

地中におけるRC杭の非線形モデルに関する検討

（財）鉄道総合技術研究所 正会員 永尾拓洋，棚村史郎，室野剛隆，神田政幸
東急建設(株) 正会員 宮城敏明，玉井真一，黒岩俊之

1. はじめに

新しい鉄道基準では，基礎構造物の耐震性能を基礎の安定レベルにより定めており，照査指標に部材の損傷レベルなどを用いている．地中における杭部材の損傷レベルの照査にあたっては，非線形モデルにM - 関係を用いるが，これは気中の片持ち部材における塑性ヒンジ部の平均曲率としてモデル化したものであり，部材周面に地盤が存在し，変形モードや支持条件が異なる地中部のモデルとして適正かは定かでない．

本研究では，地中のRC杭の非線形モデルを検討するため，水平地盤バネをコイルバネにより模擬した載荷試験装置を開発し，実験を行ったので報告する．

2. 実験結果

(1) 実験概要

実験に使用する鉄筋コンクリート模型杭の寸法は載荷実験の実績が十分に有り，実験データ数が多い 600mm の柱の 1/2 スケールとした．また引張鉄筋比及び帯鉄筋比は，現行の耐震標準におけるRC部材の変形性能評価式の基礎となっている実験パラメータの範囲内¹⁾とし，地盤剛性については2種類の硬さを設定している．試験ケースを表1に示す．なお試験体挙動の予測として，図1に示すような鉄道基準（負勾配有り），並びにH12-UNIT1の試験結果²⁾でM - 関係に負勾配が生じ難かったことから，解析モデル（負勾配無し）を用いた非線形骨組解析を行っている．

(2) 荷重 - 変位関係（P - 関係）

表2に試験結果を，代表として図2にH13-UNIT1，図3にH13-UNIT2の杭頭部のP - 関係を示す．RC部材の配筋は同じでも，地盤剛性の違いにより破壊形態に差が生じているが，履歴曲線はどちらもエネルギー吸収に優れた紡錘型曲線となっている．ここで，H13-UNIT2と実際のN値 = 3.5程度の砂地盤中で載荷試験を行った文献³⁾の履歴曲線は，最終ループで急激に荷重低下を起し，座屈後すぐに軸方向鉄筋が破断するなど，似たような結果となっている．なお各試験体の結果は，解析モデル（負勾配無し）の方が試験結果の傾向を再現できている．

(3) 曲げモーメント - 曲率関係（M - 関係）

表3に鉄道基準と実験値の曲率を，代表として図4にH13-UNIT1とH13-UNIT2の最大曲率が生じる要素のM - 関係を，図5並びに図6にH13-UNIT2の-4.5_y時の曲げモーメント分布と曲率分布を示す．せん断破壊したケースでは，載荷終了まで損傷レベル2

表1 試験ケース

試験体名	地盤剛性		引張鉄筋比 Pt (%)	帯鉄筋比 Pw (%)
	バネ定数 (kN/mm)	N値		
H12-UNIT1	5	7	1.02	0.63
H13-UNIT1	5	7	0.81	0.63
H13-UNIT2	2.5	3.5	0.81	0.63
H13-UNIT3	2.5	3.5	0.81	0.28

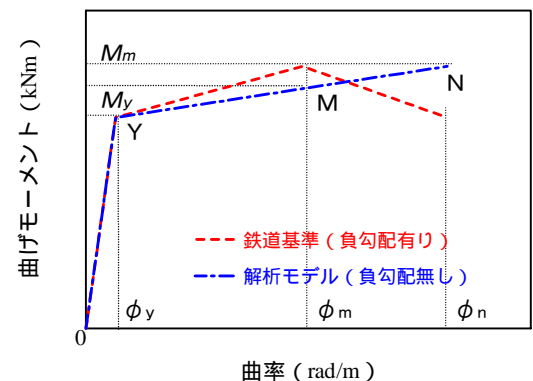


図1 解析に用いたM - モデル

表2 試験結果（荷重 - 変位）

試験体名	載荷方向	最大荷重点		終局点		破壊形態
		荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)	
H12-UNIT1	正側	238.1	90.0	234.2	105.2	せん断破壊 注)
	負側	255.8	100.5	同	左	
H13-UNIT1	正側	221.7	94.5	207.0	108.3	せん断破壊 注)
	負側	197.2	94.7	174.1	108.2	
H13-UNIT2	正側	207.5	131.4	178.5	145.4	曲げ破壊
	負側	197.2	130.7	159.4	145.4	
H13-UNIT3	正側	187.8	101.7	同	左	せん断破壊 注)
	負側	193.2	101.5	同	左	

注) せん断破壊：加力点と最初のパネ支点間でのせん断破壊

key words：地中，コイルバネ，RC杭，非線形モデル，曲率，等価塑性ヒンジ

連絡先：〒185-8540 国分寺市光町 2-8-38 （財）鉄道総合技術研究所

限界に相当する部材の圧壊，被りコンクリートの剥落は観察されなかった．一方，曲げ破壊したケースでは，最大荷重点～終局点付近でほぼ損傷レベル2に相当する損傷が発生しており，その時の最大荷重点の平均曲率 $ex1$ は，おおよそ鉄道基準における m ～ n の間となっている．またM - 関係から，P - 関係で荷重低下が起きるまでは同じく曲げモーメントの低下は生じていない．せん断破壊で実験を終了している H13-UNIT1 については，部材が十分な変形性能を発揮する前に，M - 関係において除荷が生じているように見られる．曲率分布からは，部材には比較的大きな曲率がなだらかに発生しており，鉄道基準（負勾配有り）のように曲率は1要素に集中していない．曲げモーメント分布並びに曲率分布のいずれも，負勾配の無い非線形モデルによる解析の方が試験結果の傾向を再現できる．最後に歪みゲージから，全ての試験ケースにおいて，+1 y を超えた時点から3Dを超える広い範囲で軸方向鉄筋が降伏していることが判明した．

3. おわりに

今回のパラメータの範囲では，地盤剛性，帯鉄筋および引張鉄筋比に関係無く，模擬地盤中のRC杭では荷重低下が生じ難いことが判明した．載荷試験結果の荷重低下は軸方向鉄筋の座屈現象と関係があると推測され，最近ではRC部材のポストピークの挙動を精度良く把握する目的で，鉄筋の構成則に弾塑性座屈モデルを用いている文献も見られる．今後，詳細なM - モデルの提示には更なる検討が必要であるが，地中のRC杭の非線形モデルに対して，以下の改善事項があると考えている．

- 杭頭接合部以外の地中部の部材要素については，負勾配の無い非線形モデル（曲率により制限）を設定．
- 変形性能の過大評価防止の措置である，等価塑性ヒンジ長1D以内に降伏範囲長を制限する措置の緩和．

部材の損傷レベル2に相当する曲率の制限値の再検討．

参考文献

1) 瀧口将志，渡邊忠朋他：RC部材の変形性能の評価，鉄道総研報告，Vol.13, No.4, 1999 2) 永尾拓洋，棚村史郎他：模擬地盤（コイルパネ）中におけるRC杭の復元力特性，第37回地盤工学研究発表会，投稿中 3) 福井次郎，木村嘉富他：砂地盤中における単杭の交番水平載荷試験，土木技術資料，Vol.40, No.3, 1998

表3 試験結果（曲率）

試験体名	曲率(rad/m)				
	鉄道基準			実験値	
	y	m	n	ex1	ex2
H12-UNIT1	0.0113	0.0990	0.1687	0.0814 ~0.170	0.102 ~0.205
H13-UNIT1	0.0110	0.1193	0.1968	0.104 ~0.125	0.119 ~0.126
H13-UNIT2	0.0112	0.1193	0.1915	0.0946 ~0.165	0.132 ~0.384
H13-UNIT3	0.0110	0.0793	0.1516	0.0770 ~0.110	0.0770 ~0.110

ex1：最大荷重点の平均曲率（最大曲率が生じる要素近傍の値）
ex2：終局点の平均曲率（最大曲率が生じる要素近傍の値）

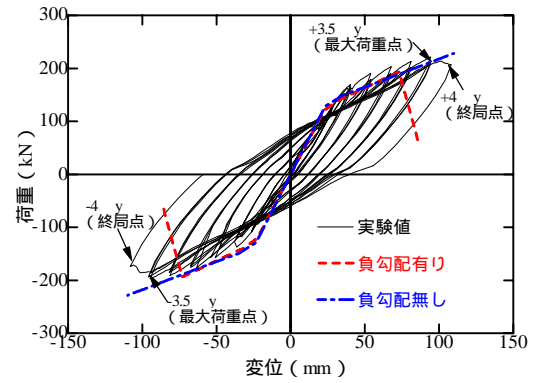


図2 P - 関係 (H13-UNIT1)

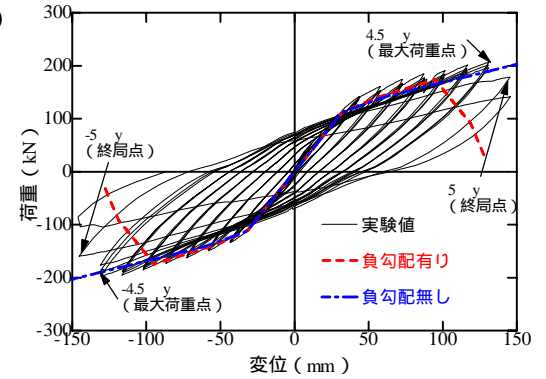


図3 P - 関係 (H13-UNIT2)

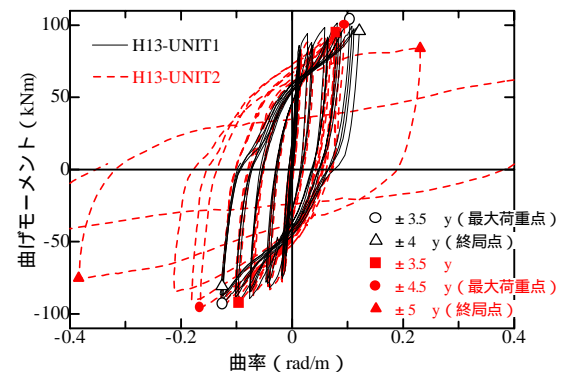


図4 M - 関係 (要素)

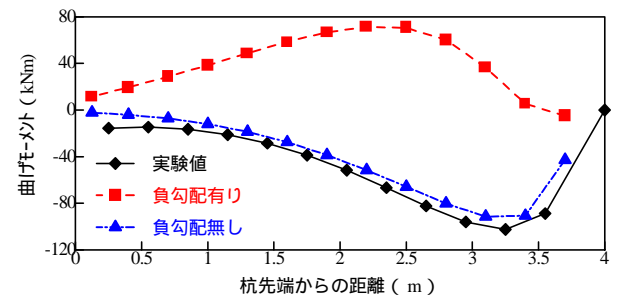


図5 曲げモーメント分布 (H13-UNIT2 -4.5 y時)

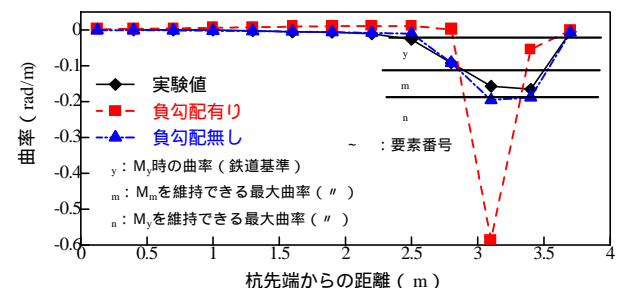


図6 曲率分布 (H13-UNIT2 -4.5 y時)