斜面上の深礎杭基礎における FEM 解析手法について

深礎杭基礎、有限要素法、弾塑性モデル

(株)白石 正会員 金井塚淳一 彭芳楽 大内正敏
(株)CRC ソリューションズ 非会員 岡部直司
中部電力(株) 非会員 岡田英幸
東京工業大学 正会員 日下部治

<u>はじめに</u>

近年,高速道路の橋梁や送電線鉄塔などの基礎を,急斜面に建設するケースが増加している(**図-1**)。このため,合理的で経済的な斜面上の深礎杭基礎設計法の検討を目的として,適切な実験および数値解析を行う必要がある.本文は研究の一段階として,斜面上に設置された深礎杭基礎の水平支持力特性に関する弾塑性 FEM 解析手法について検討を行ったものである.

解析手法

水平支持力評価を目的として,CL級岩盤を対象とした実規模水平載荷試験が行われた¹⁾.地盤の斜面角度は50度に設定され た。試験体寸法は,杭径3m,根入れ7mであり,試験体背面より6連の4.9MNジャッキで載荷された.解析手法は no-tension の考慮・非考慮、2次元・3次元の弾塑性 FEM により、地盤物性値を選択して実験結果をシミュレートし、検討を行った(**表-1**).**図-2**に,解析対象とした3次元 FEM モデルを示す.節点数を6626とし,要素数は5874である.モデルの奥行き(載荷 軸直角方向の範囲)は,実験結果から前面地盤の破壊領域広がり幅が杭径の約4倍程度と推定されたため,モデル半断面の奥行 きを10mとした.モデルは対称性を考慮して実物の片側のみを取り出した.底面を除く側面は、面外方向を固定,面内方向を自 由とし、底面は面外・面内とも固定した.載荷方向は斜面方向であり,杭背面より水平荷重を載荷した.2次元モデルの節点数 は 836,要素数を784とし,3次元モデルにおける対称断面と同じモデルを用いた.また,2次元解析の要素は平面ひずみ要素 を用い、これらの要素を用いて単位奥行き幅当たりの諸量を算出している.一方,3次元解析は,9個の積分点を持つ8節点ソ リッド要素を基本的に使用した.構成モデルの共通項目として,深礎杭基礎は弾性体,岩盤は弾完全塑性体とし,降伏基準は Mohr-Coulomb 法を用いた関連流れ則を適用した.なお,Case-2,Case-4 および Case-5 においては,載荷により地盤における過 度な引張り応力の発生を制御するため,弾塑性解析に加えて,応力分配法に基づく no-tension 解析を行った.また、岩盤の引張 強度 _は粘着力の1/2 に設定された²。

解析結果と考察

1) 地盤物性値の検討:表-2 にそれぞれのケースに対応する物性値を示す.地盤は実験前の岩盤斜面上付近における標準貫入試 験結果からN値300相当の砂岩と推定し,すべてのケースを一層地盤と仮定した.Case-4 は日本道路公団設計要領³⁾により、ま た Case-5 は中部電力における過去の深礎設計例から岩盤のパラメータをそれぞれ決定した.図-3 に両ケースの杭頭荷重~変位 曲線を示す.Case-4 および Case-5 を実験結果と比較すると、Case -4 が降伏荷重の付近まで実験値の結果を精度よく再現してい ることが分かる。

2)2次元と3次元: Case-1 および Case-2 は,2次元 FEM 弾塑性解析により検討したケースである。ただし、Case-2 では no-tension を考慮している。一方、Case-3 および Case-4 は、3 次元 FEM 弾塑性モデル解析により検討したケースであるが、case-4 の場合 は no-tension の影響が考慮されている。以上の検討ケースで得られた杭頭の荷重 ~ 変位曲線をそれぞれ図-3 に示している。全体 的に見ると、3 次元解析で得られた計算結果は、2 次元解析よりは実験値と良く近似していることが分かる。ただし、2 次元の 杭頭荷重は単位幅相当の値である。また、図-4,5 は杭頭の水平変位 30mm 付近における Case-2 と Case-4 の塑性ひずみ分布図を それぞれに示しているが,図-5 から判断できる通り,3 次元解析を用いた方が地盤の塑性破壊領域を全般的に良く把握できる. 3) No-tension の検討: Case-1 および Case-3 の岩盤構成モデルは弾塑性モデルであるが, no-tension の影響が考慮されていない. 実験結果から杭頭の水平変位が急増した点を降伏荷重とすると、降伏変位は 20mm 付近であるが, Case-3 の荷重 ~ 変位曲線に注 目すると,降伏変位を越えても変位が増加すれば荷重が著しく増加する傾向にある.これは,杭背面の岩盤要素に過剰な引張り 力が発生するためと考えられる.一方,実験値および Case-4 は,降伏変位を越えた当たりで水平反力を杭背面で担うことはで きず,杭頭変位のみが増加し、荷重の増加は小さい傾向にある.つまり,杭背面において,実際には過剰な引張り力は発生せず, 杭背面と岩盤は剥離することが分かる.したがって,弾塑性モデルに No-tension モデルを加えれば,実際の杭と岩盤の挙動を精 度よくシミュレートすることができる.

<u>まとめ</u>

解析モデルの次元および no-tension の効果から,斜面上の深礎杭基礎における FEM 解析手法について検討を行った。その結果、 no-tension 効果を取り入れた 3 次元 FEM 弾塑性解析は妥当な解析手法と示された。また、地盤物性の評価によって、本解析では 日本道路公団設計要領から算定された岩盤解析パラメータが比較的に適切と認められた。

参考文献: 1)飯島,岡田,小宅,松島,加藤:亀裂性岩盤の斜面上深礎基礎の実規模水平載荷試験(その1),第35回地盤工学研究発表会,2000;2)土質 工学会:岩の工学的性質と設計・施工への応用,pp.219~225,1985;3)日本道路公団:設計要領第二集(橋梁保全編第四章),1997.

A study on FEM simulation of the pier foundation on slope: J. Kanaizuka, F. L. Peng, M. Ouchi (Shiraishi Corp.), N. Okabe (CRC), O. Kusakabe (TIT.)

表-1 解析ケース一覧表

	次元	物性値 の選択	地盤 構成モデル
Case-1	2 次元	口木道攺	弾塑性
Case-2		山平垣昭	弾塑性+No-tension
Case-3			弾塑性
Case-4	3 次元		弾塑性+No-tension
Case-5		中部電力 設計例	弾塑性+No-tension

表-2 杭および地盤の物性値

		地盤	
	杭	日本道路 公団規準 ³⁾	中部電力 設計例
变形係数 E [MN/m ²]	28,000	556	235
ポアソン比	0.1667	0.3	0.3
単位体積重量 [kN/m ³]	24	24	20
粘着力 c [MN/m ²]	-	0.1	0.117
内部摩擦角 [度]	-	42	35
引張破壊強度 _t [MN/m ²]		0.05	0.06



図-1 送電線鉄塔基礎イメージ



図-2 3次元 FEM モデル



図-4 2次元モデルにおける塑性ひずみ図分布(Case-2)





図-5 3次元モデルにおける塑性ひずみ分布図(Case-4)