

径厚比を考慮した鋼管部材のモデル化法による 直杭式横棧橋の被災事例の再現解析

大矢 陽介¹・塩崎 禎郎²・小濱 英司³

¹正会員 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
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: ooya-y@pari.go.jp

²正会員 一般社団法人 鋼管杭・鋼矢板技術協会 (〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町3-2-10)

E-mail: y-shiozaki@jfe-steel.co.jp

³正会員 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
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

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

筆者らは、耐震強化施設の棧橋を対象に実施されるレベル2地震動に対する耐震性能照査で用いるための鋼管部材のモデル化法を新たに提案した。提案法は、局部座屈が発生する鋼管部材の径厚比に応じた耐荷性能および変形性能の評価が可能である。本研究では、提案法の適用性を確認することを目的に、1995年兵庫県南部地震の際に被害を受けた神戸港の直杭式棧橋を対象とした再現解析を実施した。その結果、棧橋の残留変位、鋼管杭における局部座屈の発生状況について、被災状況と整合する結果を得た。

Key Words : steel pipe pile, open-type wharves on vertical piles, local buckling, full plastic moment, seismic performance verification, seismic response analysis

1. はじめに

2007年に「港湾の施設の技術上の基準¹⁾」が改正され、耐震強化施設の棧橋に関しては、レベル2地震動に対する地震応答解析による耐震性能照査が必要となった。杭の塑性ヒンジの発生箇所を数える照査法であるが、地震応答解析において鋼管杭は梁要素でモデル化され、曲げモーメントと曲率の関係（以降、 $M-\phi$ 関係と称する）は、全塑性モーメントを上限とするバイリニア型の非線形モデルが一般的に用いられている。塑性ヒンジの発生は、全塑性モーメントの超過したことで判断されている。

ところで、全塑性モーメントは初期断面で全断面塑性状態を仮定した断面計算より求められる。そのため、全塑性モーメントを折れ点とするバイリニア型の $M-\phi$ モデルでは、降伏応力到達以降の鋼管杭の変形性能を表現することはできない。

また、経済設計の観点から港湾分野で多く採用される大径厚比鋼管杭（直径 D と板厚 t の比 D/t が100程度の杭）の曲げ耐力は、全塑性モーメントを下回ることが指摘されている²⁾。そのため、径厚比に応じた鋼管部材の耐荷性能および変形性能を表現可能な合理的なモデル化法の構築が不可欠となっている。

筆者らは、局部座屈が発生する鋼管部材の径厚比に応じた耐荷性能および変形性能の評価が可能であるモデル化法を提案した^{3,4)}。提案法は、三次元FEM解析より得られた $M-\phi$ 関係を、二次元有効応力解析で一般的に用いられている梁要素のバイリニア型で表現したモデル化法である。径厚比および軸力に応じた最大曲げ耐力の評価と、照査項目として最大曲げ耐力発現時の曲率（以降、限界曲率と称する）を採用することで変形性能の評価が可能である。

本研究は、提案した鋼管部材のモデル化法の耐震性能照査での適用性を確認する目的で、1995年兵庫県南部地震の際に被災した直杭式横棧橋を対象とした二次元有効応力解析による再現解析を実施した。

2. 径厚比を考慮したモデル化法

(1) 径厚比が異なる鋼管杭の耐力特性

図-1に示すように、鋼管杭の $M-\phi$ 関係は径厚比によって異なる。径厚比（直径 D /板厚 t ）が大きな鋼管杭は、断面計算から算定される全塑性モーメントに到達する前に、局部座屈が生じて耐力低下が生じる可能性が高い。一方、径厚比が小さな鋼管杭は局部座屈による耐力低下

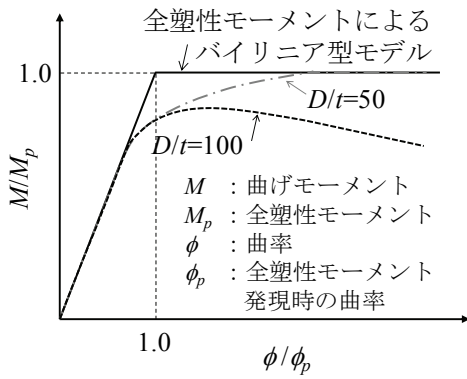


図-1 径厚比が異なる鋼管杭の耐力特性の概念図
(文献3)を修正)

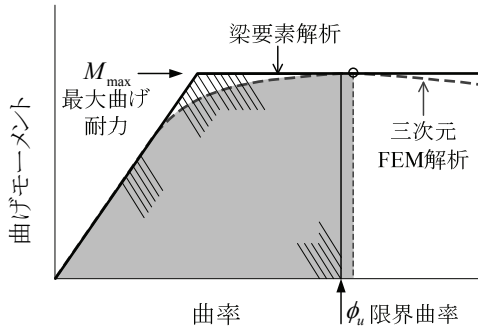


図-2 鋼管杭の M - ϕ 関係 (文献3)を修正)

が起これにくく、変形が進んでも耐力を保持することが期待できる。それゆえ、全塑性モーメントに基づく照査方法（以降、従来法と称する）では、条件によって耐力が過大評価となっている可能性があり、また、径厚比によって異なる限界曲率等の変形性能を考慮することができない。

(2) 径厚比を考慮した鋼管部材の新しいモデル化法^{3),4)}

提案法では、図-2に示すように三次元FEM解析より得られた M - ϕ 関係を、二次元有効応力解析で一般的に用いられている梁要素のバイリニア型で表現した。最大曲げ耐力 $M_{\max}$ を示すまでの下側部分の面積（着色部）を求め、バイリニア型（梁要素解析）で面積が等しくなる曲率 ϕ_u を限界曲率とした。

解析は、-10m程度の水深の直杭式横棧橋を対象として、鋼管杭は上部工から仮想固定点までのおおよその距離である20mの長さとした。杭の直径、板厚および軸力をパラメータに実施した三次元FEM解析の結果を安全側に説明できる最大曲げ耐力と限界曲率の算定式を求めた。

(3) M - N 曲面と限界曲率の算定式^{3),4)}

a) 最大曲げ耐力および限界曲率の算定式

微小変形理論に基づく梁要素において、鋼管杭の曲げモーメントと曲率の関係をバイリニア型で規定する場合、最大曲げ耐力は以下の式から算出できる。

$$M_{\max} = M_{p0}' \left[1 - \left(\frac{N}{N_{yc}'} \right)^n \right] \quad (N \geq 0) \quad (1a)$$

$$M_{\max} = M_{p0}' \left[1 - \left(\frac{N}{N_{yt}} \right)^{1.9} \right] \quad (N < 0) \quad (1b)$$

ここに、

$M_{\max}$: 最大曲げ耐力 (kN・m)

n : 軸力依存性を表すべき数

M_{p0}' : 軸圧縮方向の降伏応力低減を考慮した軸力ゼロ時の全塑性モーメント (kN・m)

N : 軸力 (圧縮が正值, kN)

N_{yc}' : 軸圧縮方向の降伏応力低減を考慮した降伏軸力 (正值, kN)

N_{yt} : 降伏軸力 (引張軸力) (負値, kN)

同様に、限界曲率は以下の式から算出できる。

$$\phi_u = \mu \phi_y' \quad (N \geq 0) \quad (2a)$$

$$\phi_u = \mu \phi_y \quad (N < 0) \quad (2b)$$

ここに、

ϕ_u : 最大曲げ耐力発現時の曲率 (1/m)

μ : 塑性率

ϕ_y : 降伏モーメントに対応する曲率 (1/m)

ϕ_y' : 軸圧縮方向の降伏応力低減を考慮した降伏モーメントに対応する曲率 (1/m)

記号の「'」(プライム)は、式(3)より算出できる径厚比に応じて低減した降伏応力を用いていることを表している⁵⁾。

$$\sigma_y' = \sigma_y (0.86 + 5.4t/D) \quad (3)$$

ここに、

σ_y' : 軸圧縮方向の降伏応力 (kN/m²)

σ_y : 降伏応力 (kN/m²)

最大曲げ耐力算定式の軸力依存性を表すべき数 n および塑性率 μ は、径厚比を用いて以下の式から算出できる。

$$n = \gamma (\alpha t/D + \beta) \quad (4)$$

$$\mu = \gamma (at/D + b) \quad (5)$$

ここに、

γ : 降伏応力に関する補正係数 ($= \sqrt{235/\sigma_y}$)⁶⁾

α, β : べき数 n のパラメータ

a, b : 塑性率 μ のパラメータ

b) 円形保持条件と有効部材長

三次元 FEM 解析は、図-3 に示す 2 つの境界条件で実

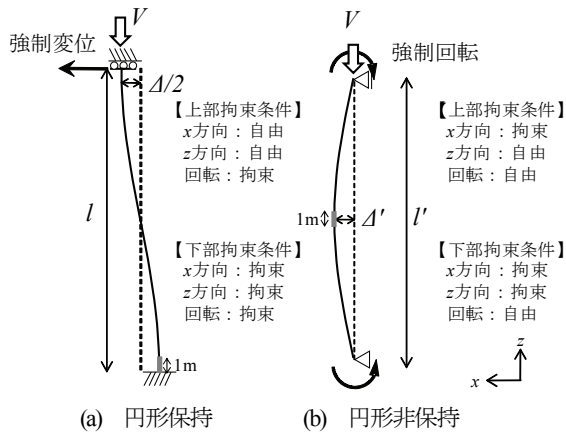


図-3 境界条件と円形断面の保持条件
(文献3)を修正)

表-1 べき数 n の算定式パラメータ³⁾

円形保持条件	α	β
円形保持	20	$-0.0095(l/r)+1.41$
円形非保持	10	$-0.0094(l/r)+1.45$

l : 有効部材長, r : 断面二次半径

表-2 塑性率 μ の算定式パラメータ³⁾

円形保持条件	a	b
円形保持	$-1.24(l/r)+209$	$-0.0119(l/r)+1.46$
円形非保持	$-4.72(l/r)+440$	$0.0413(l/r)-2.55$

l : 有効部材長, r : 断面二次半径

施した。これは、局部座屈が発生するまで鋼管杭の断面が保持される円形保持の条件と、地盤の強度が十分でなく円形断面が楕円化して局部座屈の発生が早くなる円形非保持の条件の2つの円形断面の保持条件を想定したものである。そのため、検討対象の鋼管杭の円形保持条件を設定し、条件に対応した算定式パラメータを選ぶ必要がある。例えば、直杭式横棧橋を対象とした場合、図-4に示すように上部工下端から海面（または、被覆防食部）までを円形保持条件、その他は、円形非保持条件とすることができる。

表-1 および表-2 に算定式パラメータを示す。各パラメータには細長比 l/r が含まれているが、 l は有効座屈長ではなく有効部材長であり、モーメント分布を考慮して設定する必要がある。例えば、直杭式横棧橋を対象とした場合、図-4に示すように有効部材長 l は上部工下端から仮想固定点までの距離とすることができる。

なお、提案法を各種港湾施設へ適用するため、施設毎の荷重・境界条件に合わせた算定式が提案されている⁷⁾。例えば、鋼管矢板式岸壁や矢板式岸壁の控え直杭のように軸力が作用しない場合には、最大曲げ耐力、限界曲率ともに l/r に関係ない算定式となることがわかった。

c) 従来法との比較

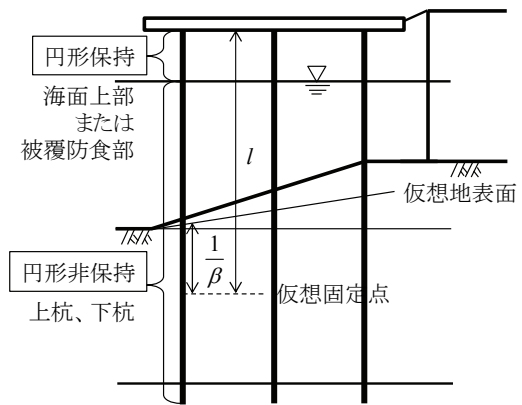


図-4 $M-N$ 曲面に関する説明図 (文献3)を修正
(軸力 N は圧縮が正值, 引張が負値)

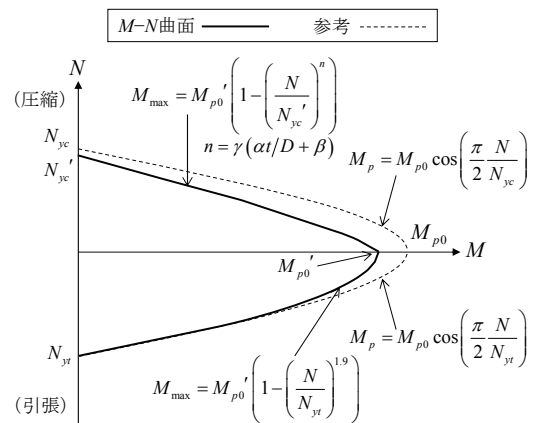


図-5 $M-N$ 曲面に関する説明図 (文献3)を修正
(軸力 N は圧縮が正值, 引張が負値)

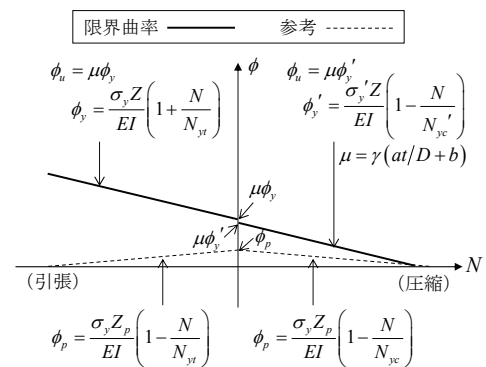


図-6 限界曲率に関する説明図 (文献3)を修正
(軸力 N は圧縮が正值, 引張が負値)

曲げモーメントと軸力の関係 ($M-N$ 曲面) の説明図を図-5に示す。提案法の $M-N$ 曲面は、余弦関数で軸力の影響を考慮する従来法の $M-N$ 曲面⁸⁾ (図中破線) よりも内側に位置する。

限界曲率と軸力の関係の説明図を図-6に示す。鋼管の引張応力が作用する側の断面では局部座屈が生じないため、引張軸力が増えるほど限界曲率は大きくなる。そのため、圧縮軸力と同様に引張軸力の増加とともに全塑性モーメントの相当曲率が減少する従来法 (図中破線) とは傾向が異なる。

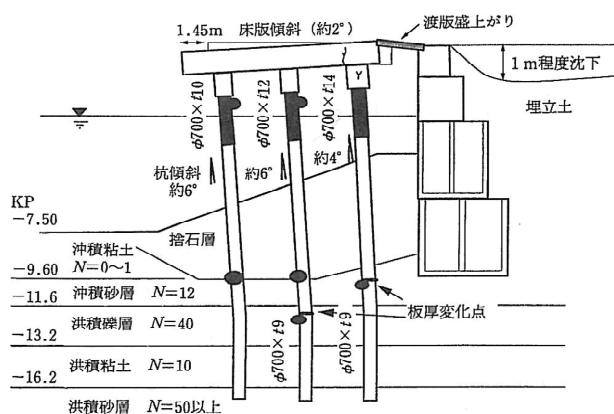


図-7 対象とする直杭式横棧橋の被災状況⁹⁾

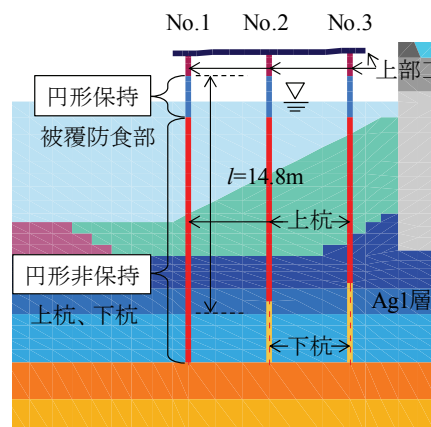


図-9 円形保持条件と有効部材長の設定

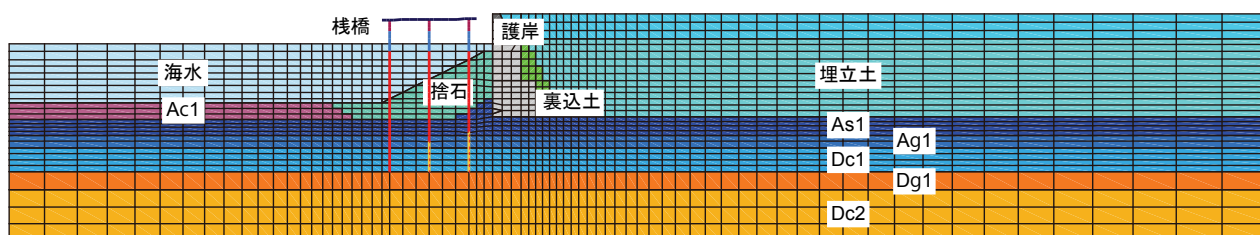


図-8 有限要素モデル図

3. 地震被害を受けた直杭式横棧橋の再現解析

(1) 検討対象の被災状況

検討の対象は、1995年兵庫県南部地震の際に被災した直杭式横棧橋とした。当該事例は、被災後に鋼管杭の引き抜き調査が実施され、鋼管の損傷状況の確認が行われた数少ない事例である。図-7に棧橋断面の概略図として、地層区分、鋼管杭の配置および被災状況を示す。棧橋は3列の杭径700mmの鋼管杭で構成され、海側杭の板厚が10mm、中間杭が12mm、陸側杭が14mm、杭長は19.5mで、中間杭と陸側杭は先端部で板厚が9mmに変化している。被災後には鋼管杭の引き抜き調査の結果、杭頭および地中部で座屈が発生していたことが確認された⁹⁾。

模型実験や数値解析による検討より、棧橋の被災メカニズムは、護岸背後の埋立土層と沖積砂層の過剰間隙水圧の上昇に伴い、護岸が棧橋と捨石層を押し出したことにより、棧橋が海側へ1.5m程度変位し、地中部で鋼管が座屈したものと推定されている^{例えは⁹⁾}。

(2) 解析条件

本検討の地震応答解析は、港湾構造物の耐震性能照査で実績がある解析コードFLIP¹⁰⁾を用いた二次元有効応力解析である。解析の諸条件は、棧橋の残留水平変位とともに鋼管杭の座屈位置を再現できた事例¹¹⁾を参考とした。杭を梁要素、地盤を平面要素でモデル化し、杭と地盤の相互作用は相互作用ばね要素¹²⁾により考慮した。地層区

分を記した有限要素モデル図を図-8、地盤のパラメータを表-3に示す。

従来法と提案法に必要な鋼管杭のパラメータを表-4に示す。全塑性モーメントと比較して、提案法の最大曲げ耐力が最も減少した杭は中間杭下杭(φ700t9)で、耐力は7%減少した。また、塑性率が最も増加した杭は陸側杭被覆部(φ700t14)で、全塑性モーメントと降伏モーメントの発現時の曲率の比1.3と比べて2.5倍増加した。

図-9に円形保持条件と有効部材長の設定の概要を示す。円形保持条件は被覆防食部のみとして、その他は円形非保持条件とした。また、実被害では局部座屈が発生した最深部がAg1層であることから、有効部材長は上部工下端からAg1層下端までの14.8mとした。

入力地震波は、1995年兵庫県南部地震の際にポートアイランドの鉛直アレーで記録された、工学基盤位置(GL-83m)の波形で、水平および鉛直成分を2方向同時入力とした(図-10参照)。

(3) 解析結果

棧橋上部工の水平変位時刻歴を図-11に示す。棧橋上部工の残留水平変位は1.54mとなり、当該棧橋の実際の変位が1.5m程度であったため、被災状況と整合が取れた結果である。全塑性モーメントに基づく従来法を用いた再現解析の結果¹³⁾が1.58mであるため、杭のモデル化法によって上部工の変位が大きく変わらないことが分かった。

表-3 地盤のパラメータ (文献11)を修正)

土層名	密度	間隙率	変形特性					液状化特性						
			せん断 弾性係数	基準 拘束圧	内部 摩擦角	粘着力	最大 減衰比	変相角	液状化パラメータ					
	ρ (t/m ³)	n (-)	G_{uv} (kN/m ²)	σ'_{uv} (kN/m ²)	ϕ (deg)	c (kN/m ²)	h_{max} (-)	ϕ (deg)	w_1 (-)	p_1 (-)	p_2 (-)	c_1 (-)	S_1 (-)	S_{δ} (kN/m ²)
埋立土	1.80	0.45	65840	98.0	38.9	0	0.24	28	6.0	0.5	0.980	1.80	0.005	-
裏込土	2.00	0.45	180000	98.0	35.0	20	0.24	-	-	-	-	-	-	-
捨石	2.00	0.45	180000	98.0	35.0	20	0.24	-	-	-	-	-	-	-
Ac1	1.50	0.67	3750	5.0	25.0	0	0.20	-	-	-	-	-	-	-
As1	1.80	0.45	111900	98.0	40.7	0	0.24	28	20.0	0.5	0.764	1.00	0.005	-
Ag1	2.00	0.45	226500	98.0	44.4	0	0.24	28	21.2	0.5	0.281	14.67	0.005	200
Dc1	1.90	0.44	51000	43.4	0.0	150	0.20	-	-	-	-	-	-	-
Dg1	2.00	0.45	228200	98.0	44.5	0	0.24	28	21.4	0.5	0.270	14.67	0.005	-
Dc2	1.70	0.55	34000	86.4	0.0	100	0.20	-	-	-	-	-	-	-

表-4 鋼管杭のパラメータ

		海側杭		中間杭			陸側杭		
		被覆部 (+1.6m~ -1.0m)	上杭 (-1.0m~ -16.2m)	被覆部 (+1.6m~ -1.0m)	上杭 (-1.0m~ -12.4m)	下杭 (-12.4m~ -16.2m)	被覆部 (+1.6m~ -1.0m)	上杭 (-1.0m~ -12.4m)	下杭 (-12.4m~ -16.2m)
外径	D (mm)	700	700	700	700	700	700	700	700
板厚	t (mm)	10	10	12	12	9	14	14	9
径厚比	D/t (-)	70	70	58	58	78	50	50	78
降伏応力	σ_y (N/mm ²)	296	296	296	296	296	296	296	296
降伏軸力	N_y (kN)	6420	6420	7680	7680	5780	8930	8930	5780
全塑性モーメント	M_{p0} (kN-m)	1410	1410	1680	1680	1270	1950	1950	1270
降伏応力(補正後)	σ'_y (N/mm ²)	277	277	282	282	275	287	287	275
降伏軸力(圧縮側)	N_{yc} (kN)	6010	6010	7310	7310	5370	8650	8650	5370
最大曲げ耐力	M_{mx0} (kN-m)	1320	1320	1600	1600	1180	1890	1890	1180
細長比	l/r (-)	60.7	60.7	60.8	60.8	60.6	61.0	61.0	60.6
円形保持条件	(-)	円形保持	円形非保持	円形保持	円形非保持	円形非保持	円形保持	円形非保持	円形非保持
$M-N$ 曲面の 軸力依存べき数	n (-)	1.00	0.91	1.05	0.94	0.90	1.10	0.96	0.90
塑性率	μ (-)	2.36	1.92	2.70	2.30	1.72	3.03	2.68	1.72

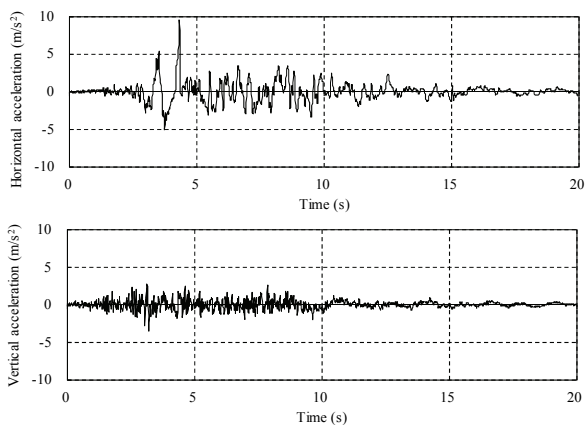


図-10 入力地震波 (上: 水平, 下: 鉛直)

残留変形図と過剰間隙水圧比の時間最大値の分布図を、それぞれ図-12および図-13に示す。護岸背後の埋土は、過剰間隙水圧比が1となり液状化が発生した。また、As1層においても過剰間隙水圧比が0.8程度まで上昇し、せん断抵抗が小さくなっている。護岸は海側へ大きく変位

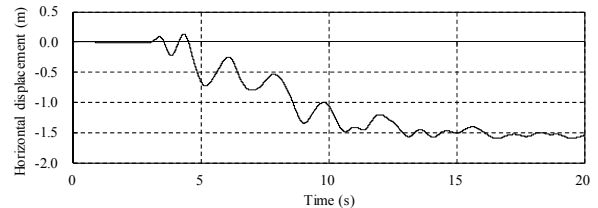


図-11 栈橋上部工の水平変位

し、栈橋を押し出す変形モードとなっている。杭の変形を見ると、過剰間隙水圧が上昇しているAs1層から変形が生じている。

杭に発生した曲率と、曲率を限界曲率で除した曲率比の全計算時間中で発生した最大値の深度分布図を図-14に示す。曲率比分布より、全ての杭で杭頭と地中部で限界曲率を超え、塑性ヒンジが発生した。地中部の詳細を見ると、海側杭および中間杭では捨石下部で限界曲率を超え、中間杭と陸側杭では、板厚変化点でも限界曲率を超えた。このような限界曲率を超過した位置は、被災状況(図-7)と一致している。

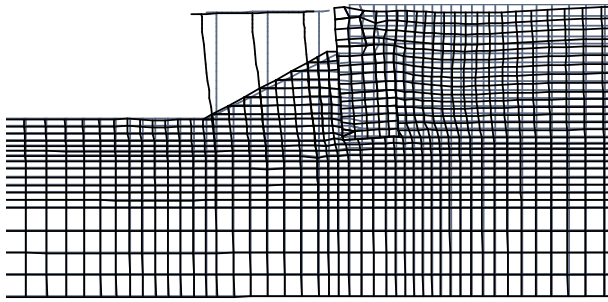


図-12 残留変形図（変形倍率1倍）

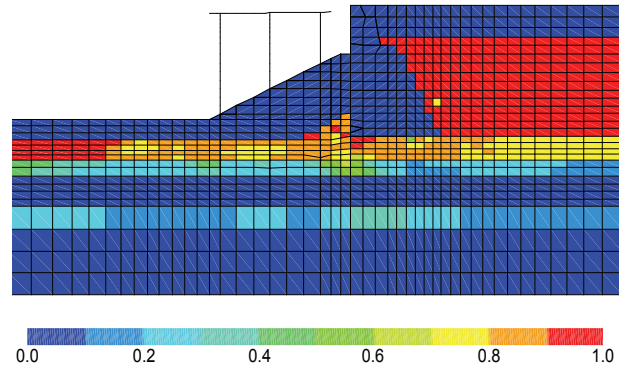


図-13 過剰間隙水圧比の時間最大値分布図

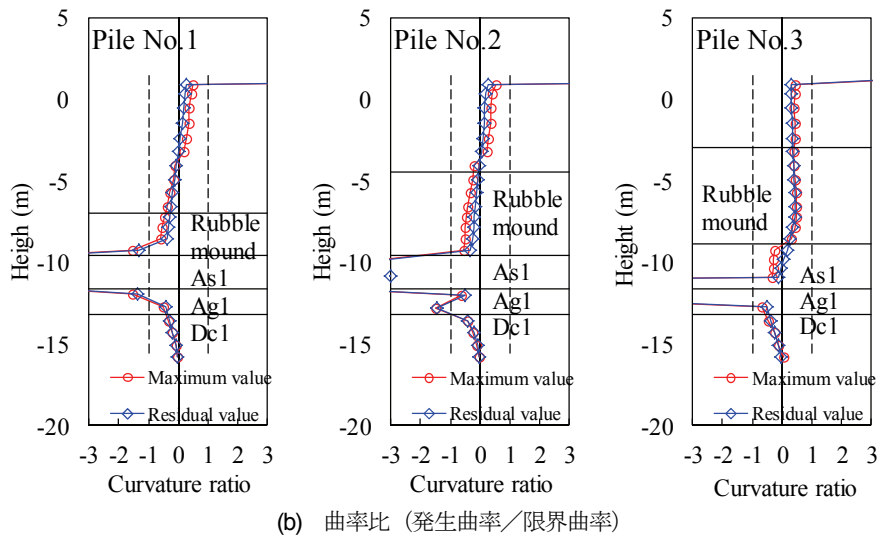
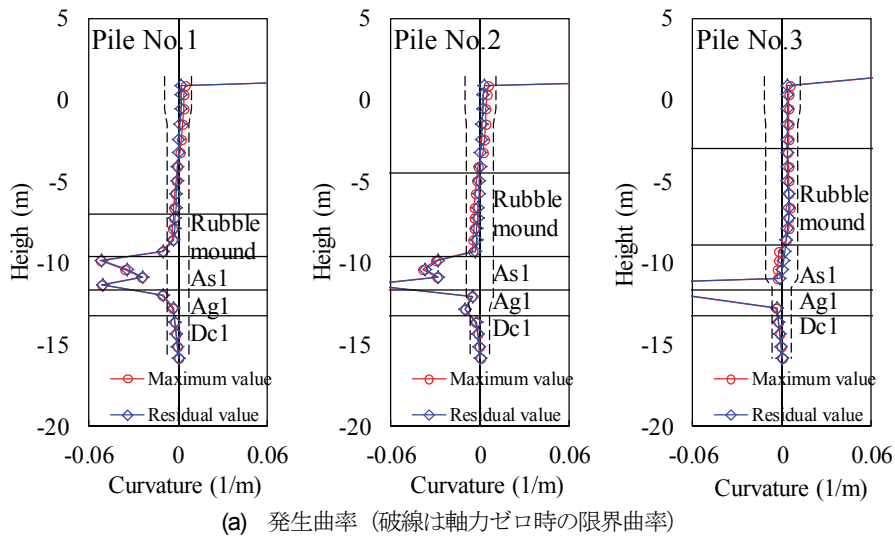


図-14 曲率の深度分布図（時間最大値）

従来法の結果¹⁴⁾と比べると、提案法の結果は限界曲率を超過する範囲が局所化する傾向が見られた。中間杭においては、従来法の結果は捨石下端（As1層～Ag1層）の広い範囲で限界曲率を超過した。一方、提案法の結果は、捨石下端と板厚変化点において2カ所で限界曲率を超過し、被災状況をより精度高く再現したと考えられる。

4. おわりに

本研究では、局部座屈が発生する鋼管部材の径厚比に応じた耐荷性能および変形性能の評価が可能なモデル化法の適用性を確認することを目的に、1995年兵庫県南部

地震の際に被害を受けた神戸港の直杭式横棧橋を対象とした再現解析を実施した。その結果、棧橋の残留変位、鋼管杭に発生した局部座屈の発生状況について、被災状況と整合する結果を得た。全塑性モーメントに基づく従来法を用いた再現解析と比べると、棧橋の残留変位はほぼ同じであるが、杭の発生曲率の分布は提案法の方が被災状況を精度高く再現した。

謝辞：本研究は、港湾空港技術研究所と鋼管杭・鋼矢板技術協会との平成28年度共同研究「港湾構造物における耐震設計手法の研究」および平成29年度共同研究「鋼管杭・鋼管矢板に関する耐震設計手法の研究」の研究成果をもとに実施した。関係各位に対して、ここに記して心からの謝意を表する。

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，2007.
- 2) 岸田英明，高野昭信：鋼管杭の座屈と端部補強，日本建築学会論文報告集，No.213，pp.29-38，1973.
- 3) 大矢陽介，塩崎禎郎，小濱英司，川端雄一郎：耐震性能照査における鋼管部材のモデル化法の提案，港湾空港技術研究所報告，Vol.56，No.2，pp.3-33，2017.
- 4) 塩崎禎郎，大矢陽介，小濱英司，川端雄一郎：局部座屈を考慮した鋼管杭の $M-\phi$ 関係について，第42回海洋開発シンポジウム講演集，論文番号 58，6pp.，2017.
- 5) 岸田英明，高野昭信：鋼管杭の座屈と端部補強，日本建築学会論文報告集，No.213，pp.29-38，1973.
- 6) 塩崎禎郎，大矢陽介，小濱英司，川端雄一郎：局部座屈を考慮した鋼管杭の $M-\phi$ 関係について，第42回海洋開発シンポジウム講演集，2017.
- 7) 塩崎禎郎，大矢陽介，小濱英司：局部座屈を考慮した高強度鋼管杭の $M-\phi$ 関係について，第37回地震工学研究発表会講演論文集，2017.（投稿中）
- 8) 日本建築学会：鋼構造塑性設計指針，丸善出版，212pp.，2011.
- 9) 南兼一郎，高橋邦夫，横田弘，園山哲夫，川端規之，関口宏二：神戸港 T 棧橋の地震被害状況と静的および動的解析，基礎工，Vol.25，No.9，pp.112-119，1997.
- 10) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
- 11) 塩崎禎郎，長尾毅，小堤治，宮下健一郎：局部座屈を考慮した直杭式横棧橋の二次元有効応力解析，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.71，No.4，pp.I 537-I 546，2015.
- 12) 小堤治，溜幸生，岡由剛，井合進，梅木康之：二次元有効応力解析における杭一液状化地盤の動的相互作用のモデル化，土木学会第58回年次学術講演会梗概集，第Ⅲ部門，pp.569-570，2003.
- 13) 塩崎禎郎，長尾毅，宮下健一郎，小堤治：直杭式横棧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.573-578，2007.

REPRODUCTION ANALYSIS OF EARTHQUAKE DAMAGE OF OPEN-TYPE WHARVES ON VERTICAL PILES USING MODELING CONSIDERING DIAMETER-TO-THICKNESS RATIO OF STEEL PIPE

Yousuke OHYA, Yoshio SHIOZAKI and Eiji KOHAMA

Authors proposed the modeling of the steel pipe for the seismic performance verification for pile-supported wharves against the level II design ground motion. The proposed method can evaluate the load-bearing capacity and the deformation performance of the steel pipe, where local buckling occurred. In this study, for verification, we performed a reproduction analysis of the open-type wharves on vertical piles in the Port of Kobe, which was damaged during the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake. The results showed that the plastic hinge occurrence in the steel pipe piles and the residual deformation of the open-type wharves on vertical piles were consistent with the actual damage.