

論文 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

杉本 訓祥*1・塚本 瞭*2・田才 晃*3

要旨: スラブ付き鉄筋コンクリート梁を対象とした既往の静的載荷実験結果の分析をした。部材スパンを変動して、付着割裂破壊耐力余裕度を变化させた試験体3体を対象に、特に、主筋の付着応力度や、すべり量の計測結果を検討した。実験では、スラブが付く上端主筋に比べて下端主筋の方がすべり量が大きくなり、特に付着の余裕度が小さい試験体は明確なすべりが観測された。また、試験体を対象として非線形 FEM 解析を行い実験結果と比較した。FEM 解析は、実験結果を精度よく評価できており、特に、下端主筋の付着挙動は、上端主筋に比べて大きな応力やすべり量が再現されている点で、実挙動と対応する結果が得られた。

キーワード: スラブ付き梁, 付着割裂破壊耐力, 非線形 FEM 解析

1. はじめに

梁降伏先行型として設計された鉄筋コンクリート（以下 RC）造架構は、大地震時には梁端に形成されるヒンジ領域の繰り返し外力に対する塑性変形によりエネルギー吸収する。理想的な梁部材では、時刻歴応答解析に用いられる TAKEDA モデル¹⁾のように、紡錘形の履歴曲線を描くとされているが、既往実験事例では、エネルギー吸収能力の乏しい逆 S 字状の履歴曲線を描く場合もあり、著者らの研究でも、スラブ付き架構の場合にそのような挙動を示すことを確認した^{2),3)}。スラブ付き RC 梁の場合、スラブの存在により、正負のいずれの曲げモーメントに対しても、下端主筋（スラブの反対側）の応力が上端に比べて大きくなる可能性がある（図-1）。その結果、鉄筋とコンクリート間に生じる付着応力度も高くなり、すべり量の増大につながる可能性があると考えられる。本報では、過去に実施されたスラブ付き RC 梁の静的載荷実験^{4)~6)}の結果を分析するとともに、非線形 FEM 解析を行い、実験結果と比較することにより、スラブ付き RC 梁の履歴曲線に及ぼす付着の影響について検討する。

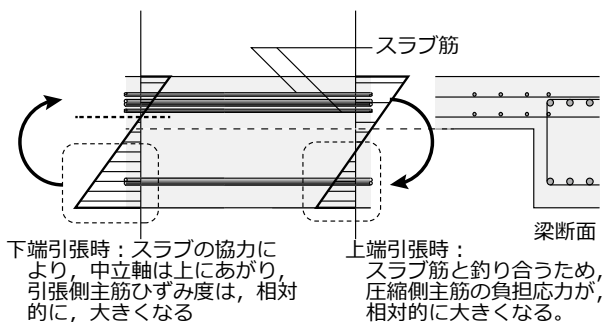


図-1 スラブが及ぼす影響の模式図

2. 既往実験の概要^{4)~6)}

本章では、検討対象の既往実験の概要について述べる。対象とする実験は、長周期地震動に対する安全性検証方法に関する調査の一環として、超高層モデル建物の中間階の梁を模擬して行われたスラブ付き RC 梁の静的正負繰り返し載荷実験である。

2.1 試験体概要

試験体一覧を表-1に、材料試験結果を表-2に、試験体形状および加力装置を図-2、図-3にそれぞれ示す。長周期地震動に対する影響を検討するため、特に主筋の付着性能を主な変数として計画されている。断面形状や配筋詳細はほぼ共通とし、主筋の付着余裕度を変動するため、梁部材スパンが変動因子となっている。曲げ降伏強度に対する付着割裂強度の余裕度は3水準とし、繰り返し回数も変動因子（同一振幅を2回または10回繰り返す）として、計6体が計画された。本報では、同一振幅で各2回繰り返す標準的な載荷とした計3体を対象とする。加力は、図-3に示す加力装置を用いて、鉛直ジャッキ2台により上下スタブの平行を維持するとともに部材に作用する軸力をゼロとしながら、水平ジャッキにより正負交番繰り返し載荷が行われている。また、繰り返しの載荷ルールは部材角 R （上下スタブの相対水平変位を部材内法長さで除した値）で制御し、 $R=1/400$ を1回繰り返した後は、 $R=1/200$ から $R=1/50$ まで $1/200$ ずつ振幅を漸増して各2回、 $R=1/33$ 、 $R=1/25$ を各2回繰り返す載荷ルールとしている。なお、 $R=1/67$ の後に $R=1/200$ を、 $R=1/50$ の後に $R=1/100$ を、 $R=1/33$ および $R=1/25$ の後に $R=1/67$ を、それぞれ正負1回繰り返す、大変形後の小振幅の挙動を確認するための載荷ルールも採用されている。

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

*2 前・横浜国立大学大学院 修（工）（現・大林組）（正会員）

*3 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 教授 博（工）（正会員）

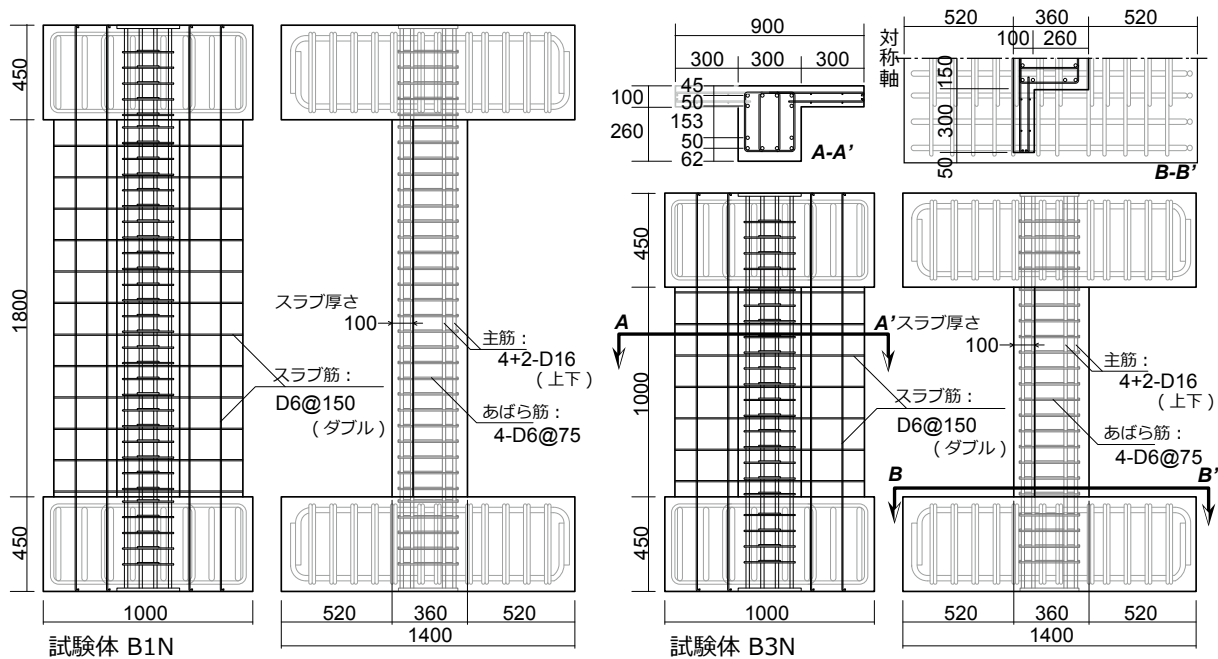


図-2 試験体形状寸法

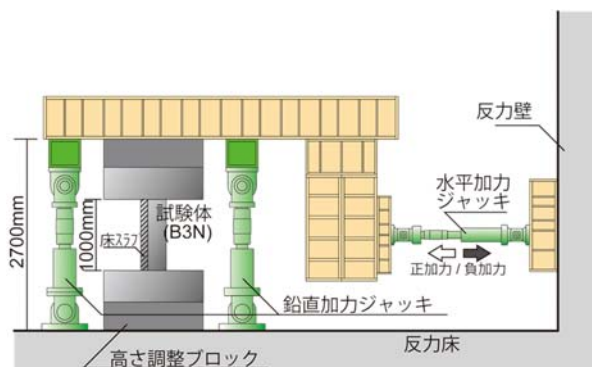


図-3 加力装置

本実験では、主筋とコンクリート間の付着性状に着目していることから、主筋のコアコンクリートに対する相対すべり量の計測が行われている。4章に述べる計測方法により、主筋のスパン中央付近に全ネジボルトを溶接しておき、別途コアに定着した全ネジボルトとの相対変位を計測している。対象は、上端と下端の断面隅角部と内側に位置する鉄筋の合計4本である。

2.2 実験結果概要

いずれの試験体も、部材角 $R=1/100$ から $1/67$ の加力サイクルまでに、2段とも主筋が降伏した。せん断スパンが最も短い試験体 B3N は、割裂ひび割れが顕著に生じ、大変形時の耐力低下が見られたが、他の2体の試験体は、大変形時も耐力低下は見られず、安定した履歴復元力特性を有していた。なお、実験結果の荷重～変形関係については、解析結果とともに4章で述べる。

また、鉄筋の相対すべり量の計測結果では、試験体 B3N の下端主筋においてのみ、大変形時の繰り返し載荷

表-1 試験体一覧

試験体	B3N	B2N	B1N
梁断面	300[mm]×360[mm]		
主筋	4+2-D16 (上下)		
あばら筋	4-D6@75mm		
内法スパン	1000[mm]	1400[mm]	1800[mm]
せん断スパン比	1.4	1.9	2.5
付着余裕度 [*]	1.0	1.5	1.9

^{*} 付着余裕度は付着破壊を考慮したせん断強度⁷⁾ (設計基準強度 F_c による) の曲げ強度略算値 (RC 規準⁹⁾) に対する比

表-2 使用材料の材料試験結果

(a) コンクリート (設計基準強度 F_{c48})

試験体	B3N	B2N	B1N
圧縮強度 [N/mm ²]	62.7	65.8	61.1
ヤング係数[N/mm ²]	34000	38800	36800
割裂強度 [N/mm ²]	4.14	4.28	3.73

(b) 鉄筋

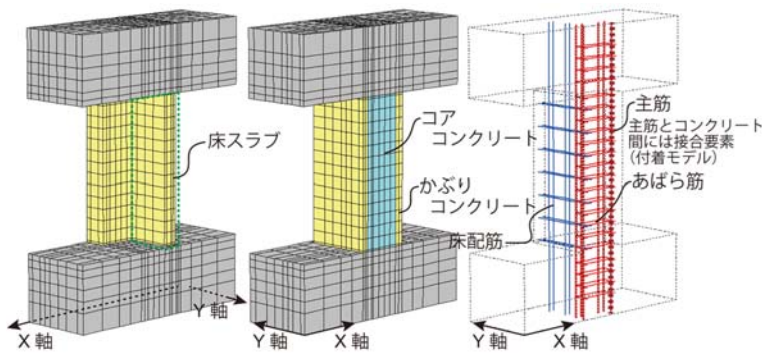
鉄筋径 (種類)	D16 (SD490)	D6 (SHD685)	D6 (SD295A)
使用箇所	主筋	あばら筋	スラブ筋
降伏強度 [N/mm ²]	536	697	409
ヤング係数[N/mm ²]	204000	192000	216000

において、大きなすべり量が計測された。具体的な計測結果については、解析結果とともに4章で述べる。

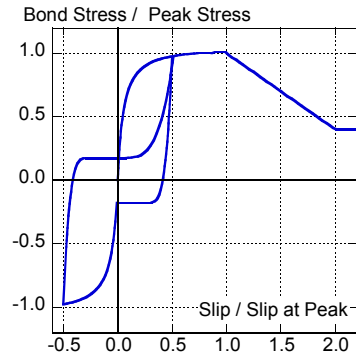
3. 非線形 FEM 解析概要

3.1 解析モデル

非線形 FEM 解析は、汎用解析ソフト「FINAL」⁹⁾ を用いて行った。要素分割を図-4 に示す。対称性を考慮して、

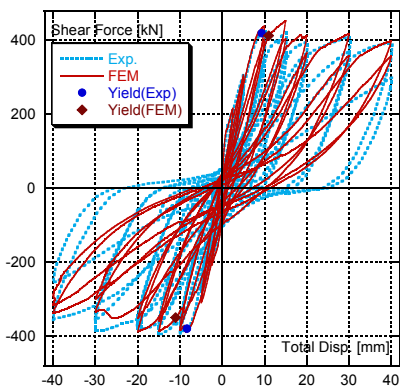


(a) メッシュ分割

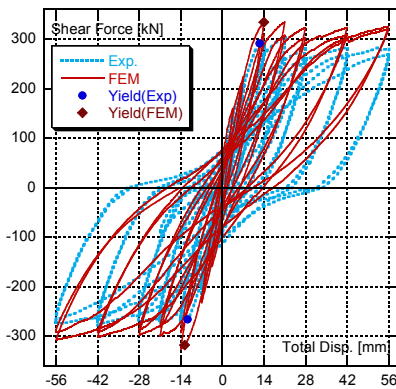


(b) 付着応力度～すべりモデル

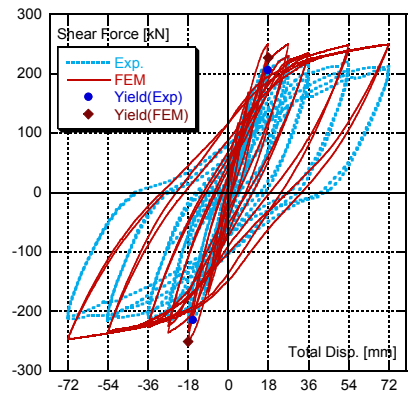
図-4 解析モデル図



(a) 試験体 B3N



(b) 試験体 B2N



(c) 試験体 B1N

図-5 荷重～変形関係（解析と実験の比較）

部材幅方向の中央で切断した半分のみモデル化し、切断面の節点は切断面法線方向を拘束した。コンクリートは六面体要素、鉄筋はすべて線材要素でモデル化した。コンクリートの応力度～歪度関係の圧縮強度までの上昇域には修正 Ahmad モデル¹⁰⁾を用い、圧縮強度後の軟化域については、Nakamura らの提案モデル¹¹⁾を用いた。鉄筋の応力度～歪度関係は、降伏後剛性低下率 1%のバイリニアモデルとした。主筋とコンクリート間には、物理的な大きさを持たない接合要素を配置して付着劣化によるすべりをモデル化した。付着応力度～すべり量関係の履歴曲線の例を図-4(b)に示す。付着応力度～すべり量関係は、包絡線と履歴特性を Naganuma らの手法¹²⁾によりモデル化した。ピーク時強度は、部材内は、付着割裂強度 τ を、スタブ内は通し主筋の付着強度 τ をそれぞれ用いることとし、ピーク時すべり量は 1.0mm とした。

3.2 荷重方法

解析では、実験と同一条件とするため、上スタブ天端面を、下スタブ底面と平行を維持するとともに、水平変位を与えた。荷重ルールは、部材角 $R=1/200$ から振幅を漸増し、 $R=1/100, 1/67, 1/50, 1/33, 1/25$ を正負各 2 回繰り返すこととしたが、2.1 節に述べた実験における大変形後の小振幅の荷重は省略した。

4. 結果の検討

4.1 荷重～変形関係

荷重～変形関係を図-5 に示す。図には、実験結果も比較して示した。また、降伏点 (Yield) は、部材両端部の 2 段筋降伏が確認された点としてプロットした。2 章で述べたように、実験では、試験体 B3N では耐力低下が見られ、履歴曲線にスリップが顕著に見られたが、他の 2 体は比較的安定した履歴性状を有していたが、解析でも履歴曲線は概ね再現できている。ただし、試験体 B1N, B2N の解析結果は、耐力をやや過大評価する傾向がみられるとともに、履歴曲線のスリップが少ない点で、実験結果との対応は良くない。また、3 体とも荷重が小さいスリップ部分の剛性変化も対応は良くなく、主筋の付着性能以外の要因も考えられるが、これらの点の要因分析と改善は今後の課題である。しかしながら、各試験体の挙動を比較した場合に、付着割裂強度の余裕度が大きくなるにつれて (B3N→B2N→B1N)、履歴性状が良好になる傾向は、よく再現できているといえる。

4.2 主筋の応力度分布

実験では、主筋にひずみゲージを貼付し、歪度を計測している。1 か所あたり 2 枚貼付したゲージの計測値の平均値を応力度に換算した。このとき、応力度～歪度関

係は, Menegotto-Pinto モデル¹³⁾を用いた。歪度から応力度の換算例を図-6に示す。上端および下端隅角部の主筋の応力度分布を, 実験結果と解析結果を比較して図-7に示す。図は引張応力度を正とし, 降伏強度 $\sigma_y=536\text{N/mm}^2$ を破線で示した。部材角 $R=1/100$ では, 圧縮応力はほとんど生じていないが, $R=1/50$ ではほぼ圧縮降伏に至っている様子など, 解析結果は実験結果とよく対応していることがわかる。一方, 上端主筋と下端主筋との比較では, 両者に有意な差は見られない。また, 試験体 B1N, B2N では, $R=1/50$ における梁の圧縮応力度の解析結果が過大評価しており, 耐力が対応していないことと関連していると推察され, この点で課題が残る。

4.3 付着応力度とすべり量

前述した主筋歪度から換算した応力度を用いて, 測定区間における平均付着応力度を算出した。また, 実験時にすべり量を計測した位置における平均付着応力度とすべり量計測値の関係を図-8に示す。また, 計測箇所とほぼ同じ位置における付着応力度とすべり量の解析結果を同図に示す。ここで, 付着応力度とすべり量の解析結果は, 複数の要素の平均値とした。すなわち, 実験ですべり量を計測した点を挟む 2 点の歪度計測区間は, 300~

400mm 程度であり, ほぼ同じ区間に位置する 9 つ (試験体 B2N) または 5 つ (試験体 B1N, B3N) の要素の値を平均した。平均値算出の対象とした要素の位置は, 図-7中 (応力・変位抽出範囲) に, また, 実験時のすべり量の計測方法の概要は図-9に, それぞれ示した。なお, 試験体 B3N については, 目安として大変形時のサイクルピークの点をプロットしている。

実験では, 試験体 B3N の下端主筋においてのみ, 大変形時に大きなすべり量が計測されている。この点は, 解析でも同様に 2.0mm 程度以上の大きなすべり量が生じており, よく対応しているといえる。特に, $R=1/33$ から

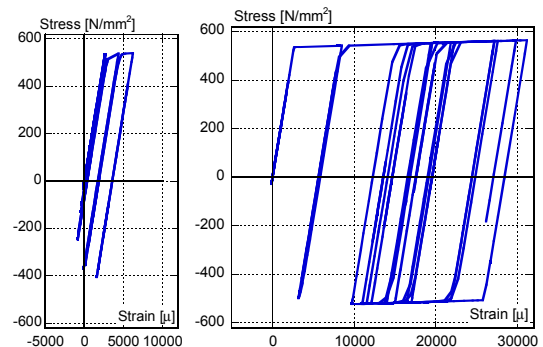
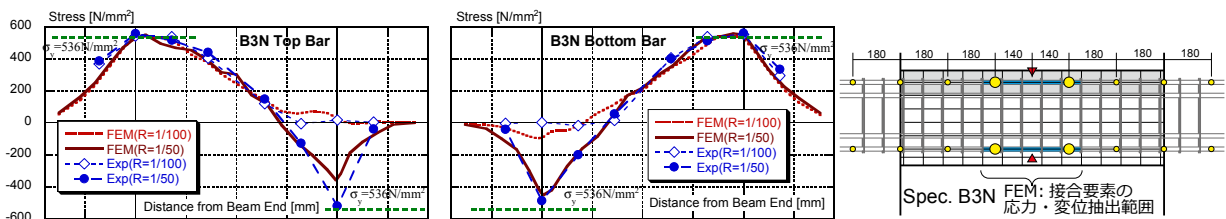
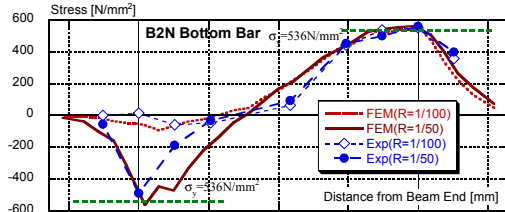
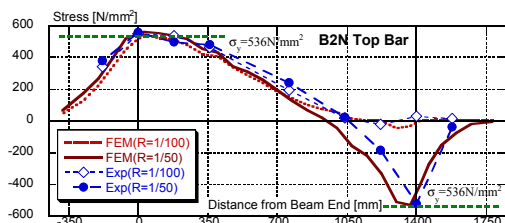
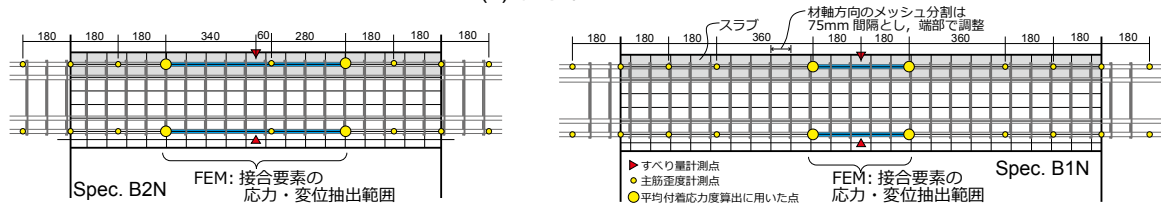


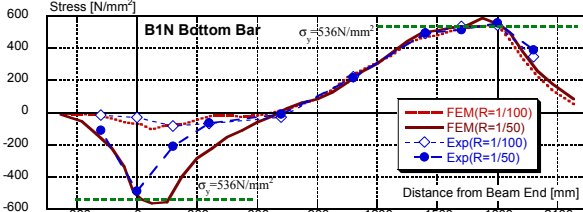
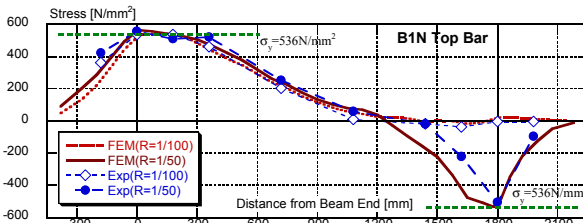
図-6 応力度ひずみ度関係例



(a) 試験体 B3N



(b) 試験体 B2N



(c) 試験体 B1N

図-7 主筋応力度分布の比較

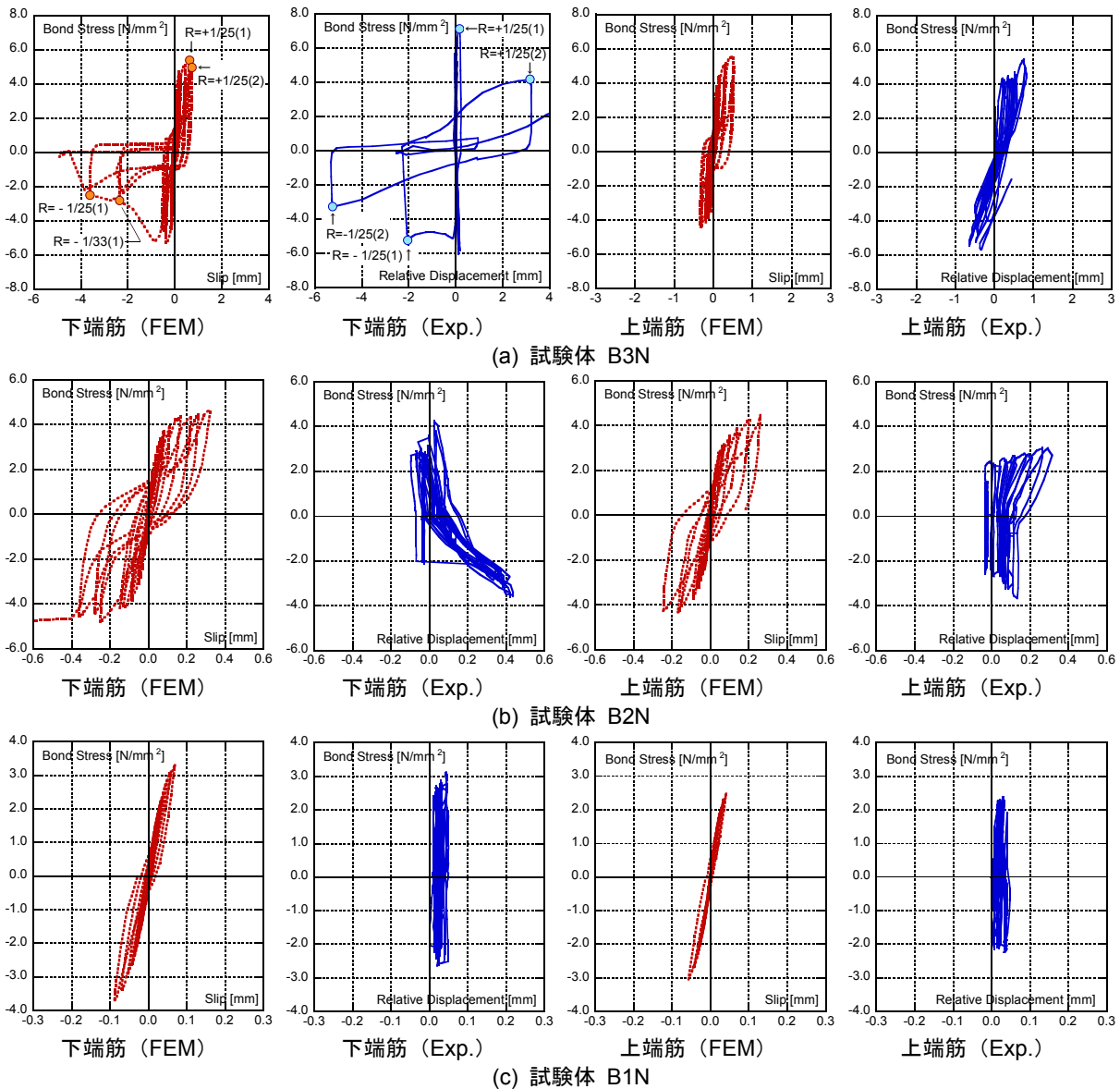


図-8 付着応力度～すべり量関係の比較

$R=1/25$ の加力サイクルまでにこのすべりが生じており、耐力低下につながったと推察される。また、その他の計測結果および解析結果は、いずれも非常に小さなすべり量となっている点で対応している。特に、上端主筋に比べて下端主筋の方が応力が高い傾向があり、その点でも解析結果は実験結果と対応している。なお、試験体 B2N の解析結果で下端筋については、最終サイクルで大きなすべり量に至っており、実験に対して過大評価といえる。

試験体 B1N および B2N では、実験結果の履歴曲線が正側に偏るなど挙動が不明瞭なケースもあるが、これは、部材のたわみにより生じる計測ボルトの傾斜などの影響を受けて、すべり量以外の変形成分を計測している可能性が考えられる。しかし、計測された値が 0.2mm 程度などの小さい値であることから、真のすべり量も同様に小さいと推定される。より適切に分析するためには、計測方法に課題があるものの、各試験体ともに上端筋に比べて下端筋の付着応力度が大きくなる傾向がある点や、試

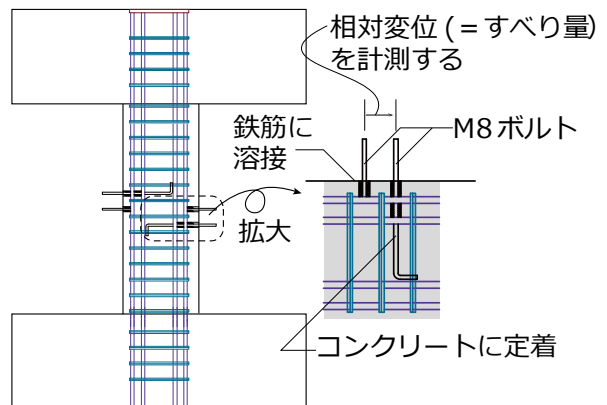


図-9 付着すべりの計測方法の概要

験体 B3N のように下端筋においてのみ過大なすべり量が生じる点は、本実験と解析の比較検討結果から、スラブ付き RC 梁の特徴として指摘できよう。

以上より、前節の結果も踏まえると、上端筋と下端筋の挙動については、軸応力度分布には顕著な差は見られ

ないが、付着応力度とすべり量の関係について詳細に分析すると、上端筋に比べて下端筋の方が作用する付着応力度が大きくなる傾向があり、その結果すべり量も大きくなる場合があることが確認された。特に、付着割裂強度に対する余裕度が 1.0 に近い場合、曲げ降伏には至るものの、大変形時には 2.0mm を超える大きなすべりが生じ、部材の耐力低下につながったと推察される。

また、本報で対象とした実験では、スパン中央でのみすべり量の計測をしているが、鉄筋とコンクリート間のずれ量は部位によって異なると考えられる。そのため、今後の課題として、スパン内の各位置ですべり量を計測するにあたり、損傷が進行するヒンジ領域での計測方法が挙げられる。さらに、本報の試験体 B1N や B2N のように不明瞭な履歴とならないように計測する方法についても課題であろう。

5. まとめ

過去に行われたスラブ付き RC 梁の部材実験を対象に非線形 FEM 解析を実施した。実験結果の分析とともに解析との比較を行い、以下の知見が得られた。

- (1) せん断スパン比のみを変動因子として付着割裂強度の余裕度を 1.0~2.0 程度に変動した 3 体では、余裕度が小さいほど履歴曲線にスリップ性状が現れ、非線形 FEM 解析でも同様の傾向が見られた。
- (2) 非線形 FEM 解析では、主筋の応力度分布についても実験結果と良く対応した。
- (3) 主筋の付着応力度とすべり量の関係について、付着割裂強度の余裕度が 1.0 程度の試験体 B3N では、スラブと反対側の下端主筋において顕著なすべりが生じていた。一方、付着割裂強度の余裕度が 1.5 程度以上の試験体 B2N, B1N では、すべり量は小さいものの、上端主筋より下端主筋の付着応力度が大きくなった。実験、解析のいずれでも確認されており、上端側のスラブが下端主筋に影響を及ぼすことを明瞭に示しているといえよう。

一方で、実験においてより正確に多数のすべり挙動データを計測する方法や、試験体 B1N および B2N の解析における評価精度の向上といった点の課題が残った。

参考文献

- 1) T. Takeda, M. A. Sozen and N. Nielsen: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Proceedings ASCE, ST21, pp.2557-2573, 1970.12
- 2) 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

- 3) 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, pp.487-452, Vol.39, No.2, 2017.7
- 4) 金善花, 田才晃, 楠浩一, 福山洋, 壁谷澤寿一: 多数回繰り返し外力を受ける鉄筋コンクリート造スラブ付き梁の静的載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.745-746, 2011.7
- 5) 高橋豪, 金善花, 田才晃, 楠浩一, 福山洋: 多数回繰り返し外力を受ける鉄筋コンクリート造スラブ付き梁の静的載荷実験 その 2 各種限界状態と復元力特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.635-636, 2012.9
- 6) 高橋豪, 田才晃, 楠浩一, 福山洋: 多数回繰り返し外力を受ける鉄筋コンクリート造スラブ付き梁の静的載荷実験 その 3 剛性低下率と付着における基準式の妥当性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.167-168, 2013.8
- 7) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1998
- 8) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2018
- 9) 長沼一洋, 米澤健次, 江戸宏彰: RC 構造物の三次元繰り返し FEM 解析の精度向上 その 3 非直交ひび割れモデルの改良と付着すべりモデルの導入, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.427-428, 2003.9
- 10) 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
- 11) 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, JCI-C51E, Vol. 2, pp.259-272, 1990.10
- 12) 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
- 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, Berkeley, 1982.11