

降伏応力 450MPa 超えの高強度鋼管杭の 港湾構造への適用に向けた検討

塩崎 禎郎¹・大矢 陽介²・小濱 英司³

¹ 正会員 JFE スチール株式会社 (〒210-0855 神奈川県川崎市川崎区南渡田町 1-1)
E-mail: y-shiozaki@jfe-steel.co.jp (Corresponding Author)

² 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@p.mpat.go.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@p.mpat.go.jp

港湾の鋼管杭式栈橋の設計条件は、載荷重や地震力の増大等の影響で厳しくなる傾向にあり、降伏応力 450MPa の高強度鋼管杭を用いても設計が容易に成立しないことがある。そこで、さらに降伏応力が高い鋼管杭（降伏応力 500MPa, 700MPa）を、港湾構造物へ適用するための検討を行い、以下の結論を得た。1) 鋼管杭の正負交番載荷実験を行い、設計が必要となる耐力と変形性能を満足することを確認した。2) 設計用の曲げモーメントー曲率関係と限界曲率は、降伏応力 450MPa 以下で設定された式を、700MPa まで拡張できることを FEM 解析で明らかにした。

Key Words: high-strength steel pipe pile, seismic response analysis, moment-curvature relationship, pile-supported wharf

1. はじめに

港湾分野における鋼管杭式栈橋の設計条件は、船舶の大型化や、載荷重、地震力の増大等の影響で厳しくなる傾向にある。そのため、設計条件によっては、降伏応力 450MPa（SM570 相当）の高強度鋼管杭を用いても設計が容易に成立しないことがある。

降伏応力 450MPa を超える鋼管杭に関しては、国内では 1980 年代の後半から単杭ドルフィン向けに降伏応力 685MPa の鋼管杭の適用が検討され¹⁾、1990 年代に 1 件の建設事例²⁾がある（図-1 参照）。欧州では降伏応力 485MPa の鋼管杭・鋼管矢板の適用が進められ³⁾、北米では降伏応力 690MPa の鋼管杭が橋梁基礎の防衛工として実用化されている（図-2 参照）⁴⁾。

このように、降伏応力 450MPa を超える鋼管杭を港湾構造物に適用できれば、設計の自由度が高まり、地中部での損傷を限定するなど、修復性の高い設計が可能となる。そこで、降伏応力 500MPa および 700MPa の橋梁用高降伏点鋼（JIS G 3140 の SBHS500 および SBHS700）と同等の機械的性質を有する鋼管杭を、港湾分野へ適用する

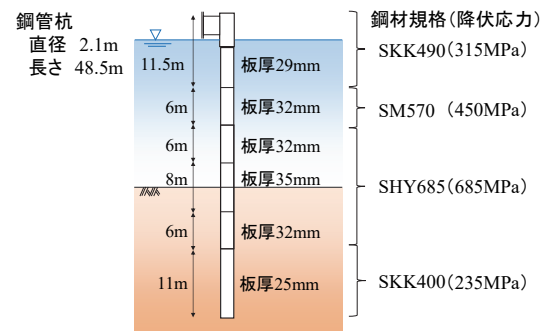


図-1 降伏応力 685MPa の鋼管杭を用いた単杭ドルフィン

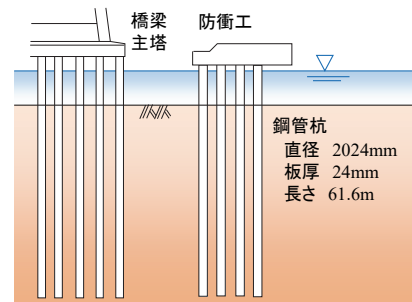
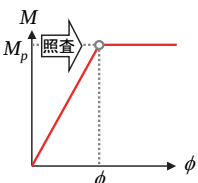


図-2 降伏応力 690MPa の鋼管杭を用いた防衛工

表-1 鋼管部材のモデル化と照査方法

旧基準	新基準	【記号の説明】															
 【全塑性モーメント】 $M_p = M_{p0} \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{N}{N_{yc}}\right)$ 【M_p時の曲率】 $\phi_p = \frac{\sigma_y Z_p}{EI} \left(1 - \frac{N}{N_{yc}}\right)$ ※ 圧縮も引張も同じ式を使う	【最大曲げ耐力】 $M_{\max} = M_{p0}' \left(1 - \left(\frac{N}{N_{yc}}\right)^n\right)$ ＜圧縮時＞$n = \gamma(\alpha t/D + \beta)$ ＜引張時＞$n = 1.9$ 【限界曲率】 ＜圧縮時＞$\phi_u = \mu \phi_y'$ $\phi_y' = \frac{\sigma_y' Z}{EI} \left(1 - \frac{N}{N_{yc}}\right)$ ＜引張時＞$\phi_u = \mu \phi_y$ $\phi_y = \frac{\sigma_y Z}{EI} \left(1 + \frac{N}{N_{yt}}\right)$ $\mu = \gamma(\alpha t/D + b)$ 【降伏応力の補正】$\gamma = \sqrt{235/\sigma_y}$	σ_y: 降伏応力 σ_y': 軸圧縮方向の降伏応力 $\sigma_y' = \sigma_y (0.86 + 5.4t/D)$ 「γ」は、低減後の降伏応力を用いていることを表す M_{p0}: 軸力ゼロ時の全塑性モーメント N_{yc}: 圧縮降伏軸力 N_{yt}: 引張降伏軸力 EI: 剛性 Z: 断面係数 Z_p: 塑性断面係数 l: 有効部材長 r: 断面二次半径 α, β, a, b: パラメータ <table><tr><th></th><th>α</th><th>β</th><th>a</th><th>b</th></tr><tr><td>円形保持</td><td>20</td><td>-0.0095l/r +1.41</td><td>-1.24l/r +209</td><td>-0.0119l/r +1.46</td></tr><tr><td>円形非保持</td><td>10</td><td>-0.0094l/r +1.45</td><td>-4.72l/r +440</td><td>0.0413l/r -2.55</td></tr></table>		α	β	a	b	円形保持	20	-0.0095l/r +1.41	-1.24l/r +209	-0.0119l/r +1.46	円形非保持	10	-0.0094l/r +1.45	-4.72l/r +440	0.0413l/r -2.55
	α	β	a	b													
円形保持	20	-0.0095l/r +1.41	-1.24l/r +209	-0.0119l/r +1.46													
円形非保持	10	-0.0094l/r +1.45	-4.72l/r +440	0.0413l/r -2.55													

ための検討を行った。以降、本論文では、SBHS500 鋼管杭、SBHS700 鋼管杭と表記する。具体的な実施内容は次の 4 項目である。

- 1)SBHS500 鋼管杭、SBHS700 鋼管杭の耐荷力性能（耐力および変形性能）確認実験
- 2)実験の再現解析で、設計法構築で用いる FEM 解析の妥当性を検証
- 3)設計で用いる鋼管杭の曲げモーメントー曲率（以降 $M-\phi$ と表記）関係と、限界曲率の設定
- 4)栈橋への適用検討

なお、SBHS500 鋼管杭は、SM570 鋼管杭と同様に塑性化後の性能を考慮した使い方を目指し、SBHS700 鋼管杭は、建築分野と同様に弾性範囲内の使い方を念頭に置いている。

2. レベル 2 地震を対象とした鋼管部材の設計法

港湾構造物のレベル 2 地震に対する耐震設計は、液状化にともなう地盤の変形を考慮した設計が求められ、設計実務では「液状化による構造物被害予測プログラム FLIP[®]」を用いた地震応答解析で検討が行われている。鋼管杭式栈橋に関する主な照査項目は、地震後の残留変形量と鋼管杭の損傷程度で、いずれも規定値以下となるように設計している。

2018 年に改定された基準⁷⁾では、鋼管杭の性能照査は、地盤の変形照査と相性の良い曲率照査に改定された。この手法（新基準と記載）の概要を、改定前の設計手法（旧基準と記載）と比較して表-1 で説明する^{8)~10)}。旧基準は全塑性モーメント M_p への到達の有無を照査していたが、新基準では限界曲率 ϕ_u への到達の照査に変更された。新基準の $M-\phi$ 関係は、最大曲げ耐力 $M_{\max}$ と限界曲率 ϕ_u で規定され、1)径厚比 D/t 、2)細長比 l/r 、3)円形保持条件（鋼管杭が円形形状を保持できる境界条件か）、

表-2 橋梁用高降伏点鋼の化学成分

名称	合金元素									炭素当量	溶接割れ感受性組成
	C	Si	Mn	P	S	Mo	V	B	N		
SM570 (参考)	0.18 以下	0.55 以下	1.70 以下	0.035 以下	0.035 以下					0.44 以下 (t≤50)	0.28 以下 (t≤50)
SBHS 500	0.11 以下	0.55 以下	2.00 以下	0.020 以下	0.006 以下						0.20 以下
SBHS 700	0.11 以下	0.55 以下	2.00 以下	0.015 以下	0.006 以下	0.60 以下	0.05 以下	0.005 以下	0.006 以下		0.30 以下 (t≤50)

(単位: %)

表-3 橋梁用高降伏点鋼の機械的性質

名称	降伏点または耐力 MPa	引張強さ MPa	伸び			シャルピー吸収エネルギー	
			厚さ mm	試験片	%	試験温度 °C	吸収エネルギー J
SM570 (参考)	460 以上 (t≤16mm) 450 以上 (16mm<t≤40mm)	570~720	16 以下	5号	19 以上	-5	47 以上*
			16 を超えるもの	5号	26 以上		
			20 を超えるもの	4号	20 以上		
SBHS500	500 以上	570~720	6 以上 16 以下	5号	19 以上	-5	100 以上**
			16 を超えるもの	5号	26 以上		
			20 を超えるもの	4号	20 以上		
SBHS700	700 以上	780~930	6 以上 16 以下	5号	16 以上	-40	100 以上**
			16 を超えるもの	5号	24 以上		
			20 を超えるもの	4号	16 以上		

※ 試験片: Vノッチ, 試験片採取方向: 圧延方向
 ※※ 試験片: Vノッチ, 試験片採取方向: 圧延直角方向

4)軸力比、5)降伏応力がパラメータとなる。最大曲げ耐力 $M_{\max}$ は、全塑性モーメント M_p よりも小さな値となるが、局部座屈による耐力低下と、微小変形解析に基づく FLIP では考慮できない付加曲げモーメントを差引いているためである。最大曲げ耐力の軸力依存を規定する「べき数 n 」と、限界曲率 ϕ_u を規定する塑性率 μ のパラメータは、港湾施設の種類の違いに応じて設定している¹¹⁾。

3. SBHS500 鋼管杭と SBHS700 鋼管杭の耐荷力性能

(1) SBHS500 鋼管杭と SBHS700 鋼管杭の規格

鋼管杭の JIS 規格 (JIS A 5525) では、SKK400 (引張強

度 400MPa) と SKK490 (引張強度 490MPa) が規格化されている。それ以上の強度の JIS 規格は存在しないが、溶接構造用圧延鋼材(JIS G 3106)の SM570 相当 (引張強度 570MPa) の機械的性質を満足する SM570 鋼管杭がある。港湾分野へ適用にあたり、耐荷力性能や防食性能など種々の検討がなされ¹²⁾、設計法が構築された¹⁰⁾。近年では、鋼管杭式栈橋をはじめ、鋼管矢板岸壁や防潮堤基礎などへの採用が広がり、実績が増えている。

本論文では、さらに強度が高い橋梁用高降伏点鋼板 (JIS G 3140) 相当の鋼管杭を適用するための検討を行う。橋梁用高降伏点鋼の化学成分と機械的性質を SM570 と比較して、それぞれ表-2、表-3 に示す。

耐荷力性能の把握のための載荷実験で用いる鋼管杭を、冷間成型および拡管による工程にて造管した。鋼管杭の直径は 558.8mm、板厚 14mm である。造管後に行った機械的性質の試験結果を表-4 に示す。

(2) 耐荷力性能の把握のための載荷実験

a) 実験方法

SBHS500 鋼管杭と SBHS700 鋼管杭の地震時の耐荷力性能を把握するため、試作した鋼管杭を用いて正負交番載荷実験を行った。実験断面図を図-3 に示す。軸力 2110kN を与えた状態で、図-4 に示す各サイクル 3 回繰り返しの正負交番載荷を行った。降伏変位 δ_y は文献¹³⁾ になり、式(1)、式(2)で決定した (表-5 参照)。ヤング率 E と降伏応力 σ_y は、鋼管軸方向から切り出した試験片 (JIS12 号 C) の引張試験の結果を用いた。

$$\delta_y = \frac{P_y h^3}{3EI} \quad (1)$$

$$P_y = \left(\sigma_y - \frac{N}{A} \right) \frac{Z}{h} \quad (2)$$

ここで、 P_y ：降伏水平荷重、 h ：供試体基部から水平載荷点までの載荷高さ、 EI ：曲げ剛性、 σ_y ：降伏応力、 N ：軸力、 A ：供試体断面積、 Z ：供試体断面係数。

水平載荷時には、ベースプレートの滑りや回転、ベースプレートと鋼管の基部の回転が生じる。変位の計測は、載荷フレームから独立した支柱に変位計を固定することを基本としているが、実験の制御用水平変位は、ベースプレートの滑りと回転の影響を少なくするため、ベースプレート上の設置したフレームに固定した DH25 の値を用いた。SBHS500 鋼管杭に対する載荷は、それぞれのサイクルの載荷時の最大荷重がピーク荷重の 80% を下回った時点で終了した。また、SBHS700 鋼管杭に対する載荷は、明らかに塑性化が生じたサイクルで載荷を終了した。

b) 実験結果の評価のための目標値の設定

正負交番載荷実験の目標値 (水平荷重および水平変位) は、図-5 に示す非線形梁要素を用いた片持ち梁の解析で

表-4 実験用鋼管杭の機械的性質の試験結果

名称	降伏点または耐力※ MPa	引張強さ※ MPa	伸び※ %	シャルピー 吸収エネルギー※※	
				試験温度 ℃	吸収エネルギー J
SBHS500	561	662	34	-5	475
SBHS700	757	881	25	-40	242

※ 軸直角方向

※※ 試験片:Vノッチ, 試験片採取方向:軸直角方向, 3個平均の値

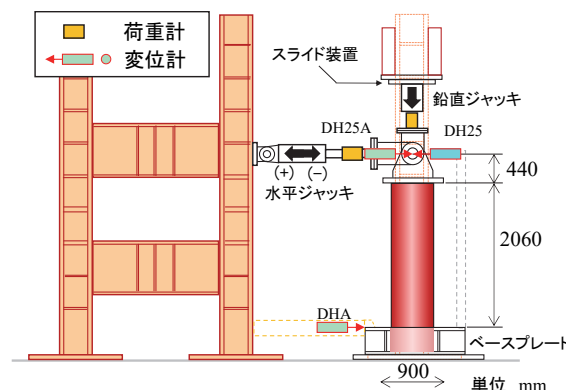


図-3 正負交番実験断面図

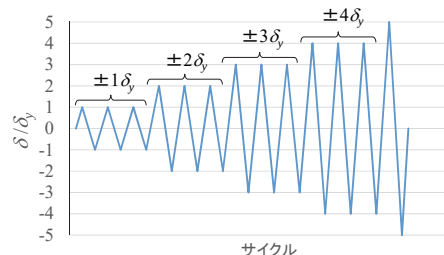


図-4 水平載荷サイクル

表-5 水平載荷で用いる降伏変位 δ_y

	SBHS500	SBHS700
直径 (mm)	558.8	558.8
板厚 (mm)	14	14
降伏応力 σ_y (MPa)	586	799
ヤング率 E (Gpa)	204	206
軸力 N (kN)	2110	2110
載荷高さ h (mm)	2500	2500
降伏水平荷重 P_y (kN)	634	905
降伏変位 δ_y (mm)	18.2	25.7

求めた。解析定数は表-1 の新基準の設計式で設定した。この設計式は、降伏応力の上限を 450MPa として構築されたものであるが、それ以上の降伏応力に対しても準用できるものと仮定した。また、実験は片持ち梁であるため、有効部材長は実験の載荷高さの 2 倍とした。梁要素の解析定数と実験の目標値を表-6 に示す。SBHS500 鋼管杭の限界曲率 ϕ_l 到達時の水平変位は 39.1mm, SBHS700 鋼管杭の限界曲率 ϕ_l 到達時の水平変位は 50.1mm である。

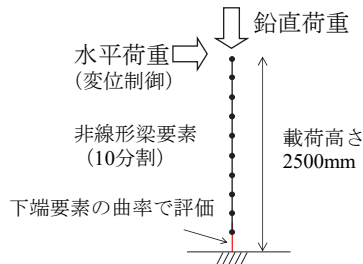


図-5 非線形梁要素を用いた片持ち梁の解析

表-6 実験の評価のための目標値

	SBHS500	SBHS700
円形保持・非保持	円形保持	円形保持
有効部材長 (mm)	5000	5000
降伏応力 σ_y (MPa)	586	799
応力補正係数	0.633	0.542
最大曲げ耐力 M_{max} (kNm)	2420	3310
べき数 n	1.05	0.90
塑性率 μ	3.53	3.03
降伏曲率 ϕ_y' (1/m)	0.00869	0.0123
ϕ_y' 時水平変位 (mm)	20.8	29.4
ϕ_y' 時水平荷重 (kN)	662	947
限界曲率 ϕ_u (1/m)	0.0307	0.0372
ϕ_u 時水平変位 (mm)	39.1	50.1
ϕ_u 時水平荷重 (kN)	884	1200

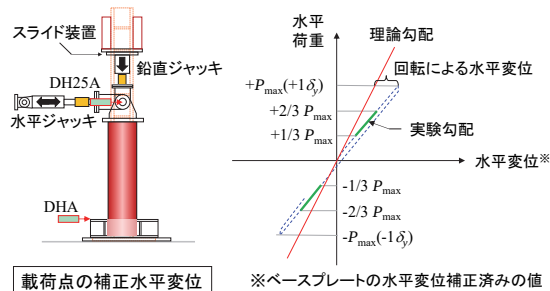


図-6 水平変位の補正方法

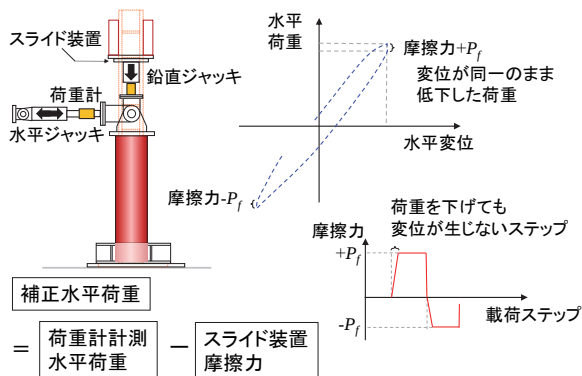


図-7 水平荷重の補正方法

c) 実験結果の整理と評価

実験結果の整理は、鋼管供試体部分に作用した実質の変位と荷重を求めるため、図-6および図-7に示す手順で補正を行った。載荷点の水平変位は、ベースプレートの

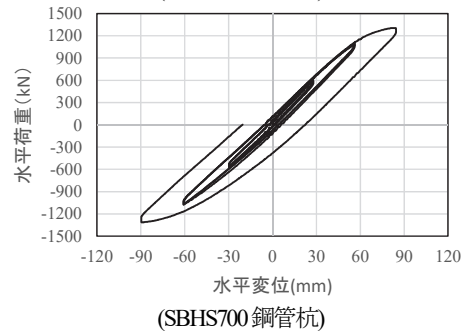
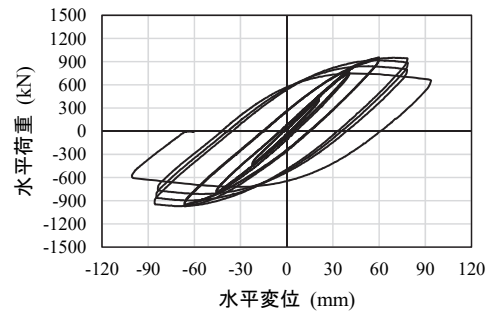


図-8 水平荷重と水平変位の関係（補正前）

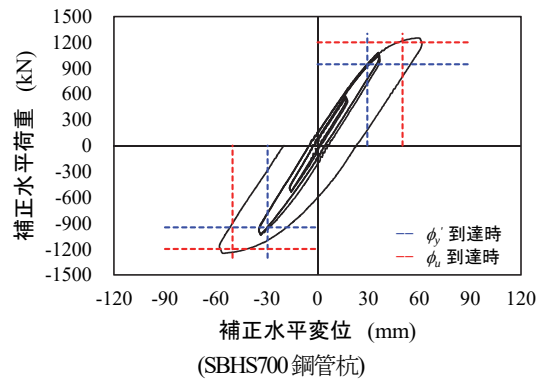
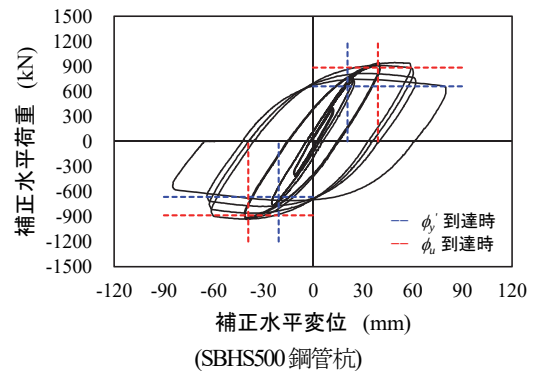


図-9 水平荷重と水平変位の関係（補正後）

水平方向の滑りと、ベースプレートの回転（鋼管基部の回転を含む）による変位を取り除く補正を行った。回転による水平変位は、鋼管下部を固定としたシェル要素による FEM 解析で理論勾配を求め、実験勾配との差から算出した。水平荷重に関しては、載荷方向反転時に、荷重を下げても変位が変わらないステップがあり、その荷重をスライド装置の摩擦力として差し引くことにした。

実験の水平方向載荷点の荷重と変位の関係に関して、

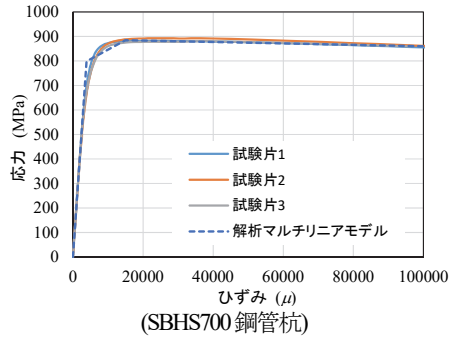
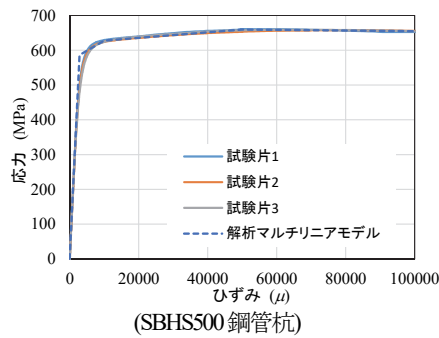


図-10 応力-ひずみ関係

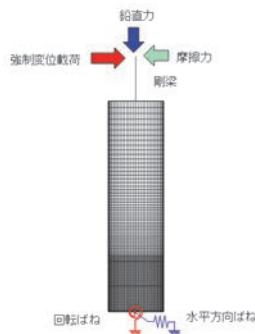


図-11 解析モデル

表-7 解析設定

	設定
使用要素	4 節点シェル要素
材料非線形 (応力-ひずみ関係)	マルチリニア型 移動硬化則 Von Misesの降伏条件
幾何学的非線形	Updated Lagrangian
収束計算	Full Newton method

表-8 回転ばね値

	SBHS500	SBHS700
回転ばね (+ 載荷方向)	3.07×10^{11}	3.45×10^{11}
回転ばね (- 載荷方向)	-2.48×10^{11}	-2.59×10^{11}

単位: Nmm/rad

補正前の値を図-8に、補正後の値を図-9に示す。図-9には、表-1の設計式に基づき非線形梁要素の片持ち梁の解析で求めた目標値を点線で示している。降伏曲率 ϕ 到達時の水平変位において、水平荷重の実験値は、水平荷重の目標値と同等 (SBHS700 鋼管杭) ないし同等以上 (SBHS500 鋼管杭) の値となっている。また、限界曲率

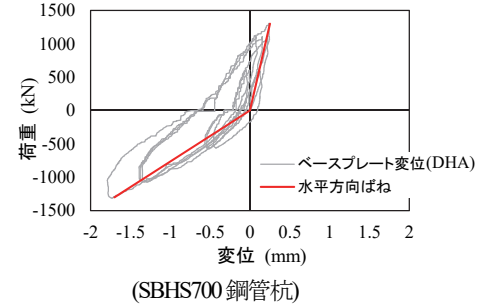
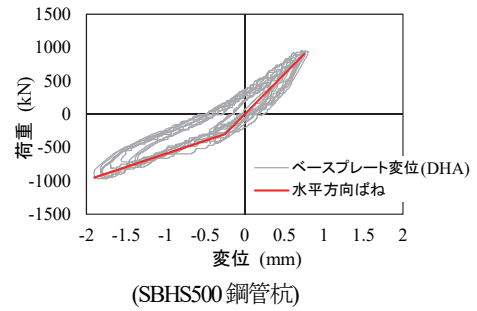


図-12 水平ばね値の設定

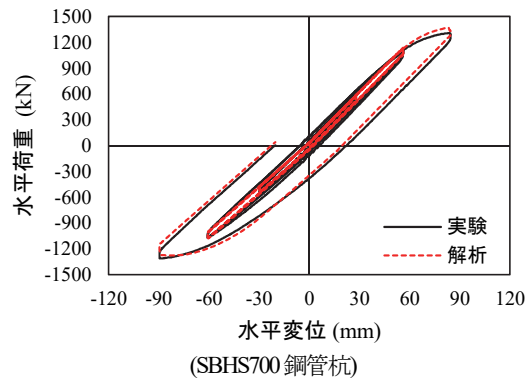
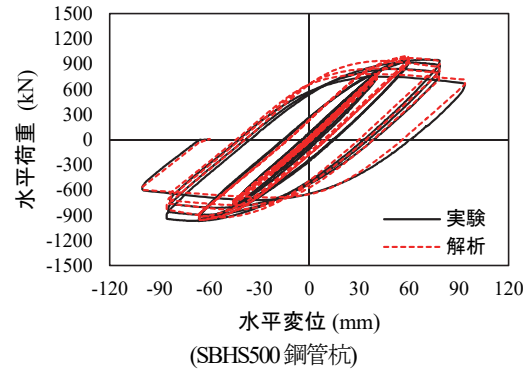


図-13 実験と解析の比較 (水平荷重と水平変位の関係)

ϕ 到達時の水平変位においても、水平荷重の実験値は、水平荷重の目標値と同等以上で、水平荷重が最大を超えて低下は始める前である。したがって、載荷実験は目標値をクリアしているといえる。

d) FEM 解析の精度確認

表-1 に示した設計式は、シェル要素を用いた FEM 解析で構築している。そのため、FEM 解析の精度の確認を目的として、載荷実験の再現解析を行った。解析プロ

グラムは、正負交番载荷実験の再現解析の実績が豊富な汎用構造解析プログラム ADINA¹⁰⁾を用いた。主な解析設定を表-7に示す。応力ひずみ関係は、引張試験結果をマルチリニアでモデル化した(図-10 参照)。ここで、降伏曲面の大きさを規定する最初の折れ点は、引張試験の降伏応力を用いることにした。解析のメッシュ分割、境界条件、载荷方法を図-11に示す。メッシュは円周方向に72分割、局部座屈が発生する下部のメッシュ高さは7.98mmとした。鋼管供試体の下面に配置した回転ばねは、図-6に示す理論勾配と実験勾配の差を表現するための値とした(表-8 参照)。水平方向ばねは、実験の水平方向荷重とベースプレートの変位の関係(図-12 参照)を再現するため非線形弾性のばねを配置することにした。鉛直力、摩擦力、水平変位 DH25A の値を時刻歴で入力して、水平方向荷重を算定した。

水平荷重と水平変位の関係を、実験値とあわせて図-13に示す。SBHS500 鋼管杭と SBHS700 鋼管杭のどちらの解析結果も、実験結果を良好に再現できていることがわかる。また、この結果から、c)の実験値の補正方法も問題ないものと考えられる。

4. 鋼管部材の設計法の SBHS500 鋼管杭と SBHS700 鋼管杭への拡張

(1) 設計式を算定した際の解析概要

表-1の設計式は、図-14に示すシェル要素を用いた FEM 解析結果をもとに構築した^{8)~10)}。図-14(a)の「円形保持」とは、栈橋上部工と鋼管杭の境界部のように、端部で鋼管杭の円形形状が保持される条件のことである。栈橋上部工下端から地中部の仮想固定点までを取り出した解析モデルを作成し(ここでは長さ20m)、下端を拘束して、上端に「円形保持」状態で水平変位を与え、 $M-\phi$ 関係を求めている。図-14(b)の「円形非保持」は、地中部の仮想固定点では上部工と異なり鋼管杭の円形形状を保持することが困難なため、この影響を考慮するために実施したものである。鋼管長さは、軸力作用時の付加曲げモーメントの割合をあわせるため16.3mとした。鋼管杭の両端に回転変位を与え、鋼管杭中央で円形形状が保持されない状態で局部座屈を発生させて $M-\phi$ 関係を求めた。

鋼管杭の直径、板厚、軸力を変化させて実施した解析結果を図-15に示す手順で整理した。ここでは、FLIP等の梁要素解析で用いるため、バイリニア型の $M-\phi$ 関係に必要な最大曲げ耐力 $M_{\max}$ と、照査に必要な限界曲率 ϕ_u を求めた。曲げモーメントは、载荷点の節点反力の値から、梁要素1mの要素中心位置での評価に対応するため0.95倍して、微小変形理論では考慮できない付加曲げモ

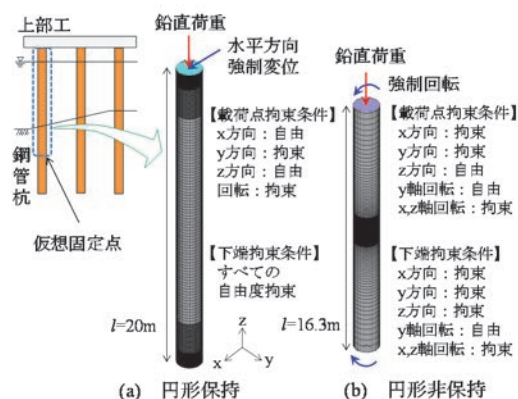


図-14 設計式検討のための解析モデル¹⁰⁾

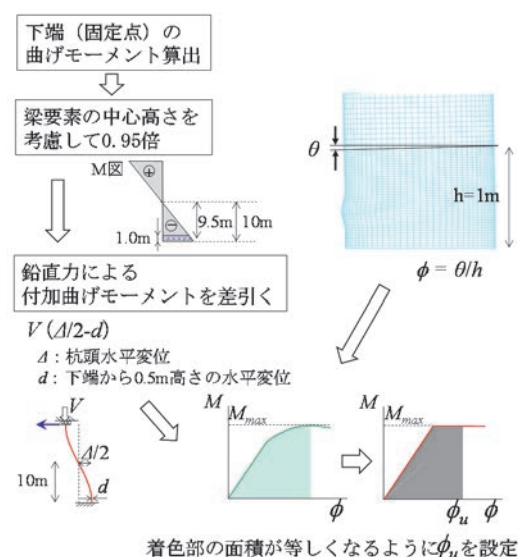


図-15 解析結果の整理方法¹⁰⁾

ーメントを差し引いて求めた。曲率は、下端から1m区間の平均曲率を求めた。この FEM 解析の $M-\phi$ 関係について、曲げモーメントの最大値を最大曲げ耐力 $M_{\max}$ として、 $M_{\max}$ 発現時までの $M-\phi$ 関係の下部の面積がバイリニア型の面積と等しくなる曲率を限界曲率 ϕ_u と定義した。

本論文では、表-1で示す $M-\phi$ 関係における最大曲げ耐力と限界曲率を決定するため、文献8)~10)と同じ方法で降伏応力を500MPa、700MPaとした解析を実施した。

(2) 最大曲げ耐力

最大曲げ耐力 $M_{\max}$ は、軸力との関係で規定しており $M-N$ 相関図で示す。最大曲げ耐力 $M_{\max}$ は軸力ゼロ時の全塑性モーメント M_{p0} で無次元化し、軸力は降伏軸力 N_y で無次元化している。FEM解析結果を、表-1で示した新基準の設計式の値(点線)とあわせて図-16に示す。図中の実線は、曲げ変形時に平面保持仮定(Bernoulli-Eulerの仮定)が成立する前提の旧基準の $M-N$ 関係である。また、ここでは、参考のため降伏応力450MPa(SM570)の結果もあわせて示す¹⁰⁾。

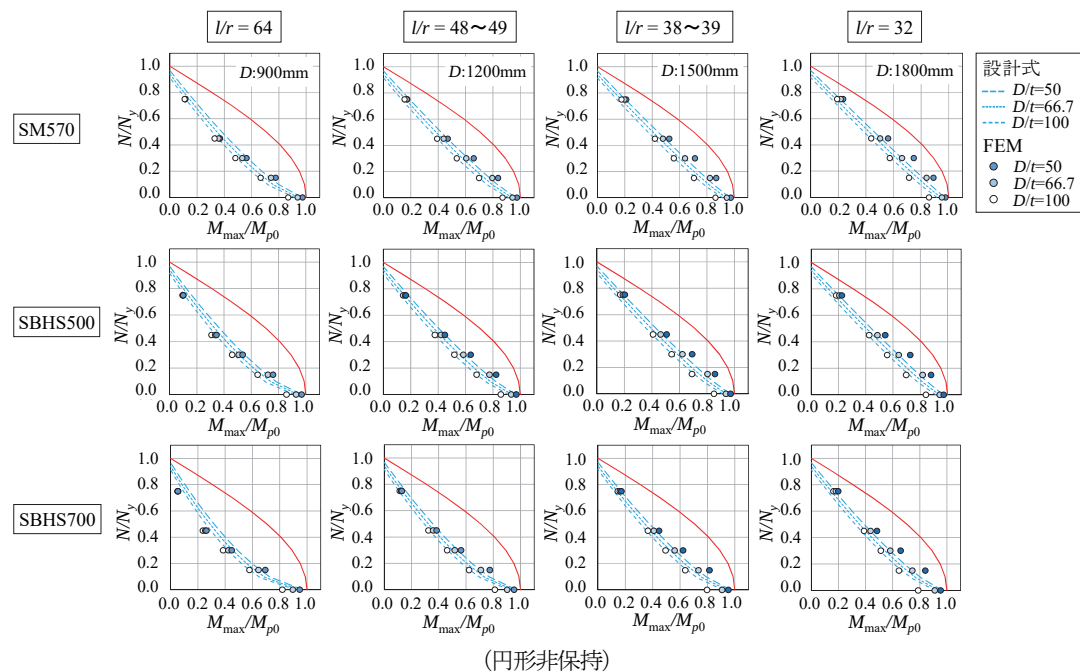
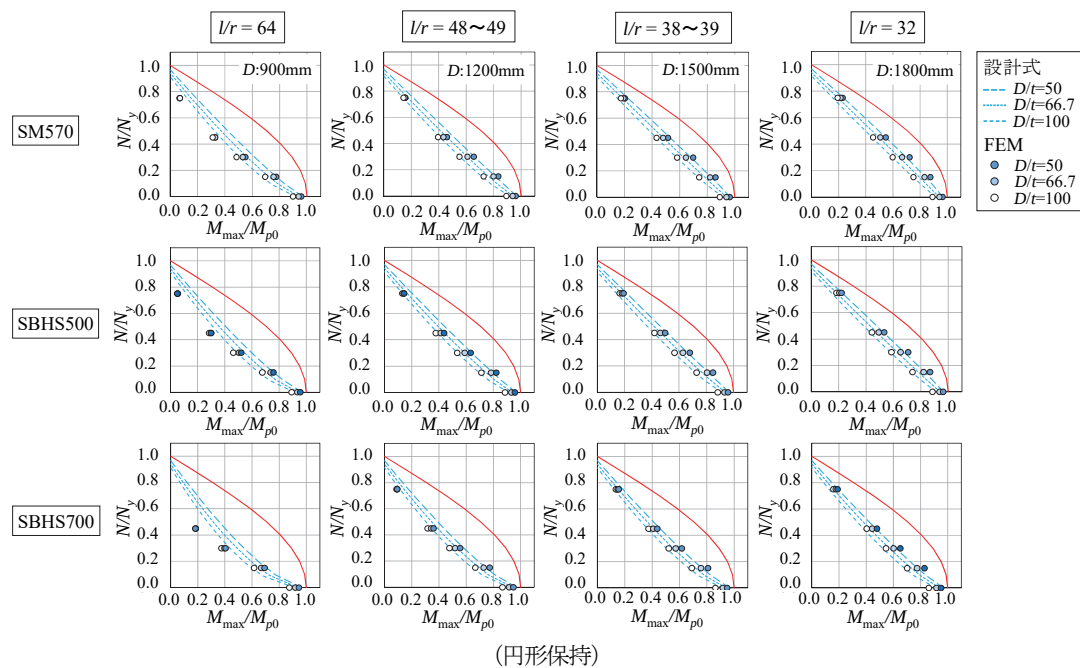


図-16 $M-N$ 相関図

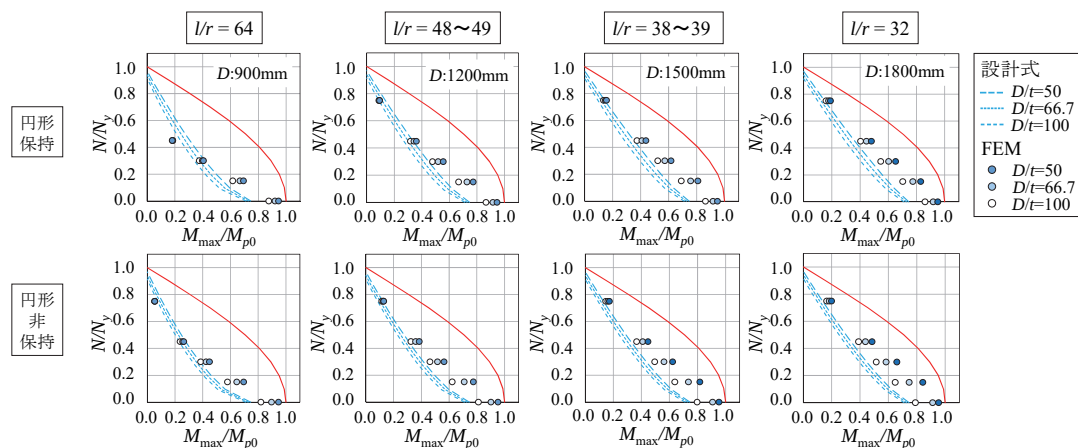


図-17 $M-N$ 相関図 (SBHS700 の弾性範囲の設計値)

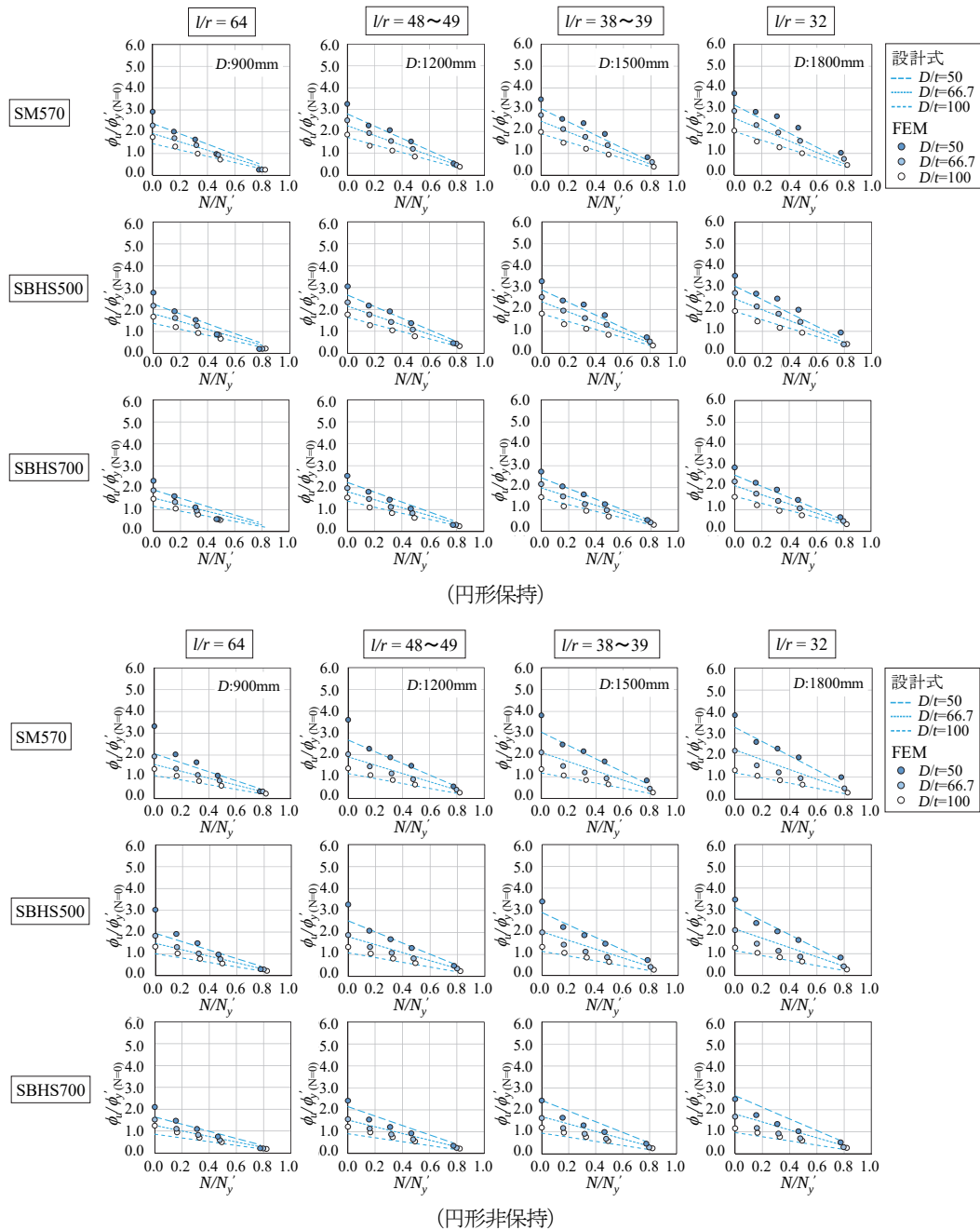


図-18 限界曲率

SBHS500は、SM570と降伏応力が1割程度しか違わないため、解析結果もほぼ同じ結果となっている。SBHS700に関しても、設計式との整合は良い結果であった。ただし、円形保持の細長比 $l/r=64$ (鋼管杭の直径900mm) の条件で、軸力比 0.3 以上で乖離が大きくなっている。また、軸力比 0.75 では、図-14 に示すモデルでは計算不能であった。これは、細長比が大きく、かつ高軸力比の条件では、軸力がオイラー座屈荷重を超えているためである。なお、SBHS700は弾性範囲内の使用を想定しており、弾性範囲内の限度となる塑性率 $\mu=1$ の設計式の値を表示すると図-17 のようになる。最大曲げ耐力は十分安全側の評価となっている。

(3) 限界曲率

限界曲率 ϕ_l は、軸力ゼロ時の降伏曲率 ϕ_0 で除した曲率比と軸力比の相関図で示す。FEM解析結果を、表-1 で示した新基準の設計式の値とあわせて図-18 に示す。限界曲率 ϕ_l は、軸力ゼロ時の降伏曲率 ϕ_0 に塑性率 μ を掛けて規定しており、軸力比ゼロ時の縦軸の値が塑性率に相当する。また、参考のため降伏応力 450MPa (SM570) の検討結果もあわせて示す¹⁰⁾。

SBHS500はSM570と降伏応力が1割程度しか違わないため、解析結果もほぼ同じ結果となっている。SBHS700は、設計式と概ね整合するものの、円形非保持の $D/t=50$, 66.7 では設計式を下回ることがある。ただし、弾性設計に相当する塑性率 $\mu=1.0$ は下回らない。

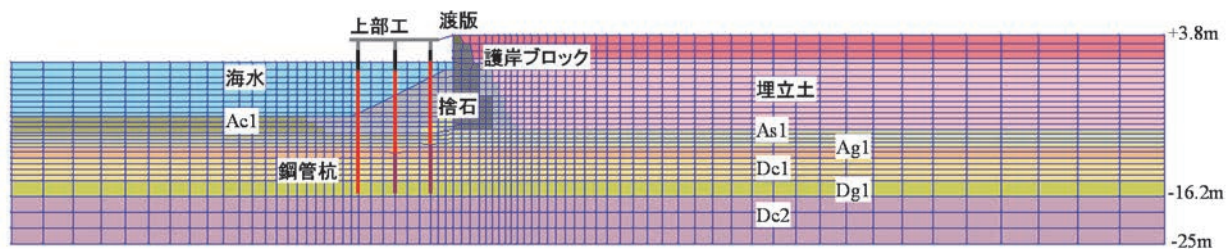


図-19 有限要素分割図

表-9 解析地盤定数

土層名	湿潤 密度	間隙 率	変形特性						
			初期 せん断 剛性	基準 化拘束 圧	拘束圧 依存 係数	内部 摩擦 角	粘着 力	履歴 減衰 上限値	
			ρ_t (t/m ³)	n	G_{ma} (kPa)	σ_{ma}' (kPa)	m	ϕ_f ($^{\circ}$)	c (kPa)
As1	1.8	0.45	111900	98.0	0.5	40.7	0	0.24	
Ag1	2.0	0.45	226500	98.0	0.5	44.4	0	0.24	
Dc1	1.9	0.44	51000	43.4	0.0	0.0	150	0.20	
埋立土	1.8	0.45	65840	98.0	0.5	38.9	0	0.24	
捨石	2.0	0.45	180000	98.0	0.5	35.0	20	0.24	
裏込土	2.0	0.45	180000	98.0	0.5	35.0	20	0.24	
Ac1	1.5	0.67	3750	5.0	0.5	25.0	0	0.20	
Dc2	1.7	0.55	34000	86.4	0.0	0.0	100	0.20	
Dg1	2.0	0.45	228200	98.0	0.5	44.5	0	0.24	

土層名	変相角 $\phi_p(^{\circ})$	液状化パラメータ					
		W_i	P_1	P_2	C_1	S_1	Sus (kPa)
As1	28.0	20.0	0.5	0.764	1.0	0.005	20
埋立土	28.0	6.0	0.5	0.98	1.8	0.005	
Ag1	28.0	21.18	0.5	0.281	14.67	0.005	
Dg1	28.0	21.4	0.5	0.27	14.87	0.005	

表-10 鋼管杭の解析定数

		海側杭		中間杭		中間杭		
		被覆部	上杭 -1.0m~	被覆部	上杭 -1.0m~ 下杭 -12.4m~	被覆部	上杭 -1.0m~ 下杭 -11.3m~	
外径 D	mm	700	700	700	700	700	700	
板厚 t	mm	10	12	9	14	9	14	
降伏応力 σ_y	N/mm ²	277	282	275	287	275	287	
最大曲げ耐力	kNm	1.32×10^3	1.60×10^3	1.18×10^3	1.89×10^3	1.18×10^3	1.89×10^3	
細長比 l/r		60.7	60.8	60.6	61.0	60.6	61.0	
円形保持条件		保持	非保持	保持	非保持	非保持	保持	非保持
軸力依存のべき数 n		1.00	0.91	1.05	0.94	0.90	1.10	0.96
塑性率 μ		2.36	1.92	2.70	2.30	1.72	3.03	2.68
限界曲率 ϕ_u	1/m	0.00908	0.00737	0.0105	0.0090	0.00657	0.012	0.0107

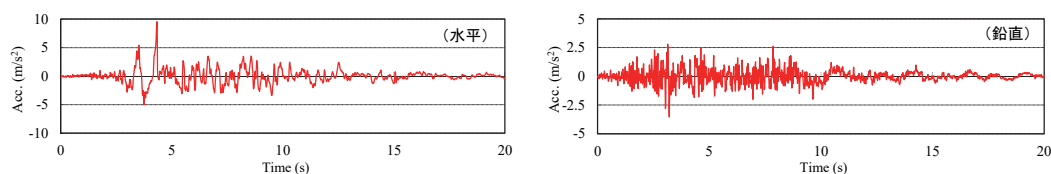


図-20 入力地震動

5. 栈橋への適用検討

1995年兵庫県南部地震時に被災した栈橋の再現解析に対して¹⁵⁾，SBHS500 鋼管杭および SBHS700 鋼管杭を適用した場合の効果について検証した。

(1) 新基準の設計式を用いた検討概要

図-19 に示す有限要素分割のモデルを用いて地震応答解析を行った。解析は有効応力解析プログラム FLIP を用いた。主な解析地盤定数を表-9 に示す。鋼管杭（直径 700mm）は非線形梁要素でモデル化し、解析定数は表-10 の新基準の設計式で設定した（表-10 参照）。ここで、有効部材長は、上部工下端から Ag1 層下端までの 14.8m を採用した。また、杭間を地盤がすり抜ける現象を模擬

するため、鋼管杭と地盤要素の間に「杭—地盤相互作用ばね」を配置している。栈橋上部工と土留め護岸の間に設置されている渡版は、圧縮力だけ伝える非線形ばね（ばね定数： 5×10^8 kN/m）でモデル化した。入力地震波は、図-20 に示す地震波(2E 波)を用い、底面粘性境界を介して入力した。

解析終了後の残留変形図と、過剰間隙水圧比の最大値のコンターを図-21 に示す。栈橋の上部工天端の残留水変位は海側に 1.52m で、被災事例を良好に再現できている。鋼管杭の発生曲率と限界曲率の比を時刻歴で整理し、最大値と残留値の分布図を図-22 に示す。杭頭部と地中部で限界曲率を大きく超えていることがわかる。

(2) SBHS500 鋼管杭の適用検討

ここでは、SBHS500 鋼管杭を適用して、耐震強化岸壁

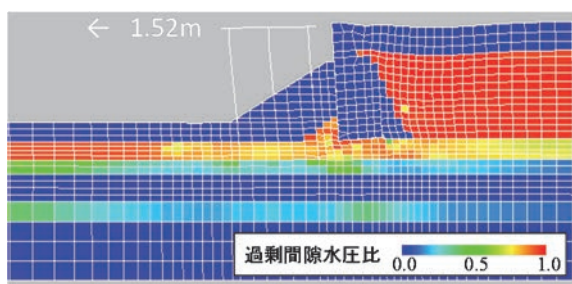


図-21 残留変形図（被災事例）

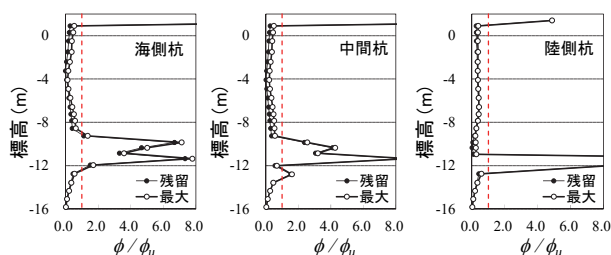


図-22 限界曲率比分布（被災事例）

表-11 鋼管杭の解析定数（SBHS500 鋼管杭）

	すべての杭		
	被覆部	上杭 -1.0m～	
外径 D	mm	800	
板厚 t	mm	14	
降伏応力 σ_y	N/mm ²	477	
最大曲げ耐力	kNm	4.13×10^3	
細長比 l/r		53.2	
円形保持条件	保持	非保持	
軸力依存のべき数 n	0.86	0.77	
塑性率 μ	2.28	2.02	
限界曲率 ϕ_u	1/m	0.0136	0.0121

（特定）相当の要求性能である杭 1 本あたりの限界曲率を超え 1 箇所以下となる断面が設定できるか検討を行った。なお、被災事例の解析では、渡版を介して大きな力が栈橋上部工に作用していたため、渡版から力を伝達しない構造を活用する前提とした。また、鋼管杭だけでなく、上部工（鉄筋コンクリート）も塑性化していたため、上部工は鋼管杭よりも十分に剛性・強度をもたせ、弾性範囲内で挙動する前提とした。これら条件を変更して解析を行うと、残留水平変位は 0.99m まで減少するものの、鋼管杭は杭頭部および地中部で限界曲率超えであることは変わらなかった。

SBHS500 鋼管杭の諸元は、トライアルの結果、直径 800mm 板厚 14mm で要求性能を満足することがわかった（検討の簡易化のためすべて同一の板厚とした）。SBHS500 鋼管杭の解析定数を表-11 に示す。解析終了後の残留変形図と、過剰間隙水圧比の最大値のコンターを図-23 に示す。栈橋の上部工天端の残留水変位は海側に 0.56m であった。また、鋼管杭の発生曲率と限界曲率の比を時刻歴で整理し、最大値と残留値の分布図を図-24 に示す。鋼管杭の損傷程度は、海側杭の杭頭部と陸側杭

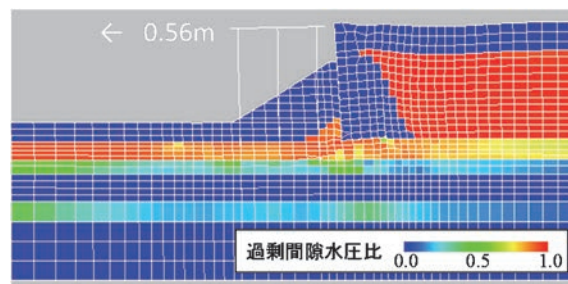


図-23 残留変形図（SBHS500 鋼管杭）

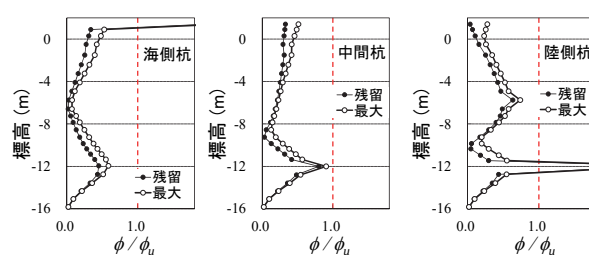


図-24 限界曲率比分布（SBHS500 鋼管杭）

表-12 鋼管杭の解析定数（SBHS700 鋼管杭）

	すべての杭		
	被覆部	上杭 -1.0m～	
外径 D	mm	800	
板厚 t	mm	16	
降伏応力 σ_y	N/mm ²	678	
最大曲げ耐力	kNm	6.66×10^3	
細長比 l/r		53.4	
円形保持条件	保持	非保持	
軸力依存のべき数 n	0.75	0.67	
塑性率 μ	1.00	1.00	
降伏曲率 ϕ_y	1/m	0.00847	0.00847

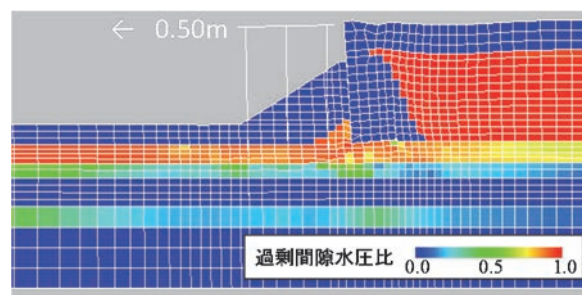


図-25 残留変形図（SBHS700 鋼管杭）

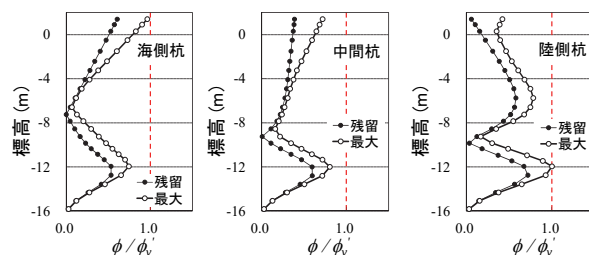


図-26 降伏曲率比分布（SBHS700 鋼管杭）

の地中部で 1 箇所ずつ限界曲率を超えているだけで要求性能を満足している。

(3) SBHS700 鋼管杭の適用検討

上記と同様にSBHS700鋼管杭を適用して、すべての鋼管杭を弾性範囲内に抑える断面の探索を行った。その結果、直径800mm板厚16mmで弾性範囲内とすることができた。鋼管杭の解析定数を表-12に示す。最大曲げ耐力 M_{max} とべき数 n は表-1の新基準を用いているが、塑性率を $\mu=1.0$ として評価することで弾性範囲内の断面を求めた。解析終了後の残留変形図と、過剰間隙水圧比の最大値のコンターを図-25に示す。栈橋の上部工天端の残留水変位は海側に0.50mであった。また、鋼管杭の発生曲率と降伏曲率の比を時刻歴で整理し、最大値と残留値の分布図を図-26に示す。いずれの鋼管杭も弾性限界曲率以下である。

6. まとめ

降伏応力500MPaおよび700MPaの橋梁用高降伏点鋼（JIS G 3140のSBHS500およびSBHS700）と同等の機械的性質を有する鋼管杭を、港湾分野へ適用するための検討を行い、以下の結論を得た。

- 1) 冷間成型および拡管による工程にて造管したSBHS500鋼管杭とSBHS700鋼管杭の正負交番載荷実験を行ったところ、設計で必要となる耐力と変形性能を満足することを確認した。
- 2) シェル要素を用いたFEM解析で、正負交番載荷実験を良好に再現できることを確認した。
- 3) レベル2地震に対する地震応答解析で用いる $M-\phi$ 関係と限界曲率は、港湾の新基準で採用されている既往の設計式を適用できることをFEM解析で明らかにした。SBHS700鋼管杭を弾性範囲内として設計する場合には、 $M-N$ 関係は従来の設計式を用いて、塑性率 $\mu=1.0$ として照査すればよい。
- 4) 兵庫県南部地震時に杭頭部と地中部で局部座屈が生じた栈橋（鋼管杭の直径700mm）を例題として、SBHS500鋼管杭とSBHS700鋼管杭の適用検討を行った。SBHS500鋼管杭は、直径800mm板厚14mmの鋼管杭で限界曲率超えが1本1箇所以下となり耐震強化施設（特定）の要求性能を満足させること出来た。SBHS700鋼管杭を適用すると、直径800mm板厚16mmの鋼管杭で弾性範囲内の設計が可能であった。

謝辞：本研究は、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とJFEスチール株式会社との令和元年～令和二年度共同研究「港湾鋼構造物における高強度鋼の利用技術に関する共同研究」として実施したものです。関係各位に対して、ここに記して心からの謝意を表します。

表-A1 軸圧縮応力度の設計式

SBHS500	SBHS700
$l/r \leq 13$ のとき 500	$l/r \leq 11$ のとき 700
$13 < l/r \leq 64$ のとき $500 - 4.3(l/r - 13)$	$11 < l/r \leq 54$ のとき $700 - 7.1(l/r - 11)$
$l/r > 64$ のとき 2.0×10^6 $3.1 \times 10^3 + (l/r)^2$	$l/r > 54$ のとき 2.0×10^6 $2.3 \times 10^3 + (l/r)^2$

単位：MPa (N/mm²)

付録 SBHS500 鋼管杭と SBHS700 鋼管杭の軸圧縮応力度の設計式

港湾分野において、レベル1地震動や接岸力などの検討で必要となるオイラー座屈に関する軸圧縮応力度は、道路橋示方書¹⁶⁾に記載されている式（A1）に示す基準耐荷力曲線をもとに設定した値を用いている。

$$\begin{aligned}\bar{\alpha} &= 1.0 & (\bar{\lambda} \leq 0.2) \\ \bar{\alpha} &= 1.109 - 0.545\bar{\lambda} & (0.2 < \bar{\lambda} \leq 0.2) \\ \bar{\alpha} &= 1.0 / (0.773 + \bar{\lambda}^2) & (1.0 > \bar{\lambda})\end{aligned} \quad (A1)$$

ここに、 $\bar{\alpha} = \sigma_{cr} / \sigma_y$ 、 $\bar{\lambda} = 1 / \pi \cdot \sqrt{\sigma_y / E} \cdot l / r$
 σ_{cr} ：基準耐荷力、 σ_y ：降伏応力度、 E ：ヤング率、
 l ：部材の有効座屈長、 r ：断面2次半径。

この式をもとに、SBHS500鋼管杭とSBHS700鋼管杭に対して構築した設計式を表-A1に示す。

参考文献

- 1) 財団法人沿岸開発技術研究センター：SPS（単杭構造）の設計の手引き、1992。
- 2) 田村徹、磯崎総一郎、鈴木操、作井新、掛江正紀、石川博：単杭ドルフィン、NKK技報 No.136、pp.37-44、1991。
- 3) 大森弘一、福島敬三、佐藤峰幸、尾高義夫、柴原信之：国内初のSPS（単杭ドルフィン）の建設、海洋開発論文集、Vol.12、pp.133-138、1996。
- 4) Sjors H.J van Es, Arnold M. Gresnigt, Daniel Vasilakis, Spyros A. Karamanos: Ultimate bending capacity of spiral-welded steel tubes - Part 1: Experiments, Thin-Walled structures, Vol.102, pp.286-304, 2016。
- 5) Armin Patsch, Carlos F. Gerbaudo, Carlos A. Prato : Analysis and Testing of Piles for Ship Impact Defenses, JOURNAL OF BRIDGE ENGINEERING JULY/AUGUST 2002。
- 6) S. Iai, Y. Matsunaga, T. Kameoka: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report of The Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990。
- 7) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、2018。
- 8) 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, 第 56 巻, 第 2 号, 2017.6.
- 9) 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, 土木学会論文集 B3, Vol.73, No.2, pp. I_372~377, 2017.
 - 10) 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高強度鋼管杭の $M-\phi$ 関係について, 土木学会論文集 A1, Vol.74, No.4, pp. I_847~863, 2018.
 - 11) 大矢陽介, 塩崎禎郎, 小濱英司, 川端雄一郎: 径厚比を考慮した鋼管部材のモデル化法の各種港湾施設への適用, 港湾空港技術研究所資料, No.1338, 2017.12.
 - 12) 塩崎禎郎, 宇佐美俊輔, 大久保浩弥: 高強度鋼管杭 (引張強度 570N/mm² 級) の港湾構造への適用に向けた検討, 土木学会論文集(B3), Vol.68, No.2, pp. I_366- I_371, 2012.
 - 13) 社団法人日本橋梁建設協会: 鋼製橋脚の耐震設計マニュアル (講習会テキスト No.12), 1998.
 - 14) ADINA R&D, Inc: ADINA Theory and Modelling Guide, 2012.
 - 15) 大矢陽介, 塩崎禎郎, 小濱英司: 傾厚比を考慮した鋼管部材のモデル化法による直杭式栈橋の被災事例の再現解析, 土木学会論文集 A1, Vol.74, No.4, pp. I_917~925, 2018.
 - 16) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編, pp.129-133, 2002.3.

STUDY ON THE APPLICATION OF HIGH-STRENGTH STEEL PIPE PILE WITH YIELD STRESS OVER 450 MPa TO PORT STRUCTURES

Yoshio SHIOZAKI, Yousuke OHYA and Eiji KOHAMA

Pile-supported wharves in ports tend to have severe design conditions due to increased loads and seismic forces. Therefore, even if high-strength steel pipe piles with yield stress of 450 MPa are used, the design may not be easily established. This paper has examined the application of steel pipe pile with yield stress over 450 MPa to port structures. The results are as follows. 1) Cyclic loading experiments of steel pipe pile have been carried out. The strength and deformation performance required in the design have been satisfied. 2) FEM analysis have revealed that the design method of the bending moment - curvature relationship and the critical curvature for yield stress up to 450 MPa has been applicable up to 700 MPa.