

鉄筋コンクリート橋脚における軸方向鉄筋の 伸び出し量に関する研究

近藤益央¹・運上茂樹²

¹ 正会員 建設省土木研究所 耐震技術研究センター耐震研究室（〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地）

² 正会員 工博 建設省土木研究所 耐震技術研究センター耐震研究室（〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地）

1. まえがき

平成8年に改訂された道路橋示方書に規定されている地震時保有水平耐力法においては、橋脚の終局変位と降伏変位から許容塑性率を算出し、鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査を行っている。道路橋示方書では、塑性ヒンジ領域での塑性曲率分布を等価な矩形ブロックに換算して終局変位を簡便的に算出している。しかし、鉄筋コンクリート橋脚の終局状態においては、軸方向鉄筋がフーチングから伸び出し、その影響を受ける¹⁾²⁾。

そこで、本研究では軸方向鉄筋として実験によく使用されるD10程度の細径のものから実橋脚で使用されるD35までの5種類の鉄筋を用いて、静的な油圧ジャッキによる引き抜き実験を実施し、フーチング直上における軸方向鉄筋のひずみ量から伸び出し量を推定することを試みた。また、本実験では軸方向鉄筋径を変化させる他に、軸方向鉄筋の本数による影響を検討するために1本と3本でそれぞれ引き抜く実験を実施し、伸び出し量に及ぼす影響について考察を行った。

5種類の異なる鉄筋径の実験結果から軸方向鉄筋径と軸方向鉄筋のひずみ量から軸方向鉄筋の伸び出し量の推定式を作成し、1.2m×1.2mの中規模供試体を用いた正負交番载荷実験³⁾により得られた軸方向鉄筋の伸び出し量との比較検討を行った結果を報告する。

2. 実験供試体と载荷方法

実験には、図-1に示すフーチングを模擬したコンクリートブロックを用いて静的な油圧ジャッキにより引き抜き実験を行った。コンクリートブロックはフーチング同様に、D22の鉄筋をかぶりコンクリ

ート厚を100mmとして1段配筋した。コンクリートブロックは、コンクリートの最大骨材寸法を20mm、载荷実験日のコンクリート圧縮強度は、30～33N/mm²であった。コンクリートブロック内にはD10、D19、D25、D32、D35の5種類の軸方向鉄筋を配置した。軸方向鉄筋が引き抜きの際に完全に抜け出してしまうのを防ぐために、900mmの定着長を確保するとともに、10φ以上のフック長を設けた。また、引き抜き実験では、鉄筋とコンクリートの付着力が大きく影響することから、鉄筋の外周面にひずみゲージを張り付け、防水テープで保護したケースと、軸方向鉄筋を半割にして内部にリード線取り出しのための溝付け加工（写真-1）を施

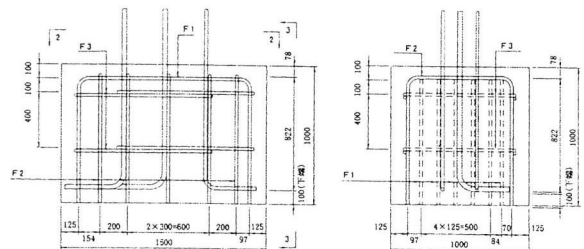


図-1 実験供試体の概要

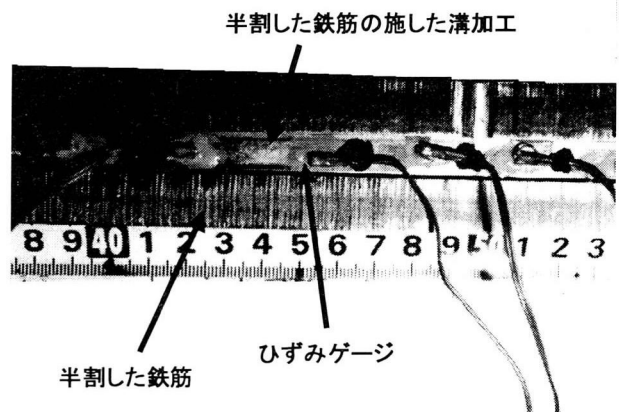


写真-1 半割した鉄筋

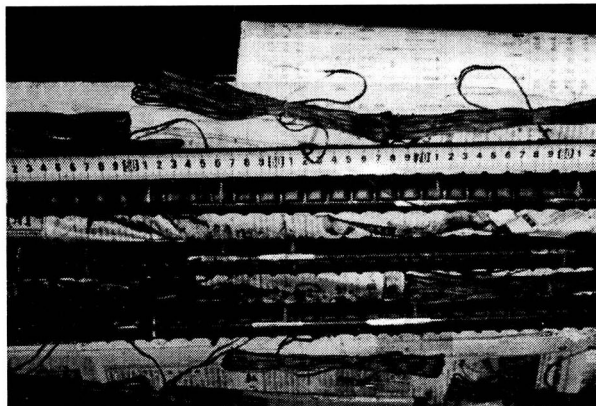


写真-2 半割した鉄筋を張り合わせた状態

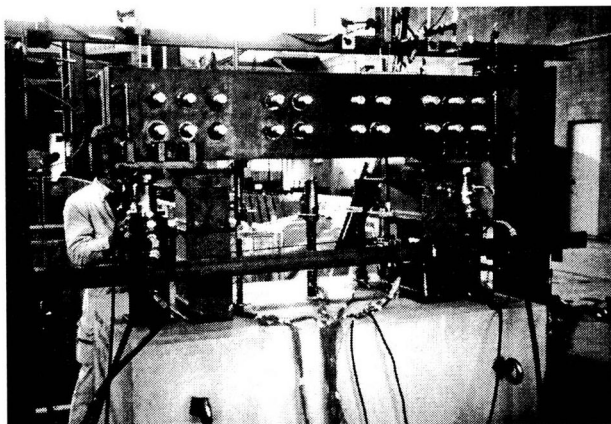


写真-3 荷重実験の状況

し¹⁾²⁾、内部にひずみゲージを張り付けた後で接着剤により一体化（写真-2）させたケースの2ケースを実施した。鉄筋を半割にしたケースでは、加工時に欠損が発生するために、2本の鉄筋をそれぞれ半割加工にして1本の試験片を作成した。なお、D10の鉄筋に関しては鉄筋を半割にすることが不可能であったので、外周面にひずみゲージを張り付けたケースのみとした。

さらに、実橋脚では複数本の軸方向鉄筋が同時に引き抜かれる状態にあることから、近接する鉄筋が相互に影響しあい、引き抜き強度が低下すると考えられるため、既往の正負交番荷重実験でよく使用されるD10、D19、D25の3種類の鉄筋について、実験供試体の配筋間隔にあわせてそれぞれ43mm、50mm、80mmの間隔で3本配置し、3本同時に引き抜く実験を実施した。3本の引き抜きにおいても、ひずみゲージの張り付けによる付着力低下の影響を評価するために、ひずみゲージを外側に張り付けた場合と半割にして内部に張り付けた場合と2ケースを実施した。

荷重実験の状況を写真-3に示す。コンクリートブロック上に配置した2機の油圧ジャッキにより梁を持ち上げることで軸方向鉄筋を引き抜き構造

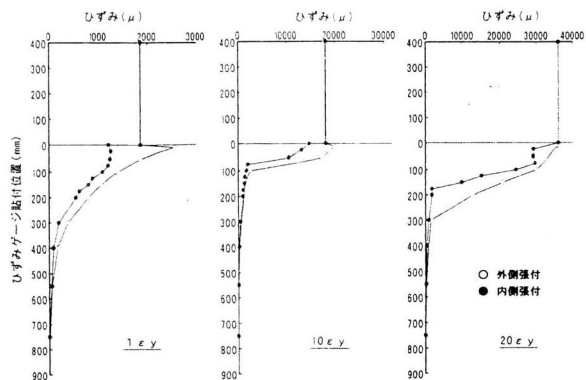


図-3 ひずみ分布の比較(D35、1本)

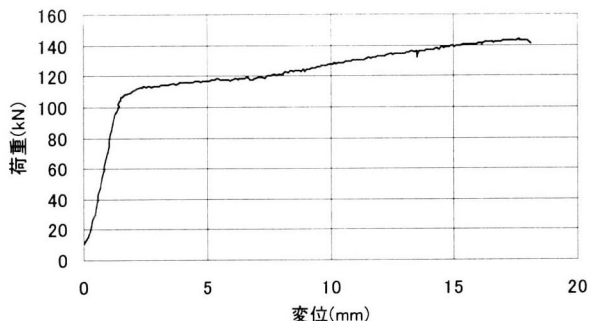


図-2 荷重実験結果(D35、1本、ゲージ内張り)

とした。軸方向鉄筋の伸び出し量は、コンクリートブロックに出来るだけ近い位置で変位計により計測した。本荷重では、人力により油圧を供給するため、荷重速度は完全な一定速度ではないが、降伏点までは軸方向鉄筋のひずみが300 μ/分となるように、降伏点に達した後は荷重梁の変位が0.6mm/分となるように荷重した。また、荷重は気中部のひずみゲージが60,000 μに達するか、鉄筋が破断した時点まで行った。

3. 実験結果

引き抜き実験の荷重-変位関係の一例を図-2に示す。ひずみゲージを鉄筋外周部に張り付けたケースでは、鉄筋気中部でひずみが60,000 μに達するまで荷重出来たが、鉄筋を半割したケースでは気中部で鉄筋が破断した。これは、リード線を取り出すために鉄筋の一部に欠損部を施したためである。荷重に伴い、軸方向鉄筋の周辺コンクリートがコーン状に剥離し、その最深部はコンクリートブロック内の上面の鉄筋まで進行していた。

ひずみゲージを鉄筋外周部に張り付けたことの影響を評価するために、気中部のひずみが降伏ひずみの1倍、10倍、20倍の時にコンクリートブロック内に埋め込まれた鉄筋のひずみを深度方向に比較したのが図-3である。ひずみゲージを外側に張り

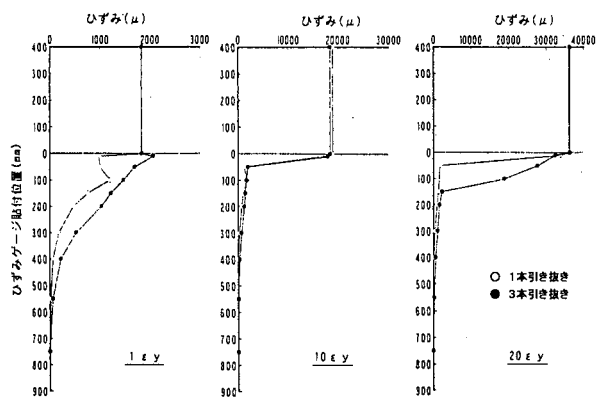
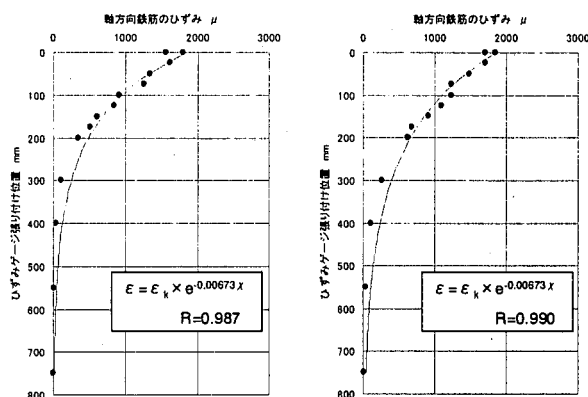


図-4 ひずみ分布の比較(D25、ゲージ内張り)

付けたケースでは、鉄筋の気中部で降伏ひずみに達した時にはコンクリートに埋め込まれた位置では降伏ひずみより小さい値となっているが、ひずみゲージを外周部に張り付けたケースでは、コンクリート上面から 50mm の深さまでほぼ降伏ひずみと同じひずみが発生していた。これは、鉄筋とコンクリートの付着が切れ、鉄筋の引っ張り応力が深い位置まで伝達されていることがわかる。気中部のひずみが降伏ひずみの 10 倍になったときでは、ひずみゲージを外周部に張り付けた場合も、内側に張り付けた場合もコンクリート上面から 100mm 程度の深さまで降伏ひずみに達している。

気中部のひずみが降伏ひずみの 20 倍になったときでは、ひずみゲージの張り付けによる付着力への影響がより一層顕著に現れ、ひずみゲージを外周部に張り付けた場合では軸方向鉄筋のひずみが大きく変化する位置がコンクリートブロック上面から 300mm の位置まで下がっているものの、ひずみゲージを内側に張り付けた場合では、軸方向鉄筋のひずみが大きく変化する位置がコンクリートブロック上面から 175mm となっていることがわかる。また、鉄筋径が太いほどコーン状にコンクリートが剥離する面積が大きくなるとともに、剥離深さも深かった。

鉄筋本数の影響について、図-4 に示す。ひずみゲージの張り付けにより付着力の低下が起きないように内側に張り付けケースで、1 本引き抜きと 3 本同時引き抜きを比較すると、鉄筋の気中部で降伏ひずみに達した時では、コンクリートブロック上面から 550mm の深さまで、3 本同時に引き抜いた時の方が 1 本引き抜きに比べて全体的に大きなひずみが発生している。これは、隣接し合う鉄筋が相互に影響し、コンクリートがコーン状に剥離しやすい状態にあることを示している。従って、3 本同時に引き抜いた時には、鉄筋の気中部でのひずみが降伏ひずみの 20 倍に達した時、ひずみが大きく変化する位置がコンクリートブロック上面から 175mm の位置



(a) D25 鉄筋 (b) D32 鉄筋
図-5 ひずみ曲線の推定(ゲージ内張り)

であったが、1 本引き抜きでは 100mm であった。このことから、複数の軸方向鉄筋が配置された場合には、1 本の鉄筋を引き抜く場合に比べて、コンクリートのコーン状の剥離を促進させ、このために鉄筋とコンクリートとの付着力の低下につながっていることが確認された。

4. 伸び出し量の推定

今回の実験結果を基に橋脚基部の軸方向鉄筋のひずみ量から伸び出し量を簡易的に求める方法を検討した。

実験結果から、コンクリートの剥離が促進しない範囲、すなわち橋脚基部のひずみが降伏ひずみに達していない場合には、深さ方向に向かってなめらかな曲線を描いて減少している。しかし、その後はコンクリートがコーン状に剥離し始め、軸方向鉄筋が伸び出す。このときには、軸方向鉄筋のひずみが大きく変化する位置がフーチング上面からフーチング内部へと移行する。しかし、フーチング内には上面鉄筋が配置されており、この上面鉄筋によりコンクリートがコーン状に剥離するのを拘束する。従って、フーチング内で鉄筋のひずみが大きく変化する位置が重要となる。5 種類の鉄筋径の異なる実験結果から、橋脚基部の鉄筋が降伏ひずみに達した時のデータを用いて、最小 2 乗法の回帰計算により図-5 に示すひずみ曲線を仮定した。鉄筋は降伏点を越えた後は、伸び出し量が大きく変化的ことから、フーチング内の軸方向鉄筋が降伏ひずみに達した位置を変曲点と仮定すると、変曲点の深さ位置は次式により求められる。

$$l_1 = \frac{(\epsilon_k - \epsilon_y)}{b} \quad (1a)$$

ここに、

l_1 : 橋脚基部（フーチング上面）から
変曲点までの距離 mm
 ε_k : 橋脚基部での軸方向鉄筋のひずみ
 ε_y : 軸方向鉄筋の降伏ひずみ
 b : 鉄筋径による補正係数で、引き抜き
実験データの回帰により式(1b)となる

$$b = -6.93\phi + 389.9 \quad (1b)$$

ここに、

ϕ : 鉄筋径 mm

伸び出し量は、橋脚基部の軸方向鉄筋ひずみが降
伏ひずみに達していない場合には式(2a)、橋脚基部
の軸方向鉄筋ひずみが降伏ひずみに達し、変曲点の
位置がフーチングの上面鉄筋より浅い場合には式
(2b)、変曲点の位置がフーチングの上面鉄筋より深
い場合には式(2c)とした。

$$\delta = \varepsilon_k \int_0^l e^{ax} dx \quad (2a)$$

$$\delta = \varepsilon_k l_1 + \varepsilon_y \int_0^{l-l_1} e^{ax} dx \quad (2b)$$

$$\delta = \varepsilon_k l_1 + \frac{(\varepsilon_k + \varepsilon_y)(l_1 - l_2)}{2} \varepsilon_y \int_0^{l-l_1} e^{ax} dx \quad (2c)$$

ここに、

l_2 : 橋脚基部（フーチング上面）から
フーチング上面鉄筋までの距離 mm

l : 鉄筋の定着長 mm

a : 鉄筋径による補正係数で、実験
データの回帰により式(2d)となる

$$a = 1.44 \times 10^{-4} \phi - 0.73 \times 10^{-2} \quad (2d)$$

5. 推定式の検証

軸方向鉄筋の伸び出し量を計測できるように、橋
脚基部に変位計を設置して実施した、正負交番載荷
実験結果^{3),4),5)}を用いて今回検討した伸び出し量の推
定式を検証した。

検証の対象とした実験供試体は、橋脚基部に軸方
向鉄筋の伸び出し量を計測するために変位計を設置
している。

実験で計測された軸方向鉄筋のひずみ量を用いて
求めた伸び出し量と実験結果との検討結果を図-6
に示す。実験結果では、橋脚基部に張り付けたひず
みゲージがリード線の欠損等により、最大で $4 \delta_y$
までしか計測できていない。同図によれば、推定し
た伸び出し量と実験値は概ね一致しているが、伸び
出し量が多いケース（2400mm × 2400mm、軸方向
鉄筋 D35 使用）では推定値の方が1割程度小さく
なっている。これは、フーチング内部のひずみ分布

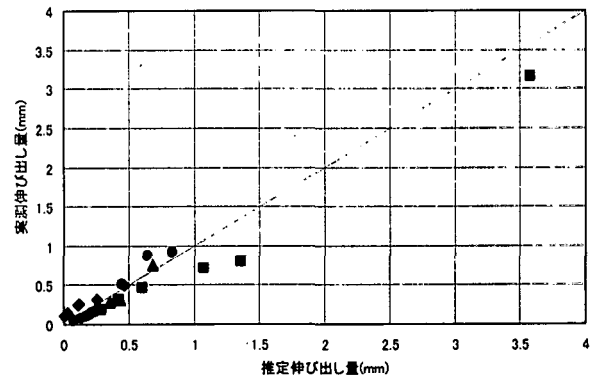


図-6 推定式と実験結果による伸び出し量の比較
が正確に推定できていないため、今後の更なる検
討が必要である。

6. まとめ

本研究では、軸方向鉄筋の伸び出し量を橋脚基部
のひずみから連続的に推定することを試みた。既往
の鉄筋コンクリートの載荷実験結果との比較では、
実規模実験で実験結果の方が計算結果より大きくな
ったものの、全般的には非常によく一致した。しか
し、本推定式ではコンクリートと鉄筋の付着力がパ
ラメータとして取り扱っていないので、コンクリー
ト強度を推定式に取り込む必要がある。さらに、既
往の実験結果では橋脚基部の軸方向鉄筋に張り付け
たひずみゲージの値が、降伏ひずみ以降ではリード
線の破断等により計測できないケースが多く、終局
変位に達する領域（伸び出し量の大きな領域）での
比較検証が出来なかった。今後は、伸び出し量の
大きな領域についても実験結果との比較検討をする
ことにより、その精度を検証する必要がある。

参考文献

- 1) 小林茂敏、河野広隆、渡辺博志、田村久：接合部の定
着鉄筋の定着性状に関する調査報告書、土木研究所資
料第2742号、1989。
- 2) 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、No.390 / V
-8, pp.57-66、1988。
- 3) 星隈順一、運上茂樹、長屋和宏、池田博之：大型模型
実験に基づく曲げ破壊型鉄筋コンクリート橋脚の塑性
変形性能、第10回日本地震工学シンポジウム論文集、
pp.2123-2128、1998。
- 4) 長屋和宏、運上茂樹：横拘束筋にスパイラル鉄筋およ
びP C鋼線を用いたR C橋脚の動的耐力、変形性能に
関する実験的検討、土木学会第54回年次学術講演会
講演概要集第1部B、pp.452-453、1999。
- 5) 運上茂樹他：鉄筋コンクリート橋脚の耐震性に及ぼす
寸法効果の影響に関する共同研究報告書、土木研究所
共同研究報告書第234号、1999。