

高耐力鋼管杭（引張強度 570～590 N/mm² 級）の構造性能

Structure Performance of High Strength Steel Pipe Pile (TS570-590 N/mm² Class)

恩田 邦彦 ONDA Kunihiko JFE スチール スチール研究所 土木・建築研究部 主任研究員（副部長）
塩崎 禎郎 SHIOZAKI Yoshio JFE スチール スチール研究所 土木・建築研究部 主任研究員（部長）
寺尾 名央 TERAO Nao JFE スチール 建材センター 建材開発部 土木技術室

要旨

近年、杭基礎の高支持力化が進み、杭 1 本あたりで受け持つ上部工荷重が増加していることをうけ、従来の鋼管杭に比べて材料強度の高い、引張強度 570 N/mm²～590 N/mm² 級の高耐力鋼管杭の開発ならびに適用拡大に取り組んだ。本論では、鋼管杭において重要となる座屈特性と耐震性能を確認するため、1) 薄肉から厚肉の各サイズによる短柱圧縮実験、2) 組杭による正負交番繰返し載荷実験、を実施し、いずれも従来材と比べて同等以上の性能を有することを証明した。また従来材に比べて、高強度～低曲げ剛性となることで、地震時の曲げモーメントが低減できる設計メリットについて述べるとともに、建築構造基礎および土木構造基礎への適用事例を紹介する。

Abstract:

In recent years, as the pile foundation's high support capacity has advanced and the upper work load handled per a piece of pile is increasing, we have developed a high-strength steel pipe pile with a tensile strength of 570N/mm² to 590N/mm² class. In this paper, in order to confirm buckling characteristics and seismic performance of pipe piles, we carried out 1) short column compression experiment with each size of thin to thick, 2) positive/negative alternating cyclic loading experiment, and it was proved to be equivalent or superior to conventional materials. In addition, the design merit that the bending moment can be reduced by making the pile with high strength and low flexural rigidity is described, and examples of application to civil engineering foundation are introduced.

1. はじめに

これまでに、道路、港湾、建築基礎などの分野で一般に用いられている鋼管杭の材質は、JIS A 5525 で規定されている、SKK400（引張強度 400 N/mm² 級、基準降伏点 235 N/mm²）材および SKK490（引張強度 490 N/mm² 級、基準降伏点 315 N/mm²）材である。一方、近年では杭先端に根固め部を持つ高支持力杭の開発およびその拡大により杭 1 本あたりで受け持つ上部工荷重が増加していること、また平成 23 年の東日本大震災などをうけて、より大規模な地震動、津波などの外力への対応が必要になるケースがあることから、従来の JIS 材よりも材料強度が高く、高耐力を有する鋼管杭のニーズが高まっている。

2. 高耐力鋼管杭の規格および製造範囲

JFE スチールは、建築基礎向けとして、590 N/mm² 級の材料引張強度を有する高耐力鋼管杭「JFE-HT590P（設計基準強度 440 N/mm²）」を開発している。また、土木港湾向け

に、道路橋示方書¹⁾ や港湾基準²⁾ に構造用鋼材として記載されている SM570 と同等の材料規格を有する高耐力鋼管杭「JFE-HT570PC（降伏応力度の特性値 450 N/mm²）」を開発している。

建築向け高耐力鋼管杭「JFE-HT590P」の強度特性を既存の SKK490 と比較して表 1 に示す。JFE-HT590P の設計強度

表 1 高耐力鋼管杭（JFE-HT590P）の強度特性
Table 1 Strength characteristics of JFE-HT 590P

		JFE-HT590P	SKK490
Design strength F-value (N/mm ²)	Allowable stress	440	325
	Design yield strength	440	325
Design strength ratio (SKK490 = 1.0)		1.35	1.0
Yield strength (N/mm ²)		450/675	315/
Tensile strength (N/mm ²)		590/	490/
Yield to tensile ratio max (%)		90※	—

※When the thickness of pile is less than 12 mm, the yield to tensile ratio is 95% or less

2018年9月19日受付

は SKK490 の強度の 1.35 倍となる。JFE-HT590P の製造範囲を **図 1** に示す。製造方法としては、熱延帯鋼を螺旋状に曲げ鋼管を形成して継目部を溶接する「スパイラル鋼管」（適用範囲：杭外径 600～2 000 mm，板厚 6～25 mm）および、熱延帯鋼を円筒状に形成して継目部を高周波電気抵抗溶接する「電気抵抗溶接鋼管」（適用範囲：杭径 400～600 mm，板厚 6～21 mm）の 2 通りに対応しており，それぞれ国交省大臣認定を取得している。

次に，土木港湾向け高耐力鋼管杭「JFE-HT570PC」の強度特性を **表 2** に示す。JFE-HT570PC は降伏応力度の特性値は SKK490 の 1.43 倍となる。また，JFE-HT570PC の製造範囲は杭径が 318.5～2 500 mm，板厚が 6～25 mm となっている。

表 2 高耐力鋼管杭（JFE-HT570PC）の強度特性
Table 2 Strength characteristics of JFE-HT 570PC

	JFE-HT570PC	SKK490
Yield strength (N/mm ²)	460/($t \leq 16$) 450/($16 < t \leq 40$)	315/
Tensile strength (N/mm ²)	570/720	490/
Property value of the yield stress (N/mm ²)	450	315
Strength ratio (SKK490 = 1.0)	1.43	1.0

3. 高耐力鋼管杭の性能評価

3.1 単杭の圧縮耐力

3.1.1 短柱圧縮実験

高耐力鋼管杭の圧縮耐力（耐座屈特性）を評価するため，短柱圧縮試験を実施した。試験体のサイズおよび材料強度を **表 3** に示す。 t/r （板厚—半径比）が，0.020 から 0.086 の 5 サイズで実験を行った。載荷状況の一例を **写真 1** に示す。試験体の長さは杭径 D の 3 倍とし，単調載荷により鋼管杭に座屈が生じるまで圧縮力を加えた。

3.1.2 実験結果

実験結果の一例として， t/r （板厚—半径比）が 0.030，0.053，0.086 の 3 サイズにおける応力比（平均応力/材料降伏強度）とひずみの関係を **図 2** に示す。 t/r （板厚—半径比）が大きくなるほど最大応力比も大きくなる傾向にある。また，**図 3** に全サイズの t/r と最大応力比との関係を示す。同図中には，従来材料（SKK400 および SKK490）データ³⁾ならびに，鋼管杭の耐力評価式（国土交通省告示 1113 号記載）を併せて

表 3 圧縮試験体のサイズと材料強度

Table 3 Test specimen size and materials strength

No.	Outer diameter D (mm)	Thickness t (mm)	t/r ※	Yield Strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)
①	402	6.1	0.030	537	683
②	502	21.5	0.086	539	651
③	600	6.0	0.020	516	662
④	601	15.9	0.053	559	683
⑤	702	22.2	0.063	551	678

※ r : Radius of steel pipe pil

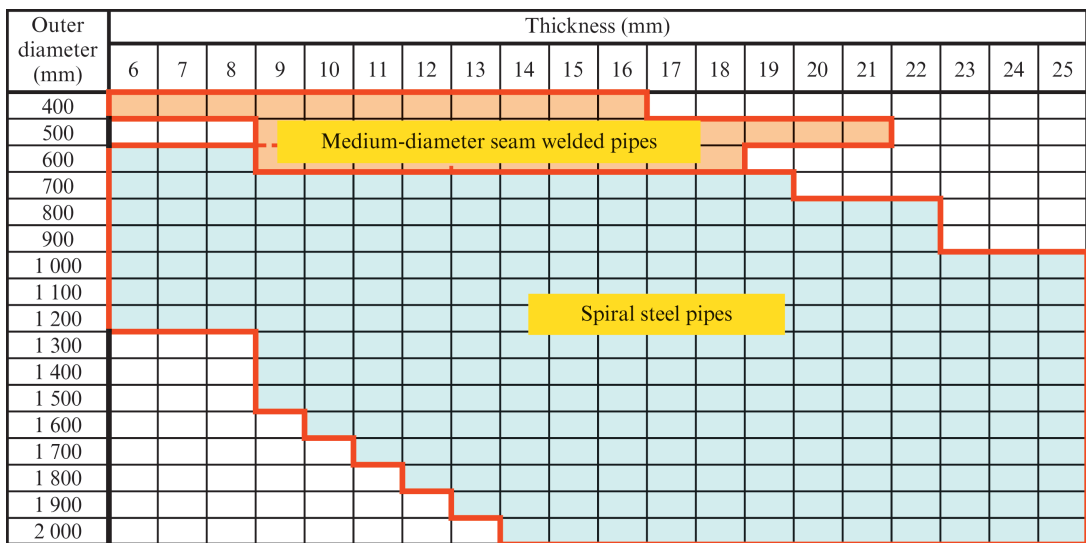


図 1 JFE-HT590P の製造範囲

Fig. 1 Production range of JFE-HT 590P



写真 1 圧縮実験状況
Photo 1 Short pillar compression test

示す。高耐力鋼管杭の最大応力比は、従来材料（SKK400 および SKK490）と比べても同等以上であり、耐力評価式を十分満足する値であった。

3.2 組杭の曲げ耐力

3.2.1 実験条件

高耐力鋼管杭の耐震性能を評価するため、組杭構造による正負交番繰返し載荷実験を行った。比較のため引張強度 400 N/mm² 級の従来材（STK400）による実験も実施した。表 4 に実験で用いた鋼管の諸元を示す。従来材は全塑性モーメントが高耐力鋼管杭とほぼ等しくなるように形状を選定した。両者を比較すると高耐力鋼管杭の鋼重が 21% 低減されることになる。実験は構造試験フレーム内に鋼管杭下部をピン構造として設置し、両側から荷重を作用させる手法を採用した。実験概要図を 図 4 に、試験体の詳細図を 図 5 に示す。なお、鋼管杭の内部に上部工下端から直径分だけ中詰コンクリートを充填した。載荷方法は、±1δy から ±4δy までは 3 回ずつ繰返し載荷を行い、以降は試験体の状況を見ながら最大 ±150 mm 程度（STK400 は +9δy、HT570PC は +6δy）まで載荷した。δy は材料試験による降伏強度を用いて算定し、従来材（STK400）は 15.1 mm、高耐力鋼管杭は 24.8 mm であった。

3.2.2 実験結果

従来材（STK400）において、繰返し載荷で得られた荷重～変位関係を 図 6 に示す。荷重は +4δy まで増加を続け、以降はほぼ同程度で推移した。最大荷重は +9δy 時の 380.4 kN であった。+4δy 3 回目の載荷終了後に局部座屈の発生が確認され、以降、座屈が進展したものの、耐力低下が生じなかった。この要因は、鋼管杭の t/D が 2% 以上であったこと、杭頭に中詰コンクリートを充填していること、上部工で致命的な破壊が生じなかったこと等が考えられる。

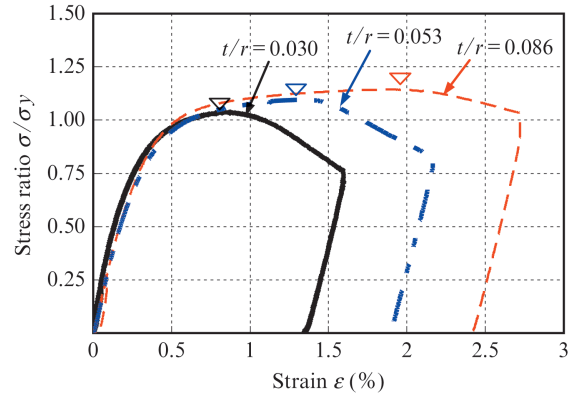


図 2 応力比とひずみの関係（短柱圧縮実験）
Fig. 2 Relationship between stress ratio and strain

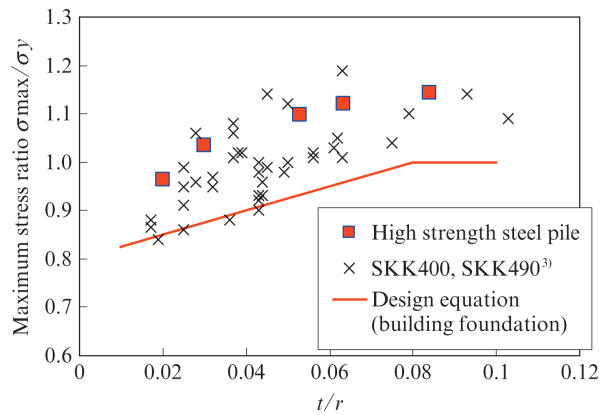


図 3 最大応力比と t/r の関係（短柱圧縮実験）
Fig. 3 Relationship between maximum stress ratio and t/r

表 4 実験で用いた鋼管の諸元
Table 4 Specifications of steel pipe used in the experiment

No.	Diameter, Thickness (mm)	Sectional area (cm ²)	Yield Strength (N/mm ²)	Full plastic moment (kN·m)
STK 400	355.6 9.07	98.7	393	428.5
High strength pile	318.5 8.03	78.3	583	451.6

次に、高耐力鋼管杭の荷重～変位関係を 図 7 に示す。荷重は、STK400 と同様に +4δy まで増加を続け、+6δy まで同程度で推移した。最大荷重は STK400 と比べると 1.18 倍で、表 4 に示す両者の全塑性モーメントの倍率 1.05 倍よりも大きな値となっていた。+4δy 1 回目載荷時に局部座屈が発生し、以降、STK400 と同様に杭頭部の圧縮側では、外側に膨らみが発生し、象の足座屈が進展していったが内側に凹むような座屈は発生しなかった。

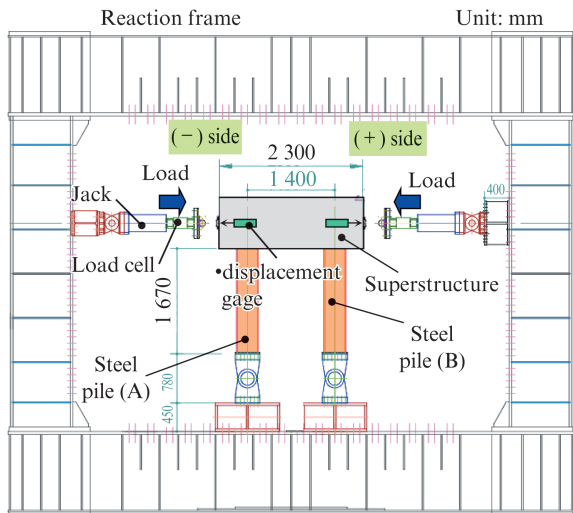


図4 組杭モデルの正負交番繰返し載荷装置
Fig. 4 Repetition loading device

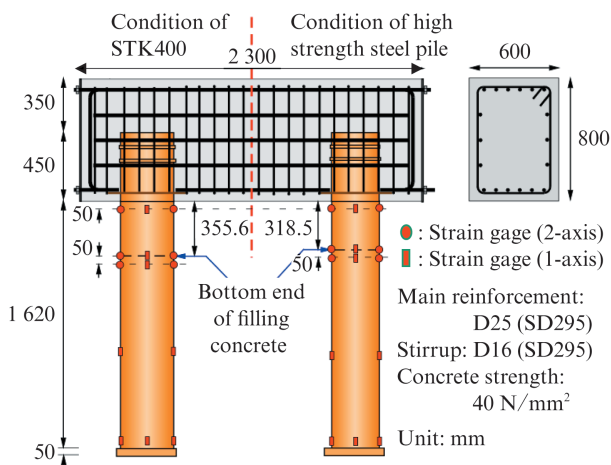


図5 組杭モデル試験体の詳細図
Fig. 5 Details of the test specimen

以上の結果から、鋼重で21%減とした高耐力鋼管杭に置き換えても同等以上の耐荷力を確保できることが明らかになった。また、座屈の発生は+4 δ_y で同じタイミングであったが、これは実スケールで評価すると高耐力鋼管杭の方が1.6倍程度の大きな変位まで座屈が発生しなかったことになる。

4. 高耐力鋼管杭の試設計例

高耐力鋼管杭 JFE-HT590P による試設計例（L2 設計，応答変位法による）を示す。図8に示す地盤条件を想定し，L2地震時の慣性力（220 kN/杭1本あたり）と地盤応答変位（告示・神戸波を用いて算定）を作用させた。杭は全長54 mとし，作用する曲げモーメントが小さい下端側の22 m（下杭）

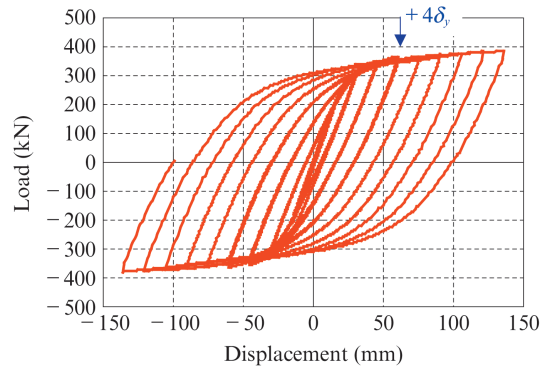


図6 荷重と変位の関係（従来材 STK400）
Fig. 6 Relationship between load and displacement (STK400)

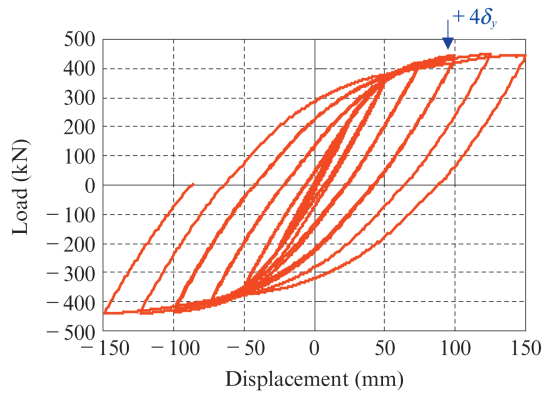


図7 荷重と変位の関係（高耐力鋼管杭）
Fig. 7 Relationship between load and displacement (High strength steel pile)

については、外径 ϕ 600—板厚9 mmで材質はSKK400とした。一方、上端側の32 m（上杭）については、従来材 SKK490 と高耐力鋼管杭 JFE-HT590P の2種類を用いて設計計算を行った。その結果，SKK490では外径 ϕ 600—板厚18 mmとなるのに対し，JFE-HT590Pは板厚を12 mmまで低減できた（33%減，表5参照）。低減理由としては，材料設計強度のアップの他に，杭の剛性が低減したことによる最大作用モーメントの抑制効果（約20%低減）による（図8）。本試算の例に示されるように，従来材であるSKK490とくらべて，高耐力—低曲げ剛性が実現できる JFE-HT590P は，地盤応答解析手法を用いた設計において，特に大きな設計メリットが発揮できることが示された。

5. 高耐力鋼管杭の適用事例

5.1 建築構造基礎の事例（千葉県）

当事例は，基礎部と1F床の間に免震材を配置した基礎免震構造を有する地上11FのRC造（一部S造）であり，告

示波・南関東地震（レベル2）および東京湾北部地震（レベル2超）を想定した設計（地盤応答変位法による）がなされた結果、地層境界部で作用する大きな外力に対応できたことから、高耐力鋼管杭 JFE-HT590P が採用された。

【杭基礎仕様】

鋼管杭規格：JFE-HT590P（上杭）

SKK490（中杭，下杭）

杭外径：φ1 000～1 200 mm

杭長：約 40～43 m

表 5 設計結果（上杭仕様）の比較

Table 5 Comparison of steel pile specifications

	SKK490	JFE-HT590P
Outer diameter (mm)	600	600
Thickness (mm) [Reduction rate]	18 [1.0]	12 [0.67]
Corrosion allowance (mm)	1.0	1.0
Steel weight ratio (SKK490 = 1.0)	1.00	0.67
Design strength (N/mm ²)	325	440
Moment of inertia (cm ⁴)	131 042	87 402

5.2 土木構造の適用事例

表 6 に土木構造分野における高耐力鋼管杭の適用事例を示す。これまでに、杭式栈橋（図 9）、鋼管矢板式岸壁（図 10）、防潮堤の基礎など港湾分野を中心に適用実績がある。防潮堤での一例として、JFE エンジニアリングが開発した「ハイブリッド防潮堤[®]」⁵⁾（図 11）の基礎杭に SM570 相当の高耐力鋼管杭 JFE-HT570PC が適用されており、これにより底版・基礎構造結合部をスリム化するなど、工期および工費の短縮に寄与している。

表 6 設計条件の比較

Table 6 Application example of civil engineering field

	Applicable case	Region	Specification of steel pile
1	Piled pier structure	Wakayama Pref.	φ1 200-t12 L = 41.3 m
2	Shore seawall construction	Tokushima Pref.	φ1 000-t19, 21 L = 28.5 m
3	Fishing port seawall construction	Iwate Pref.	φ800-t8～9 L = 9～16 m
4	Steel sheet pipe pile type quay structure	Kanagawa Pref.	(Steel sheet pipe pile) φ1 500-t22

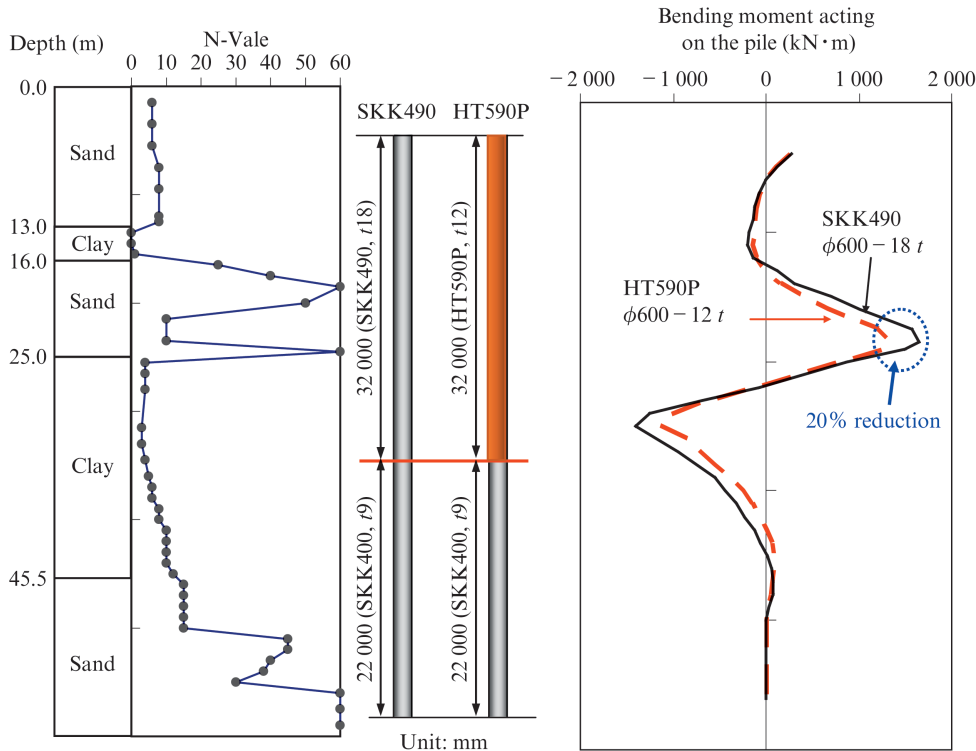


図 8 地盤条件および地震時に杭に作用する曲げモーメント
Fig. 8 Ground condition and bending moment acting on the pile

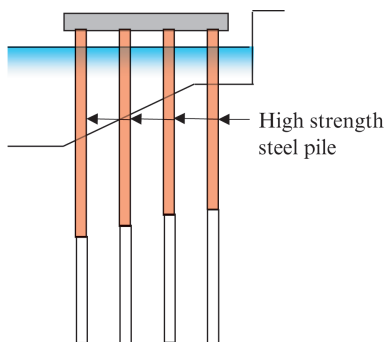


図 9 杭式栈橋構造への適用

Fig. 9 Application to piled pier structure

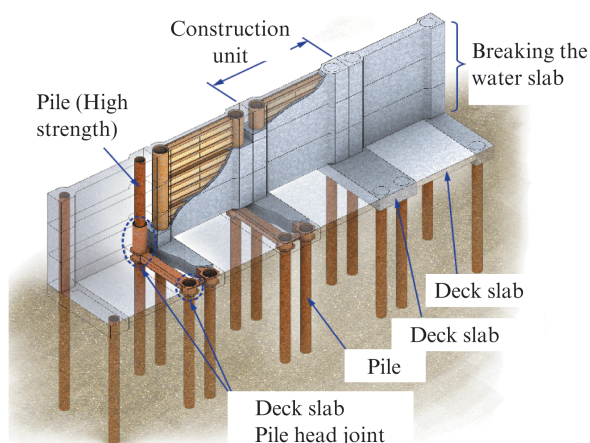


図 11 ハイブリッド防潮堤®への適用

Fig. 11 Application to Hybrid tide embankment™

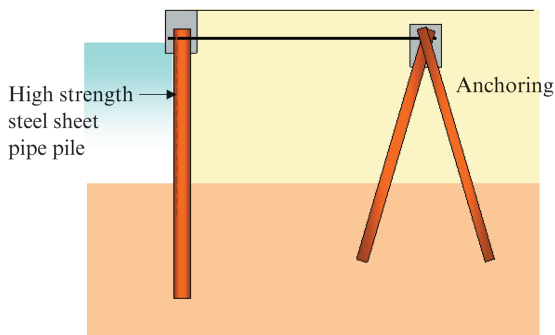


図 10 鋼管矢板式岸壁への適用

Fig. 10 Application to Steel sheet pipe pile type quay wall

参考文献

- 1) 日本道路協会. 道路橋示方書・同解説 I 共通編. 2017.11.
- 2) 日本港湾協会. 港湾の施設の技術上の基準・同解説. 2018.5.
- 3) 岸田英明, 高野昭信. 鋼管ぐいの座屈と端部補強. 日本建築学会論文報告集. 1973.12, 第 213 号.
- 4) 塩崎禎郎, 宇佐美俊輔, 大久保浩弥. 高強度鋼管杭 (引張強度 570 N/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. 2012, vol. 682, no. 2, p 366-372.
- 5) NETIS 新技術情報提供システム. “ハイブリッド防潮堤 (KTK-160017-A)”. 国土交通省. 2017-01-24 (最終更新日時).

6. おわりに

以上、高耐力鋼管杭の座屈特性と耐震性能を確認するための実験を行い、従来材と比べて同等以上の性能を有することを証明した。また、高耐力鋼管杭を適用することの効果は材料高強度化による鋼重（板厚）の低減のみならず、杭の剛性低減により地震などの外力作用時の曲げモーメントを低減できる効果もあることを示した。また、各分野の工法適用にあたっては、構造スリム化による工期短縮，工費削減に寄与できるものである。



恩田 邦彦



塩崎 禎郎



寺尾 名央