として考慮する重力式である。また、設置水深や地盤条件にもよるが、栈橋部の重量が重力式ケーソンの概ね半分程度と軽量であるため、地震時の堤体慣性力が小さいことに加え、重力式ケーソンに比べて基礎地盤の高強度改良を必要としないこと、また栈橋のように基礎杭を有しないため支持地盤の深い軟弱地盤において長尺の杭打設が不要であることなど、コスト上の優位性が期待できる構造である。

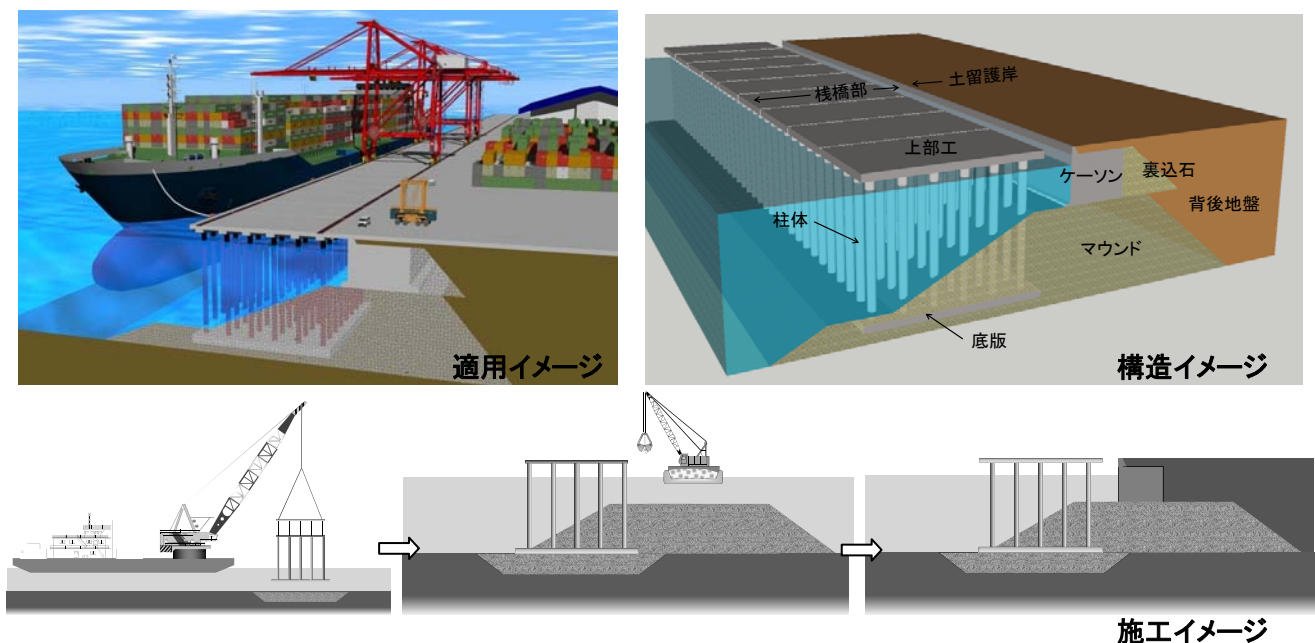


図-1 ハイブリッド重力式栈橋

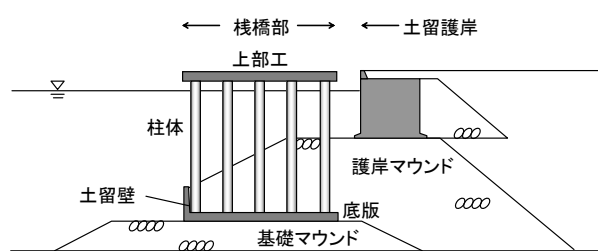
キーワード ハイブリッド重力式栈橋，大水深岸壁，水中振動台実験，数値解析

連絡先 〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1 五洋建設（株）技術研究所 TEL 0287-39-2109

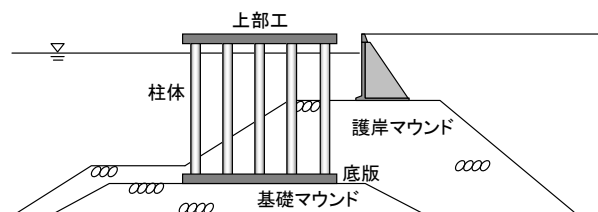
図-2 にハイブリッド重力式栈橋の構造タイプを示す。ここで、図-2(a)は底版前面に土留壁を有するタイプであり、背後の護岸マウンド重量を不足なく底版へ伝達する構造である。一方、図-2(b)は土留壁が無い代わりに、底版前面のマウンドによる受動抵抗を期待できる構造である。いずれの構造タイプが耐震性上、有利になるか模型実験から考察する。なお、土留護岸はケーソンあるいはL型ブロックなど組合せは種々考えられる。ハイブリッド重力式栈橋は、上部工と底版を柱体で連結した一体構造であり、視覚的には栈橋に類似しているが、外力（慣性力・土圧・水圧）に対してはマウンドを含めた自重により抵抗するため、構造形式としては重力式に近い。

従来の岸壁形式と比較した結果を表-1 に示す。ここでは、最大喫水 20m 級のコンテナ船に対応した大水深岸壁を想定し、岸壁水深を 22m とした。設計震度は、現行基準⁵⁾におけるレベル1地震動の最大照査用震度である 0.25 とした。

表-1 には各形式の特徴のほか、試設計の照査値、経済性、大水深での課題について示している。いずれの岸壁形式も滑動・支持力の照査値が 1.0 以上、転倒の照査値は 1.1 以上となる様に堤体幅を決定した。ハイブリッド重力式栈橋は、背後地盤の土圧が直接、栈橋部に直接作用しないため、重力式ケーソンに比べて栈橋部の重量を低減でき、かつ支持力の観点から地盤改良のスペックを低減することができるため、地盤条件にもよるが重力式ケーソンに比べて 2 割程度、栈橋と比較しても 1 割弱コストダウンされる⁴⁾。



(a) 底版前面に土留壁がある横栈橋タイプ



(b) 底版前面に土留壁がない横栈橋タイプ

図-2 ハイブリッド重力式栈橋の構造タイプ

表-1 岸壁形式の比較

形式	(a) 重力式ケーソン	(b) 直杭式栈橋	(c) ハイブリッド重力式栈橋
項目			
構造概略図			
特徴	- 通常の重力式構造 - ケーソンと中詰土砂の重量によって水平力に抵抗する。	- 通常の栈橋構造 - 地盤に打ち込まれた杭によって上部工を支える構造である。	- 背面土圧を小さくすることにより重力式に比べて重量を低減できる。マウンドの支持力に対しても有利。 - 背後護岸のマウンド重量を利用し安定性を向上させる。
耐震性	大水深化により水平力が増大し必要堤体幅が増加	水平力作用時の変形性能が大きく、耐震性に優れる。	重量低減により原地盤への作用荷重が小さくなり高強度の地盤改良が不要
施工性	ケーソン幅が大きくなるため、大型のFDが必要となる。	基礎杭および上部工が水中、水上での施工となる。上部工のプレキャスト施工の事例が多くなっている。	本体重量が小さいことにより通常の重力式に比べて製作・設置の施工性は有利
試設計	堤体幅 : 35m 滑動照査値 : 1.027 転倒照査値 : 2.618 支持力照査値 : 1.000	堤体幅 : 35m	堤体幅 : 35m 滑動照査値 : 1.025 転倒照査値 : 3.525 支持力照査値 : 1.101
経済性	△	○	◎
課題	水深が大きくなると、重量が大きくなり、支持力で断面が決定される。	大水深では杭の突出長が大きくなる	
備考	護岸を含めて新設する場合に適用	既設護岸、岸壁の前面への施工が可能	護岸を含めて新設する場合に適用

3. 水中振動台実験による地震時安定性の考察

(1) 実験概要

実験は15m×15mの平面水槽中央に位置する直径5.5mの円形テーブル上に、長さ4.0m、高さ2.0m、幅1.5mの鉄製剛土槽を設置して行った。実験対象は、表-1の検討条件と同様に前面水深22m、堤体を設計震度0.25とし、土槽寸法を考慮して模型スケールの長さの縮尺を30分の1とした。実験には、表-2に示す1G場の相似則⁶⁾を適用した。

実験ケースの一覧を表-3、模型断面図を図-3、模型の設置状況写真を図-4に示す。模型断面は、重力式ケーソンおよびハイブリッド重力式栈橋の栈橋部が震度 $k_h=0.25$ 、土留ケーソンについては土留護岸が変形しやすい状況を設定するため、震度を $k_h=0.20$ とした。これは、土留護岸の変形をより過大に設定し、栈橋部に与える土留護岸の影響を強調する意図があり、許容変形量は15cm程度に相当する震度である。加振条件は、実地震動の主要周波数が一般に1Hz程度（模型レベルでは12.8Hzに相当）であることを考慮して、岸壁法線の直角方向に正弦波の振動数10Hzを20波、振幅を100～600Galの範囲で段階的に入力した。

表-2 相似則と縮尺比

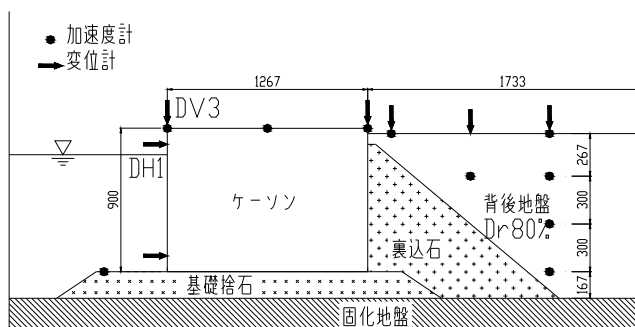
パラメータ	相似則	縮尺比
長さ	λ	30
密度	1	1
時間	$\lambda^{0.75}$	12.8
応力	λ	30
間隙水圧	λ	30
変位	$\lambda^{1.5}$	164.3
ひずみ	$\lambda^{0.5}$	5.48
加速度	λ	1
曲げ剛性	$\lambda^{4.5}$	4,436,553
透水係数	$\lambda^{0.75}$	12.8

表-3 実験ケース一覧

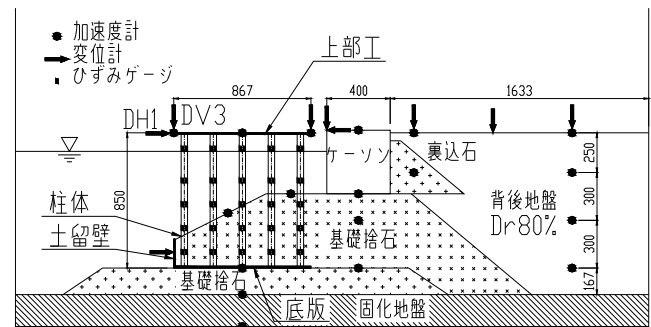
岸壁形式	設計震度 k_h	堤体幅 B 注2)	備考
重力式ケーソン	0.25	1.267m (35m)	—
ハイブリッド重力式栈橋	0.25 注1)	0.867m (26m)	土留壁あり (土留壁なし)

注1) 土留めケーソンは $k_h=0.20$

注2) 下段の括弧内は実スケール

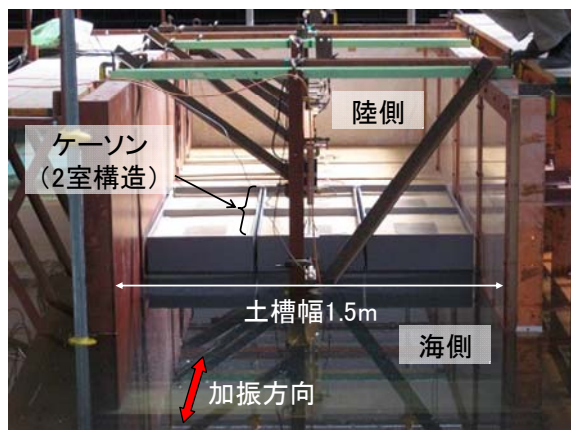


(a) 重力式ケーソン



(b) ハイブリッド重力式栈橋「土留壁ありの場合」

図-3 模型断面図 (単位: mm)



(a) 重力式ケーソン



(b) ハイブリッド重力式栈橋

図-4 模型設置後の正面状況

(2) 実験結果

加振残留変形のスケッチを図-5、入力加速度と残留水平変位（図-3 中の DH1）の関係を実スケールに換算して図-6(a)に示す。なお、図-5 では変形モードを強調するために変形量を 5 倍で示している。図中より、入力加速度が大きくなると水平変位は増加し、加速度が 600Gal 程度の最終ステップに着目すると、重力式ケーソンでは 0.9m、ハイブリッド重力式栈橋では「土留壁あり」のタイプで 1.3m、「土留壁なし」のタイプでは重力式ケーソンとほぼ同程度の水平変位が生じていることが分かる。ハイブリッド重力式栈橋は、底版上に投入された基礎捨石の有効重量が栈橋部の水平抵抗力に考慮できると考えられるが、「土留壁あり」のタイプでは、基礎捨石の水平慣性力も栈橋部に作用することになり、海側への変形には不利に働いている可能性がある。一方、「土留壁なし」のタイプでは、基礎捨石の水平慣性力が直接底版へと作用しないことや、底版海側の基礎捨石による受動抵抗が期待できるため、「土留壁あり」のタイプに比べて海側への水平変位が小さくなると推察される。図-6(b)は同様に鉛直変位について示したものであるが、ハイブリッド重力式栈橋では土留壁の有無に関わらず、重力式ケーソンに比べて鉛直変位が小さい。このことから、ハイブリッド重力式栈橋は、作用する慣性力が小さく、受働抵抗の期待できる「土留壁なし」タイプが耐震性能上、優位であると判断される。

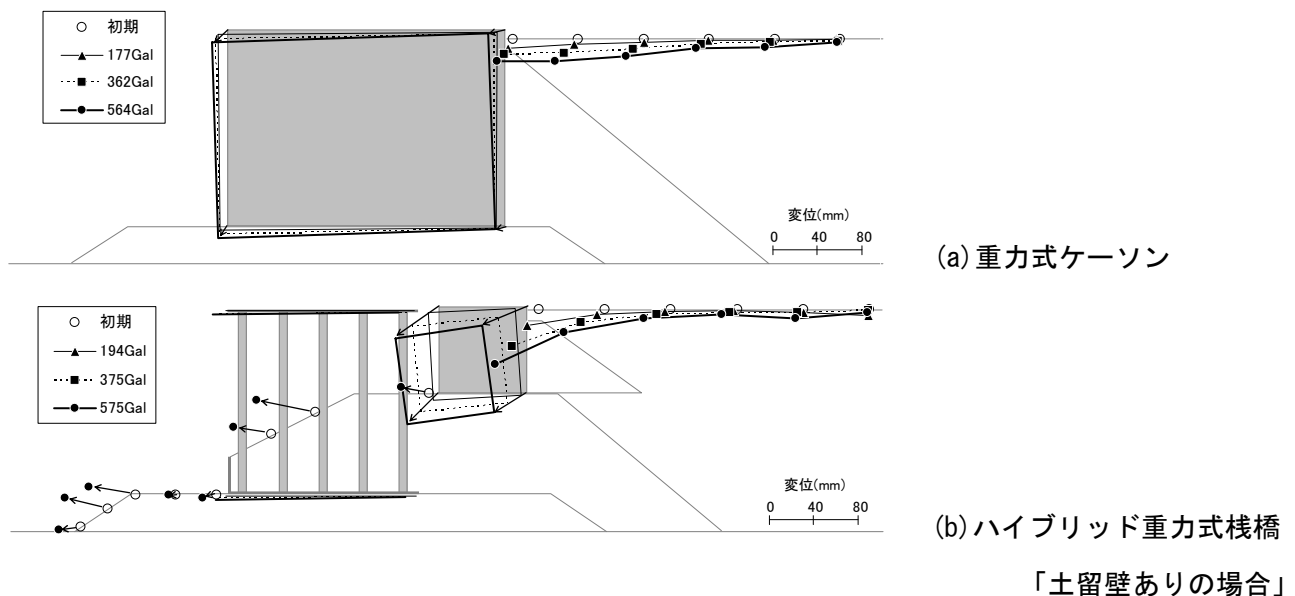


図-5 残留変形スケッチ(×5倍)_模型スケール

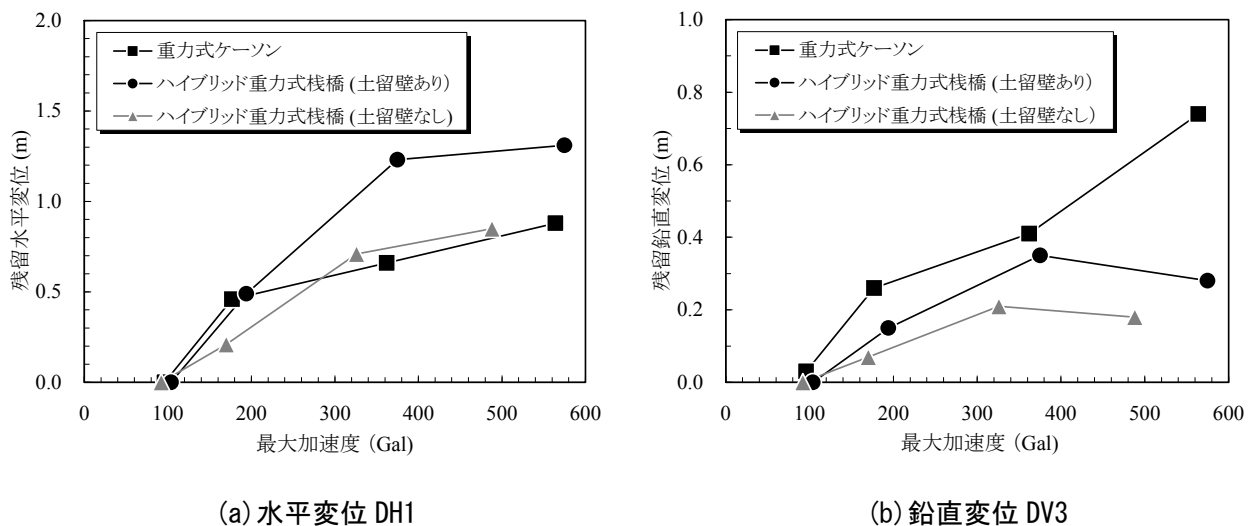


図-6 残留変位の比較_実スケール

4. 有効応力解析による解析的検討

レベル2地震動を対象とした実務設計では、有効応力解析による変形照査を行い、所定の耐震性能を有していることを確認する必要がある。ここでは、港湾施設の実務設計で適用実績の多い有効応力解析(コード:FLIP)を用い、ハイブリッド重力式栈橋「土留壁あり」について入力加速度 400Gal 相当の模型実験における再現を試みた。解析に関する詳細については文献^{3),4)}を参照されたい。

(1) 模型実験の再現結果

解析結果の一部として、加速度 (Acc.) および変位 (Disp.) の時刻歴波形を図-7 に示す。図-7 を見ると、解析結果は実験と良い整合がみられ、概ね模型実験を再現していると言える。特に、水平変位 (DH1, DH2) の挙動については、解析の方が加振中のやや早い時刻で発生しているものの、残留変位については非常に良く対応している。柱体の単位幅当たりにおける加振中の最大・最小曲げモーメント分布を図-8 に示す。実験では柱体の中央部で極小値をとり、上部工および底版にかけてモーメントが大きくなる弓形状を呈しているが、解析でも同様の傾向が再現されている。ただし、柱体の端部付近については、実験よりも解析が発生モーメントをやや過小評価しているが、実験ではステップ加振のため柱体のモーメントが累積している可能性が考えられ、今後の検討課題である。

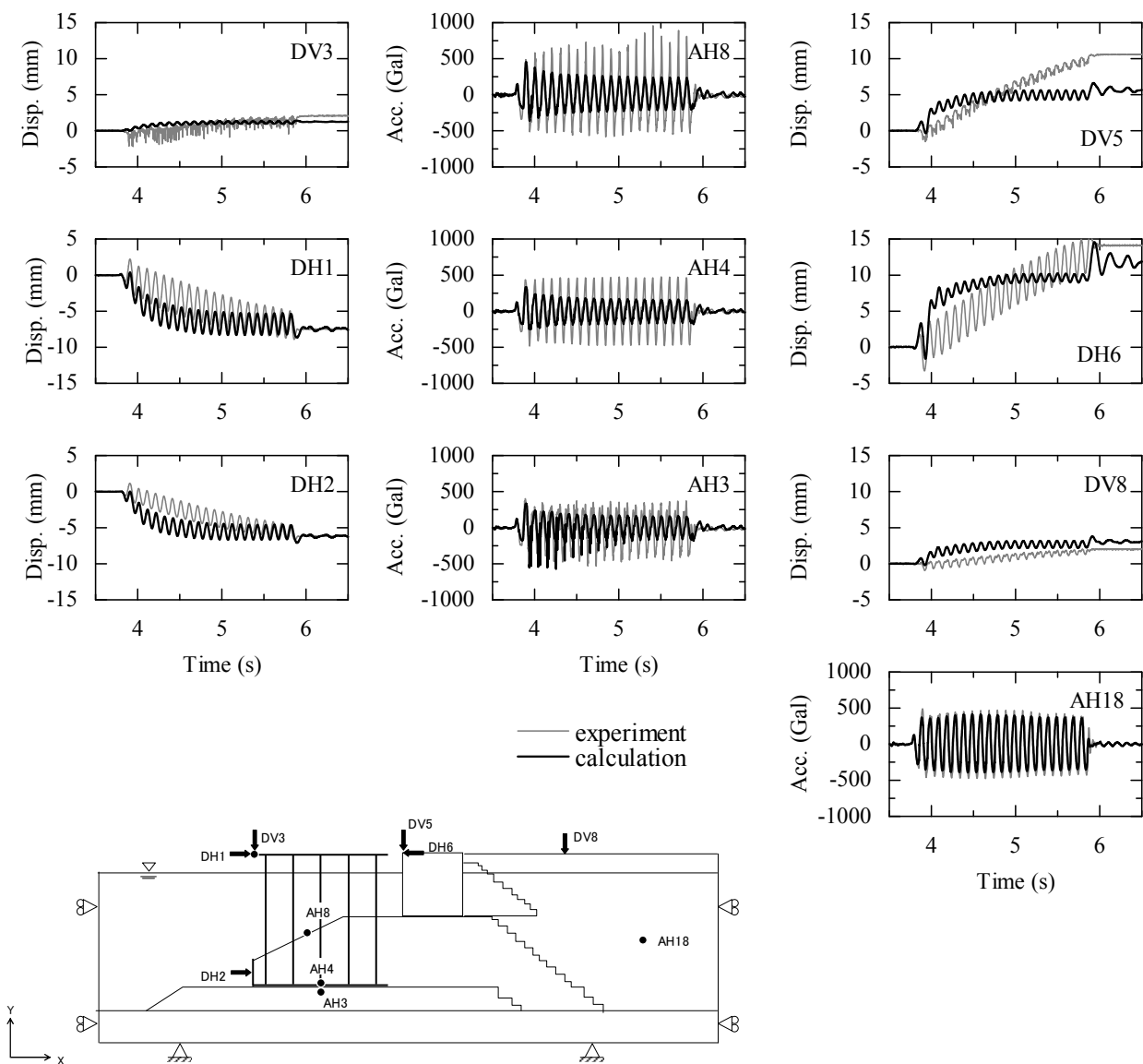


図-7 実験と解析の動的挙動「土留壁あり」_模型スケール

図-9には残留値として最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}$ 分布をメッシュ変形図(×5倍)と合わせて示している。図-9(a)土留壁ありと図-9(b)土留壁なしの両ケースは、土留ケーソン下端および栈橋部底版下端の陸側より、右肩上がりの明瞭なせん断ラインが確認できる(①)。土留ケーソンは2本のせん断ライン上方に設置されているため、マウンド上の滑動に加えてせん断変形が累積された水平変位が発生すると考えられる。また、栈橋部が水平に移動しようとする際、背後の仮想壁面部(②)および底版下の基礎捨石(③)に大きなせん断ひずみを伴いながら変形している。これに対して、底版上方の基礎捨石部(④)にはせん断ひずみが確認できないことから、解析上、基礎捨石は栈橋底版と一体となって挙動している。図-9を見る限り、底版上方の捨石挙動に関して、土留壁の有無による差異は確認できない。

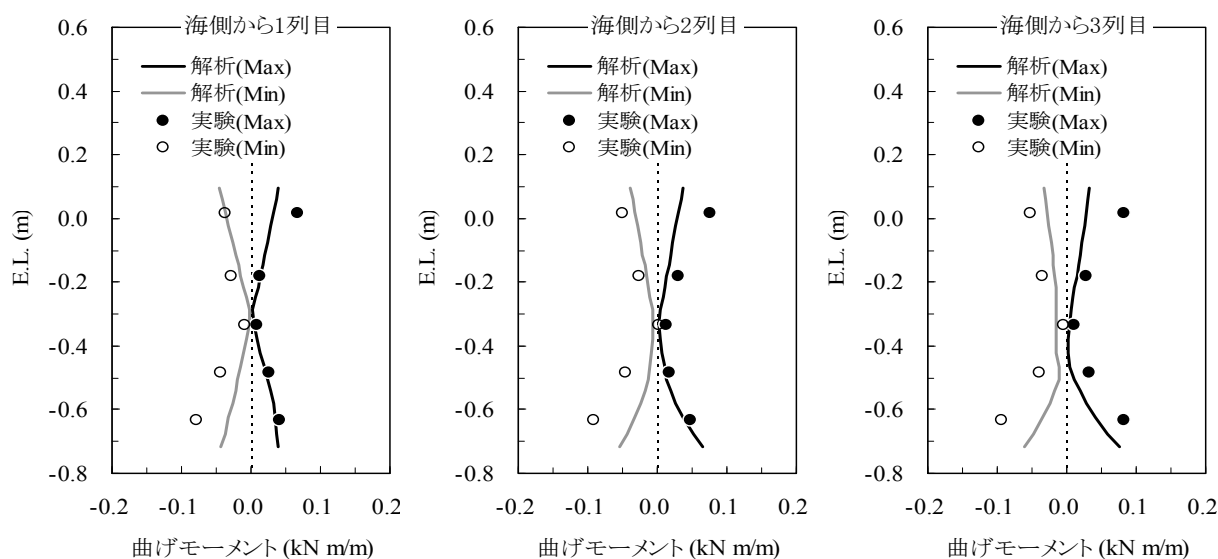
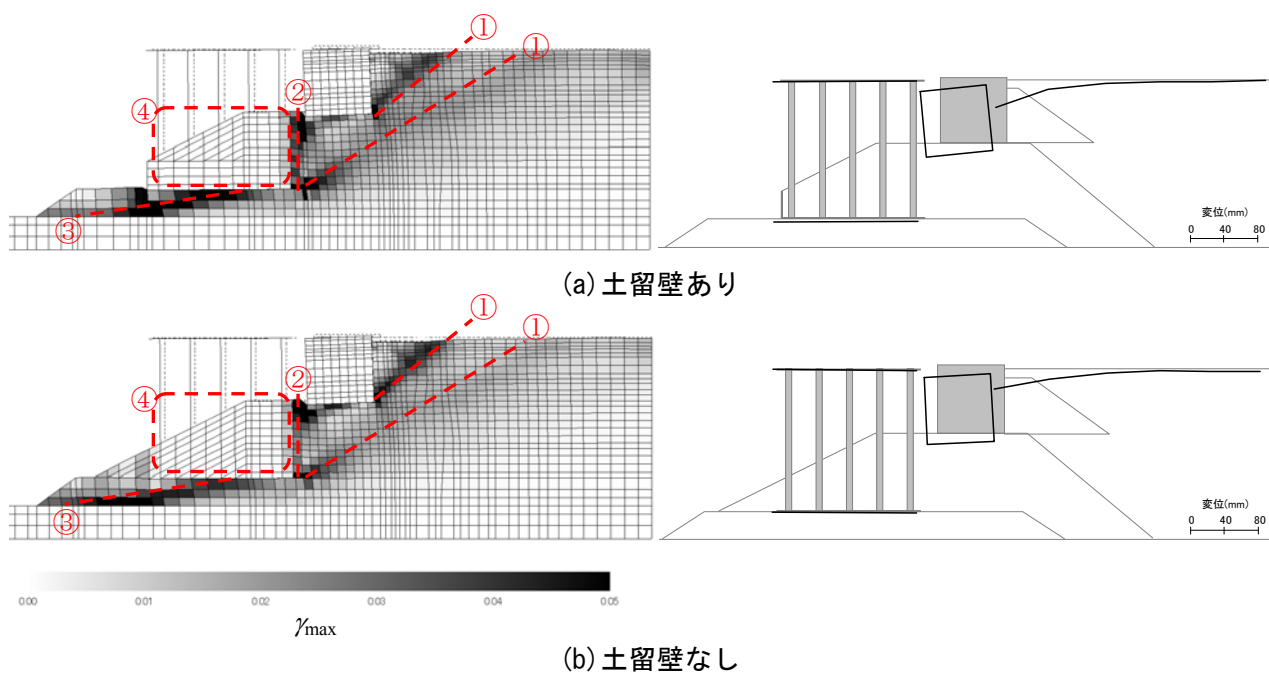


図-8 曲げモーメント分布「土留壁あり」_模型スケール



【解析】

【実験】

図-9 最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}$ 分布(変形図は×5倍)_模型スケール

(2) クレーンを考慮した解析的検討

図-10 に示す想定断面を対象に、表-4 の諸元を有するコンテナクレーンが設置された場合を想定したパラメトリックスタディを行った。パラメトリックに変化させるのは、表-5 に示す入力地震動とクレーンの固有周期である。ここで、クレーンの $T=2.0\text{s}$ は非免震、 $T=4.0$ と 6.0s は免震機構を搭載したクレーンを想定している。地震波形および解析条件等の詳細は文献⁴⁾を参照されたい。

図-11 に解析結果の一例として、クレーン固有周期と堤体水平変位の関係を示すが、全ケースで 50cm 以下に抑えられていることが分かる。さらに、紙面の都合上、詳細⁴⁾を省略するが、クレーン転倒の可能性を検討した結果、地震動によっては非免震クレーンで転倒の可能性が懸念されたが、免震クレーンでは全ての地震動で転倒しないことが示された。

表-4 対象とするクレーン諸元

岸壁水深		22 m	
荷役性能	全横行距離×全揚程	7,446 m・m	
クレーン自重		15,868 kN	
輪荷重	作業時	海側	785 kN
		陸側	621 kN
	休止時	海側	952 kN
		陸側	1,155 kN
	地震時	海側	1,179 kN
		陸側	1,233 kN
レールスパン		30 m	

表-5 検討ケース一覧

地震動	最大加速度	クレーン	
		固有周期	減衰定数
八戸波	210Gal	$T=2.0\text{ s}$	$h=3\%$
八戸波(2倍)	420Gal		
大船渡波	275Gal	$T=4.0\text{ s}$	$h=20\%$
大船渡波(2倍)	550Gal		
ポートアイランド波	817Gal	$T=6.0\text{ s}$	$h=20\%$
高砂ふ頭推定波	539Gal		

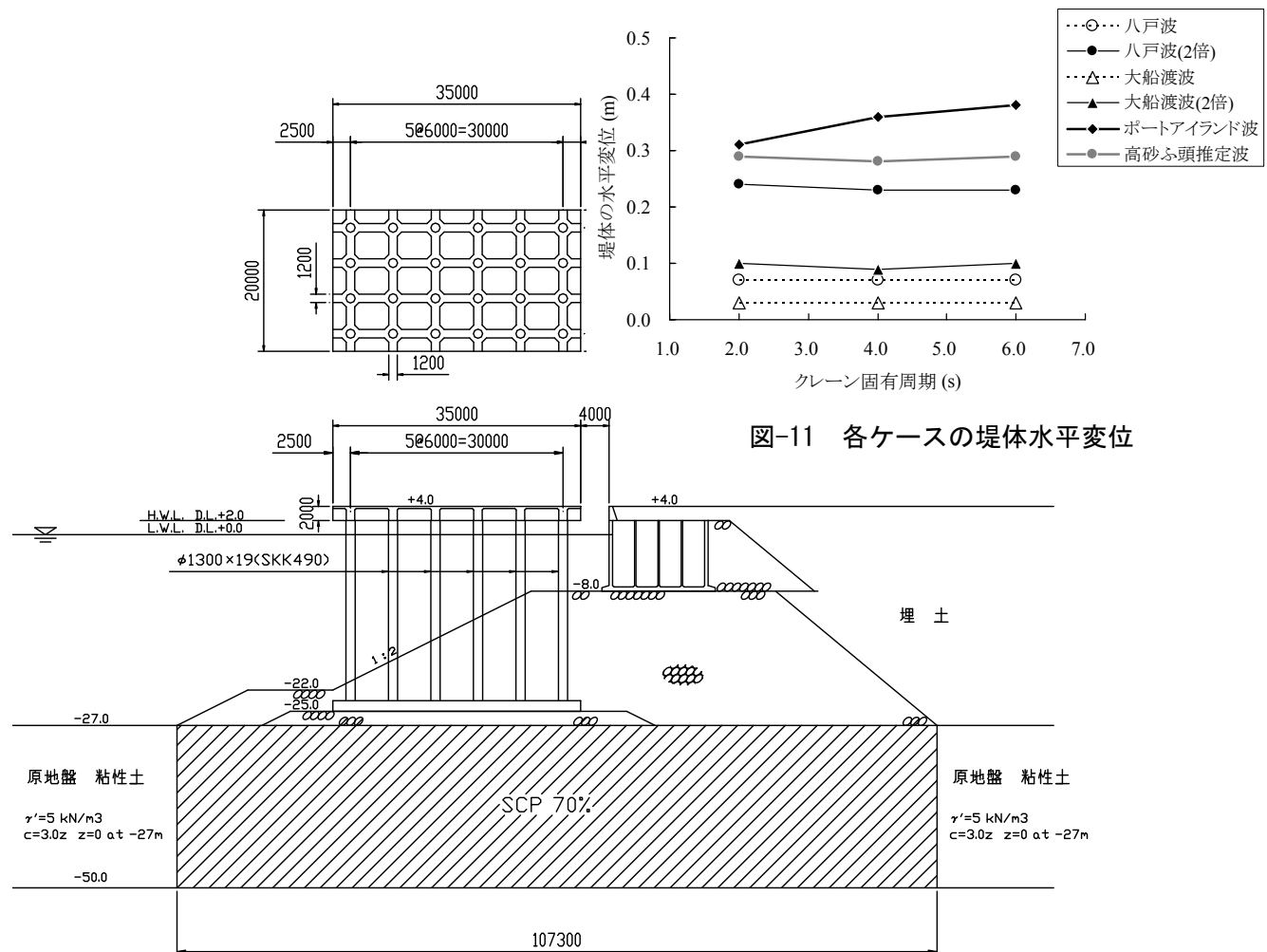


図-11 各ケースの堤体水平変位

図-10 検討対象断面 (単位: mm) _実スケール

5. まとめ

本稿では、著者らが開発したハイブリッド重力式栈橋の概要とその耐震性の検討結果について示した。具体的には、水中振動台を用いた模型振動実験を実施し、ハイブリッド重力式栈橋の耐震性能について従来の重力式ケーソンと比較することで確認した。また、ハイブリッド重力式栈橋が新しい構造形式であることを踏まえ、実務設計での性能照査方法について確認するため、模型実験の再現解析から有効応力解析の適用性について検討した。加えて、実スケール断面を仮定し、数種類の不規則波の入力および上載するクレーンの固有周期を変化させたケーススタディを実施した。得られた知見は以下の通りである。

- 底版前面に土留壁がある構造タイプは、底版上部の基礎捨石はその有効重量が鉛直下向きに作用し、栈橋底版部での水平抵抗力として寄与するものの、基礎捨石の水平慣性力が直接底版に作用するため、従来の重力式ケーソンよりも堤体に大きな水平変位が発生した
- 一方、「土留壁なし」の構造タイプでは、底版上部の基礎捨石が水平慣性力として作用しないため、重力式ケーソンと同程度の水平変位であり、「土留壁あり」よりも耐震性能が高いことが分かった
- 堤体の鉛直変位に着目すると、本構造は重力式ケーソンに比べて、栈橋部の堤体が軽量であるため鉛直変位も小さく、また傾斜角も小さい
- FLIPを用いた模型実験の再現解析から、既往の重力式係船岸および栈橋のモデル化を参考にした方法で、概ね、変形照査が可能な構造形式であることを確認した
- 数種類の地震波およびクレーンの固有周期を変化させたケーススタディでは、固有周期 $T=4.0s$ 以上の免震機構を施した場合にはクレーンの浮き上がり限界を超えることはなかった。また、堤体の残留水平変位も50cm以下であり、耐震強化岸壁として使用性および修復性を有する構造であることが示唆された

6. おわりに

本稿では、基本的な形状のハイブリッド重力式栈橋について水中振動台実験及び数値解析を行い、耐震性能を有する構造であることを確認した。しかし、底版、柱体、上部工の構造や施工方法についてはさまざまなバリエーションがあると考えられ、更なる検討の余地があることを追記する。

参考文献

- 1) 原 基久，菅野高弘，小濱英司，吉田 誠：ハイブリッド重力式栈橋の地震時安定性に関する模型振動実験，土木学会第66回年次学術講演会，VI-131，2011年，pp.261-262.
- 2) 原 基久，池野勝哉，吉田 誠，菅野高弘，小濱英司：クレーンを積載したハイブリッド重力式栈橋の模型振動実験，土木学会第67回年次学術講演会，VI-459，2012年，pp.917-918.
- 3) 池野勝哉，原 基久，吉田 誠，菅野高弘，小濱英司：ハイブリッド重力式栈橋の開発とその耐震性能，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.68，No.4(地震工学論文集第31-b巻)，2011年，pp.I_899-I_906.
- 4) 小濱英司，菅野高弘，池野勝哉，原 基久，吉田 誠，三藤正明：ハイブリッド重力式栈橋の開発および耐震性の検討，(独)港湾空港技術研究所資料，No.1259，2012年.
- 5) 国土交通省港湾局：港湾の施設の技術上の基準・同解説，(社)日本港湾協会，2007年.
- 6) 井合 進：1g場での地盤-構造物-流体系の模型振動実験の相似則，港湾技術研究所報告，第27巻，第3号，1988年，pp.3-24.