

# 軸方向鉄筋のはらみ出し挙動に着目した変形能評価式の RCラーメン橋脚への適用性

坂柳皓文<sup>1</sup>・堺淳一<sup>2</sup>・星隈順一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 修（工） 独立行政法人・土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 交流研究員  
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）  
<sup>2</sup>正会員 博（工） 独立行政法人 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 主任研究員  
<sup>3</sup>正会員 博（工） 独立行政法人 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 上席研究員

## 1. はじめに

著者らは、単柱式の鉄筋コンクリート橋脚に対する塑性変形能の評価式として、塑性ヒンジの形成メカニズムに関する研究成果を踏まえ、軸方向鉄筋のはらみ出し挙動に着目した方法を提案している<sup>1)</sup>。従来、道路橋示方書<sup>2)</sup>においては、鉄筋コンクリート橋脚の各耐震性能の限界状態に相当する変位は、終局変位から安全係数で割り戻した変位として算出していたため、限界状態の変位と橋脚の損傷状態や抵抗特性の関係が明確ではなかったが、著者らの提案する手法では、表-1に示すようにこれらの関係を明確にした上で、限界状態に相当する変位を直接的に算出する方法としている。提案の方法のポイントは、塑性ヒンジ長の算出式を軸方向鉄筋のはらみ出し挙動に関連づけた点と、軸方向鉄筋の引張ひずみを限界状態を定義する指標とした点にある。

提案の方法は、単柱式の鉄筋コンクリート橋脚模型に対する実験結果を基に、塑性ヒンジ長と軸方向鉄筋の引張ひずみのそれぞれの算出式を導出しているため、この方法を他の構造に適用する場合には、

表-1 RC橋脚の限界状態

|           | 耐震性能2                                    | 耐震性能3                  |
|-----------|------------------------------------------|------------------------|
| 耐震橋性の能    | 地震による損傷が限定的なものに留まり、橋としての機能の回復が速やかに行い得る性能 | 地震による損傷が橋として致命的とならない性能 |
| RC橋脚の限界状態 | 水平力の低下がほとんどなく、エネルギー吸収が安定して期待できる状態        | 地震時保有水平耐力を保持できる限界の状態   |

その適用性を検証する必要がある。そこで、本研究では、鉄筋コンクリートラーメン橋脚（以下、RCラーメン橋脚）の面内方向の塑性変形能の評価に対する提案方法の適用性に着目して、過去に行われた正負交番繰返し載荷実験の結果との比較をもとに検討した。

## 2. 軸方向鉄筋のはらみ出し挙動に着目したRC橋脚の塑性変形能の評価方法

著者らが提案する方法では、RC橋脚の耐震性能2又は3の限界状態に相当する変位 $\delta_{ls2}$ 又は $\delta_{ls3}$ はそれぞれ式(1)又は(2)により算出する。

$$\delta_{ls2} = \delta_y + (\phi_{ls2} - \phi_y) L_p (h - L_p / 2) \tag{1}$$

$$\delta_{ls3} = \delta_y + (\phi_{ls3} - \phi_y) L_p (h - L_p / 2) \tag{2}$$

ここで、 $\delta_y$ は降伏変位（mm）、 $\phi_{ls2}$ 又は $\phi_{ls3}$ は橋脚基部断面における耐震性能2又は3の限界状態に相当する許容曲率（1/mm）、 $\phi_y$ は橋脚基部断面における降伏曲率（1/mm）、 $L_p$ は塑性ヒンジ長（mm）、 $h$ は橋脚基部から上部構造の慣性力の作用位置までの距離（mm）である。ここで、 $\phi_{ls2}$ は、平面保持を仮定した曲げモーメントー曲率解析において、最外縁の軸方向引張鉄筋位置において軸方向鉄筋の引張ひずみが耐震性能2の許容引張ひずみ $\epsilon_{st2}$ に達するとき又は最外縁の軸方向圧縮鉄筋位置においてコンクリートの圧縮ひずみが限界圧縮ひずみ $\epsilon_{cc1}$ に達するときのいずれか先に生じるときの曲

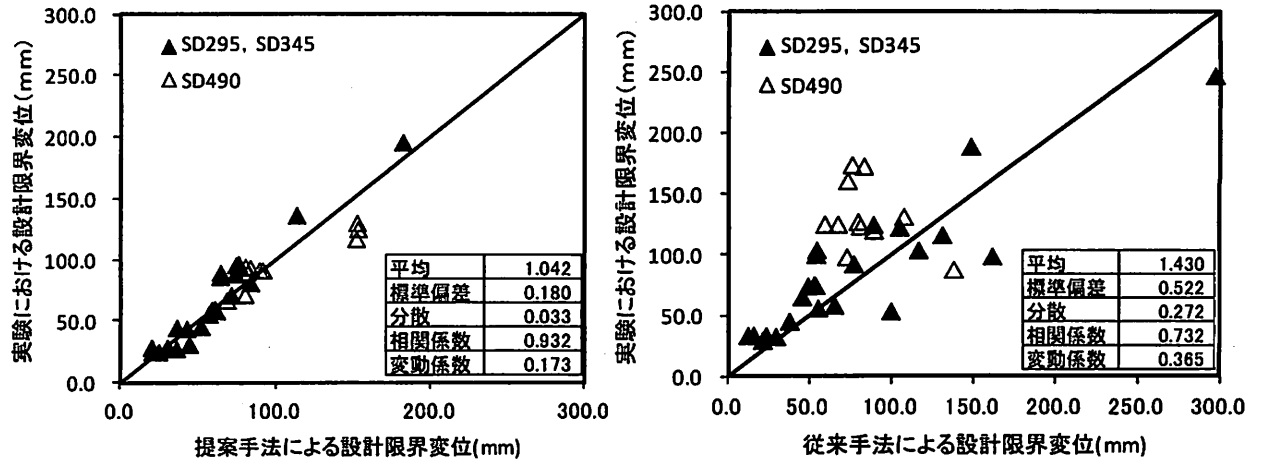


図-1 限界状態時の水平変位の推定精度

率として求められる。 $\phi_{ls3}$  も、耐震性能 3 の軸方向鉄筋の許容引張りひずみ  $\varepsilon_{st3}$  を用いて、 $\phi_{ls2}$  と同様の考え方に基き求められる。

ここで、 $L_p$ 、 $\varepsilon_{st2}$ 、 $\varepsilon_{st3}$  はいずれも、曲げ塑性変形を受けた RC 橋脚の塑性ヒンジ領域において、軸方向鉄筋が引張りを受けた後に橋脚に作用する水平力が反転して軸方向鉄筋が圧縮される段階において、軸方向鉄筋がはらみ出す挙動に関連づけて算出式を導いている。

$$L_p = 9.5 \sigma_{sy}^{1/6} \beta_n^{-1/3} \phi' \quad (3)$$

$$\varepsilon_{st2} = 0.025 \cdot L_p^{0.15} \phi^{-0.15} \beta_s^{0.2} \beta_{co}^{0.22} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{st3} = 0.035 \cdot L_p^{0.15} \phi^{-0.15} \beta_s^{0.2} \beta_{co}^{0.22} \quad (5)$$

$$\beta_n = \beta_s + \beta_{co} \quad (6)$$

ここで、 $\sigma_{sy}$  は軸方向鉄筋の降伏強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $\phi$  は軸方向鉄筋の直径 (mm)、 $\beta_s$  は横拘束鉄筋の抵抗を表すばね定数 (N/mm<sup>2</sup>)、 $\beta_{co}$  はかぶりコンクリートの抵抗を表すばね定数 (N/mm<sup>2</sup>) である。これらのうち、 $\sigma_{sy}$  及び  $\phi$  は軸方向鉄筋自体のはらみ出しにくさを表すパラメータであり、 $\beta_s$  及び  $\beta_{co}$  は軸方向鉄筋がはらみ出すことに対する横拘束鉄筋とかぶりコンクリートのそれぞれの抵抗を表すパラメータである。

また、コンクリートの限界圧縮ひずみ  $\varepsilon_{cc}$  は次式で与えられる。

$$\varepsilon_{ccl} = \varepsilon_{cc} + \frac{0.5 \sigma_{cc}}{E_{des}} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{cc} = 0.002 + 0.033 \beta \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{ck}} \quad (8)$$

$$E_{des} = 11.2 \frac{\sigma_{ck}^2}{\rho_s \sigma_{sy}} \quad (9)$$

$$\sigma_{cc} = \sigma_{ck} + 3.8 \alpha \rho_s \sigma_{sy} \quad (10)$$

ここで、 $\varepsilon_{cc}$  はコンクリートが最大圧縮応力度に達する時のひずみ、 $E_{des}$  は下降勾配 (N/mm<sup>2</sup>)、 $\sigma_{cc}$  は横拘束鉄筋で拘束されたコンクリートの最大圧縮応力度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $\rho_s$  は横拘束鉄筋の体積比、 $\sigma_{ck}$  はコンクリートの設計基準強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $\alpha$  及び  $\beta$  は断面補正係数である。

この提案の方法により、設計で考慮する限界状態における変位の推定精度は、図-1に示すように従来は変動係数にして40%近かったばらつきが17%程度となり、大幅に改善している。また、従来の道路橋示方書<sup>2)</sup>では規定されていなかったSD390及びSD490への適用性も確認されている。

### 3. 検討に用いたRCラーメン橋脚モデルの載荷実験の概要

#### (1) 橋脚モデル

本研究では、寺山らが実施したRCラーメン橋脚モデルの面内方向に対する正負交番繰返し載荷実験<sup>3)</sup>の内、主に柱に損傷が生じた2体を対象に、2に示した方法の適用性を検討することにした。また、対

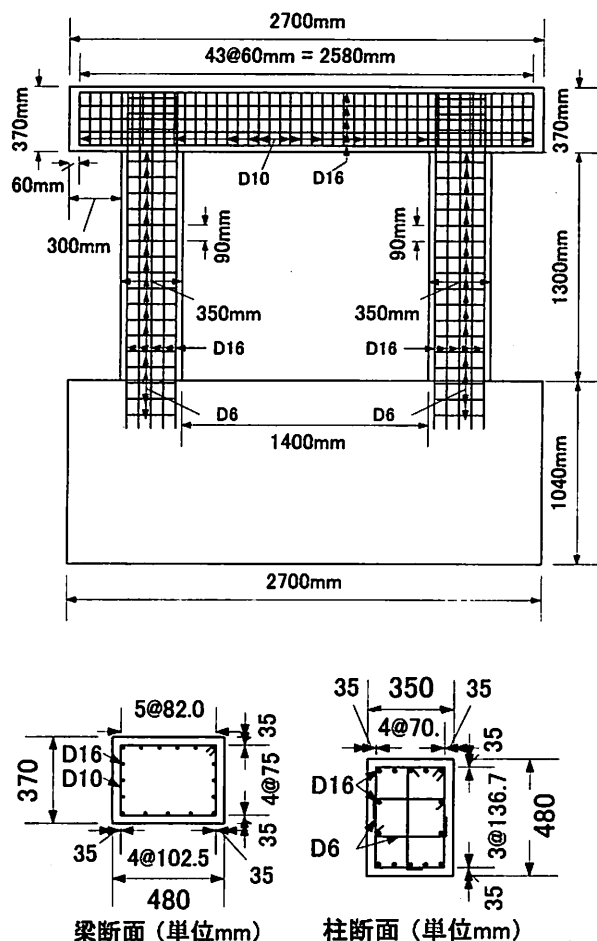


図-2 橋脚模型概要図 (ケース1)

象とした2体を本研究ではそれぞれケース1、ケース2と称する。

図-2は、ケース1の橋脚模型を示したものである。柱は荷重方向に350mm、荷重直角方向に480mmの長方形断面であり、はりはその高さが370mm、幅が480mmの長方形である。ケース1とケース2の諸元を表-2に示す。断面寸法や配筋は同じで、柱の高さがケース1では1.67m、ケース2では2.17mである点が両者の違いである。柱の軸方向鉄筋比は1.7%、横拘束鉄筋比は1.0%である。柱断面の中間帯鉄筋は、片側が鋭角フック、もう一端が直角フックとして定着されている。

荷重は、はりに荷重治具を取付け、両柱の基部で約1N/mm<sup>2</sup>の軸応力が作用するようにこの荷重治具を介して鉛直力を与えながら、正負交番の水平力をこの荷重治具に変位制御で与えている。荷重変位は、降伏変位を基準変位 $\delta_0$ として、これを漸増させることとし、一定振幅の繰返し回数は3回としている。

## (2) 実験結果

ケース1、ケース2ともに、表-3、図-3に示すように4 $\delta_0$ の荷重において柱基部においてかぶりコン

表-2 供試体諸元

| 供試体          | ケース1        | ケース2  |
|--------------|-------------|-------|
| 柱基部からはり天端の高さ | 1.67m       | 2.17m |
| 柱断面          | 350mm×480mm |       |
| 柱軸方向鉄筋       | D16×14本     |       |
| 柱帯鉄筋         | D6@90mm     |       |
| はり断面         | 370mm×480mm |       |
| はり軸方向鉄筋      | D16×17本     |       |
| はり帯鉄筋        | D10@60mm    |       |
| 鉄筋材質         | SD295       |       |

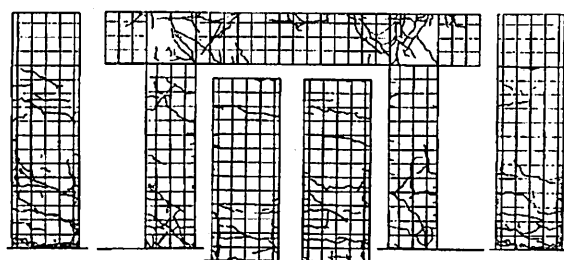
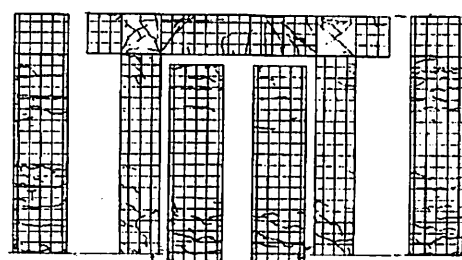
クリートの剥落が観察されている。その後、ケース1では7 $\delta_0$ の荷重において、ケース2では8 $\delta_0$ の荷重において、かぶりコンクリートの剥落の進展に伴い軸方向鉄筋の露出が観察されている。さらに、ケース1では9 $\delta_0$ の荷重において、ケース2では10 $\delta_0$ の荷重において、軸方向鉄筋のはらみ出しが観察されている。

図-4に、実験で得られた水平力-水平変位の履歴曲線を示す。いずれのケースでも、かぶりコンクリートの剥落が確認された段階付近で水平力が最大となっており、その後、水平力は緩やかに低下する。軸方向鉄筋の露出が確認された段階では、最大水平力から水平力がケース1では15%、ケース2では22%低下していた。軸方向鉄筋のはらみ出しが確認された段階では、最大水平力から水平力がケース1では40%、ケース2では31%低下していた。

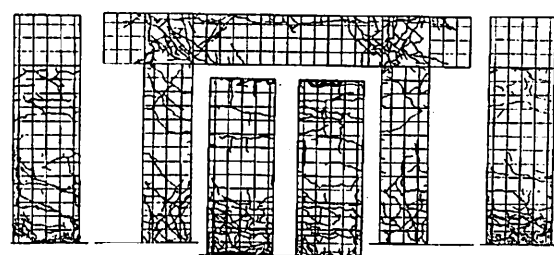
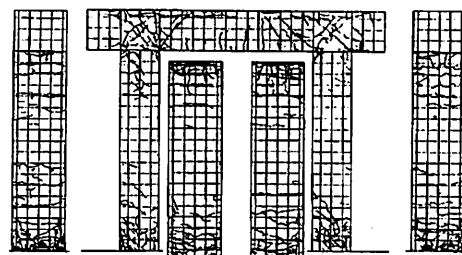
単柱式RC橋脚に対しては、耐震性能2に対する限界状態においては、表-1に示したように、安定したエネルギー吸収が確保できる状態にあることが求められており、この目安として、同一振幅における3回の正負交番繰返し荷重において、3回目の荷重における水平力の最大値が1回目の荷重における水平力の最大値の85%を下回らないことと、2回目と3回目の荷重におけるエネルギー吸収量を比較して、エネルギー吸収量の低下が10%程度以下であることとされている<sup>4)</sup>。図-5は、こうした観点で、RCラーメン橋脚模型の実験結果を評価した結果である。なお、図-5の評価は塑性応答となる2 $\delta_0$ 以降に対して示している。図-5によれば、ケース1では8 $\delta_0$ 程度まで、ケース2では11 $\delta_0$ 程度まで、上記の条件を満足することが分かる。これは、RCラーメン橋脚の場合では4箇所塑性ヒンジにおいてエネルギー吸収をすること等による効果と考えられる。一方で、これらの段階では、図-4に示したように最大水平力からは20%以上低下していること、図-3に示したように軸方向鉄筋のはらみ出しが確認されるような段階であることから、水平力の低下度合いや損傷状態の観点からは耐震性能2の限界状態を満たす状態とは言い難い。このため、RCラーメン橋脚に対して

表-3 実験時の供試体の損傷状況

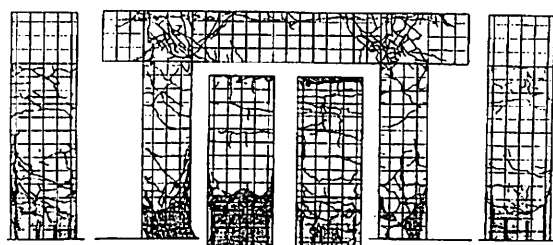
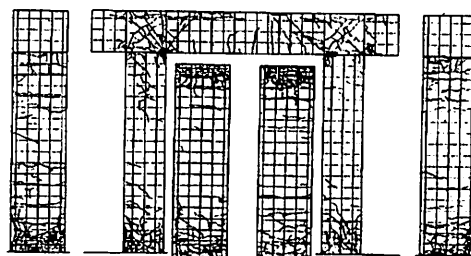
| 荷重順序          | ケース1                                                                                             | ケース2                                                     |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 軸力荷重          | 梁部に曲げひび割れが発生。                                                                                    | 梁にひび割れが発生。梁-柱接合部にひび割れが発生。                                |
| 予備荷重          | 反加振機側の柱基部及び梁-柱接合部にひび割れ発生。                                                                        | 柱基部にもひび割れ発生。梁-柱接合部にもひび割れ発生。隅角部にもひび割れ発生。                  |
| 1 $\delta_0$  | 柱及び梁に曲げによるひび割れが発生。                                                                               | 柱にひび割れが増える。                                              |
| 2 $\delta_0$  | 柱及び梁のひび割れが進展。隅角部にひび割れが発生。                                                                        | 柱基部及び隅角部にひび割れが増える。                                       |
| 3 $\delta_0$  | 柱基部にひび割れが集中する。梁-柱接合部も増加。                                                                         | 柱基部及び隅角部に新たにひび割れが増える。                                    |
| 4 $\delta_0$  | 柱基部のコンクリートが剥離。柱基部に軸方向にひび割れが発生。反加振機側の隅角部のひび割れが亀甲状になる。                                             | 柱基部のひび割れが進展。コンクリートの剥落が始まる。                               |
| 5 $\delta_0$  | 柱基部のコンクリートの剥落が進む。梁-柱接合部の剥離も進展。加振機側の隅角部のひび割れが亀甲状になる。                                              | 柱基部の剥落する範囲が大きくなってきた。隅角部はひび割れが多くなってきた。                    |
| 6 $\delta_0$  | 柱基部のコンクリートの剥離が広がる。                                                                               | 柱基部のコンクリートの剥落は、さらに進む。梁-柱接合部のコンクリートの剥落が始まる。隅角部のひび割れが密になる。 |
| 7 $\delta_0$  | 柱基部のコンクリートの剥離が広がる。梁-柱接合部のコンクリートの剥離が進んだために、軸方向筋、帯鉄筋が露出。                                           | 柱基部のコンクリートの剥落はさらに進む。梁-柱接合部のコンクリートの剥落が始まる。隅角部のひび割れが密になる。  |
| 8 $\delta_0$  | 柱基部のコンクリートに剥落が進んだために、軸方向鉄筋が露出。隅角部のひび割れが亀甲状に広がる。                                                  | 柱基部、梁-柱接合部の各所において、コンクリートの剥落にともない、鉄筋の露出が始まる。              |
| 9 $\delta_0$  | 柱基部のコンクリートに剥落が進む。軸方向筋の座屈。梁-柱の接合部の剥落もかなり進む。                                                       | 各部分での鉄筋の露出本数が多くなってきた。                                    |
| 10 $\delta_0$ | 柱基部の軸方向鉄筋の座屈が大きい。コンクリートの損傷がコアコンクリートまで至り、空隙が生じていた。梁-柱接合部のコンクリートの剥離している範囲が広がる。荷重が降伏荷重を下回ったため、実験終了。 | 柱基部で、軸方向鉄筋の変形が生じてきた。                                     |
| 11 $\delta_0$ |                                                                                                  | 反加振機側の柱基部の軸方向鉄筋破断。コンクリートの剥落は各部分で依然続く。                    |
| 12 $\delta_0$ |                                                                                                  | 加振機側の柱基部の軸方向鉄筋が5本破断。反加振機側の柱基部の軸方向鉄筋が3本破断。損傷の進行が基部に集中。    |
| 13 $\delta_0$ |                                                                                                  | さらに柱基部の軸方向鉄筋が破断。(加振機側柱で4本、反加振機側柱で3本)荷重が降伏荷重を下回ったため、実験終了。 |

ケース1 (4 $\delta_0$ )ケース2 (4 $\delta_0$ )

(a) かぶりコンクリートの剥落

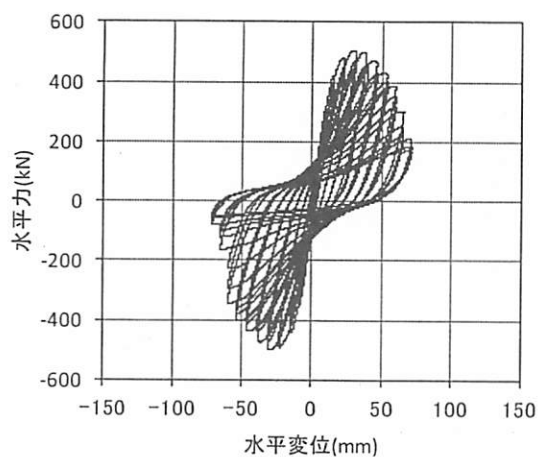
ケース1 (7 $\delta_0$ )ケース2 (8 $\delta_0$ )

(b) 軸方向鉄筋の露出

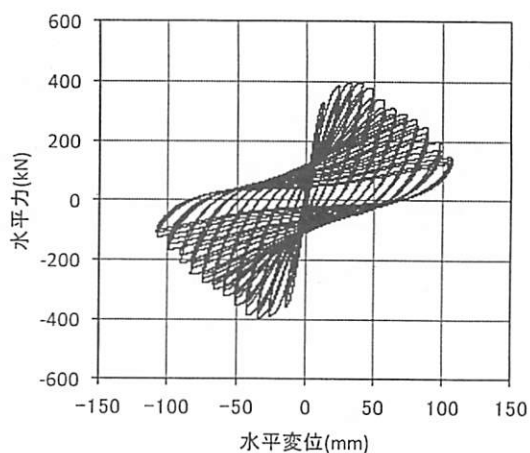
ケース1 (9 $\delta_0$ )ケース2 (10 $\delta_0$ )

(c) 軸方向鉄筋のはらみ出し

図-3 供試体の損傷状況

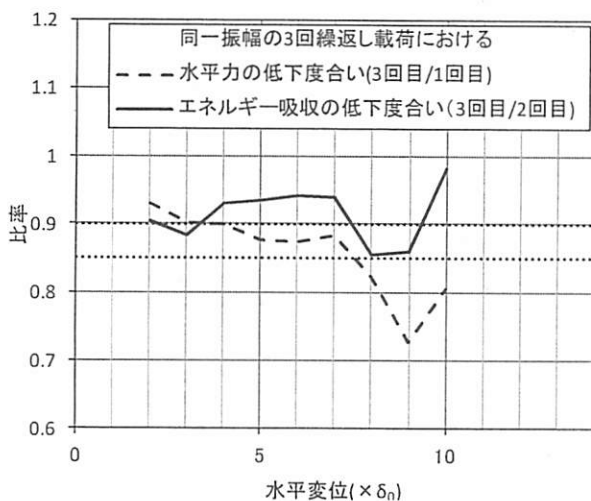


(a) ケース 1

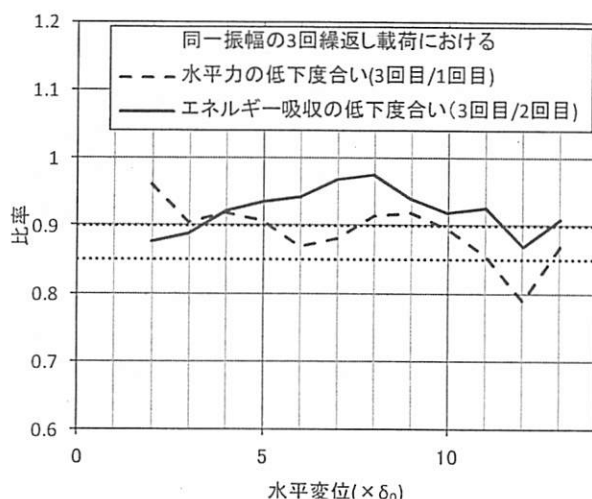


(b) ケース 2

図-4 荷履歴曲線



(a) ケース 1



(b) ケース 2

図-5 吸収エネルギー及び保持耐力の比率

は、骨格曲線における水平力の低下度合いと損傷状態も考慮し、軸方向鉄筋の露出が確認された段階の1つ前の荷重ステップを耐震性能2の限界状態に相当する変位とすることとした。この結果、ケース1については $6\delta_0$ 、ケース2については $7\delta_0$ がこれに相当する変位となり、この段階では、最大水平力からの低下はケース1では12%程度、ケース2では19%程度となっている。

また、耐震性能3に対する限界状態は、単柱式RC橋脚に対しては、地震時保有水平耐力を保持できる限界の状態としており、これはおおむね軸方向鉄筋のはらみ出しが生じ始める段階に相当する。本実験におけるRCラーメン橋脚においては、ケース2では $7\delta_0$ において軸方向鉄筋の露出が生じた後に $9\delta_0$ においてははらみだし変形が確認される間の $8\delta_0$ の荷重ステップにおいて水平力の大きな低下が確認されている。一方、ケース2では、このような水平力の大きな低下はなく、荷重振幅の増加に伴い、

徐々に水平力が低下している。

こうした特性と損傷状況をふまえ、本実験におけるRCラーメン橋脚においては、軸方向鉄筋の露出が観察された次のステップを耐震性能3の限界状態に相当する変位とすることとした。この結果、ケース1については $8\delta_0$ 、ケース2については $9\delta_0$ がこれに相当する変位となる。なお、この段階では、最大水平力からの低下はいずれのケースも30%程度となっている。

#### 4. RCラーメン橋脚の塑性変形能の推定精度

##### (1) 解析方法

RCラーメン橋脚の水平力-水平変位関係の骨格曲線を解析により求める際には、従来の道路橋示方書に示される方法に従った。すなわち、RCラーメン橋脚を塑性ヒンジが形成される箇所については要素長を塑性ヒンジ長とした軸力変動を考慮できる非線

表-4 各ケースの計算パラメーター

| 部位                                 | 柱                                   |        | 梁上側                                 |        | 梁下側                                 |      |
|------------------------------------|-------------------------------------|--------|-------------------------------------|--------|-------------------------------------|------|
| ケース                                | ケース1                                | ケース2   | ケース1                                | ケース2   | ケース1                                | ケース2 |
| コンクリート強度                           | 24N/mm <sup>2</sup>                 |        | 24N/mm <sup>2</sup>                 |        | 24N/mm <sup>2</sup>                 |      |
| 鉄筋の降伏強度                            | 360N/mm <sup>2</sup>                |        | 360N/mm <sup>2</sup>                |        | 360N/mm <sup>2</sup>                |      |
| コンクリートのヤング率                        | $2.5 \times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> |        | $2.5 \times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> |        | $2.5 \times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> |      |
| 鉄筋のヤング率                            | $2.0 \times 10^5$ N/mm <sup>2</sup> |        | $2.0 \times 10^5$ N/mm <sup>2</sup> |        | $2.0 \times 10^5$ N/mm <sup>2</sup> |      |
| 有効長 d                              | 205mm                               |        | 410mm                               |        | 410mm                               |      |
| 圧縮側軸方向鉄筋の本数 $n_s$                  | 3本                                  |        | 6本                                  |        | 5本                                  |      |
| $\beta_{\infty}$                   | 0.271                               |        | 0.271                               |        | 0.271                               |      |
| $\beta_s$                          | 2.633                               |        | 1.253                               |        | 1.504                               |      |
| $\beta_n$                          | 2.904                               |        | 1.524                               |        | 1.774                               |      |
| 塑性ヒンジ長 $L_p$                       | 111mm                               | 149mm  | 131mm                               |        | 131mm                               |      |
| 軸方向鉄筋の<br>許容引張ひずみ                  | 耐震性能2 $\varepsilon_{st2}$           | 0.0305 | 0.0318                              | 0.0269 | 0.0279                              |      |
|                                    | 耐震性能3 $\varepsilon_{st3}$           | 0.0426 | 0.0446                              | 0.0377 | 0.0391                              |      |
| コンクリートの限界圧縮ひずみ $\varepsilon_{ccl}$ | 0.008316                            |        | 0.013090                            |        | 0.013090                            |      |

形梁要素とし、梁-柱の接合部については剛性が十分に大きな要素とした骨組みモデルに置換した。また、載荷治具については鉛直方向変位を剛体変位とするため、鉛直方向に剛性が大きな要素を配置し、その上に載荷治具の梁の曲げ剛性を有する要素を配置した。モデルの概要図を図-6に示す。

解析に用いる実験模型の材料強度は、実験に際して行われた材料試験のデータに基づくのが一般的である。しかし、本実験に用いられた鉄筋については、鉄筋の種類がSD295であるにもかかわらず、材料試験に基づく鉄筋の降伏強度が423 N/mm<sup>2</sup>と非常に大きかったことが報告されている。一方、鉄筋の材料特性のばらつきを分析した調査結果<sup>3)</sup>によると、SD295の降伏強度は平均して公称値の1.22倍程度の値となり、その標準偏差は0.03程度であるという報告があることを踏まえると、材料試験の結果は一般的な値ではないと考えられる。そのため、鉄筋の強度については、公称値、実測強度及び公称値の1.22倍の3ケースに対して解析することとした。また、公称値の1.22倍を用いる場合には、鉄筋強度のばらつきの標準偏差(0.03)の2倍の範囲のばらつきを考慮して検討することとした。なお、本検討で主として着目しているのは塑性変形能の推定精度であり、後述のように塑性変形能の推定精度には軸方向鉄筋の降伏強度は大きな影響を及ぼさない。

解析においては、RCラーメン橋脚の限界状態である、複数箇所形成される塑性ヒンジが全て耐震性能2(又は3)の限界状態に達する点に着目することとした。なお、参考までに、軸方向鉄筋の引張ひずみの限界状態を設定せず、コンクリートの限界圧縮ひずみのみにより限界状態を評価する場合の結果もあわせて計算した。これは、従来の道路橋示方書<sup>2)</sup>の手法に準じた手法である。

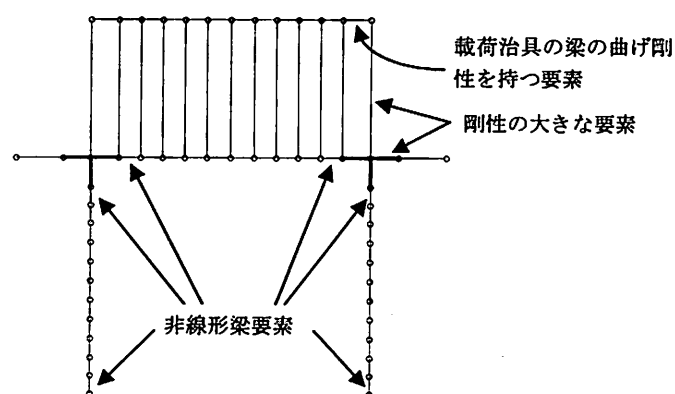


図-6 解析モデル概要図

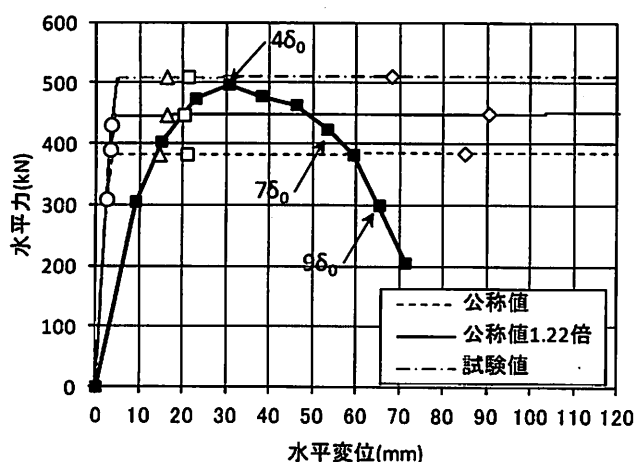
表-4に、対象とする実験模型の各断面の塑性ヒンジ長や軸方向鉄筋の許容引張ひずみ、コンクリートの限界圧縮ひずみ等を示す。なお、表-4に示したのは鉄筋の降伏強度を公称値の1.22倍としたケースである。ここで、柱部の中間帯鉄筋は片側が鋭角フック、もう一方の端部が直角フックの条件であったため、塑性ヒンジ長や軸方向鉄筋の許容引張ひずみを算出する際における横拘束鉄筋の抵抗を評価する場合及びコンクリートに対する横拘束効果を評価する場合において、有効長を相隣る横拘束鉄筋の実際の配置間隔の1.5倍として評価した<sup>4)</sup>。

## (2) 解析結果

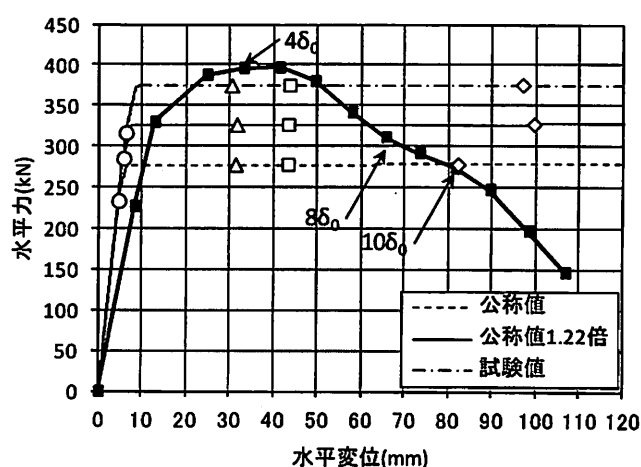
図-7に実験による骨格曲線と解析結果の比較を示す。実験による骨格曲線は正負で傾向が変わらないため、以降は正側のみを示す。図-7より塑性変形能の推定精度には解析で仮定した軸方向鉄筋の強度は大きな影響は及ぼさないことが分かる。そこで、以降は、公称値の1.22倍のケースに対する結果を示す。

また、図-7によれば、実験と解析では初期剛性に

○:初降伏点    △:鉄筋ひずみでの限界位置 (耐震性能2)    □:鉄筋ひずみでの限界位置 (耐震性能3)    ◇:コンクリートひずみでの限界位置 (耐震性能3)

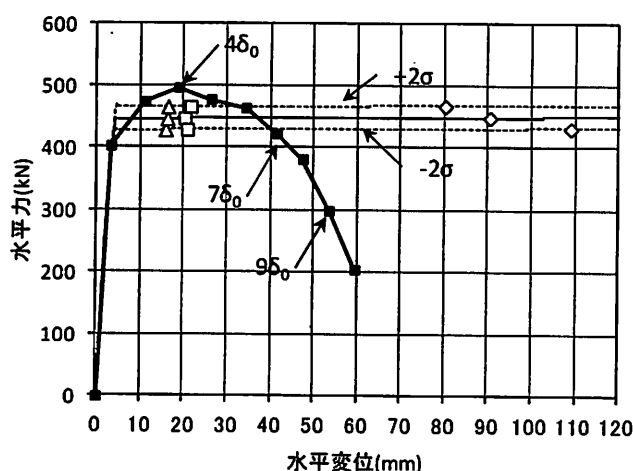


(a) ケース 1

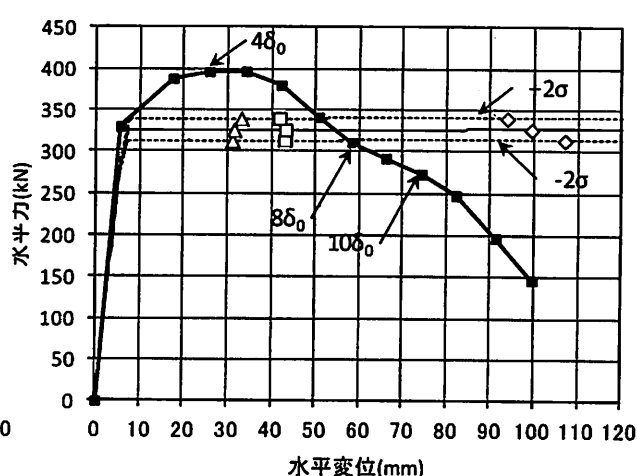


(b) ケース 2

図-7 実験結果と解析の初期剛性の違い



(a) ケース 1



(b) ケース 2

図-8 実験結果と解析値の比較

大きな差があり、実験の方がケース 1 では70%、ケース 2 では45%剛性が小さい。これは、フーチングからの軸方向鉄筋の伸び出しの影響等によるものと考えられる。この結果、解析における初降伏点に相当する水平力に達した段階では、水平変位にしてケース 1 では11mm、ケース 2 では5mmの差が生じている。本研究では、塑性変形能の推定精度に着目していることから、この初期剛性の違いを補正することとした。ここでは、解析における初降伏点に相当する水平力は実験における $2\delta_0$ の変位に相当することから、実験の $2\delta_0$ における水平変位を初降伏点の変位と一致させることにした。

この補正を行った結果を骨格曲線の比較として示したものが、図-8である。ここで、解析値は軸方向鉄筋の強度のばらつき ( $\pm 2\sigma$ ) も示している。これによれば、4箇所に形成される塑性ヒンジが全て耐

震性能 2 の限界状態に達する点は、ケース 1 に対してはかぶりコンクリートが剥落し始める前の段階 ( $3.5\delta_0$ ) に、ケース 2 に対しては、水平力が最大であり、かぶりコンクリートが剥落し始める段階 ( $4.5\delta_0$ ) におおむね相当する。

一方、4箇所に形成される塑性ヒンジが全て耐震性能 3 の限界状態に達する点は、ケース 1 では $4\delta_0$ 、ケース 2 では $6\delta_0$  におおむね相当する。これらの結果は、実験値の46%~65%と、推定精度としては高くないが、いずれも実験結果を安全側に評価する傾向にある。

一方、軸方向鉄筋の引張ひずみの限界状態を設定せず、コンクリートの限界圧縮ひずみのみにより限界状態を評価する場合には、耐震性能 2 の限界状態に達する点の変位はいずれのケースにおいても100mm程度と、実際の限界状態に相当する変位よりも

2倍程度大きな変位を推定する。これは、軸方向鉄筋の許容引張ひずみに対する限界状態を設定していない場合には、RCラーメン橋脚が水平力を受けた際に、圧縮軸力が小さくなる側の柱部において、圧縮軸力が小さくなるために柱に曲げが作用しても圧縮側のコンクリートのひずみが限界圧縮ひずみになかなか到達しないためである。このことから、著者らが提案する手法において軸方向鉄筋の引張ひずみとコンクリートの圧縮ひずみの両方に対して限界状態を設定していることは、RCラーメン橋脚の塑性変形能を適切に評価する上でも有効であると言える。

## 5. 結論

本研究では、RCラーメン橋脚の面内方向の塑性変形能の評価に対して、著者らが単柱式RC橋脚に対して提案している塑性変形能の評価方法の適用性を、過去に行われた正負交番繰返し載荷実験の結果との比較をもとに検討した。また、RCラーメン橋脚における地震時の限界状態の考え方についても検討した。本研究で得られた結論は以下の通りである。

(1) RCラーメン橋脚の場合には、4箇所の塑性ヒンジにおいてエネルギー吸収をすること等の効果により、単柱式RC橋脚よりも、載荷の繰返しに対して水平力やエネルギー吸収が安定して確保出来る傾向にある。ただし、水平力が最大値に達し

たあとは、水平変位が大きくなると、水平力は低下するため、RCラーメン橋脚の限界状態の設定においては、この水平力の低下を考慮する必要がある。

(2) 提案手法によるRCラーメン橋脚の耐震性能2及び3の限界状態に達する点の水平変位の推定値は、実験値の46%～65%と、推定精度としては高くないが、いずれも実験結果を安全側に評価する傾向にある。

## 参考文献

- 1) 小森暢行, 星隈順一, 堺淳一: RC橋脚の地震時限界状態の評価手法に関する研究, 第14回 性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.329-336, 2011.
- 2) 社団法人 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V, 日本道路協会, 2002.
- 3) 寺山徹, 大塚久哲, 長屋和宏, 佐藤貴志, 田崎賢治: 地震時保有水平耐力法による鉄筋コンクリートラーメン橋脚の耐震設計, 土木技術資料, 第39巻, 第2号, pp44-49, 1997.
- 4) 社団法人 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V, 日本道路協会, 2012
- 5) 独立行政法人 土木研究所: 鋼材料・鋼部材の強度等に関する統計データの調査, 土木研究所資料, 第4090号, 2008.