

論文 高強度材料を用いた鉄筋の機械式定着性能

小島伸一*3・中尾圭司*2・中野春彦*4・西山峰広*1

要旨: RC造高層建築物における柱・梁接合部の主筋に機械式定着を採用することを目的に、その定着性能を評価するため高強度材料を用いた引抜き実験とその解析を行った。実験変数をコンクリート強度、定着長さ、定着の形態として、コンクリートブロック中に定着されたネジシ鉄筋を引抜き実験を行った。解析では逐次積分法[1][2]を用い、鉄筋ひずみ度分布等を実験結果と比較し、定着長が 15d あれば鉄筋が弾性範囲においてはコンクリートは比較的健全でその拘束効果は十分であることが確認された。

キーワード: 付着・定着,機械式定着,高強度材料,コンクリート内部ひび割れ,逐次積分法

1. はじめに

過去の高層RCの事例においてよく用いられているU型定着に対して、機械式定着を採用することによりコンクリートの充填性が良い、鉄筋の曲げ加工が無いといった有効性がある。機械式定着工法について、普通強度の範囲においては技術的にほぼ確立されており、また柱頂部の柱主筋の定着には多くの実績がある。しかし、高強度コンクリートと高強度鉄筋の組み合わせによる事例は非常に少ないため、その定着性能を評価する必要がある。本研究では、高強度材料を用いた引抜き実験を行い定着性能を確認し、また解析的検討を行った。

表-1 試験体一覧

| No. | 試験体名 | コンクリート強度 (N/mm ²) | 定着長 | 付着の有無 | 定着の形態 | 支圧面積比 |
|-----|----------|-------------------------------|-----|-------|-------|-------|
| 1 | 60-10-BP | 60 | 10d | 有 | 板 | 5.18 |
| 2 | 60-15-BP | 60 | 15d | 有 | 板 | 5.18 |
| 3 | 42-10-BP | 42 | 10d | 有 | 板 | 7.49 |
| 4 | 42-15-BP | 42 | 15d | 有 | 板 | 7.49 |
| 5 | 42-15-UP | 42 | 15d | 無 | 板 | 7.49 |
| 6 | 42-15-BN | 42 | 15d | 有 | ナットのみ | 1.55 |
| 7 | 42-15-B0 | 42 | 15d | 有 | 鉄筋のみ | - |

コンクリート強度 定着長

※試験体名 42 - 15 - BP

B: 付着有り, U: 付着無し

P: 定着板使用, N: ナットのみ, 0: 鉄筋のみ

※ ナット端部までの定着長L 10d=380mm, 15d=570mm (dは鉄筋径の呼び名)

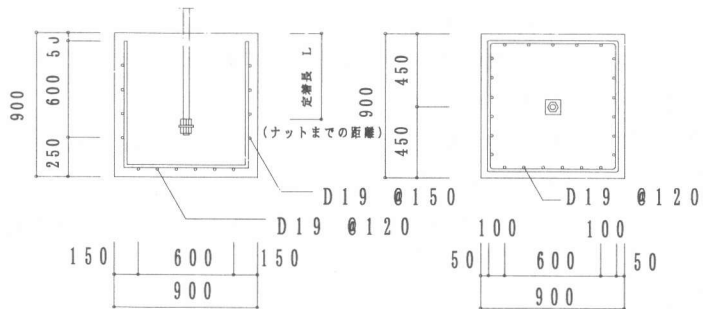


図-1 試験体の形状および配筋

*1 京都大学助手 工学研究科建築学専攻、工博（正会員）

*2 大鉄工業（株）技術室 技術開発センター所長（正会員）

*3 大鉄工業（株）技術室 技術開発センター（正会員）

*4 ジェイ・エル西日本コンサルタンツ（株）建築設計部、工修（正会員）

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の一覧を表-1、試験体の形状および配筋を図-1、定着金物の大きさと形状を図-2に示す。本工法ではプレート両側のナットを締め付けることにより定着プレートを鉄筋に固定している。鉄筋は

SD490、D38のネジ筋を使用した。実験変数は、コンクリート強度($F_c=60, 42\text{N/mm}^2$)、定着長(10d, 15d)、鉄筋の付着有無、定着の形態とした。定着板の大きさは、技術資料[3]による F_c によって決定される最小寸法とし、SS400材を使用した。定着板の形状については、同資料によると任意であるが、実部材に適用する際には一列の梁筋に対して一枚の定着金物の使用を予定していることを考慮し、正方形とした。定着ナットは鉄筋の規格降伏点を保証する強度・大きさのものを使用した。コンクリートは最大粗骨材寸法20mmの碎石を使用し、目標スランプフロー値を50cmとした。 $F_c=60\text{N/mm}^2$ の配合は水セメント比35%、単位水量 165kg/m^3 とし、 $F_c=42\text{N/mm}^2$ の配合は水セメント比45%、単位水量 185kg/m^3 とした。使用材料の力学的性質を表-2に示す。

2.2 载荷および測定方法

図-3に载荷装置を示す。鉄筋のひずみゲージ貼付位置はコンクリート打設面(0d位置)より5dピッチを基本とし、ひずみ度は表裏の平均値とした。鉄筋の変位は変位計により測定した。加力側鉄筋変位はコンクリート打設面との相対変位を、定着端鉄筋変位はシース管をあらかじめ埋め込み変位計のシャフトを延長し定着端に接続しておくことにより試験体底面との相対変位を測定した。42-10-BPには、図-4のように3方向モールドゲージを埋め込みコンクリート内部ひずみを測定し、コンクリート内部の主応力の向きと大きさを計算した。またコンクリート最終内部破壊状況を確認するため樹脂注入の上試験体を切断した。

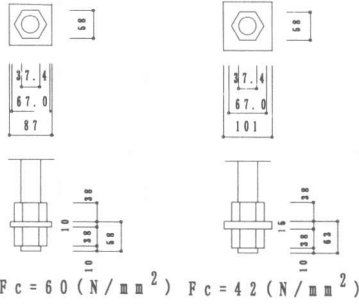


図-2 定着金物の大きさと形状

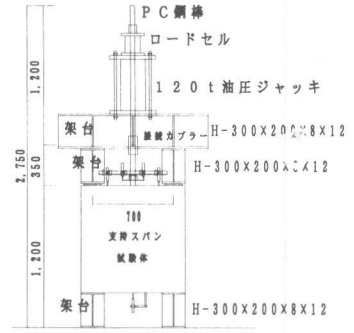


図-3 载荷装置

表-2 使用材料の力学的性質

| コンクリート | 圧縮強度 σ_B (N/mm^2) | 割裂強度 σ_t (N/mm^2) | ヤング係数 E_c ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$) |
|-----------------------|---|---|---|
| $F_c=60\text{N/mm}^2$ | 60.7 | 3.98 | 3.52 |
| $F_c=42\text{N/mm}^2$ | 48.4 | 3.43 | 3.11 |

| 鉄筋 | 降伏点 σ_y (N/mm^2) | 引張強度 σ_u (N/mm^2) | σ_y/σ_u | 伸び (%) |
|------------|---------------------------------------|--|---------------------|-----------|
| D38(SD490) | 537 | 722 | 0.74 | 22 |

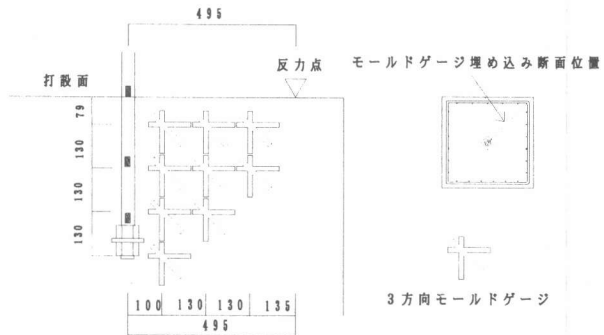


図-4 モールドゲージ位置 (42-10-BPのみ)

3. 実験結果および考察

3. 1 耐力と破壊状況

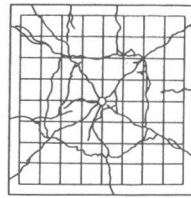
実験結果の一覧を表-3に示す。表中の最大定着端変位は、定着金物側の鉄筋端最大変位量を示す。破壊モードは42-15-B0が鉄筋拔出しによるものでその他は全て鉄筋破断であった。耐力も42-15-B0を除いて、母材の破断荷重にほぼ等しかった。試験体の加力側表面の最終破壊状況と42-10-BP、42-15-BPの最終内部破壊状況を図-5に示す。42-10-BPは鉄筋位置3d, 8d, 定着板上肩付近から3本の大きなひび割れが発生しているのに対し、42-15-BPは鉄筋位置2d付近からの1本のみであった。

3. 2 内部応力と破壊状況

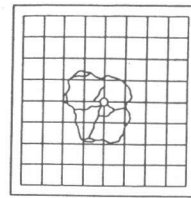
0d位置鉄筋応力度が $1/3 \sigma_y$ 、 $2/3 \sigma_y$ 、 σ_y 時のコンクリート内部の主応力の向きを図-6に示す。内向きの矢印が圧縮、外向きの矢印が引張を表している。図中の測定不能箇所から、ひび割れがその箇所に進行したことが推定できる。この結果と図-5に示す内部破壊状況とはよく一致している。両者から予想される各荷重段階における内部ひび割れを図-6中に点線で示した。

表-3 実験結果一覧

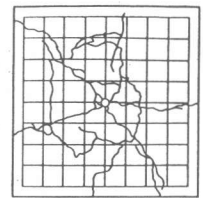
| No. | 試験体名 | 破壊モード | 耐力 (kN) | 最大定着端変位 (mm) |
|-----|----------|-------|---------|--------------|
| 1 | 60-10-BP | 鉄筋破断 | 824.5 | 5.3 |
| 2 | 60-15-BP | 鉄筋破断 | 830.4 | 2.7 |
| 3 | 42-10-BP | 鉄筋破断 | 830.7 | 5.2 |
| 4 | 42-15-BP | 鉄筋破断 | 820.3 | 2.2 |
| 5 | 42-15-UP | 鉄筋破断 | 811.4 | 5.2 |
| 6 | 42-15-BN | 鉄筋破断 | 835.9 | 9.8 |
| 7 | 42-15-B0 | 鉄筋拔出 | 778.4 | - |



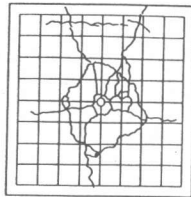
No. 1 60-10-BP



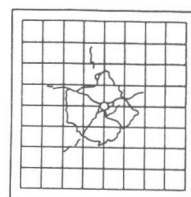
No. 2 60-15-BP



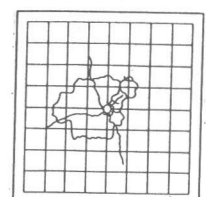
No. 3 42-10-BP



No. 4 42-15-BP

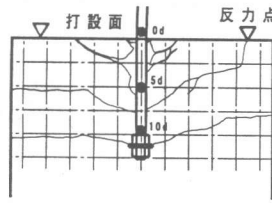


No. 6 42-15-BN

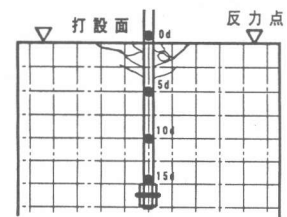


No. 7 42-15-B0

*No. 5 42-15-UP は付着無しのため打設面にひび割れ生じず

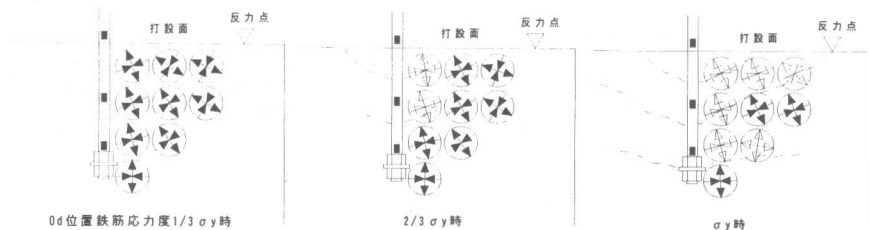


No. 3 42-10-BP 内部破壊状況



No. 4 42-15-BP 内部破壊状況

図-5 最終破壊状況



* 白抜きは測定不能箇所

図-6 モールドゲージ測定結果 (42-10-BP)

3. 3 引抜き荷重－定着端変位関係

引抜き荷重－定着端変位関係を図－7に示す。定着長 10d の試験体は鉄筋の降伏荷重付近から定着端変位が急増したが、定着長 15d の試験体は大きな変化がなかった。これは内部応力と破壊状況からも分かる通り、定着長 15d の試験体は終局時においても鉄筋の顕著な付着劣化はコンクリートの打設面より 5d 長さ程度しか進展しないが、定着長 10d の試験体は鉄筋が弾性範囲の間から、打設面側だけでなく定着金物近傍にもひび割れが発生し、0d 位置の鉄筋降伏時には鉄筋の定着区間全長に渡り付着劣化が進行しているためである。また 42-15-BP, 42-15-BN, 42-15-B0 の比較から、定着金物の支圧面積を大きくすると定着端変位を抑制する効果があることがわかる。最大定着端変位は、定着金物付の定着長 10d と 15d の試験体を比較すると、定着長 10d の方が 2 倍程度大きかった。

SD390、D38 のネジフシ鉄筋、 $F_c=21\text{N/mm}^2$ のコンクリートを用いた既往の機械式定着の実験結果[3]において「定着長が 10d あれば鉄筋が破断する」、「(定着長 10d の試験体は 0d 位置) 鉄筋降伏時までは付着応力が支配的で、それ以降(定着板の) 支圧応力の作用が大きくなる」と述べられているが、今回の実験結果においても同等の定着性能が確認できた。定着長 15d の試験体は 0d 位置鉄筋降伏時においても付着性能が健全であることが併せて確認できた。

4. 解析

十分な拘束作用がある場合の付着応力度－すべり量特性である藤井モデル[4]を用い、引抜き実験結果を模擬した。鉄筋の応力分布を実験結果と比較することにより、ネジフシ鉄筋と本機械式定着の付着・定着性能を検討した。

4. 1 解析条件

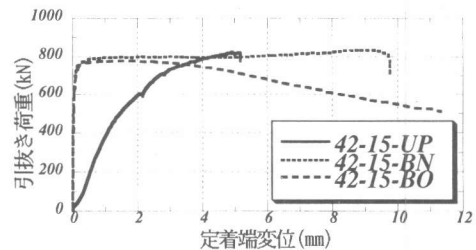
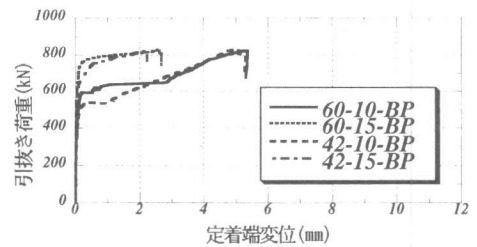
解析はネジフシ鉄筋の定着域を、有限長さ (Δx) に分割して行う逐次積分法を用いた。コンクリートを剛とすると、軸方向力の釣り合いと変形の適合条件は次式で表される。

$$A_s \frac{df_s}{dx} = p\Psi \quad (1)$$

$$\varepsilon_s = \frac{dv}{dx} \quad (2)$$

ここに f_s : 鉄筋応力, ε_s : 鉄筋ひずみ度, A_s : 鉄筋断面積, Ψ : 鉄筋周長, v : 鉄筋のコンクリートとの相対すべり量, p : 付着応力である。付着応力は鉄筋のコンクリートとの相対すべり量の関数 $p(v)$ とし、鉄筋の応力度－ひずみ度関係を $f_s=f_s(\varepsilon_s)$ と表すと、式(1), (2)より以下のように表せる。

$$\int_0^{L_d} G(x) \left[A_s \frac{df_s}{dx} - p(v)\Psi \right] = 0 \quad (3)$$



図－7 引抜き荷重－定着端変位関係

$$\int_0^{L_d} H(x) \left[\frac{dv}{dx} - \epsilon_s \right] = 0 \quad (4)$$

ここに L_d : 定着長さ, $G(x), H(x)$: 重み関数である。本来非線形関数である $p(v), f_s(\epsilon_s)$ を線形に近似表現すると以下のように表せる。

$$p(v + \Delta v) = p(v) + E_v(v) \Delta v \quad (5)$$

$$f_s(\epsilon_s + \Delta \epsilon_s) = f_s(\epsilon_s) + E_s(\epsilon_s) \Delta \epsilon_s \quad (6)$$

ここに $E_v(v)$: 付着応力度-すべり量関係における割線剛性, $E_s(\epsilon_s)$: 鉄筋の応力度-ひずみ度関係における割線剛性である。式(3), (4)に $v + \Delta v, \epsilon_s + \Delta \epsilon_s$ を代入し、直前のステップまで力の釣り合いと変形の適合条件が満足されていると仮定すると、増分型の式(7)(8)が得られる。

$$\int_0^{L_d} G(x) \left[A_s \frac{d(\Delta f_s)}{dx} - \Psi E_v(v) \Delta v \right] = 0 \quad (7)$$

$$\int_0^{L_d} H(x) \left[\frac{d(\Delta v)}{dx} - \Delta \epsilon_s \right] = 0 \quad (8)$$

実験を行った試験体に本解析法を適用するにあたり、鉄筋 1 要素を $0.5d (=19\text{mm})$ とし、定着長 $15d, 10d$ をそれぞれ 30 要素, 20 要素に分割した。定着金物付は端部に $E_v(v)$ の異なる要素 ($E_v'(v) \gg E_v(v)$) を定着金物を表現する要素として付加した。なお鉄筋の応力度-ひずみ度関係には横尾・中村モデル[5]を用いた。定着金物の付着応力度-すべり量関係は鉄筋部分の付着を切った 42-15-UP の実験結果に基づいて藤井モデルを準用した。

4. 2 解析結果

42-15-B0, 42-15-BP, 42-10-BP の鉄筋ひずみ度分布の解析及び実験結果を図-9に示す。鉄筋の弾性範囲における 42-15-B0, 42-15-BP の解析結果は実験結果とよく適合している。

このことから定着長 $15d$ の試験体では、コンクリートの拘束条件の良い藤井モデルを用いた解析により実験結果をうまく追跡できる。したがって鉄筋が弾性範囲においてはコンクリートが比較的健全で

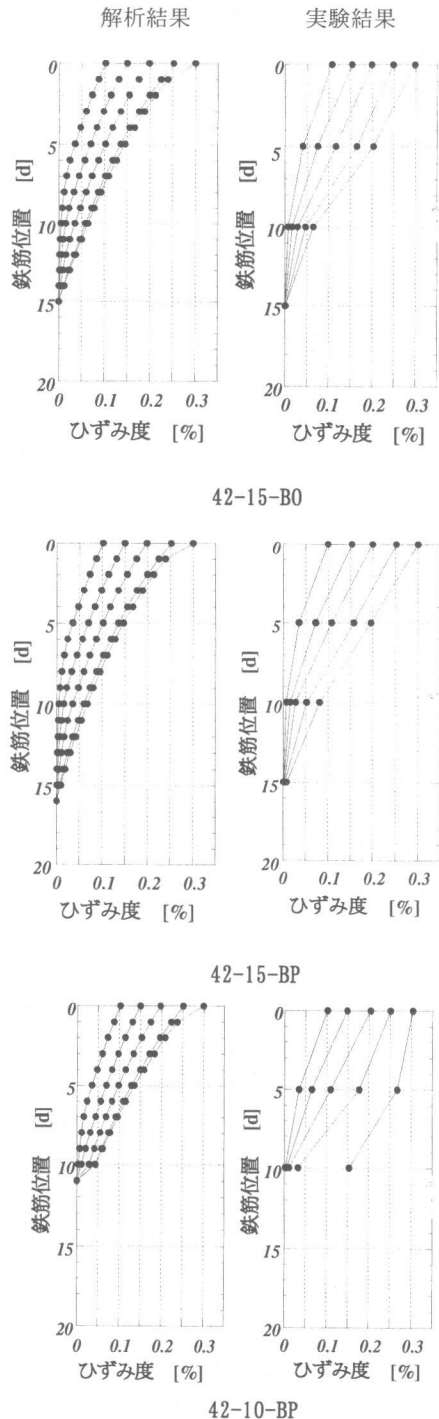


図-9 鉄筋ひずみ度分布の解析・実験結果

その拘束効果が十分であることがわかる。しかし 0d 位置の鉄筋が降伏ひずみを超えると、解析によるひずみ度が実験値と比較して小さい傾向がある。実験では 5d 位置までのコンクリートが破壊しているのに対して解析ではコンクリートが剛であると仮定しているためである。42-10-BP は初期段階で解析のひずみ度が、実験値と比較して小さな値となる。これは前述のように定着長 15d に比べ、内部ひび割れの進展が早いためである。

5. まとめ

定着金物を用いたネジフシ鉄筋の、引抜き実験及び解析結果の概要は以下の通りである。

- 1) 普通強度材料に対する従来の設計方法で、高強度材料を用いた機械式定着金物を設計し引抜き実験を行った結果、普通強度の材料を用いた場合と同等以上の定着性能が確認された。
- 2) 定着長の違いにより鉄筋周囲のコンクリートの破壊の進展に差異が見られた。
- 3) 定着金物の支圧面積を大きくすると定着端変位を抑制する効果があることが確認された。
- 4) 逐次積分法による解析によって、コンクリートが比較的健全な範囲においては、本実験を良好に模擬することができた。

なお外柱梁接合部を想定し、本機械式定着を用いた 1/2 スケールのト型接合部に対する載荷試験を終了しており、高強度材料を用いた場合でも本定着法を用いれば、従来から用いられている U 型定着と同等以上の定着性能を有していることが確認された。

(謝辞) 解析手法及び計算プログラムは Sam Ratulangi 大学の Benny Beni Assa 氏によるものを使用しました。本研究を実施するにあたり、(財)日本建築総合試験所の森田司郎所長、京都大学の渡邊史夫教授、藤井栄助教授には貴重な助言を頂きました。また実験に際しては京都大学の渡邊研究室の松岡寛氏、Eddine Ramdane 氏を始め、研究室の皆様より多大なご協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Beni Assa: RESPONSE OF REINFORCED CONCRETE BEAM-COLUMNS AND FRAMES TO RATERAL SEISMIC LORDING BASED ON MATERIAL PROPERTIES, A Thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy, pp216-221, 1996. 11
- [2] 小阪, 谷川, 山田: エンドクロニック理論による鉄筋コンクリートの非弾性解析-第1報 解析方法-, 日本建築学会論文報告集, NO. 326, pp78-90, 1983. 4
- [3] 神戸製鋼所: ネジコン定着工法の設計・施工要領, 1990. 2
- [4] Fujii, S., Noguchi, H. and Morita, S.: Bond and Anchorage of Reinforcement in High Strength Concrete, Second US.-Japan-New Zealand-Canada Multi-lateral Meeting on Structural Performance of High Strength Concrete in Seismic Regions, 1994. 11
- [5] Yokoo, Y. and Nakamura, T.: NONSTATIONARY HYSTERETIC UNIAXIAL STRESS-STRAIN RELATIONS OF A WIDE-FLANGE STEEL, 日本建築学会論文報告集, No. 250, pp71-80, 1977. 10