

論文 RC 造骨組内梁主筋の付着性状が骨組の挙動に与える影響に関する 3次元 FEM 解析

余 勇*1・柏崎 隆志*2・野口 博*3

要旨：北山，姜らが実験を行った梁主筋を通し配筋した RC 骨組（サ形）試験体と比較用の十字形柱・梁接合部試験体，さらに，実験が行われていない仮想試験体について，3次元 FEM 解析を行った。解析の結果は，実験結果より多少剛性が高いが，実験でも観察された梁主筋に沿って梁全長にわたって生じ付着劣化すること，柱に拘束された梁に発生する軸力などを解析的に確認した。また，梁主筋の付着耐力と中央梁スパンをパラメータとした仮想試験体について，梁内と接合部内の梁主筋の付着性状の相互の影響，および梁スパンが RC 骨組の付着性状へ与える影響について，FEM 解析により検討した。

キーワード：接合部通し配筋，骨組，十字形柱・梁接合部，付着，3次元 FEM 解析

1. はじめに

梁降伏先行型鉄筋コンクリート骨組内の梁主筋の付着特性は骨組の耐震性能に大きく影響する。通常の鉄筋コンクリート骨組では，梁主筋は柱・梁接合部および梁部材内を通して全スパンにわたって配筋される。梁主筋の接合部内での付着劣化と梁部材内での付着劣化は同時に発生し，両者は相互作用により，骨組の耐震性能に影響を与える。しかし，梁主筋の付着劣化に関しては，梁の反曲点で定着された十字形骨組を用いて接合部内梁主筋に対して，また，梁端部で主筋を十分定着された梁部材内鉄筋に対して実験的検討が行われてきた。

そこで，本研究では，RC 造骨組内梁主筋の付着性状が骨組全体の挙動に与える影響について解析的に検討する。北山，姜らが実験を行った試験体の一部を解析対象とし，また，実験が行われていない仮想試験体についても，解析を行い，総合的に検討した。

2. 実験対象試験体

北山，姜らが実験を行った骨組の梁主筋が接合部内と梁部材内を連続して配筋されるサ形架

構試験体と比較用の十字形柱・梁接合部，梁型試験体の形状を表 1 に示す。梁主筋の径と梁のスパン長さを試験体の実験変数とし，試験体は全部で 7 体である。試験体 L1, L2 の中央梁（クリアスパンは 2450mm）が長いので梁中央の主筋には付着滑りが生じないと予想され，梁主筋

表 1. 試験体形状

L1, L2	J1, J2
M1, M2	B

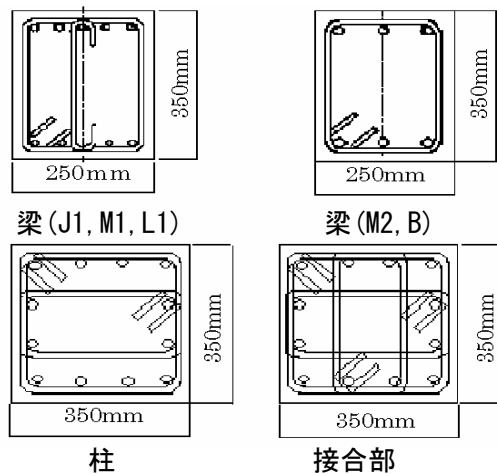


図 1. 試験体配筋詳細図

*1 千葉大学大学院自然科学研究科博士後期課程 工修（正会員）
 *2 千葉大学助手 工学部デザイン工学科 工修（正会員）
 *3 千葉大学教授 工学部デザイン工学科 工博（正会員）

の接合部のみでのすべりがRC骨組の力学性能に与える影響を検討する。試験体 M1, M2 の中央梁（内法寸法：1450mm）の主筋は滑動すると予想され、梁主筋の接合部でのすべりと梁中央での付着すべりが同時に発生することが骨組の性能に与える影響を検討する。試験体 J1, J2 は M1, M2 の中央梁の真中から切出したもので十字形を有する柱・梁接合部試験体である。部材の断面寸法および配筋を図 1 に示す。試験体は実大の約 1/2 スケールで、柱断面 350×350mm, 梁断面 350×250mm, 階高 1.72m とした。材料特性を表 2 に、各部材の配筋状況を表 3 に示す。

表 2. 各試験体コンクリート材料特性

試験体	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	最大応力時ひずみ(%)	初期剛性 (GPa)
L1,2,J1,2	45.1	3.14	0.24	3.42
B	44.5	3.35	0.25	3.37
M1,2	46.7	3.50	0.26	3.82

表 3. 各部材の配筋状況

試験体	鉄筋 (鉄筋比)				
	梁		柱		接合部 せん断補強筋
	主筋	せん断補強筋	主筋	せん断補強筋	
L1		3-D10			
M1	5-D16 (1.24%)	120mm 間隔 (0.71%)	12-D22 (3.79%)	4-D10 100mm 間隔 (0.71%)	6-D10 100mm 間隔 (1.07%)
J1					
L2	3-D22 (1.52%)	2-D10 120mm 間隔 (0.48%)			
M2					
J2					

3. 解析対象と解析方法

解析対象は完全付着とした J1MB、M1MB、L1MB 試験体と、付着劣化を考慮した J1B、M1B、L1B 試験体、及び仮想試験体 M3B、J1SB、M1SB の 9 体である (MB : Max Bond stress, B : normal Bond stress, SB : Small Bond stress)。実験は中央梁の圧縮域では付着劣化は顕著ではなかった。梁主筋と柱・梁接合部内部の梁主筋の付着劣化の相互の影響を検討するため、主筋の付着耐力と中央梁スパンをパラメータとして、仮想試験体を考えた。試験体 M3B は M1B の中央はりスパンを 850mm にした試験体、M1SB は M1B 試験体の各付着要素の τ_{max} を半分にした付着劣化型試験体である。

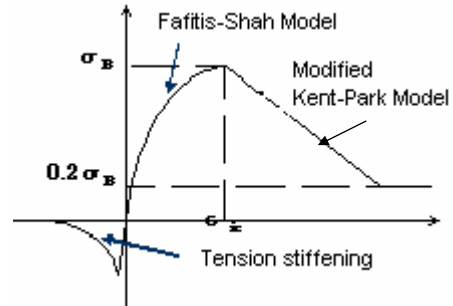


図 2. コンクリート要素の応力—ひずみ関係

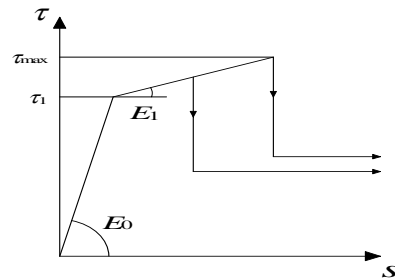


図 3. 付着要素の応力—すべり関係

3.1 要素と材料モデル

解析では内田、野口らにより開発された 3 次元 FEM 解析プログラム²⁾を用いた。コンクリート要素には図 2 に示すモデルを用い、鉄筋要素、及び鉄筋とコンクリート間の付着要素には図 3 に示すバイリニアモデルを用いた。解析におけるコンクリートと鉄筋の材料特性は実験時の材料特性を用いた。

野口の実験³⁾と森田らの実験⁴⁾では、部材（局所）の応力状態はその場所の局所付着性状に大きな影響を与えることが観察された。そのため、本解析では、J1B、M1B、M3B、L1B 試験体の付着要素を 4 種類に分けた。第 1 種類の接合部中央（コア内）の τ_{max} を 9.8MPa に（実験値は約 9.8MPa）、第 2 種類の接合部（かぶり）と梁の引張域の付着要素の τ_{max} を 1.96MPa に（実験値は約 1.96MPa）、第 3 種類の接合部（かぶり）と梁の圧縮域の付着要素の τ_{max} を 9.8MPa に（実験ではこの域の付着剛性の低下が顕著に見られない、 τ の最大値は約 5.88MPa）、第 4 種類の梁中央の付着要素の τ_{max} を 2.94MPa に（実験値は約 1.96~2.94MPa）設定した。

3.2 要素分割及び境界条件

例として M1B 試験体の要素分割及び境界条件を図 4 に示す。境界条件は実験に従い、

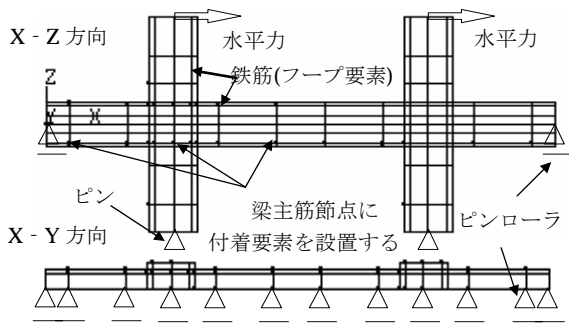
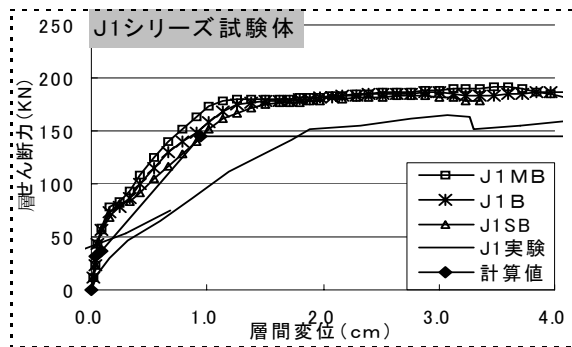


図4. 要素分割及び境界条件

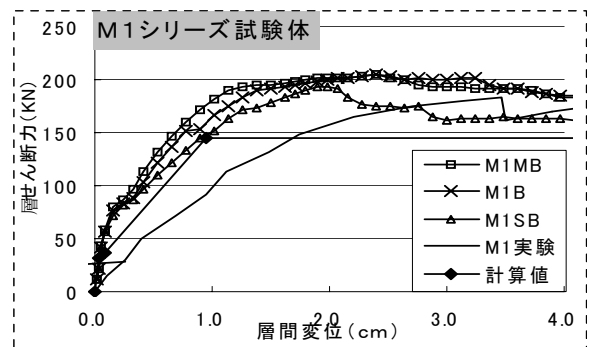
柱脚の中央線にピン、梁両端の水平中央線にピンローラ、試験体の対称性を利用し、試験体のX-Z中央面全部の節点のY方向にピンローラを設置し、柱頭の中央線にX方向の単調集中荷重を与えた。要素分割は主筋の位置に節点を配置することで決めた。要素数を減らし、解析時間を節約するため、接合部は細かめ、梁、柱のモーメントが大きくない部分は粗めに要素分割をした。付着要素を梁両端以外の全梁主筋節点に配置した。

4. 解析結果

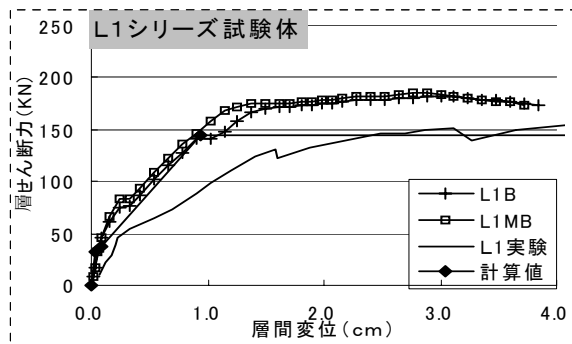
4.1 層せん断力-層間変位関係



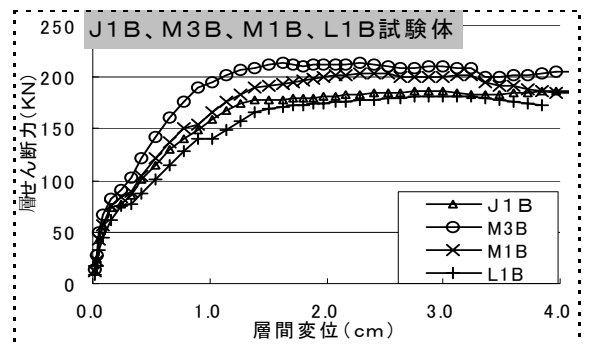
(a) J1 シリーズ



(b) M1 シリーズ



(c) L1 シリーズ



(d) J1B、M3B、M1B、L1B 試験体

図5. 各試験体解析結果の層せん断力-層間変位関係

図5に各試験体の解析結果と実験結果及び北山, 姜らによる予備計算結果の層せん断力-層間変位関係を示す。いずれの試験体の解析結果とも最初から解析の剛性が実験より高めとなり、剛性低下点(柱・梁接合部のせん断ひび割れ点)は実験よりやや高い。一方、解析結果は予備計算値の結果とほぼ一致している。

J1、M1、L1 シリーズの各試験体の解析結果の層せん断力-層間変位関係の最大層せん断力は大きな違いがみられない。主筋を完全にコンクリートに定着した J1MB、M1MB、L1MB 試験体、普通付着強度の J1B、M1B、L1B 試験体、付着強度を半分にした J1SB、M1SB 試験体の順に、剛性の解析結果は低下した、J1SB、M1SB 試験体は最大耐力後、付着劣化がかなり進んだため、耐力低下が他の試験体より早かった。付着劣化が最も進んだ M1SB 試験体の剛性と耐力が最も低いことがわかった。

サ形試験体では、ひび割れ発生後、中央梁で軸力が生じるため、接合部へのせん断力が十字形試験体より大きかった。

4.2 梁主筋ひずみ分布の検討

図6にJ1シリーズ試験体の解析結果と実験結果の梁主筋降伏時のひずみ分布を示す。また、図7にM1シリーズ試験体の解析結果と実験結果の梁主筋降伏時のひずみ分布を示す。図中の破線は実験値である。

J1シリーズでは、梁主筋を完全にコンクリートに定着したJ1MB試験体と普通付着強度のJ1B試験体は梁主筋の降伏点が違う（J1MB試験体は接合部外、J1Bは接合部内）以外、ほぼ同じ性状を示した。この梁主筋の降伏点が違う理由は接合部が強く補強されているため、コンクリート要素のひずみが小さく、コンクリート要素に定着されているJ1MB試験体の接合部内の梁主筋が大きく変形できないため接合部外で降伏した。それに対して、コンクリート要素と付着要素で接合されているJ1B試験体の接合部内の梁主筋はコンクリートとの間に滑りが発生

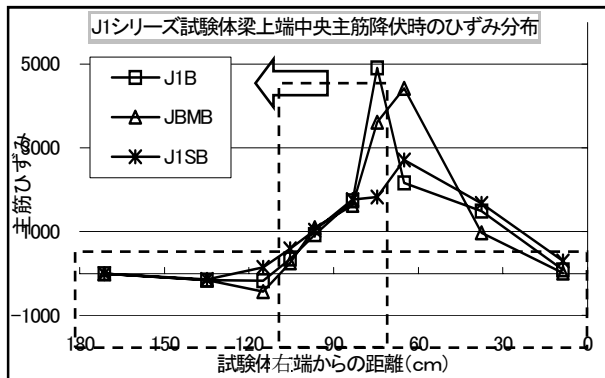


図6. J1シリーズ各試験体解析結果の梁主筋降伏時のひずみ分布

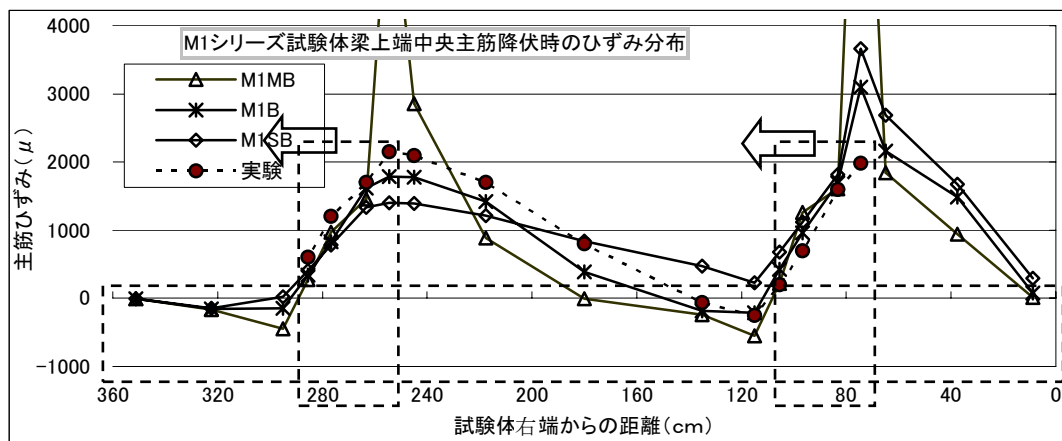


図7. M1シリーズ各試験体解析結果の梁主筋降伏時のひずみ分布

し、危険断面に近い接合部内で降伏が生じた。付着強度を半分にしたJ1SB試験体では、接合部及び梁の圧縮域でも梁主筋のひずみが正になり、逆に梁の引張域の梁主筋ひずみはほかの両試験体より小さくなっている。これは付着劣化が先行し、接合部内の梁主筋のひずみ分布が平均化したためと考えられる。

M1シリーズでは、中央梁の梁主筋のひずみが引張の範囲はM1MB、M1B、M1SBの試験体の順で大きくなった。M1B試験体の場合、実験、解析とも梁の圧縮域では主筋のひずみが正にならず、層間変位の増大に伴って負方向に増大し、そこで主筋定着されていると見なす。M1SB試験体の場合、中央梁の全域にわたって梁主筋のひずみが正である。左接合部の引張危険断面の主筋ひずみを中央梁における梁主筋に分担させ、左接合部引張危険断面の主筋ひずみの最大値は右接合部引張危険断面の主筋ひずみの最大値より小さくなった。この傾向は付着力が小さければ小さいほど、顕著になる。梁スパンを短くしたM3B仮想試験体の場合でも、中央梁の全域にわたって、梁主筋のひずみが正であり、両接合部内梁主筋の最大ひずみの差もM1SB試験体と類似していた。

L1シリーズでは、中央梁スパンが長い場合、梁主筋が中央梁で定着され、左、右接合部内主筋ひずみの差が顕著に現れなかった。

3シリーズとも主筋を完全にコンクリートに

定着した試験体主筋の降伏時のひずみが他の試験体より大きい。解析ステップの間隔も原因となるが、主筋を完全

にコンクリートに定着した試験体の主筋ひずみは降伏点に集中するのが主な理由と考える。

J1B、M3B、M1B、L1B 試験体の解析結果の梁主筋降伏時のひずみ分布を比較した。L1B 試験体はほぼ J1 試験体と同じ性状を表し、両側接合部の主筋ひずみの最大値には差がない。M1B、M3B 試験体では両側接合部の梁主筋ひずみの最大値には差がある。中央梁スパンが短ければ、短いほどこの傾向が大きい。

解析試験体の主筋ひずみ分布は実験結果と良く対応している。但し、中央梁の主筋ひずみは実験の方が解析より大きい。その理由は解析において梁中央の付着要素の τ_{max} に実験値の大

きい方を用いたことによる。

4.3 試験体最小主応力状態についての検討

Park と Paulay⁶⁾が提案した接合部せん断抵抗機構を図8に示す。接合部に隣接する柱・梁部材の圧縮域間を結ぶ対角線上の斜めコンクリート圧縮材を介して応力を伝達するコンクリート圧縮ストラット機構と縦横両方向鉄筋の付着応力と部分的な斜めコンクリート圧縮材を介して応力を伝達するトラス機構の組み合わせで接合部のせん断抵抗機構を考えたものである。上村ら⁷⁾の実験では、圧縮合力が付着良好な場合には、主なるストラット域外にも伝達されるが、付着不良の場合には、ストラット域に集中することを確認した。

例として、M1シリーズの最大耐力時の最小主応力分布及びその時の試験体変形を図9に上から主筋が完全にコンクリートに定着されているM1MB試験体、普通付着耐力のM1B試験体、M1B試験体の付着耐力を半分にしたM1SB仮想試験体について示す。付着耐力が最も大きいM1MB試験体では、接合部内の主筋が滑らないので、せん断応力がストラット域外にも伝達され、その範囲は3つの試験体の中で最も広い。逆に付着耐力が最も小さいM1SB試験体では、接合部内の主筋がかなり付着劣化したため、圧縮応力がせん断力ストラット域に集中し、接合部内の範囲は3つの試験体の中で一番狭い。付着耐力が中間であるM1B試験体の全体応力状態は以上の両試験体の中間状態である。中央梁で付着劣化が進んだ場合、梁中央で梁主筋が滑る。極端な場合には、梁全長にわたって、梁主筋が付着劣化し、梁上下の主筋付着力が梁全域で反対方向になり、中央梁でせん断力が生じる。そのせん断力によって生じたモーメントが試験体の耐力にも影響を与える。

J1シリーズ、L1シリーズの各試験体の接合部の応力状態もM1シリーズと同じ傾向を示した。但し、J1シリーズの各試験体は接合部両側の端部で主筋が定着され、L1シリーズの各試験体中

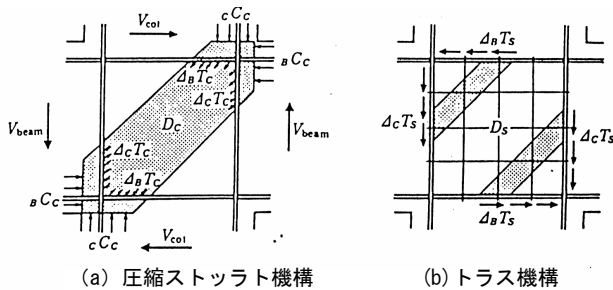


図8. 接合部せん断抵抗機構

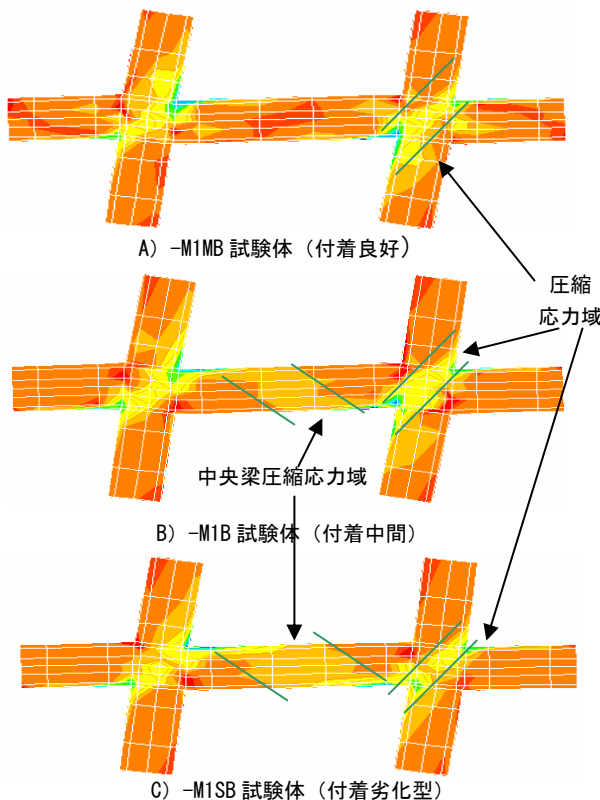


図9. 最大耐力時コンクリートの最小主応力と変形状態

中央スパンが長いので、中央梁の斜めの圧縮応力域が顕著ではない。

J1B、M1B、M3B、L1B 試験体の最大耐力時の最小主応力分布及びその時の試験体変形については、中央梁主筋と接合部の梁主筋との相互の影響により両側の接合部の梁主筋ひずみが違うため、中央梁へのせん断力も違う。接合部での梁主筋の付着劣化は、M3B 仮想試験体、J1B、M1B、L1B 試験体の順になっている。梁主筋の劣化が最も進んでいる梁スパンの短い M3B 試験体では、中央梁主筋の接合部内主筋への影響も一番大きい。中央梁へのせん断力も最も大きい。

4.4 中央梁で生じる軸力についての検討

サ形試験体の中央梁は両側の柱に拘束されているため、ひび割れの発生に伴って軸力が生じる。そのため両側の柱上下のせん断力が異なる。その差は中央梁の軸力であることが実験で観察された。L1、M1 試験体の中央梁の最大軸力は 205.8kN 位であった。解析でも、同じ現象が確認された。この現象はサ形試験体の柱上下の応力状態が違う要因である。図 10 に M1B、L1B 試験体柱上下のせん断力を示す。

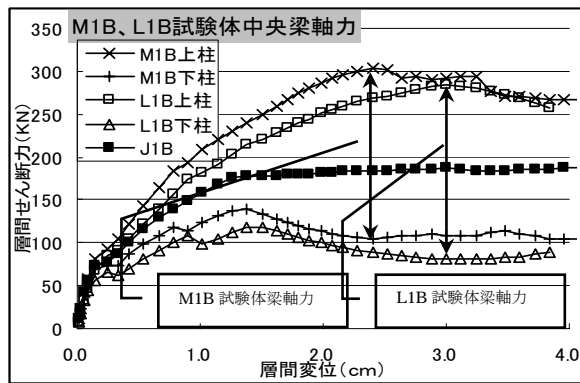


図 10. M1B、L1B 試験体柱上下のせん断力

5. まとめ

RC 造骨組内梁主筋の付着性状が骨組の挙動に与える影響に関する 3次元 FEM 解析を行い、実験結果と比較し、解析結果の分析を行った。その結果、以下の結論を得た。

1) 十字形接合部試験体、サ形架構試験体全部

で 9 体解析を行い、実験結果と比較すると $Q-\delta$ 関係の剛性以外、比較的精度良く評価できた。

2) 引張、圧縮応力を受ける部材の付着特性を分類して検討し、梁主筋が接合部内と梁部材内を連続して配筋される骨組の梁主筋の付着劣化挙動を再現できた。

3) 中央梁の長さや付着応力の大きさをパラメータとした仮想解析試験体の解析により、実験では検討できなかった梁主筋と柱・梁接合部内の主筋の付着劣化の相互の影響を検討した。その結果は Park と Paulay が提案した接合部せん断抵抗機構と良く対応した。

4) 梁主筋の付着劣化及び梁ひび割れ後に生じる軸力の影響で、十字形接合部試験体は架構の中での十字形接合部のせん断荷重下の挙動が異なることを FEM 解析によって明らかにした。

【謝辞】

東京都立大学・北山和宏助教授、姜柱博士には、貴重な研究論文を提供して戴き、ここに記して感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 姜柱：鉄筋コンクリート柱・梁接合部と梁部材を通した主筋の付着特性に関する研究 東京都立大学博士論文 1997.3
- 2) 内田和弘：非線形有限要素によるハイブリッド構造の弾塑性性状に関する解析的研究 千葉大学学位論文 1999.1
- 3) 野口博：鉄筋コンクリート柱の力学的挙動に関する研究(その1, その2) 日本建築学会論文報告集第233号 pp83~93, 1975.7
- 4) 森田司郎, 山田 稔明, 藤井 栄, 村上 秀夫：接合部内の主筋の通し配筋定着性能 高強度鉄筋分科会付着・定着WG研究成果報告書 pp61-80 1993.3
- 5) 姜, 北山他：鉄筋コンクリート骨組内の梁通し筋の付着特性に関する研究 コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 17, No. 2 1995年
- 6) T. Park, R. Paulay : 「Joints in Reinforced Concrete Frames Designed for Earthquake Resistance」 a Report Prepared for a U.S.-New Zealand -Japan Seminar
- 7) 上村智彦他：鉄筋コンクリート内部梁・柱接合部の破壊機構に関する研究(その1, その2, その3) 日本建築学会学術講演梗概集(近畿) 1987年