

# 論文 地震被害を受けたRC柱の破壊曲面形状に関する解析的検討

白石 一郎\*1・高木 仁之\*2

**要旨:** RC骨組構造の弾塑性解析では、部材の曲げ破壊は曲げ破壊曲面により判定され、その後の挙動は、塑性論に基づく場合が多い。さらに、せん断破壊に対しても、破壊後もその強度を保持しつつ変形が進行するようなモデルがされている。しかし、このような仮定は、コンクリート構造には安全側の評価でなく、より実状にあったモデル化が必要であり、そのためには地震被害を受けた破壊曲面の検討が不可欠である。本研究では、より詳細な地震時の破壊挙動を追跡することを目的に、地震被害を受けたRC柱の曲げ破壊曲面およびせん断破壊曲面の形状がどのように変化するかについて解析的な検討を行った。

**キーワード:** 鉄筋コンクリート柱, 地震被害, 曲げ破壊曲面, せん断破壊曲面, 残存軸耐力, FEM 解析

## 1. はじめに

通常の構造設計に用いられる骨組構造弾塑性解析では、柱部材の降伏・破壊やその後の挙動は、図-1のような破壊曲面により判断される場合が多い。すなわち、曲げ柱では、図-1(a)のように、応力状態が破壊曲面に到達すると曲げ破壊と判断され、その後は、塑性論の中立軸荷のように、破壊曲面上を移動すると仮定される。しかしながら、地震による損傷が累積した後も、初期破壊曲面がそのまま保持される仮定については検討すべき点が残されている。

さらに骨組解析では、せん断柱に対しても応力状態がせん断強度に達した時点でせん断破壊と判定され、その後も、せん断強度を保持したまま変位が増大するような仮定が設けられている。しかし、せん断破壊柱は、破壊後耐力低下を伴うものであり、せん断強度を保持するモデル化は明らかに危険側の仮定である。

地震被害を受けたせん断破壊曲面については、芳村らの研究<sup>1), 2)</sup>がある。この研究では、塑性流れ則および破壊曲面縮小の概念を用いて、図-1(b)の縮小破壊曲面(1)のように、引張軸耐力は変化させずに、圧縮軸耐力とせん断強度を相似的に縮小させるような破壊曲面を提案している。また、島崎は、この破壊曲面縮小の概念に基づき、損傷後の破壊曲面を設定するパラメータを実験結果から同定することを試みている<sup>3) 4)</sup>。堀田らは、図-1(b)中の縮小破壊曲面(2)のように、原点に向かっ

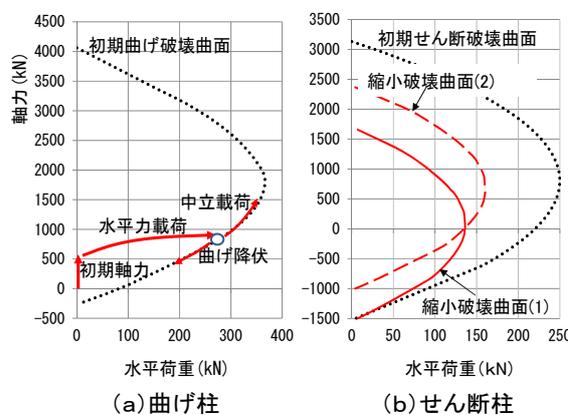


図-1 RC柱の破壊曲面

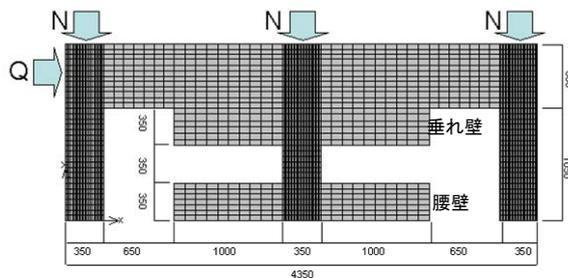


図-2 解析モデル

表-1 試験体概要

試験体名	コンクリート 圧縮強度 $\sigma_c(N/mm^2)$	軸力比 $\eta$	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

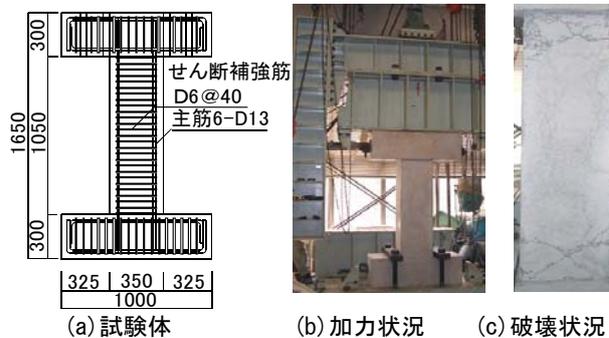


図-3 実験概要 (N00-N4 試験体)

\*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)

て縮小する等方軟化を仮定し、せん断破壊型部材を含むRCフレームの破壊挙動を解析している<sup>5)</sup>。

このせん断破壊曲面縮小の概念は、せん断柱の破壊挙動を明解に説明できる優れたものであるが、どのような形状に縮小するかについては十分には検討されていない。また、曲げ破壊曲面についても、地震被害を受けた後も、初期破壊曲面を保持し続けるかどうかについても、検討の必要がある。

本研究では、より詳細な地震時破壊挙動の追跡を目的として、地震被害を受けたRC柱の破壊曲面形状について、解析的手法により考察する。

## 2. せん断柱を含むRCフレームの破壊挙動

### 2.1 解析概要

図-2に示すようなRC造3本柱フレームを用いて、破壊に至る挙動に関するFEM解析<sup>6)</sup>および骨組構造弾塑性解析<sup>7)</sup>を実施した。3本柱のうち、引張柱および圧縮柱はともに曲げ柱であり、図-3、表-1に示すN00-N4試験体<sup>8)</sup>とした。中柱はせん断破壊型となるように、N00-N4試験体に柱幅と同厚の垂れ壁と腰壁を設けたものである。FEM解析に用いた材料特性を図-4に示す。なお、3本柱の軸力比 $\eta$ は0.1としているが、他に軸力比を変えた解析も実施した。

### 2.2 解析結果および考察

#### (1) 荷重-変位関係

骨組構造解析およびFEM解析結果を図-5～図-7に示す。図-5のひび割れ破壊状況より、引張柱および圧縮柱は、柱頭・柱脚のみに曲げひび割れが発生し曲げ破壊型となっており、中柱は、全域に斜めひび割れが生じ、計画通りにせん断破壊となっていることがわかる。

図-6(a)に示す骨組解析結果の荷重-変位関係をみると、せん断破壊型の中柱は、せん断強度に達した以降も、強度を保持したまま水平変位が増大している。これに対して、図-6(b)のFEM解析結果では、中柱がせん断破壊すると耐力低下し、フレーム全体の水平荷重が減少している。図-7には、FEM解析による軸力と水平変位の関係が示されている。図より、中柱のせん断破壊後、中柱の軸力が減少し、引張柱と圧縮柱に中柱の負担していた軸力が再配分され、フレーム全体の軸力が一定に保たれていることがわかる。

#### (2) 荷重履歴

骨組解析結果とFEM解析結果の荷重履歴を図-8に示すが、軸力比 $\eta=0.2$ および0.3の解析結果も示されている。図中には、曲げ破壊曲面およびせん断破壊曲面も示されているが、曲げ破壊曲面は平面保持を仮定した断面の曲げ解析により求めた。またせん断破壊曲面は、式(1)、(2)に示す芳村らの2次曲線の破壊曲面である<sup>1), 2)</sup>。

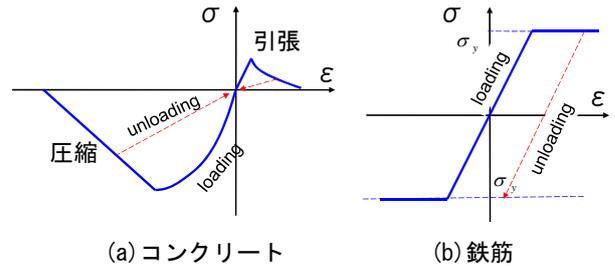


図-4 材料の応力-ひずみ関係

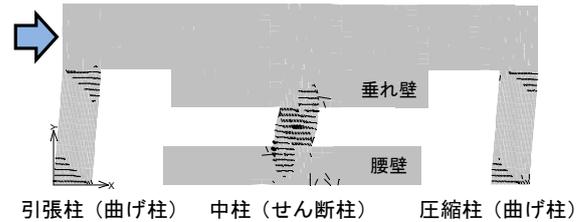
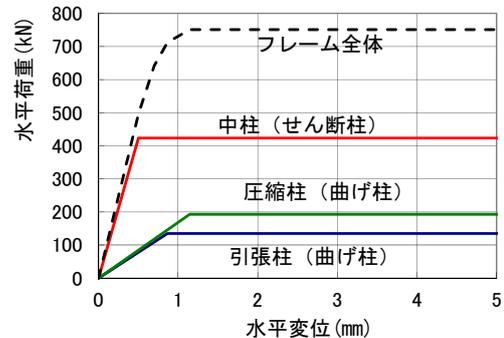
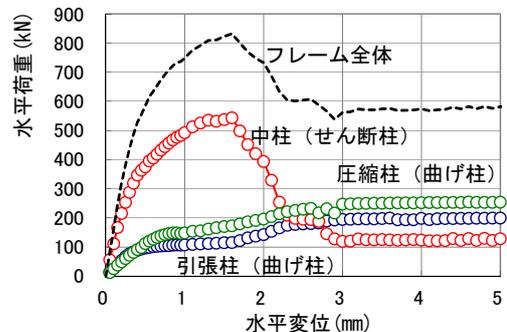


図-5 ひび割れ破壊状況



(a) 骨組解析結果



(b) FEM 解析結果

図-6 水平荷重-変位関係

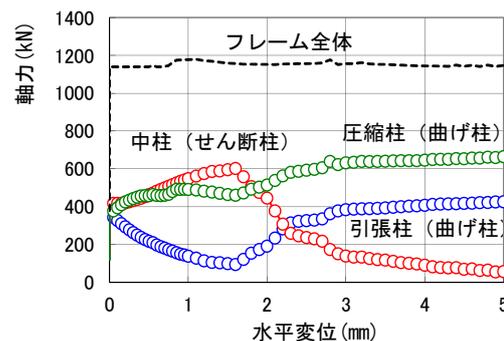


図-7 軸力-変位関係

なお、式中の記号については当該論文を参照されたい。

$$N_T = a_g \sigma_y, \quad N_C = a_g \sigma_y + bDF_C \quad (1)$$

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.053 p_t^{0.23} (18 + Fc)}{M/(Qd) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_w \sigma_{wy}} + 0.1 \sigma_0 \right\} bj \quad (2)$$

$$Q = - \frac{Q_{su}}{(N_0 - N_T)(N_c - N_0)} \left( N - \frac{N_c + N_T}{2} \right)^2 + \frac{(N_c - N_T)^2 Q_{su}}{4(N_0 - N_T)(N_c - N_0)}$$

骨組解析結果をみると、図-8 (a), (c) のように引張柱および圧縮柱は、水平力の転倒曲げによる軸力変動のある荷重履歴となっている。また、 $\eta=0.3$  の解析結果ではやや曲げ破壊曲面との差異もみられるが、 $\eta=0.1, 0.2$  では解析結果の降伏荷重と曲げ破壊曲面がよく対応している。なお、図-8 (b) の中柱で、骨組解析のせん断強度がせん断破壊曲面と一致しているのは、同一のせん断強度式で評価しているためである。

一方、FEM 解析結果をみると、中柱のせん断破壊以前では、骨組解析とほぼ同様の荷重履歴となっている。しかし、中柱がせん断破壊すると、図-8 (b) のように水平荷重および軸力が減少し、原点に戻るような荷重履歴となっており、骨組解析結果と大きく異なっている。図-8 (a), (c) の引張柱、圧縮柱では、中柱のせん断破壊後、圧縮軸力の増加とともに水平荷重も増大し、曲げ破壊曲面上を移動するような荷重履歴となっている。

### 2.3 水平荷重を受けた後の軸力荷重解析

図-8 (a), (c) の FEM 解析結果の荷重履歴は、塑性論における完全弾塑性モデルの中立載荷と類似している。しかしながら、コンクリートのような脆性材料で構成される RC 柱が、地震被害が累積した後、このまま初期破壊曲面上の中立載荷を継続しつづけることは考えづらい。そこで、中立載荷がどの程度継続するかを調べるために、図-9 のような水平力荷重を加えた後、水平変位を拘束した状態で、鉛直下方に強制変位を作用させる FEM 解析を実施した。初期軸力比  $\eta=0.2$  で、部材角  $0.007$  (水平変位  $7\text{mm}$ ) から軸方向荷重を実施した解析結果を

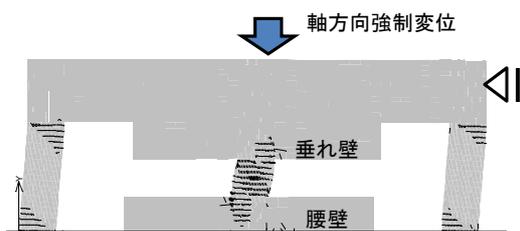
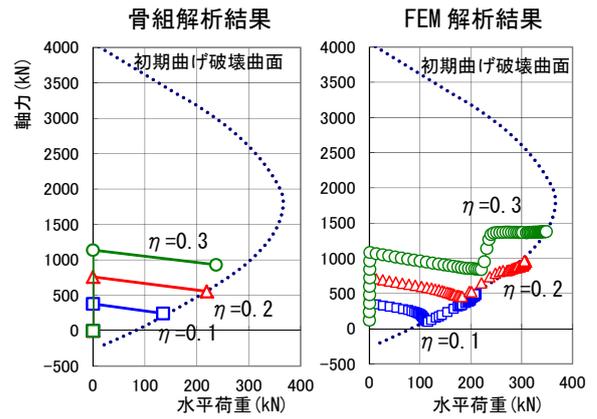
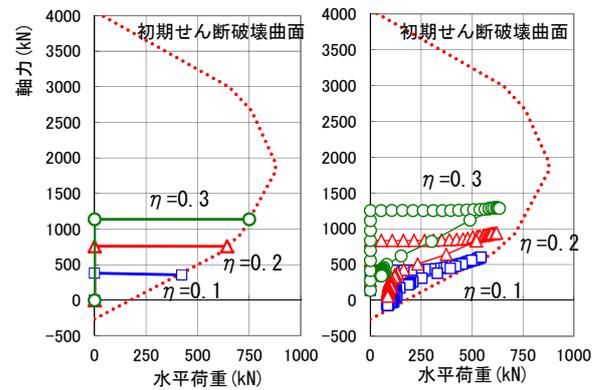


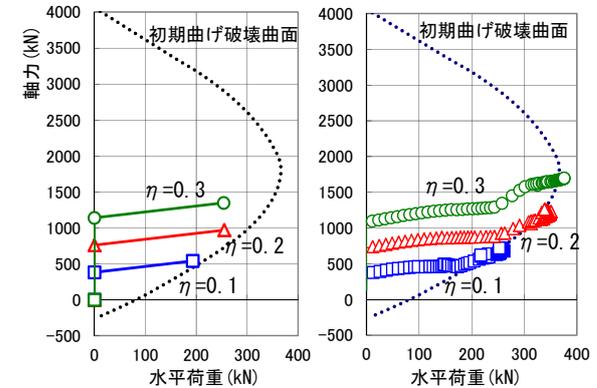
図-9 軸方向荷重解析



(a) 引張柱 (曲げ柱)

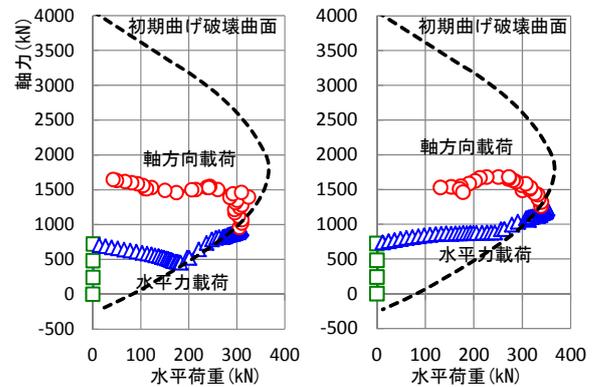


(b) 中柱 (せん断柱)

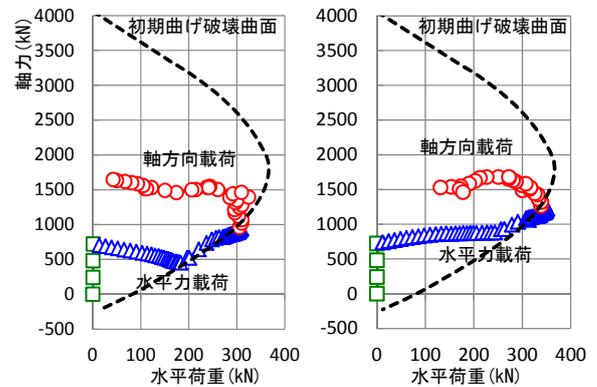


(c) 圧縮柱 (曲げ柱)

図-8 荷重履歴



(a) 引張柱



(b) 圧縮柱

図-10 軸方向荷重を含む荷重履歴

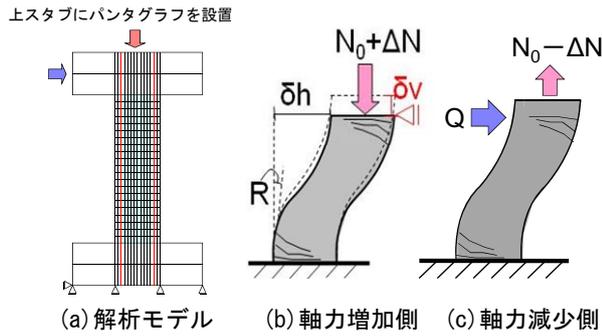


図-11 解析概要

図-10に示す。図より、曲げ降伏後、初期曲げ破壊曲面上を移動する荷重履歴をとり、その後初期破壊曲面の内側に入り込むような経路をたどった。このように地震被害を受けた曲げ破壊曲面は、初期曲げ破壊曲面より縮小すると考えられ、次章でさらに詳細な検討を行う。

### 3. 地震被害を受けたRC柱の曲げ破壊曲面形状

#### 3.1 解析概要

本章では、図-11(a)に示す単独柱を対象に、逆対称曲げを作用させることにより、地震被害を受けた曲げ破壊曲面形状について検討する。柱の形状、配筋は、表-1、図-3と同様である。解析方法は、図-12のように初期軸力下で、所定の部材角に達するような水平荷重を受けた後、軸方向に強制変位を加えるもので、文献9)と同様である。ここで、水平荷重は柱脚の水平反力から評価したRC柱のせん断力を示している。

このように、水平変位を拘束した上で、圧縮変位を加えることにより、圧縮軸力が増加する状態での、抵抗可能なせん断力が求まる。本報では、この荷重履歴を地震被害を受けたRC柱の破壊曲面と判断した。さらに、本報では、図-11(c)のように、軸方向引張変位を加えると同時に、せん断力を増加させる方向に水平変位を増加させる解析により、圧縮軸力が減少する側での破壊曲面形状についても検討した。

#### 3.2 解析結果および考察

軸力増加側および減少側の2ケースの解析結果を合わせて図-13に示す。図-13(a)に示す経験部材角  $R=0.002$  のように地震被害が軽微な場合は、初期曲げ破壊曲面とほぼ同様な破壊曲面形状となっている。

図-13(b), (c)のように、軸力増加側の破壊曲面は、経験部材角が大きくなると、水平耐力方向に比べて軸耐力方向が大きく縮小する形状となっている。初期軸力の違いについてみると、初期軸力が高いほど軸耐力方向に大きく縮小する傾向がみられるが、軸耐力の最大値については差異がみられない。

軸力減少側での破壊曲面形状についてみると、経験部材角が増加しても、初期曲げ破壊曲面からほとんど変化

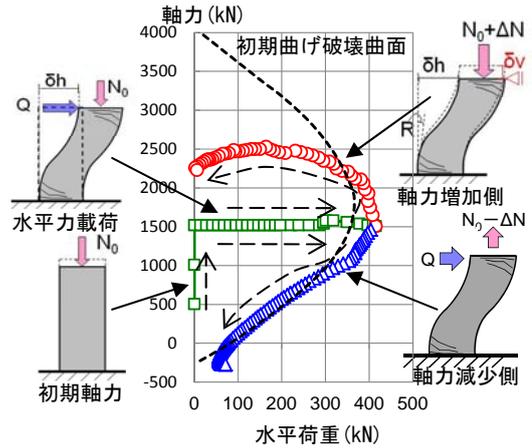


図-12 地震被害を受けた破壊曲面の解析方法

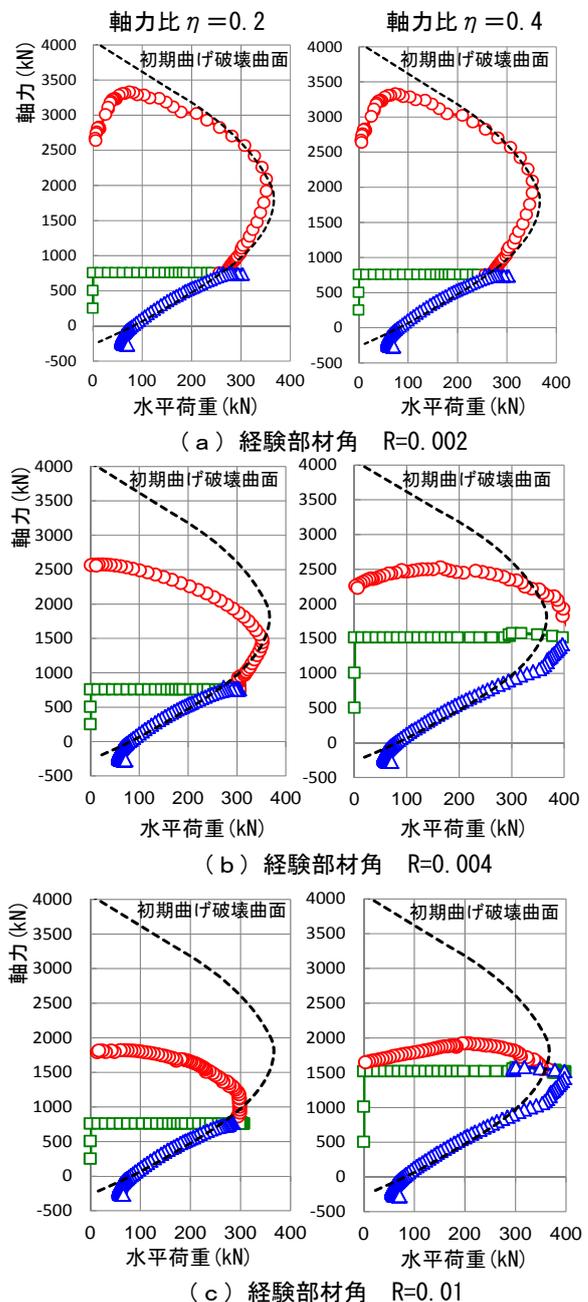


図-13 地震被害を受けた曲げ破壊曲面

していないことがわかる。これは、引張側ではコンクリート損傷の影響が小さく、主筋の影響が大きいためと考えられる。

曲げ柱の軸耐力減少と水平耐力低下の関係を図-14に示す。図の縦軸は、地震被害を受けたRC柱の残存軸耐力を初期軸耐力で除したもので、横軸は、軸方向荷重開始時の水平荷重を曲げ強度時せん断力で除したものである。図より、曲げ柱では水平耐力の低下に比べて、軸耐力が大きく減少している。特に、通常の構造設計で想定されるような軸力比 $\eta=0.2$ では、軸耐力のみが大きく低下する傾向となっている。

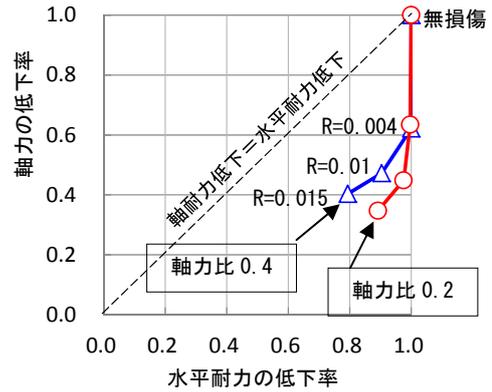


図-14 軸耐力と水平耐力の低下傾向（曲げ柱）

#### 4. 地震被害を受けたRC柱のせん断破壊曲面形状

##### 4.1 解析概要

解析対象のせん断柱は、表-2のようにN00-N4試験体のコンクリート強度を低下させ、主筋量を増加させることで、せん断破壊型となるように計画したものである。解析手法は、前章までと同様のFEM解析である。

##### 4.2 解析結果および考察

図-15に、解析結果のひび割れ破壊状況と荷重-変位関係を示すが、せん断柱は、主筋が未降伏であったことに加えて、ひび割れ破壊状況や終局強度後の耐力低下などから、計画通りの破壊モードである判断される。

##### (1) 初期せん断破壊曲面

初期軸力をパラメータとして、水平力荷重を実施した解析結果を図-16に示す。図中には、芳村らの提案破壊曲面や極限解析の破壊曲面も示されているが、FEM解析結果は、芳村らの破壊曲面とよく対応した。

##### (2) 地震被害を受けたRC柱のせん断破壊曲面

地震被害を想定した水平変位を経験させた後に、軸方向変位を作用させた場合の荷重履歴を図-17に示す。経験部材角 $R=0.002$ の場合についてみると、引張軸力側では、初期せん断破壊曲面とほとんど差異がみられない。一方、圧縮側では、軸耐力および水平耐力ともに減少し、初期破壊曲面から相似的に縮小する傾向となっている。

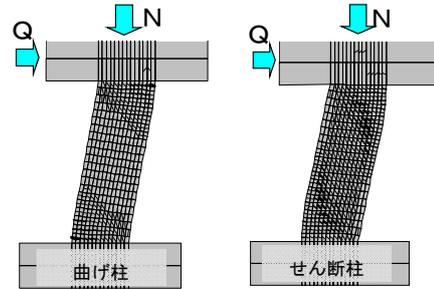
経験部材角が $R=0.01$ と大きくなると、圧縮側の破壊曲面がさらに縮小し、その形状は、初期破壊曲面とやや相似形状となっている。引張側については、まず水平耐力は変化せず直線的に初期破壊曲面に近づき、その後初期破壊曲面に沿う荷重履歴となっている。

解析結果の残存軸耐力と経験部材角の関係を図-18に示すが、解析結果は耐震診断基準の基準値より大きくなっており、耐震診断基準値は安全側となっている。解析結果の軸力比は主筋断面積も考慮しており、耐震診断基準値がコンクリート断面のみで軸力比を評価していることから、診断基準値の安全率はさらに大きくなる。

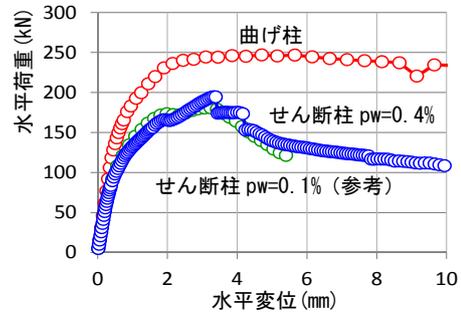
図-19は、軸耐力と水平耐力の低下傾向を、曲げ柱と

表-2 せん断柱諸元

試験体名	コンクリート圧縮強度 $\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	軸力比 $\eta$	主筋比 $P_g$ (%)	せん断補強筋比 $P_w$ (%)	主筋降伏強度 $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	せん断補強筋降伏強度 $\sigma_w$ (N/mm <sup>2</sup> )
曲げ柱	31.0	0.1	0.62	0.46	348	366
せん断柱	13.5	0.1, 0.3	2.4	0.4	500	366



(a) ひび割れ破壊状況



(b) 荷重-変位関係

図-15 せん断柱の解析結果

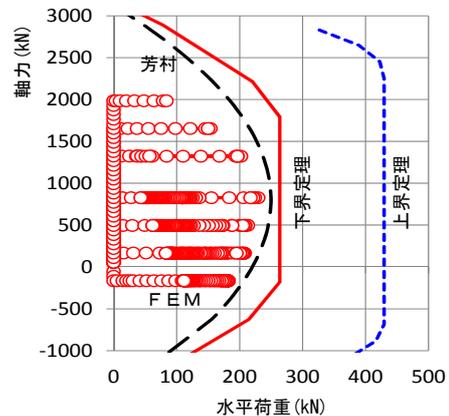
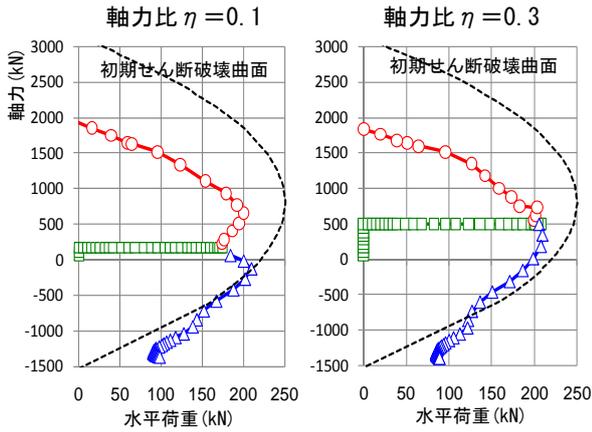
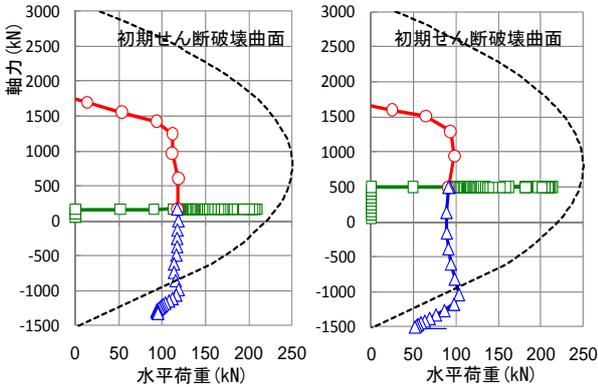


図-16 初期せん断破壊曲面



(a) 経験部材角 R=0.002



(b) 経験部材角 R=0.01

図-17 地震被害を受けたせん断破壊曲面

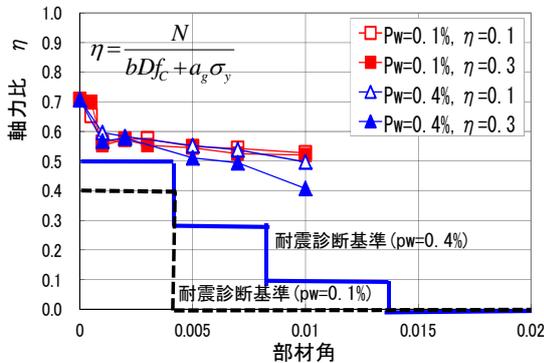


図-18 経験部材角と残存軸耐力

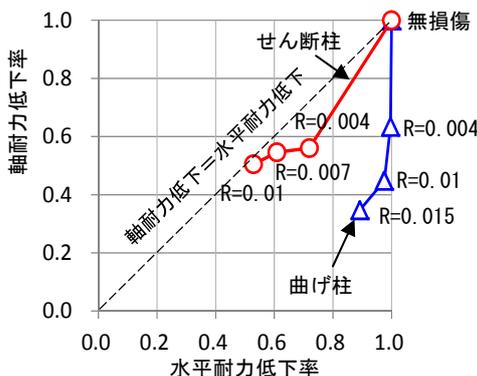


図-19 軸耐力と水平耐力の低下傾向 (η=0.2)

せん断柱を比較したものである。曲げ柱では、主に軸耐力のみが減少しているのに対し、せん断柱では、軸耐力と水平耐力が同様な比率で縮小しており、相似的に縮小すると仮定する芳村らの提案モデルと類似している。

## 5. まとめ

本研究では、地震被害を受けたRC柱の破壊曲面形状に関する解析的な検討を行った。限定されたケースの解析結果であるが、得られた結果を以下に示す。

- 地震被害を受けたRC造曲げ柱の曲げ破壊曲面については、軸力増加側では、経験部材角の増加とともに軸耐力方向に大きく縮小した。一方、軸力減少側では経験部材角によらず、初期破壊曲面からは変化しなかった。
- 地震被害を受けたせん断破壊曲面については、軸力増加側では、経験部材角が大きくなると、初期破壊曲面からほぼ相似的に縮小した。また、軸力減少側では、直線的に初期せん断破壊曲面に近づいた後、初期破壊曲面に沿うような形状であった。

## 参考文献

- 芳村学, 高稲宜和: 破壊曲面縮小の概念に基づくせん断破壊型鉄筋コンクリート柱の鉛直変形評価に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 第 592 号, pp. 167-175, 2005 年 6 月
- 高稲宜和, 芳村学: 破壊曲面縮小の概念に基づくせん断破壊型鉄筋コンクリート柱の定量的損傷評価, 日本建築学会構造系論文集 第 618 号, pp. 191-197, 2007 年 8 月
- 島崎和司: RC造柱の地震後の残存軸耐力に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 第 637 号, pp. 537-542, 2009 年 3 月
- 島崎和司: 曲げヒンジ部で破壊するRC造柱の地震後の残存軸耐力, 日本建築学会構造系論文集 第 656 号, pp. 1867-1872, 2010 年 10 月
- 堀田久人, 吉崎敦子: せん断破壊型方立て壁がRC架構の崩壊形・耐震性能に及ぼす影響に関する解析的研究, 日本建築学会構造系論文集 第 630 号, pp. 1339-1346, 2008 年 8 月
- ATENA: Computer Program for Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete, Cervenka Consulting, Revision Oct. 31, 2005
- Super Build/US2 解説書, ユニオンシステム(株)
- 高木仁之, 白石一郎: 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, コンクリート工学年次論文報告, Vol. 30, No. 3, pp. 121-126, 2008 年 7 月
- 白石一郎, 高木仁之: 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, コンクリート工学年次論文報告, Vol. 32, No. 2, pp. 121-126, 2010 年 7 月
- 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