

論文 鉄筋コンクリート造平面架構の耐震性能

杉本 訓祥^{*1}・勝俣 英雄^{*2}・福山 洋^{*3}・斉藤 大樹^{*4}

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平面架構を対象とした多数回繰り返し載荷実験を実施した。さらに，実験時の境界条件として，梁の軸方向拘束の影響を検討するため，FEM 解析を実施した。実験により，本実験の範囲では，多数回繰り返し載荷の履歴復元力特性への影響は小さいことが確認された。さらに，解析結果とあわせた検討により，実験時の境界条件の影響から梁に軸力が生じることが確認された。

キーワード：長周期地震動，復元力特性，柱梁接合部

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っている。超高層鉄筋コンクリート造建物のそのような外力に対する性能を評価する目的で，各部材の多数回繰り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。著者らは，これらの研究の一環として，既存の超高層鉄筋コンクリート造建物の部材断面の調査結果に基づき，柱や梁部材および架構の耐震性能評価やモデル化手法を検証するための一連の実験および解析的研究を進めてきた^{1),2)}。本報では，RC 造平面架構の性能評価手法の適合性等を検証する目的で行った静的載荷実験について述べる。さらに，試験体を対象とした非線形 FEM 解析についても報告する。

2. 実験概要

2.1 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，試験体形状を図 - 1 に示す。試験体は，柱 3 本と梁 2 本からなる実物の約 1 / 4 の 1 層 2 スパンの平面架構形状とした。試験体数は 3 体とし，柱主筋量と梁せん断

補強筋量，および載荷履歴をパラメータとした。すなわち，試験体 A は，柱主筋および梁せん断補強筋を比較的少なくし，柱梁耐力比と梁せん断余裕度を小さく設定し，試験体 BN および BL は，それらを大きく設定した。また，試験体 A および BN は，標準的な変位振幅を正負各 2 回ずつ繰り返す載荷とし，試験体 BL では，一部の変位振幅で多数回繰り返し載荷を行った。

なお，次節で述べる本実験の加力方法は，3 本の柱の柱頭のローラーまたは柱脚のピンは，各節点間の相対距離が一定に保たれるため，梁の軸方向伸びに対する拘束が非常に大きい条件となる。一般に多層ラーメン架構中の柱部材の梁軸方向変形に対する拘束は，各層の梁が一樣に伸びるとすれば生じないと考えるのが一般的であるが，低層建物の場合（基礎の柱脚拘束）や，各層の層間変形が一樣でない場合には梁の軸方向伸びが一樣でなくなり，拘束が生じる可能性がある。本実験の境界条件は，梁に生じる軸力，および反力として柱に生じる付加せん断力に関して，一般に考えられるよりも大きくなる拘束条件であるといえる。本実験では，このような条件に対する影響を検討することも目的のひとつとしている。

表 - 1 試験体一覧（長さの単位 [mm]）

	試験体 A	試験体 BN / BL
柱断面，主筋，帯筋	250×250，8-D13，4-D6@50	250×250，16-D13，4-D6@50
梁断面，主筋，あばら筋	200×225，3+2-D13(上下)，2-D6@100	200×225，3+2-D13(上下)，2-D6@60
載荷履歴	標準各 2 回	標準各 2 回 / 多数回繰り返し含む
柱梁曲げ耐力比（外 / 内）	3.07 / 1.53	4.72 / 2.36

表 - 2 材料特性（単位 [N/mm²]）

(a) コンクリート				(b) 鉄筋			
	圧縮強度	ヤング係数	割裂強度		降伏強度	ヤング係数	引張強度
柱部材	81.8	4.14X10 ⁴	4.28	D13（主筋）	540	1.93X10 ⁵	744
梁部材	49.2	3.21X10 ⁴	3.51	D6（補強筋）	697	1.92X10 ⁵	927

*1 (株)大林組 技術研究所 博士（工学）（正会員）

*2 (株)大林組 技術研究所（正会員）

*3 独立行政法人 建築研究所 工博（正会員）

*4 独立行政法人 建築研究所 工博

2.2 加力方法

加力は、正負交番载荷とした。なお、長周期地震動に対しては中間層の応答も大きくなること³⁾を踏まえて、軸力は、平均軸圧縮応力度が $0.05F_c$ 程度の一定軸力を载荷した。試験体 A および BN では、層間変形角 $R=1/200$, $1/100$, $1/67$, $1/50$, $1/33$, $1/25$, $1/20$ を正負各 2 回繰り返す载荷履歴とし、試験体 BL では、長周期地震動による繰り返し回数の検討結果を踏まえて³⁾、このうち $R=1/200 \sim 1/50$ において正負各 10 回繰り返した。

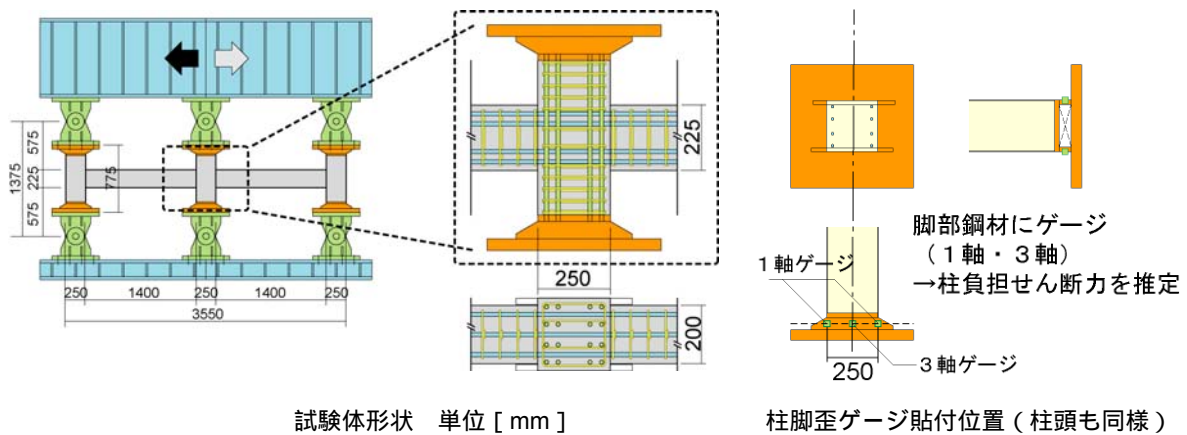
3. 実験結果

3.1 破壊性状

各試験体の破壊状況を図 - 2 に、荷重～変形関係を図 - 3 に示す。いずれの試験体も、層間変形角 $R=1/100 \sim 1/67$ の加力サイクルにおいて、外端梁の一段・二段筋、

内端側梁の一段筋が降伏した。その後、 $R=1/67 \sim 1/50$ の加力サイクルにおいて、梁端の圧壊が始まった。 $R=1/50$ 以降では、中柱梁接合部の損傷が進み、 $R=1/33$ の加力サイクルでは、柱の主筋および接合部内補強筋の降伏が確認された。最終的には、内柱梁接合部の破壊と外柱側梁端部の曲げ降伏後のせん断破壊となった。ただし、試験体 A に比べて、柱主筋量および梁せん断補強筋量を多くした試験体 BN および BL は、内柱梁接合部や、外端側梁端部の損傷が少ない結果となり、架構の靱性能の向上も確認された。

試験体 A の荷重～変形関係は、他の 2 体に比べて、最大耐力が 7～8%程度小さく、耐力低下も早く生じる結果となった。一方、試験体 BN と BL では、荷重～変形関係には大きな差は見られず、多数回繰り返し载荷の履歴性状への影響はほとんどない結果となった。



試験体形状 単位 [mm]

柱脚歪ゲージ貼付位置 (柱頭も同様)

図 - 1 試験体形状 (試験体 BN, BL)

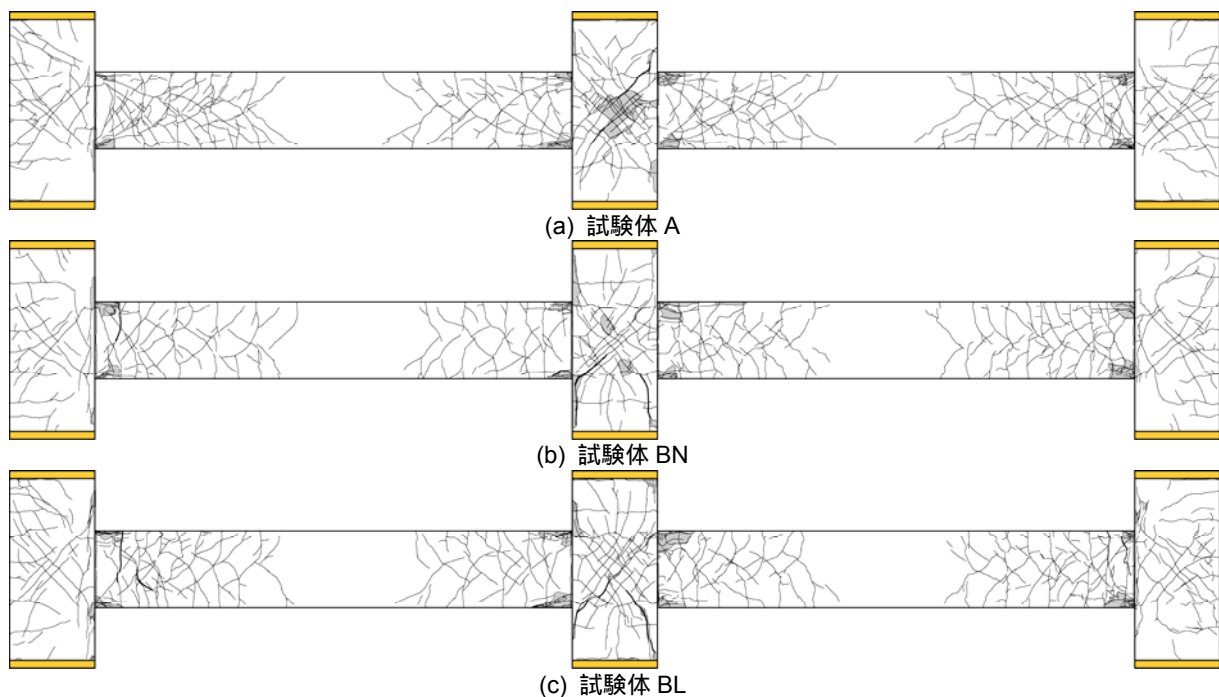


図 - 2 試験体の損傷状況 (R=1/25 終了時)

3.2 多数回繰り返し荷の影響（試験体 BL）

試験体 BL の最終破壊時の様子を写真 - 1 に示す。多数回繰り返し荷を行った試験体 BL は、内柱梁接合部の損傷がより少なくなるとともに、最終破壊時には、外柱梁接合部の外部側に、梁主筋定着板の押抜きによると思われる割裂（写真 - 1 中の点線囲み部分）が生じた点で、他の試験体と異なる破壊性状を示した。

次に、等価粘性減衰定数の推移を図 - 4 に示す。図より、2 ~ 3 回目以降はほぼ一定となっており、3 回目以降 10 回目までの繰り返しの影響は小さいことがわかる。

3.3 柱の負担せん断力の推定

試験体 A および BN について、柱の負担せん断力と変形角関係の例を図 - 5 に示す。実験では、柱頭・柱脚の鋼板に貼付した歪ゲージの計測結果（図 - 1 参照）から、各部材のモーメント分布を推定した²⁾。この結果から、

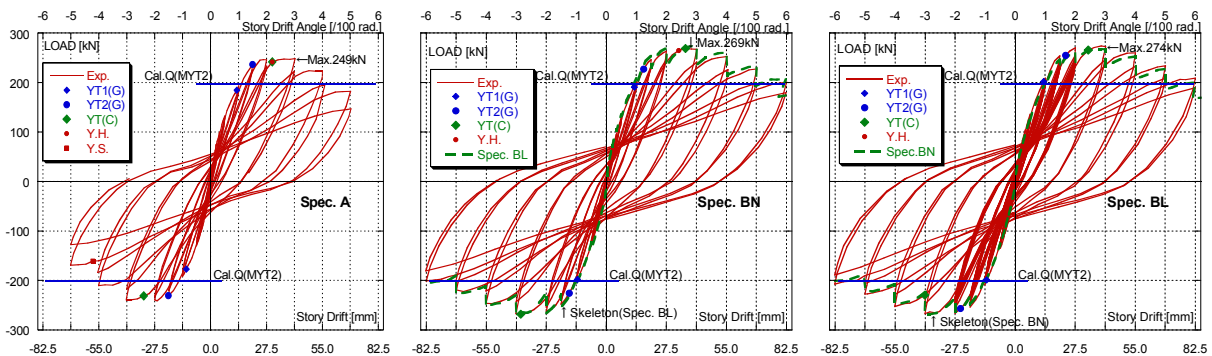
柱の負担せん断力を算出し、柱の変形角との関係を図示した。図には、復元力特性計算値⁴⁾もあわせて示した。図より、計算上の柱梁曲げ耐力比は外柱では 2 以上あり、柱の降伏まで余裕がある。しかし、実験では降伏荷重程度のせん断力が生じており、梁の軸方向伸びによる付加せん断力の影響も要因のひとつと考えられる。

4. 非線形 FEM 解析

ここでは、試験体を対象とした FEM 解析⁵⁾により、梁に生じる軸力の挙動について検討した結果を述べる。

4.1 解析方法

解析ケースを表 - 3 に、解析モデル図を図 - 6 に示す。2 章で述べたように、本実験では、梁の軸方向伸びが柱に拘束されることで、梁に軸力が生じる。そこで、柱の拘束を与えない境界条件で、FEM 解析を実施し、その影



YT1(G), YT2(G) : 梁 1 段筋, 2 段筋降伏時, YT(C) : 柱主筋降伏時, Y.H. : 柱せん断補強筋降伏時
 図 - 3 実験結果：荷重～変形関係



写真 - 1 試験体 BL の最終破壊状況

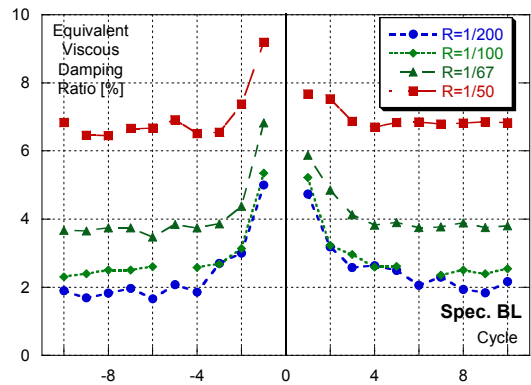
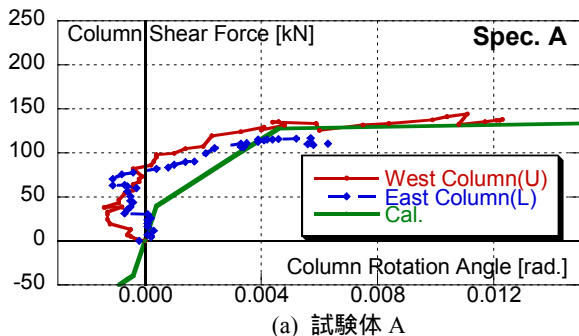
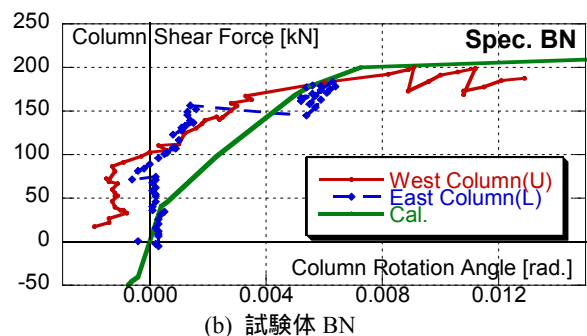


図 - 4 繰返し回数と Heq (試験体 BL)



(a) 試験体 A



(b) 試験体 BN

図 - 5 柱の負担せん断力と変形角関係

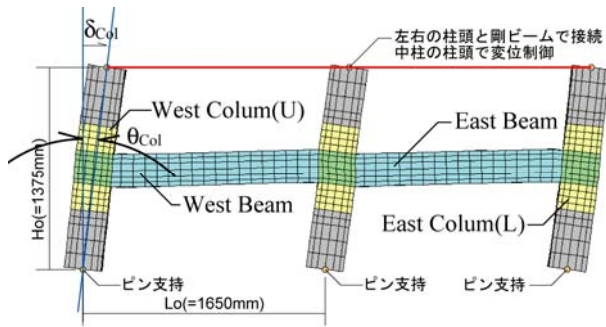
響について検証する。試験体 A および BN と同一の配筋とした 2 ケースに加えて、梁の軸方向拘束を与えない境界条件の 2 ケースの合計 4 ケースの解析を実施した。なお、梁の軸方向拘束を与えないケースでは、図 - 6 (b) に示すように、左右の柱を上下方向 (Z 方向) に変位さ

せることで、層間変形を生じさせる。さらに、同図中に示す方法で、架構の層せん断力と層間変形の関係を得た。なお、この解析ケースでは柱に軸力を載荷することが困難である。比較の為、全ケースとも柱軸力をゼロとした。解析では、試験体形状の対称性を考慮して、幅方向中

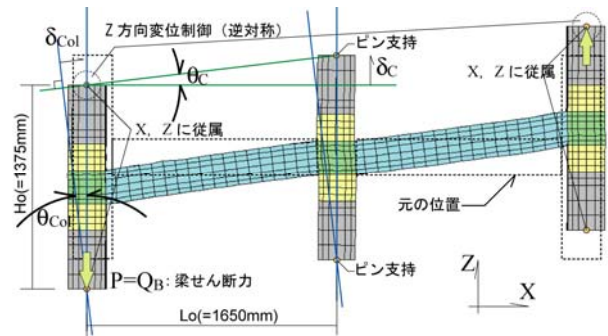
表 - 3 解析ケース一覧

解析ケース	配筋条件	加力境界条件 (いずれも柱軸力無し)
ケース AN	試験体 A	試験体 A と同一
ケース DA	試験体 A	Z 方向加力により梁の軸方向拘束無しとするモデル
ケース BN	試験体 BN	試験体 BN と同一
ケース DB	試験体 BN	Z 方向加力により梁の軸方向拘束無しとするモデル

* いずれも各振幅 2 回の正負繰返し载荷とする。



(a)標準モデル (実験同様に水平方向载荷)



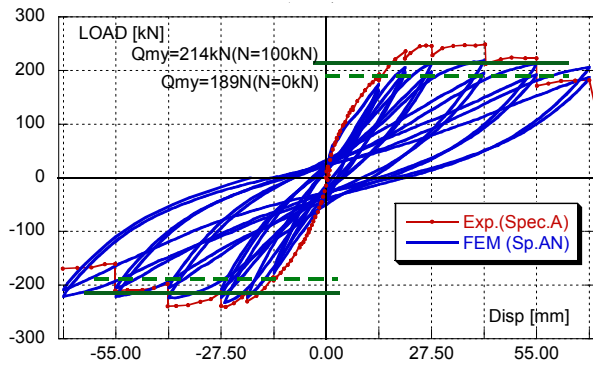
(b)Z 方向载荷により梁の軸方向拘束を与えないモデル

$$Q_{story} = 2 \times Q_B \cdot L_O / H_O = 2.4 \cdot Q_B \quad (1)$$

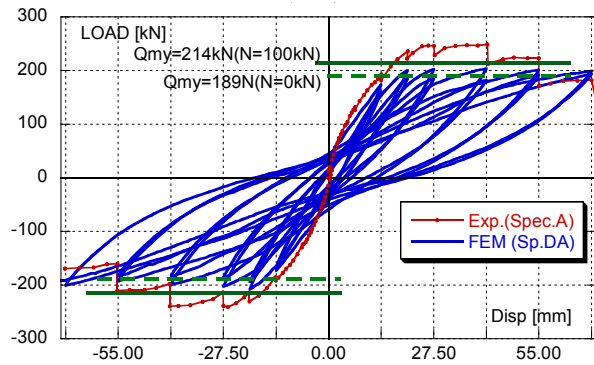
$$\delta_{Col} = \delta_C / L_O \times H_O = 0.83 \cdot \delta_C \quad (2)$$

ここで、 Q_{story} : 層せん断力、 δ_{Col} : 層間変位、 θ_{Col} : 層間変形角 ($=\theta_C$)

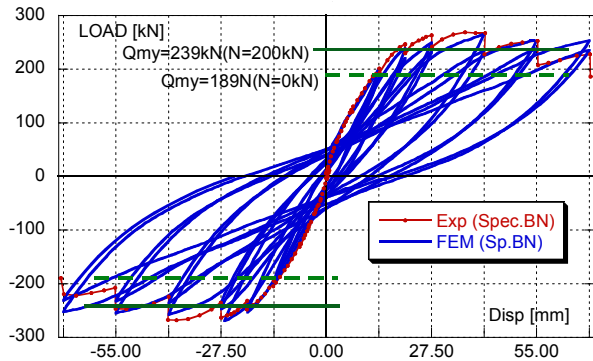
図 - 6 解析モデル図



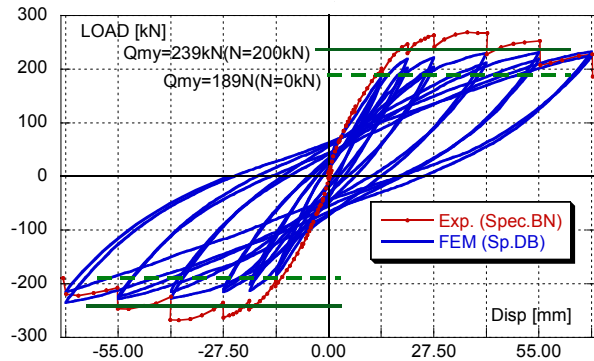
ケース AN (実験同様に水平方向载荷) と試験体 A



ケース DA (梁軸方向拘束無し) と試験体 A



ケース BN (実験同様に水平方向载荷) と試験体 BN



ケース DB (梁軸方向拘束無し) と試験体 BN

図 - 7 解析結果: 荷重 ~ 変形関係

央で切断した 1/2 部分をモデル化した。コンクリートは六面体要素、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、Otosen の提案⁷⁾に従い、畑中らの係数⁸⁾を用いた。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、Elmorsi ら¹⁰⁾の提案を修正した Naganuma ら¹¹⁾の手法によりモデル化した。付着強度は、靱性指針¹²⁾による付着割裂強度および通し主筋の付着強度を用いて、強度時のすべり量は 1.0mm とした。

4.2 解析結果

(1) 荷重～変形関係および損傷状況

解析結果のうち、荷重～変形関係を図 - 7 に、損傷状況を図 - 8 に示す。図 - 7 には、梁に軸力が生じた場合の耐力計算値（試験体 A では 100kN、B では 200kN）もあわせて示した。柱の拘束を考慮した実験と同一のモデルでは、ほぼ実験結果と対応しているが、拘束を生じさせない境界条件のモデルでは、いずれの試験体でも耐力が小さい結果となっている。また、いずれのケースでも軸力を考慮した梁耐力計算値と概ね対応している。なお、解析モデルでは、柱に軸力を与えていないことから、柱梁耐力比が実験時の条件にくらべて小さくなっている。既往研究では、柱梁耐力比が小さくなると、接合部が損傷し架構の性能が低下することが指摘されている¹³⁾。本解析のうち、特に柱梁耐力比が 1 に近くなった試験体 A

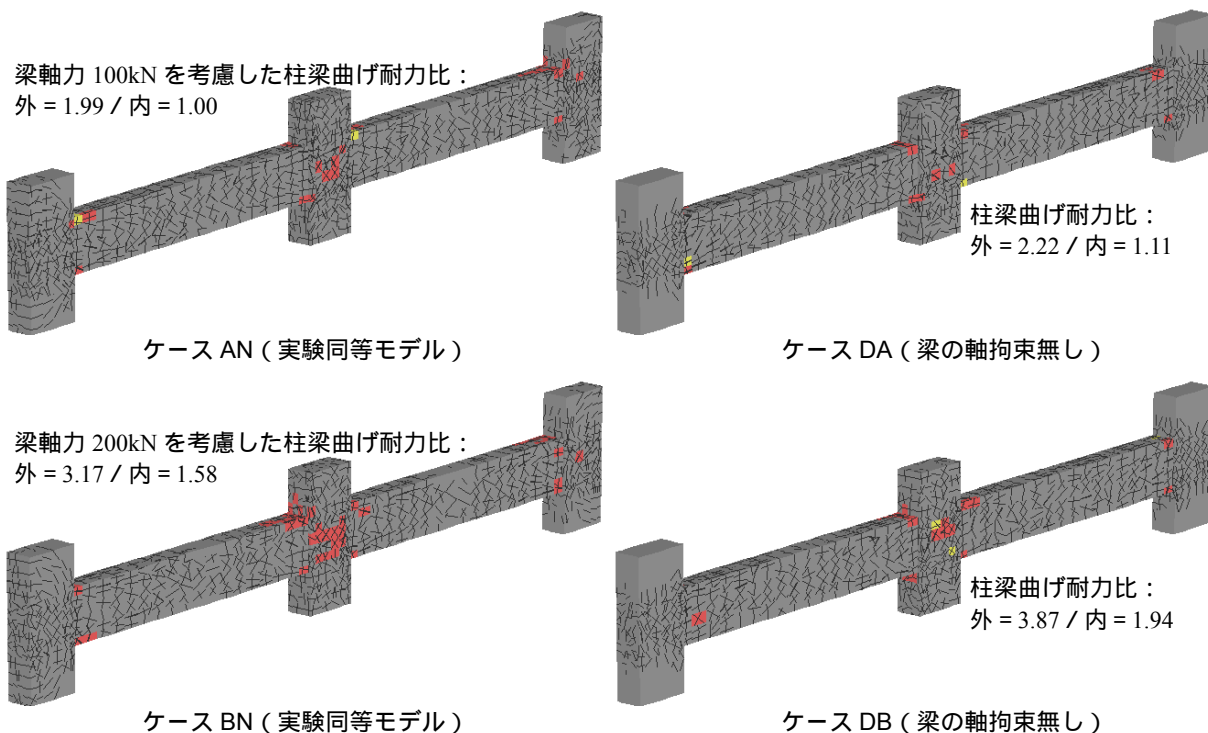


図 - 8 解析結果：損傷状況 (R=1/33 終了時)

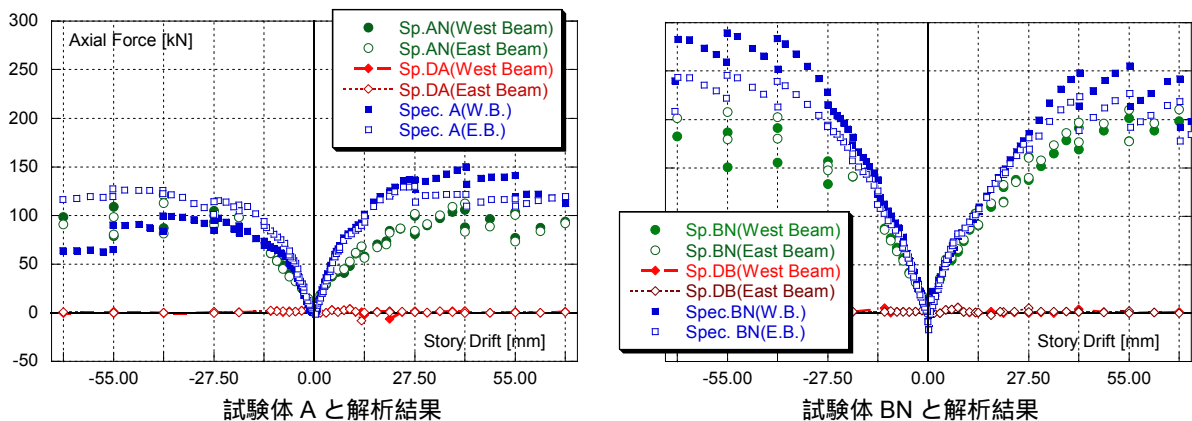


図 - 9 梁軸力と水平変位の関係

を基準にしたケースで耐力を過小評価していることは、その影響と考えられる。さらに、本実験では、梁の軸力付加の影響で、計画時よりも柱梁耐力比が小さくなり、接合部の損傷がより激しくなったと推察される。

(2) 梁の軸方向拘束の影響

解析結果のうち、梁に生じる軸力を抽出し、層間変形との関係で図-9に示す。図には、実験計測結果から推定した梁軸力もあわせて示す。図より、本実験では、柱の拘束により梁に軸力が生じており、試験体 A では100kN程度以上、試験体 B では200kN程度以上となっていることが実験・解析それぞれの結果からわかる。また、その軸力は、図-5に示す復元力特性と比較すると、概ね柱の降伏耐力程度まで達しているといえる。一方、解析で梁軸拘束を無しとしたモデルでは、梁に軸力は生じておらず、その結果、実験結果に比べて、耐力が小さくなったことがわかる。

5. まとめ

長周期地震動を受ける鉄筋コンクリート造架構の性能を確認する目的で、平面架構の静的載荷実験を行い、以下の知見を得た。

- (1) 多数回繰り返し外力の履歴復元力特性への影響は、本実験の範囲ではほとんど現れなかったが、同一配筋で載荷方法のみが異なる試験体では、最終破壊状況($R=1/10$ 程度まで載荷した後)に違いが見られた。
- (2) 柱梁耐力比および梁のせん断耐力余裕度を増すことで、架構の耐力・変形性能は向上した。
- (3) 架構の耐力は、梁に軸力が導入されると想定した結果、精度よく評価できた。
さらに、実験結果を対象とした非線形 FEM 解析を行った。解析の結果、以下の知見を得た。
- (4) FEM 解析により、概ね実験結果を追跡できた。
- (5) 梁の軸方向拘束を与えないようにモデル化した解析結果は、実験結果を過小評価する結果となり、梁の軸力を考慮しない計算値と対応する結果となった。

謝辞：本研究のうち、平面架構の静的載荷実験は、平成22年国土交通省建築基準整備促進事業(27-1 長周期地震動に対する鉄筋コンクリート造建築物の安全性検証方法に関する検討)の一環として実施した。関係各位に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 勝俣英雄・杉本訓祥・津田和明・福山洋・斉藤大樹・塩原等：多数回繰り返し外力を受ける鉄筋コンクリート構造実験のための予備的検討(超高層RC建物の部材断面の調査), 日本建築学会大会学術講演梗

概集, 構造, pp.757-758, 2011.08

- 2) 杉本訓祥・津田和明・勝俣英雄・福山洋・斉藤大樹：多数回繰り返し外力を受ける鉄筋コンクリート造平面架構の静的載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造, pp.751-752, 2011.08
- 3) 小鹿紀英・鈴木芳隆・阿部雅史・兵頭陽・福山洋・斉藤大樹：長周期地震動に対する超高層鉄筋コンクリート造建物の多数回繰り返し挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造, pp.759-760, 2011.08
- 4) 杉本訓祥：鉄筋コンクリート造柱・梁部材の復元力特性評価法(せん断非線形性状に着目した包絡線の評価), 日本建築学会構造系論文集, 第578号, pp.123-130, 2004.04
- 5) 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, 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, Vol.12, No.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.490-500, 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) 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
- 13) 塩原等：鉄筋コンクリート柱梁接合部：梁曲げ降伏型接合部の耐震設計, 日本建築学会構造系論文集, 第640号, pp.1145-1154, 2009.06