

剛塑性有限要素法による実物大単杭の水平載荷試験の終局挙動評価

(株)シーテック 技術コンサルタント部
長岡技術科学大学
中部電力(株) 電力技術研究所 正会員

正会員 ○鈴木 隆
正会員 大塚 悟
上田 稔, 橋詰 正広

1 はじめに

杭基礎の設計を行う場合には、基礎の非線形挙動を精度良く把握する技術に加えて、さらに大変形領域における挙動や終局状態を把握することが求められる。そこで、実物大単杭（場所打ち杭、径 80cm）の大変形水平載荷試験における杭の終局挙動を精度良く把握することを目的として、これらの数値シミュレーションをダイレイタンシー特性に着目した剛塑性有限要素法により行った。本論文では、砂質土地盤中の長さが 4m の短杭を対象にして、杭頭の回転拘束による影響を考慮した解析を実施し、実構造物中の杭の終局挙動について考察した。

2 水平載荷試験

(1) 試験概要

杭基礎を対象にした大変形水平載荷試験は、これまでいくつか実施されているが、これらの主要な目的は、いずれも杭基礎の終局状態までの挙動を解明することである。この中でも、東京電力が実施している水平載荷試験¹⁾は、杭頭固定条件を実物大の単杭において実現していることなどが、特徴として挙げられる。また、砂質土地盤以外にも粘性土地盤を対象にした実験を行っていることや、有限長に分類される $L=4\sim 5\text{m}$ の短杭と半無限長に分類される $L=12\text{m}$ の長杭を用いることにより、地盤や杭長の差異による影響についても検討している。

(2) 解析モデル

解析モデルは、上記に示すように杭頭条件の違いにより杭の破壊形態が異なることを確認するため、現実用いられる基礎杭の杭頭条件に近い回転固定条件と、回転自由条件の2種類を設定した。図-1に示す回転固定条件では、杭頭において水平ローラーの条件を与えた。なお、このときの水平力が作用する高さは、 $GL+0.5\text{m}$ と載荷に支障の無い範囲で可能な限り小さくした。今回、水平載荷試験の砂質土地盤を対象に作成したメッシュ分割を、図-2に示す。

3 三次元剛塑性 FEM によるシミュレーション

(1) 物性設定方法と解析手法

既往のN値による算定式に基づく物性値評価結果を表-1に示す。ここに示すように解析に用いる入力物性は、粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ 、ダイレイタンシー角 ϕ_d および単位体積重量 γ のみである。なお、今回使用した剛塑性有限要素法解析では、Drucker-Prager の降伏関数に非関連流れ則を適用している。²⁾

(2) 解析結果と考察

解析結果の一覧を表-2に示す。物性値については、表-3に示すようにN値より地盤定数を決定した。柱状図から、地層ごとにN値の平均値を統計的に定めて代表値とした。各解析ケースにより得られた破壊形態の違いを比較するため、変位速度の分布と地表面の地盤変状領域（試験結果では杭頭変位 35mm に対して 10% 以上の変位を示した領域）を、図-3, 4に示す。図-3に示す杭頭回転拘束時の破壊形態は、深部まで地盤の変形が見られるなど、水平変形が卓越していることがわかる。また、このときの極限支持力の値については、解析結果のほうが試験結果に対して、大きな値を示したが、試験時には荷重が大きくなると杭の降伏による剛性低下および損傷の影響も発生していると考えられる。一方、図-4に示す杭頭回転自由にした場合の破壊形態では、地盤上部の塑性化により、回転中心が底面から少し離れた位置の杭体前方部に認められる。この場合、極限支持力は解析結果のほうが安全側となった。なお、地表面の地盤変状領域および変位（速度）の深度分布については、解析結果（最大変位速度の20%を示す領域）が概ね試験結果と一致していることから、杭に作用する地盤反力特性を解析により明確にできることを確認した。

4 まとめ

剛塑性有限要素法では、非線形弾性の場合に考慮できなかったダイレイタンシー特性を考慮した解析を行えることから、今回のように砂質土地盤以外にも砂礫等の幅広い地盤に応用できる。今後は、より多くの事例に対して適用し、本手法の支持力や破壊形態に対する推定精度を検証していきたいと考える。

キーワード：砂質土地盤，実規模単杭，水平載荷試験，剛塑性有限要素法，ダイレイタンシー，短杭
〒459-8522 名古屋市緑区大高町字北関山 20-1 中部電力(株) 電力技術研究所内 (株) シーテック 技研工事事所
TEL 052-621-6101

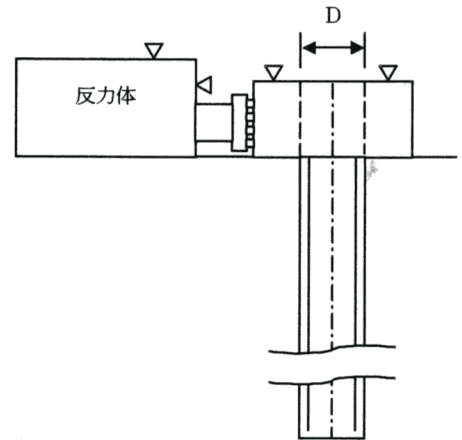


図-1 解析モデルの概要
(杭頭回転固定条件)

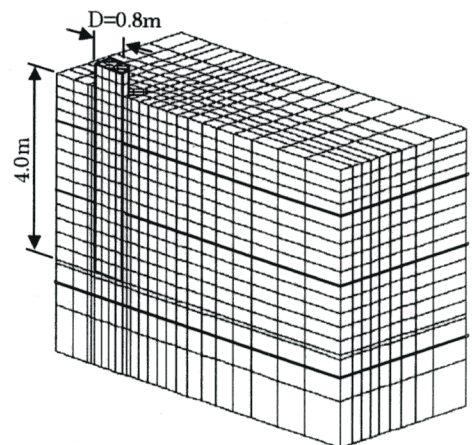


図-2 解析メッシュ分割図
(砂質土地盤・短杭 4m)

表－1 物性値評価結果

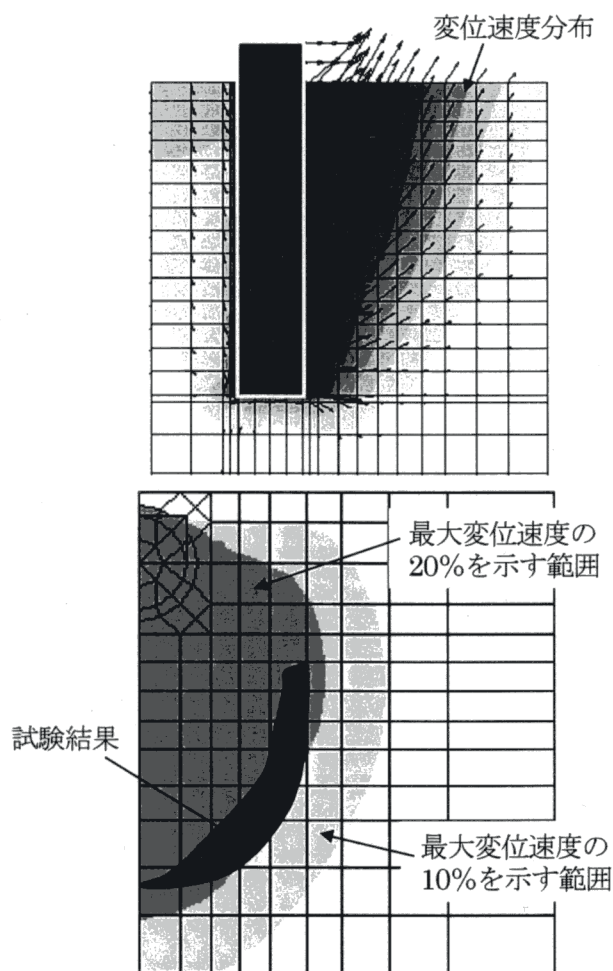
対象地点	ケース名	基礎幅 D(m)	杭頭固定	層厚	地盤 (N 値)	ϕ ($^{\circ}$)	ϕ d ($^{\circ}$)	c (kN/m ²)	γ (kN/m ³)	載荷面積 (m ²)	実験値 (kN)
砂地盤	CASE-1	0.8 (L=4m)	回転固定	0～1	3	22	0	10	18	0.4	540
	-1～2.5			5	24	0	10	18			
	CASE-2		回転自由	-2.5～4.5	12	28	0	20	18		336 (推定値)
				-4.5～6.0	15	30	0	20	18		

表－2 解析結果一覧

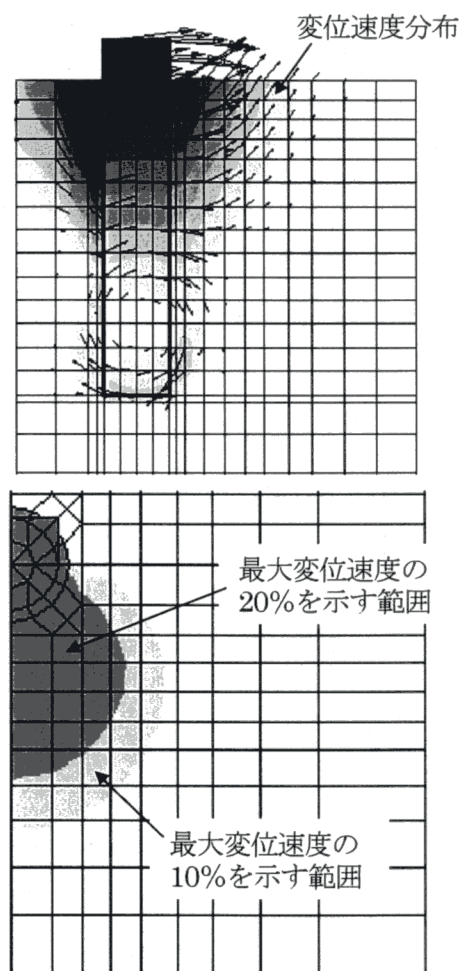
対象地点	ケース名	基礎幅 D(m)	杭頭固定	実験値 (kN)	解析結果	
					支持力 (kN)	評価
砂地盤	CASE-1	0.8 (L=4m)	回転固定	540	700	1.30
	CASE-2		回転自由	336	220	0.65

表－3 地盤定数算定式

地質	粘着力 c (kN/m 2)	内部摩擦角 ϕ ($^{\circ}$)
砂質土	(N<10) c=10	$\phi = \sqrt{15 \cdot N} + 15$ $\phi \leq 40$
	(10≤N<30) c=20	
	(30≤N<50) c=30	



図－3 破壊形態図
【砂質土（杭頭回転拘束時）】



図－4 破壊形態図
【砂質土（杭頭回転自由時）】

<参考文献>

- 1) 佐藤博, 大矢孝, 松島学: 実物大単杭の水平載荷実験における杭と砂質土地盤および粘性土地盤の挙動, 土木学会論文集, No.715/III-60, pp357-367, 2002.9
- 2) Tamura, T: Rigid - Plastic Finite Element Method in Geotechnical Engineering, Computational Plasticity, Current Japanese Material Research, vol.7, Elsevier, pp.135-164, 1990