

論文 有限要素解析による主筋に丸鋼を用いた RC 部材の力学挙動評価

松岡 由高^{*1}・中村 光^{*2}・国枝 稔^{*3}・河村 精一^{*4}

要旨: 主筋に丸鋼を用いた RC 部材の力学挙動を有限要素解析を用いて評価することを試みた。有限要素解析を利用するにあたり丸鋼とコンクリートの付着応力-すべり関係は、従来明確にされていなかったため、丸鋼の引抜き試験を行い、その付着応力-すべり関係をモデル化した。次に既存の構造物を模擬した丸鋼を用いた低鉄筋比の RC 柱の繰返し実験を行い、その力学挙動を確認するとともに、モデル化した付着応力-すべり関係を適用した有限要素解析により評価し、その適用性を示した。また、異形鉄筋を用いた場合にせん断破壊する、比較的鉄筋比が大きい RC はりの挙動を検討し、丸鋼を用いた部材の挙動を数値解析により評価することの有用性を示した。

キーワード: 丸鋼, 付着応力-すべり関係, 繰返し挙動, せん断破壊

1. はじめに

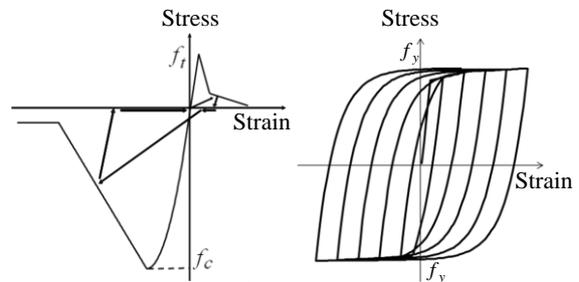
昭和40年代前半までに建設された既存の鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物は、主要鉄筋として丸鋼が用いられてきた。現在も供用されている RC 構造物は多数あるが、供用開始後、少なくとも40年以上が経過しており、今後継続して供用するには維持管理の観点からその構造性能を明確にする必要がある。主筋に丸鋼を用いた場合には、異形鉄筋を用いた場合よりも付着が弱いことが広く知られており、そのためひび割れの局所化、地震時の履歴吸収エネルギー量が少ないことなどが懸念されている。しかしながら付着が弱いことでコンクリートに応力が伝達されにくく、せん断破壊を起こしにくい、靱性が向上するなど部材として有益な結果もいくつか報告されている^{1),2)}。このように丸鋼を用いた部材は異形鉄筋を用いた場合と挙動が異なることから、異形鉄筋を主な対象として得られた各種評価手法は、適用に限界があることが予測される。また、丸鋼とコンクリート間の付着に関しては、土木学会コンクリート標準示方書（以下、示方書）³⁾ではその付着強度を異形鉄筋の4割にするとの記述があるのみであり、付着に関する詳細は明らかにされていない。したがって丸鋼を用いた RC 部材に対してはその付着特性を明確にして、有限要素解析を用いて個々の構造物の性能照査を行うことが合理的と考えられる。

本研究では、コンクリートに埋め込まれた丸鋼の引抜き試験を行い、付着応力-すべり関係のモデル化を行った。また丸鋼を用いた RC 柱部材に対し、モデル化した付着応力-すべり関係を用いた非線形有限要素解析を行い、力学挙動の解析的評価を行った。さらに丸鋼を用いた RC はり部材に対して、種々の鉄筋比を有する場合に

ついて、主筋に異形鉄筋を用いた場合と比較した解析を実施し、異形鉄筋の場合との部材の力学挙動の相違に与える影響について解析的検討を行った。

2. 解析概要

本研究では、丸鋼を用いた RC 部材の挙動を明らかにするため、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用いた。構成則は名古屋大学で開発された格子等価連続体モデル⁴⁾を用いた。コンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ関係を図-1に示す。コンクリートの圧縮モデルには圧縮強度までは Saenz の式を用い、ひずみ軟化領域には解のメッシュ寸法依存性を軽減するために圧縮破壊エネルギー (G_f) を導入した。引張モデルには 1/4 モデルと破壊エネルギーを導入した。繰返し内部履歴は図-1に示すとおりである。鉄筋モデルは一般的なバイリニア型の応力-ひずみ関係を仮定し、繰返し内部履歴には鉄筋のパウジンガー効果を評価可能な CEB モデル⁵⁾を用いた。また鉄筋はトラス要素により離散的にモデル化し、コンクリート節点との間に接合要素を用い、付着応力-すべり関係を導入した。異形鉄筋



(a) コンクリートモデル (b) 鉄筋モデル

図-1 材料モデル

*1 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)
 *2 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 博士 (工) (正会員)
 *3 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻准教授 博士 (工) (正会員)
 *4 中部電力株式会社 土木建築部火力土建 G 工修

を仮定する場合には、既往の部材解析に適用性が確認されているモデル⁶⁾を用いた。丸鋼とコンクリート間の付着応力-すべり関係については次章にて検討を行う。

3. 丸鋼の付着応力-すべり関係のモデル化

3.1 丸鋼の引抜き試験概要

(1) 供試体材料諸元および実験概要

丸鋼の付着応力-すべり関係のモデル化を行うため、**図-2**に示すように、コンクリート中に埋め込まれた丸鋼の引抜き試験を行った。実験は2体行い、鉄筋径、定着長ならびにコンクリートの圧縮強度を変えることで、鉄筋に生じるひずみレベルや付着応力を変化させた。コンクリートおよび鉄筋の材料諸元を**表-1**に示す。丸鋼の付着に関しては、異形鉄筋の場合とは異なり、かぶりの影響は微小であると考えられるため、実験に支障がない範囲内でかぶりを確保した。また鉄筋端部の影響を無視するために、供試体にはそれぞれ非定着領域を設けた。埋め込んだ鉄筋には両面に1mmひずみゲージを貼付した。鉄筋の表面を紙やすりで薄く削り、ひずみゲージを接着し、上から蠟、エポキシ樹脂の順にできるだけ付着を阻害しないように薄くかつ極力狭い範囲で塗布した。なお、ひずみゲージの貼付による、付着性能の低減は考慮していない。荷重はセンターホールジャッキにより行い、ロードセルにより荷重値を計測した。またNo.1供試体には、不動点より変位計を設置し、自由端拔出し量および載荷端の拔出し量を計測した。

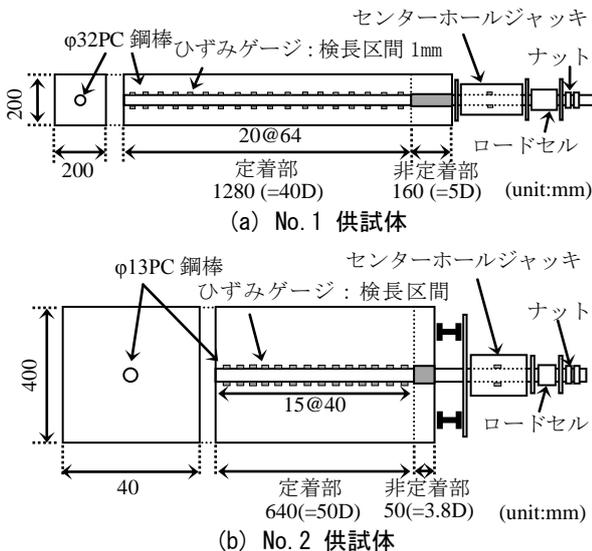


図-2 引抜き試験供試体概要

表-1 材料諸元

	コンクリート		丸鋼	
	f_c [MPa]	D [mm]	E_s [GPa]	
No.1	19.1	32	189	
No.2	33.4	13	212	

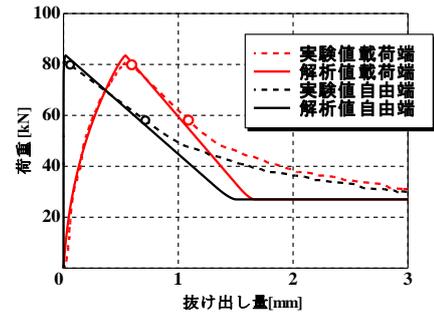
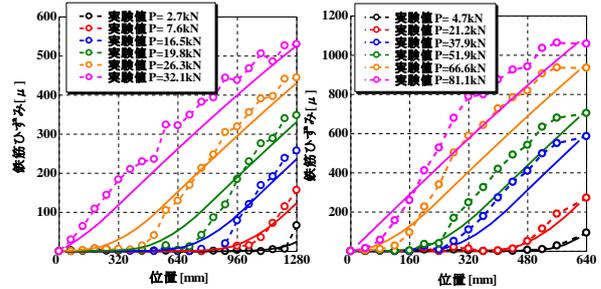


図-3 荷重-拔出し量関係



(a) No.1 供試体

(b) No.2 供試体

図-4 ひずみ分布の推移

(2) 実験結果および考察

No.1 供試体より得られた荷重-載荷端拔出し量関係、荷重-自由端拔出し量関係を**図-3**に破線で示す。なお、載荷端拔出し量は載荷端の変位計の読みからジャッキ内で計測したひずみ値のナットまでの長さ分を差し引いた値である。載荷端から鉄筋が抜け出してくるとともに荷重が増加していき、徐々にその勾配は緩やかになり、最大荷重に達する。**図-3**に、最大荷重直後に計測した2ステップをプロットで示すが、最大荷重に達した直後のステップで、一気に鉄筋全体が動的にすべり、荷重が大きく低下していることが分かる。その後は、載荷端拔出し量と、自由端拔出し量の差が小さくなり供試体内での伸びが少なくなっていることから、付着が喪失している様子が見て取れる。また**図-4**にNo.1およびNo.2供試体の最大荷重までのひずみ分布の推移を破線で示す。荷重の増加とともに載荷端側からひずみが増大し、付着により供試体端部に力が伝達されている様子が見られる。なお、最大荷重後のひずみ分布は、最大荷重後に、急激な引抜け挙動が生じた際に、供試体内部のひずみゲージが剥がれてしまったため、計測できなかった。

3.2 付着応力-すべり関係のモデル化

丸鋼の付着応力-すべり関係を、試験結果の逆解析を行うことでモデル化した。モデル化した付着応力-すべり関係を、異形鉄筋のモデルも併せて**図-5(a)**中の赤線で示す。その関係式を式(1)に示す。なお繰返し内部履歴は、除荷、再載荷時の勾配を $0.1\tau_{max}$ 時の割線剛性と仮定し、Tassiosのモデル⁷⁾を参考に軟化後一定応力の値まで付着応力が線形的に変化すると仮定した。異形鉄筋の付着応力-すべり関係と比較すると、約1/10程度のすべ

$$\tau = \begin{cases} 0.17 \times 0.9 \times f'_c \frac{2}{3} \times \{1 - \exp(-40(s/D)^{0.5})\} & 0 \leq s \leq 0.02 \\ (-0.70\tau_{\max}/S_1 - S_2)(s - S_1) + \tau_{\max} & 0.02 \leq s \leq 1.5 \\ 0.30\tau_{\max} & 1.5 \leq s \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 $\tau_{\max} = 0.17 \times 0.9 \times f'_c \frac{2}{3} \times \{1 - \exp(-40(S_1/D)^{0.5})\}$

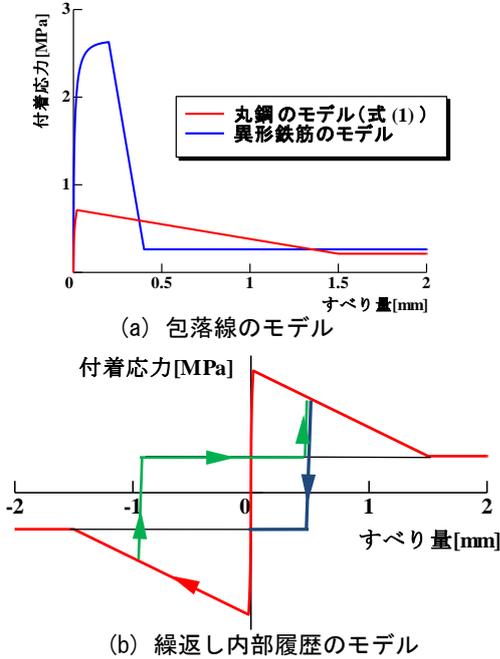


図-5 付着応力-すべり関係のモデル

り量で付着強度に達する。最大付着応力は異形鉄筋の場合の 0.425 倍であり、示方書で丸鋼の付着強度は異形鉄筋の 4 割とする規定と概ね一致する。一方、付着強度以降は異形鉄筋に比べ徐々に付着応力が低下するモデルである。また、軟化後は異形鉄筋と同様、一定付着応力となる値は、概ね等しい。このモデルを用いた解析より得られた荷重-拔出量関係を図-3 中実線で示す。鉄筋が抜け出していく挙動を精度よく評価できていることが分かる。さらに解析より得られたひずみ分布の推移を図-4 中の実線で示す。比較的簡易なモデルであるが、拔出挙動やひずみ分布を概ね妥当に評価可能なことが分かる。

4. 正負交番荷重を受ける RC 柱部材の挙動の解析的評価

4.1 実験概要および結果

(1) 供試体諸元および実験概要

図-6 に示す断面 400×300(mm)、高さ 1700(mm)、軸方向鉄筋比 0.26%の RC 柱部材の正負交番荷重実験を行った。柱部材は、既存の地中ボックスカルバートの中柱を模擬して軸方向鉄筋の配置ならびに定着方法を決定した。そのため軸方向鉄筋比は 0.26%と低鉄筋比となっている。また、丸鋼の付着の影響評価を主目的とし、せん断補強筋は配置しなかった。なお、供試体上下端部のはりには破壊しないよう十分な補強を施している。使用

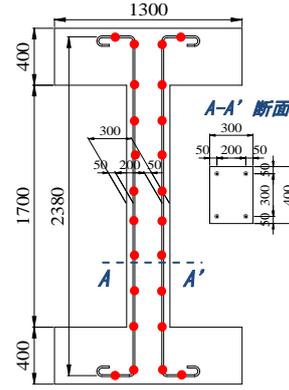


図-6 柱部材の供試体概要

表-2 柱部材の材料諸元

コンクリート			
f'_c	f_t	E_c	G_f
(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm)
16.8	1.64	27500	87
鉄筋			
f_y		E_s	
(N/mm ²)		(N/mm ²)	
313		198000	

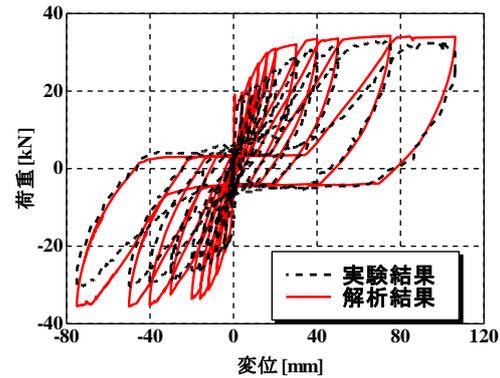


図-7 荷重-変位関係の比較



写真-1 柱部材の変形状況

している。使用したコンクリートおよび丸鋼の材料特性を表-2 に示す。コンクリート強度は丸鋼を用いた部材に使用されたコンクリートの設計基準強度は低いと推測されることから 20.0 N/mm² 以下とした。荷重は 30kN(0.25MPa)の軸力を載荷させながら、上下端部のはりが回転しないように逆対称曲げモーメント荷重を行った。計測は、図中●印の位置の主鉄筋のひずみと柱下端部はり上面のひび割れ幅を測定した。荷重則は±20mm までは 3 回ずつ、それ以降は 1 回ずつ正負交番荷重を行った。

(2) 実験結果および考察

図-7 に実験より得られた荷重-変位関係を破線で、表-3 に鉄筋降伏時の結果を示す。変位 2mm 程度で、柱基部での曲げひび割れ発生により、部材の剛性が低下する挙動を示した。曲げひび割れ発生後も安定的に荷重が増加し、鉄筋の初降伏は、変位 9.1mm、荷重 18.9kN の時点で

北側柱基部位置に生じた。その後は各柱基部位置の鉄筋が降伏を経験しながら、徐々に荷重が増加する挙動を示した。さらに変位 41.4mm 時点で全ての柱基部位置の鉄筋が降伏を経験し、以降はほぼ一定の荷重レベルを維持し、部材角 1/20 以上になっても、コンクリートの圧壊や荷重が低下する挙動には至らず、変形性能は非常に優れた挙動を示した。曲げ耐力時の荷重は 30.5kN であり、耐荷力は示方書に基づく算定値とほぼ一致した。履歴挙動については、エネルギー吸収の少ない逆 S 字型の挙動を早期に示した。損傷状況は写真-1 に示すように、柱上下端部に曲げひび割れが発生するのみで、他の部位のコンクリートにほとんど損傷が生じなかった。

図-8(a)に正方向載荷時鉄筋のひずみ分布を示す。なお、図中黒の破線は柱上下端部を示すものである。鉄筋ひずみ分布は変形の増大とともにほぼ一様分布に近づいていっている。また、はり内部の鉄筋折り曲げ位置までひずみの増加は及んでいる。これは、付着が失われてすべりが生じたことを意味する。すべりが生じた結果、コンクリートに力が伝達されず柱基部のひび割れのみが開口して、部材変形を支配することで、部材角 1/20 の大変形でも柱基部のひび割れを除いてコンクリートに著しい損傷が生じることがなかった。さらに、鉄筋のひずみも

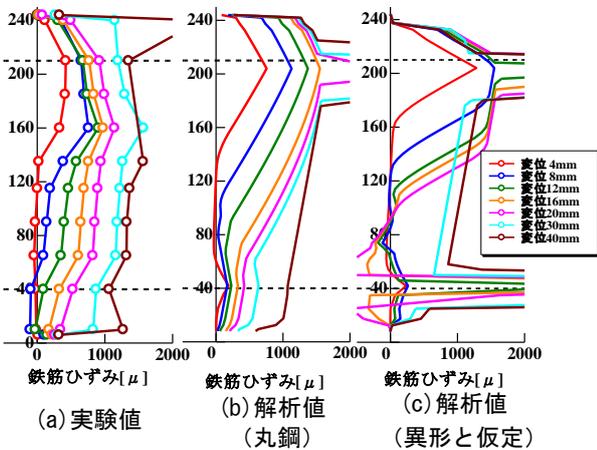


図-8 軸方向鉄筋のひずみ分布の推移

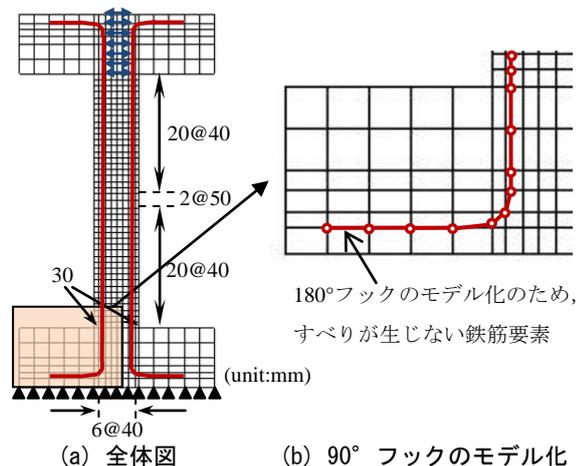


図-9 RC 柱部材の解析モデル

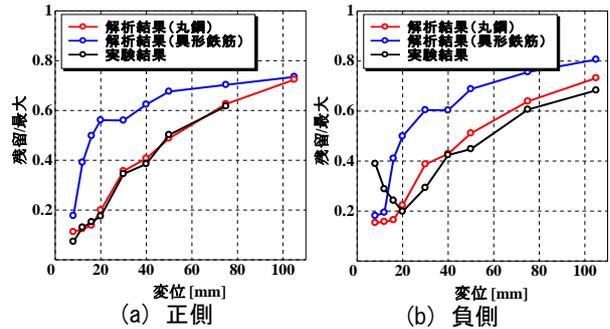


図-10 最大ひび割れ幅と残留ひび割れ幅の関係

平均化して局所的に著しい降伏現象を生じず、大きな損傷を受けることがなかった。今回対象とした、丸鋼を用いた部材は、逆 S 字型でエネルギー吸収の少ない挙動を示すため、地震時慣性力を受ける地上構造物の場合は問題が生じる可能性がある。一方、地中構造物に用いた場合は、上記の問題が逆に地盤変形への良好な追従性につながるるとともに、損傷も一部の断面のひび割れのみとなること、さらには付着が失われれば斜めひび割れが発生する可能性もかなり少なくなることから、地中構造では有用な部材形式として一考に値する可能性がある。

4.2 RC 柱部材の挙動の解析的評価

前節で示した RC 柱部材の挙動の解析的評価を行った。解析モデルを図-9 に示す。軸方向鉄筋のモデル化は 90° フックの折り曲げ形状および折り曲げ位置より先端までトラス要素でモデル化を行い、定着内でのすべり挙動も評価できるようにした。トラス要素は図-9(b) に示すように、鉄筋の曲げ形状に近くなるように各要素を直線補間しながら配置した。さらに 90° フックの自由端側の 180° フックはモデル化せず、先端のトラス要素ですべりが生じないものとした。載荷は、上部はりの上面に一定軸力をかけながら図中に示される 7 つの載荷点において変位制御により集中載荷を行った。

解析より得られた荷重-変位関係を図-7 に赤線で示す。解析結果は包絡線の荷重を若干高めに評価しているが、曲げひび割れ後の剛性の低下する挙動、最大荷重の値、内部履歴挙動のいずれも妥当に評価していることが分かる。特に内部履歴挙動については、特徴的な逆 S 字型の挙動を適切に評価していることが分かる。なお、内部履歴において変位 0 前後で一定となる荷重の大きさは付着応力-すべり関係において、付着強度以降一定となる付着応力の値に密接に関係した。鉄筋のひずみ分布挙動の解析値を図-8(b) 中に実線で示す。解析値は繰返し履歴を受けるひずみ分布挙動を概ね評価していることが分かる。また図-10 に、柱基部の繰返しループの残留ひび割れ幅と最大ひび割れ幅の比の関係を示すが、解析結果は実験結果を精度よく評価できている。なお、解析結果のひび割れ幅は、隣接する有限要素節点間の鉛直方向の相対変位とした。

以上より、丸鋼の付着特性を考慮した解析手法を用いれば、荷重－変位関係とともに、鉄筋ひずみやひび割れ幅などの損傷と関係する力学量も適切に評価可能といえる。

4.3 付着の相違が正負交番载荷を受けるRC柱部材の挙動に及ぼす影響の解析的評価

付着の相違が RC 柱部材の挙動に与える影響を解析的に評価するため、導入する付着応力－すべり関係を異形鉄筋と仮定した解析を行った。得られた荷重－変位関係を図-11に、丸鋼の場合の解析結果と併せて示す。荷重－変位関係より丸鋼を用いた場合には曲げひび割れ発生後の剛性低下は大きいものの、その後の最大荷重はほぼ同様であった。内部履歴挙動に関しては、今回解析対象とした RC 柱は鉄筋比が 0.26%と小さいためにすべりが生じやすくなったと考えられ、異形鉄筋を仮定した場合も丸鋼と同様に、大きな変位レベルでは比較的逆 S 字型の挙動が卓越する性状を示した。ただし、内部履歴曲線では、早期に復元力が増加する挙動を示し、エネルギー吸収能力は丸鋼よりも大きくなった。一般に異形鉄筋を用い、曲げが卓越する場合、荷重－変位関係は紡錘型となる傾向を示すが、今回対象としたように鉄筋比が小さい場合は、その挙動は丸鋼を用いた場合と比較的似た挙動を示すことが予想される。異形鉄筋と仮定した場合の軸方向鉄筋のひずみ分布の推移を図-8(c)に示す。柱上下端部でひずみが集中して塑性ヒンジが形成されている挙動を示していることから、丸鋼を用いた RC 部材に対し、異形鉄筋に用いる付着応力－すべり関係を適用した場合には、鉄筋の降伏や内部ひずみの分布などの挙動を適切に評価できていないことが分かる。また図-10に示す残留ひび割れ幅と最大ひび割れ幅の比は実験結果より大きくなっており、丸鋼の付着応力－すべり関係を用いなければ、地震後の損傷評価の重要な指標である残留ひび割れ幅を過大に評価してしまうといえる。

5. 丸鋼と異形鉄筋を用いた RC はりの挙動評価

5.1 解析概要

本節では、単調载荷を受ける RC はり部材に対して、異形鉄筋を用いた場合と丸鋼を用いた部材で力学挙動の相違を検証するため、異なる鉄筋比を有するはり部材を仮定し解析を行った。解析は、図-12に示すように、200×100(mm)の矩形断面を有するせん断スパン比 (a/d) 3.46のはり部材に対して行い、軸方向鉄筋の直径を変化させることにより、鉄筋比が異なる場合を仮定した。解析モデルの要素寸法は、20×20(mm)とした。180° フックは、柱部材の場合と同様に、直線でモデル化した端部の鉄筋要素のすべり挙動を考慮しないことにより、モデル化した。解析を行ったシリーズを表-3に示す。なお、表中に

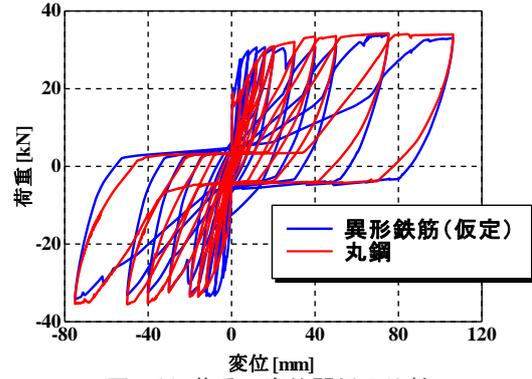


図-11 荷重－変位関係の比較

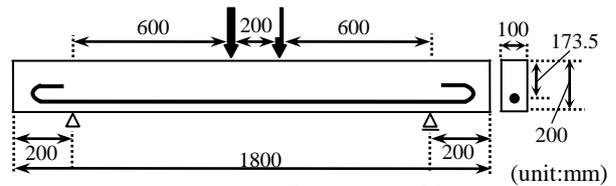


図-12 はり部材の供試体概要

表-3 鉄筋比を変えたシリーズ

供試体 No.	供試体諸元		計算値	
	鉄筋比(%)	断面積(mm ²)	曲げ耐力(kN)	せん断耐力(kN)
1	0.76	132.7	22.9	32.1
2	1.63	283.5	45.2	41.3
3	2.19	380.1	57.3	45.5

表-4 材料諸元 (鉄筋比 0.76%)

コンクリート	丸鋼(R13)	
f_c [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	E_s [N/mm ²]
22.6	319	209000

は異形鉄筋の場合の完全付着を仮定した際の曲げ耐力およびせん断耐力の計算値を示している。ここでせん断耐力は二羽式⁸⁾により算定した。一般に RC 部材は、鉄筋比が大きくなればせん断破壊をおこしやすくなる。池田らは付着を制御した鉄筋を用い、a/d を変化させた実験を行い、異形鉄筋であればせん断破壊する部材も、付着を弱めるまたは失くすことによりせん断破壊が生じない結果を報告している⁹⁾。本研究では異形鉄筋を用いた場合にせん断破壊する供試体に対し、丸鋼が用いられた場合の挙動について検討を行うため、比較的鉄筋比が大きい部材も仮定した。なお、供試体 No.1 の鉄筋比 0.76%の丸鋼を用いた供試体に対しては、実験を行った。用いた材料諸元を表-4に示すが、解析では全てのシリーズに対して表に示す材料諸元を用いている。

5.2 解析結果および考察

図-13にそれぞれのケースの荷重－変位関係を示す。実験を行った No.1 供試体(鉄筋比 0.76%)のケースでは、実験で得られた曲げひび割れ発生後の剛性低下、最大荷重に至る挙動および変形性能を、丸鋼の解析結果は妥当に評価できている。異形鉄筋を仮定した場合は、丸鋼の

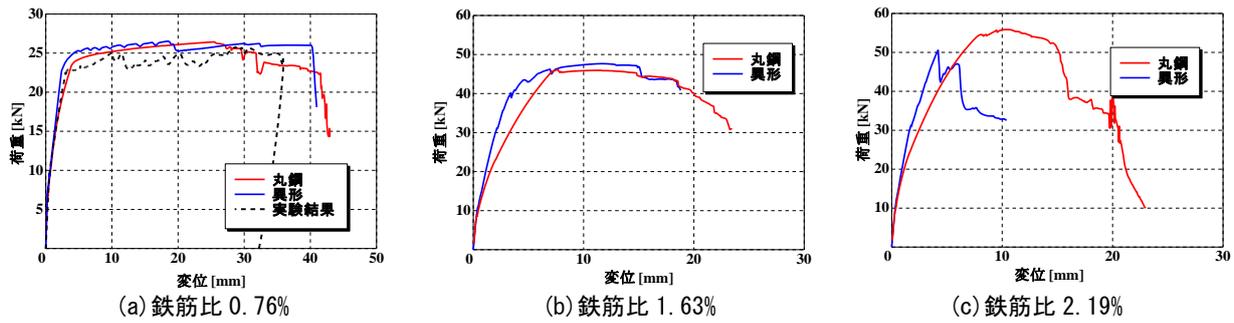


図-13 荷重-変位関係の比較

場合と比較して、曲げひび割れ発生後の剛性低下が小さく早期に降伏する挙動を示す。しかしながら、荷重低下に至るまで、挙動に大きな差異はない。

鉄筋比を高くした No.2 供試体（鉄筋比 1.63%）のケースでは No.1 の供試体と同様に付着性能の違いで曲げひび割れ発生後の剛性が大きく異なる結果となった。但し、全体的な挙動はほぼ同様であった。

鉄筋比をさらに高くした No.3 供試体（鉄筋比 2.19%）のケースでは、異形鉄筋を用いた部材では、曲げひび割れが発生後、剛性が低下し荷重 50.2kN 時点で急激に荷重が低下し、斜め引張破壊に至った。一方、丸鋼を用いた部材では異形鉄筋を用いた部材とその挙動は異なり、曲げひび割れ発生後、変位 8.2mm 地点で鉄筋が降伏し、最大荷重に至った。その後変位 15mm 程度でかぶりコンクリートが圧壊し、終局に至る典型的な曲げ圧縮破壊の挙動を示した。最大耐力は 56.0kN であり、異形鉄筋として算出した場合の曲げ耐力値とほぼ同値となった。

以上のように、丸鋼を用いた部材の場合、異形鉄筋を用いた部材に対し、曲げひび割れ発生後の剛性やせん断破壊に至る挙動が異なる。したがって、丸鋼を用いた部材に対しては、現行の照査方法ではその挙動を正確に把握することができず、丸鋼の付着応力-すべり関係を考慮した解析手法を利用することが有用となりえることが示された。

6. まとめ

本研究ではコンクリートと丸鋼の引抜き試験を行い、丸鋼の付着応力-すべり関係をモデル化した。モデル化した付着応力-すべり関係を用いて丸鋼を用いた RC 部材に対して非線形有限要素解析を行い、その挙動の解析的評価を行った。また異形鉄筋と仮定した場合の解析を行い、丸鋼を用いた部材との挙動の相違についても検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

(1) 引抜き試験の逆解析により非線形有限要素解析に用いる、簡便な形状の丸鋼の付着応力-すべり関係のモデル化を行った。モデル化した付着応力-すべり関係を用いれば、丸鋼を用いた RC 部材の荷重-変位関係などマクロな指標だけでなく、ひずみ分布、ひび割

れ幅などの力学量をも評価可能となる。

(2) 低鉄筋比の丸鋼を有する RC 柱の繰返し挙動を実験的に明らかにするとともに、その挙動を解析で妥当に評価できることを示した。

(3) 異形鉄筋を用いた場合には、せん断破壊する比較的高鉄筋比を有する部材においても、丸鋼を用いれば曲げ破壊に移行する挙動を有限要素解析により示し、丸鋼を用いた部材の挙動を評価することの有用性を示した。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会中国支部：低強度コンクリートに関する特別研究委員会報告書，2009
- 2) 睦好宏史・牧剛史・Govinda Raj PANDAY・杉田清隆：鉄筋の付着を制御することによる RC 柱部材の耐震性状改善に関する研究，土木学会論文集，No.802/V-69，pp.155-169，2005
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕，2007
- 4) 伊藤睦・Kongeo PHAMAVANH・中村光・田邊忠顕：格子等価連続体化法による鉄筋コンクリート部材の有限要素解析，土木学会論文集，No.767/V-64，pp.115-129，2004
- 5) CEB：RC Elements Under Cyclic Loading，Bulletin，pp.58-69，1996
- 6) 菅満宜・中村光・檜貝勇・斉藤成彦：RC はりの力学的挙動に及ぼす付着特性の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.295-300，2001
- 7) Tassios, T.P. and Yannopoulos, P.J.：Analytical Studies on Reinforced Concrete Members Under Cyclic Loading Based on Bond Stress-Slip Relationship, Journal Proceedings, Vol.78, No.3, pp.206-216, May. 1981
- 8) 二羽淳一郎・山田一字・横沢和夫・岡村甫：せん断補強筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，No.372/V-5，pp.167-176，1986
- 9) 池田尚治・宇治清隆：鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷挙動に及ぼす鉄筋の付着の影響に関する研究，土木学会論文報告集，第 293 号，pp.101-109，1980