

径厚比の違いを考慮した鋼管杭の耐震性能照査法 ―港湾施設に対する検討―

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 大矢陽介, 小濱英司, 川端雄一郎

1. はじめに

港湾施設で用いられる鋼管杭は、径厚比に関する制限は特に無く、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。これらの港湾施設に対して耐震性能照査を行う場合は、地盤と杭の相互作用を考慮した地震応答解析で実施する。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（以降、 M_p と表記）を折れ点とするバイリニア型が標準的に用いられてきた。ところが、大径厚比の鋼管杭は、 M_p に到達せずに耐力低下が生じる懸念があり、危険側の照査となっている可能性がある。

そこで、筆者らは、鋼管杭の $M-\phi$ 関係に関して、三次元 FEM 解析で耐力・変形特性の検討を行い、新しい $M-\phi$ 関係と、それを用いた照査方法の提案を行った¹⁾²⁾。ここでは、その概要と、精度検証を行った結果を紹介する。

2. 鋼管杭の $M-\phi$ 関係

栈橋の上部工下端から仮想固定点までの鋼管杭を取り出した図-1(a)に示す三次元 FEM モデルを用いて、 $D/t=100$ （直径 1500mm, 板厚 15mm, 軸力比 0.3）と $D/t=50$ （直径 1500mm, 板厚 15mm, 軸力比 0.3）の水平載荷解析を行った。解析で得られた $M-\phi$ 関係を無次元して図-2 に示す。 $D/t=100$ では、 M_p に到達する前に耐力低下が生じているが、 $D/t=50$ の鋼管杭は、降伏後に緩やか M_p まで漸近していくことがわかる。

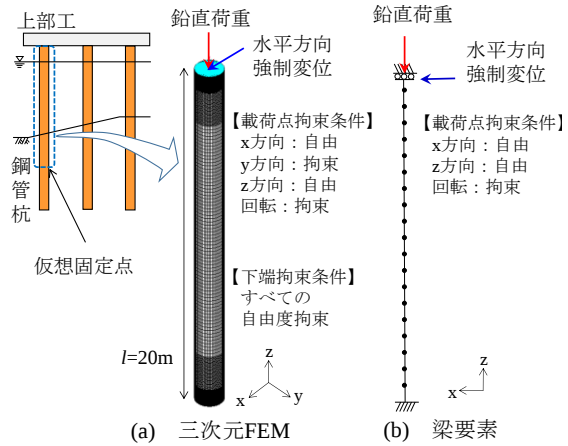


図-1 検討対象とする鋼管杭と解析モデル

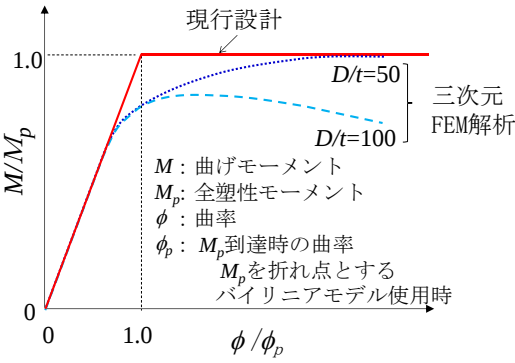


図-2 鋼管杭の耐力特性

表-1 耐震性能照査法の概要

従来法	提案法	【記号の説明】 σ_y : 降伏応力 σ'_y : 軸圧縮方向の降伏応力 $\sigma'_y = \sigma_y (0.86 + 5.4t/D)$ 「'」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															
【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】 $\gamma = \sqrt{235/\sigma_y}$																
		<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>$-0.0095/r$ $+1.41$</td><td>$-1.24/r$ $+209$</td><td>$-0.0119/r$ $+1.46$</td></tr><tr><td>円形非保持</td><td>10</td><td>$-0.0094/r$ $+1.45$</td><td>$-4.72/r$ $+440$</td><td>$0.0413/r$ -2.55</td></tr></table>		α	β	a	b	円形保持	20	$-0.0095/r$ $+1.41$	$-1.24/r$ $+209$	$-0.0119/r$ $+1.46$	円形非保持	10	$-0.0094/r$ $+1.45$	$-4.72/r$ $+440$	$0.0413/r$ -2.55
	α	β	a	b													
円形保持	20	$-0.0095/r$ $+1.41$	$-1.24/r$ $+209$	$-0.0119/r$ $+1.46$													
円形非保持	10	$-0.0094/r$ $+1.45$	$-4.72/r$ $+440$	$0.0413/r$ -2.55													

キーワード：鋼管杭, 栈橋, 耐震性能照査, 地震応答解析, $M-\phi$ 関係

連絡先 〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町 3-2-10 鉄鋼会館 6F 鋼管杭・鋼矢板技術協会 TEL:044-322-6222

これらの特性の全容を把握するため、港湾施設で用いられる鋼管杭の条件を網羅するように 80 ケースの三次元 FEM 解析を行い、図-1 (b) の梁要素解析で評価が可能な手法を提案した。

3. 提案する耐震性能照査法の概要

提案法の概要を従来法と比較して表-1 で説明する。従来法は M_p への到達の有無を照査しているが、提案法では「限界曲率」への到達を照査することにした。ここで、バイリニアモデルの折れ点となる最大曲げ耐力 M_{max} と限界曲率 ϕ は、①径厚比(D/t)、②細長比(l/r)、③円形保持条件（鋼管杭が円形を保持できる境界条件か）、④軸力比、⑤降伏応力で規定される。最大曲げ耐力は、 M_p よりも小さな値となるが、局部座屈の発生と、微小変形解析で考慮できない付加曲げモーメントを差引いていることが主因である。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た。

4. 提案法の精度確認

提案法の精度を確認するため、梁要素解析と三次元 FEM 解析の比較を行った。直径1500mm、板厚15mm、軸力比0.15の条件に対する下端部の曲げモーメントと曲率の関係を図-3 (a) に示す。従来法による梁要素解析は、三次元 FEM 解析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、最大曲げモーメントとその際の曲率を良好に捉えている。これによって、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っている（図-3 (b) 参照）。

表-2 に示す30ケースの比較を行った結果を紹介する。水平荷重の比較を図-4 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（従来法は M_p 到達時）の水平変位の比較を図-5 に示す。従来法は危険側から安全側まで大きくばらついているのに対して、提案法はすべて安全側の評価となった。特に変位が0.15m以上の領域で、提案法による評価が改善されていることわかる。

5. おわりに

鋼管杭の $M-\phi$ 関係に関して、三次元 FEM 解析で耐力・変形特性の検討を行い、最大曲げ耐力を折れ点とするバイリニア型の $M-\phi$ 関係と、限界曲率を照査点とする照査方法の提案を行った。提案法は、従来法に比べ、耐力・変形特性を適切に評価できることを三次元 FEM 解析と梁要素解析の比較検討で確認した。

参考文献 1) 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。

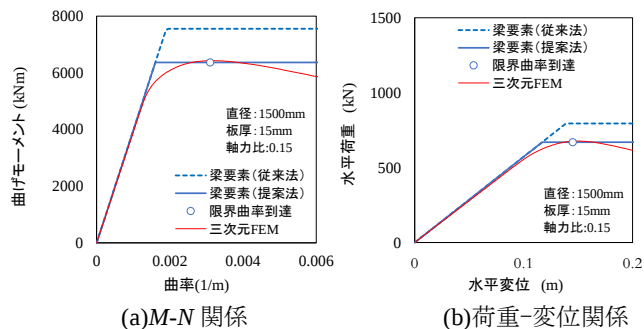


図-3 三次元 FEM 解析と梁要素解析の比較

表-2 検討ケース

直径(mm)	1200, 1500
D/t	50, 67, 100
長さ(m)	20
軸力比	0.0, 0.15, 0.3, 0.45, 0.75
降伏応力	235N/mm ²

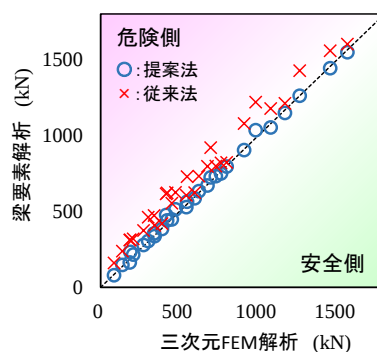


図-4 三次元 FEM 解析と梁要素解析の比較（水平荷重）

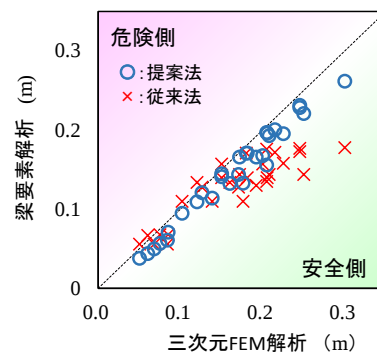


図-5 三次元 FEM 解析と梁要素解析の比較（水平変位）