

土圧を受けるRC杭の変形性能の評価方法

今村年成¹・室野剛隆²

¹正会員 工修（財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

²正会員 工博（財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

1. はじめに

L2 地震動のような大規模地震動を対象として構造物の耐震設計を行う場合、部材の曲げ変形特性を適切に評価することは重要である。

RC 部材の曲げ変形特性に関する研究としては、これまでも実物大模型や縮小模型を用いた载荷試験が多数行われており^{1)・3)}、横拘束筋を密に配置すれば、①軸方向鉄筋の座屈やはらみ出しが抑制されること、および②コアコンクリートが拘束されることのために、部材靱性能を高められることが明らかにされている。また、部材の曲げ変形特性の評価方法としては、①部材を梁要素でモデル化し、正負交番载荷試験の結果をもとに、部材レベルで曲げ変形特性を定義する方法³⁾、あるいは②鉄筋とコンクリートに構成則を与え、ファイバー要素や有限要素法などを用いて部材の曲げ変形特性を算出する方法⁴⁾などが提案されている。

しかしながら、これらの研究では、その基本となる载荷試験は気中で行われたものがほとんどであり、杭のような地盤からの拘束圧を受ける部材に対しても、気中での実験により得られた曲げ変形特性をそのまま適用することが適切であるか否かについては検討の余地が残る。

そこで、筆者らのひとり、周辺地盤による拘束効果が RC 部材の曲げ変形特性に与える影響を把握するために、地盤をコイルバネで模擬した模型杭の正負交番载荷試験を実施し、拘束圧を受ける RC 部材は、気中部材よりも大きな靱性能を発揮することを確認した²⁾。

本研究では、上記の実験結果を踏まえ、地盤による拘束圧をそれと等価な拘束圧を与える帯鉄筋に換算して RC 部材の曲げ変形特性を評価する手法を提案した。そして、上記の実験結果を正解に位置付け

表-1 鉄筋の材料試験結果

種類	引張降伏強度	ヤング係数
軸方向鉄筋	380 N/mm ²	191 kN/m ²
帯鉄筋	387 N/mm ²	186 kN/m ²

表-2 コンクリートの材料試験結果

呼び強度	圧縮強度	ヤング係数
24	33.28 N/mm ²	27.1 kN/m ²

た数値シミュレーションを行い、提案手法の妥当性を確認した。

2. 模擬地盤(コイルバネ)を用いた模型実験⁵⁾

(1) 実験概要

供試体は、300mm×300mm の矩形断面であり、その長さは载荷点位置から杭先端まで4.3mである。軸方向鉄筋は16-D13、帯鉄筋は D10-1組-ctc75を配置しており、引張鉄筋比は0.81%、帯鉄筋比は0.63%である。これらは、現行の鉄道構造物の耐震設計基準⁶⁾における RC 部材の曲げ変形特性の適用範囲内で設定している。実験で使用した鉄筋とコンクリートの材料試験結果をそれぞれ表-1、表-2に示す。

コイルバネは、载荷点位置から杭先端に向かって、450mm離れの位置を起点に300mm間隔で合計12個取り付けられている。また、バネ定数は2.5kN/mmであり、線形弾性範囲内で挙動するように設定している。

载荷パターンは、模型杭の最外縁軸方向鉄筋のひずみが降伏ひずみに達したときの载荷点変位 ($1\delta_y=29\text{mm}$) を基準にして、 $0.5\delta_y$ ずつ振幅を増やしていき、正、負それぞれ3サイクルずつの繰返しとした。

(2) 実験結果

載荷点での荷重-変位関係を図-1に示す。図中の実線は実験結果を示す。点線（従来モデル）は、現行の耐震設計基準⁹で規定される RC 部材の曲げ変形特性を用いた数値シミュレーション結果である。なお、一点鎖線（提案モデル）は、第3章で提案する曲げ変形特性での計算結果であり、これについては後述する。

実験結果に着目する。荷重が108kN に達したときに最外縁の軸方向鉄筋が降伏し、その後 $4.0\delta_y$ までは変位の増加に伴い部材耐力の上昇が認められた。 $4.5\delta_y$ 載荷時の1サイクル目においてコンクリートの圧壊および軸方向鉄筋の座屈傾向（コンクリート表面のひび割れ観察による）が観察され、3サイクル目においてかぶりコンクリートの剥落および軸方向鉄筋の座屈が確認された。 $5\delta_y$ 載荷時には1サイクル目でかぶりコンクリートが大きく剥落した。2サイクル目には圧縮側で軸方向鉄筋が破断し、耐力の急激な低下が生じた。以上より、 $4.5\delta_y$ 載荷時を最大耐力点、 $5\delta_y$ 載荷時を終局点と判定した。

次に、現行の耐震設計基準に準拠した数値シミュレーション結果（図中の点線）に着目する。最大耐力点での変位をみると、解析値は実験値を約20%過小評価することが分かる。これより、拘束圧を受けるRC部材は、現行の耐震設計基準で規定される曲げ変形特性よりも大きな靱性能を発揮することが分かる。

3. 拘束圧下でのRC部材の非線形モデル

(1) 基本的な考え方

地中部材では、コアコンクリートには帯鉄筋による拘束圧の他に、周辺地盤からの土圧による拘束圧も作用する。そのため、気中部材よりも大きな靱性能を発揮することが予想される。

本研究では、このような周辺地盤による拘束圧の効果を、それと等価な拘束圧を与える帯鉄筋に置き換えて、部材靱性能の向上を評価することを考えた。以下に、その方法について説明する。

(2) 等価帯鉄筋比 p'_w の算出

地盤による拘束圧を帯鉄筋による拘束圧に換算する際には、帯鉄筋が所定の間隔で配置されているため、帯鉄筋と帯鉄筋の間においては、コアコンクリート内においても拘束圧が作用しない緩み領域が生じる（図-2 参照）。この影響を考慮するために、Mander ら¹⁾の提案する拘束有効係数 k_e という概念

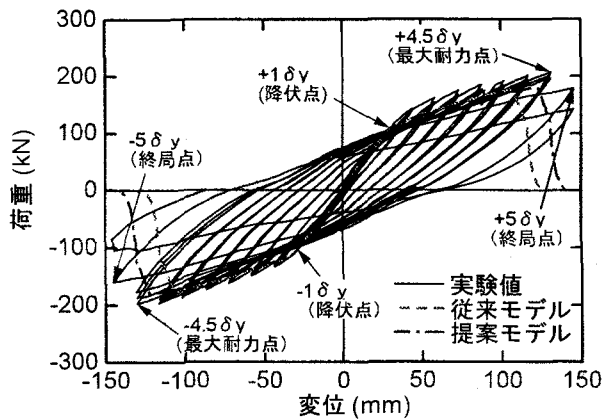


図-1 載荷点位置での荷重変位曲線

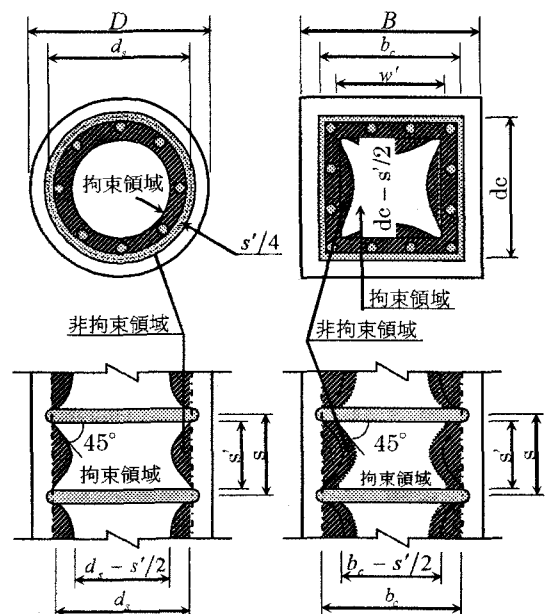


図-2 帯鉄筋によるコアコンクリートの拘束

を導入した。拘束有効係数 k_e とは、実際に拘束されるコアコンクリートの面積 A_e （図中での拘束領域の面積）と、帯鉄筋によって囲まれるコアコンクリートの面積（厳密には、軸方向鉄筋の断面積を差し引いたもの） A_{cc} との比であり、 $k_e = A_e / A_{cc}$ で算出される。

円形断面の場合、材軸方向への応力分布を帯鉄筋配置位置から 45° の初期勾配で始まる放物線であると仮定すると、拘束有効係数 k_e は式(1)で求めることができる。

$$k_e = \left(1 - \frac{s'}{2d_s}\right)^2 / (1 - \rho_{cc}) \quad (1)$$

ここに、 s' は隣接する帯鉄筋間の鉛直方向の純あき、 d_s は帯鉄筋の中心線での直径、 ρ_{cc} はコアコンクリートの断面積に対する軸方向鉄筋の断面積の比である。

また、矩形断面においては、材軸方向への応力低減の他に、材軸直交断面においても帯鉄筋の辺部において応力が低減することに留意すると、拘束有効係数 k_e は、式(2)で求めることができる。

$$k_e = \frac{\left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w_i')^2}{6 \cdot b_c \cdot d_c}\right) \cdot \left(1 - \frac{s'}{2b_c}\right) \cdot \left(1 - \frac{s'}{2d_c}\right)}{(1 - \rho_{cc})} \quad (2)$$

さて、帯鉄筋で囲まれるコアコンクリートが緩み領域なく全断面が拘束されているものと仮定すると、部材断面でのコアコンクリートと帯鉄筋の力の釣り合いは図-3のようになる。同図より、円形断面の場合、帯鉄筋によるコアコンクリートの拘束圧 f_l は、式(3)より算出されることが分かる。

$$f_l = \frac{2f_{yh} \cdot A_{sp}}{s \cdot d_s} \quad (3)$$

ここで、 f_{yh} は帯鉄筋の引張降伏強度、 A_{sp} は帯鉄筋1本当たりの断面積、 s は帯鉄筋のピッチである。これに拘束有効係数 k_e を乗じることで、材軸方向での拘束圧の緩みを考慮したコアコンクリートの拘束圧 f_l' が算出される。こうして算出された拘束圧 f_l' は、部材靱性能の向上という観点からは、地盤による拘束圧 p に等しいと考えられるので、式(4)が成り立つ。

$$p = f_l' \quad (4)$$

また、杭径を D とすれば、帯鉄筋比 p'_w は、 $p'_w = (2 \cdot A_{sp}) / (D \cdot s)$ と定義されるので、地盤による拘束圧と等価な拘束圧を与える帯鉄筋比 p'_w は、式(5)により算出される。以後、この帯鉄筋比 p'_w を等価帯鉄筋比と呼ぶことにする。

$$p'_w = \frac{p \cdot d_s}{k_e \cdot f_{yh} \cdot D} \quad (5)$$

同様に、矩形断面の等価帯鉄筋比 p'_w は、式(6)により算出できる。ここに、 B は部材断面の長辺の長さである。

$$p'_w = \frac{p \cdot b_c}{k_e \cdot f_{yh} \cdot B} \quad (6)$$

(3) M- ϕ 関係の算出

構造物の設計で用いることを念頭に置くと、提案するM- ϕ 関係は、①部材靱性率が拘束圧ゼロの状態から連続性を持って滑らかに増加するような評価式であること、および②簡易に算定できる評価式であることが重要である。そこで、拘束圧を受ける部材

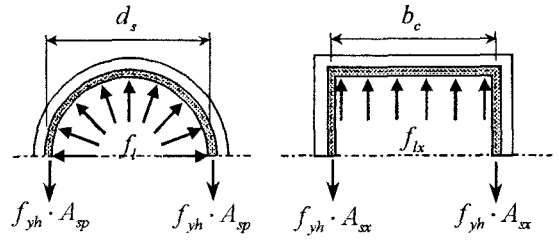


図-3 帯鉄筋に作用する力

のM- ϕ 関係の算出方法としては、現行の鉄道の耐震設計基準⁹⁾で規定されているテトラリニアモデルを基本とし、塑性ヒンジ部の回転角の算定に際して、実際に配置される帯鉄筋比に、式(5)あるいは式(6)で求まる等価帯鉄筋比を足し合わせたものを用いることで表現することとした。

4. 有効性の検証

(1) 検討概要

第2章で示した模型杭の載荷試験の結果を正解に位置付け、数値シミュレーションを実施することで提案モデルの妥当性を検証する。

等価帯鉄筋比の算出においては、地盤による拘束圧 p を算定する必要があるが、本解析では、実験で得られたコイルバネ反力の最大値を部材幅(0.3m)およびコイルバネ間隔(0.3m)で除して算出することとした。

(2) 解析結果

載荷点での荷重変位曲線に着目して、従来モデルと提案モデルの比較を行う(図-1参照)。最大耐力点での変位は、実験では $4.5\delta_y$ であったが、従来モデルでは $3.7\delta_y$ であり、実験結果を過小評価している。それに対して、提案モデルでは $4.2\delta_y$ であり、実験結果を概ね説明できている。

次に、曲げモーメント分布を図-4に示す。従来モデルでは、早い段階で耐力低下が生じているため、実験で得られた最大耐力点付近($4.2\delta_y$ 時)では、曲げモーメント分布はほぼゼロになっている。それに対して、提案モデルでは、 $4.2\delta_y$ 時に至るまで実験結果をうまく表現できている。

実験および解析では、図-4のa部において塑性ヒンジが形成されたが、その部位でのM- ϕ 関係を図-5に示す。先に説明したように、実験でコンクリートの圧壊および軸方向鉄筋傾向が認められるのは $4.5\delta_y$ 時の1サイクル目であるが、提案モデルの最大耐力点(以下、M点)はこのときの曲げモーメントおよ

び発生曲率と概ね一致している。また、提案モデルでM点に到達するのは、荷点変位が $4.2\delta_y$ の時であり、変形の進行という観点からも実験結果を概ね表現できている。

最後に、曲率分布 ($4.2\delta_y$ 時) を図-6に示す。図中の実線は実験結果を、点線は従来モデルでの解析結果を、一点鎖線は提案モデルでの解析結果を示す。また、提案モデルにより算出した損傷レベル2限界の曲率 (最大耐力時の部材曲率, ϕ_m) も合わせて示す。従来モデルでは1箇所に大きな曲率が集中的に発生しているのに対し、提案モデルでは、①損傷レベル2限界の曲率 ϕ_m が軸方向鉄筋の座屈が生じる曲率をほぼ表現できていること、②提案モデルによる数値シミュレーションでの発生曲率は実験結果を概ね表現できていることが確認できる。

5. まとめ

本研究では、地盤中でのRC部材 (杭部材) の曲げ変形特性の評価方法として、地盤による拘束圧をそれと等価な拘束圧を与える帯鉄筋に換算する方法を提案し、地盤をコイルばねで模擬した模型杭の正負交番荷重試験を数値シミュレーションすることでその妥当性を確認した。

なお、今回実施した解析では、地盤による拘束効果をコイルばねに作用する反力を用いて評価したが、現実のRC杭では、地盤による拘束効果として、どの程度の土圧を評価するのか適切であるのかについて、今後、議論してゆく必要がある。そのために、地盤中での杭の水平荷重試験を実施し、検討を深めてゆく所存である。

謝辞：本研究は、国土交通省からの補助金を受けて得られた研究成果の一部である。

参考文献

- 1) Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R. : Theoretical stress-strain model for confined concrete, *Journal of the Structural Engineering*, ASCE, Vol.114, No.8, pp.1804-1826, August, 1988.
- 2) Hoshikuma, J., Kawashima, K., Nagaya, K. and Taylor, A. W. : Stress-strain model for confined reinforced concrete in bridge piers, *Journal of the Structural Engineering*, ASCE, Vol.123, pp. 624-633, May, 1997.
- 3) 渡邊忠朋, 谷村幸裕, 瀧口将志, 佐藤勉 : 鉄筋コンクリート部材の損傷状況を考慮した変形性能算定手法, 土木学会論文集, No.683/V-52, pp. 31-45, 2001.

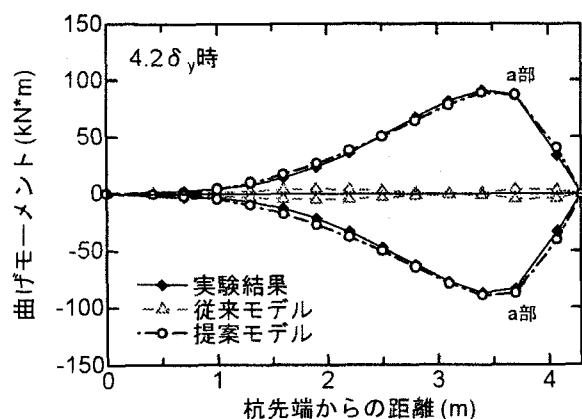


図-4 曲げモーメント分布

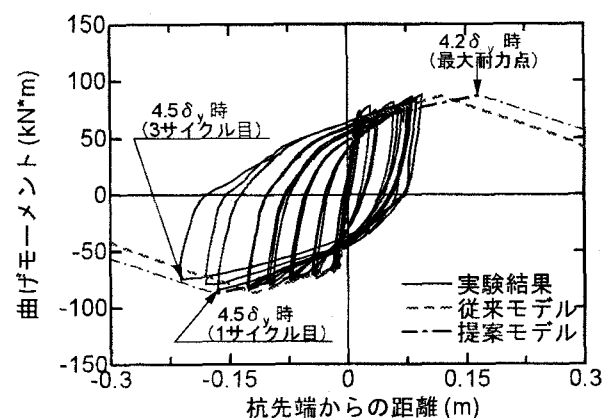


図-5 塑性ヒンジ部 (a部) でのM- ϕ 関係

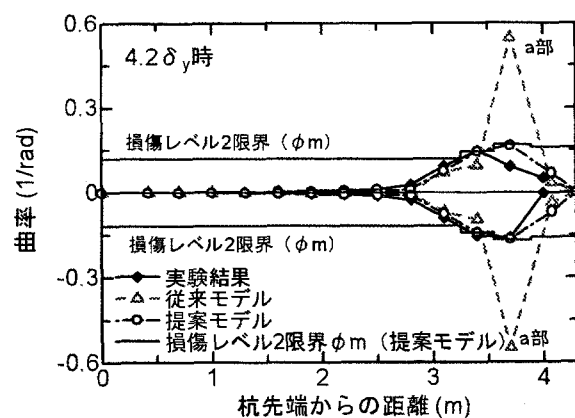


図-6 曲率分布

- 4) 白戸真大, 木村嘉富, 福井次郎 : 鉄筋のはらみ出しを考慮した場所打ち杭のモデルと地盤震動が杭基礎に与える影響評価への適用, 土木学会論文集, No.689/I-57, pp.153-172, 2001.
- 5) 永尾拓洋, 棚村史郎, 室野剛隆, 神田政幸 : 模擬地盤 (コイルバネ) を用いた地中における RC 杭の非線形モデルに関する検討, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, pp. 1119-1124, 2002.
- 6) (財) 鉄道総合技術研究所 : 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善, 1999.