

論文 繰返し載荷を受ける RC 造柱梁接合部の履歴性状の解析精度に関する研究

早坂 香苗*1・田嶋 和樹*2・長沼 一洋*3

要旨：繰返し載荷を受ける RC 造柱梁接合部の損傷・エネルギー吸収能の予測のため、有限要素法を用いて解析を行った。しかし、柱梁接合部が繰返し載荷を受ける際に現れる、エネルギー吸収能が劣化するスリップ現象の再現が不十分であった。そこで、スリップ現象の再現精度を向上するため各材料モデルの除荷時剛性に着目し、コンクリートの圧縮側履歴特性、ひび割れ後のせん断伝達特性、鉄の繰返し応力下の履歴特性、付着応力—すべり関係をそれぞれ変化させた感度解析を行い、それらが RC 造柱梁接合部の履歴性状に及ぼす影響を調べた。

キーワード：三次元 FEM 解析, スリップ型応答, エネルギー吸収能, 除荷時剛性

1. はじめに

鉄筋コンクリート造（以下、RC 造）柱梁接合部の耐震性能に関して、接合する他の部材よりも破壊が遅れて発生し、損傷が集中しないことが求められている。この耐震性能の把握のために接合部の損傷とエネルギー吸収能の正確な予測が必要である。既往の実験より、損傷・エネルギー吸収能には多くの影響因子があり、複雑に組み合わせ影響し合っていることが報告されている。このため、実験だけで全ての影響因子を抽出し、接合部に関する損傷・エネルギー吸収能を検討することには限界がある。そこで、三次元 FEM 解析により詳細に検討することができれば、損傷低減とエネルギー吸収能の向上に貢献できると思われる。

繰返し載荷を加えた RC 造柱梁接合部の解析精度は十分とは言えず、特にエネルギー吸収能が低下するスリップ現象の再現が不十分であることが分かっている。本報は解析精度向上に向けて、特にスリップ現象の再現を行うため、影響要因と考えられる除荷時剛性に着目し、それが柱梁接合部の履歴性状に及ぼす影響を調べた。

2. 解析概要

2.1 解析対象試験体の概要

塩原らの実験¹⁾より、柱の曲げ強度に対する梁の曲げ強度の比（柱梁曲げ強度比）をパラメータとした B シリーズ 3 体を対象とした。図-1 及び表-1 に試験体概要及び試験体配筋図を示す。試験体は 1/3 スケールで、柱、梁の反曲点位置で切り出した十字型柱梁接合部試験体である。

図-2 に加力装置の概要を示す。加力は軸力を加えな

表-1 試験体概要¹⁾

試験体	B02	B05	B06
コンクリート強度(Mpa)	29.0		
梁			
スパン(mm)	1400		
引張鉄筋	5-D13		
引張鉄筋比	1.22		
柱			
スパン(mm)	1400		
引張鉄筋	5-D13	5+2-D13	5+5-D13
引張鉄筋比	1.22	1.80	2.67
接合部			
横補強筋	□-D6×2		
横補強筋比	0.28		
柱梁曲げ強度比	1.00	1.35	1.77

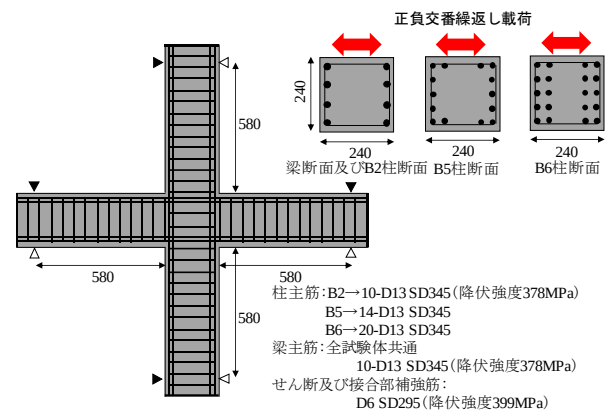


図-1 試験体配筋図¹⁾

い状態で、両端ピン接合の柱より支持された上部加力梁の南端に油圧ジャッキにより水平力を加え、加力フレームに水平力を生じさせることで、地震時における架構の変形を生じさせている。

2.2 試験体のモデル化

本報では図-3 に試験体の要素分割図を示す。試験体の対称性を考慮して奥行き方向に半分に割った1/2モデル

*1 日本大学 理工学部建築学科 (学生会員)

*2 日本大学 理工学部建築学科准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 日本大学 理工学部建築学科教授 博士 (工学) (正会員)

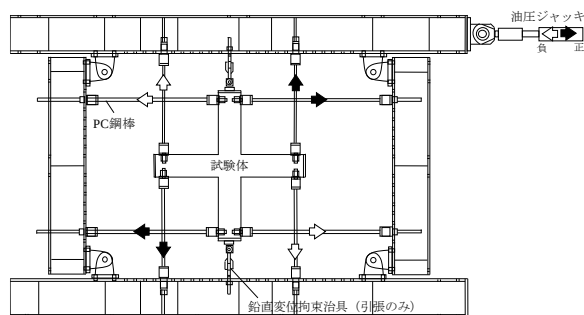


図-2 加力装置の概要¹⁾

ルとした。境界面においては Y 方向の水平及び X, Z 方向の回転を拘束した。また、柱脚は中央の一例を固定、柱頭及び梁端はローラー支持となるように Y, Z 方向の水平および X, Y, Z 方向の回転を拘束した。コンクリート及び柱頭、柱脚、梁端の鋼板を六面体要素で、主筋、帯筋はトラス要素でモデル化した。また、コンクリートはかぶりコンクリート、コアコンクリート、試験装置に接続する部分のコンクリートに分けてモデル化を行った。主筋とコンクリート間には界面要素を入れ、付着すべりを考慮した。

2.3 各種材料構成例

図-4 にコンクリートの応力-ひずみ関係を示す。圧縮側は修正 Ahmad モデル²⁾また圧縮軟化後には要素寸法依存性を考慮した Nakamura-Higai モデル³⁾を採用した。引張側は長沼・山口のモデル⁴⁾、ひび割れ後のせん断伝達特性には長沼の提案モデル⁵⁾を採用した。また、コンクリートの履歴則は文献(6)を参照にした。図-5 に鉄筋の応力-ひずみ関係を示す。鉄筋は Bi-linear 型モデルとし、降伏後の剛性は初期剛性の1/100とした。また、繰返し応力下の履歴特性は直線モデルとした。図-6 に付着応力-すべり関係を示す。付着強度及び付着強度時のすべりは靱性保証型耐震設計⁷⁾から算出し、付着応力-すべり曲線は Naganuma らのモデル⁸⁾を採用した。

3. 解析結果

3.1 層せん断力-層間変形角関係

図-7 に層せん断力-層間変形角関係の実験値と解析結果を示す。2つの結果を比較すると、試験体 B02, B05 は耐力・履歴性状の大まかな傾向を再現できた。B06 において、層間変形角 1.5%, 2.0%の加力サイクルでは耐力が小さいが履歴性状は再現できている。B02, B05 は層間変形角 2.93%, B06 は-2.93%で最大耐力に達した。しかし、実験では 1.5~2.0%で最大耐力に達しており、この違いについては今後検討が必要である。

図-8 には試験体 B02 における各加力サイクルの実験と解析の層せん断力-層間変形角関係を示す。図中に示す等価粘性減衰定数は、1 サイクル分のエネルギー吸収

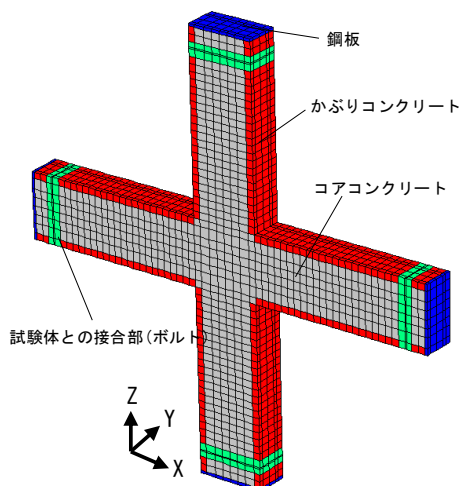


図-3 要素分割図

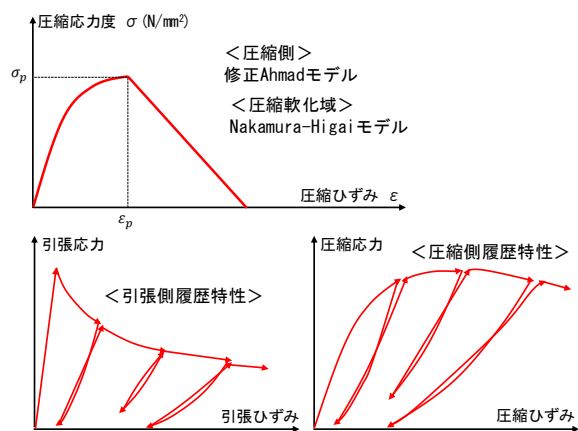


図-4 コンクリートの応力-ひずみ関係

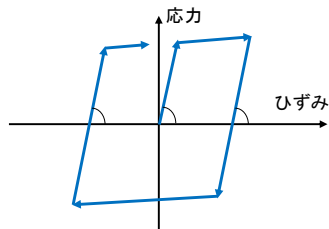


図-5 鉄筋の応力-ひずみ関係

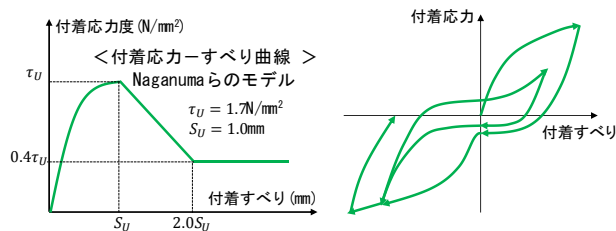


図-6 付着応力度-付着すべり関係

量と等価剛性による弾性ひずみエネルギーの正負の平均値により算定した。実験においては層間変形角が大きくなるに従い、履歴特性がスリップ型になっていることが分かる。しかし、解析ではこのスリップ型の履歴特性を十分に再現することはできなかった。等価粘性減衰定数を比較すると、解析結果は全てのサイクルにおいて類似した値となっており、実験より小さい値となった。この

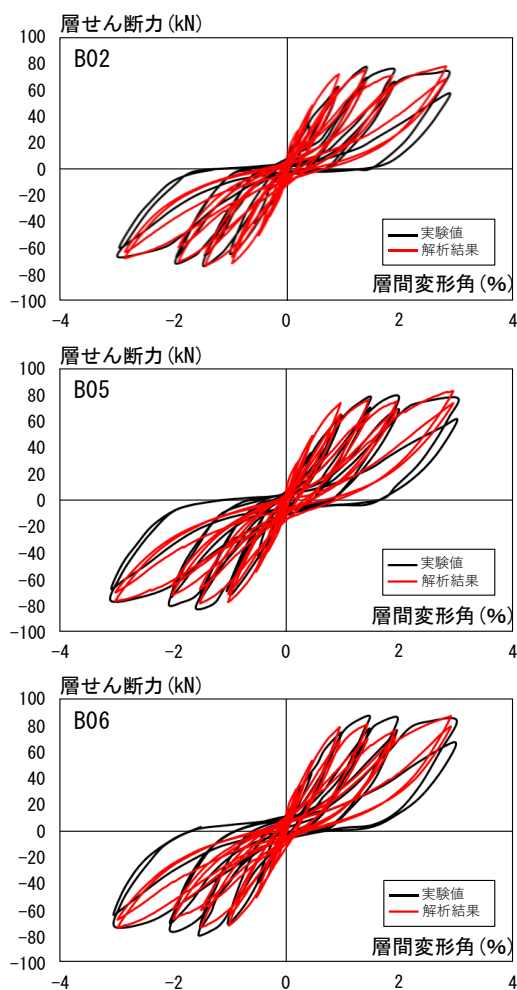


図-7 層せん断力(kN)-層間変形角(%)関係

原因には、各材料の応力-ひずみ関係における除荷曲線の剛性（除荷時剛性）の影響と考えられる。

3.2 エネルギー吸収量

図-9 に各加力サイクルにおける履歴ループが描く面積（エネルギー吸収量）及びその低下率の比較を示す。エネルギー吸収量の比較を行うため、同じ変形角を2回与えている加力サイクルを対象に1回目と2回目サイクルのエネルギー吸収量（kN・mm）より、低下率を算出した。実験では1回目に対する2回目のエネルギー吸収量は約15～30%低下した。一方、解析結果では35～50%と実験結果よりも大きなエネルギー吸収量の低下が見られた。しかし、エネルギー吸収量だけを比較したとき、解析結果の方が実験よりも全体的に大きくなったため一概に低下率だけを比較することはできず、さらに詳細な検討が必要である。

3.3 損傷・破壊性状

図-10 に解析による最大耐力時の各試験体のひび割れ性状を示す。全試験体においてコンクリートは梁、柱、接合部の順番で圧壊し、柱と接合部コンクリートはほぼ同時に圧壊する結果となった。また、鉄筋の降伏状態は

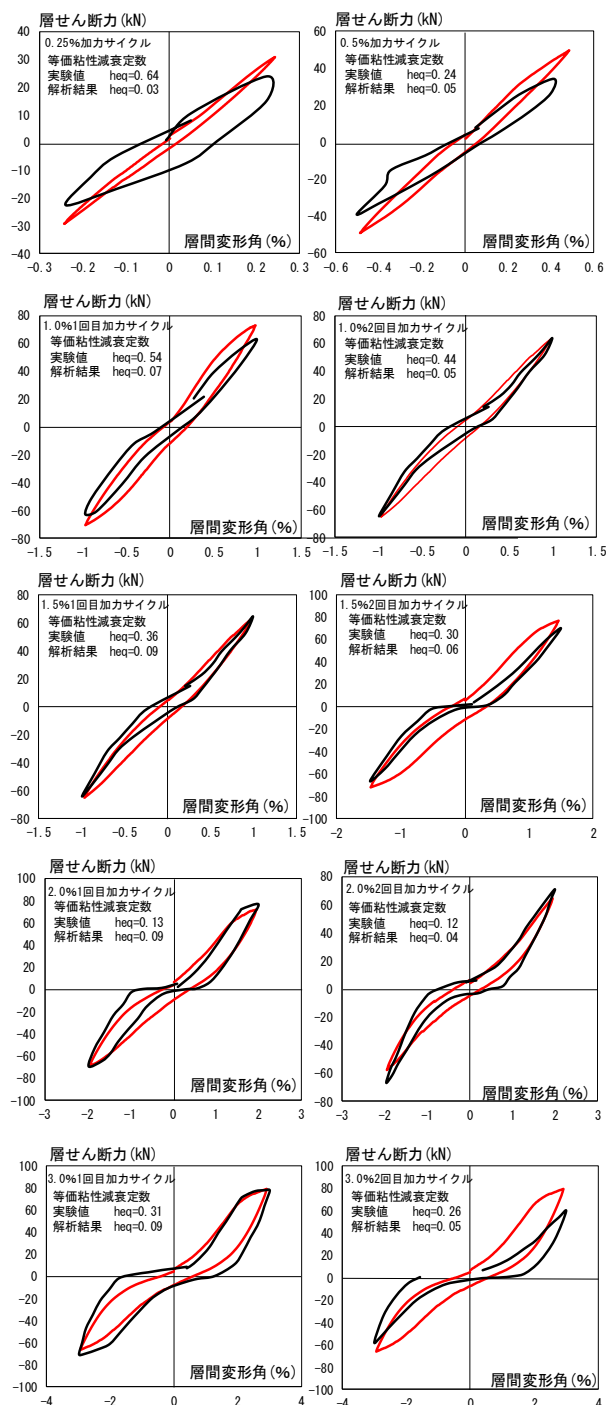
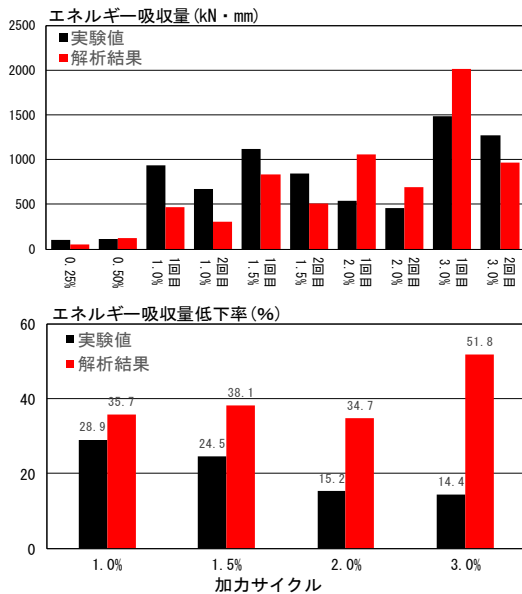


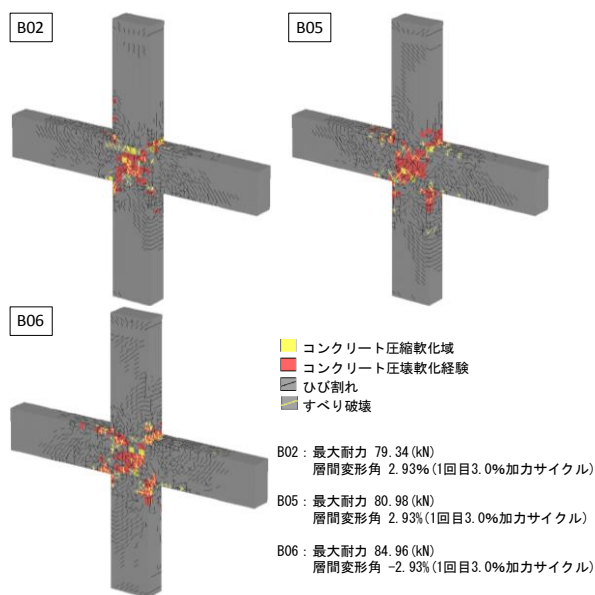
図-8 試験体 B02 における各加力サイクルの層せん断力-層間変形角関係

梁主筋が層間変形角 0.5%加力サイクルで降伏、その後 1.0%で接合部横補強筋が降伏、最後に 2.0%加力サイクルで柱主筋の降伏が発生した。柱主筋の降伏は柱梁曲げ強度比が大きくなると降伏する層間変形角が大きくなる結果となり、実験での挙動とも概ね対応した。最大耐力時のひび割れを比較すると、B05 が他の試験体と比べて接合部に損傷が集中している。また、B02 は柱にひび割れがほとんど発生していない。

解析において、コンクリートの圧壊、鉄筋の降伏は概



図－9 各加力サイクルにおけるエネルギー吸収量・低下率の比較



図－10 最大耐力時における各試験体のひび割れ性状

ね実験と対応する結果となった。破壊性状としては、接合部コンクリートの圧壊が広範囲に広がる前に梁主筋が降伏しているため梁(柱)主筋降伏後の接合部破壊(BJ型)と推測される。しかし、実験ではB06の柱主筋が未降伏であったこと、加力終了時のひび割れ性状において柱梁曲げ強度比による違いなどを解析で十分再現できなかった。解析において破壊が顕著になると計算が不安定になる傾向もあることから、最終加力までの損傷の再現は今後の課題である。

4.履歴特性に関する検討

4.1 除荷時剛性に関する影響を及ぼす因子

繰返し载荷を受ける柱梁接合部の履歴特性に関して、前章で述べたようにスリップ型の履歴の再現が十分でないことが問題と考えられる。そこで、試験体B02のモデルを基準とし、以下に示す4つの因子が除荷時剛性と履歴性状に与える影響について検討を行った。

(1) コンクリートの圧縮側履歴特性

図－11にコンクリートの圧縮側履歴特性の概要を示す。コンクリートの圧縮応力下における履歴特性について、除荷後に応力が零となる点のひずみ ε_z はKarsanら⁹⁾の提案式より圧縮強度到達時のひずみ及び除荷開始点のひずみ ε_P 、 ε_E で式(1)のように表される。また、 ε_E が大きくなると ε_P が負の値となってしまうため $4\varepsilon_P$ を超える場合は、式(2)で表される⁷⁾。

$$\varepsilon_z = \left[0.145 \left(\frac{\varepsilon_E}{\varepsilon_P} \right)^2 + 0.127 \left(\frac{\varepsilon_E}{\varepsilon_P} \right) \right] \varepsilon_P \quad (1)$$

$$\varepsilon_z = \left(\frac{\varepsilon_E}{\varepsilon_P} - 1.172 \right) \varepsilon_P \quad (|\varepsilon_E| \geq 4|\varepsilon_P|) \quad (2)$$

今回の検討では、除荷時剛性を初期剛性と仮定し、そのまま応力が零になるひずみまで除荷させるように変更し、履歴性状への影響を調べた。

(2) コンクリートのひび割れ後のせん断伝達特性

図－12にコンクリートのひび割れ後のせん断伝達特性の概要を示す。分布ひび割れモデルにおけるひび割れ方向のせん断応力－せん断ひずみ関係において、除荷開始点のひずみ γ_D と除荷後に応力が零になる点のひずみ γ_F の関係は式(3)で表される⁷⁾。

$$\gamma_F = 0.5\gamma_D \quad (3)$$

(3)式の係数0.5を0.8に変えることで除荷時剛性への影響を検討した。この係数に関して、長谷川ら¹⁰⁾は高強度コンクリートを使用した部材の解析において係数を0.8にすることで解析値が実験結果と良好に対応することを報告している。今回の試験体は普通コンクリートを使用しているが履歴性状への影響があると考え、検討を行った。

(3) 鉄の繰返し応力下の履歴特性

基準モデルにおいて鉄の繰返し応力下の履歴性状を直線モデルとしたが、修正Menegotto-Pintoモデル(曲線モデル)¹¹⁾に変更することで、図－13に示すような除荷曲線の形が変化し、除荷時剛性の変化も見られると考え、検討を行った。

(4) 付着の応力－すべり関係

図－14に示すように、付着強度時のすべりと除荷後に応力が零となる点のすべりの関係は、除荷時剛性は初期剛性が大きくなるほど、また付着強度時のすべりが小さくなるほど大きくなる。図－14の付着の履歴性状のような除荷時剛性が大きい実線の曲線にするために、今回は

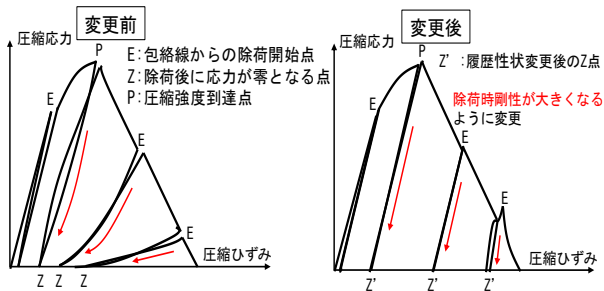


図-11 コンクリートの圧縮応力下の履歴特性の変更点の概要

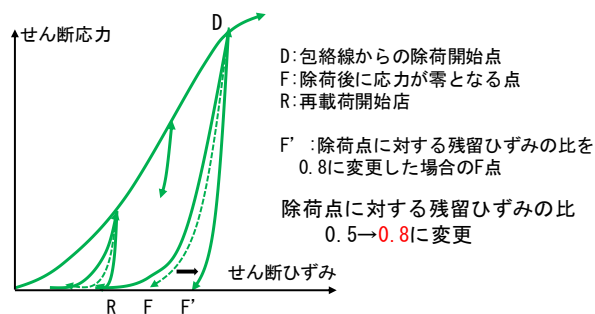
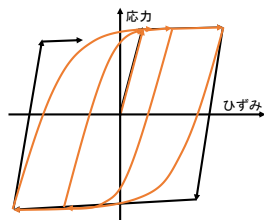


図-12 コンクリートのひび割れ後のせん断伝達特性の変更点の概要



修正Menegotto-Pintoモデルに変更

図-13 鉄の繰返し応力下の履歴特性(曲線モデル)

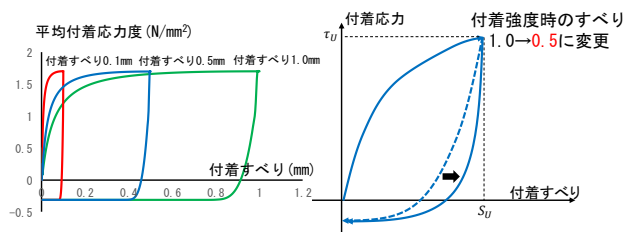


図-14 付着の履歴特性の変更点の概要

基準モデルでの付着強度時のすべり 1.0mm を 0.5mm に変更することで、履歴性状への影響を調べた。

4.2 検討結果

図-15 に各因子の特性を変えた解析結果を示す。基準モデルと比較すると、耐力が少し上昇し実験値に近づくモデルもあったが、各因子を変えた場合の履歴性状にほとんど変化が見られなかった。コンクリートの圧縮履歴特性を変更したモデルを実験値と比較すると層間変形

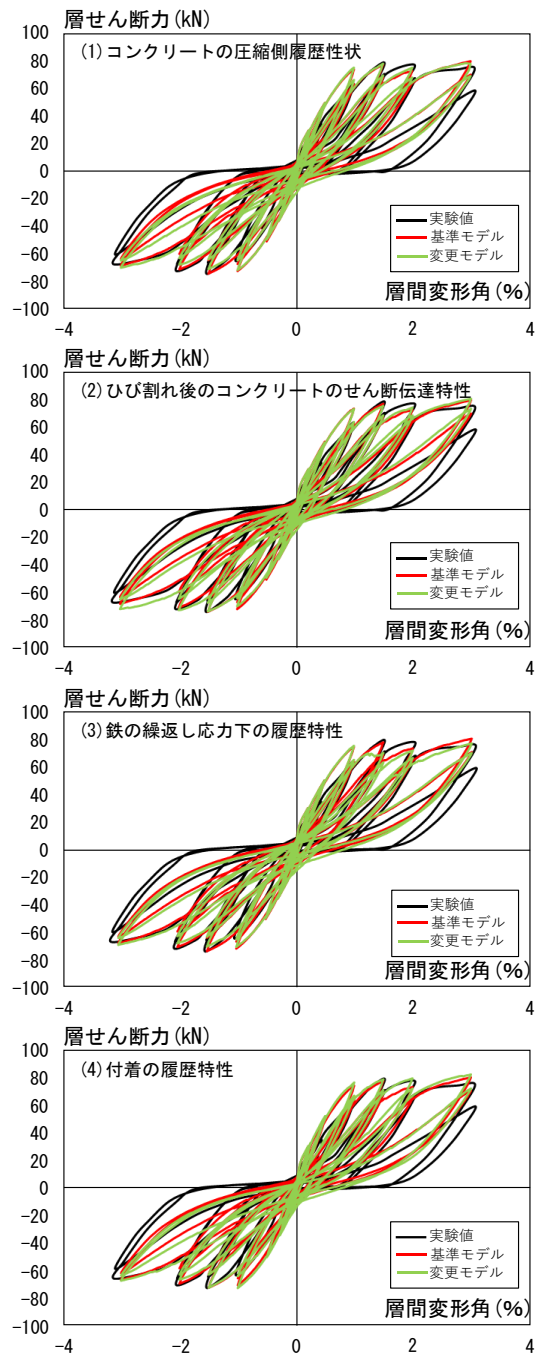


図-15 除荷時剛性に関する検証の解析結果

角 2.0% 加力サイクルにおいて、除荷曲線が少し実験結果に近づき除荷時剛性が大きくなったように見えるが、他と比べてもほとんど変化はなかった。鉄の履歴性状を変えた場合では、基準モデルよりも除荷時剛性は層間変形角が大きくなるに従い、若干小さくなる結果となった。これらの検討より、上述した 4 つの因子は履歴性状及び除荷時剛性に大きな影響を与えないことが明らかになった。

RC 造柱梁接合部のスリップ現象に関して既往の研究では、梁通し主筋の付着劣化が大きな要因とされているが、今回の検討では付着強度時のすべり量及び付着すべ

りの履歴特性を変化させたただけなので、今後は付着強度の違いや付着強度に到達した後の劣化特性に関する検討が必要である。

以上の結果を踏まえ、この他に考えられる要因として2つ挙げられる。1つは試験体と試験装置の間に生じる摩擦力の影響である。軸力を与えた状態で接合部に正負交番繰返し載荷を加えた場合、試験体と試験装置間に摩擦力が発生し、層せん断力の一部が摩擦力によって吸収される可能性がある。摩擦がどれ程影響するかは分からず、今後、摩擦の履歴性状及び他試験体を用いた解析による摩擦の試験体への影響を検証の必要がある。しかし、今回解析した試験体は軸力がないので摩擦力による影響はないものと考えられる。

もう1つの要因は、時間の経過で進行する変形（ここでは、遅れ変形と呼ぶ）による影響である。実験において、試験体の損傷状況の観測のため、ある一定の荷重で止めて、維持する時間が発生する。このとき、内部で損傷が進み、遅れ変形が生じることで、荷重が低下する。これらにより、除荷時剛性が見かけ上大きくなるのではないかと考えられる。

しかし、遅れ変形は載荷に要する時間や一定の荷重で載荷を止めている時間によって変わると考えられ、それを解析で考慮することは現時点では難しい。過去の実験より、載荷速度による変形性状の違いなどの遅れ変形についての調査が必要である。

5. まとめ

本報では、繰返し載荷を受ける RC 造柱梁接合部の三次元 FEM 解析による、履歴性状の解析精度向上を目的として、除荷時剛性に着目し、検討を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 繰返し載荷を受ける RC 造柱梁接合部の FEM 解析を実施した結果、耐力・履歴性状については実験と良好に対応した。しかし、層間変形角が大きくなるに従い、実験で発生するスリップ型の履歴性状の再現性は十分ではなかった。
- (2) スリップ型の履歴性状の影響因子と考えられる除荷時剛性に着目し、コンクリートの圧縮側履歴性状、せん断伝達特性、鉄の履歴特性、付着の履歴特性についてそれぞれ感度解析を行った。その結果、これらはいずれも履歴性状に対して影響が小さいことが分かった。

今後は付着性状の違いや、試験装置の摩擦が履歴性状に及ぼす影響について検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 楠原文雄, 塩原 等, 田崎 渉, 朴星勇: 柱と梁の曲げ強度の比が小さい鉄筋コンクリート造十字形柱梁接合部の耐震性能, 日本建築学会構造論文集, 第 75 巻, 第 656 号, pp.1873-1882, 2010.10
- 2) 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
- 3) Nakamura. H, 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, 1999.10.
- 4) 長沼一洋, 山口恒雄: 面内せん断応力下におけるテンションスティフニング特性のモデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp.649-650, 1990.10
- 5) 長沼一洋: 鉄筋コンクリートの壁状構造物の非線形解析手法に関する研究 (その 1), 日本建築学会構造系論文報告集, 第 421 号, pp.39-46, 1991.3
- 6) 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, 1999
- 7) 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, August., 2004.
- 8) 長沼一洋, 大久保雅章: 繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル. 日本建築学会構造論文集, 第 536 号, pp135-142, 2000 年 10 月
- 9) Karsan, I. D., Jirsa, J. O. : Behavior of Concrete Under Compressive Loading, Journal of the Structural Division , ASCE, Vol.95, No.ST12, pp.2543-2563, Dec.,1969.
- 10) 長谷川了一, 大泉康平, 香取慶一, 篠原保二, 林 静雄: 100N/mm²を超える高強度コンクリートのひび割れ面におけるせん断伝達挙動に関する研究 (その 3) 構成側の提案, 日本建築学会大会梗概集 (北海道), 2004.9
- 11) Ciampi, V, et al. : Analytical Model for Concrete Anchorages of Reinforcing Bars Under Generalized Excitations, Report No. UCB/EERC-82/23, Univ. of California, Berkeley, Nov.,1982.