

論文

[2210] 束ね鉄筋を用いた RC 柱の鉄筋抜け出し量と変形性能

菅野 貴浩*1・石橋 忠良*2・古谷 時春*3・堀江 雅直*4

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート（以下、RCという）柱をスレンダーにするために軸方向鉄筋量の大きい高密度配筋を用いるケースが生じてきた。その場合、主鉄筋間隔の十分な確保が困難、束ね鉄筋の使用が必要、等といった場合がしばしばある。特に束ね鉄筋を用いた場合、定着部での付着力低減による主鉄筋抜け出し量が相当に大きく、それがRC柱の変形性能に及ぼす影響が比較的大きい。しかし今のところその影響についてまだ十分に解明されておらず、束ね鉄筋RC柱、高密度配筋RC柱のじん性について正確な評価がなされていないのが現状である。そこで今回、束ね鉄筋を用いたRC柱の主鉄筋抜け出し量を実験的に解明し、その定量的評価方法を求めるとともに、部材全体の変形性能に及ぼす影響について検討・考察を行ったので報告する。

2. 実験概要

供試体形状・配筋の例を図-1に、供試体諸元を表-1に示す。パラメータとして、主鉄筋抜け出し量に関係がある[1]鉄筋中心間隔Dと鉄筋径φとの比D/φ、主鉄筋の束ね本数nをそれぞれ2.17~4.07、1~4本と変化させた。ここで束ね鉄筋のDとφは、それぞれ等断面積の1本の鉄筋として換算した値とする。主鉄筋はフーチング中に十分な定着長および直角フックを付けて定着し、定着端部でのすべりをゼロとした。また柱部材には十分な量の帯鉄筋を配置し、確実に曲げ破壊を起こすようにした。

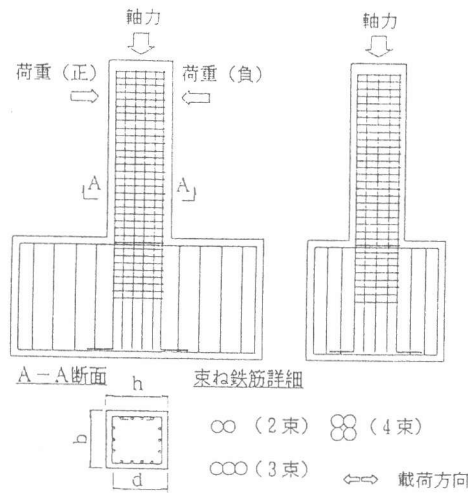


図-1 供試体形状・配筋の例

表-1 供試体諸元

| 供試体番号 | 柱断面寸法 (mm) b × h | 軸方向引張鉄筋 | | | | | 帯鉄筋 | | コンクリート強度 (kgf/cm ²) |
|-------|---------------------|--------------|-----------|---------------|--------------|------|------------|---------|---------------------------------|
| | | 径 (mm) × 本数 | 引張鉄筋比 (%) | 鉄筋中心間隔 D (mm) | 鉄筋換算径 φ (mm) | D/φ | 径 (mm) | 鉄筋比 (%) | |
| 1 | 300 × 350 | D18 (2束) × 3 | 1.33 | 60 | 22.5 | 2.67 | D13 ctc100 | 0.84 | 3.3.4 |
| 2 | 350 × 350 | D18 (3束) × 3 | 1.75 | 60 | 27.6 | 2.17 | D13 ctc100 | 0.72 | 3.1.6 |
| 3 | 400 × 350 | D19 (2束) × 3 | 1.48 | 110 | 27.0 | 4.07 | D13 ctc 75 | 0.84 | 3.0.3 |
| 4 | 400 × 400 | D19 (3束) × 3 | 1.96 | 110 | 33.1 | 3.32 | D13 ctc 50 | 1.27 | 4.2.4 |
| 5 | 400 × 450 | D16 (4束) × 3 | 1.53 | 80 | 31.8 | 2.52 | D13 ctc 50 | 1.27 | 4.0.0 |
| 0 | 300 × 300 | D22 (1束) × 3 | 1.55 | 60 | 22.0 | 2.73 | D13 ctc100 | 0.84 | 4.0.1 |

※1 引張鉄筋比には帯鉄筋を考慮していない。
 ※2 鉄筋換算径は、束ね鉄筋を前節の等しい1本の鉄筋に換算した場合の径。
 ※3 鉄筋はJIS G3112に規定されたSD345を使用し、断面は軸力に対して直角、また引張試験の結果、ひずみ18,000μ前後でひずみ硬化を示し、約5,000kgf/cm²で破断した。

- * 1 東日本旅客鉄道 (株) 東京工事事務所 工事管理室、工修 (正会員)
- * 2 東日本旅客鉄道 (株) 東京工事事務所 工事管理室室長、工博 (正会員)
- * 3 東日本旅客鉄道 (株) 東京工事事務所 工事管理室 (正会員)
- * 4 東日本旅客鉄道 (株) 東京工事事務所 工事管理室

なお主鉄筋降伏時を部材降伏時、荷重－載荷点変位曲線の包絡線が主鉄筋降伏荷重 P_y を下回る限界を部材終局時とし、それぞれの変位を δy 、 δu とする。

3. 実験結果

実験結果を一覧として表-2に、荷重－載荷点変位の例を図-2に示す。ここで変位は、主鉄筋抜け出しによる柱部材の回転変位を補正する前の供試体全体についての値である。

表-2 実験結果

| 供試体 番号 | 降伏時 | | | | 終局時 | | | |
|-----------|---------------------|---------------------|--------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|----------------------------------|
| | 荷重 (tf) | | 変位 δy (mm) | P _{ve} /P _{yc} | 荷重 (tf) | | 変位 δu (mm) | P _{ue} /P _{uc} |
| | 実験値 P _{ve} | 計算値 P _{yc} | | | 実験値 P _{ue} | 計算値 P _{uc} | | |
| 1 | 18.0 | 17.8 | 1.01 | 9.6 | 21.8 | 20.8 | 1.05 | 65.9 |
| 2 | 22.3 | 22.4 | 1.00 | 10.4 | 27.2 | 25.5 | 1.07 | 48.5 |
| 3 | 24.3 | 25.1 | 0.97 | 8.8 | 30.5 | 28.5 | 1.07 | 46.7 |
| 4 | 40.1 | 39.3 | 1.02 | 8.2 | 50.2 | 44.4 | 1.13 | 63.7 |
| 5 | 41.5 | 42.2 | 0.98 | 7.9 | 50.7 | 48.7 | 1.04 | 62.4 |
| 0 | 15.0 | 15.4 | 0.97 | 9.9 | 17.8 | 18.0 | 0.99 | 52.5 |

※ 終局時の荷重については、最大耐力とする。

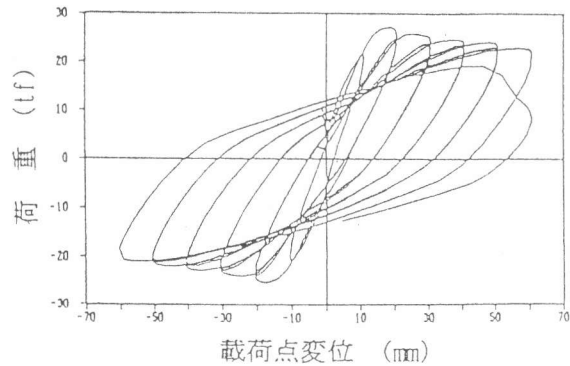


図-2 荷重－載荷点変位

3.1 破壊状況

供試体0、1、2、5の破壊状況を図-3に示す。供試体はすべて曲げひび割れ発生後、引張鉄筋が降伏し、その後曲げひび割れの増加に伴い、曲げひび割れから斜めひび割れへの進展、さらには軸方向主鉄筋に沿った縦ひび割れの発生も見られた。縦ひび割れは主鉄筋束ね本数が多くなるほど大きくなる傾向を示し、全供試体とも最終的には圧縮部のコンクリートの圧壊による耐力の低下を示し、終局状態に至った。また主鉄筋束ね本数の多い供試体2、4、5では、部材終局時において柱下端から0.5~1.0 d (dは有効高さ)までの範囲で、縦ひび割れによる鉄筋とコンクリートとの付着切れも見られた。

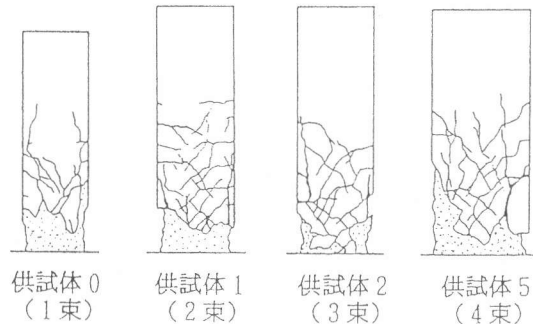


図-3 破壊状況

3.2 フーチング内での主鉄筋ひずみ分布と荷重－主鉄筋ひずみ関係

供試体2の降伏時、終局時でのフーチング内における主鉄筋ひずみ分布を図-4に、柱下端における荷重－主鉄筋ひずみ曲線を図-5に示す。これより主鉄筋ひずみは柱下端において最大値を示し、2 δy 時に12 000~16 000 μ となり、その後若干増加はするが変化は少ないことがわかる。この傾向は全供試体について共通し、終局時でのひずみは20 000 μ 前後であった。

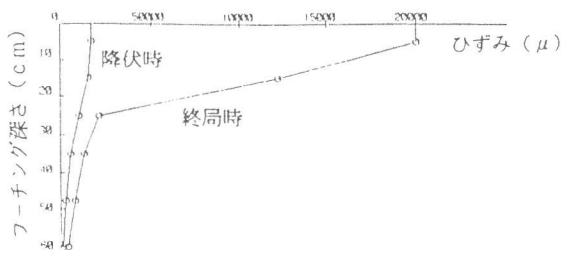


図-4 フーチング内主鉄筋ひずみ分布

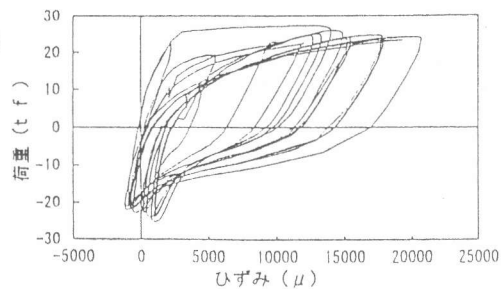


図-5 荷重－主鉄筋ひずみ関係

3. 3 主鉄筋抜け出し量

表-3にフーチングからの鉄筋抜け出し量の実験値と計算値を示す。ここで実験値は、前章から定着端部でのすべりがゼロであることにより、文献[1]よりフーチング内での主鉄筋ひずみの積分値により求めた。ただし、終局時におけるフーチングと柱との接合位置でのひずみを $20\ 000\ \mu$ とした。一方、計算値は式(1)、(2)に示す束ね鉄筋を用いない場合の従来の算定式[1]による値である。

表-3 主鉄筋抜け出し量

| 供試体 番号 | 鉄筋抜け出し量 (mm) | | | | | |
|-----------|---------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|
| | 降伏時 | | | 終局時 | | |
| | 実験値 Δl_{yc} | 計算値 Δl_{yc} | $\Delta l_{yc}/\Delta l_{yc}$ | 実験値 Δl_{uc} | 計算値 Δl_{uc} | $\Delta l_{uc}/\Delta l_{uc}$ |
| 1 | 0.53 | 0.57 | 0.93 | 3.52 | 0.70 | 5.01 |
| 2 | 0.52 | 0.59 | 0.88 | 3.70 | 0.72 | 5.14 |
| 3 | 0.45 | 0.51 | 0.89 | 2.99 | 0.63 | 4.71 |
| 4 | 0.58 | 0.54 | 1.08 | 3.84 | 0.67 | 5.76 |
| 5 | 0.58 | 0.57 | 1.01 | 4.47 | 0.70 | 6.35 |
| 0 | 0.43 | 0.57 | 0.75 | 2.45 | 0.69 | 3.55 |

$$\Delta l_{yc} = 0.70 - 0.054 (D/\phi) + 0.0017 (D/\phi)^2 \quad (1)$$

$$\Delta l_{uc} = 0.83 - 0.054 (D/\phi) + 0.0015 (D/\phi)^2 \quad (2)$$

ただし、 Δl_{yc} : 降伏時の抜け出し量(mm) Δl_{uc} : 終局時の抜け出し量(mm)
 D : 主鉄筋中心間隔 ϕ : 主鉄筋径

これによると降伏時では精度良く算定可能だが、終局時において違いが大きいことがわかる。またこの終局時における違いは束ね鉄筋を用いていない供試体0についても大きく、これは従来の算定式がひずみ硬化を示さない鉄筋を用いて求めたものであるのに対し、今回の実験で使用した鉄筋はひずみ硬化の性質を示すため、主鉄筋の材料の性質に原因があるものと考えられる。

4. 終局時における軸方向束ね主鉄筋抜け出し量算定式の検討

前章より、使用した鉄筋のひずみ硬化の影響により、束ね鉄筋を用いていない供試体0についても終局時抜け出し量が計算値と合わないことがわかった。そこでこの章では束ね鉄筋を含む、ひずみ硬化の性質を示す軸方向主鉄筋の終局時におけるフーチングからの抜け出し量算定式を求めることとする。

ここで鉄筋とコンクリートとの付着応力についてであるが、島らにより鉄筋降伏後も精度良く算定可能な、式(3)に示す付着応力-すべり-ひずみ関係(以下、 $\tau-s-\varepsilon$ 関係という)が提案されている[2][3]。

$$\tau/f'c = 0.73 (\ln(1+5s))^3 / (1+\varepsilon \times 10^5) \quad (3)$$

ただし、 $s = 1000 (S/D)$ τ : 付着応力
 $f'c$: コンクリート強度 S : すべり量
 D : 鉄筋径 ε : ひずみ

そこで供試体0について、鉄筋の性質に合わせひずみ硬化をも考慮した応力-ひずみ関係をトリリニア曲線でモデル化し、 $\tau-s-\varepsilon$ 関係を用い収束計算により終局時のフーチング内での主鉄筋ひずみ分布とすべり量を求めると図-6のようになり、実験値と良く一致している。

ここで、島らの $\tau-s-\varepsilon$ 関係は1本の異形鉄筋を埋め込んだ引き抜き試験から得られたもの

であり、本実験のように鉄筋を数本並べて配置してある場合は鉄筋が相互に影響しあい付着力を低下させると考えられ、付着応力についてはとなり合う鉄筋相互の影響を補正する係数K (式(4)に示す) [1] により低減を行った。またフーチング上面における主鉄筋のひずみは20 000 μ とした。

$$K = 0.40 + 0.03 (D/\phi) \quad (4)$$

図-6より、束ね鉄筋を用いない場合の終局時の主鉄筋抜け出し量は $\tau-s-\epsilon$ 関係から精度良く算定出来ることがわかった。そこで同様の方法により、供試体1~5について束ね鉄筋を用いないと仮定した場合の終局時主鉄筋抜け出し量を求め、実験値との比較を示すと表-4のようになる。

ここで供試体1~5についての実験値と計算値との比 ($\Delta l_{ue}/\Delta l_{uc}$) は、主鉄筋を束ねたことによる付着力低減の影響によるものと考えられる。

そこで、($\Delta l_{ue}/\Delta l_{uc}$) と鉄筋束ね本数との関係を示すと図-7のようになり、束ね本数が多いほど ($\Delta l_{ue}/\Delta l_{uc}$) が大きくなる傾向がある。

これより、最小2乗法により鉄筋束ねによる主鉄筋抜け出し量の補正係数B(n) を求めると式(5)のようになる。(図-7に実線で示す)

$$B(n) = 1 + 0.56(n-1)^{0.89} \quad (5)$$

ただし、n : 主鉄筋束ね本数 (本)

$$1 \leq n \leq 4$$

これにより、 $\tau-s-\epsilon$ 関係で求めた主鉄筋抜け出し量に主鉄筋束ねの補正である式(5)を乗じれば軸方向束ね主鉄筋の終局時抜け出し量が算定出来ることになるが、 $\tau-s-\epsilon$ 関係による収束計算はかなり煩雑である。そこで、次にD/ ϕ から主鉄筋抜け出し量を簡易に求める方法を示す。

主鉄筋束ね補正B(n) より、今回の実験値を式(5)で除した値は、束ねない鉄筋を用いた場合の終局時抜け出し量に相当すると考えられる。そこでその値およびD/ ϕ = 5, 8, 12, 16 として $\tau-s-\epsilon$ 関係から求めた終局時抜け出し量と、D/ ϕ との関係を示すと図-8のようになる。

これを最小2乗法により近似すると式(6)が得られる。(図-8に実線で示す)

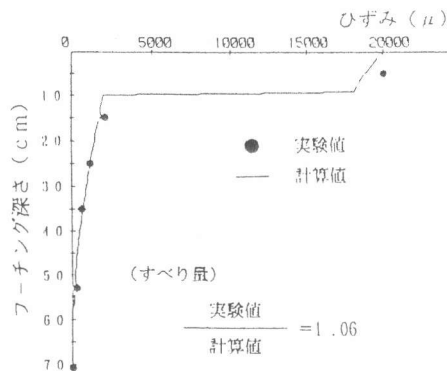


図-6 フーチング内主鉄筋ひずみ分布 (終局時)

表-4 終局時主鉄筋抜け出し量の比較

| 供試体番号 | 終局時鉄筋抜け出し量 (mm) | | |
|-------|---------------------|---------------------|-------------------------------|
| | 実験値 Δl_{ue} | 計算値 Δl_{uc} | $\Delta l_{ue}/\Delta l_{uc}$ |
| 1 | 3.52 | 1.74 | 2.02 |
| 2 | 3.70 | 1.98 | 1.87 |
| 3 | 2.99 | 2.23 | 1.34 |
| 4 | 3.84 | 2.00 | 1.92 |
| 5 | 4.47 | 1.61 | 2.78 |
| 0 | 2.45 | 2.31 | 1.06 |

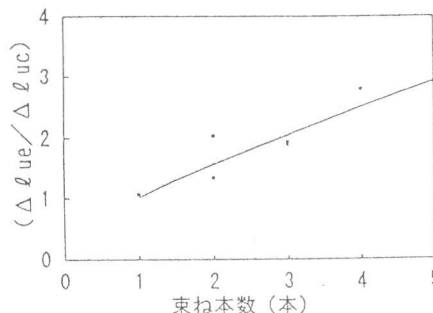


図-7 ($\Delta l_{ue}/\Delta l_{uc}$) と束ね本数

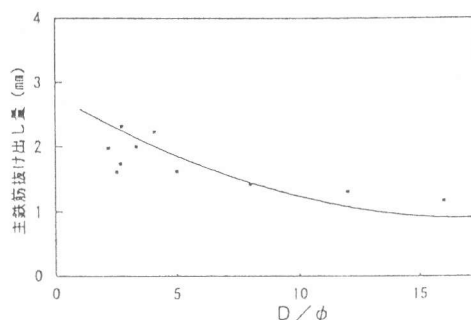


図-8 終局時主鉄筋抜け出し量とD/ ϕ

$$\Delta l_{uc} = 2.8 - 0.22(D/\phi) + 0.0064(D/\phi)^2 \quad (6)$$

ただし、 Δl_{uc} : 終局時の抜け出し量(mm) D : 主鉄筋中心間隔
 ϕ : 主鉄筋径 $2 \leq D/\phi \leq 16$

ここで、式(6)はあくまで鉄筋を束ねない場合の終局時抜け出し量と D/ϕ との関係である。従って、式(5)、(6)より束ね鉄筋の終局時抜け出し量 Δl_{uc} は次式で表される。

$$\Delta l_{uc} = [2.8 - 0.22(D/\phi) + 0.0064(D/\phi)^2] \times [1 + 0.56(n-1)^{0.89}] \quad (7)$$

ただし、 Δl_{uc} : 終局時の抜け出し量(mm) n : 主鉄筋束ね本数
 D : 主鉄筋中心間隔 ϕ : 主鉄筋径
 $2 \leq D/\phi \leq 16$ $1 \leq n \leq 4$

※ ここで束ね鉄筋の場合の D と ϕ は、それぞれ等断面積の1本の鉄筋に換算した場合の値とする。

式(7)の検証のため、今回の実験データと束ね鉄筋RC柱による過去のデータ[4]、さらに柱部の鋼管とフーチングの縁が切れており、力学的メカニズムが比較的RC柱と似ている束ね鉄筋を用いた鋼管巻きRC柱のデータ[5]を用い、計算値と実験値との関係を示すと図-9のようになる。各供試体とも、軸方向主鉄筋はフーチング中に十分な定着長および直角フックを付けて定着されており、定着端部でのすべりはゼロと考えられる。またせん断力に対しては、十分な量の帯鉄筋または鋼管で補強されている。実験値 Δl_{ue} と式(7)による計算値 Δl_{uc} との比($\Delta l_{ue}/\Delta l_{uc}$)の平均値、変動係数はそれぞれ、0.948、0.209となっており、式(7)は実験値を良く近似していることがわかる。

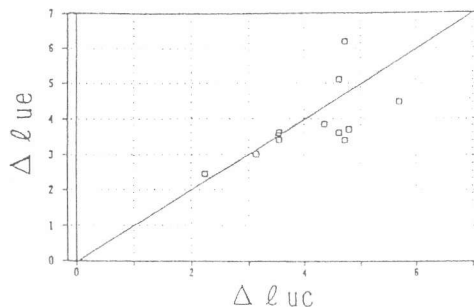


図-9 計算値と実験値との関係

5. 束ね鉄筋RC柱の変形性能

実験で得られる供試体の変位は、柱部分のみの弾性・塑性変位と、軸方向主鉄筋がフーチングから抜け出すことによる柱の回転変位が合計されたものである。特に束ね鉄筋を用いたRC柱では前章からわかるように終局時の主鉄筋抜け出し量が大きく、実験供試体等、断面の小さいもの場合は全変位に占める柱部分の回転変位の割合がかなり高いものと考えられる。

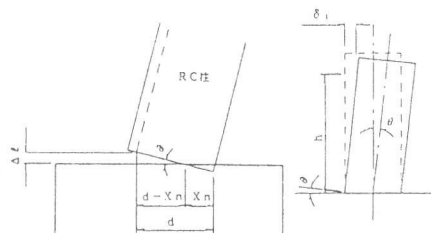


図-10 主鉄筋抜け出しによる柱の回転変位

ここで、主鉄筋抜け出しによる柱部分の回転変位 δ_1 は図-10より以下の方法により求めることにする。

$$\begin{aligned}
 \theta &= \Delta \ell / (d - x_n) \\
 \delta_1 &= h \cdot \theta \\
 &= h \cdot \Delta \ell / (d - x_n)
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \theta \\ \delta_1 \\ & \end{aligned}} \right\} (8)$$

ただし、 x_n : 圧縮縁より中立軸までの距離 (力のつり合い、平面保持の法則による)

h : せん断スパン (載荷点までの高さ)

$\Delta \ell$: 軸方向主鉄筋抜け出し量

d : 有効高さ

図-11に部材降伏時および終局時の供試体全変位 δ に対する回転変位 δ_1 の比 δ_1/δ を示す。これより今回実験の供試体では、 δ_1/δ は降伏時で35~45%、終局時で30~50%と大きく、束ね鉄筋を用いたRC柱の地震時変形能力を評価する場合、主鉄筋抜け出しによる回転変位を正確に把握しなければならないと言える。

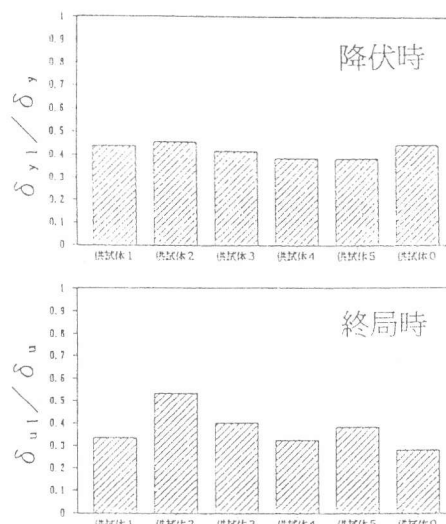


図-11 δ_1 と δ との関係

6. まとめ

今回の研究により以下のことがわかった。

- ・ 従来の降伏時軸方向主鉄筋抜け出し量算定式(1)は、束ね鉄筋を用いた場合でも適用可能である。
- ・ ひずみ硬化域をもつ鉄筋を使用した場合の終局時鉄筋抜け出し量は、ひずみ硬化の性質を示さない鉄筋を用いて求めた従来の算定式(2)に比べ相当に大きく、またその違いは鉄筋束ね本数が多いほど大きい。そこでその場合、鉄筋ひずみ硬化の影響を考慮し束ね補正を行った式(7)により算定すれば良い。
- ・ 束ね鉄筋を用いたRC柱供試体の全変位に占める回転変位の割合は、今回実験の供試体では降伏時、終局時とも30~50%と大きく、地震時変形能力を評価する場合、主鉄筋抜け出しによる回転変位を正確に把握しなければならない。

【参考文献】

- 1) 石橋忠良・吉野伸一：鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形能力に関する研究、土木学会論文集、第390号、pp57~66、1988. 2
- 2) 島弘・周礼良・岡村甫：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係、土木学会論文集、第378号、pp165~174、1987. 2
- 3) 島弘・周礼良・岡村甫：異形鉄筋の鉄筋降伏後における付着特性、土木学会論文集、第378号、pp213~220、1987. 2
- 4) 今井政人・石橋忠良・古谷時春・菅野貴浩：高密度配筋RC橋脚の地震時変形能力に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.2、pp1097~1100、1993
- 5) 鷹野秀明・鎌田則夫：鋼管とRCとの接合部に関する実験的研究、第21回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集、PP486~487、1994