

鉄筋コンクリート部材における付着劣化過程の解析的研究

多田 利正 武田 寿一

Analysis of Bond Deterioration Process in Reinforced Concrete Member

Toshimasa Tada Toshikazu Takeda

Abstract

This paper describes a theoretical investigation into the hysteretic behavior of end hinges in reinforced concrete members under the influence of bond deterioration processes of main bars. End hinges and adjacent bond regions in reinforced concrete members were represented by mathematical models which consist of steel elements, concrete fiber elements and bond links. Hysteresis rules for stress-strain relations of materials and bond stress-slip relations of link elements were given. Then, the equilibrium condition of section forces in a hinge was iteratively obtained. Slippage of bars in beam column joints and bond splitting failures of reinforced concrete columns were studied.

概 要

鉄筋コンクリート部材における材端塑性ヒンジの変形特性に付着劣化過程の及ぼす影響を解析的に検討した。材端のヒンジとそれに隣接する鉄筋の定着域を、鉄筋要素、コンクリートファイバー要素、ボンドリンクから構成される数学的なモデルで表現した。材料の応力-ひずみ関係、ボンドリンクの付着応力-すべり関係の履歴則を仮定し、ヒンジでの断面力の釣合状態を繰返し計算で求めた。柱はり接合部における鉄筋抜け出しの問題、及び短柱における付着割裂破壊の問題につき、既往の実験挙動の解析的検討を行なった。解析結果は大略実験挙動を再現するものであった。

1. 序

鉄筋コンクリート部材の復元力特性を考える上で、付着劣化過程の定量的評価という問題は極めて重要である。本論では、付着バネを用いたこの問題に対する一解析手法を提示し、その解析例として、(1) 柱はり接合部における鉄筋抜け出し問題¹⁾、(2) 短柱における付着割裂破壊挙動²⁾、を検討することにする。

解析法の概略を述べれば、まず材端に仮想のヒンジ域を設定し、これに隣接する定着域における付着特性を鉄筋とコンクリート間を結んだ付着バネの $\tau \sim S$ 関係で取り入れる。次に有限個の鉄筋バネに対して付着方程式を逐次計算で解き、一定の境界条件のもとでコンクリートの圧縮力分担を評価し、ヒンジでの断面力の釣合状態を、材端での鉄筋抜け出し量を変動量として、繰返し計算で求めるといものである。すなわち材端塑性ヒンジの変形特性の推移と隣接定着域の付着劣化過程との関連性を、材料の応力-ひずみ関係、付着バネの $\tau \sim S$ 関係に基づいて、定量的に追跡・説明しようというものである。

なお、同内容の論文を文献³⁾に発表しているので、参照されたい。

2. 解析手法

2.1. 解析モデル

図-1に柱はり接合部を対象とした解析モデルをしめす。一応はり降伏型の架構で、地震時の逆対称モーメントを受け、しかも上下等配筋という逆対称条件を満足していることを前提とする。材端部に仮想のヒンジ域を設定し、接合部及びはり中央スパン側の隣接定着域を剛なコンクリートと仮定し、鉄筋とコンクリート間を有限個の付着バネで連結する。ヒンジコンクリートはFiber要素に分割し、そのひずみ状態は柱面とはり中央スパン側コンクリート面で決定されるものとする。問題が複雑になるので、以下の解析では接合部での付着劣化過程のみを対象とし、はり中央スパン側の付着は考慮しない。

2.2. 構成要素の履歴則

(1) コンクリートの応力 σ -ひずみ ϵ 関係は、3次式 $\cdot e$ 関数・直線で包絡線を表わし、繰返し時には最大

耐力までは直線、それ以後は平行四辺形を描く直線でルール化する(図-2)。

(2) 鉄筋の応力 $s\sigma$ —ひずみ $s\varepsilon$ 関係は、ランベルグ・オズグッド関数を用いる(図-3)。

(3) 付着バネの τ — S 関係は、図-4に示すスリップタイプの履歴ルールを設定する。繰返しの際は初期剛性で減力し、減力点Gの2/3の変位点から剛性を回復して経験した最大変位点に向うものとする。

以上の関係を次の様に表示しておく。

$$c\sigma = c(c\varepsilon) \dots (1) \quad s\sigma = f(s\varepsilon) \dots (2) \quad \tau = B(S) \dots (3)$$

2.3. 定着域での付着方程式

定着域では、次の付着方程式を逐次計算で解く。

$$S_i; \text{ given} \dots \dots \dots (4)$$

$$\tau_i = B(S_i) \dots \dots \dots (5)$$

$$s\sigma_i = (s\sigma_{i-1} \cdot sA_{i-1} - \tau_i \cdot \phi \cdot dx) / sA_i \dots \dots \dots (6)$$

$$s\varepsilon_i = f^{-1}(s\sigma_i) \dots \dots \dots (7)$$

$$S_{i+1} = S_i - s\varepsilon_i \cdot dx \dots \dots \dots (8)$$

ただし、 sA_i : 鉄筋断面積、 ϕ : 周長、 dx : 付着長さ

2.4. 変形の適合条件とヒンジコンクリートのひずみ状態

ヒンジコンクリートのひずみは、はり側境界面の変位のみから定まり、平面保持状態とする。すなわち、鉄筋位置のコンクリートひずみは、

$$c\varepsilon_u = -S_i/DHL \dots \dots (9) \quad c\varepsilon_L = S_{N+1}/DHL \dots \dots (10)$$

$$\text{これから、} c\varepsilon_1 = -\frac{c\varepsilon_u - c\varepsilon_L}{D} \times cL_1 + \frac{c\varepsilon_u + c\varepsilon_L}{2} \dots \dots (11)$$

ただし、DHL: ヒンジ長さ、D: 上下鉄筋間隔

cL_1 : コンクリート要素の位置

2.5. ヒンジ断面力の釣合条件

$$(11), (1) \text{式より、} c\sigma_1 = c(c\varepsilon_1) \dots \dots \dots (12)$$

$$\text{釣合式は、} \sum c\sigma_1 \cdot cA_1 + s\sigma_1 \cdot sA_1 + s\sigma_N \cdot sA_N = 0 \dots \dots (13)$$

(13)式が満足されれば、材端モーメント・回転角は、

$$M = \sum c\sigma_1 \cdot cA_1 \cdot cL_1 + s\sigma_1 \cdot sA_1 \cdot \frac{D}{2} + s\sigma_N \cdot sA_N \cdot \frac{D}{2} \dots (14)$$

$$\theta = (S_1 + S_{N+1})/D \dots \dots \dots (15)$$

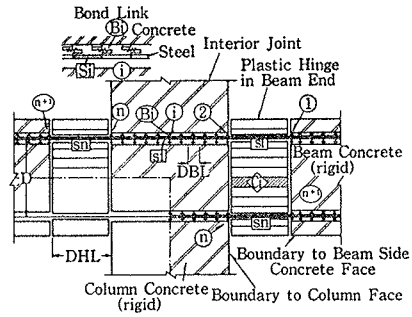
で定まる。以上から、本解析はヒンジ断面力の釣合状態の満足ということを端部境界条件とする一軸付着問題として定式化されたことになる。

2.6. 解析フロー

解析フローチャートを図-5に示す。

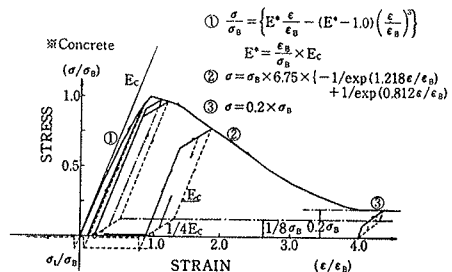
3. 柱はり接合部における鉄筋の抜け出し挙動

柱はり接合部における付着劣化に伴う鉄筋の抜け出し挙動は、隣接部材の復元力特性の性格を左右するため¹⁾、その定量的評価は重要な問題である。ここでは接合部実験¹⁾における通常の通し配筋試験体を対象とした解析結



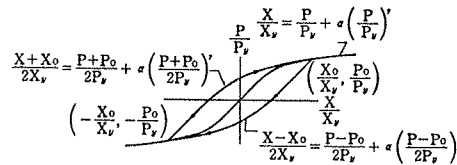
i ; Nodal Point on Straight Bar
 Si ; Steel Element
 Bi ; Bond Link in Interior Joint
 Ci ; Concrete Fiber Element in Hinge
 DHL ; Hinge Length
 DBL ; Bond Length of Each Link
 Analytical Model of Beam-Column Joint Region

図-1 解析モデル



*Stress-Strain Curves of Concrete under Cyclic Loading.

図-2 コンクリートの応力ひずみ関係



*Stress-Strain Relation for Steel

図-3 鉄筋の応力ひずみ関係

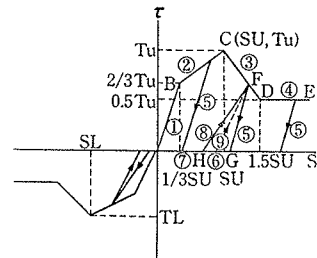


図-4 付着バネの τ — S 関係

果を示す。

3.1. 解析例と接合部内付着特性の仮定

解析例の諸元を図-6に示す。接合部内の付着特性の仮定は現実の付着挙動が複雑なため検討の余地も多いが、ここでは付着実験¹⁾結果を参考にして図-7に示すような値を用いる。これは付着耐力 T_u 、 T_L とその時のスリップ S_u 、 S_L を接合部内で直線分布させたもので、圧縮側と引張側で τ — S 特性の値を変えた。

3.2. 解析結果の検討

まず、材端モーメント—回転角関係を図-8に示す。

付着劣化に伴い、低荷重での剛性低下、ループの逆S化を示している。

次に、材端モーメントと鉄筋抜け出し量の関係を図-9に示す。付着劣化に伴い抜け出し量、めり込み量ともかなり大きくなり回転変形に占める割合も大きい。

図-10に材端モーメントと鉄筋ひずみ量との関係を示す。一度引張側で降伏した後、次の圧縮側への加力途中において、鉄筋ひずみが引張側へ増加するという、ひずみ変化の反転現象が現われている。これは付着劣化の生じる通し配筋試験体に共通して見られる特徴的な実験挙動¹⁾を解析的に再現しているものである。

図-11にヒンデ鉄筋の応力-ひずみ履歴を示す。降伏後の繰返しにおけるループ面積すなわちエネルギー吸収が極めて少ないことが分かる。

図-12には接合部端の付着バネの $\tau \sim S$ 履歴を示す。引抜き状態と押込み状態で別の $\tau \sim S$ 関係を設定しているものである。

図-13には、 $\tau \sim S$, $s\sigma \sim s\epsilon$, $c\sigma \sim c\epsilon$ 分布の推移過程を示す。処女載荷時(1)~18ステップにおいては、圧縮端側の鉄筋応力も若干引張側になっている。一度引張降伏した後の繰返しにおいては、圧縮鉄筋の圧縮力分担は大きくなる。これは引張塑性ひずみの残存によるひび割れ開口によりコンクリートが圧縮力を分担しないためである。すなわち(4)~8ステップでは、鉄筋応力は Couple を形成している。この時圧縮側における引張塑性ひずみの残存と引張側での塑性域の進展によって接合部域の鉄筋ひずみ分布は中央を谷とするV字形になる¹⁾。(4)~9ステップでは τ が付着耐力を越えて塑性域に入り、大きなすべりが生じるとともに、付着力の減少により、鉄筋の圧縮力分担が喪失する。

4. RC 短柱の付着割裂破壊挙動

鉄筋コンクリート短柱の崩壊防止に関する総合実験においては、多数の試験体が付着割裂破壊現象を呈している²⁾。ここでは一試験体⁵⁾を例にとり付着劣化過程の解析的検討を行なう。

4.1. 解析例と付着特性の仮定

解析例の諸元を図-14に示す。両端に1D(D:柱全せい)のヒンデ域を仮定し、中央スパン部のコンクリートと鉄筋を付着バネで結ぶ。せん断力の影響、スタブ側における抜け出し、めり込み問題は考慮しない。中央スパン部分の $\tau \sim S$ 特性としては、図-18に示す値を採用した。

4.2. 解析結果の検討

図-15に実験荷重-変形曲線を示す。図-16には解析材端モーメント・回転角曲線を示す。解析曲線は、耐力

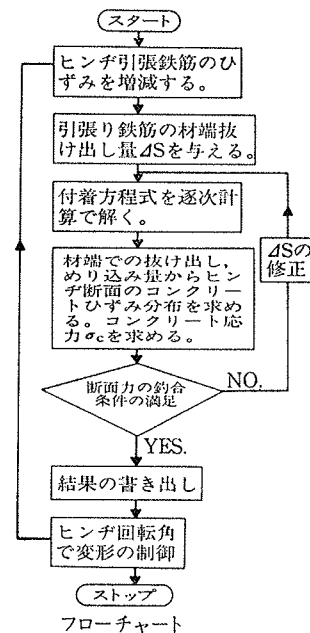


図-5 解析フローチャート

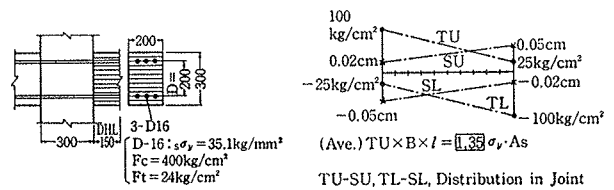


図-6 解析対象の諸元 図-7 接合部 $\tau \sim S$ 特性の仮定

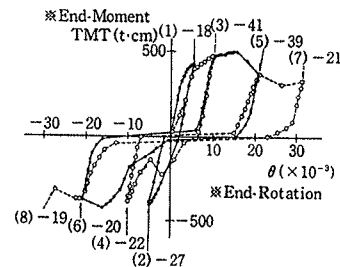


図-8 材端モーメント回転角関係

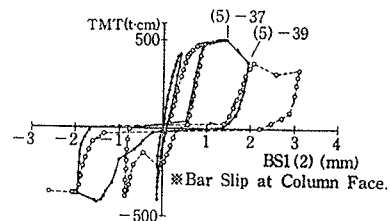


図-9 材端モーメント鉄筋抜け出し量関係

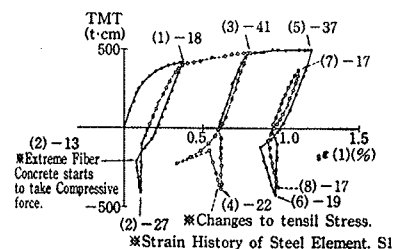


図-10 鉄筋ひずみの履歴

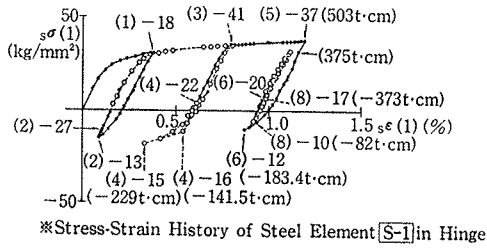


図-11 ヒンジ鉄筋の応力・ひずみ履歴

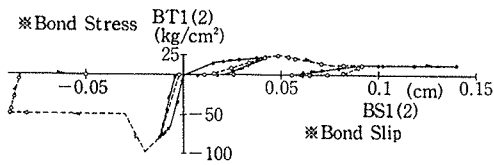


図-12 接合部端部付着バネのτ-S履歴

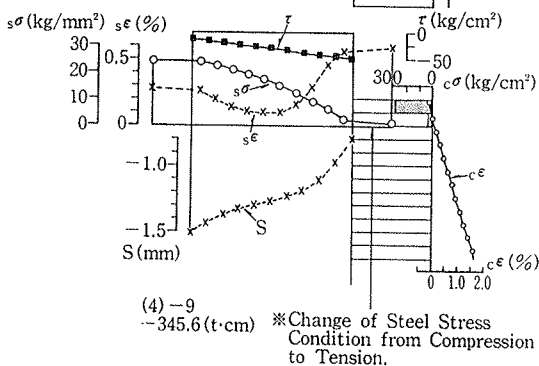
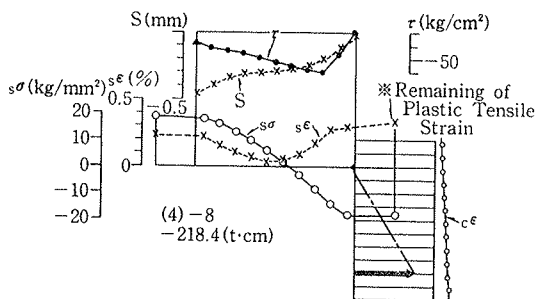
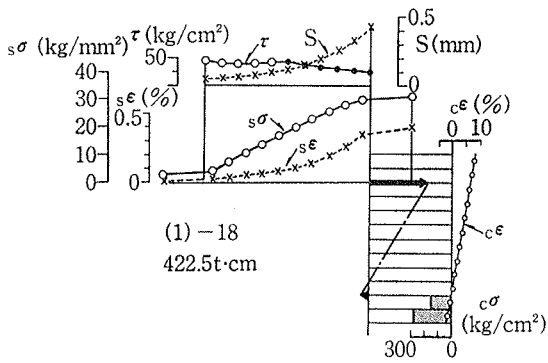


図-13 τ-S 鉄筋の応力 $s\sigma$ とひずみ $s\epsilon$, コンクリートの応力 $c\sigma$ とひずみ $c\epsilon$ 分布の推移

低下、極端な剛性低下、ループの逆S化という実験曲線の特徴を再現している。

図-17には、中央スパン端での鉄筋の抜け出し、めり込み挙動を示す。荷重増に応じ鉄筋の抜け出し量は増加し、スパン全域における付着割裂の発生に伴って、その値は急増し、その後の繰返しに対しては全体的な滑動を呈している。また、この抜け出しめり込み挙動こそが短柱の変形特性を決定づけているものである。すなわち、降伏以後の繰返しにおいては、耐力上昇を示さず、ヒンジ鉄筋のひずみは収束傾向にあり、その後の塑性変形増加は、大部分中央スパンからの鉄筋の抜け出しに拠っているものである。

図-18には、2カ所の付着バネの τ -S 履歴を示す。この τ -S 特性が現実の付着挙動を再現しているかどうかを検討するには、現在の所、対応する実験データが無いので、関連するデータの整備を待たねばならない。

図-19には、 τ -S, $s\sigma$ - $s\epsilon$, $c\sigma$ - $c\epsilon$ 分布の推移過程を示す。(1)-4ステップでは τ は弾性域にあり、鉄筋ひずみの反転位置はほぼスパンの中央、ヒンジの中立軸もほぼ断面中央である。(1)-18ステップでは、 τ は両端部で塑性域への進展を見せ、 $s\epsilon$ の反転位置は圧縮側へ移行する。(3)-45ステップにおいては、 τ はスパン全域で塑性状態に入り、引張側約1/3部分は、stage 4(■印)になっている。(3)-47ステップでは、付着割裂が全域に及ぶ。すなわち、 τ は一定となり、すべりSは急増する。また、圧縮鉄筋応力が激減し、その分はコンクリートの圧縮力分担が増加する。以上の如く、短柱の繰返し荷重下での付着劣化特性、それに伴うメカニズムの変化過程を定量的に追跡した。

5. 結び

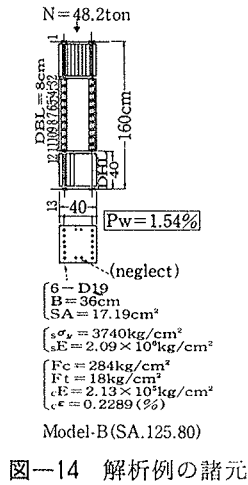
鉄筋コンクリート部材の復元力特性を考える上で、鉄筋とコンクリート間の付着特性は支配的な要因であり、これの定量的な評価は重要な課題である。

ここでは付着バネを用いた一解析手法を示し、解析例として柱はり接合部における鉄筋抜け出しの問題、短柱における付着割裂破壊の問題を検討した。

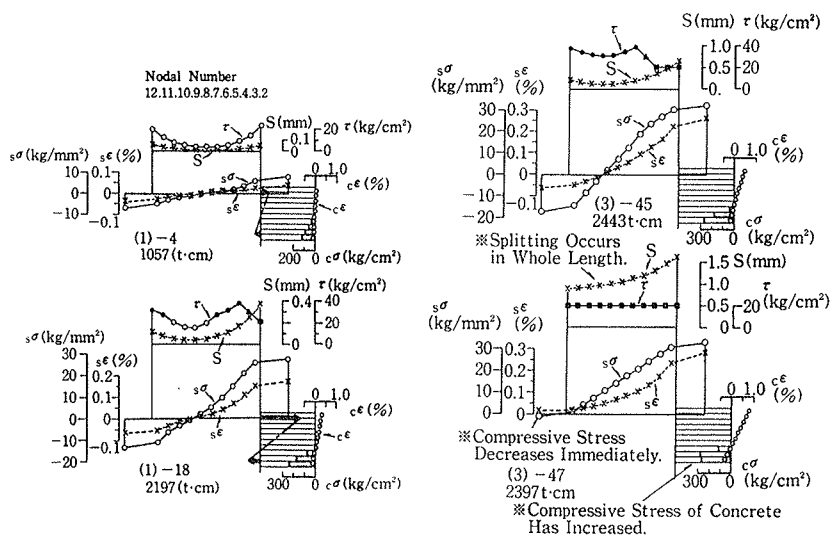
すなわち、付着劣化に起因する部材レベルの復元力特性の劣化過程、メカニズムの変化過程等の特徴的な実験挙動を材料の応力-ひずみ関係、付着バネの τ -S 関係に基づいて解析的に検証・説明した。

解析結果は大略、実験挙動を再現しており、本解析法の有効性を立証するものであった。

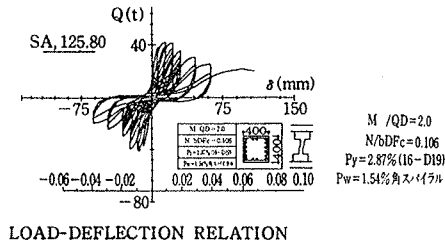
なお、 τ -S 特性の仮定には検討すべき点も多く、これに関連する実験データの整備も重要であろう。



図一14 解析例の諸元

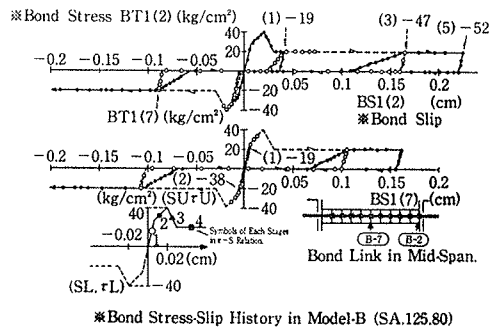


図一19 $\tau \sim S$, $s\sigma \sim s\epsilon$, $c\sigma \sim c\epsilon$ 分布の推移過程

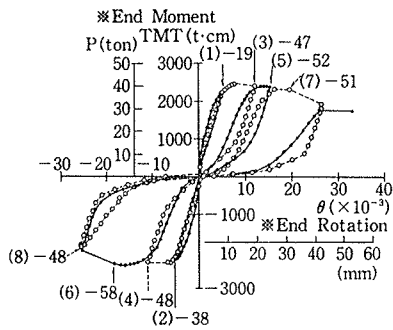


LOAD-DEFLECTION RELATION

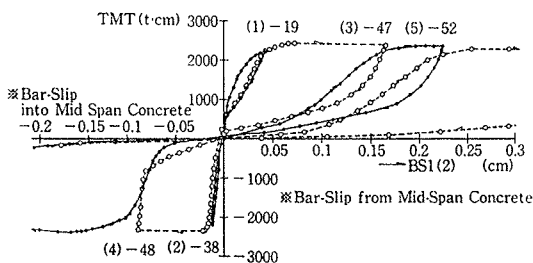
図一15 実験荷重変形曲線



図一18 $\tau \sim S$ 履歴



図一16 解析材端モーメント・回転角曲線



図一17 鉄筋の抜け出し挙動

参考文献

- 1) 多田, 他: RC 柱はり接合部補強法に関する実験的研究 (その1~その5), 日本建築学会 関東支部 報告集及び大会学術講演梗概集, (昭和51, 昭和52)
- 2) 広沢: 鉄筋コンクリート短柱の崩壊防止に関する総合研究 (その19), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和49.10)
- 3) 多田, 他: 鉄筋コンクリート部材における材端塑性ヒンジの変形特性と隣接定着域の付着劣化過程に関する解析的研究 (その1~その3), 日本建築学会関東支部研究報告集, (昭和55)
- 4) 多田, 他: 異型鉄筋の付着特性に関する実験, 日本建築学会関東支部研究報告集, (昭和52)
- 5) 吉岡, 他: 鉄筋コンクリート短柱の水平加力実験, その1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和49.10)