

論文 主筋を直線定着したスラブ付き RC 梁の復元力特性と付着挙動

杉本 訓祥*1・胡 全斌*2・布施 虎太郎*3・田才 晃*4

要旨：鉄筋コンクリート造部材の履歴復元力特性におよぼす主筋とコンクリート間の付着特性の影響を検討するため、片持ち梁部材を用いた繰返し載荷実験を行い、試験体を対象とした非線形有限要素解析を実施した。片持ち梁部材試験体は、スラブ付きとし、主筋とコンクリート間のずれを計測することを主たる目的として、直線定着とした。実験では、直線定着部が抜け出し耐力低下に至り、大きなすべり量が計測された一方で、部材スパン内では小さなすべり量ながら逆 S 字状の付着応力度～すべり量関係が得られた。非線形 FEM 解析では、顕著なすべりが生じた定着部の付着強度を考慮することで、実験結果を精度よく評価できた。

キーワード：復元力特性, 付着性能, 非線形 FEM 解析

1. はじめに

曲げ降伏先行型の鉄筋コンクリート造梁部材の履歴復元力特性は紡錘形を描くことが望ましいが、エネルギー吸収能力に乏しい逆 S 字状の履歴性状を示す場合がある。2012 年に行われた縮小 20 層 RC 造建物試験体の震動実験では、層せん断力～層間変形関係や、塑性化した梁端の回転角と荷重の関係に、逆 S 字状の履歴曲線が見られ、接合部通し配筋された梁主筋の付着性状においても、スリップ性状が見られた¹⁾。このような背景から、著者らはこれまでに、スラブ付き梁の付着性状に関する検証解析などを行ってきた^{2),3)}。本報では、曲げ降伏する梁部材における主筋の付着性状と復元力特性の関係について検証するために行った実験と解析について述べる。すなわち、主筋とコンクリート間の付着応力度とすべり量の関係を把握するため、主筋とコンクリートの相対変位(すべり量)の計測に主眼をおいて計画した片持ち梁部材の静的載荷実験を行った⁴⁾。特に、すべりがより顕著に表れるよう主筋を直線定着することとした。さらに、実験結果を対象として非線形 FEM 解析を行い、復元力特性に及ぼす主筋の付着・定着性状の影響を検証した。本報では、これらの実験および解析結果について述べる。

2. 実験概要

2.1 実験計画

(1) 試験体計画

静的載荷実験⁴⁾の概要について述べる。試験体一覧を表-1に、使用材料特性一覧を表-2に、試験体の形状・寸法を図-1に、それぞれ示す。スタブを反力床に固定した片持ち梁状の試験体とし、梁先端を上下に繰返し載荷する形式とした。また、スラブと反対側の主筋などの挙動

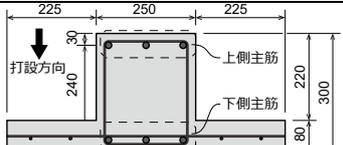
を、スタブからの抜け出しも含めてより多く計測することを目的として、通常の梁の上下を反転し、スラブを下寄りに配置する計画とした。打設方向は表-1断面詳細に示すとおりである。また、主筋とコンクリート間の相対すべりに関し、部材内に加え、スタブからの抜け出し挙動も調査するため主筋は直線定着とした。直線定着の長さは RC 規準⁵⁾による式(1)から得られた 418mm に基づき 420mm と設定した。

$$l_{ab} = \alpha \frac{S \cdot \sigma_t \cdot d_b}{10 \cdot f_b} \dots (1)$$

ここで、 l_{ab} ：定着長さ、 σ_t は鉄筋の強度で規格値 345N/mm²とし、 f_b (付着割裂の基準となる強度)は試験体のコンクリートの目標圧縮強度 30N/mm²に基づき 1.65N/mm²とした。S=1.25(構造部材)、 $\alpha=1.0$ (コア内定着とした)、 $d_b=16$ (主筋径)である。

試験体は、あばら筋の間隔を変動因子とした 2 体を計

表-1 試験体一覧

	Bo40	Bo65
梁部材	B×D=250×300, a(スパン)=625 主筋：3-D16(SD345)上下	
スラブ	幅 700mm, 厚さ 80mm, 4-D6(SD295A)	
断面詳細		
あばら筋	2-D6@40 (SD295A)	2-D6@65 (SD295A)
載荷履歴	R=1/100, 1/50, 1/33, 1/25 正負各 2 回	R=1/100, 1/50 正負各 10 回
(共通)	R=1/200 を正負各 2 回繰り返す。上述の載荷を行った後、R=1/10 程度まで正方向に載荷	

*1 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 博士(工学) (正会員)

*2 横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府 (学生会員)

*3 横浜国立大学 都市科学部建築学科

*4 横浜国立大学 名誉教授 博士(工学) (正会員)

画したが、1体目の荷重実験の結果、直線定着部の破壊が顕著となったため荷重履歴を変動因子とした。すなわち、試験体 Bo65 は、あばら筋間隔を 65mm とし、変形角 $R=1/100$, $1/50$ を正負各 10 回繰返し荷重した一方で、あばら筋間隔を 40mm とした試験体 Bo40 では、 $R=1/100$, $1/50$ は正負各 2 回繰返し、その後も $R=1/33$, $1/25$ と振幅を漸増し、正負各 2 回繰返した。なお、最初の $R=1/200$ の正負各 2 回繰返しと最後の正方向の大変形荷重は共通とした。また、変形角 R は、梁先端の上下方向変位を梁スパン (625mm) で除した値とした。

(2) 計測計画

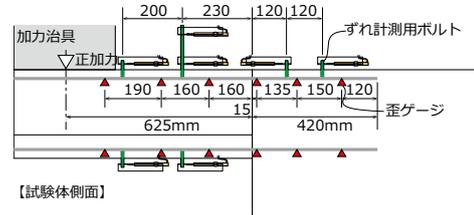
いずれの試験体も、主筋や補強筋、スラブ筋にゲージを貼付して歪度を計測したほか、各所にインサートボルトを設置し、相対変位を計測した。加力芯に設置したボルトを標点として、スタブに固定した治具からの相対鉛直方向変位を梁のたわみとし、制御用の全体変形とした。

本実験の主たる目的である主筋とコンクリート間の相対すべり量は、図-2 に示すように、予め主筋に溶接したボルトと、主筋の近傍でコアコンクリートに定着したボルトの相対変位として計測した。なお、主筋に溶接したボルトはかぶりコンクリートとは接触しないように空隙を設けた。スパン内の上下端の主筋で、隅角部と中央部に配置された計 4 本についてそれぞれ 2 か所を計測した。また、試験体上側の主筋 (スラブと反対側の主筋、打設時も上側で「上側主筋」と呼ぶ) については、スタブ内の直線定着部の各 2 か所についても計測した。

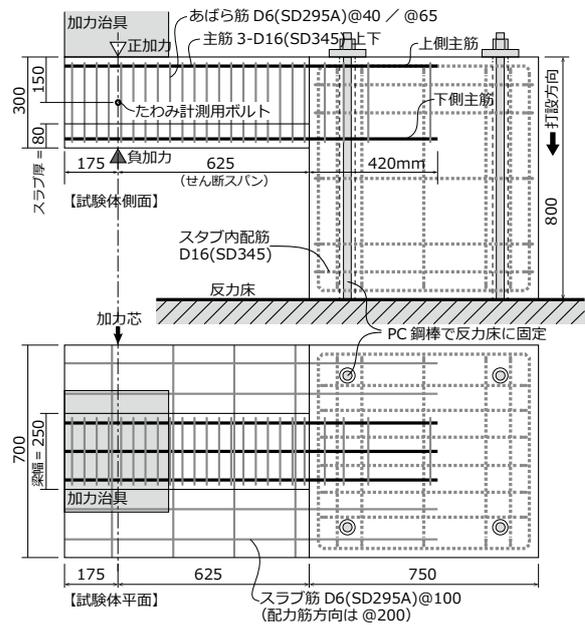
2.2 実験結果概要

ここでは実験結果概要について述べる。なお、非線形 FEM 解析との比較検討を行うため、詳細については次章において解析結果と比較しながら述べる。試験体の荷重～変形関係を図-3 に示す。梁先端を押し下げる方向、すなわち、スラブ側が圧縮となる方向を正加力方向としている。なお、図には、後述する FEM 解析結果も合わせて示した。上側主筋が引張を負担する正方向において、スタブからの直線定着主筋の抜け出しが生じて荷重が低下した。特に、 $R=1/100$ および $R=1/50$ で正負各 10 回繰返した試験体 Bo65 と、各振幅正負 2 回ずつの繰返し荷重

とした試験体 Bo40 とでは、繰返し回数によって耐力の劣化程度にほとんど差が見られず、変形の増大に伴って耐力低下する傾向が見られた。また、平面保持を仮定し、コンクリートの応力度～歪度関係として NewRC 提案モデル⁶⁾を用いた断面解析による曲げ耐力計算値に対し



(a) すべり量の計測位置



(b) 形状および配筋詳細

図-1 試験体計画 (Bo40)

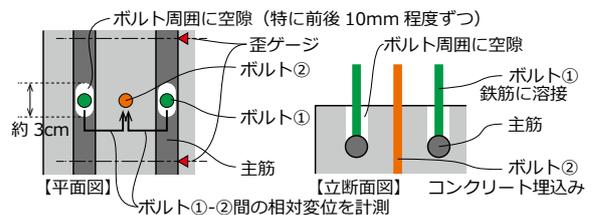


図-2 すべり量計測概念図

表-2 使用材料一覧

(a) コンクリート

	圧縮強度	ヤング係数 ^{※1)}	割裂強度
6本平均	31.7	2.68×10^4	2.76

※1) ヤング係数は 1/3 割線剛性

(b) 鉄筋

	降伏強度	ヤング係数	引張強度
D6(SD295A)	429 ^{※2)}	1.81×10^5	615
D16(SD345)	369	1.73×10^5	566

※2) D6 の降伏強度は 0.2% オフセット値 (単位: N/mm²)

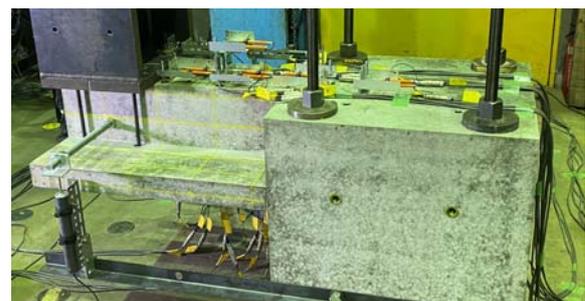
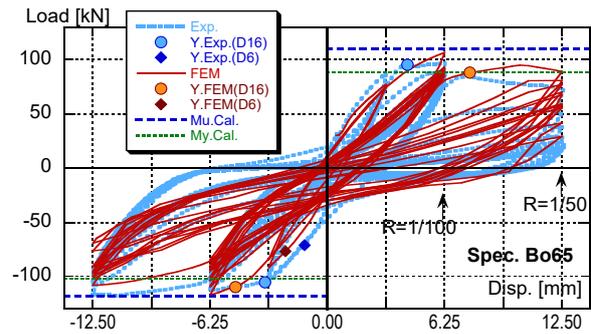
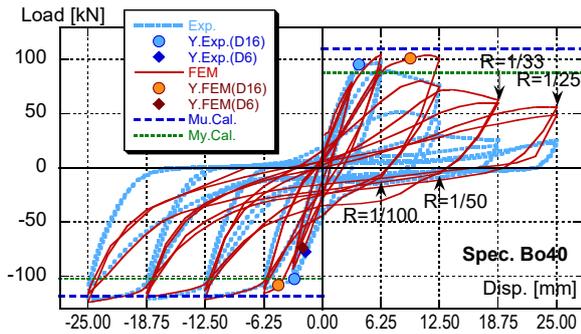


写真-1 試験体の荷重・計測状況



Exp., FEM は実験および FEM 解析を, Y.Exp.(D16), Y.Exp.(D6)は実験における梁主筋(D16)またはスラブ筋(D6)の降伏時を, Y.FEM(D16), Y.FEM(D6)は FEM 解析による梁主筋(D16)またはスラブ筋(D6)の降伏時を, Mu.Cal., My.Cal.は平面保持仮定による断面解析 (曲げ終局時 (圧縮縁歪度 3000 μ 時), 及び曲げ降伏時 (引張側主筋(D16)の降伏時) を, それぞれ表す。

図-3 荷重～変形関係

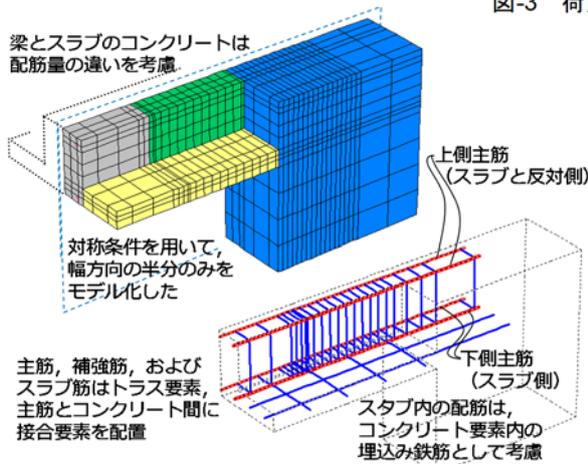


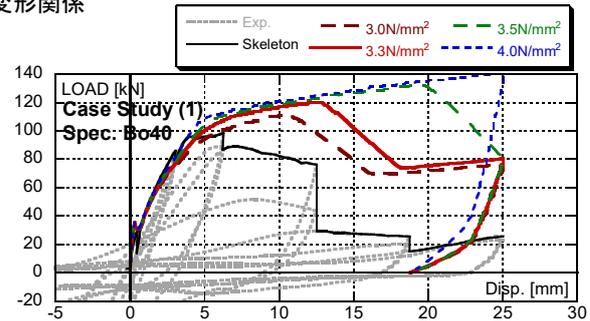
図-4 解析モデル図 (試験体 Bo40)

て, 主筋降伏時 (図中 My.Cal.) は正負ともに対応した。一方, 正方向荷重時については, 最大耐力実験値は終局時 (圧縮縁歪度 3000 μ 時で図中 Mu.Cal.とした) の計算値に到達しなかった。

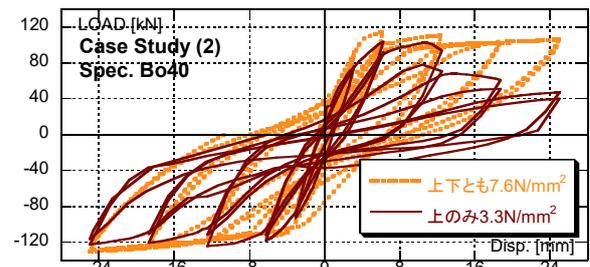
3. 非線形 FEM 解析

3.1 解析モデル

非線形 FEM 解析は, 汎用解析ソフト「FINAL」⁷⁾を用いた。要素分割の例を図-4 に示す。対称性を考慮して, 幅方向の半分のみをモデル化した。コンクリートは六面体要素, 主筋とあばら筋およびスラブ筋は線材要素でモデル化し, スタブ内の配筋はコンクリートの埋込み鉄筋としてモデル化した。鉄筋の応力度～歪度関係はバイリニアとし, 等方硬化則を用いた。コンクリートの応力度～歪度関係は, 修正 Ahmad モデル⁸⁾によりモデル化し, 圧縮強度後の軟化域については Nakamura らの提案モデル⁹⁾を用いた。梁主筋の線材要素とコンクリートの六面体要素の間には, 付着特性を表すために物理的な厚さを持たない接合要素を配置した。付着応力度とすべり量の関係は, Naganuma らの手法¹⁰⁾によりモデル化した。部材スパン内の付着強度は付着割裂強度¹¹⁾とし, 強度時すべり量は 1.0mm とした。一方, スタブ内の直線定着部の



(a) 単調荷重による比較



(b) 繰返し荷重による比較

図-5 上側主筋付着強度を変数としたスタディ結果

付着強度については, パラメトリックスタディの結果から以下とした。すなわち, 下側主筋には通し主筋の付着強度¹¹⁾を用い, 上側主筋には RC 規準⁵⁾のコア内に直線定着する場合の定着長さの算定に用いた式 (1) に基づき, 次式 (2) により求めた付着応力度 (τ) を用いた。

$$\tau = \frac{2.5 \cdot f_b}{\alpha \cdot S} = \frac{\sigma_t \cdot d_b}{4 \cdot l_{ab}} \quad \dots (2)$$

また, 強度時すべり量は, 直線定着した場合の既往の研究¹²⁾を参考に, いずれも 3.0mm とした。次節では, 上側主筋の付着特性のモデル化に際して行ったスタディの概要を述べる。

3.2 直線定着部の付着特性のモデル化

本実験では, 上側主筋の直線定着部のスタブからの抜け出しが顕著に表れた。その挙動は, 正側加力においてのみ現れたことから, 上側主筋の付着特性モデルにその影響を反映することとした。靱性指針に示される, 柱梁接合部内を通し配筋される主筋とコンクリート間の付着

強度 (7.6N/mm²) に比べて小さい付着応力度ですべりが生じており、その値は概ね3~4N/mm²程度であった。また、前節に述べた式(2)による付着強度は設計基準強度 $F_c=30\text{N/mm}^2$ に対して、3.3N/mm²と算出されることから、付着強度を3~4まで変動した単調載荷解析を行った。図-5(a)に示すように、付着強度の変化により耐力低下傾向を再現できることから、式(2)により求めた付着応力度 (3.3N/mm²) を用いることとした。なお、下側主筋については通し主筋の付着強度 (7.6N/mm²) を準用したが、参考までに、繰返し載荷解析で、上下ともに7.6N/mm²とした場合と、上側のみ3.3N/mm²とした場合の対比を図-5(b)に示す。上側主筋の付着強度を小さくすることで、正側は耐力低下が顕著になる一方で、負側の挙動には大きく影響していないことがわかる。

3.3 実験結果との比較

(1) 荷重～変形関係

解析の結果得られた荷重～変形関係は、図-3に実験結果と比較して示した通りである。また、試験体 Bo40 のひび割れ状況を比較して図-6に示す。漸増振幅で各振幅2回繰返した試験体 Bo40、および R=1/100 と 1/50 を10回繰返した試験体 Bo65 のいずれも正加力時の耐力低下

傾向を再現できている。一方、負加力時は大変形時でも曲げ耐力を維持し、概ね断面解析による曲げ終局時耐力を発揮している点なども対応している。一方、主筋降伏時の変形 (図中 Y.FEM(D16)) が実験 (同 Y.Exp.(D16)) に比べてやや大きい点が対応していない。要因のひとつとして付着強度時のすべり量の設定との関係も考えられ、解析モデルの改善の余地があり、今後の課題である。

なお、図-5で示したように、上側主筋の付着特性を、下側主筋と同じ大きさとした場合は、正方向で耐力低下は生じることなく正負でほぼ対称な履歴曲線となった。上側主筋の付着特性を、下側に比べて小さく設定することで、実験結果と対応する結果が得られたといえる。

(2) 主筋応力度分布

加力サイクルのピーク時の主筋応力度分布を、実験と解析を比較して図-7に示す。実験時に計測した歪度は、Menegotto-Pinto モデル¹³⁾を用いて応力度に換算した。各振幅2回繰返しとした試験体 Bo40 では、2回目のサイクルピーク時について、また、多数回繰返しを行った試験体 Bo65 では、R=1/200, 1/100, 1/50 の2回目、および 1/50 の10回目のサイクルピーク時についてプロットした。同図(c)(f)の荷重～変形関係には、主筋応力度分布を

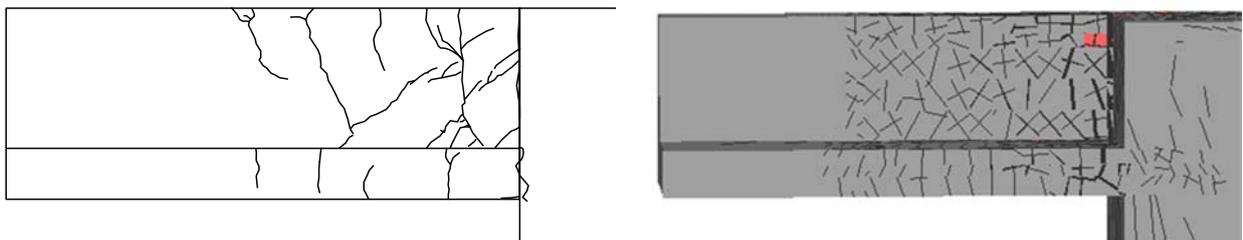
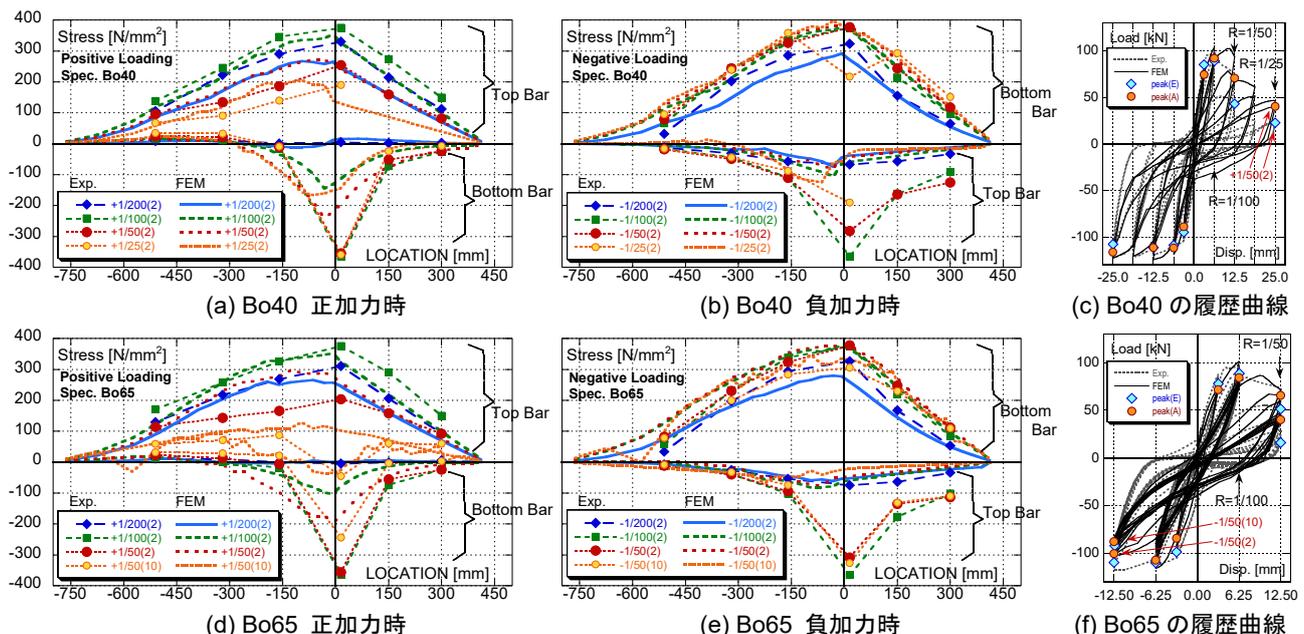


図-6 試験体 Bo40 のひび割れ状況 (R=+1/25 時) (左: 実験結果スケッチ, 右: FEM 解析結果 線の太さは幅を表す)



Top Bar は上側主筋 (スラブと反対側主筋) を、Bottom Bar は下側主筋 (スラブ側主筋) を、右図中の peak(E)、peak(A)はサイクルピーク時で、(E)は実験値、(A)はFEM解析結果を、それぞれ表す。また、変形角 (1/200, 1/100, 1/50, 1/25) の後ろの()内の数値は、サイクル回数で2回目または10回を表す。

図-7 主筋応力度分布

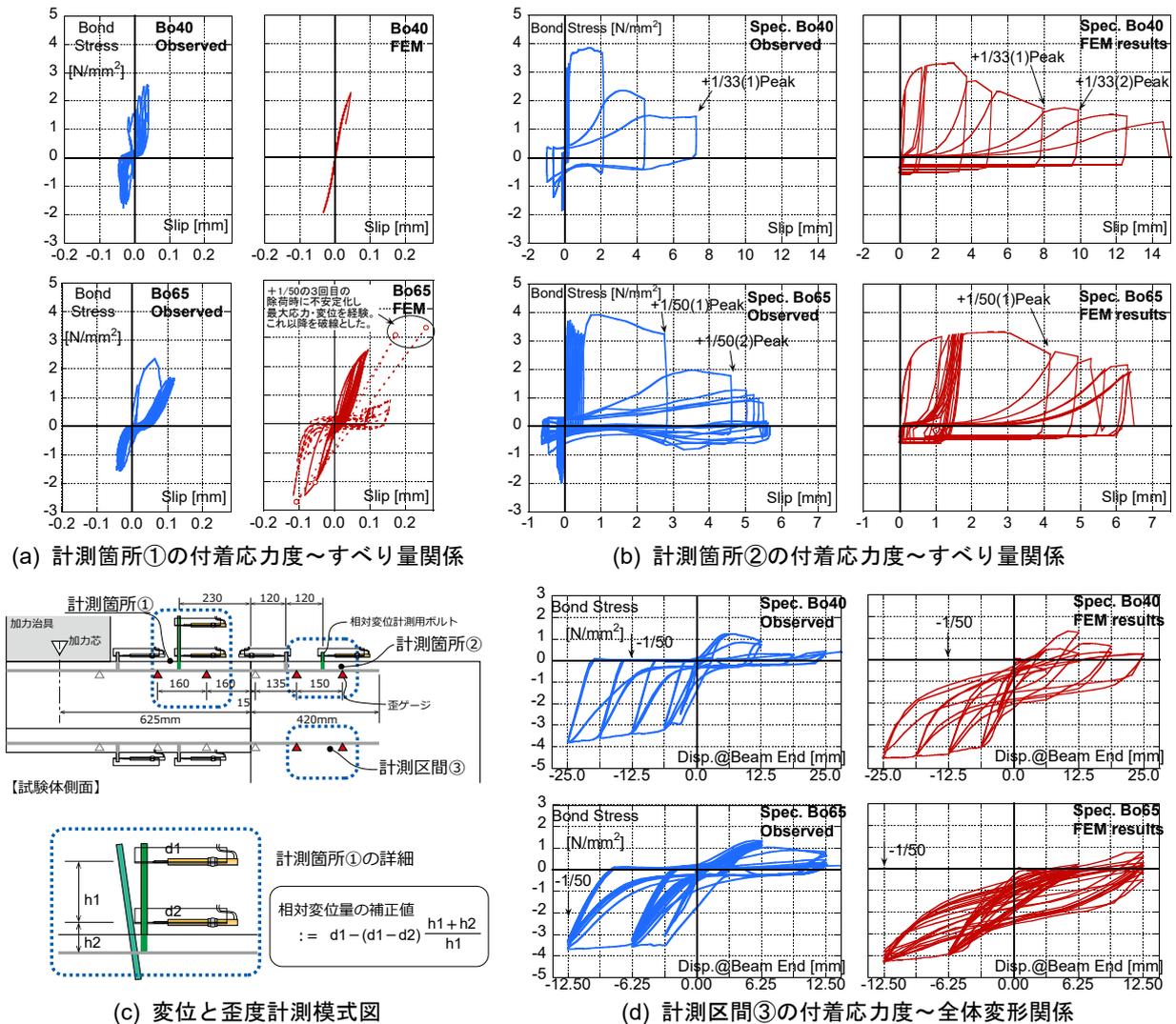


図-8 付着応力度と変位量の関係の比較

プロットしたサイクルピークの点を示した。

正負荷荷時とも、引張応力度負担する場合は、実験と解析の傾向は概ね対応している。一方、圧縮側の応力分布はやや対応しておらず、実験結果を過少評価する傾向がある。実験結果の応力度分布は、歪度から応力度に換算しており、応力度～歪度関係のルールに依存するが、この点は、著者らの既報¹²⁾でも同様の傾向が見られており、精度向上のためには課題といえる。また、下側主筋（スラブ側）は、正加力時圧縮、負加力時引張ともに大変形時まで大きな応力を負担する一方で、定着部の抜け出しが生じた上側主筋は、変形増大と耐力低下が進むとともに、応力の負担が徐々に低下する傾向が表れている。

(3) 付着応力度～すべり量関係

主筋応力度（前項に示す歪度からの換算値）と、主筋とコンクリート間の相対変位計測結果から、その区間の平均付着応力度と代表したすべり量関係を得た。解析では、鉄筋の線材要素とコンクリートの要素間に配置した接合要素の応力と変位の関係として付着応力度～すべり量関係が得られる。これらを比較して図-8(a)(b)に示す。

なお、計測点のうち、同図(c)に示した計測箇所①②について示した。さらに、スタブ内定着部の下側主筋についてはすべり量の計測は出来ないため、付着応力度と全体変形の関係を同図(d)に示した。

部材スパン内（計測箇所①）については、本実験ではすべりはほとんど生じなかったものの、付着応力度～すべり量関係を示すと、実験結果では、逆S字状の履歴曲線が観測されている。また、せん断補強筋間隔が小さく付着余裕度の大きい Bo40 に比べて、余裕度の小さい Bo65 の方が、わずかながらすべり量が大きく、付着余裕度の違いが表れている。解析では、履歴曲線の形状は実験を十分に再現できていないものの、特に Bo40 ではすべり量の大きさが実験と概ね対応している。また、Bo65 の接合要素の応力と変位は、R=1/50 の3回目除荷時に、一時的に不安定化し乱れた履歴となっている。なお、ボルトの傾斜により誤差が生じる可能性を考慮し、計測箇所①では部材高さ方向で2段に渡り計測し、図-8(c)に示すように補正した相対変位をすべり量としている。

一方、すべりが顕著に表れた直線定着部の挙動について

ては、耐力を発揮したのち、2~3mm 程度以上のすべりが生じる様子など、実験時に計測された傾向を概ね再現できているといえる。R=1/50 の繰り返しにより付着応力度が徐々に低下する様子は、荷重~変形関係において、耐力低下とともにスリップ挙動が見られる様子が相関しており、前節までに述べた付着特性のモデル化手法により、部材の履歴復元力特性が表現できたと考えられる。また、付着応力度と全体変形の関係について示した図-8(d)より、引き抜きに対して健全であった下側主筋の付着応力度は概ね 4N/mm² 程度で R=1/100 程度から概ね値が一定となっている。主筋降伏により付着応力度は概ね一定となり、抜け出しや付着劣化が生じることなく安定した挙動であると考えられる。

以上のように、本実験を対象とした解析では、すべりが生じた実態を踏まえて上側主筋の付着強度を小さくし、コア内に確実に定着できていたと考えられる下側主筋は付着強度を大きく設定した。これらのモデル化により、繰返し載荷時の挙動を概ね再現できたといえる。本報では、実験結果を踏まえたモデル化により再現しているが、部材の仕様に依りてあらかじめモデル化できることが望ましいため、この点が今後の課題といえる。

4. まとめ

鉄筋コンクリート部材の履歴復元力特性と主筋の付着性状の関係について検証する目的で、片持ち梁部材の繰返し載荷実験を対象として非線形 FEM 解析を実施した。本実験では、上側主筋のスタブ内定着部の抜け出しが荷重~変形関係に影響したことが考えられた。非線形 FEM 解析では、上側主筋のスタブ内定着部の付着性状として、RC 規準における直線定着部の安全性の確保に対応する付着強度を設定することで、抜け出し挙動や荷重~変形関係における耐力の劣化やスリップ挙動が再現できた。ただし、主筋の付着特性のモデル化手法は十分に確立されているとはいえず、今後の課題である。今後は、このような点に加えて、部材スパン内における主筋とコンクリート間の付着性状やスラブの影響についてさらに検討を進める予定である。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP19K04706 (研究代表者 杉本訓祥) および公益財団法人鹿島学術振興財団研究助成金 (2020 年度)により行われました。試験体製作にあたり、朝日工業株式会社より材料を提供していただきました。2019 年度の小山遥加氏・茂木友寛氏の修士論文・卒業論文研究として行われた実験では、横浜国立大学 畠中雄一技術専門職員をはじめ、RC 構造研究室所属学生の多大なる協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 杉本訓祥, 三輪田吾郎, 増田安彦, 勝俣英雄, 壁谷澤寿一, 福山洋: 長周期地震動を受ける縮小 20 層 RC 造建物試験体の履歴復元力特性, 構造工学論文集, Vol.61B, pp.95-102, 2015.3
- 2) 杉本訓祥, 田才晃: スラブ付き鉄筋コンクリート造柱梁接合部部分架構の FEM 解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.487-492, 2017
- 3) 杉本訓祥, 塚本瞭, 田才晃: スラブ付き鉄筋コンクリート梁の復元力特性と主筋の付着挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp.151-156, 2019
- 4) 茂木友寛, 胡全斌, 小山遥加, 田才晃, 杉本訓祥: 鉄筋とコンクリート間の付着挙動と鉄筋コンクリート部材の復元力特性の関係に関する実験的研究 (その 1) (その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.157~160, 2020.9
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 日本建築学会, 2018
- 6) 崎野健治, 孫玉平: 直線型補強材により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, No.461, pp.95-104, 1994.7
- 7) 長沼一洋, 米澤健次, 江戸宏彰: RC 構造物の三次元繰返し FEM 解析の精度向上 その 3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.427-428, 2003.9
- 8) 長沼一洋: 三軸圧縮下のコンクリートの応力~ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 474 号, pp.163-170, 1995.8
- 9) Nakamura, H. and Higai, T.: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on Post-peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Load, JCO-C51E, Vol.2, pp.259-272, 1990.10
- 10) Naganuma, K., Yonezawa, K., Kurimoto, O. and Eto, H.: Simulation of Nonlinear Dynamic Response of Reinforced Concrete Scaled Model using Three-dimensional Finite Element Method, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 586, 2004.8
- 11) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 日本建築学会, 1999
- 12) 杉本訓祥, 田才晃, 谷量子, 秋山友昭, 福山洋, 井上芳生: あと施工アンカーによる直線定着主筋を有する RC 壁柱状部材の履歴復元力特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 749 号, pp.1041-1050, 2018.7
- 13) Ciampi, V., Eligehausen, R., Bertero, V. V. and Popov, E. P.: Analytical Model for Concrete Anchorage of Reinforcing Bars Under Generalized Excitations, Report No. UCB/EERC-82-83, Univ. of California, 1982.11