

# 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 (その2)

——柱主筋の接合部からの抜け出し挙動——

多田 利正 武田 寿一

## Analysis of Bond Deterioration Process in Reinforced Concrete Member (Part 2)

——Pullout of Column Reinforcement from Joint under Seismic Loading——

Toshimasa Tada Toshikazu Takeda

### Abstract

An interior beam-column joint in a ductile moment-resisting reinforced concrete frame was assumed and eight different cases of bond characteristics of column reinforcement in the joint were hypothesized. A previously developed computer program was applied to each case, and the bond deterioration processes of column reinforcement in the joint under seismic loading were investigated theoretically through the hysteretic behavior of column-end hinge, pullout of column reinforcement from joint, etc. According to the bond strengths in the joint the hysteretic behavior of column-end hinge showed drastic changes and indicated the importance of assessing "bond" in the joint, and further, it was explained theoretically that both the reduction of flexural moment capacity at column end and the compressive failure of hinge concrete were accelerated considerably when bond strength in the joint was inadequate.

### 概 要

RC造骨組内柱の柱はり接合部を想定し、この接合部内での柱主筋の付着特性を8ケースに仮定して、地震時の繰返し外力を受けた時の柱主筋の接合部からの抜け出し挙動を解析的に検討した。接合部内での付着耐力分布の大小に応じて、柱端ヒンジの変形特性(モーメント～回転角曲線)は紡錘形の履歴から逆Sスリップ形の履歴へ、顕著な変化を示し、柱の復元力特性を考える上で接合部内の付着特性を評価することが不可欠の事項であることを例証した。また、柱主筋の抜け出し挙動、鉄筋ひずみの履歴挙動などについても、かなりの相違を生じる結果となり、特に、付着耐力が不足する場合には、ヒンジコンクリートの圧縮破壊が促進されたり柱端ヒンジの抵抗モーメントが低下するという現象が解析的に明らかになった。これらの現象と靱性骨組設計との関連性、あるいは接合部における付着検定の重要性について言及した。

### 1. 序

地震時の繰返し水平力を受けるRC造骨組の柱はり接合部を対象として、はり主筋の接合部からの抜け出し挙動、あるいは、接合部域における鉄筋とコンクリート間の付着劣化特性について実験的<sup>1)</sup>・解析的<sup>2)</sup>検討を行っている。この問題はRC部材の復元力特性を考える上で、本質的な性格を有するものと言って良いが、柱主筋についても同様な挙動は当然考えられるものである。接合部における柱主筋の付着性状に着目した実験<sup>5),6)</sup>も行なわれているが、結論的に言えば、柱軸力の存在と地震時の転倒モーメントによるその変動を除けば、柱主筋の

接合部における付着挙動は、はり主筋の場合と全く同一のメカニズムにあるものと考えられる(図-1に地震時の骨組に加わるモーメント分布を、図-2に接合部における応力状態の概念図を示す)。このことから、柱主筋の接合部からの抜け出し量の評価、接合部における付着劣化特性の評価は、柱の復元力特性を定める上で不可欠の事項であり、さらには、この抜け出し挙動が顕著になれば、柱のスパン部分の破壊性状への影響も検討する必要があることが理解される。

前報<sup>1)</sup>においてはRC部材における付着劣化特性を評価するための解析モデル・解析手法と、それを用いた所の柱はり接合部におけるはり主筋の抜け出し問題と短柱

における付着割裂破壊の問題についての解析的検討を紹介したが、本報においては、一つの柱部材を想定して、この解析手法を適用し、接合部からの柱主筋の抜け出し挙動を検討し、さらに、靱性骨組設計との関連性について若干の考察を行なうことにする。

## 2. 解析対象の想定

解析の対象として想定した RC 造骨組の内柱の接合部を図-3に示す。これは文献7)に示された RC 短柱の試験体と同一の諸元を持つ柱を仮定し、それにせい 30 cm のはりの取り付けいた接合部を考えたものである。接合部端に、1D=25 cm (D: 柱せい) の長さの仮定の塑性ヒンジ域を設定する。接合部内部分では、鉄筋を10分割し、各節点をボンドリンクでコンクリートに連結する。

各ボンドリンクの付着応力 $\tau$ ~すべりS特性、あるいは接合部内での付着耐力分布については不明確な点が多いので、これを図-4に示す8ケースに仮定する。図-4では正方向の $\tau$ ~S曲線の特性値  $T_u$ ,  $S_u$  の分布を示しているが、負方向に対してはこれと逆対称の特性を与えているものである。CASE-1, 2, 4, 5, ⑦, ⑧については鉄筋の抜け出し側とめり込み側で耐力を変えたもので、これは接合部内の圧縮端側と引張端側で、付着抵抗機構・コンクリートの破壊形態が全く異なるという実験結果<sup>4)</sup>を反映させたものである。このはり端からの曲げモーメントによる圧縮力を受ける側の付着強度が大きくなるという実験事実<sup>5)</sup>においても指摘されている。

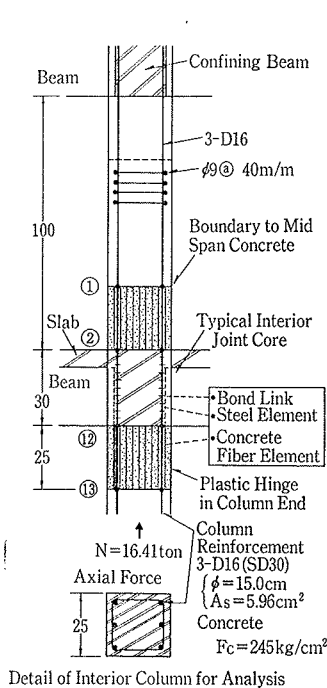
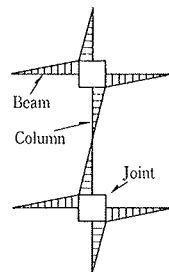
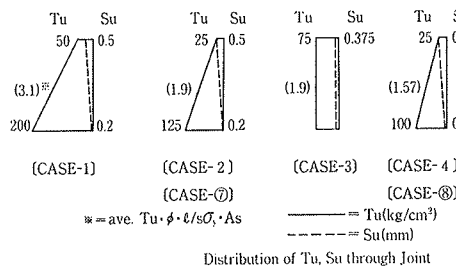


図-3 解析対象の諸元



Typical Moment Diagram of Frames under Seismic Force

図-1 地震時モーメント分布



Distribution of  $T_u$ ,  $S_u$  through Joint

図-4 接合部内付着耐力分布の仮定

CASE-3, 6は、接合部内を同一耐力分布に仮定したものであり、鉄筋にグリース塗布<sup>9)</sup>を施したり丸鋼の場合等、若干特殊なケースと考へてもよからう。また、CASE-⑦, ⑧は $\tau$ ~S関係に於いて最大耐力点以降も同一耐力を保持すると仮定した場合である。図中( )内の数字は接合部内付着耐力の総和  $ave. T_u \cdot \phi \cdot l$  ( $ave. T_u$ : 付着耐力の平均値,  $\phi$ : 鉄筋周長和,  $l$ : はりせい)と鉄筋の降伏時引張り力  $s\sigma_y \cdot A_s$  ( $s\sigma_y$ : 鉄筋降伏応力,  $A_s$ : 引張鉄筋断面積)の比を示したものである。その他の解析上の仮定については前報<sup>1)</sup>に示す所と同じである。

## 3. 解析結果の検討

### 3.1. 材端モーメント(M)~ヒンジ回転角( $\theta$ )曲線

図-5に各ケースの材端モーメント(M)~ヒンジ回転角( $\theta$ )曲線を示す。接合部内の付着耐力が十分に有るCASE-1では、紡錘形の履歴ループを示しているが、付着耐力が小さいケースに於いては、履歴ループは逆Sスリップ型に drastic な変化を呈している。図中に示した、 $M_y^*$ は、建築学会 RC 規準の付20の略算式:

$$M_y^* = 0.8a_1\sigma_y \cdot D + 0.5ND \left( 1 - \frac{N}{b \cdot D \cdot F_c} \right)$$

によって計算した降伏曲げモーメント値であるが、付着耐力の小さいCASE-4, 5, 6では最大曲げ耐力がこの計算値  $M_y^*$  に達しない結果となっている点は注意を要する事項である。

(3.2. 以降では、CASE-1, 6, ⑧の結果について比較検討する。)

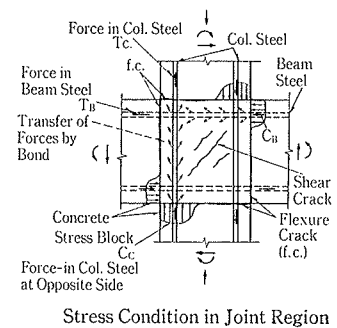
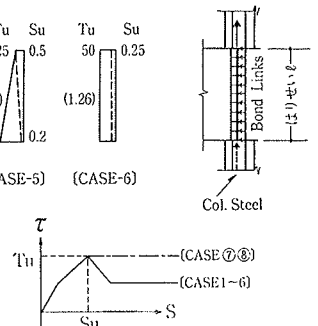


図-2 接合部域の応力状態



3.2. 柱主筋の接合部からの抜け出し挙動

図-6に柱主筋の接合部端における抜け出し・めり込み挙動を示す。CASE-6, ⑧では抜け出し・めり込み量共CASE-1に比較して、かなりの大きさに達しており、当然のことながら、この挙動は、材端ヒンジの変形特性に極めて大きな影響を持つ性格のものであることがわかる。

3.3. 材端ヒンジ鉄筋の挙動

材端ヒンジに位置する鉄筋要素について、材端モーメント(M)と鉄筋ひずみ( $s\epsilon$ )の関係を図-7に、またこの要素の応力( $s\sigma$ )～ひずみ( $s\epsilon$ )履歴関係を図-8に示す。

CASE-6, ⑧では圧縮方向への加力途上において、付着劣化に起因するところの、圧縮鉄筋ひずみの引張側への反転現象が表われている。特にCASE-6では圧縮側鉄筋の応力状態が引張りに転じている。また $s\sigma$ ～ $s\epsilon$ 曲線の描くループ面積、すなわちヒンジ鉄筋によるエネルギー吸収量には、接合部の付着耐力の相違に応じて、大きな差異が生じていることがわかる。

3.4. ボンドリンクの $\tau$ ～S履歴

図-9に代表的なボンドリンクについて、付着応力( $\tau$ )～スリップ(S)履歴例を示す。CASE-1においては、接合部中心部(B-7・リンク)では若干弾性範囲を越えているがほぼ直線的な挙動を示している。端部(B-2・リンク)では、抜け出し方向に対しては大きく塑性域に入っているが、めり込み方向に対しては弾性域に留まっ

ている。CASE-6, ⑧では、抜け出し・めり込み両方向共、大きく塑性域に入っている。

3.5.  $\tau$ とS,  $s\sigma$ と $s\epsilon$ ,  $c\sigma$ と $c\epsilon$ の分布

図-10に第1サイクルと第3サイクルでの最大荷重ステップにおける付着応力( $\tau$ )とスリップ(S), 鉄筋応力( $s\sigma$ )とひずみ( $s\epsilon$ ), ヒンジコンクリートの応力( $c\sigma$ )とひずみ( $c\epsilon$ )の各分布を示す。仮定した接合部内の付着耐力分布の差に応じてすべり量分布, 鉄筋の応力・ひずみ分布には大きな差が生じていることがわかる。たとえば、第3サイクル最大荷重時において、CASE-1では、圧縮側鉄筋はかなりの圧縮応力を分担しているが、CASE-6においては、付着劣化に伴って圧縮側鉄筋の圧縮力分担が喪失し、引張り応力に転じている。またCASE-6の鉄筋ひずみは塑性域への進展が少ない。

3.6. ヒンジコンクリートの挙動

ヒンジ最外縁コンクリート要素の応力～ひずみ履歴を図-11に示す。CASE-6のコンクリートのひずみはCASE-1のそれと比べて塑性域への進展が極めて大きくなっている。つまり接合部の付着耐力が不足するとヒンジコンクリートの圧縮破壊が促進される結果になっている。曲げ耐力時には( $s\sigma \cdot A_s + \text{柱軸力}$ )を圧縮側鉄筋とコンクリートで分担しなければならないので、付着耐力が不足する程、高軸力の場合程、ヒンジコンクリートの圧縮力分担は厳しいということになる。

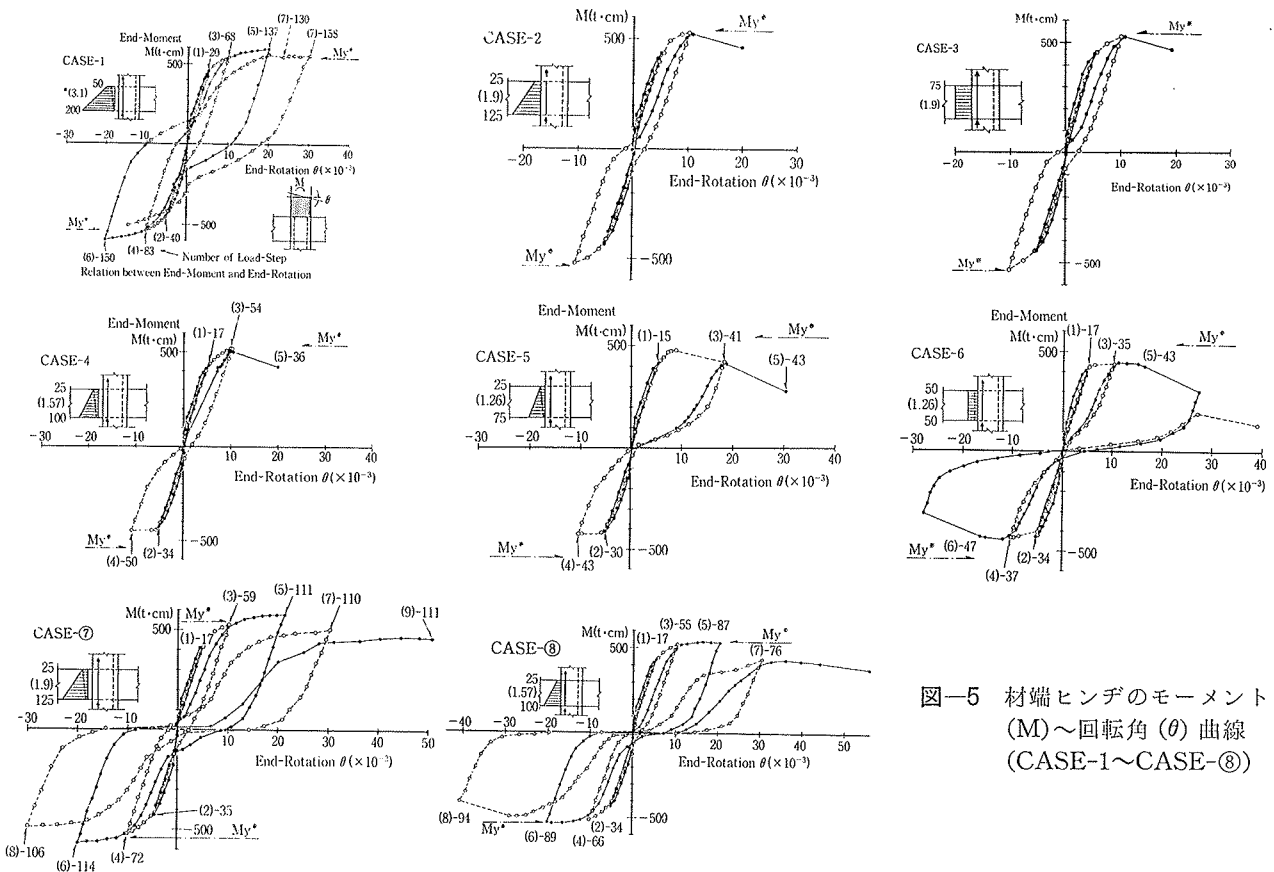


図-5 材端ヒンジのモーメント(M)～回転角( $\theta$ )曲線 (CASE-1～CASE-8)

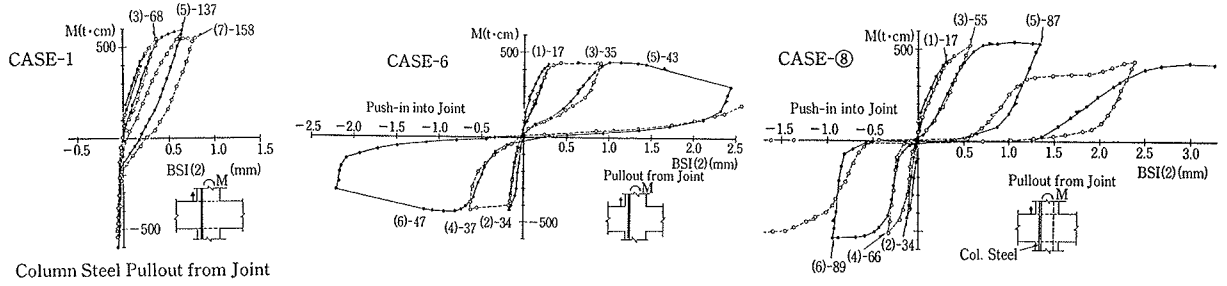


図-6 材端モーメント(M)と柱主筋の接合部からの抜け出し挙動の関係

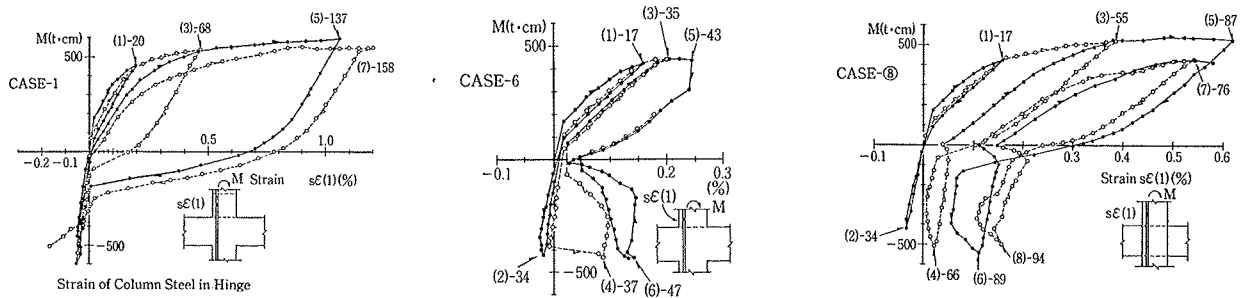


図-7 材端モーメント(M)とヒンジ部分柱主筋のひずみ履歴との関係

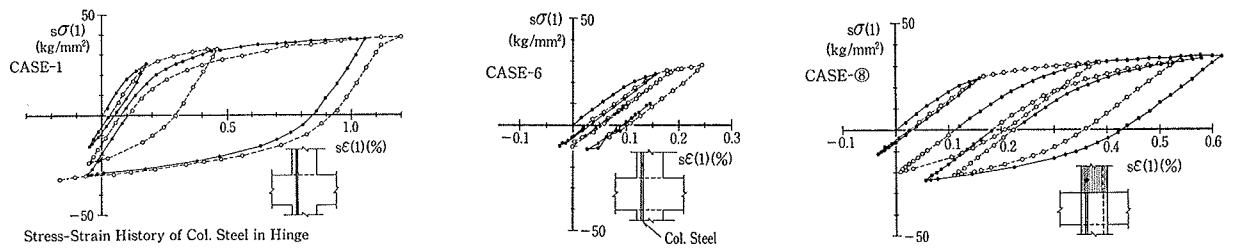


図-8 ヒンジ部分柱主筋の応力(sσ)～ひずみ(sε)履歴の比較

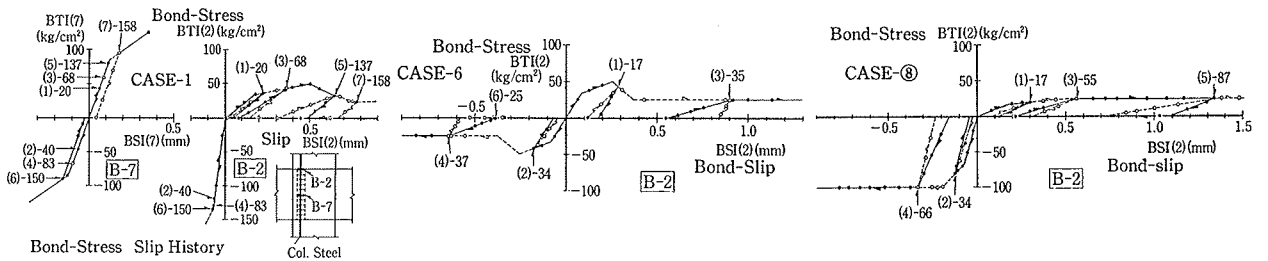


図-9 ボンドリンクの付着応力(τ)～スリップ(S)履歴の比較

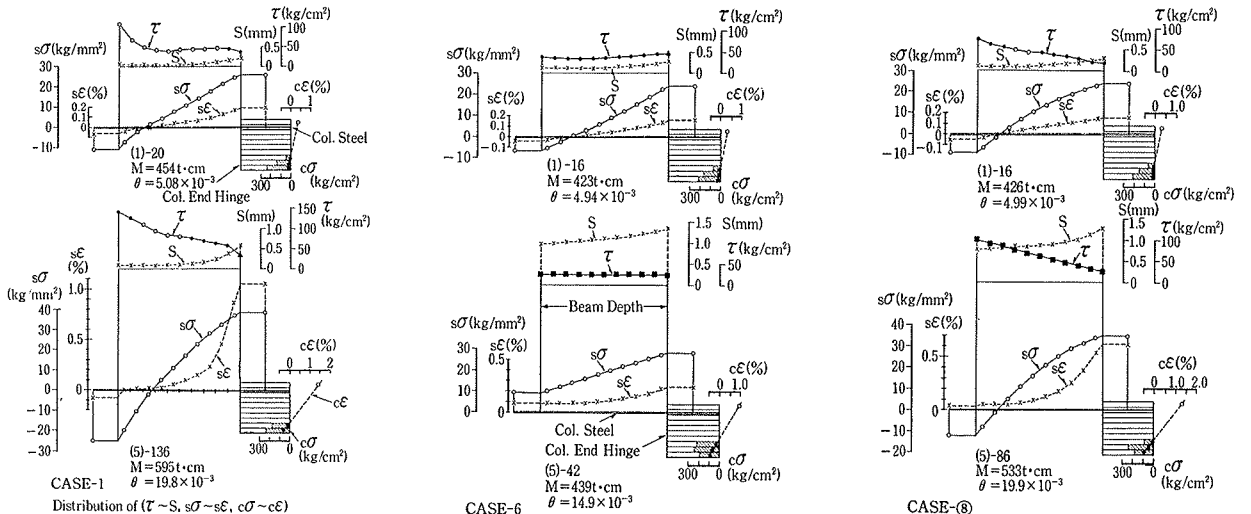
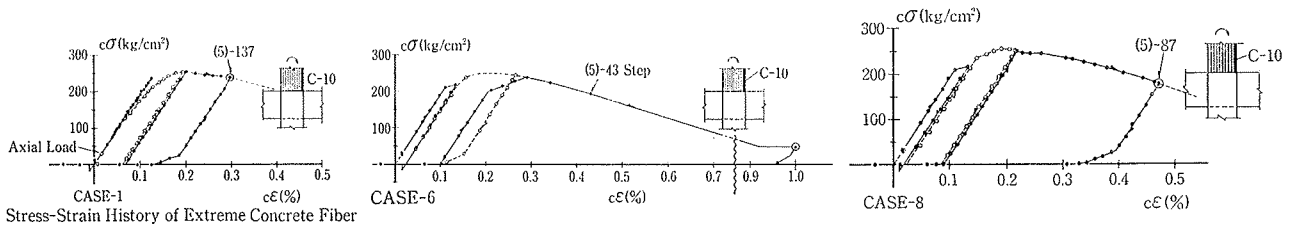


図-10 ある荷重ステップにおけるτとS, sσとsε, cσとcεの分布



図—11 ヒンジ域最外縁コンクリート fiber 要素の応力( $c\sigma$ )～ひずみ( $c\epsilon$ )履歴の比較

#### 4. 結 び

RC 造骨組内柱接合部を想定して、地震時の繰返し外力が加わった時の柱主筋の接合部からの抜け出し挙動を解析的に検討した。接合部内の付着特性に関しては、不確定要素が多いので、これに対して付着耐力分布 $\tau \sim S$ 関係を8ケースに仮定し、各ケースにつき、柱端ヒンジのモーメント( $M$ )～回転角( $\theta$ )曲線・柱主筋の抜け出し挙動・鉄筋の応力～ひずみ履歴、などを求めた。柱端ヒンジの変形特性( $M \sim \theta$ 曲線)は、接合部内での付着耐力分布の大小に応じて、紡錘形の履歴特性から逆Sスリップ形のそれに、顕著な変化を示し、接合部内での付着特性を正確に評価することが、柱の地震外力に対する復元力特性を考える上で不可欠であることを例証した。また、変形特性<sup>5),6),8)</sup>、主筋の抜け出し挙動<sup>6)</sup>、鉄筋ひずみの履歴性状<sup>8)</sup>は、そのまま、直接的な比較対照が行なえるデータではないが、これらの文献<sup>5),6),8)</sup>に示されている実験結果の特徴と比較して、概略の対応を示しているものと思われる。さらに、接合部内の付着耐力が不足する場合には、柱端モーメントの耐力低下は、かなり顕著に表われる傾向にあり、この耐力低下という点に関しては、はりの場合よりも苛酷な条件にあると考えられる。それは柱軸力の存在によって、ヒンジ圧縮側鉄筋の付着劣化に伴う圧縮力分担の喪失が、ヒンジコンクリートに対してより厳しい条件となり、コンクリートの圧縮破壊が促進されるためと考えられる。従って、柱端ヒンジコンクリートを横補強によって十分拘束することは肝要であろう。また、この接合部での付着耐力不足による耐力低下(さらには、スパン部分での付着割裂破壊による耐力低下)は骨組柱端の抵抗モーメントの減少ということになり、節点での柱・はりの耐力比にもよるがはり端に塑性ヒンジの形成を期して、その変形能・エネルギー吸収能によって耐震性を確保するという靱性骨組設計の前提を危うくすることも考えられる。以上の点から付着に関する検定は接合部、スパン部分<sup>9)</sup>共、「せん断破壊の防止問題」のみでなく必要な事項と思われる。

一方、接合部内での付着挙動とスパン部分での付着挙動は、当然の事ながら相対関係に有るものであり、例えばスタブ付の短柱実験<sup>8)</sup>では接合部内の付着挙動が実際

の架構と異なる<sup>5)</sup>ので、その結果の評価にあたって接合部での付着の影響を検討しておくことが必要であろう。本解析法<sup>1),2)</sup>では、現在のところ、FEM<sup>10)</sup>や他の解析法<sup>11)</sup>と異なり、接合部とスパン部分の付着問題を同時に取り扱うことが出来ないで、この問題については、実験挙動との比較・付着割裂挙動の解析結果<sup>2)</sup>との比較を行なうなど、検討の余地を残すものである。

#### 参考文献

- 1) 多田, 他: 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, 大林組技術研究所報, No. 22, (1981)
- 2) 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), (その4) 同上, (昭和56), (その5～その7) 同上, (昭和57)
- 3) 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7), 日本建築学会関東支部研究報告集, (昭和51, 52) 及び日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和51, 52, 55, 56)
- 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) 六車, 他: 繰返し水平力を受ける二層鉄筋コンクリートラーメン要素の復元力-変形機構に関する実験的研究, セメント技術年報, No. 28, 29, (昭和49, 50)
- 6) 若林, 他: 鉄筋コンクリート構造柱はり接合部の応力伝達と耐力に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和52)
- 7) 黒正, 他: 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6), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和48)
- 8) 吉岡, 他: 閉鎖型フープを有する鉄筋コンクリート短柱の実験, 日本建築学会関東支部研究報告集, (昭和48)
- 9) 吉岡, 他: 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40), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和51)
- 10) 野口, 他: 鉄筋コンクリート柱はり接合部の非線形有限要素解析, 日本建築学会関東支部研究報告集, (昭和55, 56)
- 11) 一の瀬, 他: 鉄筋の連続性を考慮した鉄筋コンクリート造長方形骨組の非線形解析, 日本建築学会関東支部研究報告集, (昭和53)