

径厚比の違いを考慮した鋼管杭のM- ϕ 関係について(その1:M- ϕ モデル算定法の提案)

港湾空港技術研究所 正会員 ○大矢陽介
 鋼管杭・鋼矢板技術協会 正会員 塩崎禎郎
 港湾空港技術研究所 正会員 小濱英司, 川端雄一郎

1. はじめに

近年の杭式栈橋は、大水深化や設計地震力の増大によって、大径鋼管杭が多用されるようになった。その際、港湾基準では適用箇所や条件による径厚比の制限はなく、経済合理性から大径厚比鋼管杭(直径 D /板厚 $t=100$ 程度)が採用されることが多い。これらの構造物の多くは、耐震強化施設として地震応答解析による耐震性能照査が行われるが、鋼管杭の曲げモーメントと曲率関係のモデル(以降M- ϕ モデルと表記)は、 D/t が比較的小さな(54程度以下¹⁾)ものを想定とした関係式(図-1参照)が用いられている。しかし、 $D/t=100$ の場合には全塑性モーメント M_p 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耐力的に危険な設計となっている。径厚比について制限が設けられている基準類もあるが、性能設計の観点から制限を設けない方がよいとの考えもあり、大径厚比まで対応したM- ϕ モデルを構築するための模型実験が行われた²⁾。しかし、大きな軸力を載荷した実験データが十分ではなく、高軸力比に対応したM- ϕ モデルは構築されていない。本報では、シェル要素を用いた三次元FEM解析を実施し、梁要素解析で用いるM- ϕ モデル構築で必要となる曲げ耐力と限界曲率を検討した。

2. シェル要素を用いた三次元FEM解析による検討³⁾

(1) 解析概要

三次元FEM解析は、鋼管杭の載荷実験の再現が可能であった文献4)の手法を採用した。解析は、汎用構造解析プログラムADINA⁵⁾を用いた。検討対象は上部工から仮想固定点までの領域(本検討では20m)を取り出し、下端を完全固定、上端を回転拘束して水平載荷した(図-2参照)。この条件では、局部座屈が発生する杭の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が発生させるため、杭の両端に強制回転を与える解析を実施した(図-3(b)参照)。その際、図-3(a)の強制変位載荷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-3(a)の解析を「円形保持」、図-3(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。

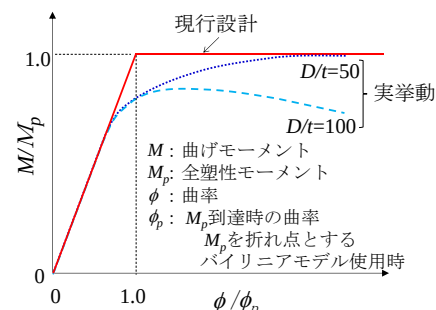


図-1 鋼管杭の耐力特性の概念図

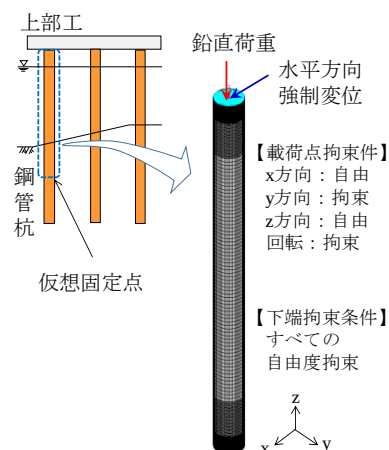
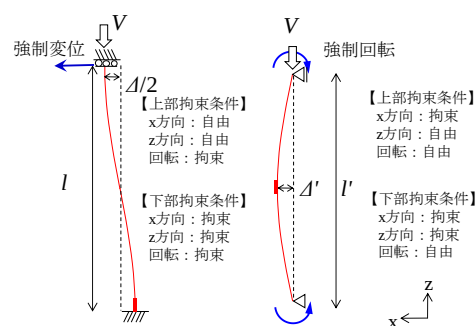


図-2 検討対象範囲と三次元 FEM モデル



(a) 円形保持 (b) 円形非保持

図-3 載荷方法の模式図

表-1 検討ケース

直径(mm)	900, 1200, 1500, 1800
D/t	50, 67, 100
長さ(m)	円形保持: 20 円形非保持: 16.3
軸力比	0.0, 0.15, 0.3, 0.45, 0.75
降伏応力	235N/mm ²

キーワード 鋼管杭, 杭式栈橋, 局部座屈, 全塑性モーメント, 耐震性能照査, 地震応答解析
 連絡先 〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1 港湾空港技術研究所 TEL:046-844-5058

(2) 解析結果：耐力の評価

図-4に曲げモーメント M と軸力 N の関係の一例を示す。杭の端部に生じる曲げモーメントは、 $D/t=50$ では理論式と同等の値となっているが、 $D/t=100$ では局部座屈の影響で理論式よりも小さくなった。また、図中には、鉛直荷重による付加曲げモーメント(PD 効果相当)を差し引き、梁要素のメッシュ分割(1m程度)を考慮した「微小変形解析の梁要素用」として補正した値 $M_{\max}$ も示している。この値を説明する式として、径厚比、細長比を変数とした式(1)を提案した。圧縮降伏軸力 N_{yc} と軸力ゼロ時の全塑性モーメント M_{p0} の低減は、岸田ら⁶⁾による局部座屈による軸圧縮応力低減の式(2)を採用した。低減後の記号にはプライムをつけた。式(1)のべき数 n は、径厚比、細長比の関数とした。軸力が引張時も含め詳細を図-5に示す。

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

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

ここで、 σ_y' は降伏応力である。

(3) 解析結果：限界曲率の評価

限界曲率 ϕ_u と軸力比の関係の一例を図-6に示す。径厚比が小さいほど限界曲率が大きくなるのがわかる。限界曲率 ϕ_u の算定式として、軸力ゼロ時の降伏曲率 ϕ_y' に塑性率 μ を掛けた式(3)を提案した。詳細を図-7に示す。

$$\phi_u = \mu \times \frac{\sigma_y' Z}{EI} \left(1 - \frac{N}{N_{yc}'} \right) \quad (3)$$

ここで、 Z は断面係数、 EI は曲げ剛性である。提案法では、全塑性モーメントを限界値とする従来法では考慮できなかった径厚比に応じた変形性能を評価することが可能となった。

3. おわりに

耐震性能照査における径厚比の違いを考慮した鋼管部材の $M-\phi$ モデルを提案するため三次元FEM解析を用いた検討を行った。解析結果の耐力および限界曲率は、円形保持条件、径厚比、細長比をパラメータとする算定式で説明できることがわかった。本提案法による事例検討について連報⁷⁾で紹介する。

参考文献

1) 日本建築学会：鋼構造限界状態設計指針・同解説，2010. 2) 川端雄一郎ほか：港湾構造物における鋼管の $M-\Phi$ 算定法，港湾空港技術研究所資料，No.1288，17pp.，2014. 3) 大矢陽介ほか：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，2017. 4) 塩崎禎郎：引張強度570N/mm²級スパイラル鋼管の正負交番載荷実験と数値解析，土木学会第71回年次学術講演会講演概要集，第I部門，pp.583-584，2016. 5) ADINA R&D, Inc：ADINA Theory and Modelling Guide，2012. 6) 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. 7) 塩崎禎郎，大矢陽介，小濱英司，川端雄一郎：径厚比の違いを考慮した鋼管杭の $M-\phi$ 関係について（その2：事例検討），第72回土木学会年次学術講演会概要集，2017.（投稿中）

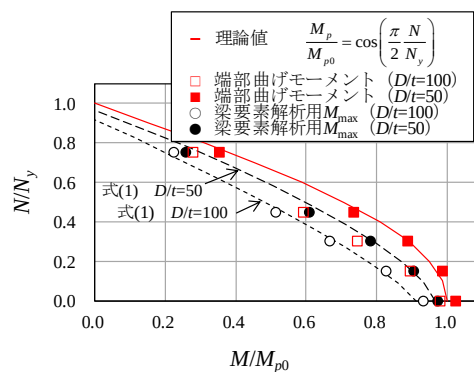
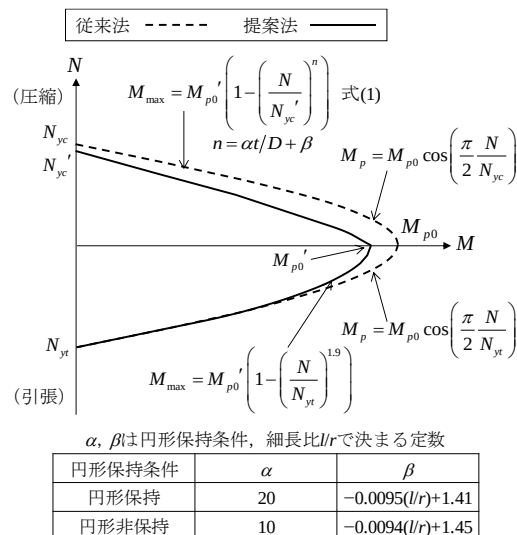
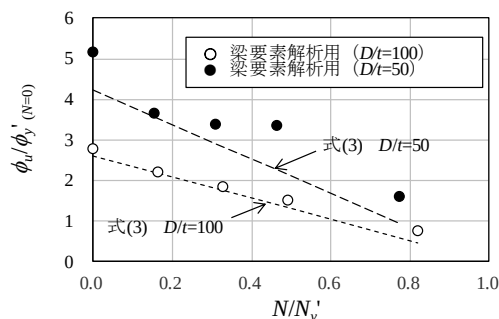
図-4 三次元 FEM 解析結果 ($M-N$ 関係)図-5 耐力 ($M-N$ 関係) に関する算定式

図-6 三次元 FEM 解析結果 (限界曲率)

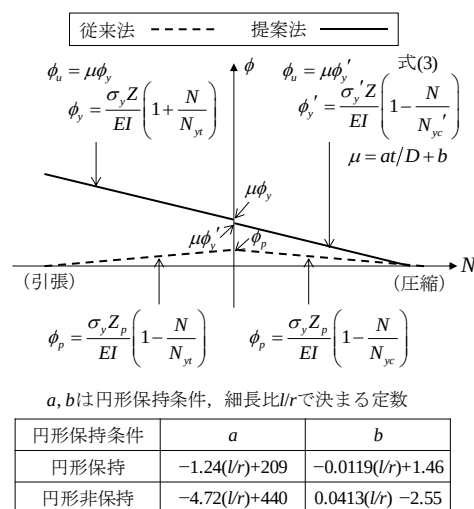


図-7 限界曲率に関する算定式