

# ハイブリッド重力式栈橋の開発とその耐震性能

池野 勝哉<sup>1</sup>・原 基久<sup>2</sup>・吉田 誠<sup>3</sup>・菅野 高弘<sup>4</sup>・小濱 英司<sup>5</sup>

<sup>1</sup>五洋建設株式会社技術研究所 耐震構造チーム 係長 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail:Katsuya.Ikeno@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>2</sup>五洋建設株式会社技術研究所 耐震構造チーム 課長 (同上)

E-mail:Motohisa.Hara@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>3</sup>五洋建設株式会社技術研究所 耐震構造チーム 係長 (同上)

E-mail: Makoto.Yoshida@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>4</sup>独立行政法人港湾空港技術研究所 地震防災研究領域長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail:sugano@pari.go.jp

<sup>5</sup>独立行政法人港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 耐震構造研究チームリーダー (同上)

E-mail:kohama-e83ab@pari.go.jp

著者らは、経済的な大水深岸壁としてハイブリッド重力式栈橋の開発に取り組んでいる。これは、底版と上部工を鋼管杭等の柱体で連結した栈橋形状の構造をマウンド上に設置し、地震時の慣性力や土圧等の水平力に対して、自重によって抵抗する重力式の特徴を有するものである。本論文では、ハイブリッド重力式栈橋の概要について述べるとともに、大型の水中振動台を用いた模型実験を実施し、ケーソン式と比較することで地震時の安定性について考察している。また、FLIPによる有効応力解析で模型実験の再現を試み、堤体の変形モードおよび柱体に生じるモーメント分布の再現性が高く、変形照査の可能な構造形式であることを確認したので報告する。

**Key Words :** gravity hybrid pier, shaking table test, quay wall, numerical analysis

## 1. はじめに

近年、世界的にコンテナ船の大型化が進む中で、アジア圏内各国において大水深岸壁が整備されている。アジア最大のコンテナ取扱個数を誇る上海港やシンガポールではそれぞれ22m, 23m級の岸壁水深を有し、港湾別にみた世界のコンテナ取扱個数ランキングの上位10港のうち、8港がアジア各国の港が独占している状況にある。アジア各国の台頭、コンテナ船の大型化の進展、パナマ運河の拡張等、国際物流の大きな変動の中で、我が国はアジア圏内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、岸壁の大水深化が急務である<sup>1)</sup>。

港湾施設の岸壁形式には、大別して堤体の自重で外力に抵抗する重力式、矢板根入れ部およびタイ材で結ばれた控え工の横抵抗で外力に抵抗する矢板式、栈橋本体とその背後の土留護岸により構成される栈橋式等がある。重力式の場合、岸壁の設置水深および設計震度が大きくなると、地震時土圧および堤体慣性力が増大し、滑動・転倒および支持力の安定性を確保するための堤体幅が非常に大きくなると同時に、原地盤が軟弱な場合には大規模で高強度な地盤改良を必要とする。これに対して、栈橋式は背後の

土留護岸により土圧が直接栈橋に作用しないと同時に、栈橋本体が重力式に比べて軽量で慣性力が小さく設計震度の増加に伴う影響が少ない、杭体が塑性に至らない限り、地震後の残留変形は小さいなどの特徴がある。このような背景から、a)計画水深が深い、b)設計震度が大きい、c)地盤条件が悪い、という条件下で栈橋式が採用されるケースが多い<sup>2)</sup>。しかし、先般、国際コンテナ戦略港湾に指定された京浜港<sup>3)</sup>や阪神港<sup>4)</sup>では重力式が多く採用されており、20m級の大水深となれば必ずしも栈橋式が適した構造とは言えないと考えられる。栈橋式で大水深岸壁を構築する場合には、原地盤が軟弱で支持地盤が深いと長尺杭を打設する必要があり、それに伴うコスト増などの課題も考えられるからである。

そこで著者らは、従来の構造形式と比較して経済的な大水深岸壁の開発を目指し、ハイブリッド重力式栈橋(Gravity Hybrid Pier)に関する研究を行っている<sup>5)</sup>。これは、底版と上部工を鋼管杭等の柱体で連結した栈橋形状の構造を基礎マウンド上に設置し、地震時の慣性力や土圧・水圧等の水平力に対して、自重によって抵抗する重力式の特徴を有するものである。また、栈橋式と同様に、背後に土留護岸を有するため、栈橋本体に作用する水平力が小さく、設

計震度の増加による影響が小さい等の特徴がある。

本論文では、開発したハイブリッド重力式栈橋の概要について述べるとともに、大型の水中振動台実験による地震時安定性の評価および有効応力解析による変形照査の適用性について報告する。

## 2. ハイブリッド重力式栈橋の開発

### (1) 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 (Gravity Hybrid pier) 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構造物で構成され、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。背後護岸の基礎マウンドを底版上に構築し、その重量を堤体の抵抗力として考慮できる点で合理的な構造と言える。また、堤体重量が重力式ケーソンの40%程度 (上載荷重無視, 浮力考慮) と軽量であるため、地震時の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強度を必要としないこと、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基礎杭打設が不要であること等、コスト上のメリットが期待できる。

図-1にハイブリッド重力式栈橋の適用例、図-2に適用イメージを示す。ここで、図-1(a)は底版前面に土留壁を有するタイプで、背後護岸の基礎マウンド重量を不足なく底版へ伝達できると考えられる。

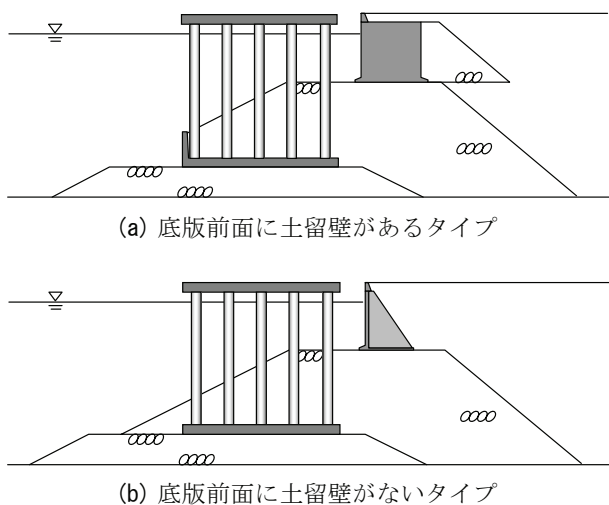


図-1 ハイブリッド重力式栈橋の適用例

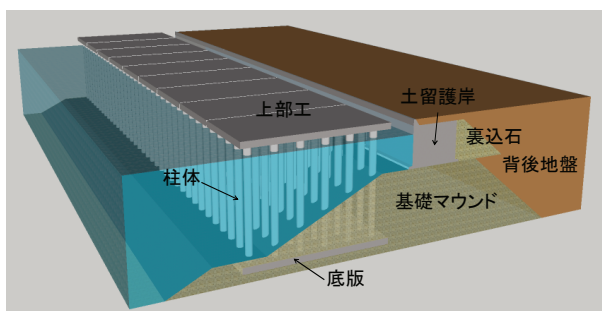


図-2 ハイブリッド重力式栈橋のイメージ (上部工・柱体・底版は一体構造)

図-1(b)は土留壁がない代わりに、基礎マウンドによる受動抵抗が期待できる。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。

### (2) 震度法による地震時安定性

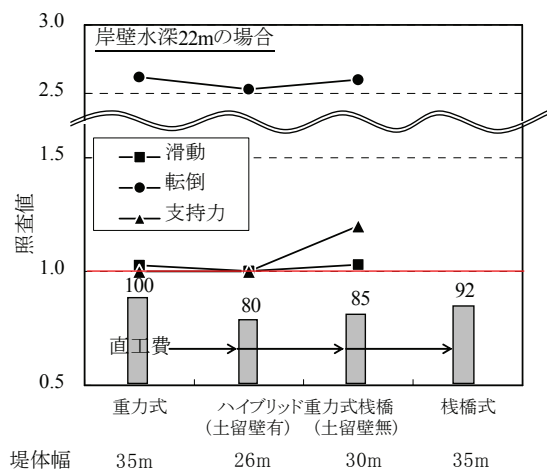
ハイブリッド重力式栈橋の地震時安定性について、表-1の条件で他の構造形式と比較を行った。

本検討では、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。港湾の現行設計法<sup>6)</sup>では、レベル1地震動に対する岸壁の許容変形量、地震動の周波数特性、継続時間や地盤改良の有無などを考慮した照査用震度を算出する必要があるため、本来、構造形式が異なれば算定される震度も同じではない。しかし、ここではハイブリッド重力式栈橋の地震時安定性能を考察するため、一律に設計震度0.25を設定して検討する。なお、設計震度0.25は、現行設計法<sup>6)</sup>におけるレベル1地震動の最大照査用震度である。

概略のコスト試算と合わせて安定検討結果を図-3に示す。栈橋以外の構造形式は滑動・支持力の照査値が1以上となる様に堤体幅が決定される。ハイブリッド重力式栈橋では背後地盤の土圧が直接、栈橋本体に作用しないため、重力式ケーソンに比べて堤体重量を低減でき、かつマウンド支持力の観点から高強度の地盤改良が不要となるため、地盤条件にもよるが本条件下では重力式ケーソンに比べて直工費が15~20%程度低減される。

表-1 検討条件

水深	原地盤-27m, 岸壁水深-22m
潮位	H.W.L. +2.0m, L.W.L. +0.0m
地盤	-27.0 砂 $\gamma' = 5 \text{ kN/m}^3$
	粘性土 $c = 3.0 \text{ z kN/m}^2$ ( $z=0$ , at GL)
	-50.0 粘性土 $\gamma' = 8.5 \text{ kN/m}^3$
	$c = 1100 \text{ kN/m}^2$
	※支持力が得られる様、地盤改良を実施する。
設計震度	0.25
上載荷重	20kN/m <sup>2</sup> (常時), 10kN/m <sup>2</sup> (地震時)



※重力式: CDM改良, ハイブリッド重力式栈橋・栈橋式: SCP改良を想定

図-3 安定検討の結果

### 3. 水中振動台実験による地震時安定性の評価

ハイブリッド重力式栈橋の地震時安定性および動的挙動について考察するため、三次元水中振動台を用いた模型振動実験を行った<sup>5)</sup>。

#### (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、前面水深22m、堤体を水平震度0.25の条件で設計した重力式ケーソンおよびハイブリッド重力式栈橋であり、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。なお、実験には、表-2に示す井合<sup>7)</sup>により導かれた1G場の相似則を適用した。

模型地盤の作製方法は以下の通りである。相馬珪砂5号に超早強セメントを乾燥重量比3%で添加攪拌して作製された固化地盤上に、砕石5号(D=13~22mm)で基礎捨石マウンドを形成する。

重量および重心位置等を調整したケーソンあるいはハイブリッド重力式栈橋の模型をマウンド上に設置し、底版上部には捨石として砕石5号、背後には砕石6号(D=5~13mm)を裏込石として投入した。ハイブリッド重力式栈橋は上部工、柱体(鋼管杭)、底版で構成されている。実験では、栈橋模型の重量および鋼管杭の曲げ剛性を相似則に合わせるため、上部工および底版のそれぞれをt=9mmおよびt=12mmの鋼製板とし、柱体(鋼管杭)を模擬したアルミニウム管(φ=40mm, t=1.5mm)で接続した。また、ケーソンおよびハイブリッド重力式栈橋模型の底面には、摩擦係数 $\mu=0.7$ の摩擦増大マットの適用を想定し、ゴム製のシート(t=2mm)を貼り付けた。なお、摩擦係数は別途行った静的実験によって確認している。実験では、これらの模型を実験土槽の幅1.5mに3体並列させ、土槽境界の影響が小さいと考えられる中央の模型を計測用とした。

背後地盤は、非液状化地盤として相馬珪砂5号(D<sub>50</sub>=0.3mm)を気中状態で締め固め、相対密度80%の密詰め地盤を作製した。その後、24時間かけて所定の水位まで緩速注水した。

模型設置後の状況を写真-1に示す。

#### (2) 実験ケースと加振条件

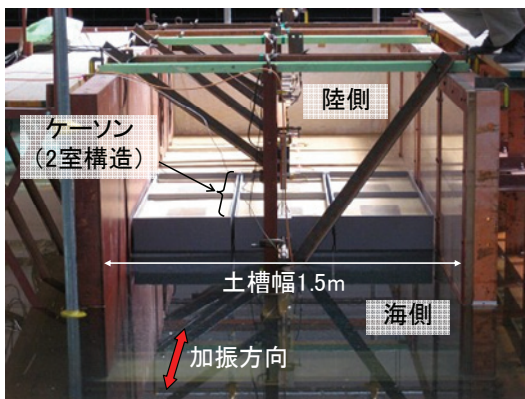
実験は、ハイブリッド重力式栈橋に加え、従来工法と比較するため重力式ケーソンについても実施した。また、ハイブリッド重力式栈橋では前面に土留壁を設けたケースに加えて、土留壁の無いケースについても実験を行った。これは、土留壁を設けることで底版上の捨石重量が不足なく滑動抵抗に寄与するとした構造(前者)と、土留壁を設けずに捨石の受動抵抗を期待した構造(後者)について、地震時の安定性を比較するためである。

実験ケースの一覧を表-3、模型断面図を図-4に示す。実験断面は、表-3に示すように堤体に対して設計震度0.25、土留ケーソンについては0.20で設定した。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の範囲で段階的に加振した。

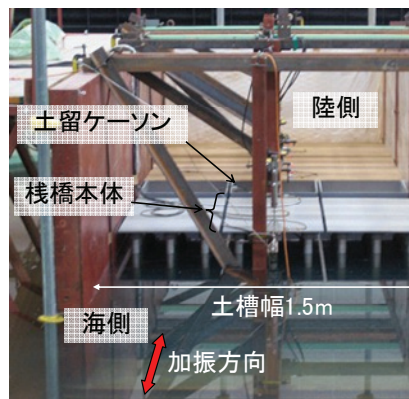
模型地盤には、図-4に示す所定の位置に加速度計・変位計およびひずみゲージを設置し、サンプリング周波数512Hzで収録するとともに、各加振ステップの前後において地表面に設置したターゲットを定規計測することで残留変形を把握した。

表-2 適用相似則と縮尺比

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



(a) 重力式ケーソン



(b) ハイブリッド重力式栈橋

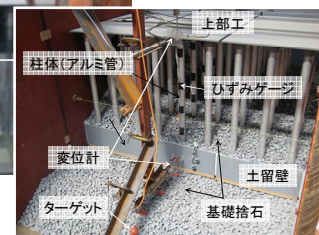
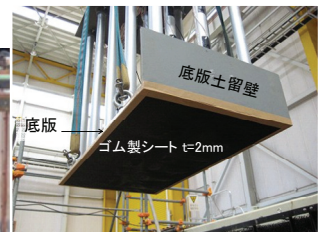


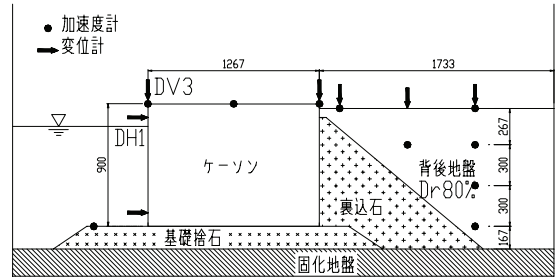
写真-1 模型設置後の正面状況



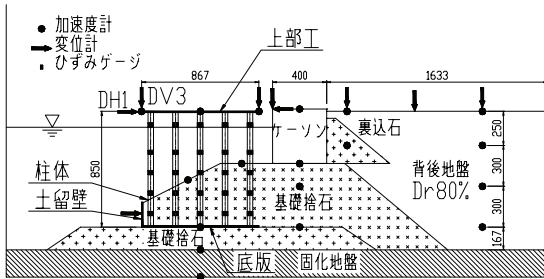
表-3 実験ケース一覧

Case	岸壁形式	設計震度 $k_h$	堤体幅 $B$ 注2)	前面土留壁の有無
1	重力式ケーソン	0.25	35m (1.267m)	—
2	ハイブリッド重力式栈橋	0.25 注1)	26m (0.867m)	有り
3	ハイブリッド重力式栈橋	0.25 注1)	26m (0.867m)	無し

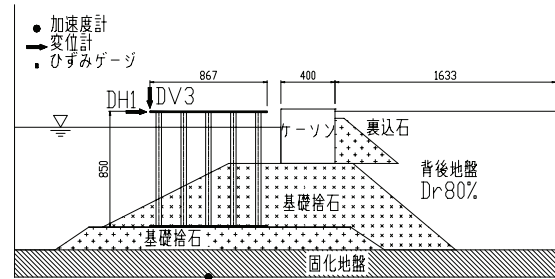
注1)土留めケーソンは $k_h=0.20$   
注2)下段の括弧内は模型スケール



(a) 重力式ケーソン



(b) ハイブリッド重力式栈橋 (土留壁有)



(c) ハイブリッド重力式栈橋 (土留壁無)

注)加速度計(+)  
変位計は矢印の方向が(+)

図-4 実験模型の断面図 (単位: mm)

### (3) 残留変位による堤体の地震時安定性

図-5に入力加速度と堤体海側上部(図-4のDH1)の水平変位の関係を示す。なお、水平変位量は表-2の相似則に基づいて実スケールに換算したものである。全ケースにおいて、入力加速度が大きくなるにしたがい、水平変位は増加する傾向にあり、入力加速度が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有のタイプで1.3m、土留壁無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た。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堤体の水平抵抗力に考慮できる特徴があるが、土留壁有のタイプでは、基礎捨石の水平慣性力も堤体に作用することになり、海側への変形には不利に働くものと考えられる。一方、土留壁無のタイプでは、基礎捨石の水平慣性力が直接底版へと作用しないため、土留壁有のタイプに比べて、海側への水平変位が小さくなると推察される。

次に、入力加速度と堤体海側上部(図-4のDV3)の鉛直変位の関係を図-6、堤体の傾斜角を図-7に示す。図-6より、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とが分かる。また、図-7の傾斜角を見ると、重力式ケーソンでは入力加速度が600Gal程度で2°、土留壁有のハイブリッド重力式栈橋では傾斜角が0.7°と小さく、特に土留壁無のケースでは傾斜角が負となり、堤体が陸側に傾斜する変形モードを示していた。このことから、ハイブリッド重力式栈橋は、堤体に直接作用する背面土圧が小さいと同時に、軽量(重力式ケーソンの40%程度)で地震慣性力が低減されているため、傾斜しながら海側へ変形するモードは卓越しないものと考えられる。

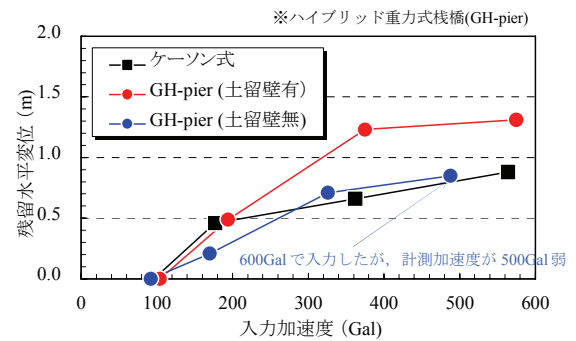


図-5 水平変位(DH1)\_[実スケール]

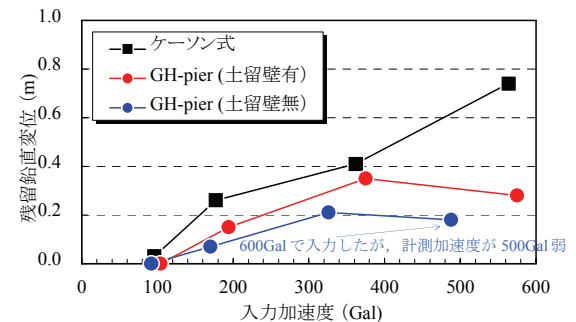


図-6 鉛直変位(DV3)\_[実スケール]

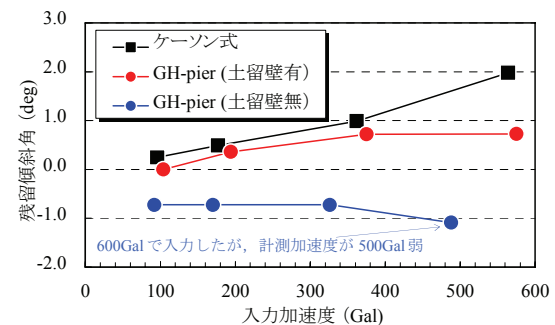


図-7 傾斜角\_[実スケール]

(4) 動的挙動の評価

加振中の動的挙動として、400Gal相当の加振レベルにおける代表的な変位計および加速度計の時刻歴波形を図-8に示す。なお、各ケースの動的挙動を比較し易いよう加振開始の時間軸を調整しており、測点の記号は、D：変位、A：加速度の計測器であることを表し、続くHおよびVはそれぞれ水平、鉛直の方向を表している。また、土留壁無のハイブリッド重力式栈橋は、堤体海側上部の変位計(DH1, DV3)のみ設置・収録している。

変位の時系列を見ると、全ケースにおいて加振中に変位が発生し、加振終了とともに変形が収束していることが分かる。堤体海側上部の水平変位(DH1)は、前項で述べたように、重力式ケーソンと土留壁無のハイブリッド重力式栈橋が概ね同様の傾向を示し、土留壁有の場合にはやや水平変位が大きい。ハイブリッド重力式栈橋は、重力式ケーソン式に比べて軽量なため、堤体の傾斜角が小さいことを既に述べたが、それを反映する形で堤体海側下部の水平変位(DH2)がやや大きく、鉛直変位(DV3)が重力式ケーソン式に比べて小さくなっている。なお、前項の実験条件で述べたように、ハイブリッド重力式栈橋では土留ケーソンの設計震度を0.20で設定している関係で、設計震度0.25で設定した重力式ケーソンの堤体よりも大きな水平変位(DH6)が発生している。一方、加速度の時刻歴を見ると、栈橋構造を有するため、ハイブリッド重力式栈橋上部の加速度計(AH6)の応答振幅が重力式

ケーソンに比べて大きい。堤体が軽量なため大きな慣性力は作用していないと考えられる。なお、背後地盤内のAH17からAH19にかけて応答が増大していることから、密詰め地盤として挙動している。

図-9は、加速度計(AH3, AH4, AH8)の時刻歴を3波分(0.3秒間)で比較したものである。加速度の位相差に着目すると、ハイブリッド重力式栈橋の底版上に設置したAH4と底版上に投入した捨石上のAH8では位相差が小さく、逆にケーソン底面および栈橋底版上のAH4と基礎マウンド上のAH3では大きいことがわかる。これより、土留壁有のハイブリッド重力式栈橋では、底版上に投入した捨石は堤体と一体的に挙動していたことが推察される。

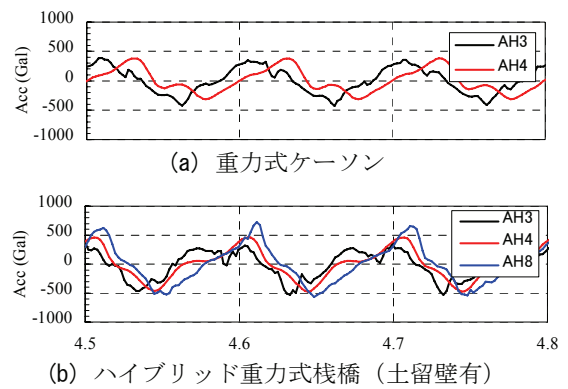
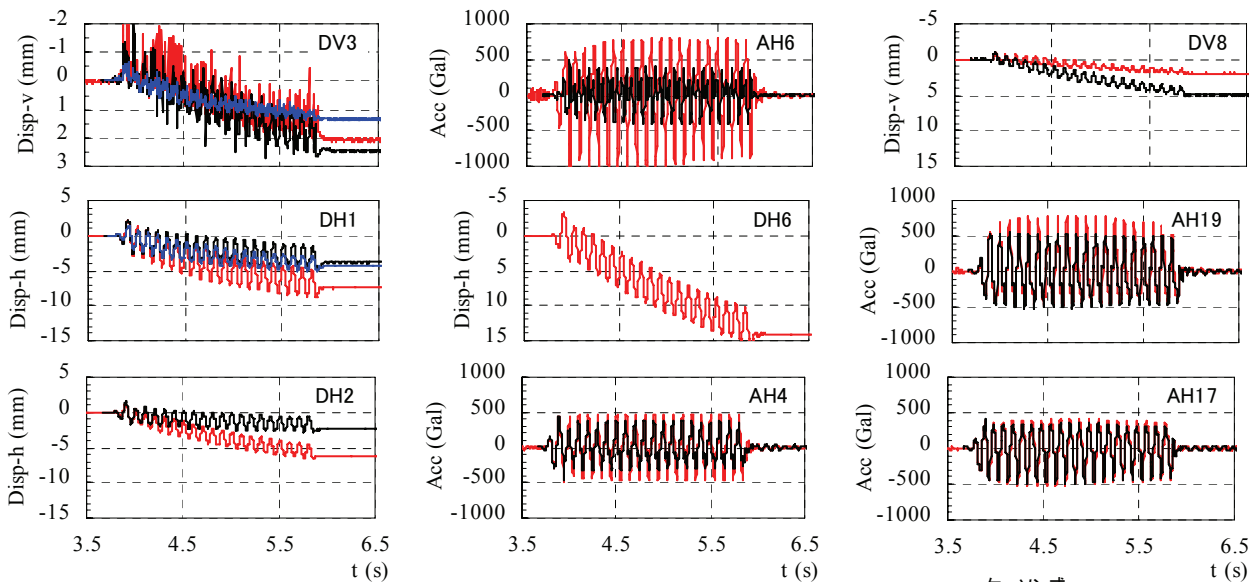
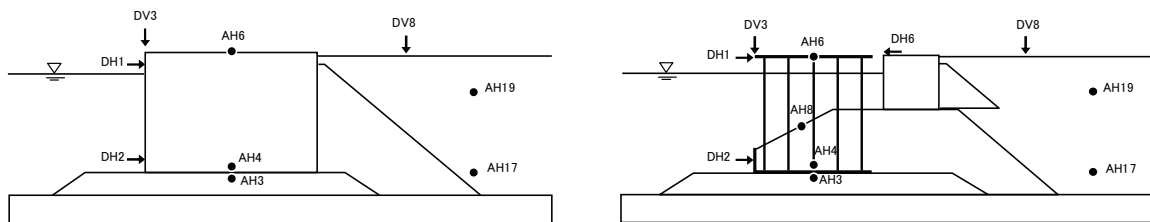


図-9 加速度時刻歴の比較〔模型スケール〕



注) 変位計は矢印方向が正の変位



(a) 重力式ケーソン (b) ハイブリッド重力式栈橋(土留壁有)  
 図-8 代表点の時刻歴波形(400Gal相当の加振ステップ)〔模型スケール〕

#### 4. 有効応力解析による変形照査の適用性

性能設計に基づく港湾施設の設計実務では、有効応力解析による変形照査を行い、規定の耐震性能を満足することを確認する<sup>6)</sup>。したがって、新しい構造形式であるハイブリッド重力式栈橋においても、有効応力解析による変形照査が行えることが望ましい。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<sup>8)</sup>)を用い、土留壁有のハイブリッド重力式栈橋について、模型実験の再現を試み、その適用性について考察する。

##### (1) 解析パラメータの設定

本検討で用いた解析コードFLIPは、1995年の兵庫県南部地震の被災解析をはじめとした多くの適用事例が報告されている<sup>9), 10)</sup>。ハイブリッド重力式栈橋は、文字通り重力式と栈橋式の両方の特徴を取り入れたハイブリッド構造であり、重力式ケーソン<sup>9)</sup>および栈橋式<sup>11)</sup>の既往の各モデル化方法を参考にした。

解析に使用したパラメータを表-4に示す。固化地盤を除く全ての地盤要素をマルチスプリング要素とし、せん断弾性係数 $G_{ma}$ は、実験前に行ったパルス波加振による層中央でのせん断波速度 $V_s$ から $G_{ma}=\rho V_s^2$ より求めた。また、体積弾性係数 $K_{ma}$ は地盤のポアソン比 $\nu=0.33$ から、 $K_{ma}=2(1+\nu)G_{ma}/\{3(1-2\nu)\}$ より求めるとともに、 $G_{ma}$ および $K_{ma}$ ともに拘束圧の0.5乗に依存させた。なお、背後地盤の内部摩擦角は別途実施した三軸CD試験結果の値を使用している。基礎捨石および裏込石について、透水性が

よいことから排水条件によるモデル化が望ましいが、本解析で用いるコードが非排水条件に立脚しているため、間隙水が発揮する体積弾性係数を低減させ、見かけの透水性を与える方法を採用した<sup>12)</sup>。ケーソンは線形平面要素として、単位体積重量は実験値、ヤング率 $E$ およびポアソン比 $\nu$ を文献<sup>12)</sup>を参考に決定した。また、数値解析上の安定性を確保するために用いた初期剛性比例型のReyleigh減衰 $\beta$ は、自由地盤部の一次元解析を実施し、最大水平変位が安定する程度の小さい値として0.0002を用いた。

##### (2) ハイブリッド重力式栈橋の解析モデル

上部工、底版および土留壁壁を線形はり要素、それを結ぶ柱体をバイリニアの非線形はり要素でモデル化した。図-10に解析モデルを示す。なお、図中の非線形はり要素と地盤要素は独立した2重節点とし、相互作用ばね要素で接続させている。これにより、杭間地盤のすり抜け現象など杭の三次元的挙動を表現した<sup>11)</sup>。

ケーソン背後および底面、底版下には滑り・剥離挙動を再現するため、弾完全塑性型のジョイント要素を設定した。本要素は、ジョイント要素の垂直方向について引張力は負担しない。入力パラメータは、過去の被災事例等で適用性が確認されている値として、ジョイント要素のせん断および垂直方向の接線剛性を $K_n=K_s=1.0 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ とし、せん断抵抗角をケーソンと裏込石間を $\phi_j=15$ 度、それ以外を模型実験の摩擦係数を参考に $\phi_j=35$ 度とした。

表-4 解析パラメータ

線形平面要素		ケーソン	固化地盤	
密度	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	1.93	2.00	
ヤング率	$E$ (kN/m <sup>2</sup> )	2.20E+07	4.89E+05	
ポアソン比	$\nu$	0.17	0.33	

マルチスプリング要素		背後地盤	裏込石	基礎捨石1	基礎捨石2
密度	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	1.96	1.87	1.96	1.96
基準拘束圧	$\sigma_{ma}$ (kN/m <sup>2</sup> )	4.24	2.15	5.46	7.73
せん断弾性係数	$G_{ma}$ (kN/m <sup>2</sup> )	10633	7582	9203	29828
体積弾性係数	$K_{ma}$ (kN/m <sup>2</sup> )	27729	19773	24000	77787
ポアソン比	$\nu$	0.33	0.33	0.33	0.33
間隙率	$n$	0.45	0.45	0.45	0.45
内部摩擦角	$\phi_r$ (deg)	42.0	35.0	35.0	35.0
粘着力	$c$ (kN/m <sup>2</sup> )	-	0.67	0.67	0.67
最大減衰定数	$h_{max}$	0.24	0.24	0.24	0.24
体積弾性係数(間隙水)	$K_r$ (kN/m <sup>2</sup> )	2.20E+06	2.20E+04	2.20E+04	2.20E+04

線形はり要素		上部工	底版
密度	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	7.85	7.85
せん断弾性係数	$G$ (kN/m <sup>2</sup> )	7.7E+07	7.7E+07
断面積	$A$ (m <sup>2</sup> /m)	0.009	0.012
断面2次モーメント	$I$ (m <sup>4</sup> /m)	0.00075	0.0010
ポアソン比	$\nu$	0.30	0.30

非線形はり要素		柱体(アルミニウム管)
密度	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	2.68
せん断弾性係数	$G$ (kN/m <sup>2</sup> )	2.76E+07
断面積	$A$ (m <sup>2</sup> /m)	1.09E-03
曲げ剛性_1次勾配	$EI_1$ (kNm <sup>2</sup> /m)	14.45
曲げ剛性_2次勾配	$EI_2$ (kNm <sup>2</sup> /m)	0.145
全塑性モーメント	$M_p$ (kNm/m)	1.93
降伏軸力	$N_y$ (kN/m)	157.53
ポアソン比	$\nu$	0.30

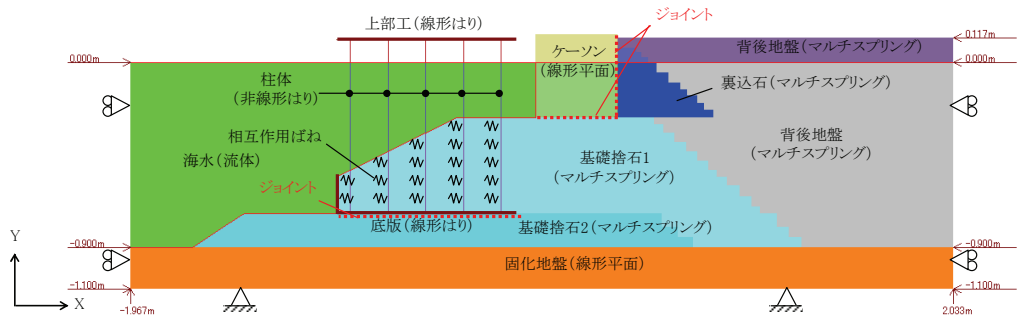


図-10 ハイブリッド重力式栈橋(土留壁有)の解析モデル

(3) 境界条件および入力地震動

模型実験の境界条件と適合させるため、解析モデルの側面をx固定、底面をxy固定とした。入力地震動は、図-8の模型実験で計測された固化地盤底面における加速度時刻歴を用いた。

(4) 模型実験の再現解析結果

FLIPによる再現解析結果を模型実験と比較して図-11に示す。概して、解析は実験値に対して良い整合を示しており、特にハイブリッド栈橋堤体上端の変位(DH1, DV3)について再現性が高いことが分かる。図-11の右下には、ハイブリッド栈橋堤体上端の変位(DH1, DV3)と土留ケーソンの上端の変位(DH6, DV5)について、2次元的な変位の軌跡を整理しているが、両堤体ともに変位挙動が概ね再現されていることが分かる。

一方、基礎捨石部の加速度時刻歴(AH4, AH8)をみると、栈橋底版下部のジョイントで滑るため解析の応答値が実験と比べて過小評価する傾向があるが、背後地盤内(AH18)では概ね対応している。

図-12には、任意の柱体(図-11中のM2, M5)における最大(+ )および最小(-)値の曲げモーメント分布を示している。模型実験では柱体の中央部で曲げモーメントが最も小さく、上部工および底版にかけてモーメントが大きくなる傾向を示していたが、解析結果も同様の傾向が確認された。しかし、上部工および底版との連結部分においては、解析結果が実験値を過小評価しているため、注意が必要である。

図-13は最大せん断ひずみ $\gamma_{max}$ のコンターをメッシュ変形図(変形倍率5倍)と合わせて示している。

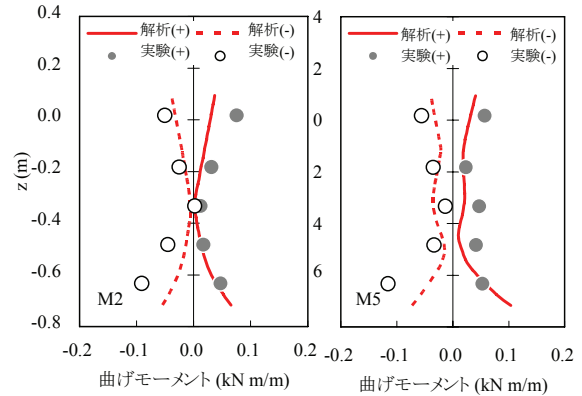


図-12 柱体の曲げモーメント分布\_[模型スケール]

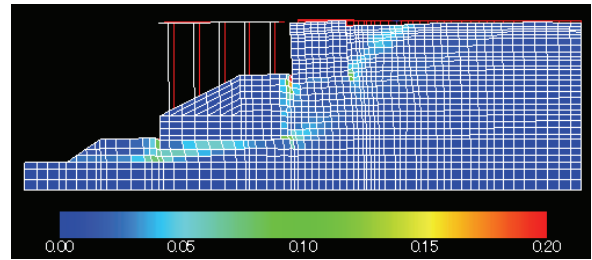
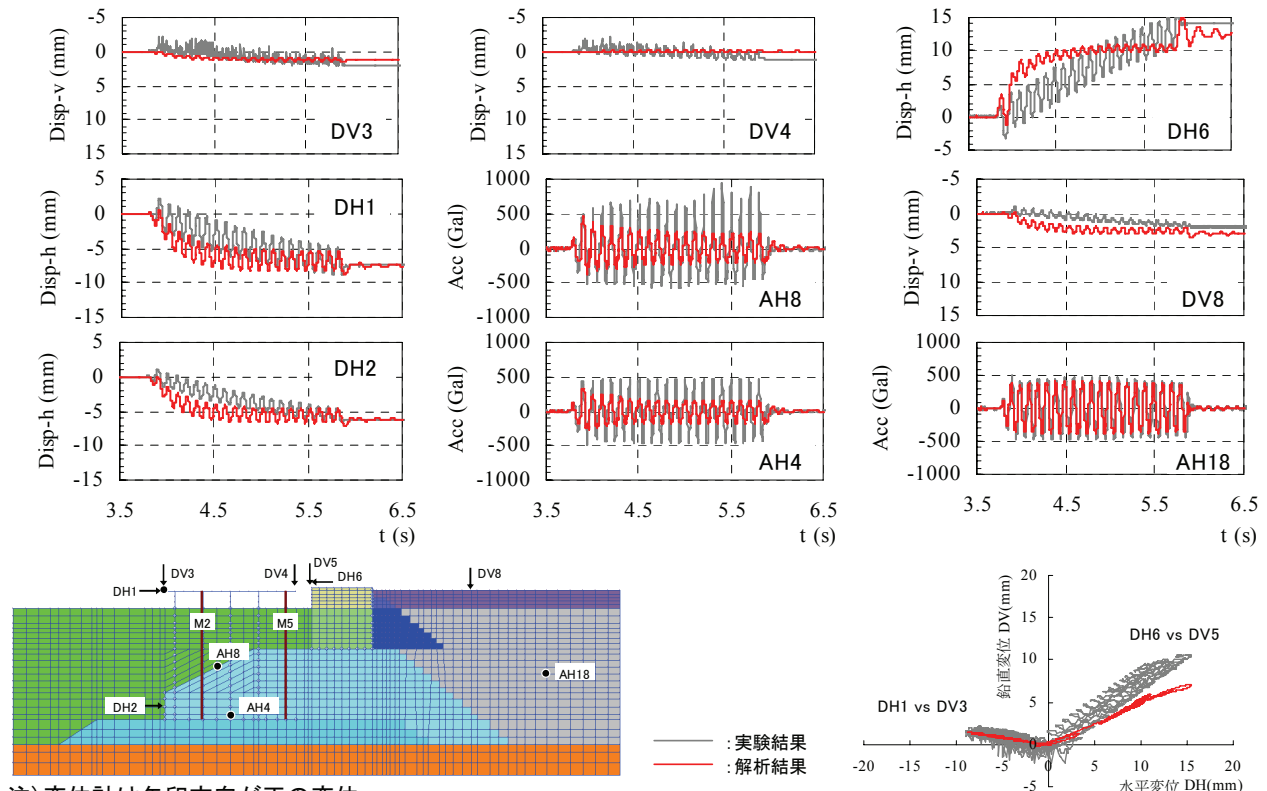


図-13 最大せん断ひずみ $\gamma_{max}$ 分布

図を見れば、土留護岸の背後と栈橋底版の背後に局所的なせん断が確認されるが、堤体は概ね水平に海側へ変位していることが分かる。このように、重力式の土留護岸はマウンド変形の影響を大きく受け、堤体が半時計回りに傾斜する一方で、栈橋堤体は重力式に比べて軽量なことから、傾斜のない水平変位が支配的な変形モードであると推察される。



注) 変位計は矢印方向が正の変位

図-11 解析と実験の時刻歴比較\_[模型スケール]



## 5. おわりに

本論文では、大型の水中振動台実験を実施し、ハイブリッド重力式栈橋の地震時安定性および動的挙動について把握するとともに、底版前面の土留壁の有無による水平変位への影響を明らかにした。さらに、FLIPによる有効応力解析を用いて模型実験の再現解析を試み、モデル化方法および変形照査の適用性について検討した。

- a) 本検討条件において、重力式ケーソンとハイブリッド重力式栈橋の地震時安定検討を行った。検討結果より、成立する堤体構造について概略の直工費を算出したところ、重力式ケーソンに比べて15~20%程度のコストダウンを見出すことができた。
- b) ハイブリッド重力式栈橋の底版前面に土留壁が有る場合には、底版上の基礎捨石による水平慣性力が堤体に直接作用し、重力式ケーソンよりも大きな水平変位が発生した。一方、底版前面に土留壁が無い場合にも、底版上の基礎捨石は堤体の滑動抵抗として寄与することが推察され、コストダウンを図りつつ重力式ケーソンと同等程度の水平変位に抑えることが可能と判断された。
- c) ハイブリッド重力式栈橋の堤体部は重力式ケーソンに比べて軽量(40%程度)であり、地震時における変形モードは傾斜を伴わない水平変位であることが確認された。
- d) 模型実験の加速度時刻歴から、底版上の基礎捨石は底版と大きな位相差を伴わないことから、土留壁有の場合には堤体と一体的に挙動することが推察された。
- e) 土留壁有のハイブリッド重力式栈橋について、FLIPによる再現解析を行った。その結果、本検討によるモデル化方法で、概ね実験の変形挙動を再現できることが確認された。しかし、柱体と上部工・底版の連結部における曲げモーメントについては、過小評価する傾向があり、数値解析の更なる精度向上が必要である。

本検討では、底版前面に土留壁を設けないハイブリッド重力式栈橋の地震時安定性が高いことを確認

した。今後は、土留壁が無い構造を中心に不規則波を入力地震動とした模型実験を行い、ガントリークレーンを考慮した際の動的相互作用の影響、柱体への軸力変動の影響などを詳細に調べる予定である。

## 参考文献

- 1) 平澤 興：拡大する世界のコンテナ物流と我が国の現状、(特集)国際海上コンテナ輸送の歩みと現在「港湾」、p.25, 2009.
- 2) 老平武弘, 塩見雅樹：直ぐい式横栈橋の構造諸元の統計的分析, 港湾技研資料, No.749, 1993.
- 3) 横浜市：京浜港国際コンテナ戦略港湾計画書について, <http://www.city.yokohama.lg.jp/kowan/business/senryakokuwan/>, (2010.5.17閲覧)
- 4) 神戸市：阪神港国際コンテナ戦略港湾について, <http://www.city.kobe.lg.jp/information/project/port/port/senryakukowan/index.html>, (2010.8.6閲覧)
- 5) 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, pp.261-262, 2011.
- 6) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp.951-957, 2007.
- 7) 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, pp.3-24, 1988.
- 8) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Analysis of undrained cyclic behavior of sand under anisotropic consolidation, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, pp.16-20, 1992.
- 9) 井合進, 一井康二, 森田年一：兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察(その7) ケーソン式岸壁の有効応力解析, 港湾技術研究所資料, No.813, 1995.
- 10) 井合進：FLIPによる解析, 地盤と土構造物の地震時の挙動に関するシンポジウム, 土質工学会, pp.94-103, 1989.
- 11) 塩崎禎郎, 長尾毅, 宮下健一郎, 小堤治：直杭式横栈橋の二次元有効応力解析における精度向上に関する検討, 土木学会地震工学論文集, pp.573-579, 2007.
- 12) (財)沿岸技術開発センター：港湾構造物設計事例集, 上巻, pp.1-57~1-76, 2007.

(2011.11.25受付, 2012.2.7修正, 2012.3.6受理)

## PROPOSITION OF NEW GRAVITY-TYPE PIER AND EVALUATION OF ITS ASEISMIC PERFORMANCE

Katsuya IKENO, Motohisa HARA, Makoto YOSHIDA, Takahiro SUGANO and Eiji KOHAMA

In this paper, we conducted a model test in 1g gravitation field and numerical analysis about seismic behavior of proposed gravity-type pier for deepwater quay wall. The performance of proposed pier is compared with that of conventional type. This proposed pier has the hybrid type structure, in which a superstructure to a substructure with steel pipe piles on base mound, it resists an inertial force and earth pressure during earthquakes by its self-weight. From results, the seismic stability of this proposed pier is confirmed, and seismic behavior of steel pipe piles can be simulated by effective stress analysis FLIP.