

地盤による拘束圧を考慮したRC杭の変形性能の評価手法に関する検討

今村年成¹・室野剛隆²・永尾拓洋³

¹ (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)
E-mail:imamura@rtri.or.jp

² (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)
E-mail: muro@rtri.or.jp

³東海旅客鉄道株式会社 (当時, (財) 鉄道総合技術研究所に出向中) (〒485-0801 愛知県小牧市大山1545-33)
E-mail:nagao-t@jr-central.co.jp

現行の鉄道の耐震設計基準では、RC部材（杭部材）の曲げ変形特性は、気中での正負交番載荷試験に基づき決定されている。しかしながら、現実の杭部材は、地盤による拘束圧を受けるため、気中よりも大きな靱性能が期待できるものと予想される。本研究では、合理的な杭基礎の耐震性能評価手法の確立を目的として、地盤による拘束効果を帯鉄筋による拘束効果に換算してRC部材の曲げ変形特性を評価する手法を提案した。また、筆者らがこれまでに実施している地盤をコイルバネで模擬した模型杭の正負交番載荷試験を数値シミュレーションすることで、提案手法の妥当性を確認した。最後に、試設計を行い、提案モデルの実構造物への適用性を確認した。

Key Words : reinforced concrete pile, moment-curvature relation, confining pressure induced by subgrade reaction

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載荷試験が多数行われており^{1)~4)}、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、正負交番載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などが提案されている⁵⁾。

しかしながら、これらの研究では、その基本となる載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は検討の余地が残る。

また、地盤中に埋設された杭の載荷実験もこれまでに多数行われてきているが、杭と地盤の相互作用問題として群杭効果や杭と地盤の相対剛性に着目したものが多く、RC 杭の曲げ変形特性を地盤の拘束効果に着目して検討している事例はほとんどない。

そこで、筆者らは、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載荷試験を実施し、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⁶⁾。

本研究では、上記の実験結果を踏まえ、まず、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。次に、上記の実験結果を正解に位置付けて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。最後に、試設計を通して、提案手法の実構造物への適用性を確認した。

2. 模擬地盤（コイルバネ）を用いた模型実験⁶⁾

(1) 実験概要

地盤中の杭部材の曲げ変形特性を明らかにするため、筆者らは、これまでに地盤をコイルバネで模擬した載荷試験装置を開発し、模型杭の正負交番載荷実験を実施している⁶⁾。ここでは、曲げ破壊モードを示した実験ケースである H13-UNIT2 について概要を説明する。

供試体は、300mm×300mm の矩形断面であり、その長さは載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、現行の耐震設計基準における 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、載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。

載荷パターンは、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載荷点変位 ($1\delta_y=29\text{mm}$) 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を行った。

(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、現行の鉄道の耐震設計基準⁷⁾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サイクル目に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の破断が生じ、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、現行の鉄道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。

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

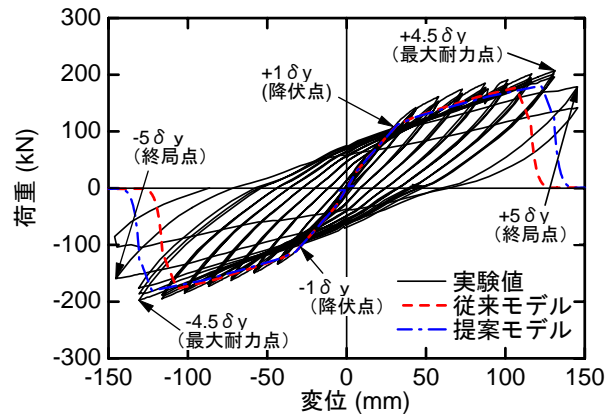


図-1 載荷点位置での荷重変位曲線

3. 拘束圧下でのRC部材の非線形モデルの提案

(1) 基本的な考え方

本節では、コアコンクリートの拘束圧に着目して、地盤による拘束効果を帯鉄筋による拘束効果に置き換える方法について提案する。

まず、帯鉄筋がコアコンクリートを拘束する仕組みについて考える。帯鉄筋が配置された RC 部材では、コンクリートは曲げによる圧縮応力を受けると横方向に膨張しようとする。このとき、帯鉄筋には円周方向に引張力が作用し、その結果、コアコンクリートには帯鉄筋から半径方向へ拘束圧 f'_r が生じる。このように、帯鉄筋には、部材の変形が生じた際に、反作用としてコアコンクリートを拘束する効果がある。この拘束圧 f'_r を“帯鉄筋による拘束圧”と呼ぶことにする。一方、地中部材は、周辺地盤から拘束圧 p を受けるが、これは部材の変形に関わらず、常に作用する拘束圧である。以後、これを“地盤による拘束圧”と呼ぶことにする。

帯鉄筋による拘束圧と地盤による拘束圧とは、作用の仕方にこのような違いが見られるが、塑性ヒンジが形成されるような段階においては、どちらもコアコンクリートを拘束していることに変わりはない。また、その拘束圧の大きさが同じであれば、部材靱性能の増大の程度も同じであると考えるのが合理的である。そこで、コア

コンクリートに作用する拘束圧を指標として、地盤による拘束効果を帯鉄筋による拘束効果に置き換える手法を考えることにした。

さて、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領域が生じることに留意する必要がある。この概念を図-2 参照に示す。この影響を考慮するために、Mander^らの提案する拘束有効係数 k_e という概念を導入した。ここで、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。

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

ここに、 w'_i は帯鉄筋で拘束されている軸方向鉄筋の水平方向の純あき、 b_c および d_c は、それぞれ帯鉄筋の中心線で形成される長方形の長辺および短辺である。

(2) 等価帯鉄筋比 p'_w の算出

以上の議論をもとに、地盤による拘束圧を等価な拘束圧を有する帯鉄筋比に換算する。

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。

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

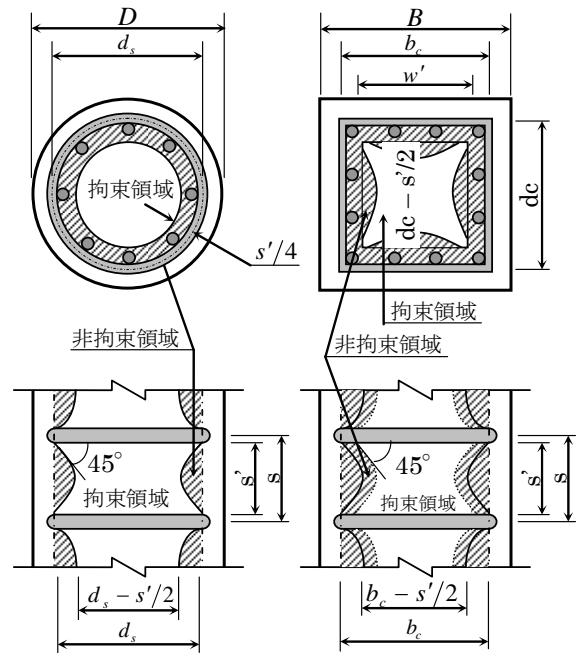


図-2 帯鉄筋によるコアコンクリートの拘束

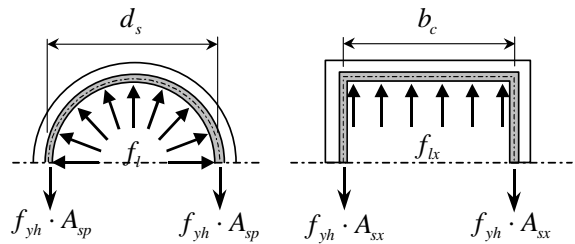


図-3 帯鉄筋に作用する力

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、矩形断面について考えると、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⁷⁾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

本章では、第2章で示した模型杭の荷重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。

本解析では、模型杭が正方形断面であるため、式(2)および式(6)により等価帯鉄筋比を求めて、部材の曲げ変形特性を算出した。なお、地盤による拘束圧 p としては、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。算出された M- ϕ 関係の一例を図-4に示す。同図より、提案モデルは、従来モデルに比べて、最大耐力時の曲率 ϕ_m がおよそ40%向上していることが分かる。

(2) 解析結果

荷重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-5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-5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-6に示す。

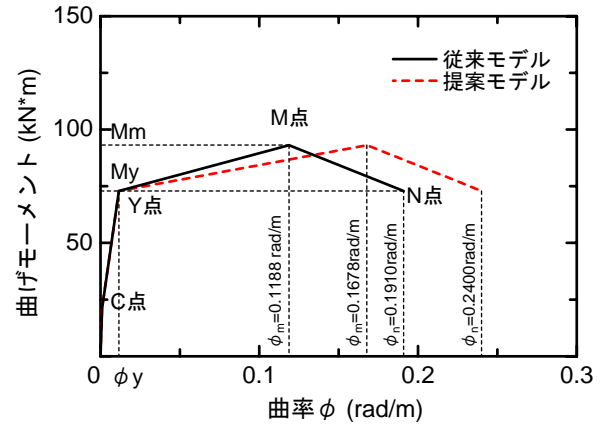


図-4 鉄道の耐震設計基準での M- ϕ 関係

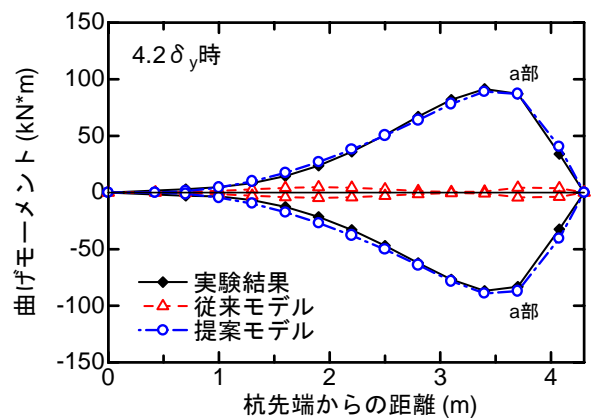


図-5 曲げモーメント分布

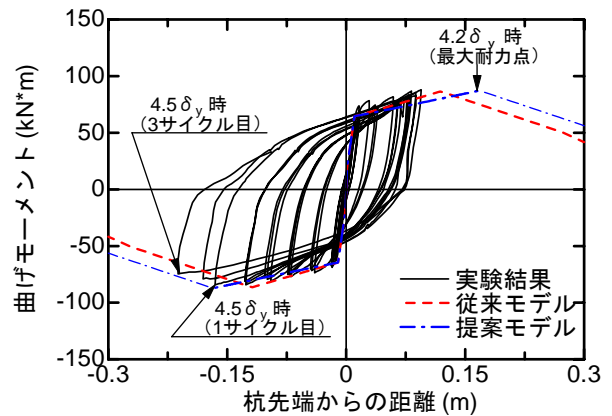


図-6 塑性ヒンジ部 (a部) での M- ϕ 関係

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、荷重点変位が $4.2\delta_y$ 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。

曲率分布 (4.2 δ_y 時) を図-7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.

以上より, 提案モデルの妥当性が確認できた.

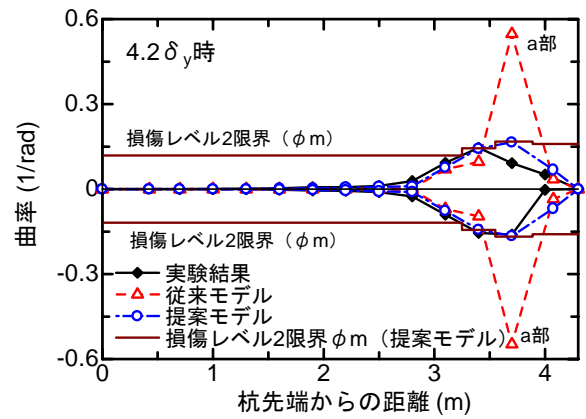


図-7 曲率分布

5. 実構造物への適用

(1) 検討概要

本章では, 試設計を行い, 提案モデルの実構造物への適用を確認する.

検討対象構造物の解析モデルおよび地盤条件を図-8に示す. 基礎形式は2×2群杭であり, く体形状は5000mm×1800mmの矩形断面, 杭形状は杭径 ϕ 1300mm, 杭長L=22mである. コンクリートの圧縮強度は, く体およびフーチングについては24N/mm², 杭については30N/mm²である. また, 鉄筋の材質はSD390とした.

地盤条件は図-8に示すとおり, 表層地盤はN値20程度の砂層を主体とする普通地盤 (表層地盤の固有周期 $T_g=0.26$ sec, 鉄道の耐震設計基準⁷⁾での分類ではG3地盤) であり, 基盤はN値50の洪積砂礫層である. また, 液状化は考慮しないものとした. 解析手法としては非線形スペクトル法を用いることとし, 地震動としては, 鉄道の耐震設計基準で規定されているL2地震動 (スペクトルII波) を想定することとした.

さて, 杭の曲げ変形特性として, 提案モデルを用いる場合に, 地盤による拘束圧をどの程度見込むべきかについて議論する. コアコンクリートの横方向への膨張, 軸方向鉄筋のはらみ出しや座屈は, 部材断面の圧縮縁で生じることを考えると, 受働土圧を見込むのが合理的であると考えられる. しかしながら, 現時点では, 土中での杭の載荷試験などによる検証を行っていないので, 安全側の配慮から, ひとつの割り切りとして, 杭前面側の土圧と背面側の土圧の平均値程度を見込むこととし, 受働土圧の1/2の土圧が杭に作用するものと仮定した.

また, 杭頭から $1/\beta$ の範囲においては, 地震時に杭と地盤の間に隙間が生じることが予想されるので, この区間については, 地盤による拘束効果を考慮しないこととした. 比較のために, 現行の耐震設計基準に基づく解析 (従来モデル) も合わせて実施した.

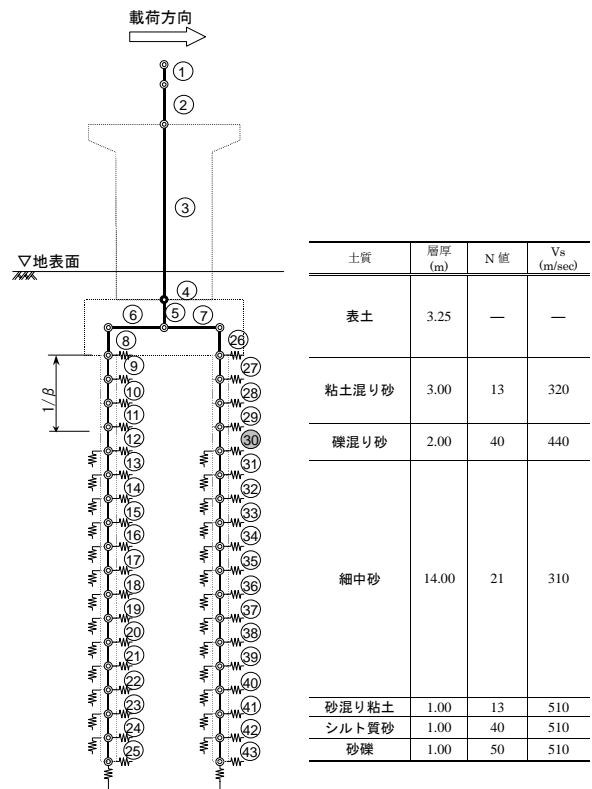


図-8 構造解析モデルおよび地盤条件

(2) 解析結果

従来モデルおよび提案モデルでの構造物天端での荷重変位曲線を図-9に示す. また, 塑性化の進んだ要素30におけるM- ϕ 関係を図-10に示す. 検討対象構造物は, く体耐力の大きな壁式橋脚であるので, 構造物全体の応答震度が高くなり, 杭に作用する軸力変動も大きくなる. そのため, 押し込み杭は, 釣合い軸力を超える高い軸方向圧縮力が作用する部材 (以後, このような部材を“高軸方向圧縮力部材”と呼ぶ) となる. このような高軸方向圧縮力部材のM- ϕ 関係は, 解析では, 図-10に示すように, C点 (ひび割れ発生点), CU点 (軸方向鉄筋の降伏とコンクリートの圧壊が同時に起こる点), CN点 (かぶりコンクリートが大幅に剥落するとともに軸方向鉄筋

の座屈が生じて急激な荷重低下が生じる限界点) を結びトリニアモデルで表現している⁷⁾。

さて、図-9から分かるように、提案モデルで得られた荷重変位曲線は、従来モデルでの荷重変位曲線と完全に一致しており、両者で構造物全体の挙動に大きな差が認められなかった。この原因としては、検討対象構造物が壁式橋脚であり損傷部位が杭部材に限られること、および損傷部位が高軸方向圧縮力部材となっていることが考えられる。すなわち、高軸方向圧縮力部材では、 $M-\phi$ 関係においてCU点以降の勾配が水平となるため、提案モデルを用いて部材靱性率を大きく評価しても、計算上の骨格曲線が提案モデルと変わらないことがその要因である。

また、部材の損傷レベル限界 (ϕ_{cnd}) に着目すると、図-10に示すように、提案モデルでは従来モデルよりも大きな靱性率が確保できる結果となっている。一方で、応答曲率については、提案モデルと従来モデルで解析上の骨格曲線が同一であるため、両解析で同一の値となっている。したがって、部材安全率 ($\gamma_i \cdot \phi_d / \phi_{cnd}$) を比較すると、従来モデルでは0.93であるのに対し、提案モデルでは0.84となることが分かる。以上より、提案モデルを用いることによって、照査指標の比較で約10%程度の経済設計が可能になることが確認できた。なお、土の拘束効果を考慮している要素30において、提案モデルでの杭に作用する地盤反力度が有効抵抗土圧に達していること、すなわち提案モデルでの前提条件を満足していることは、別途確認している。

6. まとめ

地盤中でのRC部材（杭部材）の曲げ変形特性は、地盤による拘束圧を受けるため、気中よりも大きな靱性能が期待できることに着目して、その評価方法および実構造物への適用性について検討した。本研究で得られた知見は、次のとおりである。

- ①地盤による拘束圧を受けるRC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、その妥当性を検証した。
- ②提案手法を用いた試設計を行い、地盤の拘束効果として受働土圧の1/2の土圧を考慮した場合、10%程度の部材靱性能の向上効果があることを確認した。

今後は、地盤中での杭の水平載荷試験を実施し、さらに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。

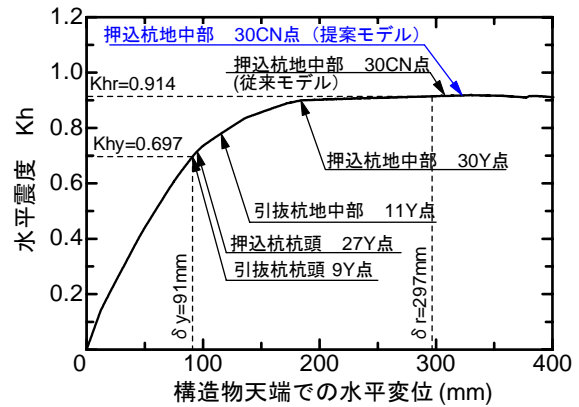


図-9 構造物天端での荷重変位曲線

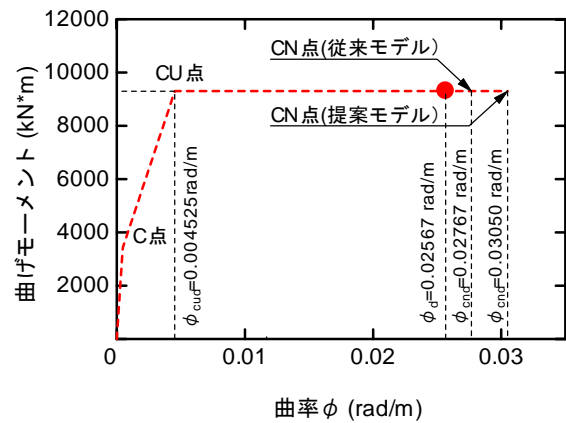


図-10 $M-\phi$ 関係 (要素30)

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.
- 4) 星隈順一, 運上茂樹, 長屋和宏 : 鉄筋コンクリート橋脚の変形性能に及ぼす断面寸法の影響に関する研究, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.215-232, 2001.
- 5) 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.
- 6) 永尾拓洋, 棚村史郎, 室野剛隆, 神田政幸 : 模擬地盤 (コイルパネ) 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.
- 7) (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.

(2005. 2. 28 受付)

EVALUATION OF DUCTILITY FOR RC PILES SUBJECTED TO CONFINING PRESSURE IN THE GROUND

Toshinari IMAMURA, Yoshitaka MURONO, and Takuhiro NAGAO

In the seismic design codes for railway structures, a deformation capacity of RC piles is evaluated based on the experimental results, which have been obtained from the alternate loading tests of RC columns under the atmosphere. The actual behavior of piles, however, is expected to show greater ductility than these experimental results, because piles embedded in the ground are subjected to confining pressure from the subgrade. In this study, we aimed to establish the rational evaluation method of seismic performance of pile foundations. A calculation method of ductility of RC piles is proposed, in which confinement pressure by the subgrade reaction is converted into an equivalent passive confinement pressure from circular steel hoops. By the way, we have been conducted the alternate loading tests of RC columns supported by coil springs in stead of the ground. Comparing these experimental results with those obtained from numerical simulation using proposed calculation method, the applicability of the newly developed method is confirmed. In addition, the seismic response of railway structures having general shape and size is calculated using the proposed model, and the applicability of the proposed model to railway structures is also confirmed.