

制振部材を用いた直杭式栈橋の 耐震補強・復旧工法の開発について

近藤 明彦¹・小濱 英司²・渡辺 健二³・国生 隼人⁴・
天野 俊³・小山 萌弥⁴・永尾 直也⁵・吉原 到⁶

¹ 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域
耐震構造研究グループ (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

² 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域
耐震構造研究グループ長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

³ 八千代エンジニアリング (株) 港湾・海洋部 (〒111-8648 東京都台東区浅草橋 5-20-8 CS タワー)

⁴ 八千代エンジニアリング (株) 九州支店 河川・水工部 (〒810-0062 福岡県福岡市中央区荒戸 2-1-5)

⁵ 日本製鉄 (株) 建材開発技術部 (〒100-8071 東京都千代田区丸の内 2-6-1)

⁶ あおみ建設 (株) 土木本部技術開発部 (〒108-8430 東京都港区海岸 3-18-21)

本研究では、栈橋式係留施設の耐震性を安価かつ容易に向上する方法の開発を目的として、直杭式栈橋模型を対象に制振部材を基礎杭間に追設する工法の耐震性向上効果を検討している。制振部材として座屈拘束ブレースを検討対象とし、その特性として制振材、軸剛性、設置角度などの諸元が栈橋構造全体の応答に与える影響を検討している。本報告では、護岸のない簡略化した断面を対象に模型振動台実験による耐震性向上効果の検討と、有限要素法解析における制振部材のモデル化・再現解析による検証を行った上で、実物大スケールにおける護岸を含む断面で制振部材の特性に関する影響を検討した結果を概略的に示す。

キーワード 制振部材, 直杭式栈橋, 模型振動台実験, 再現解析, 有限要素法

1. はじめに

高度経済成長期に整備された多くの港湾構造物は老朽化が進行しており、供用後50年を経過する施設は急速な増加の一途を辿っている。一方で、港湾構造物の設計で考慮する地震作用¹⁾は、一般的に過去のものより大きくなる傾向があることから、老朽化の進行に起因する構造耐力の低下によって構造物の安定性を確保できなくなる懸念がある。これらを背景として、比較的安価で容易に耐震性を向上させる工法が期待されている。

そこで、本研究では、栈橋式係留施設を対象に、直杭式栈橋の基礎杭間に制振部材を追設することで耐震補強・復旧を行う工法²⁾の開発を目的として検討を行っている。制振部材には、既往のオイルダンパーや座屈拘束ブレースを設置する方法³⁾を参考に、損傷後の交換による復旧や防食対策などのメンテナンス性を考慮して、座屈拘束ブレースを対象とした。本工法の検討においては、簡略化した断面を対象に模型振動台実験で耐震性向上効果を検討し、その結果を再現する有限要素法モデルの検討と再現解析による検証を行った。これを踏まえ、実物大スケールの断面を対象として制振部材の特性による耐震性向上効果への影響をパラメトリックに検討している。

2. 模型振動台実験³⁾

(1) 検討断面

本研究で対象とする断面は、国土技術政策総合研究所資料No.1001⁴⁾における栈橋式係留施設の照査用震度算出方法の設定に用いた断面を参考に、水深7.5m、-10.0m、-13.0mの直杭式栈橋を対象としている。模型振動台実験では、図-1に示す水深10.0mの直杭式栈橋を参考としており、その構造は、地盤条件として基盤の上に礫質土層と2種類の砂質土層があり、その上に捨石マウンド、L型ブロック、裏込石と裏埋土による護岸と3列の基礎杭

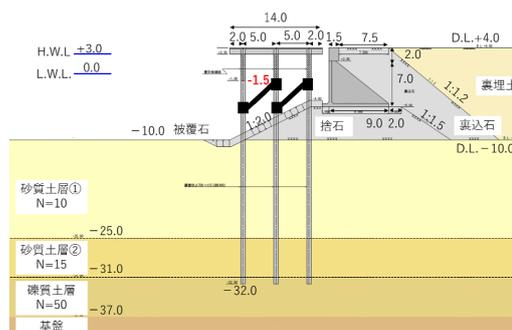


図-1 検討断面例(水深10m, 制振部材設置角度45度)

($\phi 90\text{mm} \times t 12\text{mm}$, SKK490) による直杭式栈橋がある断面となっている。また、図中の制振部材は、設置角度を水平面とのなす角で45度のケースを示しており、設置角度30度、60度の検討も行っている。なお、設置角度の変更にあたり、部材上端はL.W.Lより-1.5mに固定しており、下端の位置のみ変更することとした。

(2) 実験条件

模型振動台実験では、制振部材の取り付けによる効果に着目して検討するために護岸の無い断面に簡略化し、相似則を考慮して縮尺1/25に設定した。図-2に模型断面の詳細を示しており、上部工は鉄製の板（幅600mm、奥行900mm、板厚6mm）であり、基礎杭模型はアルミ製のパイプ（直径25mm、肉厚1mm）を用いている。図-3(a)に制振部材模型を示しており、対象とする縮尺で座屈拘束ブレース模型の製作が困難であったため、制振材には防振ゴムを用いている。部材模型は、軸方向に圧縮・引張のみが作用するようシャフトとリニアブッシュを並行して配置し、基礎杭との接合部ではヒンジとなるようユニバーサルジョイントを取り付けている。また、制振部材の挙動を計測するために渦電流式変位計とロードセルを設置した。なお、比較のために制振部材の無い条件の現況断面も作成しており、同時に加振を行っている。模型地盤は、岐阜硅砂6号を幅4000mm、奥行1400mm、高さ1000mmの領域に8層に分けて気中落下で作成し、制振部材のある断面の相対密度は85.4%、現況断面は85.1%だった。本検討では、制振材消費エネルギー（防振ゴム7種類、うち直径2種類：12mm、15mm、材質3種類：天然ゴム硬度45、60、クロロプレンゴムCR）、設置角度（30度、45度、60度）、剛性（防振ゴムの設置個数：1個、2個）を変更して、応答の比較を行った。また、改良効果は入力地震動の周波数特性の影響を踏まえ、図-4に示す3種類で検討を行った。なお、入力地震動は、相似則⁷⁾をもとに時間軸を換算している。

図-3(b)に制振部材に5Hzの正弦波を用いて軸変位が±1.0mmを入力した際の応答を示しており、基本ケースとして、同一の変位で軸力-軸変位関係の面積が最大である赤線のKA15(CR)・2個を基本に、剛性を低下させた黒線のKA15(CR)・1個、同程度の剛性で面積の小さい

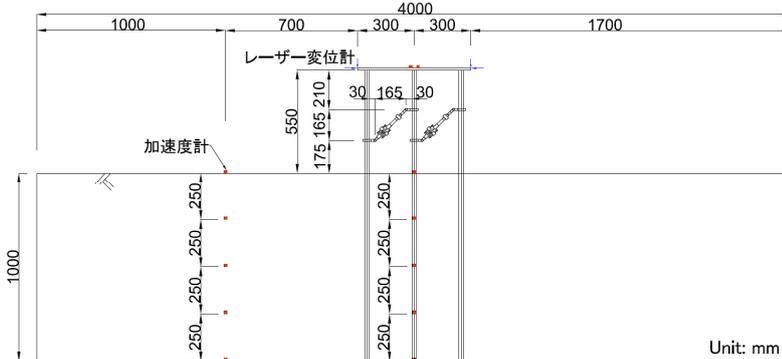


図-2 模型実験断面(設置角度 45 度)

緑色のKA15(60)・2個、最も剛性が低く面積が小さい青色のKA12(45)・1個の4ケースを選定した。

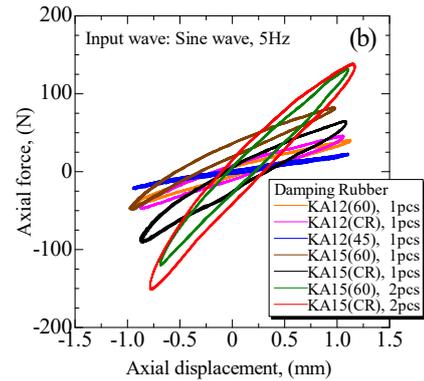
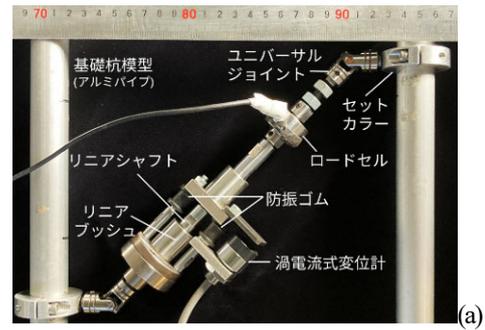


図-3 制振部材模型の特徴：(a)制振部材模型の構成、(b)制振材(防振ゴム)の応答

制振部材を用いた栈橋における耐震性向上効果は入力地震動の周波数特性に影響を受けると考えられるため、図-4に示すホワイトノイズの入力地震動 A、レベル1地震動相当の入力地震動 B、レベル2地震動相当の入力地震動 C の合計3種類を用いて検討を行った。なお、入力地震動 B と C は模型縮尺比 1/25にあわせて相似則⁷⁾をもとに時間軸を換算している。また、これらの波形は以降の再現解析や実スケールの解析での検討においても相似則を考慮した波形を用いている。

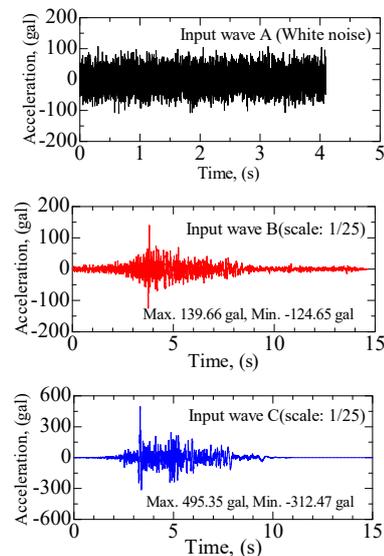


図-4 入力地震動3波

(3) 実験結果

加振実験結果について、紙面の都合上、入力地震動Cについて示す。図-5(a)に模型栈橋上部工の最大応答加速度(図-1左右方向の最大応答加速度の平均値)と部材設置角度の関係を、図-5(b)に模型栈橋上部工の最大応答変位(同上)との関係を示している。なお、図中には制振部材を設置しない現況ケースにおける応答を破線で示している。図より、同一の防振ゴム(1個及び2個)を用いた場合は、設置角度が大きいほど最大応答加速度と最大応答変位が低下する傾向を示している。最も改良効果が見られたのは、KA-15(CR)の防振ゴム2個を設置角度60度としたケースであり、現況断面より最大応答加速度は35%程度、最大応答変位は75%程度低下した。

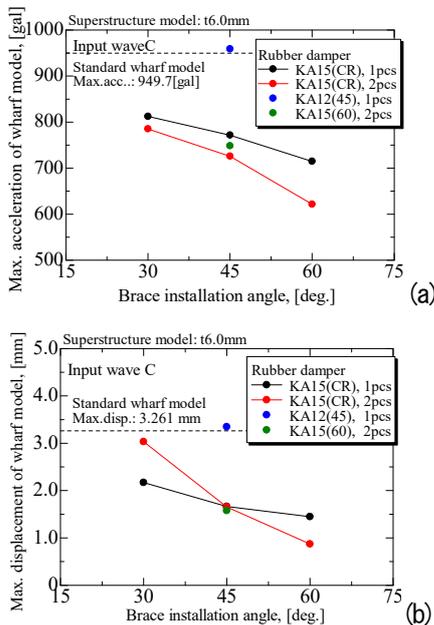


図-5 入力地震動 C における栈橋上部工の応答に対する制振部材の特徴の影響: (a)最大応答加速度, (b)最大応答変位

最も改良効果が得られたKA-15(CR)の防振ゴム2個を設置したケースについて、基礎杭の曲げモーメント分布の応答に対する設置角度の影響を検討する。図-6に図-1の左側杭の曲げモーメント分布を示す。現況断面では、基礎杭の曲げモーメントが上部工接合部と地表面付近で大きくなっている。制振部材を設置したケースでは、上部工との接合部における曲げモーメントは低減され、設置角度30度と45度では制振部材下端取付位置(標高1175mm付近)の曲げモーメントが現況断面より増加している。これは、制振部材の設置によって杭頭で低減されたモーメントが制振部材に分担されたためと考えられる。また、設置角度ごとの曲げモーメント分布の最大値の低減割合については、設置角度30度、45度、60度の順に大きく、現況断面の最大値6.69 N・mに対して設置角度60度では1.77 N・mと75%の低減がみられる。

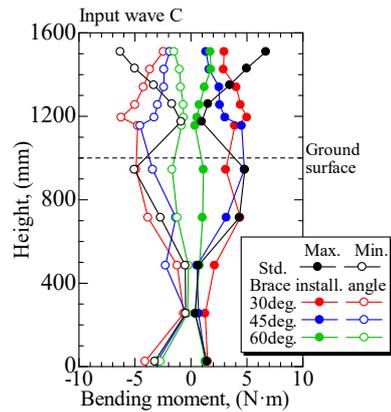


図-6 入力地震動Cにおける制振部材(KA15(CR), 2pcs.)の設置角度に対する栈橋基礎杭の曲げモーメント応答

制振部材の特性(制振材, 設置角度, 剛性)が栈橋構造全体の減衰定数に与える影響として、栈橋構造全体の減衰定数を、基礎杭の仮想固定点付近で計測した加速度をもとに様々な減衰定数で算定した加速度応答スペクトルを用いて、固有周期と最大応答加速度との関係から読み取った。なお、固有周期は、各加振ケースにおける仮想固定点付近の深さ250mm地点の応答加速度と栈橋上部工の応答加速度におけるフーリエスペクトル比の最大値をとる周期とした。図-7には、最大応答変位に対する栈橋全体の減衰定数の関係を示しており、栈橋応答の増加による地盤の影響による全体減衰の増加を考慮することで、制振部材の特性(制振材, 設置角度, 剛性)の影響を検討する。図中の破線は、8ケースの栈橋模型と同時に加振した現況断面における最大応答変位と減衰定数の平均値を示している。図より、制振部材を設置した多くのケースにおいて、破線で示す現況断面の減衰定数以上の位置にあることから、制振部材を設置した栈橋構造は応答変位が同一のレベルにおいて、より高い減衰定数を持つ傾向があると考えられる。また、最も高い減衰定数を示したのは、KA-15(CR)の防振ゴム2個を60度で設置した図中の緑色四角塗り潰しのケースであった。

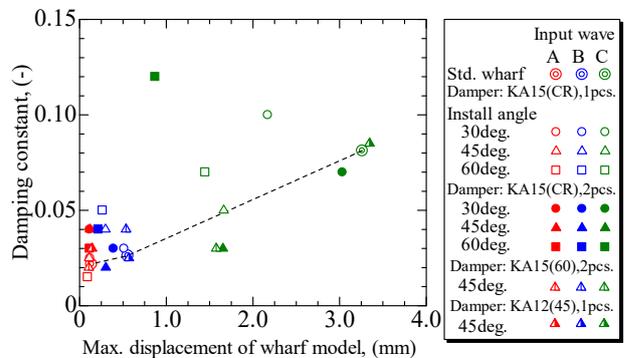


図-7 様々な制振部材の特性(制振材, 設置角度, 剛性)における栈橋構造の減衰定数と最大応答変位関係

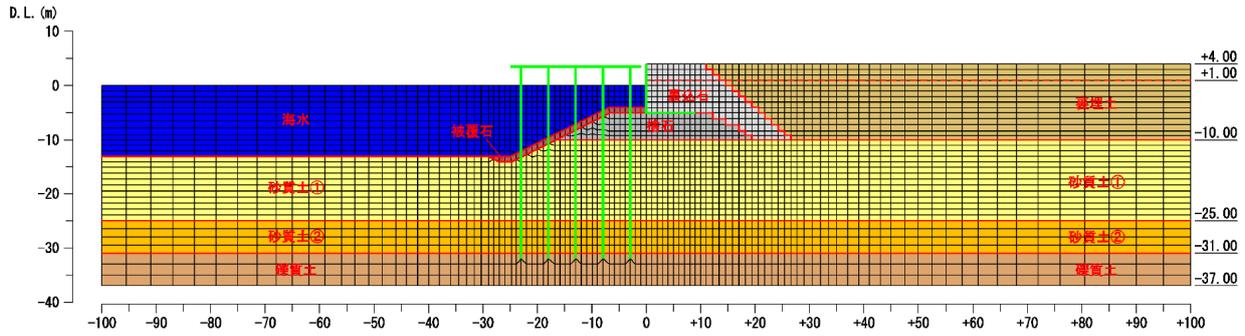


図-11 現況断面の有限要素法解析メッシュ

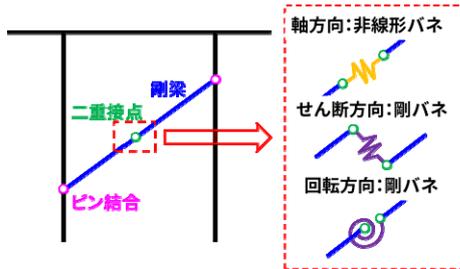


図-12 座屈拘束ブレースのモデル化概念図

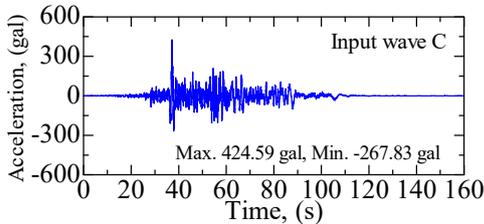


図-13 振幅調整した入力地震動C

表-2 実物大スケールの解析パラメーター一覧

床版梁・L型ブロック (線形はり要素)		L型ブロック			
		床版梁	上部工	側板	底版
密度	ρ (kN/m ³)	30.0	22.6	24.0	24.0
断面二次モーメント	I (m ⁴ /m)	0.167	0.281	0.005	0.018
断面積	A (m ² /m)	1.0	1.5	0.4	0.4

鋼管杭 (非線形はり要素)		重防食範囲 (-1.0m以浅)		
		水中	地中	
密度	ρ (kN/m ³)	77.0	77.0	77.0
断面二次モーメント	I (m ⁴ /m)	5.34×10^{-4}	4.94×10^{-4}	5.28×10^{-4}
断面積	A (m ² /m)	6.91×10^{-3}	6.41×10^{-3}	6.84×10^{-3}
曲げ剛性 (一次勾配)	EI_1 (kNm ² /m)	1.07×10^5	9.88×10^4	1.06×10^5
曲げ剛性 (二次勾配)	EI_2 (kNm ² /m)	0	0	0
全塑性モーメント	M_p (kNm/m)	520.2	478.5	513.9

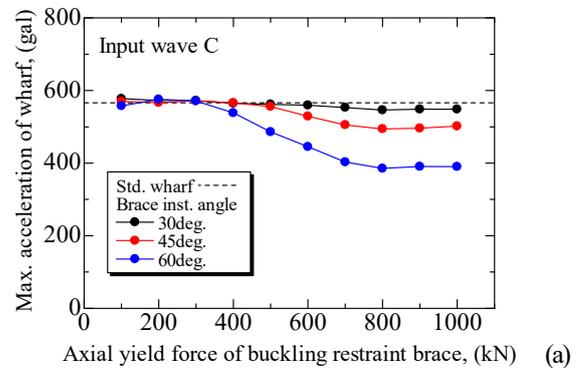
地盤 (マルチスプリング要素)		裏埋土 (気中)	裏埋土 (水中)	砂質土①	砂質土②	礫質土
密度	ρ (kN/m ³)	18.0	20.0	20.0	20.0	20.0
基準拘束圧	σ_{ma} (kN/m ²)	98.0	98.0	98.0	98.0	98.0
せん断弾性係数	G_{ma} (kN/m ²)	76,326	76,326	81,626	77,771	160,593
体積弾性係数	K_{ma} (kN/m ²)	108,316	90,410	154,863	146,979	679,456
ポアソン比	ν	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
間隙率	n	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
内部摩擦角	ϕ (deg.)	39.70	39.70	39.80	39.70	42.80
粘着力	c (kN/m ²)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
最大減衰定数	h_{max}	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
拘束圧依存性	m_g, m_k	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

座屈拘束ブレース (非線形バネ要素)						
降伏軸力	P_y (kN)	100	200	300	400	500
等価剛性 (一次)	K_1 (kN/m/m)	4100	7940	11160	14180	16900
等価剛性 (二次)	K_2 (kN/m/m)	82.0	158.8	223.2	283.6	338.0
降伏軸力	P_y (kN)	600	700	800	900	1000
等価剛性 (一次)	K_1 (kN/m/m)	19260	22420	25600	28900	31980
等価剛性 (二次)	K_2 (kN/m/m)	385.2	448.4	512.0	578.0	639.6

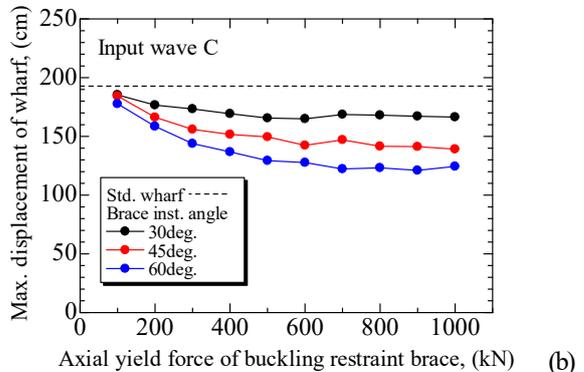
(2) 解析結果

本項では、入力地震動Cにおける現況断面と座屈拘束ブレースを全ての杭間に配置する改良断面について、座屈拘束ブレースの設置角度 (30度, 45度, 60度) と軸降伏強度を100kNから1000kNまで100kNごとに変化させたケースについて検討を行った。

図-14(a)に栈橋上部工の最大応答加速度, 図-14(b)に最大応答変位に関する結果を示す。最大応答加速度について、破線の現況断面と比較して、座屈拘束ブレースを設置したケースでは軸降伏力が100-300kNでは同程度、500-800kNで減少がみられ、800kN以上で減少割合は横ばいとなっている。また、減少割合は、模型実験と同様に設置角度が大きいくりに増加しており、最大で32%程度低下している。最大応答変位についても同様に、座屈拘束ブレースを設置した全てのケースで現況断面より低下し、設置角度も大きいくりに減少割合が大きくなっている。



(a)



(b)

図-14 入力地震動Cにおける栈橋上部工の挙動に対する座屈拘束ブレースの設置角度と降伏軸力の影響: (a)最大応答加速度, (b)最大応答変位

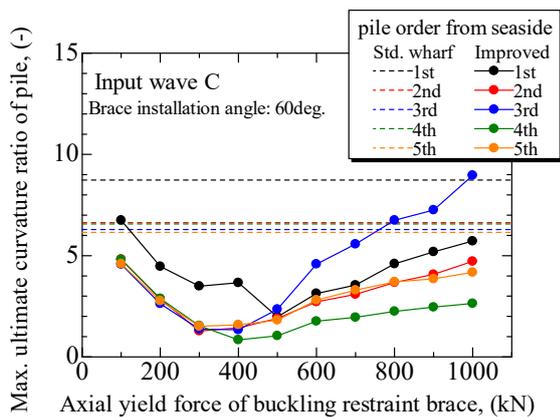


図-15 栈橋基礎杭の最大限界曲率比に対する座屈拘束ブレースの降伏軸力の影響（入力地震動C，設置角度60度）

図-15に、耐震性向上効果が最もみられた設置角度60度の断面について、基礎杭の損傷度に関する検討として、最大限界曲率比に対する座屈拘束ブレースの降伏軸力の影響を示す。ここで、最大限界曲率比は、各基礎杭の限界曲率に対する各要素での発生曲率の比の最大値とした。図より、最大限界曲率比は、いずれの基礎杭でも軸降伏力300-500kN程度で最も低く、軸降伏力が低下もしくは増加するほど限界曲率比が増加しており、基礎杭の損傷が大きくなっているといえる。この理由として、図-14の傾向を踏まえると、軸降伏力100-300kNでは、部材が負担する軸力が低いため最大応答変位が大きくなり、軸降伏力600kN以上では、部材自体の剛性が大きく、かつ部材の負担する軸力が大きいため、基礎杭と制振部材の接合部で損傷してしまうと考えられる。

5. 結論

本研究では、直杭式栈橋の基礎杭間に制振部材を追設することで耐震補強・復旧を行う工法の開発として、護岸のない簡略化した断面の模型振動台実験と有限要素法によるモデル化と再現解析、実物大スケール護岸を含む断面における座屈拘束ブレースの特性による耐震性向上効果の検討を行い、以下の知見を得た。

- 模型振動台実験において、制振部材を追設することで、一般的な栈橋基礎杭の杭頭で発生する曲げモーメントを制振部材が分担し、基礎杭の最大曲げモーメントと栈橋上部工の最大応答加速度と最大応答変位を低減する効果が得られた。また、最も低減する効果が得られたのは、制振部材の消費エネルギー（同一変位に対して軸力×軸変位関係の面積）が大きく、設置角度が大きいケースであった。
- 再現解析において、制振部材を剛梁要素の二重節点にダンパー要素と非線形バネ要素で軸方向のみの変形が発生するようモデル化を行った。解析結果は、制振部

材の設置角度に対する最大応答加速度を15%程度、最大応答変位を30%程度の誤差で再現することができた。

- 実物大スケールの有限要素法解析において、座屈拘束ブレースの特性（軸降伏力と剛性）の影響を検討では、設置角度が大きく、座屈拘束ブレースの軸降伏力が大きいほど、栈橋上部工の最大応答加速度と最大応答変位が低減されることを示した。一方で、本検討ケースにおける部材特性（軸降伏力300kN以下、もしくは600kN以上）では、基礎杭の最大限界曲率比が増加することから、適切に座屈拘束ブレースの特性を選択することで栈橋上部工の応答と基礎杭の損傷を抑えられることを示した。

謝辞：本研究は、内閣府官民研究開発投資拡大プログラム（PRISM）によるものであり、深謝の意を表します。本研究の実施において、有益な助言をいただきました京都大学小野憲司客員教授、名古屋大学富田孝史教授、国土交通省港湾局技術企画課技術監理室、関東地方整備局に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，2018。
- 2) 近藤明彦，小濱英司，渡辺健二，国生隼人，小山 萌弥，永尾直也，吉原到：座屈拘束ブレースを用いた直杭式栈橋の耐震性向上に関する基礎的検討，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.75, No. 2, pp.I 563-I 568, 2019。
- 3) 近藤明彦，小濱英司，渡辺健二，国生隼人，天野俊，小山 萌弥，永尾直也，吉原到：制振部材を用いた直杭式栈橋の模型振動台実験による耐震性向上効果の検討，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol.76, No.2, I 408-I 413, 2020。
- 4) 宇野州彦，三好俊康，荒水照夫，大塚久哲：鋼管杭式栈橋に制震ダンパーを適用した耐震補強工法の開発に関する実験的研究，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol. 72, No. 2, pp. I 467-I 472, 2016。
- 5) 塩崎禎郎：座屈拘束ブレースを用いた鋼管杭式栈橋の制震化に関する研究，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.71, No. 2, pp.I 167-I 172, 2015。
- 6) 勝俣優，福永勇介，竹信正寛，宮田正史，小濱英司：地震動に伴う地盤の非線形性を考慮した直杭式横栈橋の照査用震度算出方法に関する研究，国土技術政策総合研究所資料 No.1001, 2018。
- 7) Iai, S.: Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1g Gravitational Field, Report of the Port and Harbor Res. Inst., Vol. 27, No.3, pp.3-24, 1988。
- 8) 杉沢充，佐伯英一郎，中村秀司，平林里恵，市川康，植木正憲，穂苅實：耐震，免震，制振技術の開発，新日鉄技報，No. 356, No. 2, pp. 38-46, 1995。
- 9) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report of The Port and Harbor Research Institute, Vol. 29, No.4, pp.27-56, 1990。