付着特性がRC柱部材の繰り返し挙動に及ぼす影響の解析的検討

名古屋大学　　学生会員　松岡由高
名古屋大学大学院　正会員　中村　光，国枝　稔，上田　尚史

1. はじめに

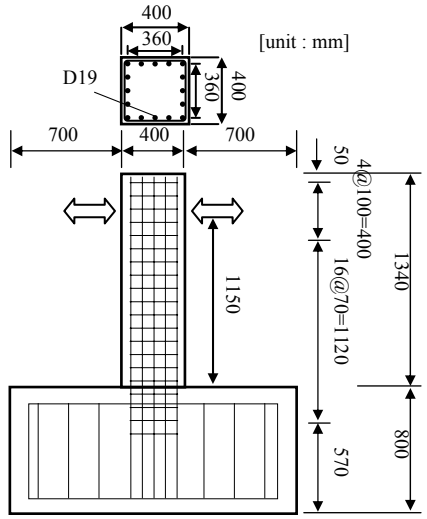
曲げ破壊するRC部材が地震動などの繰り返し荷重を受ける場合，変位の増大とともにかぶりの浮き，剥落が生じ，復元力が低下して終局状態に至る．そのため，終局状態に至るまでにはコンクリートと鉄筋の付着はかなり劣化し，軟化域を含めた付着特性が構造物の耐震性能に及ぼす影響は非常に大きいと推測される．しかしながら，これまでRC構造物の力学性能を解析的に評価する際には，鉄筋とコンクリートは完全付着と仮定される場合がほとんどであり，付着の影響については必ずしも明確にされていない．そこで本研究では，繰り返し荷重を受ける曲げ破壊型RC部材に対し付着特性を考慮した非線形有限要素解析を行い，その力学特性を解析的に評価した．

2. 解析対象供試体

本解析では石橋らによって行われた，実物のラーメン高架橋柱の1/2スケールを想定した試験体のうち試験体A1を対象とした[1)]．供試体概要ならびに試験体の材料特性を**図－1**，**表－1**に示す．載荷は一定軸力1.0MPa下において行われ，降伏変位の整数倍の変位毎に正負1サイクルずつ漸増交番載荷された． 実験では，終局状態においてかぶりコンクリートが剥落し，軸方向鉄筋がはらみだし，損傷の集中する1D区間で圧縮を受けるコアコンクリートが繰り返し載荷により徐々に粉体化もしくは細粒化し，耐力が低下したと報告されている．実験での荷重－変位関係を**図－2**に示すが，最大荷重となる$5\delta_y$までは紡錘型を示し，その後徐々に逆S字型の卓越する挙動を示すようになる．最終的にはかぶりの剥落，鉄筋の座屈により$9\delta_y$で荷重が低下している．

表－1　材料特性

コンクリート		
f'_c(MPa)	f_t (MPa)	E_c(GPa)
26.4	2.04	26.2
鉄筋		
	f_y (MPa)	E_s(GPa)
軸方向鉄筋	378.4	200
帯鉄筋	358.3	200



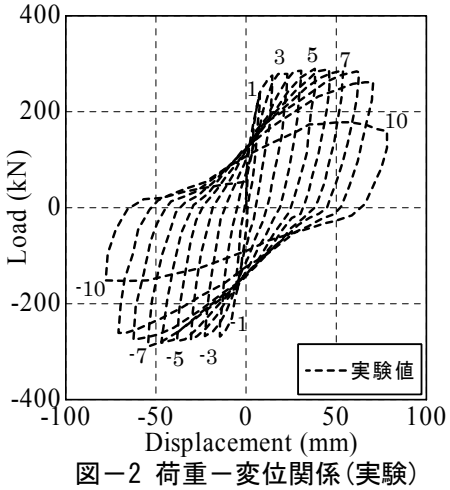
図－1　供試体概要

3. 解析概要

本研究では，4節点アイソパラメトリック要素を用いた非線形2次元有限要素解析を行った．構成則には格子等価連続体モデルを用いた．軸方向鉄筋はトラス要素で離散鉄筋としてモデル化し，付着特性は，コンクリートと鉄筋要素間のリンク要素に**図－3**に示す付着応力－すべり関係[2)]を導入することで考慮した．付着応力－すべり関係では，最大付着応力までは式(1)により付着応力を求めた．

$$\tau = 0.4 \times 0.90(f'_c)^{\frac{2}{3}}\left(1-\exp(-40(s)^{0.5})\right) \qquad (1)$$

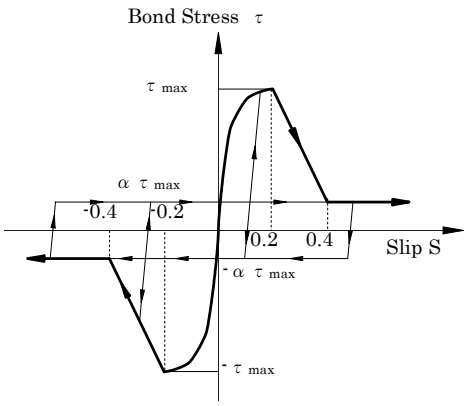
最大付着応力後は，付着応力が線形的に低下しその後一定になると仮定した．なお最大付着応力以降の一定の応力は最大付着応力のα倍として解析パラメータとした．要素分割は， 柱の要素寸法を 80×80(mm)，フーチング部を200×200(mm)とし，解析モデルは図－1と同様フーチングまでモデル化した．フーチング内も離散鉄筋要素を用いて付着を考慮することで，鉄筋の伸び出しを自動的に考慮した．また完全付着のモデルとも比較するため，軸方向鉄筋を分散鉄筋としてモデル化した解析も併せて行った．なお帯鉄筋は分散鉄筋モデルによりモデル化した．



図－2 荷重－変位関係(実験)

4. 鉄筋のすべり挙動が荷重－変位関係に及ぼす影響

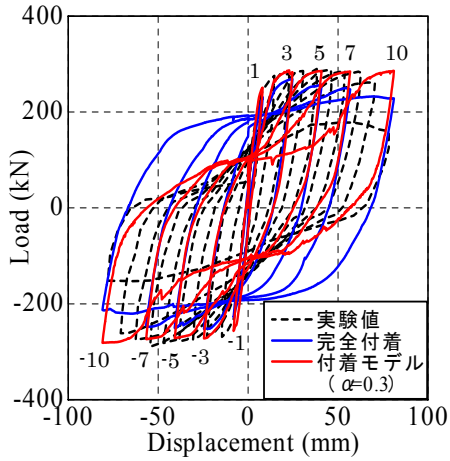
鉄筋のすべりを考慮できない完全付着を仮定した分散鉄筋モデルと，付着を考慮したモデルの比較により，すべり挙動が荷重－変位関係に及ぼす影響を検討した．解析結果ならびに実験結果の荷重－変位関係を**図－4** に示す．なお，解析結果は，線の重なりの関係上 $2\delta_y$ ピッチで示している，ここで，付着を考慮したモデルでは，最大付着応力後に一定値となる付着応力の値を $0.3\tau_{max}$ とした．完全付着の場合，荷重－変位関係は実験結果に対し包絡線は妥当に評価できているが，内部履歴は終局域まで紡錘型の挙動を示し，構造物の吸収するエネルギーを過大に評価する結果が得られた．これは，すべりが生じないために荷重が実挙動よりも大きく出てしまっていると考えられる．付着応力－すべり関係を導入したモデルでは，付着応力の低下により荷重－変位関係の履歴が紡錘型から逆 S 字型に移行している挙動が妥当に評価できている．これらのことより完全付着を仮定した解析は必ずしも適切でなく，付着特性を考慮した解析手法を積極的に採用するのが望ましいと考えられる．



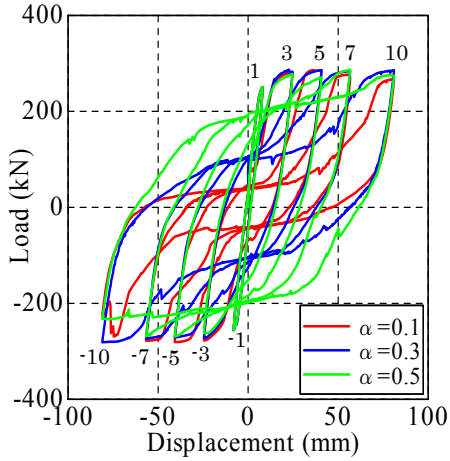
図－3　付着応力－すべり関係

5. 付着軟化領域の挙動が荷重－変位関係に及ぼす影響

図－2 に示す最大付着応力以降の一定付着応力の値を，$0.1\tau_{max}$，$0.3\tau_{max}$，$0.5\tau_{max}$ と変化させ，付着軟化領域の挙動が荷重－変位関係に及ぼす影響を検討した．荷重－変位関係を**図－5** に示す．$3\delta_y$ までは，最大付着応力に達していないため各ケースとも同様の結果であるが，その後，付着軟化挙動の影響が現れる．付着応力が最も低下する α＝0.1 のケースでは早期に逆 S 字型に移行した．すなわち，付着応力の低下の度合いにより，逆 S 字型への移行が影響されることが示された．また α=0.5 程度まで付着応力が低下しても，今回の対象供試体では逆 S 字型の挙動は卓越しないことが示された．また内部履歴曲線が囲む面積にも，付着軟化挙動の影響は顕著に現れる．特に，原点付近の内部履歴曲線はほぼ載荷・除荷経路で平行な挙動を示し，その距離は概ね軟化後の一定付着応力の値と比例している．このことから，今回対象とした曲げ破壊型の RC 部材では，最大荷重以降の内部履歴挙動は，鉄筋のすべり挙動が支配的となることが分かる． 付着軟化挙動に関する研究は少ないのが現状であるが，繰り返し荷重を受ける RC 部材の履歴挙動・エネルギー吸収能力・変形能を精度良く評価するために，今後その詳細な検討が必要になるといえる．



図－4　鉄筋のすべり挙動の影響



図－5　付着軟化領域の挙動の影響

6. まとめ

繰り返し荷重を受け，曲げ破壊する RC 部材の最大荷重以降の挙動は，従来一般に用いられる完全付着と仮定した解析ではその挙動を適切に再現することができず，付着特性を考慮したモデルが必要であることが示された．また付着応力－すべり関係を明確に定義することで繰り返し荷重を受ける構造物の力学特性を正確に評価できることにつながると考えられる．

参考文献

1) 石橋ら：大変形正負交番載荷を受ける RC 柱の損傷状況及び補修効果に関する実験的研究，土木学会論文集，No.648/V-47，pp.55-69，2000.

2) 菅ら：RC はりの力学挙動に及ぼす付着特性の影響，コンクリート工学次論文集，Vol.23，No.3，pp.295-300，2001.