

論文 地震被害を受けた RC 柱の残存軸耐力に関する解析的検討

白石 一郎*¹・高木 仁之*²

要旨： RC柱の軸支持能力喪失は、上階スラブの落下など重大な被害に直結することから、地震時の柱の残存軸耐力を把握することは重要である。耐震診断基準では、地震時の水平変位量に応じて、RC柱の残存軸耐力を破壊モード別に規定しているが、本研究では、地震被害を受けた曲げ破壊型RC柱の残存軸耐力を解析的に考察し、この耐震診断基準値の妥当性について検討したものである。さらに、地震被害を受けた後のRC柱の破壊曲面形状についても議論している。

キーワード： 鉄筋コンクリート柱、地震被害、残存軸耐力、耐震診断基準、曲げ破壊曲面

1. はじめに

地震時に、RC柱のような鉛直部材が軸支持能力を喪失すると、上階スラブの落下などの深刻な被害に直結することから、地震時のRC柱の残存軸耐力を把握することは重要な課題である。

RC建物の耐震診断基準¹⁾における建物の耐震性能は、強度指標C値と靱性指標F値により評価されている。このうち靱性指標F値は、建物の変形性能を表すもので、RC柱の残存軸耐力が、長期軸力を下回る直前の水平変形量として決定されている。したがって、このF値の精度を向上させるためには、柱の残存軸耐力評価の精度向上が不可欠である。図-1は、耐震診断基準における曲げ破壊型RC柱の残存軸耐力である。耐震診断基準では、このように破壊モードやせん断補強量別に、地震時の経験変形が大きくなるほど軸耐力が低下するように規定されているが、この基準値の理論的妥当性については、十分には説明されていない。

本研究は、地震被害を受けた曲げ破壊型RC柱の軸支持能力について解析的手法により考察し、耐震診断基準における残存軸耐力の妥当性を検討するものである。さらに、地震被害を受けた後の曲げ破壊型RC柱の破壊曲面形状についても検討する。

2. 地震被害を受けたRC柱の残存軸耐力の検討方法

2.1 解析対象の試験体

検討対象のRC柱は、表-1に示すN00-N4試験体²⁾とした。この試験体の形状・配筋を図-2(a)に示すが、3, 4階建ての学校建築のRC柱を想定したもので、断面350mm×350mm、高さ1050mmで、およそ実大の1/2スケールである。加力状況および破壊状況を図-2(b), (c)に示すが、逆対称曲げせん断加力を受けるもので、せん断余裕度1.2以上の曲げ破壊型に計画されたものである。

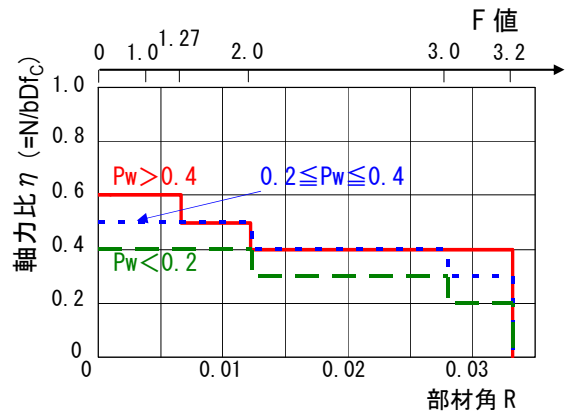


図-1 柱の残存軸耐力と部材角の関係¹⁾ (曲げ柱)

表-1 試験体概要²⁾

試験体名	コンクリート 圧縮強度 $\sigma_c(N/mm^2)$	軸力比 η	主筋比 $P_g(\%)$	せん断補強筋比 $P_w(\%)$	主筋降伏強度 $\sigma_y(N/mm^2)$	せん断補強筋 降伏強度 $\sigma_w(N/mm^2)$
N00-N4	31.0	0.1	0.62	0.46	348	366

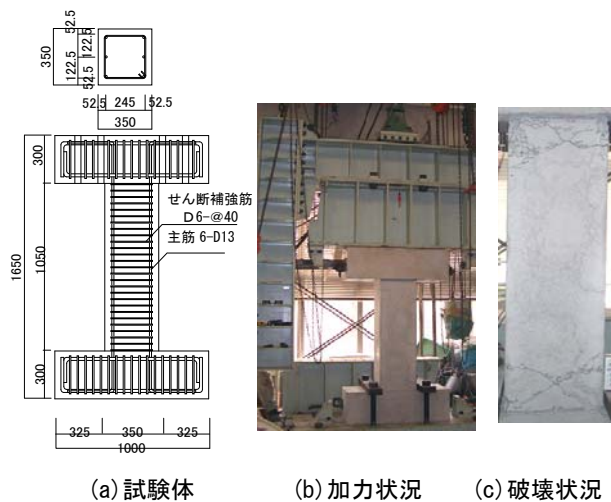


図-2 実験概要

*1 日本工業大学 工学部建築学科 教授 工博 (正会員)

*2 明治大学 理工学部建築学科 准教授 工博 (正会員)

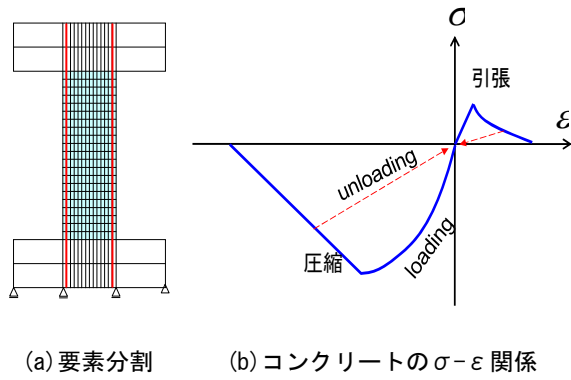


図-3 解析モデル

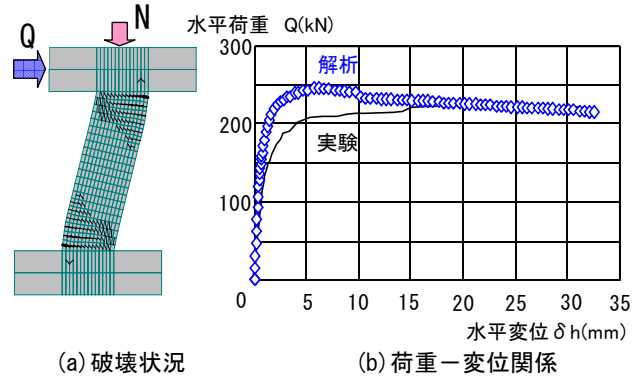
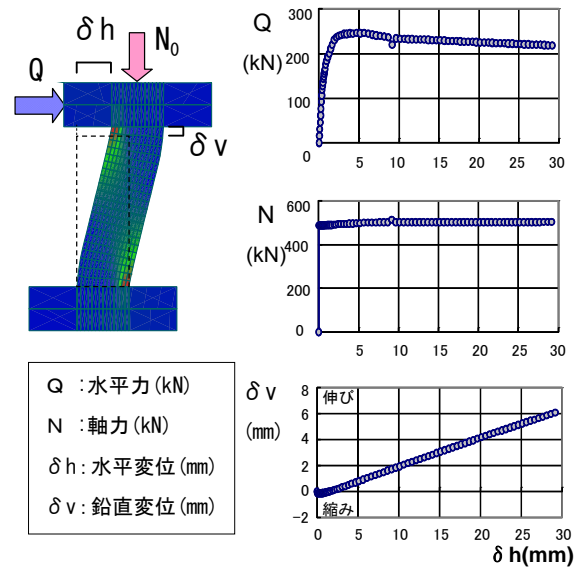


図-4 解析結果

2.2 解析方法および解析モデル

解析手法は文献3)に示す2次元非線形FEM解析であり、解析モデルを図-3(a)に示すが、コンクリートは長方形要素、主筋は線要素、せん断補強筋は分散鉄筋の膜要素でモデル化している。鉄筋の応力-ひずみ関係はbi-linear型とし、コンクリートは、図-3(b)のような等価1軸ひずみに基づく応力-ひずみ関係としたが、詳細は文献3)を参照されたい。

図-4(a)は、解析結果のひび割れ破壊状況である。実験では、図-2(c)のように柱頭、柱脚に曲げひび割れ発生後、圧縮側コンクリート圧壊により破壊に至ったが、解析結果もよく類似している。また、図-4(b)は荷重-変位関係の比較である。曲げ降伏付近でやや差異があるが、曲げ破壊挙動は概ね追跡できていると判断した。なお、実験は繰り返し载荷であったが、比較のために正側包絡線のみ示されている。



(a) 軸力比 $\eta=0.1$ (N00-N4 試験体)

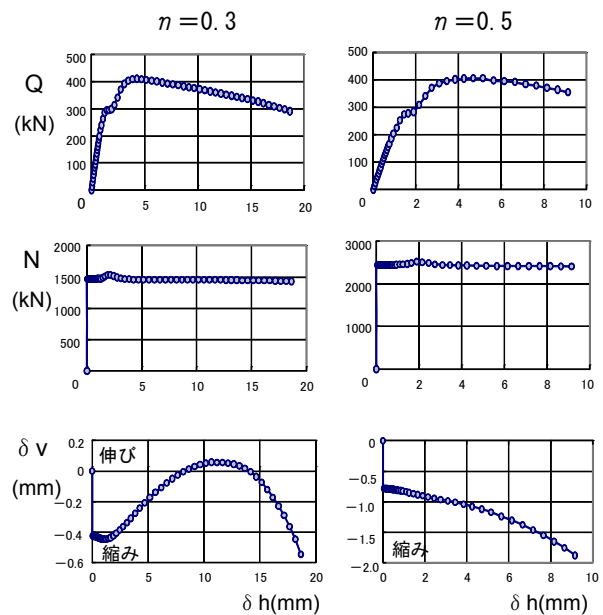
2.3 解析結果の軸方向変位と軸支持能力

曲げ破壊型RC柱の残存軸耐力に関する研究では、RC柱の軸方向変位が伸びから縮みに変化した時点、あるいは、縮み変位が急増した時点をもって、軸支持能力を喪失したと判定されることが多い⁴⁾。

ここでは、まず前節の解析結果における軸方向変位と軸支持能力の関係について考察する。

図-5(a)は、N00-N4試験体を対象に、軸力比 $\eta=0.1$ 程度の初期軸力下で水平加力を実施した解析結果における、鉛直反力や軸方向変位の変化を示す。図より、水平耐力が低下する領域においても、軸方向反力は、初期軸力を保持し、軸方向変位も伸び変位が継続しており、軸支持能力を喪失してはいないと判断される。

さらに、図-5(b)には、N00-N4試験体に対し、初期軸力のみを軸力比0.3と0.5まで増加させた場合の解析結果を示す。図より、軸力比0.3と0.5の高軸力下の水平耐力低下領域においても、軸方向反力は初期軸力を保持している。また、軸方向変位が、伸び変位から縮み変位に変化、あるいは、縮み変位が増加した後も、軸力が



(b) 軸力比 $\eta=0.3, 0.5$

図-5 解析結果の軸方向変位と反力

保持されていることがわかる。

以上のように、本解析によれば、RC柱の軸方向変位のみでは、残存軸耐力を評価できない場合もあるという結果であった。

2.4 残存軸耐力の検討方法

そこで本研究では、図-6に示すような方法により、残存軸耐力の検討を試みた。すなわち、まず図-6(a)の初期軸力載荷後、図-6(b)のように初期軸力下で水平力を漸増せる。次に、所定の水平変位に達した時点で、残存軸耐力を調べるための、軸方向力を変位制御により載荷するものである。

残存軸耐力の検討モデルは次の2ケースとした。すなわち、図-6(c)のように残留変位をそのまま拘束した状態で軸力載荷する場合と、残留変位を0まで戻した後に軸力載荷を行う2ケースである。残留変位をそのまま拘束した解析は、地震後の建物に残留変位が残った場合で、残留変位を0まで戻す解析は、地震後の残留変位がない場合を想定したものである。

この2ケースの残存軸耐力検討における境界条件の妥当性については、次のような検討を実施した。図-7は、曲げせん断加力により、所定の水平変位を生じさせた後に、軸方向を作用させたときの、残留水平変位の増減を調べた解析の結果である。この解析結果によれば、部材角 $R=0.06$ を超えるような場合には、軸方向載荷により残留水平変位が増加する傾向がみられる。このような場合には、増加する残留水平変位を拘束する境界条件では、残存軸耐力を過大に評価することとなる。しかしながら、通常の構造設計では、RC柱の部材角は0.03程度以下で検討されることを考えると、残留水平変位は、軸方向載荷により減少する傾向と判断される。

したがって、地震被害を受けたRC柱の残存軸耐力は、残留水平変位拘束と、残留水平変位0の2ケースにより、安全側に評価できると考えられる。

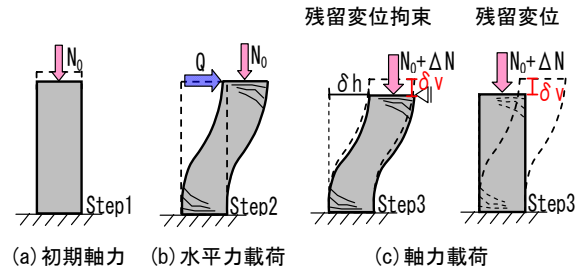
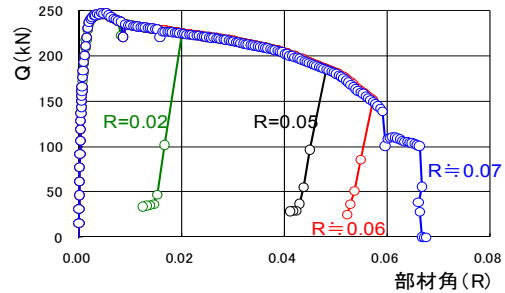
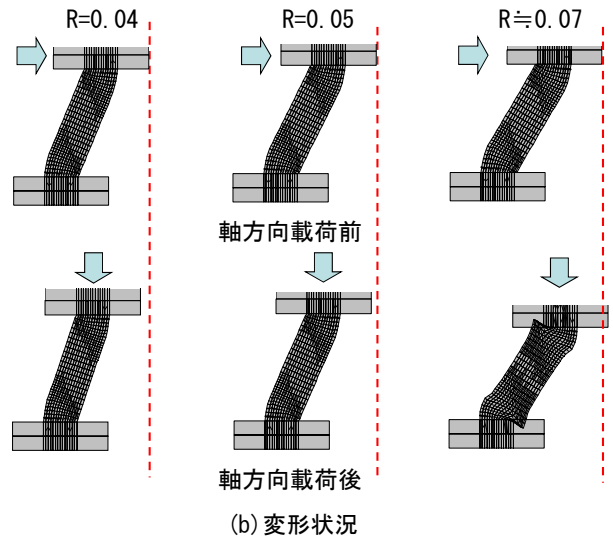


図-6 残存軸耐力の検討方法

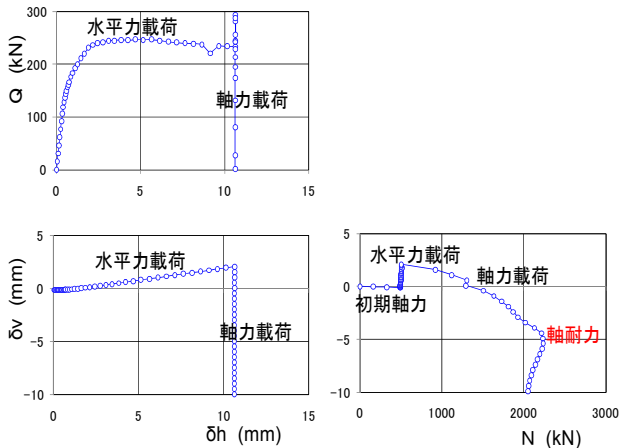


(a) 荷重-変位関係

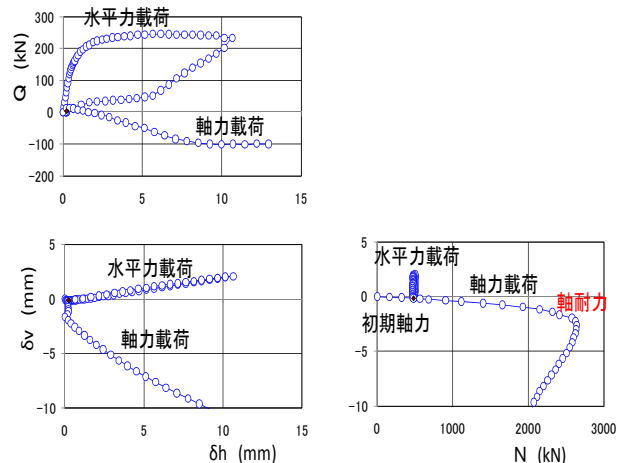


(b) 変形状況

図-7 軸力載荷による残留水平変位の増減



(a) 残留変位拘束



(b) 残留変位0

図-8 残存軸耐力の解析結果 (経験部材角 $R=0.01$ で軸方向載荷)

3. 地震被害を受けたRC柱の残存軸耐力

3.1 解析結果の荷重－変位関係

N00-N4 試験体に対して、部材角 1/100 まで水平変位を与えた後に、軸力を載荷した解析結果を図-8に示す。図-8(a)は、残留変位を拘束した状態での解析結果であるが、軸力載荷以後、軸力の増加とともに、鉛直変位が伸びから縮みに移行している。軸力は 2200kN ($\eta \approx 0.6$) 程度で最大となり、その後軸力が低下している。したがって、部材角 1/100 まで経験した RC 柱で、残留変位を拘束した場合の残存軸耐力は、無損傷の RC 柱の半分程度まで低下するという結果となった。

これに対して、図-8(b)は、部材角 1/100 まで変形させ、その水平変位を 0 まで戻した後に軸力を載荷した解析結果である。徐荷時に残留水平変位の戻りが大きめとなっているのは、原点指向のコンクリート構成則によるものである。解析結果の残存軸耐力は 2600kN ($\eta \approx 0.7$) 程度となり、残留変位拘束の場合より残存軸耐力が大きくなっている。

図-9には、水平力載荷時および軸耐力時の柱脚鉛直応力度分布を示す。残留変位拘束の軸耐力時には、外側の鉛直応力度が小さくなっているのに対し、残留変位を 0 とした場合には、全域に大きな鉛直応力度が分布しており、残存軸耐力が大きくなっていることと対応している。

このように、解析結果によれば、地震時に部材角 1/100 程度の水平変位を受けた曲げ柱の残存軸耐力は、無損傷の RC 柱に比べて低下し、残留変位を拘束した場合には半分程度まで劣化しているという結果であった。ここで、軸力比は、耐震診断基準と合わせるために、作用軸力をコンクリートのみの軸耐力で除しており、主筋は考慮していない。

3.2 経験部材角と残存軸耐力の関係

前節の残存軸耐力の検討方法において、図-10のように、軸方向力載荷に移る部材角を変化させる複数の解析を実施することにより、地震時の経験部材角と残存軸耐力の関係を検討することができる。

解析結果の経験部材角と残存軸耐力の関係を図-11に示す。図-11(a)は、N00-N4 試験体を対象とした解析結果であるが、前節での検討と同様に、残留変位拘束の場合の方が、残留変位 0 の場合より、残存軸耐力が小さくなっている。よって、これ以降の検討では、残存軸耐力を小さめに評価する残留変位拘束の場合について主に議論することとする。

同図には、耐震診断基準の残存軸耐力も示されているが、解析結果に比べて安全側の値であり、また、水平変位の増加に伴う、残存軸耐力の減少傾向も同様となっている。

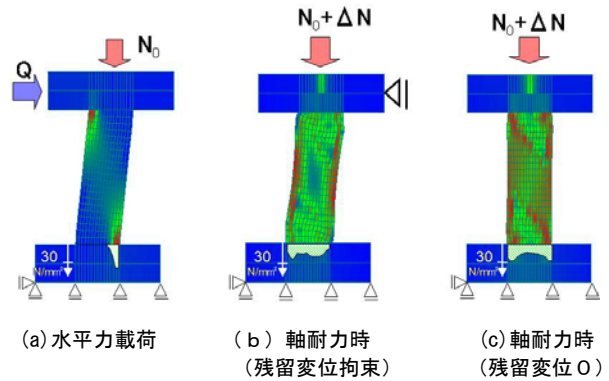


図-9 柱脚の鉛直応力度分布

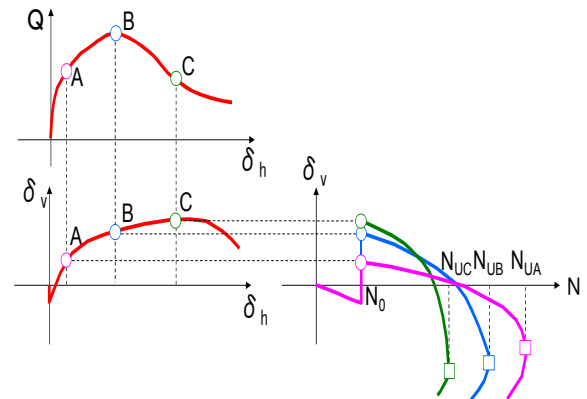


図-10 経験部材角による残存軸耐力の計算方法

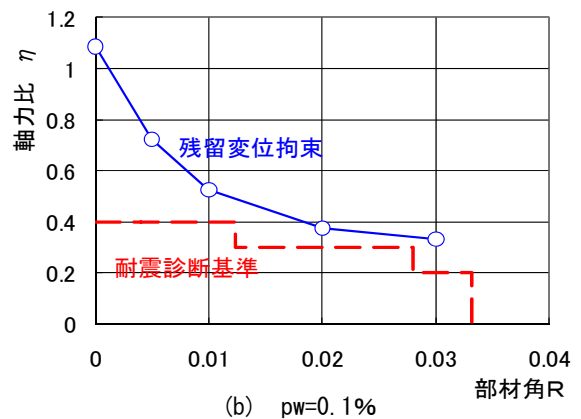
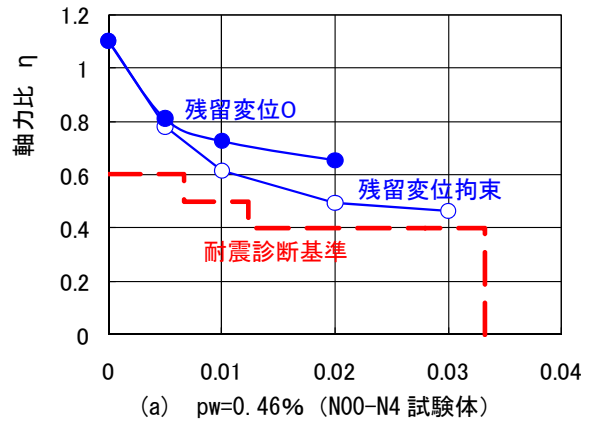


図-11 経験部材角と残存軸耐力の関係

図-11 (b) は、N00-N4 試験体のせん断補強筋比のみを、0.1%まで減らした場合の残存軸耐力の解析結果である。図-11 (a) と比較すると、せん断補強筋を減少させることにより、残存軸耐力も低下していることがわかる。また、耐震診断の残存軸耐力基準値との比較では、せん断補強筋が極端に少ない曲げ柱においても、基準値は安全側という結果であった。

図-12 には、水平荷重時および軸力載荷時の鉛直応力度分布を示す。経験部材角 $R=0.005$ の解析は、曲げ降伏直後で軸力を載荷したケースであるが、軸耐力時では、ほぼ全域で圧縮応力度となっており、残存軸耐力は $\eta=0.75$ 程度となっている。これに対して、経験部材角が大きくなるほど、軸耐力時では、コンクリートの一軸圧縮強度よりかなり小さな鉛直応力度となっており、前節までの残存軸耐力の低下と符合している。

3.3 残存軸耐力への初期軸力の影響

前節までの検討は、初期軸力 $\eta=0.1$ の解析結果に基づくものであった。ここでは、初期軸力を $\eta=0.1$ から 0.4 まで増加させ、残存軸耐力への初期軸力の影響を調べる解析を実施した。

解析結果を図-13 に示すが、初期軸力を変化させた解析結果に差異はほとんどなく、通常の構造設計で想定する初期軸力の範囲では、残存軸耐力への初期軸力の影響は小さいという結果であった。

4. 地震被害を受けた曲げ柱の破壊曲面

4.1 無損傷 RC 柱の曲げ破壊曲面

本章では、無損傷の曲げ破壊曲面が、地震被害によりどのように変化するかについて検討する。

まず、無損傷の曲げ破壊型 RC 柱の曲げ破壊曲面を図-14 に示す。これは、N00-N4 試験体を対象に、断面の曲げ解析により求めたものである。図中には、N00-N4 試験体の実験結果および FEM 解析結果も示されているが、実験結果は断面の曲げ解析結果とよく対応している。また、一定軸力下での曲げせん断加力および比例荷重の FEM 解析の結果も、曲げ破壊曲面とよく対応しており、せん断余裕度 1.2 程度の曲げ柱では、平面保持仮定に基づく曲げ破壊曲面が妥当なものであることを確認した。

4.2 地震被害を受けた曲げ破壊型 RC 柱の破壊曲面

図-15 には、残留水平変位拘束の解析における、初期軸力載荷、水平力載荷および軸力載荷に至る軸力とせん断力の荷重経路が示されている。なお、同図には、初期軸力比 η が 0.1 と 0.3 の 2 つの解析結果が示されている。

図-15 (a) は、部材角 $R=0.002$ まで水平荷重した後、軸力を載荷した解析結果である。経験部材角 $R=0.002$ では、曲げ降伏が開始するような時点であり、圧縮域コンクリートはあまり損傷していないため、軸力を載荷して

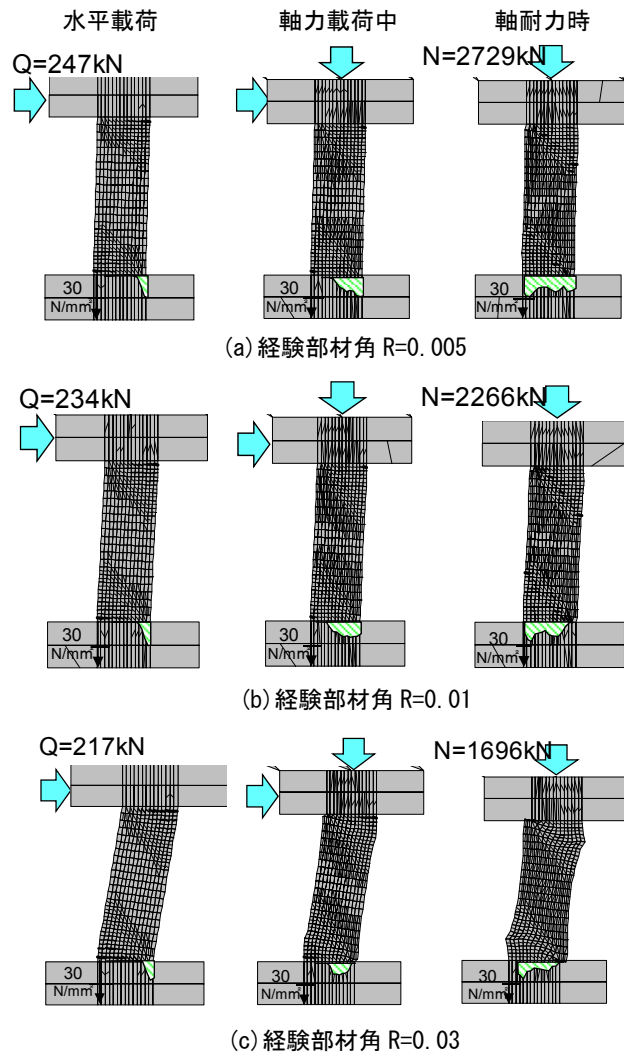


図-12 鉛直応力度分布の変化 (N00-N4 試験体)

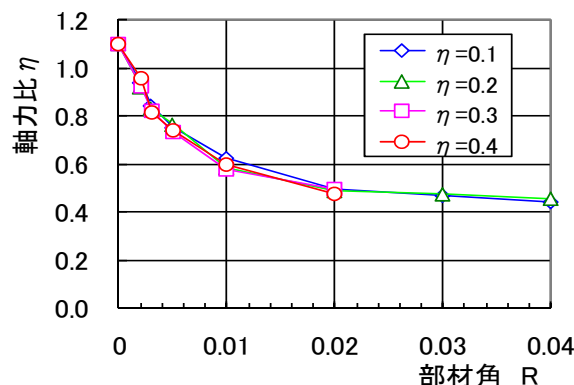
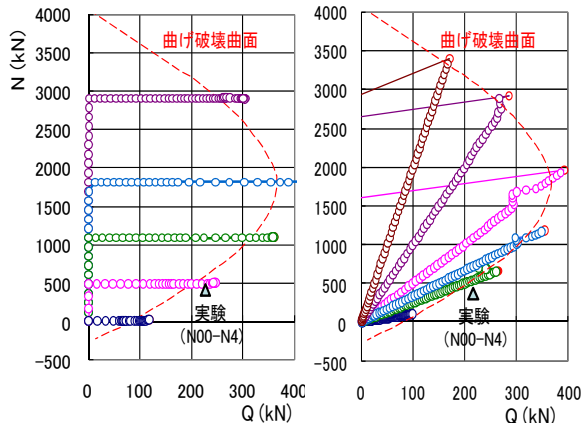


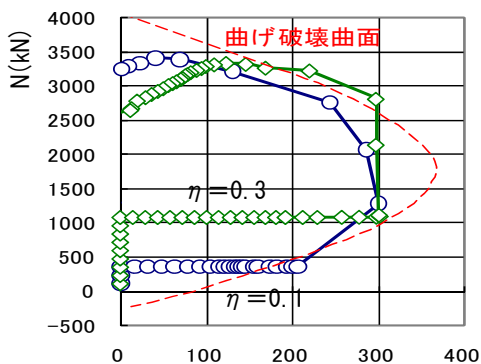
図-13 残存軸耐力への初期軸力の影響

も、せん断力はあまり低下せず軸力が増加している。その後、軸力の増加につれて、曲げ破壊曲面に沿って、せん断力が減少している。この荷重経路は、軸力増加に対する抵抗可能なせん断力を示しており、経験部材角 $R=0.002$ の損傷を受けた曲げ破壊型 RC 柱の破壊曲面を表していると考えられることもできる。

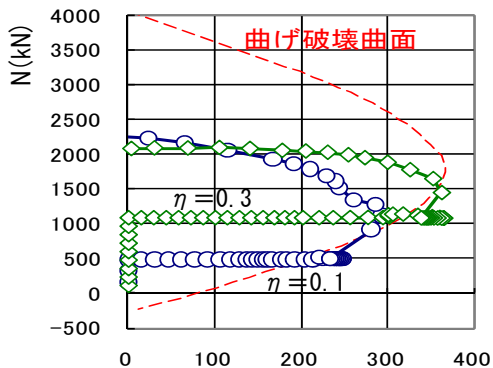


(a) 一定軸力解析 (b) 比例載荷解析

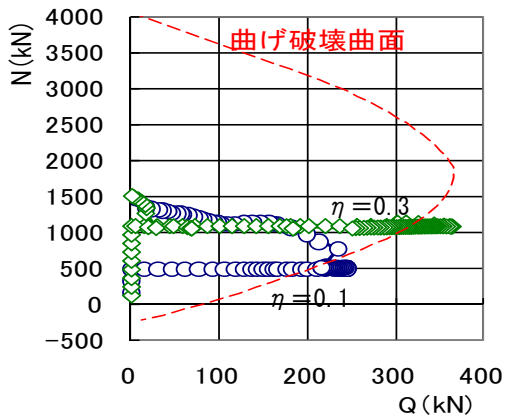
図-14 無損傷RC柱の曲げ破壊曲面



(a) 経験部材角 R=0.002



(b) 経験部材角 R=0.01



(c) 経験部材角 R=0.03

図-15 解析結果の載荷経路

図-15 (b), (c)は、それぞれ経験部材角 $R=0.01$ および $R=0.03$ までの水平力載荷後、軸力を作用させた場合の載荷経路である。図より、経験部材角が大きくなるほど、すなわち、地震時の損傷が大きいほど、軸耐力方向のふくらみが小さい載荷経路となっている。

以上のように、この載荷経路を地震被害後の曲げ破壊曲面と考えれば、地震時の経験部材角が増加するほど、無損傷の曲げ破壊曲面に比べて縮小するが、その形状は相似形ではなく、軸耐力方向に大きく縮小するという結果であった。

5. まとめ

本研究では、地震被害を受けた曲げ破壊型RC柱の残存軸耐力について解析的な検討を行った。本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) RC柱の軸方向変位が伸びから縮みに移行する時点あるいは、縮み変位が増加する時点においても、軸力が保持されている場合も存在し、柱の軸方向変位のみから軸支持能力の喪失を判定できない場合もあると考えられる。
- 2) 地震後に残留変位がそのまま拘束される場合と、残留変位が残らない場合の2ケースについての残存軸耐力に関する解析によれば、地震時の経験水平変位が大きくなるほど、RC柱の残存軸耐力は減少するという結果であった。
- 3) 耐震診断基準における曲げ破壊型RC柱の残存軸耐力は、解析結果に比べて安全側の値であった。
- 4) 残留水平変位拘束の解析結果の載荷経路を、地震被害を受けた曲げ破壊型RC柱の破壊曲面と考えれば、その破壊曲面形状は、無損傷の曲げ破壊曲面と相似的には縮小せず、軸耐力方向に大きく縮小するものであった。

参考文献

- 1) 国土交通省住宅局建築指導課：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説、2003
- 2) 高木仁之、白石一郎、松戸正士、佐々木仁：火熱を受けた鉄筋コンクリート柱の強度・変形性能の劣化に関する研究（その1、その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 355-358, 2007
- 3) ATENA: Computer Program for Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete, Cervenka Consulting, Revision Oct. 31, 2005
- 4) 例えば、堀田他：曲げ圧縮破壊する鉄筋コンクリート柱の安定限界点に関する研究（その1、その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 803-806, 1999