

論文 鉄筋コンクリート梁部材の多数回繰返し載荷時の挙動

杉本 訓祥*¹・増田 安彦*¹・津田 和明*¹・勝俣 英雄*¹

要旨：近年，超高層建物への影響が懸念されている長周期地震動に対する耐震性能を検証するため，鉄筋コンクリート造の短スパン梁部材を対象とした多数回繰返し載荷実験を実施した。試験体は，プレキャストによる部材の接続を想定して，スパン内に主筋の機械式継手を配置した。実験により，補強量の多少の影響から，限界変形が変化する傾向が見られたが，多数回繰返しにより大幅に限界変形が小さくなるなどの影響は見られなかった。さらに，実験を対象とした非線形 FEM 解析を実施した。FEM 解析では，多数回繰返し載荷による耐力低下傾向など，実験結果を精度良く評価できた。

キーワード：プレキャスト，長周期地震動，非線形 FEM 解析

1. はじめに

近年，発生が予想されている海溝型巨大地震により，首都圏や大阪，名古屋などの大都市の超高層建物が長周期地震動を受ける懸念が高まりつつある。超高層鉄筋コンクリート造建物については，そのような外力に対する性能を評価する目的で，各部材の多数回繰返し外力に対する性能確認実験や解析的検討が行われている^{1), 2)}。鉄筋コンクリート造建物は，梁降伏先行型とすることが一般的であるため，特に標準的なスパンの梁部材については，曲げ降伏後の靱性能の検証を目的とした多数回繰返し載荷実験は行われており，多数回繰返しによる耐力低下はあまり生じないなどの結果が報告されている例もある¹⁾。一方で，コンクリートのせん断，付着に対する応力条件が厳しくなる傾向にある短スパン部材についての検証は少ない。また，プレキャストを想定した部材の実験も報告されていない。そこで，これらの点に着目し，プレキャストを想定した短スパン梁部材を対象として，多数回繰返し載荷実験を実施した。本報では，プレキャストを想定した短スパン梁部材実験および実験結果を対象とした非線形 FEM 解析について述べる。

2. 鉄筋コンクリート梁部材の多数回繰返し載荷実験

2.1 実験概要

(1) 試験体計画

試験体一覧を表 - 1 に，使用材料の特性一覧を表 - 2 に，試験体の形状寸法を図 - 1 に示す。試験体は計 3 体とし，2 体は同一配筋で載荷履歴を変数とした。他の 1 体は，補強量を多くして多数回繰返し載荷を行うこととした。いずれも短スパン（せん断スパン比 1.5）とし，また，プレキャスト工法³⁾を模擬し，梁スパン中央付近に機械式継手を配置するとともに，継手付近でコンクリートを打ち分ける製作手順とした。

(2) 載荷計画

載荷装置を図 - 2 に示す。載荷方法は，90 度回転して柱状に配置した試験体の上下スタブの平行と軸方向力（= 0）を維持するように制御し，静的正負交番載荷する形式とした。

標準載荷では，部材角（R）= 1/200, 1/100, 1/50, 1/33, 1/25・・・の各変位振幅を正負 2 回づつ繰返す載荷とし，これに対し，多数回繰返し載荷では，R = 1/200, 1/100, 1/50 において各 10 回繰返す載荷とした。

表 - 1 試験体一覧

	PC15-09N	PC15-09L	PC15-12L
断面	幅×せい=350mm×450mm		
内法長さ	1350mm (a/D=1.5)		
主筋	4+2-D22(SD490)上下		
補強筋	4-D10@90	4-D10@68	
付着余裕度 ¹⁾	1.0	1.2	
載荷方法	標準載荷	多数回	多数回

¹⁾靱性指針⁴⁾による付着割裂強度の曲げ降伏時付着応力度に対する比で，継手の存在は考慮せず算出した

表 - 2 材料特性一覧 [N/mm²]

(a) コンクリート

部位	圧縮強度	割裂強度	ヤング係数
梁上部	49.7	3.50	3.33 X 10 ⁴
梁下部	43.6	2.84	3.02 X 10 ⁴
スタブ	50.4	3.42	3.40 X 10 ⁴

(b) 鉄筋

部位	降伏強度	引張強度	ヤング係数
D22(主筋)	521	561	1.93 X 10 ⁵
D10(補強筋)	814	954	1.89 X 10 ⁵

*1 (株)大林組 技術研究所 (正会員)

2.2 実験結果

(1) 破壊経過

各試験体の破壊状況を図 - 3 に示す。なお、図には、後述する FEM 解析結果もあわせて示した。いずれの試験体も、部材角 $R=1/200$ の加力サイクルにおいて、危険断面の曲げひびわれ、部材スパン内の斜めひびわれが発生し、また、スパン中央の打ち継ぎ面のひびわれが確認

された。その後、 $R=1/100$ 、 $1/50$ の加力サイクルにかけて、 $R=1/120$ 付近で一段筋の、 $R=1/100$ 付近で二段筋の降伏がそれぞれ確認された。また、全試験体ともに、機械式継手部分に比較的多くのひびわれが発生する傾向が見られた。これは、継手が無い部分に比べて、かぶりが少ないことと、打ち付けたコンクリートの特性が、継手側の強度がやや低い結果となったことに起因すると

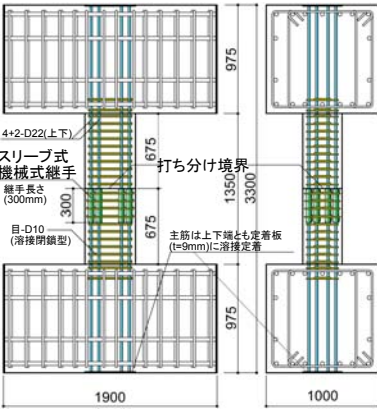


図 - 1 試験体形状

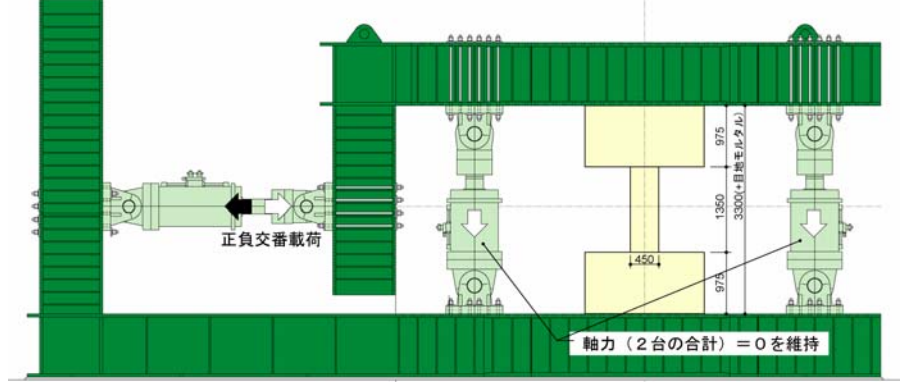
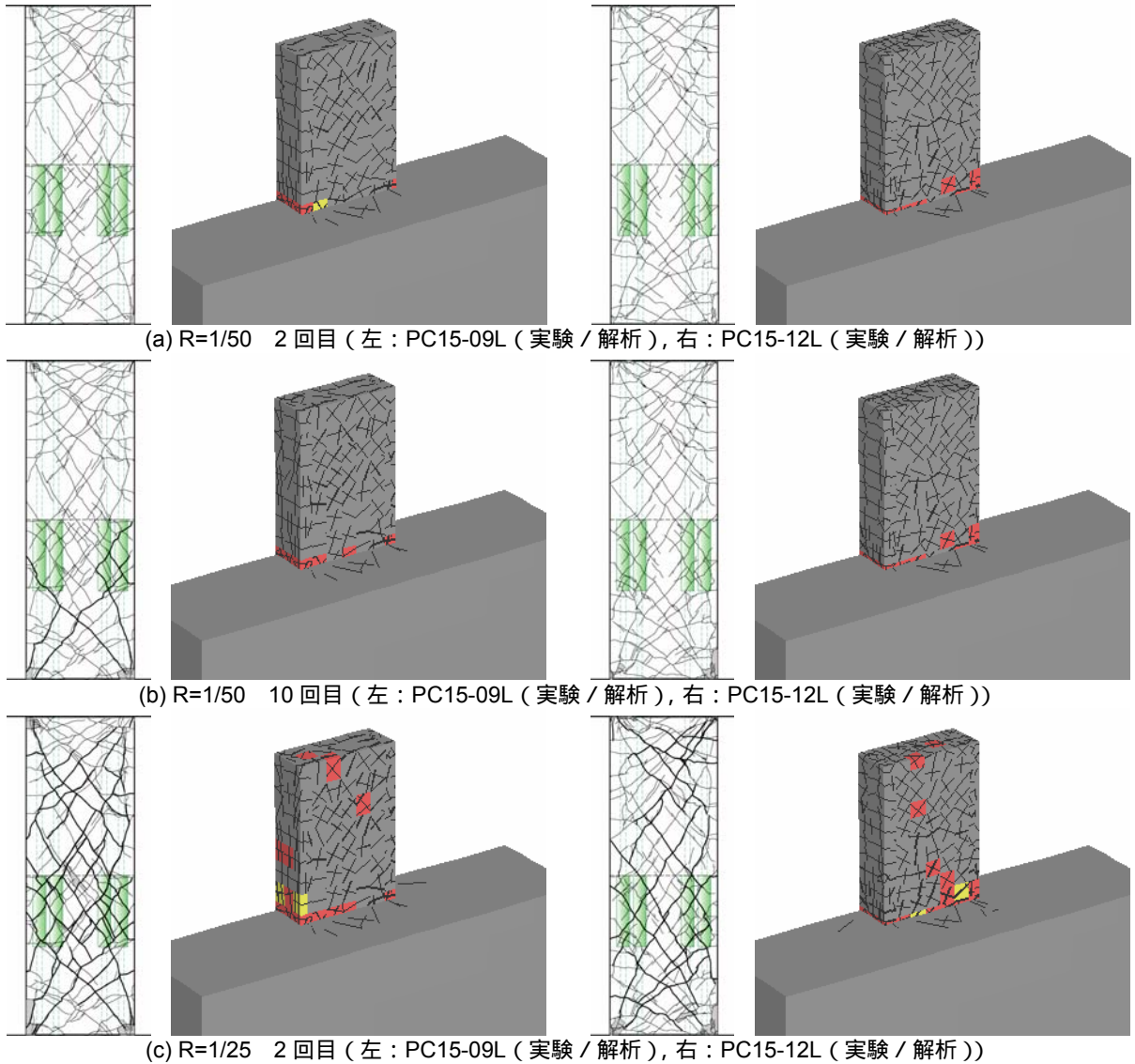


図 - 2 載荷装置



(a) $R=1/50$ 2回目 (左: PC15-09L (実験 / 解析), 右: PC15-12L (実験 / 解析))

(b) $R=1/50$ 10回目 (左: PC15-09L (実験 / 解析), 右: PC15-12L (実験 / 解析))

(c) $R=1/25$ 2回目 (左: PC15-09L (実験 / 解析), 右: PC15-12L (実験 / 解析))

図 - 3 各試験体の損傷状況

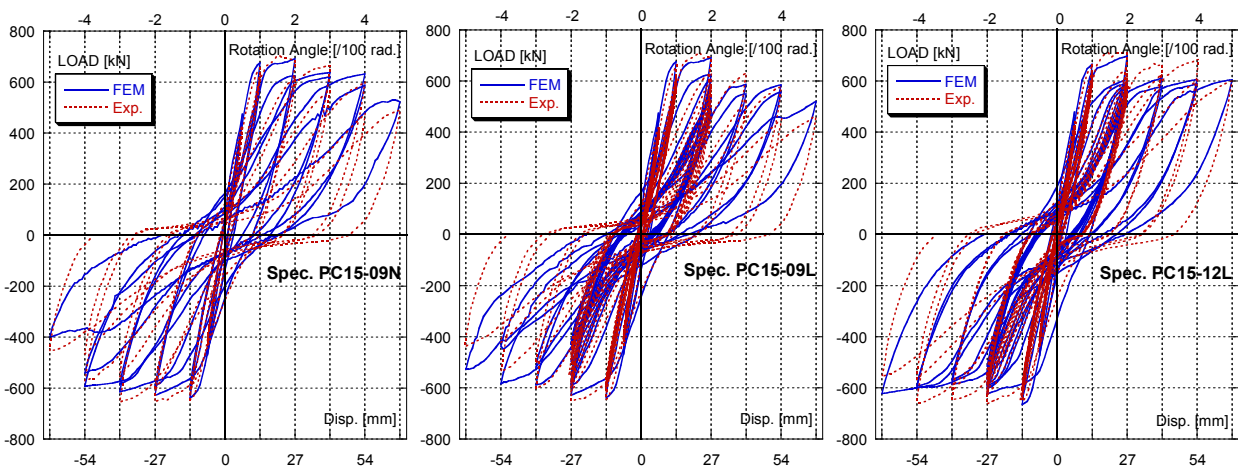


図 - 4 荷重～変形関係

考えられる。

補強量の少ない試験体 PC15-09N および PC15-09L は、 $R=1/50$ のサイクルで、部材全域にわたり多数のひびわれが発生し、特に機械式継手周辺のコンクリートの剥落が顕著に見られた。試験体 PC15-09L は繰り返しによる損傷状況の影響は、ひびわれがより大きく開く点に見られたものの、試験体 PC15-09N とほぼ同様の破壊性状を示し、いずれも曲げ降伏後のせん断破壊となった。

試験体 PC15-12L は、 $R=1/50$ の加力サイクルで、他の 2 体と異なり、ひびわれの進展があまり見られず、同じ変位振幅での損傷は、他の 2 体よりやや少ない傾向が見られた。最終的には曲げ降伏後のせん断破壊となった。

(2) 荷重～変形関係

各試験体の荷重～変形関係を図 - 4 に示す。なお、図には、後述する FEM 解析結果もあわせて示した。

補強量の少ない試験体 PC15-09L は、 $R=1/50$ において、繰り返しによる耐力低下が顕著に見られた。しかし、標準荷重を行った試験体 PC15-09N と比較すると、包絡線はほぼ同等となっており、多数回繰り返しによる耐力低下は、この試験体においては包絡線には影響しない結果となった。一方、補強量の多い試験体 PC15-12L は、 $R=1/50$ での多数回繰り返し荷重による耐力低下は、試験体 15PC09L に比べてやや少なく、補強筋の増量による改善効果が見られる。その結果、耐力低下開始時の変形も他の 2 体より大きく、靱性能が改善されたと考えられる。

次に、各試験体の部材角～軸方向変形関係を図 - 5 に示す。図より、試験体 PC15-09N と PC15-09L では、多数回繰り返しによる影響はわずかに見られるものの、同様の傾向を示している。すなわち、 $R=1/50 \sim 1/33$ にかけて、軸方向の伸びが進まなくなり、耐力低下と対応している。一方、試験体 PC15-12L は、 $R=1/50$ の多数回繰り返しの後も、軸方向の伸びが進んでいる。その後、若干の耐力低下が見られる $R=1/25$ に至って初めて軸方向の伸びが進まなくなる傾向が見られる。

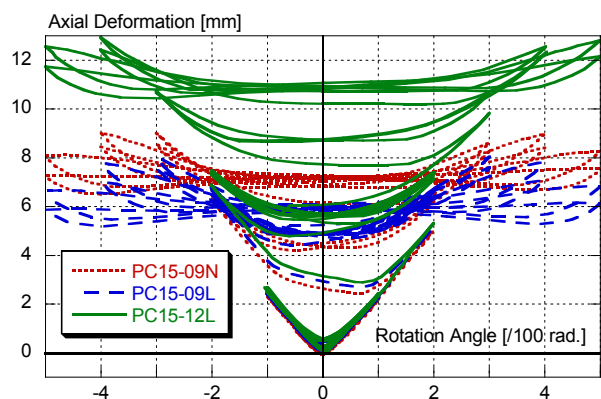


図 - 5 部材角～軸方向変形関係

以上より、補強量の少ない試験体 PC15-09N および PC15-09L は、補強量が多い試験体 PC15-12L に比べて靱性能が劣っており、その挙動は、多数回繰り返し荷重によって大きく影響されていないといえる。

3. 非線形 FEM 解析

3.1 解析モデル

FEM 解析は、大林組開発ソフト「FINAL」⁵⁾を用いて行った。解析モデル図を図 - 6 に示す。試験体形状の対称性を考慮して、試験体の断面幅方向中央および部材スパン中央で分割した 1/4 部分をモデル化した。スタブの最下面の節点を加力点とし、底面を構成する各節点には加力点に対する従属条件を与えた。部材スパン中央の切断面を構成する節点は、断面芯に位置する節点を中心として逆対称に変位するよう境界条件を与えた。

コンクリートは六面体要素、試験部分の主筋およびせん断補強筋は線材要素でモデル化した。コンクリートの応力度～歪度関係は、修正 Ahmad 式⁶⁾によりモデル化し、多軸応力下の破壊条件は、Ottosen の提案⁷⁾に従い、畑中らの係数⁸⁾を用いた。本破壊基準では、拘束応力により、最大強度が上昇する現象を再現できる。圧縮強度後の軟化域については、Nakamura ら⁹⁾の提案モデルを用いた。

主筋の線材要素に継手の存在は考慮せず、コンクリートの六面体要素との間には、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、Elmorsiらの提案¹⁰⁾を修正したNaganumaら¹¹⁾の手法によりモデル化した。付着応力度～すべり量関係の例を図-7に示す。強度は、付着割裂強度⁴⁾とし、強度時すべり量は1.0mmと仮定した。解析は、すべて変位制御とし、軸力ゼロとして正負交番繰返し载荷とし、多数回繰返しはR=1/50においてのみ実施した。

3.2 解析結果

(1) 荷重～変形関係

解析結果の荷重～変形関係および損傷状況は、図-3、図-4に示した。また、R=1/50における荷重～変形関係を図-8に示す。いずれの試験体も、実験結果と解析結果は概ね対応している。特に、全体挙動として、補強量の多いPC15-12Lが、他の2体に比べて大変形時に耐力を維持している点は、よく再現できている。ただし、R=1/33以降の大変形時には、除荷時の性状（残留変形、剛性変化）がやや対応が悪い結果となっている。また、多数回繰返しによる耐力低下傾向は、概ね対応しており、PC15-09LとPC15-12Lの違いも概ね表現できている。特に、PC15-09Lの方が、耐力低下がやや大きい傾向が見られる。一方、損傷状況については、部材スパン全域にわたり斜めひびわれが多数発生する状況がみられる。解析では、機械式継手の存在を考慮していないため、実験のような非対称性は再現できないが、解析結果の損傷状況は概ね実験結果と対応しているといえる。

(2) エネルギー吸収性状

次に、各試験体の等価粘性減衰定数について、実験結果と比較する。全試験体の等価粘性減衰定数の実験結果と解析結果の比較を、各変位振幅の

2回目のサイクルにおける比較を図-9に、R=1/50の多数回繰返しにおける比較を図-10にそれぞれ示す。図には、履歴復元力特性として、TAKEDAモデル¹²⁾およびスリップモデル¹³⁾を用いた場合の等価粘性減衰定数の計算値もあわせて示した。なお、スリップモデルによる荷重～変形関係の比較例を図-11に示す。

いずれの試験体も、等価粘性減衰定数は比較的小さい傾向がある。多数回繰返しにより、その値は大きく低下することはなく、ほぼ同じ値となっていることがわかる。解析結果と実験結果を比較すると、2回目のサイクルの挙動では、R=1/50程度まではよく対応しているが、その後の変位については、解析結果は実験値に対して過小評価する傾向が見られる。一方、多数回繰返しの場合には、3回目以降のサイクルで一部過小評価する傾向がある

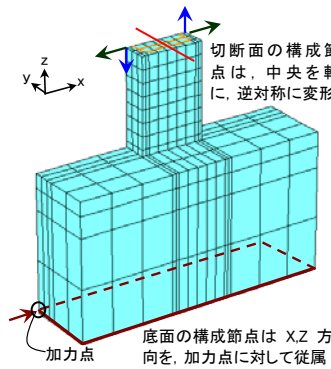


図-6 解析モデル

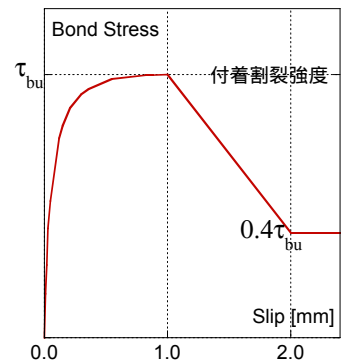


図-7 付着特性

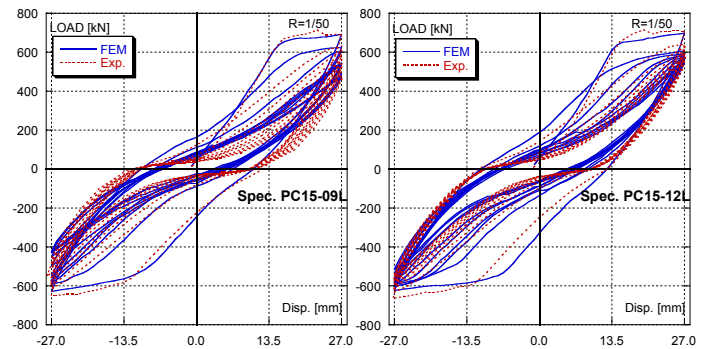


図-8 荷重～変位関係 (R=1/50における繰返し载荷)

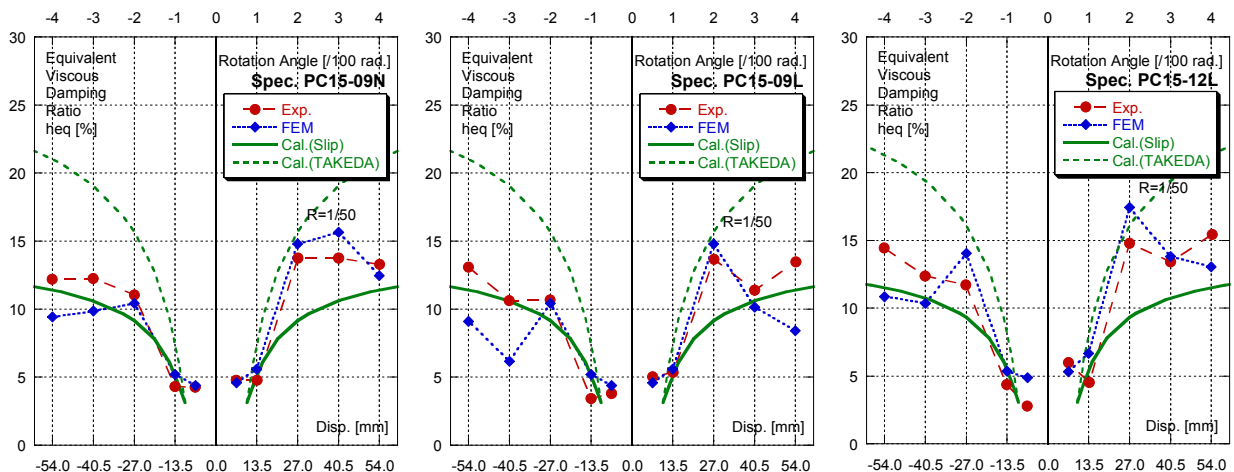


図-9 等価粘性減衰定数の推移 (各振幅2回目の値)

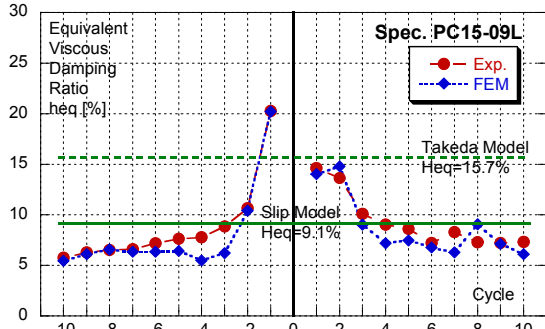


図 - 1 0 等価粘性減衰定数の推移 (R=1/50 の繰返しによる影響)

ものの、概ね実験結果と対応しており、本実験のように機械式継手を有しても、継手の存在を無視したモデル化で解析可能であるといえる。さらに、本実験範囲では、R=1/50 程度の大変形時に、多数回繰返し外力を受ける場合には、履歴復元力特性モデルとしてスリップモデルを用いることで、エネルギー吸収性状については概ね妥当に評価できるといえる。

(3) 付着特性

各試験体の付着特性について検討する。実験では、主筋に歪ゲージを貼付して軸方向歪度を計測した。両端の危険断面から 0.8D 程度はなれた位置で計測した歪度をもとに、この区間の平均付着応力度を算出した。FEM 解析結果においても同様に付着応力度を求めて、全体変形との関係として図-12に示す。図より、補強量の少ない試験体 PC15-09N、および PC15-09L では、解析結果は実験値をやや過大評価するもの、概ね対応している。一方、試験体 PC15-12L では、ほぼ対応していることがわかる。さらに、R=1/50 における各サイクルピーク時の値を求め、図-13に示す。図より、実験における計測範囲では、繰返しによる付着応力度の低下は確認できないが、解析では、補強量の少ない PC15-09L の負側では低下する傾向が見られる。一方、PC15-12L では、実験、解析ともに概ね安定している。以上から、本実験の範囲では、付着割裂強度の余裕度が比較的小さくても、多数回繰返しによる付着力の低下は顕著に現れなかった。

(4) せん断変形成分

せん断変形成分の推移について検討する。実験では、部材スパン内を 5 区間に分割し、各区間の側面の軸方向変形から平均曲率を算出し、部材の曲げ変形を算出した。せん断変形は、全体変形と曲げ変形の差として求めた。試験体 PC15-09L の R=1/50 の各ピーク時のせん断変形成分の割合を図-14に示す。なお、解析のせん断変形は、スパン内の区間の分割をメッシュ分割に従うほかは、実験値の算出と同様の方法により求めた。図より、一定振幅で荷重を繰り返すにつれて、せん断変形成分が増大していることがわかる。解析では、やや過大評価するもの

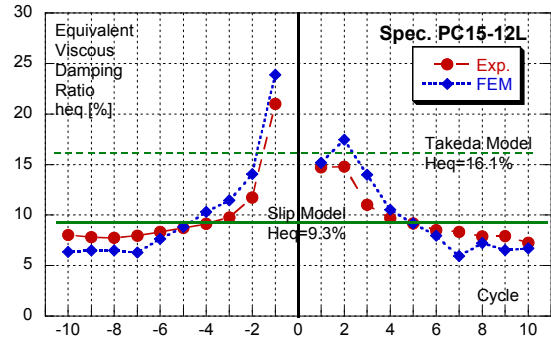
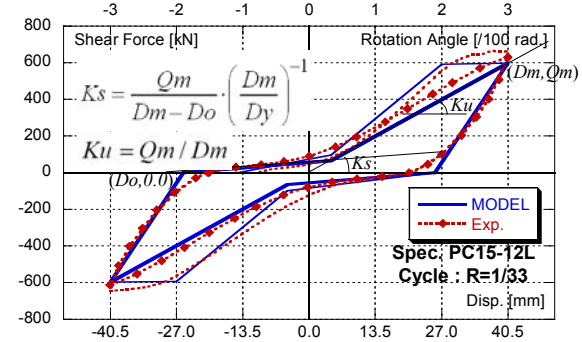


図 - 1 1 荷重～変形関係の比較例 (スリップモデル) ¹³⁾



の、増加傾向は概ね対応しているといえる。この図より、繰返しによる耐力低下は、前項の付着性状だけでなく、せん断変形成分に関連付けて検証することが必要であることを示唆しているといえる。

4. まとめ

本報では、比較的スパンが短い鉄筋コンクリート梁部材の多数回繰返し載荷実験を実施し、耐力・変形状について検証した。さらに、非線形 FEM 解析を実施し、解析精度の検証を行うとともに、耐力低下の傾向について検討した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 補強量の少ない試験体では、主筋降伏後 R=1/50 における多数回繰返しにより顕著に耐力低下した。しかし、標準的な 2 回繰返し載荷した試験体と比較して、全体の包絡線については有意な差は見られなかった。
- (2) 補強量の多い試験体は、少ない試験体に比べて、靱性能が高く、繰返しによる耐力低下も少ない結果となった。
- (3) 試験体を対象とした非線形 FEM 解析は、荷重～変形関係、エネルギー吸収性状、付着応力度などにおいて、繰返しによる性状を含めて、実験結果と概ね対応する結果が得られた。特に、機械式継手を考慮しないモデル化によっても、概ね評価可能であり、本実験における継手の影響は小さいものと考えられた。
- (4) 実験・解析いずれにおいても、耐力低下の傾向は、付着性状の変化だけでなく、せん断変形成分の増大との関連性が示唆された。

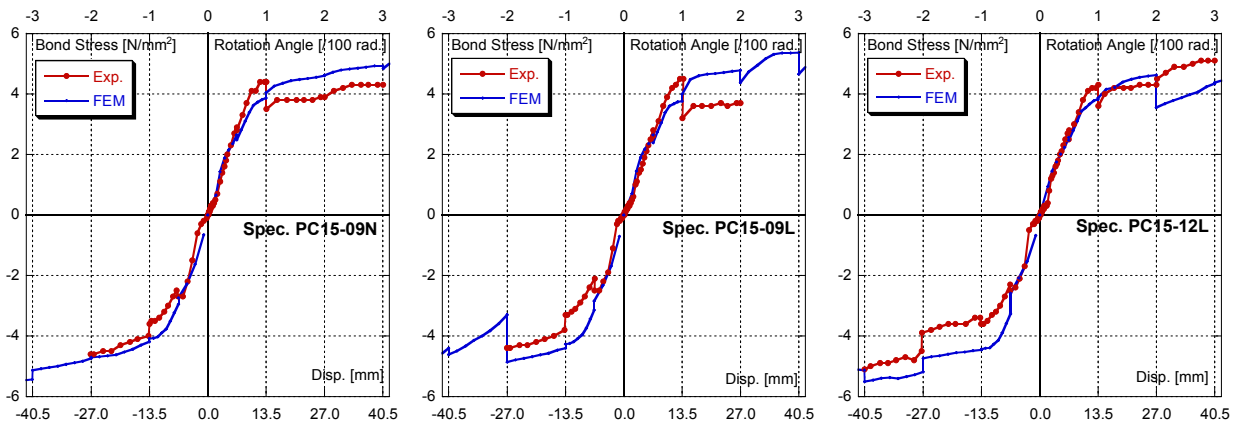


図 - 1 2 付着応力度～全体変形関係

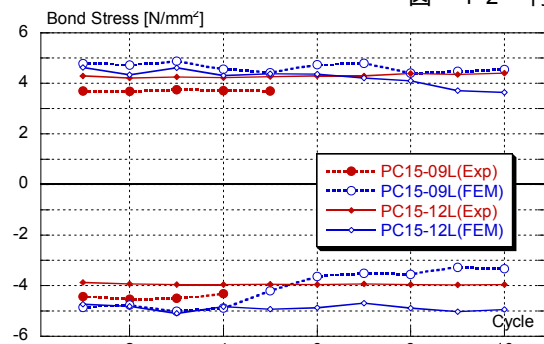


図 - 1 3 付着応力度の推移 (R=1/50)

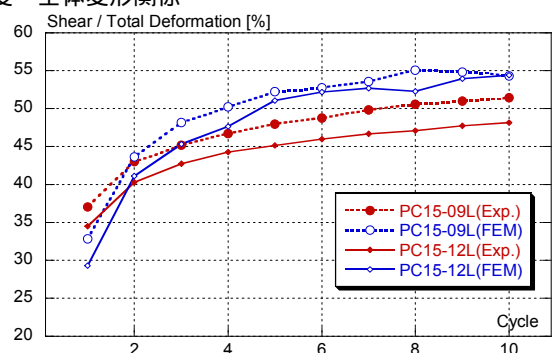


図 - 1 4 せん断変形成分割合の推移 (R=1/50)

参考文献

- 1) 出水俊彦, 斉藤大樹, 福山洋, 森田高市, 向井智久, 濱田真, 菊田繁美, 金川基, 葉研地彰, 佐々木仁: 長周期地震動を受けるRC造超高層建築物の構造性能(その1~7), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.499-512, 2009.08
- 2) 鈴木芳隆, 兵頭陽, 丸田誠, 鈴木紀雄, 小鹿紀英: 多数回繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリート造建物の挙動に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第646号, pp.2317-2325, 2009.12
- 3) 藤生直人, 杉本訓祥: 高層RC建物の超短工期施工法の開発, コンクリート工学, Vol.47, No.8, pp.25-32, 2009.8
- 4) 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
- 5) 長沼一洋, 米澤健次, 江戸宏彰: RC構造部材の三次元繰返し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, 構造IV, pp.427-428, 2003.09
- 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) Ottosen, N. S.: A Failure Criterion for Concrete, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 103, No. EM4, pp.527-535, Aug. 1977
- 8) 畑中重光, 服部宏巳, 吉田徳雄, 谷川恭雄: 低側圧3軸圧縮下の高強度コンクリートの塑性変形挙動, コンクリート工学年次論文集, 12-2, pp.719-724, 1990
- 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, JCI-C51E, Vol. 2, pp.259-272, Oct.1990
- 10) Elmorsi, M., Kianoush, M. R. and Tso, W. K.: Modeling Bond-slip Deformations in Reinforced Concrete Beam-Column Joints, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 27, pp.490-505, 2000
- 11) 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
- 12) Takeda, T. et. Al.: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Proceedings of the ASCE, ST12, pp.2557-2573, Dec. 1970
- 13) 江戸宏彰, 武田寿一: 鉄筋コンクリート構造物の弾塑性地震応答フレーム解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1877-1878, 1977.10