

論文 軸力と2方向曲げを受ける実大RC柱の損傷評価

河野 進^{*1}・Bechtoula Hakim^{*2}・角 徹三^{*3}・渡辺 史夫^{*4}

要旨:一辺600mmの正方形断面を持つ鉄筋コンクリート隅柱の柱脚部モデル試験体4体を用いて多軸載荷実験を行い,変動軸力及び水平2方向載荷が塑性ヒンジ部における損傷の進展状況に与える影響を確認した.実験で得られたモーメント及び軸歪と曲率の関係は,ファイバーモデルを用いてかなりの精度で予想することが可能であった.しかし,変動軸力を受ける柱の終局限界ヒンジ回転角や,ひび割れ・圧壊の進展予想には,実験結果をさらに集積する必要がある.

キーワード: 損傷評価, 隅柱, 塑性ヒンジ, 変動軸力, 水平2方向載荷, ひび割れ, 軸歪

1. はじめに

過去十年に世界各地で発生した大地震では,安全性を確保することはもちろん重要であるが,震災からの復興を円滑に行うためには構造物の損傷評価を早く正確に行う必要があることが認識された.また,性能評価設計法における各種の限界状態を明確に定義する為には,やはり各構造部材が様々な限界状態において受ける損傷を正確に評価する必要がある.これまでも,架構の損傷指標を算定する方法は,Rao等¹⁾やPark等²⁾によって提案されている.しかし,実際の補修・補強を行う際に重要である部材の損傷状態についてはまだ十分な定量化が行われているとはいえない.

本研究では,建築構造物において最も厳しい荷重状態に置かれる1階の隅柱柱脚ヒンジ部に焦点をあて,損傷の進展状況を部材モデル実験によって明らかにする.日本建築学会の「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針(案)・同解説」では,単独柱の降伏ヒンジ領域において軸力比2/3までの圧縮力及び全主筋の引張降伏に対応する引張力が許容されているが,この規定は柱が大きな軸力変動を受ける可能性を示唆する.また,水平2方向からの同時曲げせん断力が部材性能に与える影響は,現在の設計法では十分考慮さ

れているとはいえない.そこで,変動軸力と2方向曲げせん断力の影響が最も大きいと考えられる1階隅柱の柱脚部モデル試験体を一辺600mmの正方形断面で4体製作し,変動軸力及び2方向同時曲げせん断力が損傷の進展状況に与える影響を明らかにすることにした.

2. 実験概要

試験体寸法及び配筋詳細を,図-1に示す.実験対象の柱部は,1辺600mmの正方形断面で基礎上面から載荷点までの高さが1200mm(せん断スパン比が2.0)となっている.主筋はD25を12本外周に配し(鉄筋比1.69%),せん断補強筋は正方形及び長方形のD13鉄筋を井形に組んで100mm間隔で配した(せん断補強筋比0.85%).コンクリートと鉄筋の力学的性質を表-1に示す.

表-2に示す通り,実験変数は軸力・水平方向加力状態の2つであり,これらを組み合わせると合計4試験体の実験を行った.軸力履歴を図-2に示す.一定軸力では8MN(0.57f'cD²)で軸力を一定に保った.変動軸力では,主軸回りのモーメント和-Mx+Myが-0.95MN・m時を軸力が0MN,モーメント和が0.95MN・m時を軸力が8MNとして,この2点を直線で結ぶように軸力を変動させた.柱頭に与

*1	京都大学工学研究科助手	建築学専攻	Ph.D. (正会員)
*2	京都大学工学研究科大学院生	建築学専攻	
*3	豊橋技術科学大学教授	建設工学系	博士(正会員)
*4	京都大学工学研究科教授	建築学専攻	博士(正会員)

える水平変位の加力は，一方向載荷又は柱頭が円を描くようにする2方向載荷の2通りである．実際の軌跡を図-3に示す．L1N60は，一方向水平載荷をする予定であったが，Y方向の正側方向に面外変形が進行した結果，主筋が座屈し軸力保持ができずに載荷を終了した．

図-1(c)の実線四角内に柱の曲げ，せん断，及び伸びを測定するために東西南北の柱側面に取り付けた変位計を示す．変位計の標点は，図-1(a)

表-1 コンクリート・鉄筋の力学的性質

コンクリート	種類	圧縮強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
	柱及び基礎		39.2	3.38
鉄筋	種類	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
	D13	524	673	194
	D25	388	588	184

D16は，公称降伏強度785MPaの鉄筋を使用した．

表-2 試験体名と実験変数

試験体名	実験変数		
	軸力比	水平方向の加力	コメント
L1D60	定軸力 (0.6で固定)	1軸	片振り
L1N60		1軸	両振り
L1NVA	変動 (0から0.6)	1軸	
L2NVA		2軸	

L1N60は，図-3に示す通り，面外変形が進行して破壊に至る．

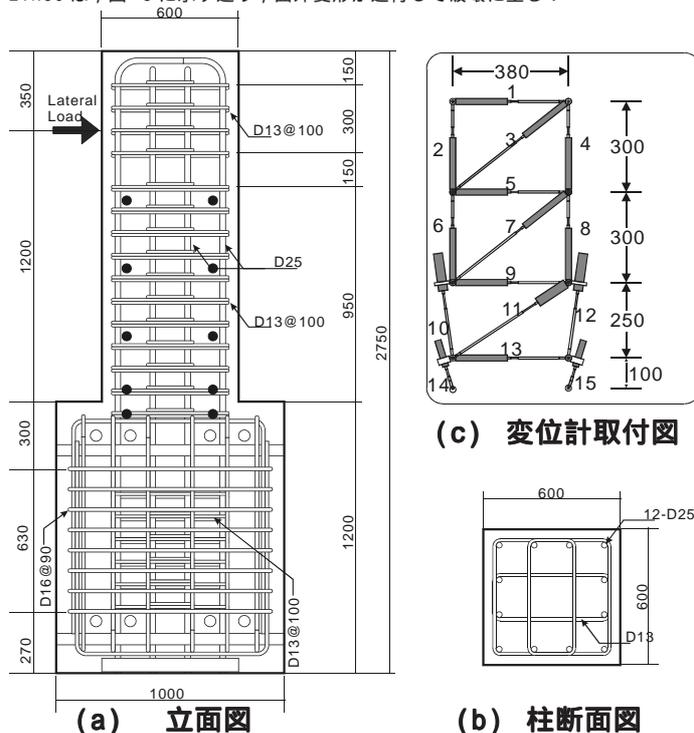


図-1 試験体図

に黒点で示している．さらに，柱頭変位を測定するための変位計6本を基礎上面に固定した測定用フレームに取り付け，載荷点近傍の柱頭変位を測定することで，載荷点高さにおける柱中心部の変位を算定し，部材回転角の制御を行った．

載荷装置を，図-4に示す．水平1方向載荷では柱頭における部材回転角で0.25%，0.5%，0.75%，1.0%，2%，3%，4%において正負2回づつ繰り返し載荷を行った．ただし，L1D60の負側(引き)では，ジャッキの容量が足りず引側の最大容量約1MNで加力を反転した．水平2方向載荷のL2NVAでは，図-3に示す部材変形角で2周づつ円を描いた．

3. 実験結果

3.1 実験結果とファイバーモデル予想結果

図-5に各試験体のモーメント-曲率関係を無次元化して示す．曲率は柱基部D(以下，Dは柱幅600mmを示す)における平均曲率である．また，ファイバーモデルを用いた計算結果をCAL1，CAL2として図中に示す．CAL1は，実験で得られたX及

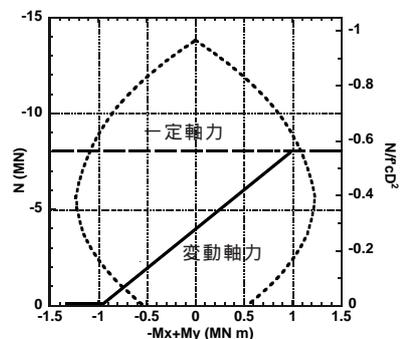


図-2 軸力 - モーメント相関図

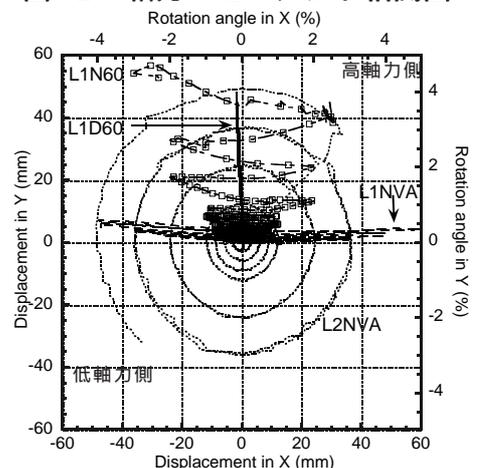


図-3 柱頭の水平面における軌跡

びY方向の曲率と軸力の履歴を与えて、X及びY方向のモーメント及び軸歪を予想した結果である。CAL2は、一定軸力で一方向水平単調載荷を仮定した場合の予想である。本研究で用いたファイバーモデルについては、文献³⁾で用いたものと同じものである。拘束コンクリートの強度については、コンクリートの拘束効果を示すNewRCの式に修正係数 α を挿入して式(1)のようにして用いた。

$$f'_{cc} = f'_c + 1.5\alpha \left(\frac{d'}{c} \right) \left(1 - \frac{s}{2D_{core}} \right) \rho_h f_{hy} \quad (1)$$

ここで、 f'_{cc} ：拘束コンクリートの強度、 f'_c ：無拘束コンクリートの圧縮強度、 f_{hy} ：横補強筋の降伏強度、 ρ_h ：横補強筋の体積比、 d' ：横補強筋の直径、 c ：主筋の非拘束長さ、 s ：横補強筋間隔、 D_{core} ：拘束コンクリートの断面幅である。なお、本解析では文献³⁾に基いて α を2.6に固定して解析を行った。実験結果とCAL2の予想値は、表-3にまとめて示している。また、図-6に各試験体の軸歪-曲率関係

を無次元化して示す。ただし、実験における軸歪は柱基部Dの範囲における柱断面中心における平均値を示し、CAL1については図-5のCAL1と同様の意味をもつ。

L1D60は、部材回転角1% (D 0.5%)で最大モーメントに到達した。以後曲率の増加に関わらずモーメント耐力はほぼ一定であったが、軸歪はサイクルを重ねるごとに徐々に大きくなった。L1N60では、部材回転角2% (D +1.5% また -2.0%)から面外変形が大きくなり、部材回転角3%の負側で北西隅の主筋が座屈し鉛直支持力を失った。鉛直支持力を失うまでは、モーメント耐力に明らかな劣化は見られない。軸歪に関しては、面外変形が大きくなる部材回転角2%から大きく進展し、部材回転角-3%では軸歪が2.5%に達している。軸力を変動させたL1NVAでは、高軸力側の正側において部材回転角+1% (D +1.0%)で最大モーメントとなり以後徐々に耐力を下げ、部材回転角+5% (D +6.0%)では、

表-3 実験結果と予想結果の比較

試験体名	モーメント耐力						等価軸力比 η_e		限界ヒンジ回転角 R_u (%)	
	実験値 M_e (MN·m)		予想値 M_p (MN·m)*1		M_e/M_p		稲井等	加藤等	稲井等	加藤等
	正方向	負方向	正方向	負方向						
L1D60	1.56	無	1.70	無	0.92	無	0.59	0.59	0.73 (*2)	0.72 (*4)
L1N60	1.71	-1.38	1.70	-1.70	1.01	0.81				
L1NVA	1.60	-0.85	1.70	-0.89	0.94	0.96	0.26	0.33	3.41 (*3)	4.22 (*4)
L2NVA(X)	1.63	-0.78	1.70	-0.89	0.96	0.88				
L2NVA(Y)	1.50	-1.02	1.70	-0.89	0.88	1.15				

*1：予想モーメント耐力は、単調載荷時の最大値であり、図-5におけるCAL2の値に相当する。*2：軸歪が繰返し載荷によって圧縮方向に進展を始める曲率を示す。*3：引張側主筋の伸びが載荷履歴中最大又は極大に達する曲率を示す。*4：モーメント耐力が最大時の80%に達する曲率にDを乗じて示した。ただし、予想には20%下限評価式ではなく、平均値を予想する評価式を用いた。

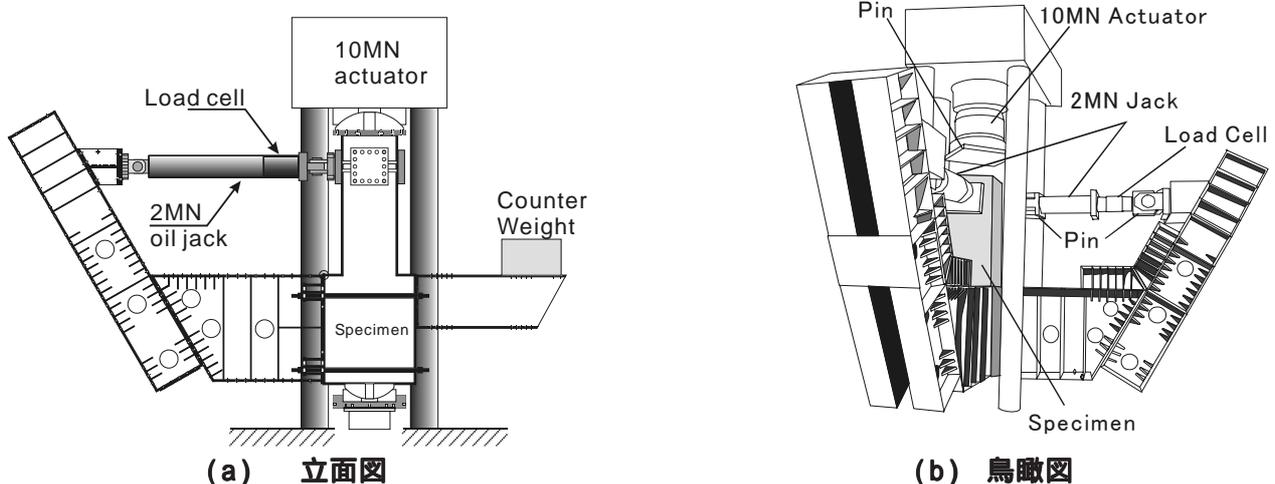


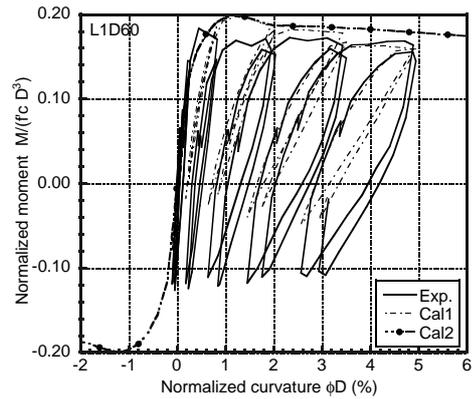
図-4 載荷装置

最大モーメントの約80%に耐力が落ちた。曲率が負側では、モーメント耐力が徐々に大きくなっている。軸歪は正側（高軸力側）で多少の進展が見られるものの、 D が0の時の軸歪はほとんど進展せず安定している。L2NVAでは、X軸及びY軸回りともに部材回転角が正側の場合はモーメント耐力が徐々に大きくなっているが、負側ではモーメント耐力にそれほど大きな変化はない。

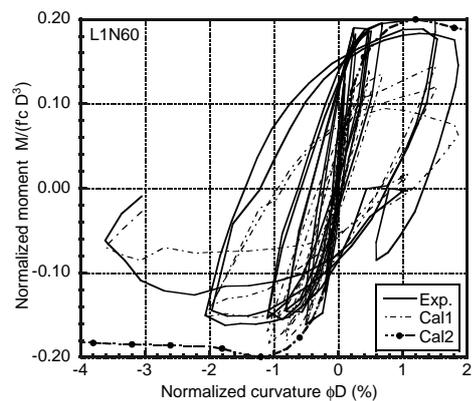
ファイバーモデルを用いた予想値CAL1と実験結果を比較すると、曲率に伴って変化するモーメント及び軸歪の様子を全体としては比較的良く表していると考えられる。しかし、L1N60では、面外変形の影響で正側のモーメント耐力は単調載荷に比べて大きく下がることを予想したが、実験結果は単調載荷に近い結果を示している。また、2方向載荷を行ったL2NVAに関しては、曲率と伴に増加するモーメント耐力をうまく予想できていない。つまり、水平方向の柱頭変位が2方向となった場合には一定軸力（L1N60）でも変動軸力（L2NVA）でもモーメント耐力の予想精度が高くない。また、全ての試験体でモーメント-曲率関係の除荷時剛性がかなり低めかつ除荷曲線を直線的に予想していることも、用いたファイバーモデルの改良すべき点である。

3.2 限界ヒンジ回転角の予想

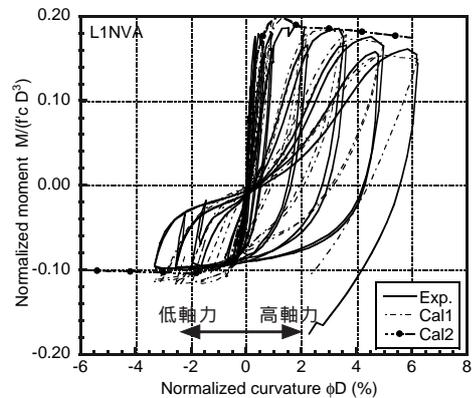
表-3には、本実験に用いた試験体の等価軸力比 ρ 及び限界ヒンジ回転角 R_u を稲井等⁴⁾による方法と加藤等⁵⁾による方法の2種類で計算して示し



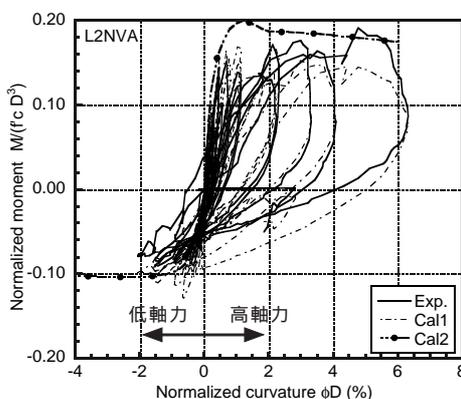
(a) L1D60



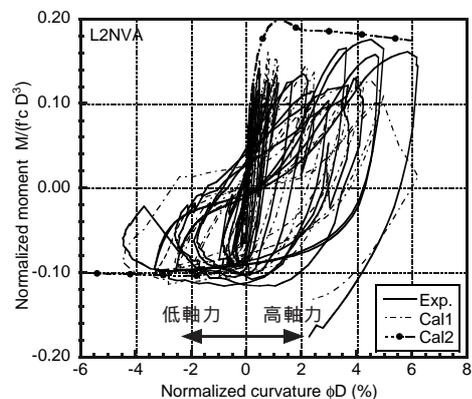
(b) L1N60



(c) L1NVA



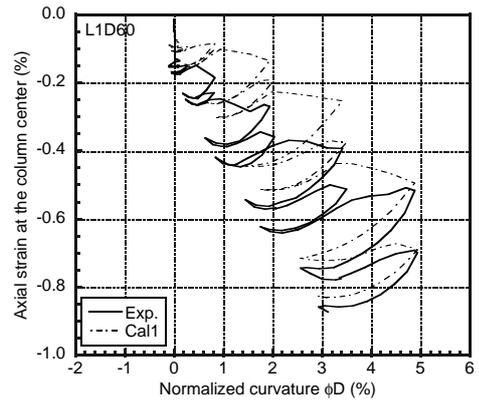
(d) L2NVA(X軸回り)



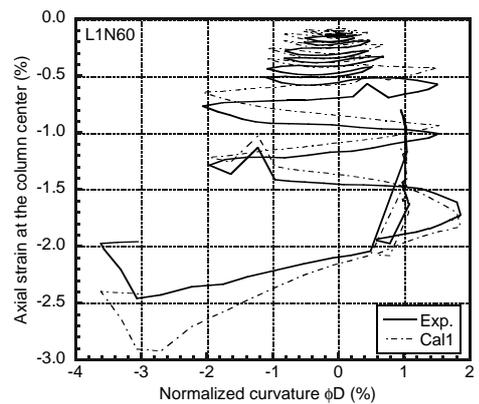
(e) L2NVA(Y軸回り)

図-5 モーメント-曲率関係

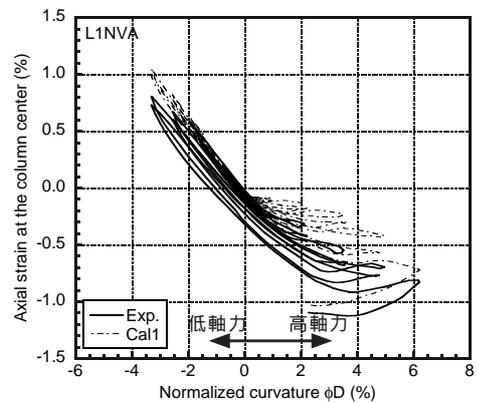
た。稲井等の方法では、一定軸力の2体がヒンジ回転角0.73%において軸歪が繰返し载荷によって圧縮方向に進展を始める「変形限界」に到達すると予想し、変動軸力の2体がヒンジ回転角3.41%において引張側主筋の伸びが载荷履歴中最大又は極大に達し、それ以後柱のエネルギー吸収性状が急変する「安定限界」に到達することを予想した。また、加藤等の方法では、一定軸力の2体がヒンジ回転角0.72%において、変動軸力の2体がヒンジ回転角4.22%において、モーメント耐力が最大モーメントの80%に減少すると予想した。本論文では、ヒンジ回転角 R が D に等しいと仮定してここからの議論を進める。まず、稲井等の予想通り、一定軸力の2体は「安定限界」の前に「変形限界」が現れたことが図-5(a)(b)と図-6(a)(b)から分かる。変動軸力のL1NVAに関しては、引張軸筋の詳細な検討が必要であるが、モーメント-曲率関係から判断すると、ヒンジ回転角が+6%に至ってもエネルギー吸収能は安定しており、予想された「安定限界」に至っているとは言い難い。L2NVAに関しては、「安定限界」が「変形限界」に先行することを予想した。しかし、図-6(d)(e)において、曲率が+2%までは原点が中心の楕円軌跡であるが、曲率が+3%を越えたあたりで楕円の中心が圧縮側に進展をはじめていることから、実験では「変形限界」が先行していると考えられる。加藤等の予想では、モーメント耐力の80%に対応する限界曲率に载荷中に全ての試験体が至るは



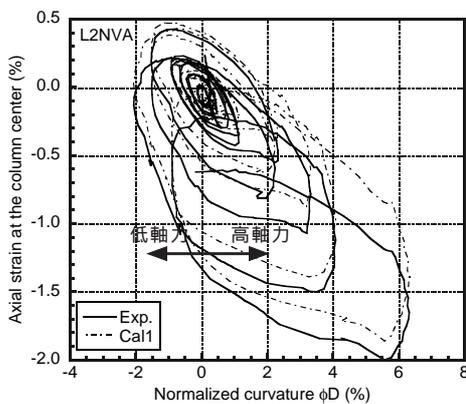
(a) L1D60



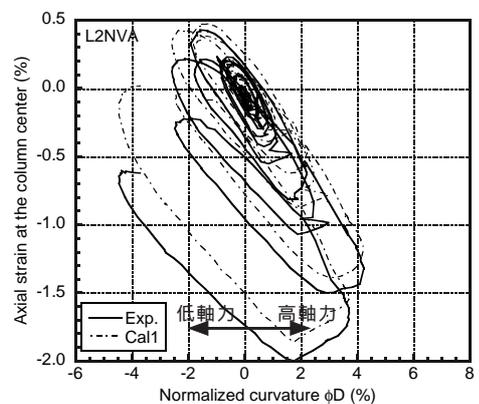
(b) L1N60



(c) L1NVA



(d) L2NVA(X軸回り)



(e) L2NVA(Y軸回り)

図-6 断面中心の軸歪 - 曲率関係

ずである。実験では、L1NVAの曲率正側時に予想曲率を大きく越えてこの「限界状態」が実現されたが、他の試験体ではこの「限界状態」には到達しなかった。

終局限界状態を予想することは、鉛直力を支持する柱では大変重要と考えられる。しかし、稲井等や加藤等の方法では、本実験結果の限界状態を精度良く予想することはできなかったと考える。

3.3 ひび割れ及び剥離状況

図-7にL2NVAの4つの部材回転角におけるひび割れの進展状況を柱基部900mmについて示す。図中の格子は縦横ともに間隔が100mmであり、北東隅が曲げ圧縮を受けるときに高軸力、南西隅が曲げ圧縮を受けるとき低軸力となる。部材回転角が1%までは、新しいひび割れが形成されたり既存のひび割れが進展する。部材回転角が1%を過ぎると、既存のひび割れの幅が大きくなり圧壊によるかぶりコンクリートの剥離は進展するが、新しいひび割れの形成や進展は観察されない。こうした状況は、他の3つの試験体においてもほぼ同様であった。RC部材の補修には、ひび割れの大きさや分布、かぶりの剥落等の情報は欠かせない。しかし、これらを定量的に精度良く予想する方法はなく、実験結果を積み重ねることが今後必要と思われる。

5. 結論

一辺が600mmの正方形断面を持つせん断スパン比2.0のRC隅柱の柱脚部モデル試験体4体を用い、変動軸力や水平2方向載荷が損傷の進展状況に与える影響を確認した。

1. 簡単なファイバーモデルにより、曲率に伴って変化するモーメントや軸歪をかなりの精度で予想することができた。ただし、水平2方向載荷時及び除荷時のモーメントに関しては予想精度が悪く、モデルを改良する必要がある。
2. 稲井等及び加藤等による方法で、等価軸力比に基いた終局限界ヒンジ回転角を計算した。実

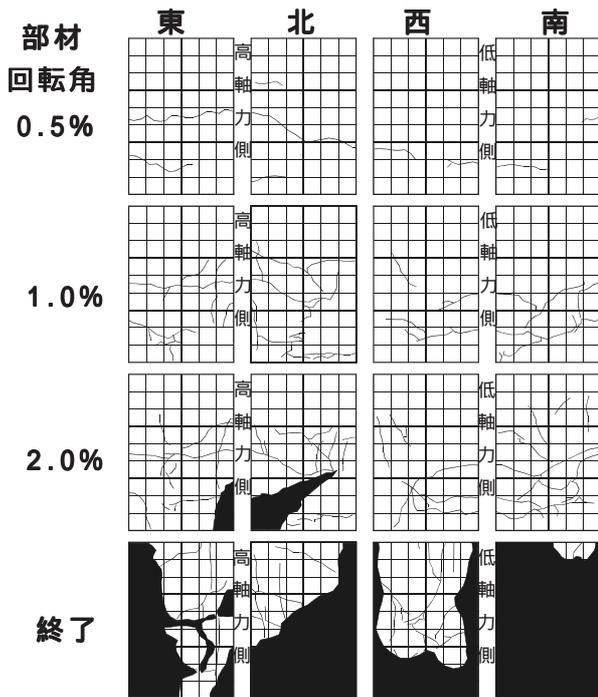


図-7 L2NVAのひび割れ進展状況

験結果との比較から変動軸力の影響を調べたが、本実験結果を十分な精度で予想するまでには至らなかった。

3. ひび割れや圧壊の進展はかなり特徴的な様子が観察されたが、より多くの実験結果を積み重ねて予想モデルをつくる必要がある。

参考文献

- 1) Rao, P.S., Sarma, B.S., Lakshmanan, L., and Stangenberg, F.,: Damage Model for Reinforced Concrete Elements under Cyclic Loading, ACI Structural Journal, V95, No. 6, pp. 682 - 690, 1998
- 2) Park, Y.J and Ang, A.H.S: Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete, ASCE Journal of Structural Engineering, V111, ST No. 4, pp. 722-757, 1985
- 3) 藤本良、河野進、西山峰広、渡辺史夫：多軸載荷を受けるRC柱の履歴特性と損傷評価法に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 22, No.3, pp. 355-361, 2000年
- 4) 稲井栄一、平石久廣：軸力変動を考慮した曲げ破壊する鉄筋コンクリート造柱の限界変形と設計用算定式、日本建築学会構造系論文集第545号, 119-126, 2001年
- 5) 加藤大介、芝讓、松田壮史：変動軸力を考慮したRC柱の変形能の評価法、日本建築学会構造系論文集第506号, 155-161, 2001年

謝辞：実験を遂行するに当たりトビー工業株式会社、高周波熱錬株式会社、神戸製鋼株式会社には実験資材を提供して頂きました。また、実験の遂行に当たっては、当時修士2回生松石長之君、4回生荒井勇作君に多大なる協力を得ました。ここに謝意を表します。