

径厚比を考慮した鋼管杭のM- ϕ 関係の提案

—港湾鋼構造の耐震性能評価の高精度化に貢献—

鋼管杭・鋼矢板技術協会 港湾技術委員会

1. はじめに

近年の鋼管杭式栈橋は、大水深化や設計地震力の増大に対応するため、大径鋼管杭が多用されている。その際、現行の港湾基準¹⁾では、鋼管杭の径厚比の制限はなく、経済合理性から径厚比の大きな鋼管杭（直径 D /板厚 $t=100$ 程度）が採用されることがある。

これらの構造物に対して地震応答解析による耐震性能照査を行う際、鋼管杭は梁要素でモデル化され、曲げモーメントと曲率関係（以降 $M-\phi$ 関係と表記）は、全塑性モーメントを折れ点とするバイリニア型が用いられてきた（図1参照）。ところが、図2（a）に示すシェル要素を用いた三次元FEM解析にて変形挙動を求めると、 $D/t=100$ （直径1500mm、板厚15mm、軸力比0.3）の径厚比の大きな鋼管杭は、全塑性モーメントに到達する前に局部座屈が発生し、耐力低下が発生するため危険側の照査となる恐れがある。一方、 $D/t=50$ （直径1500mm、板厚30mm、軸力比0.3）の径厚比の小さな鋼管杭は、降伏後に緩やかに曲げモーメントが増加し、 $\phi/\phi_p=4.0$ でも耐力低下が生じていない。

そこで、これらの特性を考慮可能な梁要素解析用の $M-\phi$ 関係を提案するため、シェル要素を用いた三次元FEM解析を網羅的に実施した。なお、本検討は（国研）海上・港湾・航空技術研究所と共同で行った^{2,3)}。

2. 三次元FEM解析による検討

(1) 解析概要

三次元FEM解析は、鋼管の载荷実験の再現解析に実績が豊富な汎用構造解析プログラムADINA⁴⁾を用いた。検討対象は、栈橋の上部工下端から仮想固定点までの鋼管杭（本検討では20m）として、下端を完全固定、上端を回転拘束して強制水平変位を与える解析を行った（図2参照）。この条件では、局部座屈が発生する端部は円形が保持され

た状態であるが、栈橋の仮想固定点は地中部であるため、地盤の条件によっては完全な円形を保持することは不可能である。そこで、端部とは離れた位置で局部座屈を発生させるため、杭の

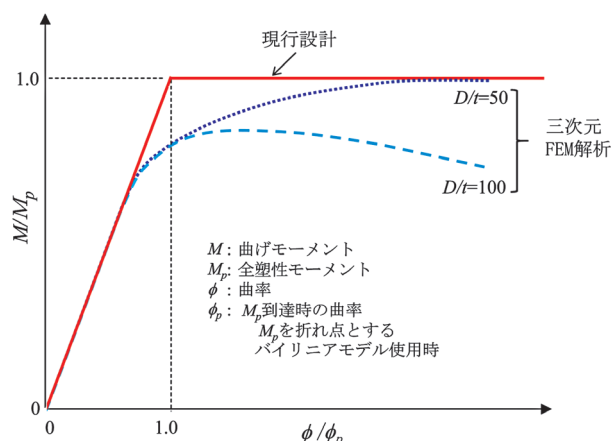


図1 鋼管杭の $M-\phi$ 関係

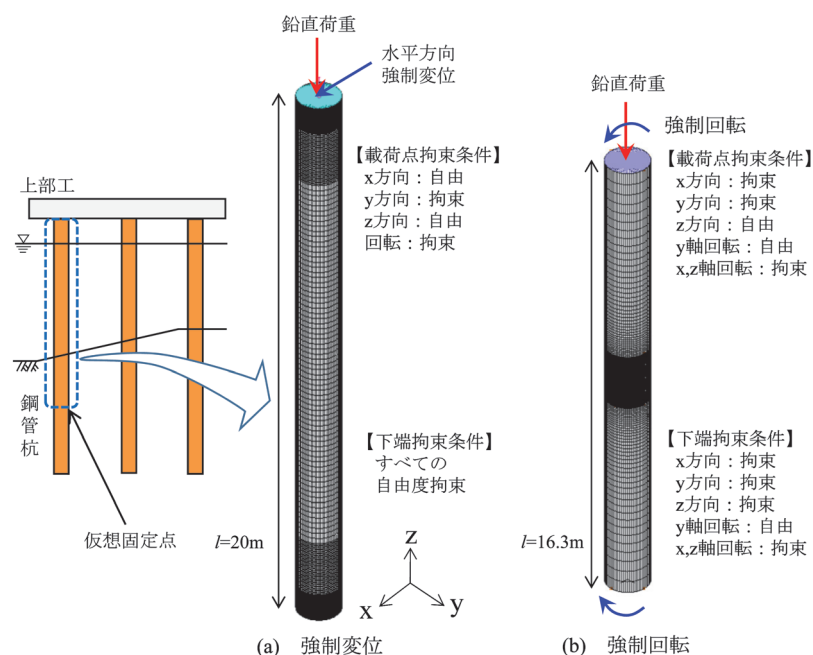


図2 鋼管杭の三次元FEM解析モデル

両端に強制回転を与える解析を実施した(図2(b)参照)。その際、図2(a)の強制変位荷重モデルと水平変位による曲げモーメントに占める付加曲げモーメントの割合を同一とするため、長さを16.3mとした。以降、図2(a)の解析を「円形保持」、図2(b)を「円形非保持」と表記する。解析は、表1に示す直径、径厚比、軸力比を対象とした。

(2) 解析結果の整理方法

解析結果の整理手順を図3に示す。曲げモーメントは下端の固定境界の反力から求めた。ここで、梁要素の解析では、断面力は1mピッチで分割された要素中心で評価することを念頭に、図3に示す曲げモーメント分布を

表1 解析ケース一覧

直径 (mm)	板厚 (mm)	D/t	l/r	軸力比
900	9	100	63.5	0.0~0.75
	13.5	66.7	63.8	
	18	50	64.1	
1200	12	100	47.6	0.0~0.75
	18	66.7	47.9	
	24	50	48.1	
1500	15	100	38.1	0.0~0.75
	22.5	66.7	38.3	
	30	50	38.5	
1800	18	100	31.7	0.0~0.75
	27	66.7	31.9	
	36	50	32.1	

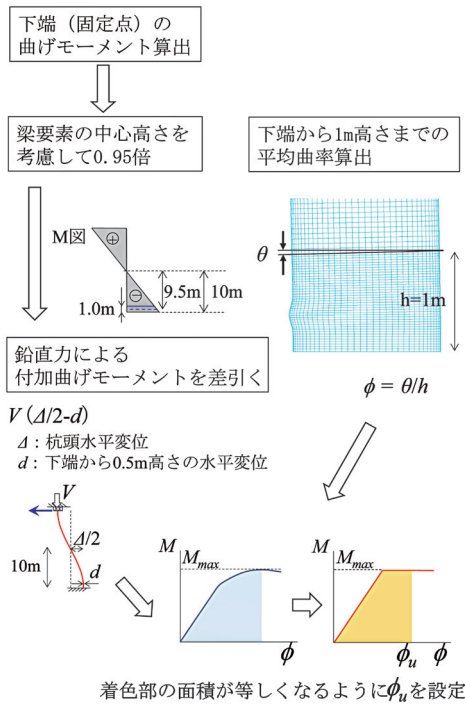


図3 解析結果の整理手順

仮定して5%低減した値を用いた。次に、微小変形理論の梁要素では考慮できない、鉛直荷重の偏心による付加曲げモーメントを差引いた($P-\Delta$ 効果)。曲率は下端から1m上方の傾斜角を求め、高さ1mで割ることで区間の平均曲率を算定した。これらの方法で $M-\phi$ 関係を求め、最大曲げ耐力 M_{max} とその際の曲率を抽出した。さらに、非線形梁要素へのバイリニア型の $M-\phi$ 関係の適用を念頭に、 M_{max} 発生時までの $M-\phi$ 曲線の下部の面積(着色部)とバイリニア型の面積が等しくなる曲率を限界曲率 ϕ_u とした。

(3) 解析結果：耐力評価と定式化

最大曲げ耐力 M_{max} と軸力の関係は、軸力ゼロ時の全塑性モーメント M_{p0} と降伏軸力 N_y で無次元化して整理した。一例を図4に示す。図中の実線は、平面保持が成立する前提の理論値の式(1)の値である。

$$M_p = M_{p0} \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{N}{N_y}\right) \quad (1)$$

式(1)よりも、解析結果は原点側に分布しており、径厚比が大きいほど原点側に寄る傾向がある。局部座屈の発生と、付加曲げモーメントが影響しているためである。また、円形保持に比べ円形非保持の方が、局部座屈の発生が早く発生

するため、原点側の結果となっている。

これらの結果を推定する式を構築するにあたり、圧縮降伏軸力と軸力ゼロ時の全塑性モーメントの低減は、岸田ら⁵⁾による局部座屈による降伏応力 σ_y の低減式(2)を採用した。記号の「 $'$ 」は、低減後の降伏応力を用いていることを表している。

$$\sigma_y' = \sigma_y(0.86 + 5.4t/D) \quad (2)$$

軸力による最大曲げ耐力の低減は、1から軸力比の n 乗を引いた値を掛ける式(3)とした。べき数 n は、解析結果を説明できるように、径厚比、細長比、円形保持条件で決まる式(4)で表現した。パラメータ α および β は表2の値で算定できる。また、降伏応力に関する補正係数 γ は(5)式とした。

$$M_{max} = M_{p0}' \left(1 - \left(\frac{N}{N_{yc}}\right)^n\right) \quad (3)$$

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

$$\gamma = \sqrt{235/\sigma_y} \quad (5)$$

ここに、 N_{yc} : 圧縮降伏軸力

(4) 解析結果：限界曲率と定式化

限界曲率 ϕ_u と軸力の関係を、それぞれ軸力ゼロ時の降伏曲率 $\phi_y'(N=0)$ と軸力 N_y' で無次元化して整理した。一例

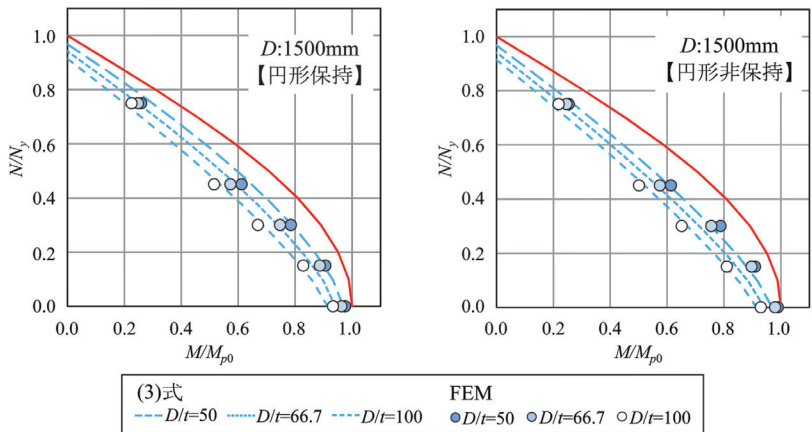


図4 $M-N$ 関係の一例

表2 べき数 n のパラメータ

	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

を図5に示す。限界曲率 ϕ_u は、径厚比が小さいほど大きくなる。

これらの結果を説明する限界曲率 ϕ_u の算定式は、式(6)で示す様に降伏応力低減後の降伏曲率 ϕ_y' に塑性率 μ を掛けることにした。ここで、 ϕ_y' は軸力比を考慮して式(7)で算定する。塑性率 μ は、径厚比、細長比、円形保持条件で決まる式(8)を用いることにした。パラメータ a および b は表3の値で算定できる。

$$\phi_u = \mu \phi_y' \quad (6)$$

$$\phi_y' = \frac{\sigma_y' Z}{EI} \left(1 - \frac{N}{N_{yc}'} \right) \quad (7)$$

$$\mu = \gamma (at/D + b) \quad (8)$$

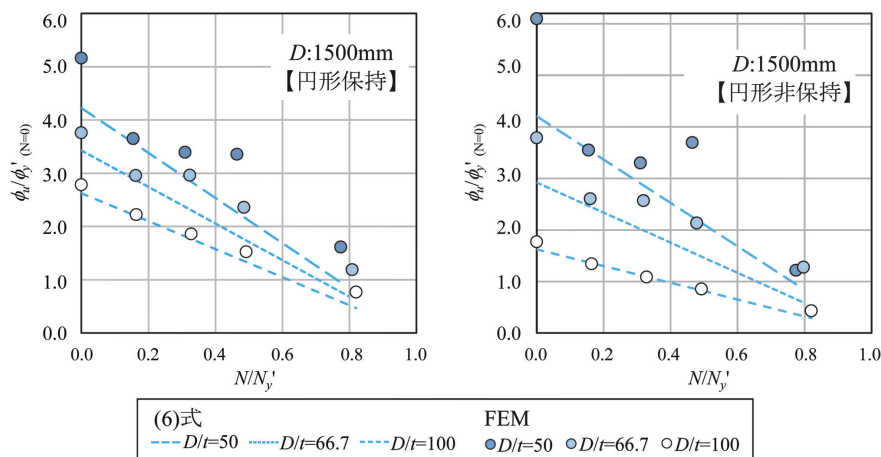


図5 限界曲率と軸力比の関係の一例

表3 塑性率 μ のパラメータ

	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

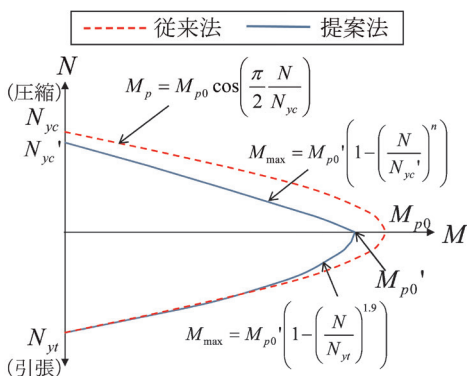


図6 M-N関係の定式化

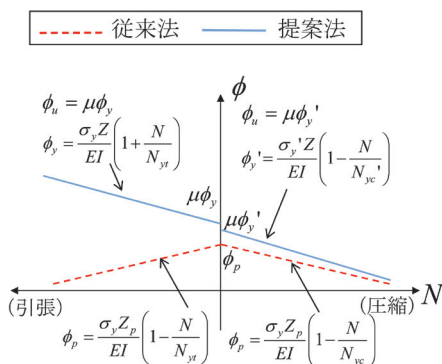


図7 限界曲率 ϕ_u の定式化

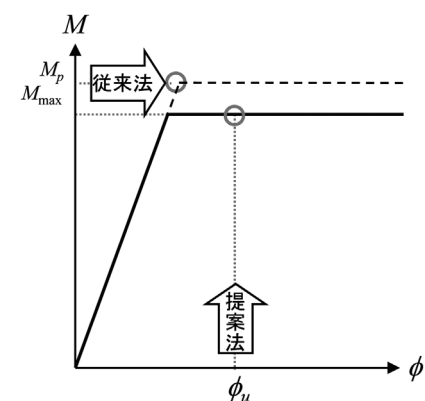


図8 従来法と提案法のM- ϕ 関係

ここに、 EI : 鋼管杭の曲げ剛性、 Z : 鋼管杭の断面係数

3. 新しいM- ϕ 関係を用いた耐震性能照査法の提案

上述の結果と、軸力引張時の検討をまとめると、 $M-N$ 関係は図6に、軸力比と限界曲率の関係は図7となる。それぞれ、従来法も併せて示す。提案法の $M-N$ 関係は、局部座屈や付加曲げモーメントを差引くため従来法よりも小さくなる。一方、限界曲率は、提案法の方が大きくなることが出来る。

これらを $M-\phi$ 関係として表示すると図8となる。従来法は、縦軸の全塑性モーメントへの到達を限界値とし

て耐震性能照査を行っていたが、提案法では、横軸の限界曲率への到達を限界値として照査することになる。

4. 提案法の精度確認

提案法の精度確認のため、図2(a)の三次元FEM解析結果と、提案法および従来法を用いた梁要素解析の結果の比較を行った。直径1500mm、板厚15mm、軸力比0.15に対する検討結果として、図9に下端部の曲げモーメントと曲率の関係を示す。従来法による梁要素解析では、三次元FEM解析結果よりも曲げモーメントが過大で、危険側の評価になっている。一方、提案法は、曲げモーメントとその際の曲率(図中○印)を良好に捉えている。したがって、提案法を用いることで、杭頭部の水平荷重とその際の変位の適切な評価が可能となる(図10参照)。

直径1500mmの鋼管杭(表1に示す条件)に関する水平荷重の比較結果を図11に示す。従来法では全て危険側の評価となっていたが、提案法は三次元FEM解析結果を良好に再現できている。

また、三次元FEM解析の最大荷重発生時の水平変位と、梁要素解析の限界曲率到達時(従来法では全塑性モーメント到達時)の水平変位の比較を図12に示す。ばらつきがあるものの、提案法の方が、三次元FEM解析結果に近い結果となっている。

以上のとおり、従来法に比べて提案法の方が、高精度で、安全側の評価が得られることを確認した。

5. 栈橋に対する事例検討

提案法が耐震性能照査法実務に与える影響を把握するため、-10m水

深の栈橋（鋼管杭の諸元は2種類）を対象とした地震応答解析を行った（図13参照）³⁾。解析はFLIP⁶⁾ Ver.740^{※)}を用いた。

従来法と提案法の比較は次の手順で実施した。鋼管杭の $M-\phi$ 関係を従来法で設定し、図14に示す入力地震動の最大加速度を調整して、地中部で全塑性モーメントに到達している杭が存在しない最大加速度を決定する。この入力に対して、提案法による $M-\phi$ 関係を用いて、地中部で限界曲率以下となる鋼管杭の諸元（板厚を変化させる）を決定する。

検討結果を表4に示す。径厚比 $D/t=100$ では、鋼管杭の上杭の板厚を1mm増加させる必要があったが、径厚比 $D/t=64$ では、上杭・下杭の板厚を2mm減らすことができた。

※) 非線形梁要素の材料定数のデータに「提案法」で用いる定数を直接入力できるように改良したバージョン

6. まとめ

港湾施設で用いられる鋼管杭を想定した載荷解析を実施し、径厚比、細長比、円形保持条件の違いを考慮した鋼管杭の $M-\phi$ 関係を提案した。この提案法を用いることで、径厚比の違いに応じた鋼管杭の変形性能を考慮した耐震性能照査が可能となる。

本報では、栈橋を対象として説明したが、各種港湾施設への適用方法は提案済みである。詳細は文献3)を参照されたい。

【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年。
- 2) 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年6月。
- 3) 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年12月。
- 4) ADINA R & D, Inc.: ADINA Theory and Modelling Guide, 2012.
- 5) 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、No.213、pp.29-38、1973.
- 6) 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.

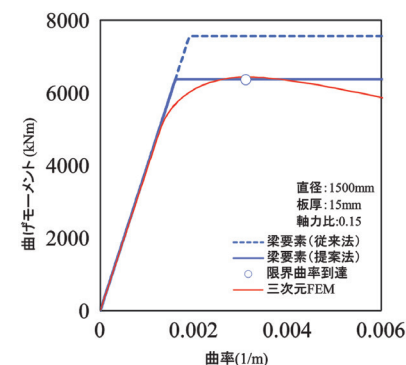


図9 三次元FEM解析と梁要素解析の比較（曲げモーメントと曲率の関係）

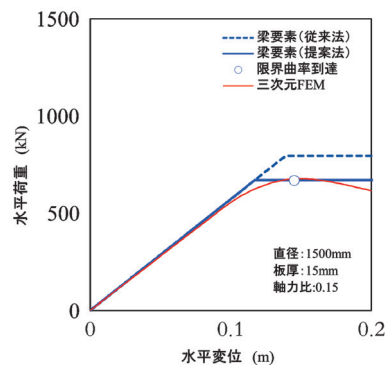


図10 三次元FEM解析と梁要素解析の比較（水平荷重と水平変位の関係）

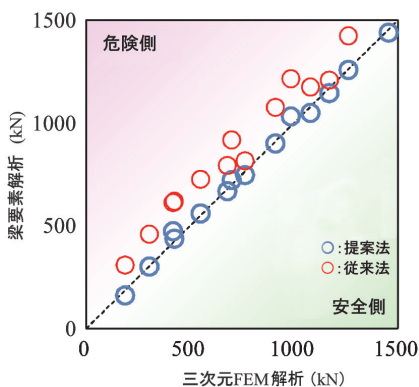


図11 三次元FEM解析と梁要素解析の比較（水平荷重）

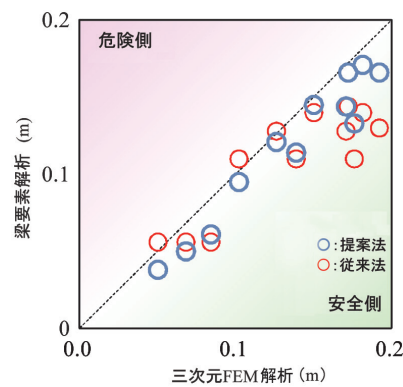


図12 三次元FEM解析と梁要素解析の比較（水平変位）

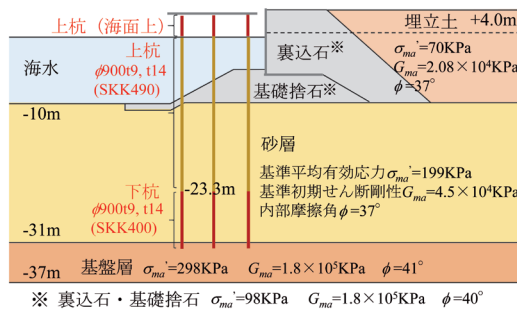


図13 -10m水深の栈橋モデル

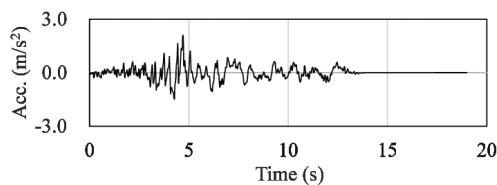


図14 入力地震動

表4 事例検討結果（鋼管杭の諸元）

直径 (mm)	従来法		提案法		最大加速度 (m/s ²)
	上杭板厚 (mm) (D/t)	下杭板厚 (mm) (D/t)	上杭板厚 (mm) (D/t)	下杭板厚 (mm) (D/t)	
900	9 (100)	9 (100)	10 (90)	9 (100)	5.1
900	14 (64)	14 (64)	12 (75)	12 (75)	5.6

従来法に比べ 〇: 板厚増 〻: 同等 〼: 板厚減