

論文 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

杉本 訓祥*1・田才 晃*2

要旨: 鉄筋コンクリート造柱梁接合部を含む部分架構の地震時挙動において、スラブが及ぼす影響について、非線形 FEM 解析により検証した。比較的柱梁曲げ強度比を大きくした十字型柱梁接合部部分架構を対象とし、梁通し主筋の付着性能を変動させた複数のモデルを対象とした FEM 解析を行い、スラブの有無が履歴性状や付着性状に及ぼす影響を検証した。特に大変形時のエネルギー吸収性能は、スラブ付き架構の方がやや劣る傾向がみられた。さらに、スラブ無し架構では上下の主筋の付着挙動に差は見られないが、スラブ付き架構の場合、主筋の付着すべり量は、下端主筋がより大きく、上端主筋はより小さくなることが確認された。

キーワード: 柱梁接合部, 履歴特性, 付着

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造架構は、大地震時に梁端に形成されるヒンジ領域の塑性変形によりエネルギー吸収する。効率的に、履歴によりエネルギー吸収するためには、紡錘形の履歴曲線を描くことがよいと考えられているが、靱性が比較的高くなるように設計された梁を有する架構試験体でも、履歴性能が低いことがある。例えば、2012 年に行われた縮小 20 層 RC 造建物試験体の震動実験¹⁾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履歴は、エネルギー吸収能力がやや乏しい逆 S 字状の曲線となっていた。さらに、この震動実験結果から得られた接合部通し梁主筋の付着応力度は、上端に比べて下端の方が大きく、履歴にはスリップ性状が見られた (図-1)²⁾。

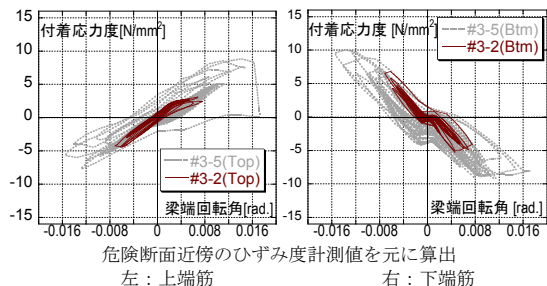
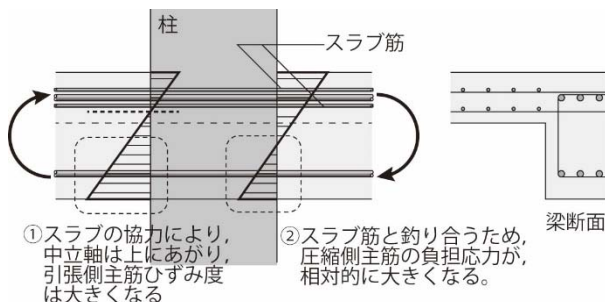
図-1 付着応力度～梁端回転角関係の実験結果例²⁾

図-2 スラブによる通し主筋への影響

上端にスラブが取り付け梁部材では、上下対称な矩形断面の場合と異なり、下端主筋の方が生じる応力度が大きくなることが推察される (図-2)。このため、特に下端主筋とコンクリート間の付着応力度が、上端主筋に比べて大きくなり、付着性状に影響を及ぼすと考えられる。そこで、本研究では、十字型接合部部分架構を対象とした FEM 解析によるパラメトリックスタディを行い、スラブの有無と付着性状の関係について分析する。

2. 解析対象

2.1 対象架構

解析対象とする架構の基本的形状・寸法および境界条件を図-3に示す。解析対象は、一般に実験室で行う静的載荷実験で用いられる縮小モデルを想定し (実物の 1/2.5 程度)、ラーメン架構の柱および梁の反曲点位置を想定したスパン中間で切り出した十字型架構とした。下柱脚部をピン、両梁端をピンローラー支持とし、柱頂部を水平方向に載荷した。また、柱の軸力はゼロとした。なお、対称条件を考慮し、幅方向半分のみの解析モデルとした。

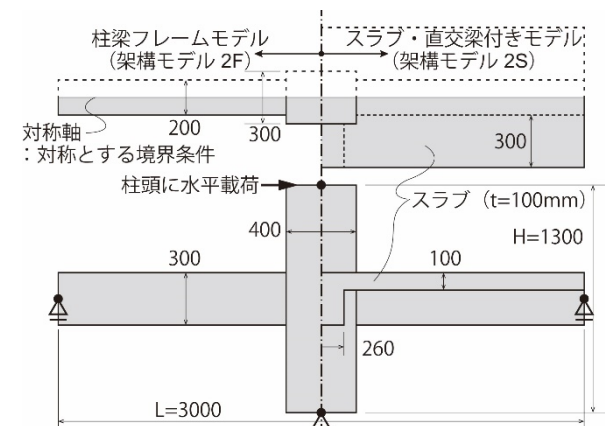
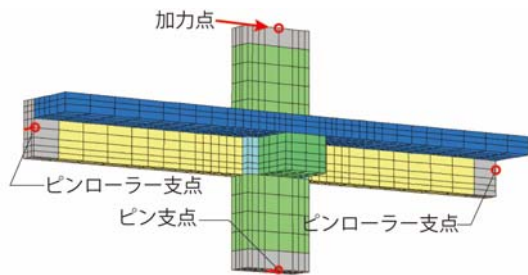


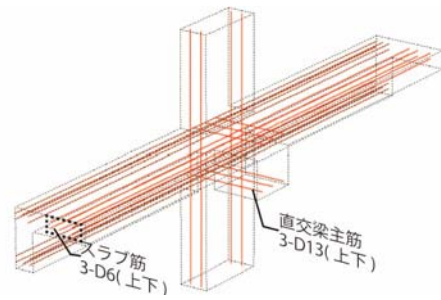
図-3 解析対象架構の模式図

*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 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)



(a) 要素分割



(b) 主筋の線材要素

図-4 要素分割

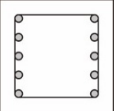
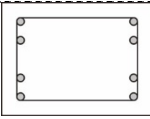
主要な変動因子を表-1に示す。解析対象架構の形状および寸法は、スラブおよび直交梁の有無による2種、および柱せい2種の計4種の架構モデル(1F, 1S, 2F, 2S)を設定した(同表(a))。また、通し主筋の付着性状と架構の荷重～変形の履歴曲線の関係を検討対象とするため、架構の耐力は大きく変えることなく付着性能を変動するように主筋径と本数を変動した梁配筋4種(A～D)を設定した(同表(b))。なお、接合部降伏により性能が低下することのないように、柱梁曲げ強度比は比較的大きくなるよう計画した。以上から、架構モデル4種に対して梁配筋4種の計16ケースの解析を実施した。解析ケース名は、1F-A, 2S-Aなどと表記する。使用材料は、表-1(c)に示す通りとし、SD345およびSD490に対して規格降伏点強度を用いた。また、柱梁曲げ強度比、通し主筋の付着余裕度および接合部せん断余裕度を表-2に示す。

2.2 解析モデル

FEM解析は、汎用解析ソフト「FINAL」³⁾を用いて行った。要素分割の例を図-4に示す。対称性を考慮して、幅方向半分のみをモデル化した。これまでにやってきた実験を対象とした検証解析^{4), 5)}と同様に、コンクリートは六面体要素、柱・梁主筋およびスラブ筋は線材要素でモデル化し、せん断補強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～歪度関係は降伏後剛性低下率1%のバイリニアモデルとし、等方硬化則とした。コンクリートの応力度～歪度関係は、修正 Ahmad モデル⁶⁾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⁷⁾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、物理的な大きさを持たない接合要素を配置し、主筋とコンクリート間の付着劣化によるすべりをモデル化した。付着応力度～すべり量関係は、包絡線と履歴特性をNaganumaらの手法⁸⁾によりモデル化した(図-5)。また、付着強度のみ部位により変更し、部材スパン内については付着割裂強度⁹⁾を、通し主筋については接合部内通し主筋の付着強度⁹⁾をそれぞれ用いた。載荷は、正負交番繰り返しとし、層間変形角R(柱頭水平変位を柱高さ1300mmで除したもの)で制御し、 $\pm 1/200$ の1回繰返しの後、 $\pm 1/100 \sim \pm 1/16$ まで1/100ずつ漸増して各2回繰返した。

表-1 解析対象

(a) 架構の形状・寸法

架構モデル	1F	1S	2F	2S
柱断面	300×300		300×400	
主筋				
	10-D13(SD490)		8-D13(SD490)	
高さ（せん断スパン）	1300（500）		1300（500）	
梁断面	200×300		200×300	
梁主筋	A～D（下表(b) 梁配筋による）			
長さ（せん断スパン）	3000（1350）		3000（1300）	
直交梁	－	180×300	－	260×300
直交梁主筋	3-D13(上下)			
スラブ厚さ	－	100	－	100
スラブ幅	－	300	－	300
スラブ筋	D6@100(上下)			

単位[mm]

(b) 梁配筋

梁断面モデル	A	B	C	D
梁主筋(上下)	5+3-D10	5-D13	3-D16	2-D19

(c) 使用材料の仮定

材料	強度	ヤング係数
梁主筋(D10～D19)	345	2.05×10^5
柱主筋(D13)	490	2.05×10^5
梁コンクリート	30	2.66×10^4
柱コンクリート	42	2.97×10^4

コンクリートのヤング係数は靱性指針⁹⁾に示されるNewRC式により算出

単位[N/mm²]

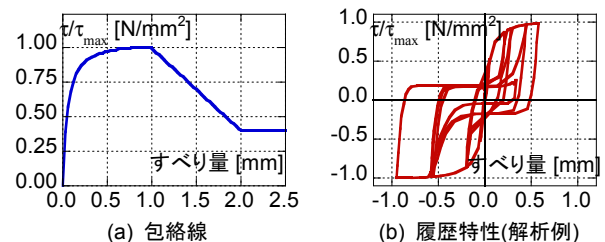


図-5 付着応力度～すべり量関係

3. 解析結果および結果の検討

3.1 荷重～変形関係

解析結果のうち、2F-A および 2S-A の損傷状況を図-6 に、梁断面 A および D の解析ケースについて荷重～変形関係を図-7 に示す。また、層間変形角 $R=1/100$ 以降の各変位振幅における等価粘性減衰定数 (h_{eq}) を図-8 に、各耐力余裕度と h_{eq} の関係を図-9 に示す。図-8 には、 $R=1/100$ を降伏点と仮定した TAKEDA モデル¹⁰⁾による h_{eq} も示した。ここで、等価粘性減衰定数は、各変位振幅

表-2 耐力余裕度一覧

(a) 柱梁曲げ強度比

梁断面モデル	A	B	C	D
架構 1F	1.91	1.66	1.77	1.83
架構 1S	1.53	1.37	1.44	1.49
架構 2F	2.17	1.89	2.01	2.09
架構 2S	1.74	1.57	1.64	1.69

柱・梁の曲げ強度は、スラブを考慮して、平面保持仮定に基づく断面解析により圧縮緑ひずみ度 0.3% 時として算出した。曲げ強度比は節点モーメントの比とした。

(b) 梁通し主筋の付着余裕度

梁断面モデル	A	B	C	D
架構 1F/1S	1.47	1.13	0.92	0.78
架構 2F/2S	1.97	1.51	1.23	1.03

(c) 接合部せん断余裕度 (スラブ無視)

梁断面モデル	A	B	C	D
架構 1F/1S	2.39	2.15	2.29	2.37
架構 2F/2S	3.21	2.90	3.09	3.19

の2回目のサイクルの値を示した。耐力余裕度等によらず、荷重～変形の履歴曲線は、紡錘形というよりやや逆 S 字状となり、エネルギー吸収性能の低い形状となっている。また、 h_{eq} は、 $R=1/50$ では 0.15～0.20 程度であり、RC 架構で一般に用いられる TAKEDA モデルと同等程度以上であるが、 $R=1/50$ 以降は、変形の増大とともに低下する傾向が見られている点で大きく異なっている。また、スラブ付きとしたモデルは、 $R=1/50$ 程度まではスラブ無しモデルと同等かそれ以上だが、 $R=1/25$ 以降で性能が低下する傾向がみられる。

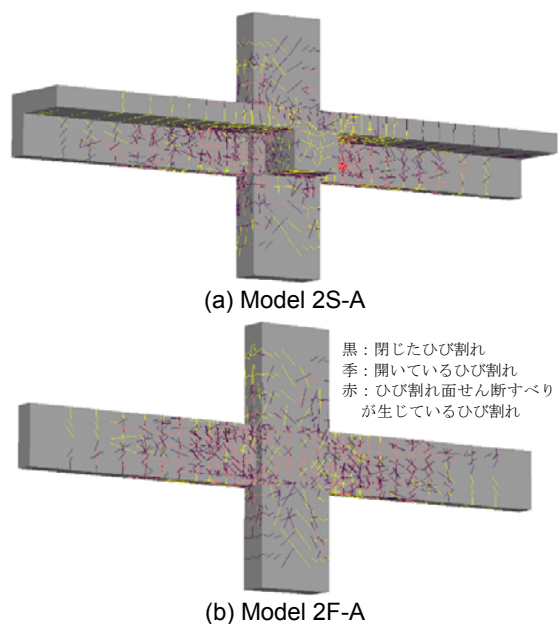


図-6 解析結果：損傷状況 ($R=1/25$ 繰り返し後)

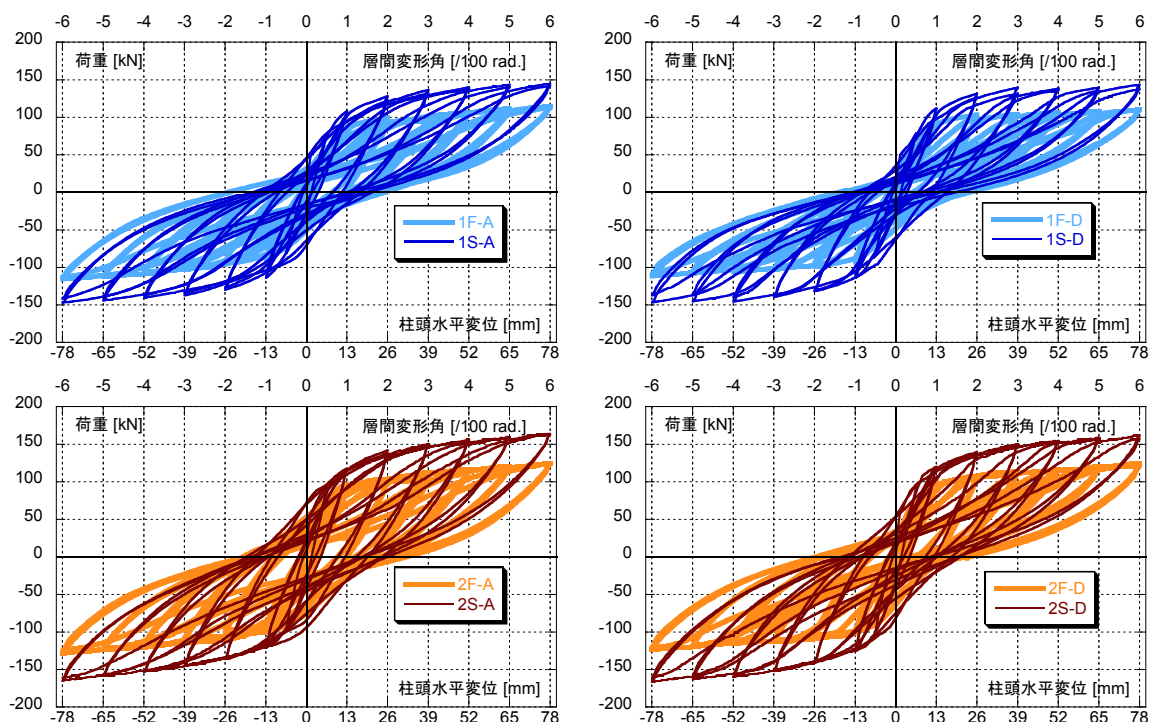


図-7 解析結果：荷重～変形関係

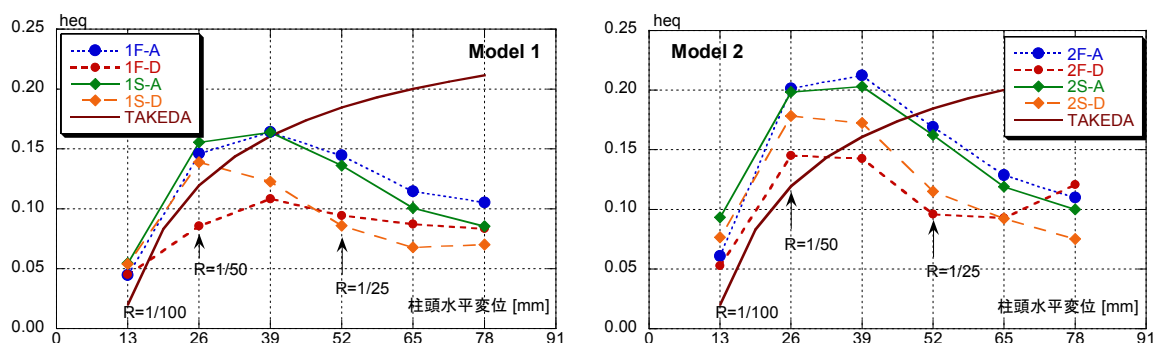


図-8 解析結果：等価粘性減衰定数

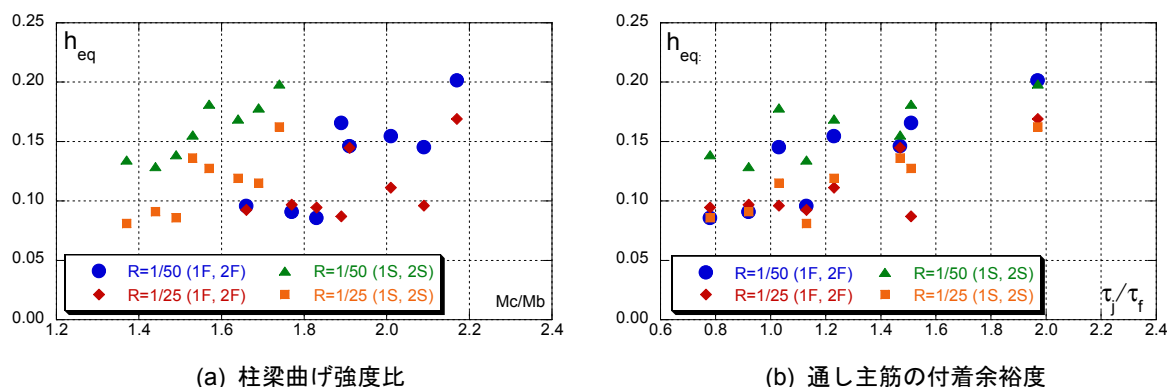


図-9 解析結果：耐力余裕度と等価粘性減衰定数

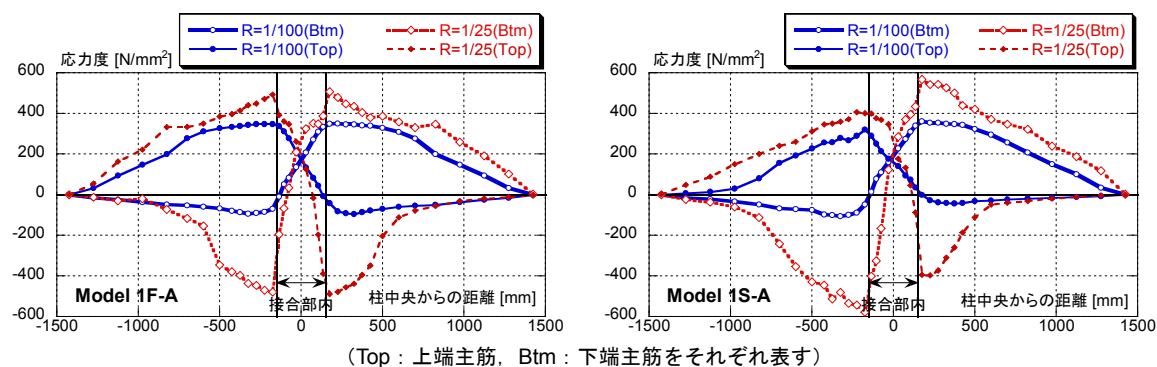


図-10 解析結果：主筋の応力度分布

耐力余裕度(柱梁曲げ強度比や通し主筋の付着余裕度)と h_{eq} の関係では、余裕度が大きいほど h_{eq} が大きい傾向はあるものの、柱梁曲げ強度比が 1.6 程度以上では、 h_{eq} の変動はあまり見られない。一方、付着余裕度は 1.0 前後では h_{eq} の変動が少なく、1.2 程度より大きくなると、余裕度の上昇に相関して h_{eq} が大きくなる傾向がある。

3.2 主筋の応力度分布

解析結果のうち、解析ケース 1F-A および 1S-A について梁主筋の応力度分布を図-10 に示す。図は、層間変形角 $R=1/100$ 、および $1/25$ について示した。いずれの解析ケースでも、 $R=1/100$ 程度で引張降伏し、その後梁端部において塑性域が広がり、およそ梁せい程度の範囲がヒンジ領域となっていること、 $R=1/25$ では圧縮側でも降伏に至っていることが確認できる。また、大変形時の接合部内の応力度差は大きく、さらに、曲線状に分布してい

ることで、付着応力度が局所的に大きくなっていることがわかる。主筋の軸応力度分布を直線と仮定して付着に関する検討・設計を行うことが一般的であるが、仮定と異なる付着応力度が生じている可能性を示唆している。靱性指針⁹⁾における接合部内通し主筋の両端が降伏して上限強度に達するとの仮定は、設計用付着応力度を大きく設定し、安全側の設計と考えられるが、軸応力度が曲線状に分布する影響についての検証も必要であろう。

3.3 通し主筋の付着応力度

通し主筋の付着性状について検討する。通し主筋の付着応力度と主筋とコンクリート間の相対すべり量を図-11 に示す。梁主筋とコンクリート間に設けた接合要素に作用する応力度とすべり量の関係を示している。特に、同図(a)に示すように、柱主筋より内側にある4つの要素の応力度の平均値およびすべり量の和の関係を図示した。

スラブ無しのモデルでは、上端筋と下端筋には有意な差は見られないが、スラブ付きモデルでは、上端筋と下端筋に顕著な差が見られる。また、各サイクルにおける最大すべり量の下端筋と上端筋の比較を図-12に示す。同図は、層間変形角 $R=1/50, 1/33, 1/25, 1/20, 1/16$ の各サイクルのすべり量最大値を下端筋と上端筋の関係で示した。スラブ無しモデル (1F および 2F のシリーズ) では、上端筋と下端筋のすべり量は同程度か、あるいは上端筋の方が下端筋よりも大きい場合もあるが、スラブ付きモデル (1S および 2S のシリーズ) では、下端筋のすべり量が非常に大きくなっている。特に付着余裕度が 1 より大きいモデル (1S-A や B, 2S-A や B など) でも下端筋のすべり量の方が大きく、スラブ無しモデルとは逆の傾向があり、スラブの存在が大きく影響していることがわかる。下端筋については、前述したように、スラブの存在により上端圧縮時と引張時のいずれに対しても下端主筋の作用応力が上端に比べて大きくなることから、軸応力度分布における勾配が大きくなり、付着応力度とすべり量がともに大きくなったと考えられる。一方、上端筋は相対的に応力が小さくなることに加え、スラブ筋の存在により負担が小さくなることなどから、スラブ無しモ

デルに対してもより小さい応力となったと考えられる。

解析では、あらかじめ付着応力度とすべり量の関係を非線形でモデル化しているため、作用する応力度が大きくなった結果として付着劣化が顕著に進むこととなったと考えられる。特に、本解析では、全モデルで同一の応力度～すべり量関係を与えていることから、1章に述べたようにスラブの存在が大きく影響していることが示されたといえる。一方で、実挙動における、付着応力度とすべり量の関係は、未解明な部分があり、実態を調査する必要があると考えられる。すなわち、周辺の拘束状況などによらずピーク強度を一定としてよいか、ピーク時のすべり量をどう定めるか、などの点でモデル化手法の検証を進める必要があると考えられる。

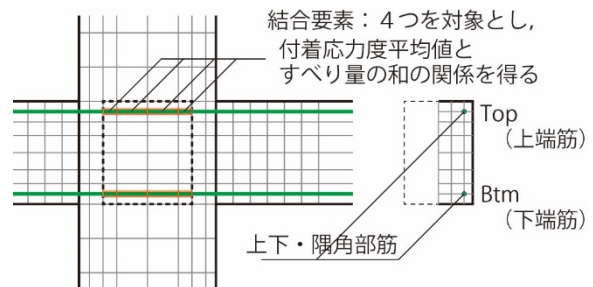


図-11(a) 付着応力度とすべり量の抽出要素

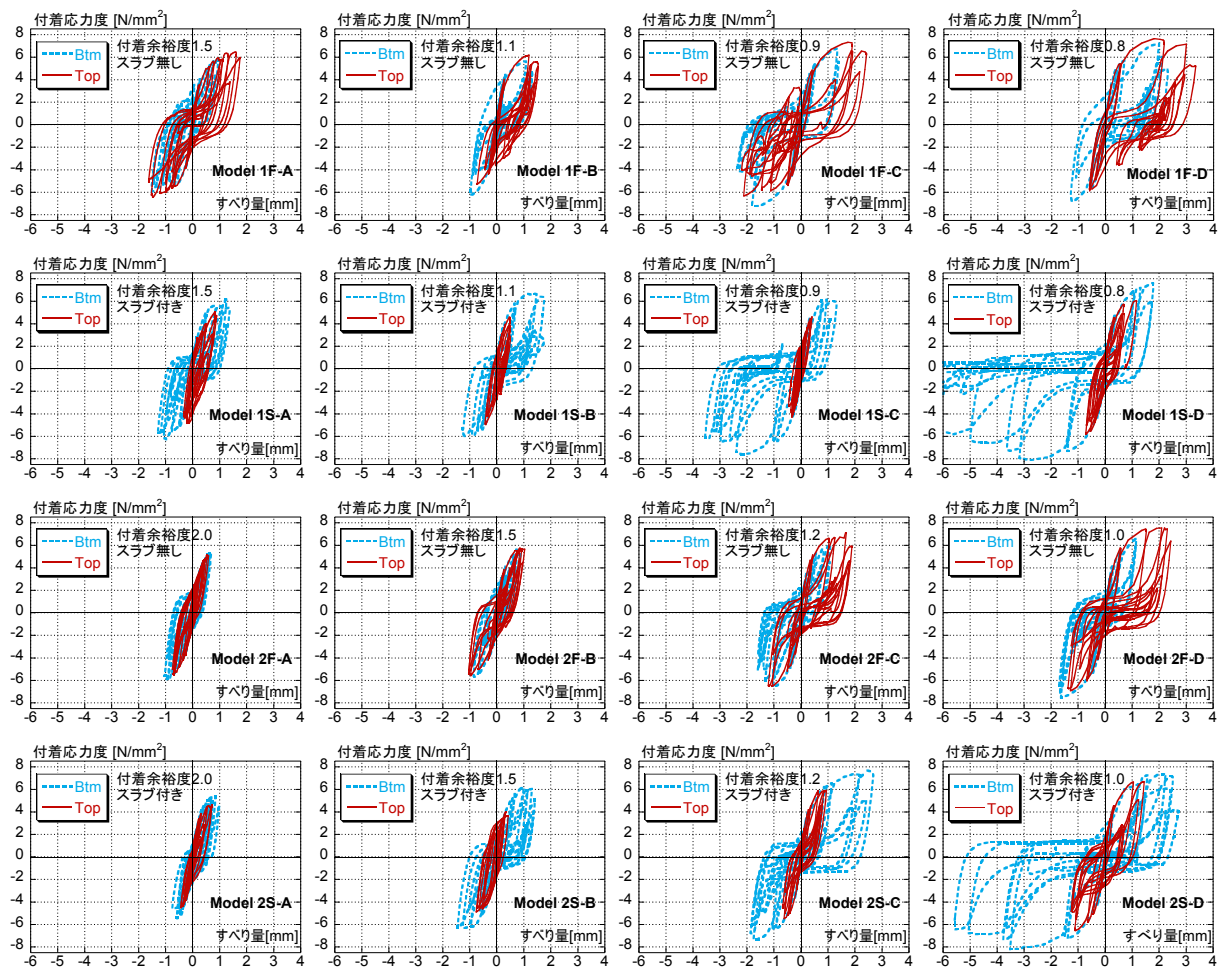


図-11(b) 通し主筋の付着応力度とすべり量関係 (Top:上端筋, Btm: 下端筋)

4. まとめ

十字型柱梁接合部部分架構を対象とした非線形 FEM 解析により、通し主筋の付着性状に関する分析を行った。特に、スラブの存在が梁主筋の付着性状に及ぼす影響を検討対象とし、通し主筋の付着余裕度を主な変動因子として、複数ケースの解析を行った。付着余裕度が大きくない場合に限らず、履歴性状は必ずしも良好ではなく、逆 S 字状の履歴となった。また、スラブの有無による履歴性状への影響は、比較的大変形時に表れることが確認された。さらに、通し主筋の付着応力度とすべり量関係を比較したところ、スラブ付き架構では、下端主筋において顕著な付着劣化が生じており、スラブのない架構において上下主筋が概ね同様に挙動する状況と大きく異なることが確認された。解析では、あらかじめ付着応力度～すべり

量関係を規定しており、その特性は全解析ケースで同一のものであるが、解析結果には大きく差が生じたことから、スラブの存在が影響することが示された。

鉄筋とコンクリート間の付着応力度～すべり量関係は、現状では通し主筋の付着強度や付着割裂強度などを用いて一律にモデル化される場合が多いが、妥当性を検証するとともに、必要に応じて実験等により実挙動をより詳細に把握し、モデル化するべきであると考えられる。

参考文献

- 1) 杉本訓祥, 増田安彦, 塩原等, 勝俣英雄, 福山洋, 壁谷澤寿一ほか: 縮小 20 層 RC 造建物試験体の長周期地震動による振動実験 (その 1 ~ 5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.653-662, 2013.08
- 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, 2015.03
- 3) 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 非直交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, 2003.09
- 4) 杉本訓祥, 増田安彦: 鉄筋コンクリート造柱梁接合部を含む部分架構の FEM 解析, 日本コンクリート

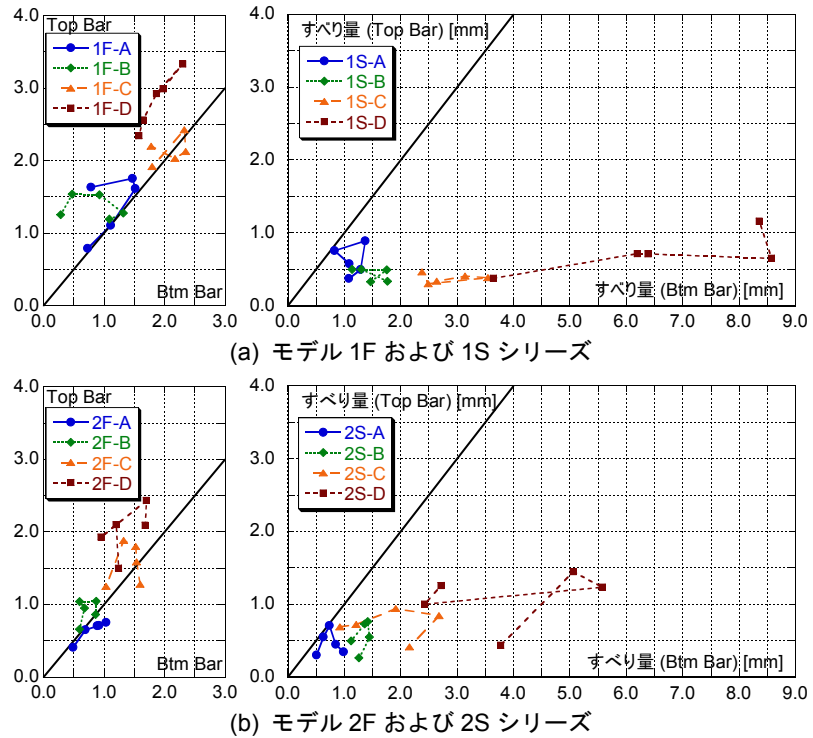


図-12 各サイクル ($R=1/50, 1/33, 1/25, 1/20, 1/16$) における
下端筋(Btm Bar)と上端筋(Top Bar)のすべり量最大値の比較

- 工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.205-210, 2014.07
- 5) 杉本訓祥, 増田安彦, 津田和明, 勝俣英雄: 鉄筋コンクリート梁部材の多数回繰返し載荷時の挙動, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.241-246, 2011.07
- 6) 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, 1995.08
- 7) 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, Oct. 1990
- 8) 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, Aug. 2004
- 9) 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
- 10) T. Takeda, M. A. Sozen and N. Nielsen: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Proceedings ASCE, ST21, pp.2557-2573, 1970.12