

論文 せん断破壊形式鉛直部材を有するRC造架構の柱軸力の変動

上荒磯 崇^{*1}・塩屋 晋一^{*2}

要旨:本研究では,学校建築で見られるRC造壁梁形式架構で柱や耐震壁がせん断破壊する場合,その隣接柱に生じる変動軸力量を明らかにするために架構の弾塑性解析を行った。その結果,壁梁形式架構では,せん断破壊後に鉛直支持力が期待される柱や耐震壁が存在しても,それらに隣接する曲げ破壊形式の柱の材長の伸びや壁梁の剛性によりそれらの部材に軸ひずみが生じない状態になり,せん断破壊後の鉛直支持力は発揮されない可能性が十分あること,また,せん断柱が負担していた鉛直荷重のモーメントにより隣接柱へ付加軸力が生じること,などが明らかになった。

キ-ワード:柱,せん断破壊,鉄筋コンクリート架構,変動軸力,高軸力

1.はじめに

既存RC造建築の耐震診断・耐震補強設計においては,部分的な落階が生じなければ,一部の柱や耐震壁がせん断破壊すること許容し,その変形以降の他の部材の性能を含めて,建築物の耐震性能を評価できる¹⁾。そこでは,柱がせん断破壊しても周辺の梁や柱および壁でそれ以前の鉛直力を基礎に伝達できればよいことにし,また耐震壁は水平力によりせん断破壊してもそれ以前の鉛直力を保持できるものとしている。その際,それらのせん断破壊する部材に隣接する柱(以後,隣接柱)は軸力の増加により,破壊形式が曲げ破壊から,せん断破壊または高軸力を受ける曲げ破壊に移行して変形性能が乏しいものになる可能性があり,その変動軸力を精度よく評価する必要がある。

本研究では,学校建築の桁行き方向の壁梁形式架構を対象にして,最下層で一部の柱や耐震壁のせん断破壊が先行する場合の隣接柱の変動軸力量を定量的に把握するためにRC造架構の弾塑性解析を行った。本論文では,柱に変動軸力を生じさせる要因とメカニズムについて述べ,そして架構の弾塑性解析とその解析結果について述べる。

2.変動軸力に影響を与える要因とメカニズム

2.1 せん断破壊する柱と耐震壁の鉛直支持力

せん断破壊する柱や耐震壁は,せん断破壊直後,鉛直荷重を支持する機構が変化して材長が縮む方向に軸方向変形が生じ,この変形は水平変形の増加に伴い増加する。この時,それらの部材は鉛直支持力を完全に喪失するのではなく,ある程度,保持できる²⁾。これを根拠に現行の耐震診断では,せん断破壊後の袖壁付き柱や耐震壁は破壊以前の鉛直荷重を支持できることにしている。しかし,この破壊後の鉛直支持力を発揮するためには材長が縮む軸方向変形を伴う必要がある。

2.2 架構の鉛直剛性

架構のある層で柱または耐震壁がせん断破壊すると,それらの軸剛性が低下して上層の鉛直荷重により,それらの柱頭で鉛直変位が生じようとするが,周りの架構部分によりその柱頭の鉛直変形は拘束される。これにより,せん断破壊後の柱や耐震壁の軸方向変形は生じにくくなり,前節で述べたことを理由にせん断破壊後の鉛直支持力を発揮しにくくなる。特に学校建築のような壁梁形式の架構の場合には,架構の鉛直方向の剛性が大きくなるため,せん断破壊する部材の軸方向変形が生じにくくなる。

2.3 隣接する柱の材長の伸び変形

柱や耐震壁がせん断破壊する変形レベルよりも柱が曲げ降伏する変形レベルの方が後になる。せん断破壊する柱や耐震壁に隣接する柱群が柱頭・柱脚で

*1 鹿児島大学理工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 鹿児島大学工学部建築学科助教授・博士(工学)(正会員)

曲げ降伏する場合，水平変形に伴い材長に伸び変形が生じる。この時，上層架構部分が上方に移動する変形成分が生じ，せん断破壊した柱や耐震壁には材長が伸びる変形成分が合成される。これにより，せん断破壊後の柱や耐震壁は，さらに鉛直支持力を発揮しにくくなる。

2.4 隣接柱への付加軸力

図 - 1 (a)に示すように外柱側の柱がせん断破壊により鉛直支持力を失うと，隣接柱にはそれらの柱が負担していた鉛直荷重(N_1+N_2)と，(N_1+N_2)のなすモーメントMによる付加軸力(N)が加算される。また図 - 1 (b)に示すように内柱がせん断破壊する場合でも同様に隣接柱にモーメントMによる付加軸力が生じる。

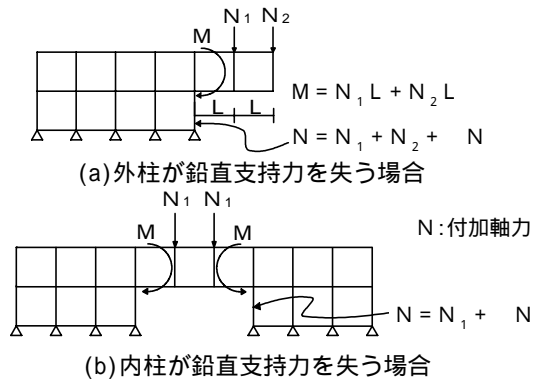


図 - 1 せん断柱に隣接する柱に生じる付加軸力

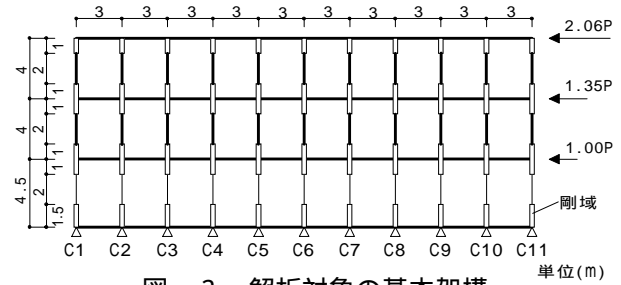


図 - 2 解析対象の基本架構

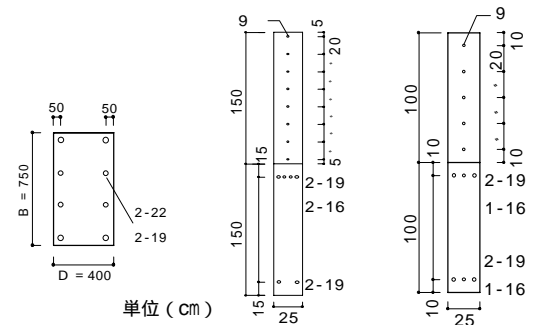
3. 架構の弾塑性解析

3.1 解析方針とせん断破壊部材

学校建築で，桁行き方向の壁梁形式架構の最下層が水平力により層破壊する場合を対象にし，一部の柱や耐震壁がせん断破壊した以降の最下層の柱の軸力の変動の特徴を明らかにするために解析を行う。せん断破壊する柱の本数は，1本の場合と，1スパンの耐震壁を想定して2本連続する場合とする。これら以外の最下層の柱は曲げ破壊形式とする。解析でのせん断部材はつぎのように取り扱うことにする。対象にしている範囲がせん断破壊以降であること，せん断破壊後の柱や耐震壁の軸力 - 軸変形特性は不明な点が多いこと，および隣接柱での軸力の変動をより明確にさせることなどの理由により，せん断破壊後の柱は鉛直支持力を完全に失うものとして，解析の架構からその柱を外して，せん断破壊する柱や耐震壁を表現する。解析には有限要素解析プログラムABAQUSを用いた。

3.2 解析モデルと解析仮定および外力

図 - 2に解析で対象にした基本架構を示す。架構はRC造の3層10スパンで，壁梁と柱の接合部には剛域を設けている。図 - 3に柱と梁の断面を示す。最下層の柱だけを弾塑性とし，それ以外の柱と梁は，塑性化を考慮した一定の剛性の部材としている。最下層の柱は，図 - 4 (a)に示すように柱の可撓範囲が

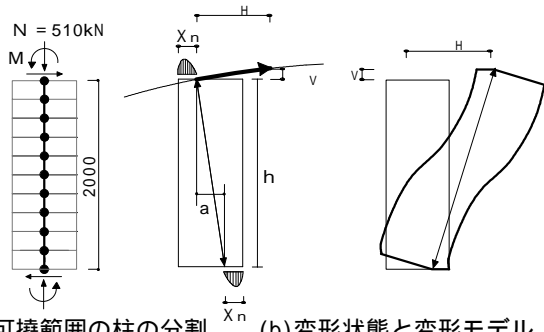


(a) 柱 (b) 基礎梁 (c) 2F, 3F, RF梁
 図 - 3 柱・梁の断面

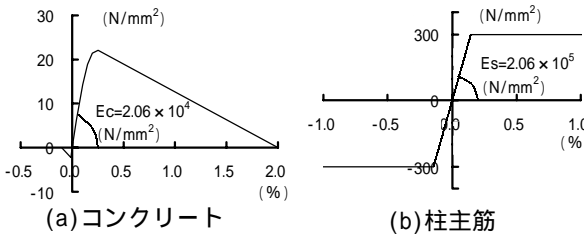
10分割され，梁要素が連続しているものとしている。梁要素は中間節点を有するタイプで，ガウス積分点では平面保持と材料特性に基づき断面分割法で断面内力が逐次計算される。図 - 5に解析に用いた力学的材料特性を示す。

図 - 6に前述の柱と同様の弾塑性解析による二階梁のせん断力 - 変形関係を示す。図中には梁の軸変形を拘束しない場合とする場合について示している。梁の剛性は，スラブや梁の軸変形の拘束により増加する。この結果を基に，梁の剛性については弾性剛性の30%と70%の2種類とした。また，2，3階の柱の剛性についても同様の解析を行い，その結果に基づき弾性剛性の30%とした。これらの剛性はコンクリートのヤング係数を低下させて表現した。

外力については2階より上の柱・梁の節点に鉛直荷重の170kNを作用させ，Ai分布の水平荷重を作用



(a)可撓範囲の柱の分割 (b)変形状態と変形モデル
 図 - 4 最下層の柱の分割状況と変形モデル



(a)コンクリート (b)柱主筋
 図 - 5 解析で仮定した材料特性

させた。この加力方向は右加力と左加力の2種類とした。1階の柱軸力は軸力比で0.08であった。解析は一階の層間変形を漸増させる変位制御の形式で行った。

4. 解析結果

4.1 柱のせん断力 - 変形関係と材長の変形

図 - 7 (a)に柱だけの弾塑性解析による柱のせん断力 - 水平変形関係を示す。柱は曲げ破壊して最大耐力以降、耐力低下を生じるものである。図 - 8に柱頭の鉛直変形 - 水平変形関係を示す。水平変形の増加に伴い鉛直変形も増加している。図中の実線は図 - 4 (b)に示すモデルでその関係を近似したものである。そのモデルでは柱頭と柱脚の降伏ヒンジの中立軸を結ぶ線は、その長さが変化しないで柱脚側の中立軸を中心に回転するものとしている。ただし、軸力による柱の鉛直変形は差し引いている。このモデルによる計算値と弾塑性解析の結果はほぼ一致しており、解析に用いた梁要素モデルでRC造柱の材長の変化は表現されていると判断できる。以下にその評価式を示す。

$$\delta_v = -h + \sqrt{h^2 + 2ah - \delta_H^2} \quad (1)$$

ここに、 v , h , a , H ; 図 - 4 (b)を参照

4.2 柱の軸力分布と柱頭の鉛直変位分布

図 - 9 ~ 図 - 11に解析を行った架構の最下層の柱の軸力分布と柱頭の鉛直変位分布を示す。示した分

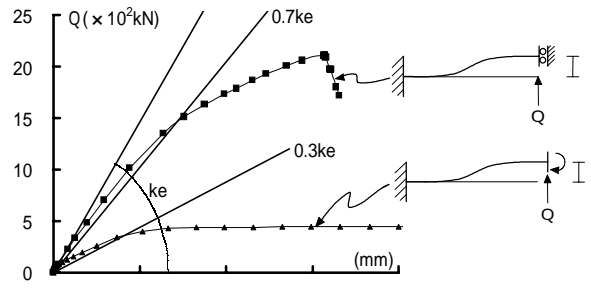
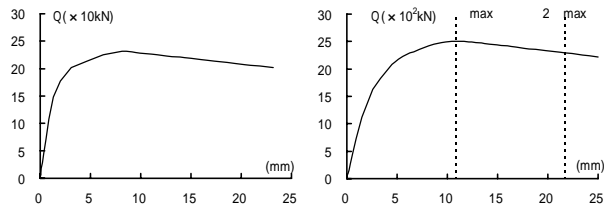


図 - 6 梁のせん断力 - 変形関係と仮定した剛性



(a)柱のQ - 関係 (b)最下層のQ - 関係

図 - 7 柱のせん断力 - 変形関係と層せん断力 - 層間変形関係

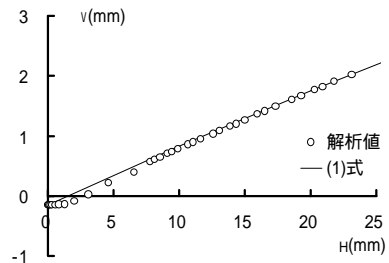


図 - 8 最下層の柱の $v - H$ 関係

布は、梁の剛性を弾性剛性の30%とした場合のものである。横軸は図 - 2の最下層の柱記号である。軸力分布の縦軸の値は、各柱の軸力 N_i を図 - 2の基本架構に鉛直荷重だけが作用した時の一階の柱の軸力 $N_0 (=510kN)$ で除したものである。

鉛直変位分布の図では右側に柱の軸ひずみ v の軸を示している。 v は柱頭の鉛直変位を柱の可撓長さ(2000mm)で除している。 N_i/N_0 と v および v が負の場合は柱に圧縮変形が生じている状態を意味する。各分布には、鉛直荷重時と最大耐力時およびその時の変形(\max)の2倍の変形(2 \max)の時のものを示している。図 - 7 (b)に基本架構の最下層の層せん断力 - 層間変形関係を示すが、最大耐力時の変形 \max は約11mmで、解析した他の架構のものもほぼ同じであった。図中に凡例を示すが、原則として水平荷重の右加力時(以後、右加力時)の分布は白塗りの記号で、水平荷重の左加力時(以後、左加力時)の分布は黒塗りの記号で示している。ただし、軸力分布において、最大耐力時(\max)と2 \max

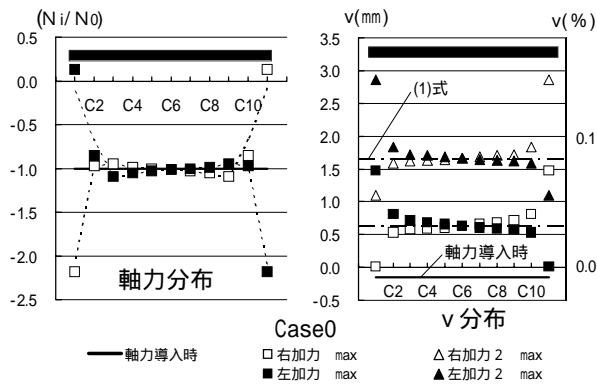


図 - 9 柱がせん断破壊しない場合の柱軸力分布と柱頭の鉛直変位分布

の分布にほとんど差が生じなかったため、 2_{max} の分布については点線で示している。

(1) 柱がせん断破壊しない場合(Case0)

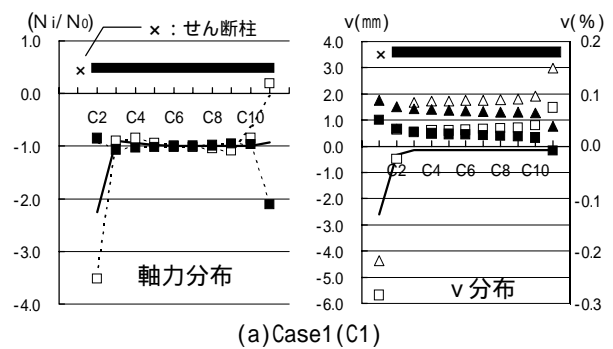
図 - 9 に柱がせん断破壊しない基本架構の分布を示す。鉛直荷重時（太実線）ではすべての柱に等しい圧縮軸力と圧縮変形が生じているが、水平荷重を受けると風下側の柱(右加力の場合ではC1柱)で、梁のせん断力による変動軸力(-1.2)が付加されて、 N_i/N_o は-2.2まで増加している。この変動軸力は梁の剛性と耐力の影響を受けるが、これについては本節(4)で述べる。外柱がせん断破壊する柱や袖壁付き柱で、せん断破壊後も、その柱に鉛直支持力を期待する場合はこの変動軸力を考慮して柱の安全性を確認する必要がある。内柱の鉛直変位も水平荷重により上昇している。(1)式による鉛直変位を一点鎖線で示すが、架構の内柱の変位量とほぼ同程度である。

(2) 1本の柱がせん断破壊する場合

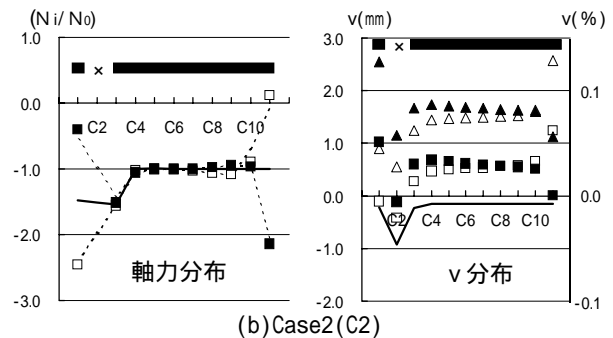
図 - 10 にせん断破壊する柱を意図して1本の柱が外された架構の分布を示す。

Case1 ; C1の柱がせん断破壊する場合

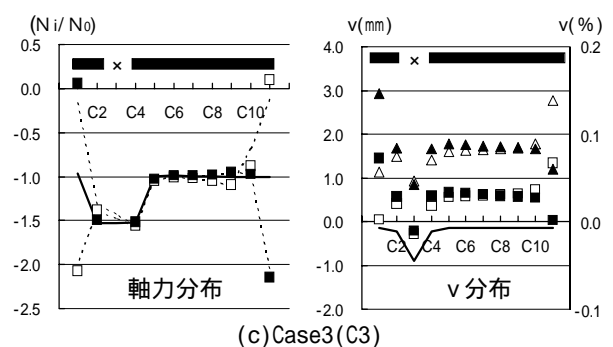
鉛直荷重時（太実線）に隣接柱のC2の N_i/N_o が-2.3になっている。2.4節で述べたモーメントによる付加軸力は-0.3となる。さらに右加力を受けるとCase0と同様に梁のせん断力による変動軸力(-1.2)が追加されて、 N_i/N_o は-3.5まで増加している。しかし、この荷重状態で max 時のC1の鉛直変位()は-5.7mmで、柱の軸ひずみでは-0.27%である。この程度、柱の軸ひずみが生じていれば、C1の柱はせん断破壊後も鉛直支持力を発揮できる可能性があるが、左加力時(,)にC1で引張ひずみが生じてお



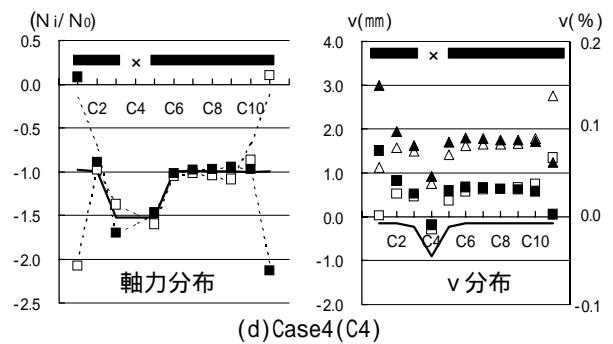
(a)Case1(C1)



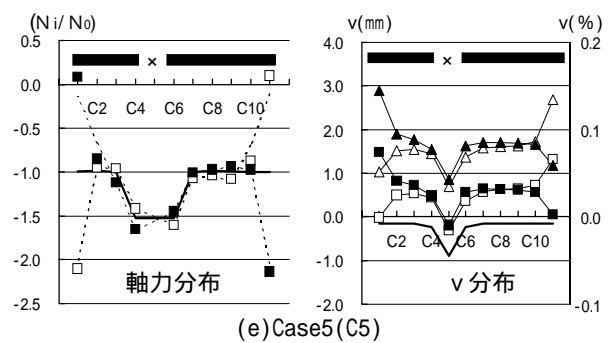
(b)Case2(C2)



(c)Case3(C3)



(d)Case4(C4)



(e)Case5(C5)

図 - 10 1本の柱がせん断破壊する場合の柱軸力分布と柱頭の鉛直変位分布

り、地震時には圧縮力・引張力の変動軸力が生じることになる。このためせん断破壊後の柱の軸剛性が低下してその鉛直支持力の発揮が抑制されることも考えられる。

Case2 ; C2 の柱がせん断破壊する場合

鉛直荷重時では、せん断破壊するC2の軸力が左右の隣接柱C1とC3にほぼ等しく分担され、それらのNi/Noは約1.5～1.6となっている。内柱のC3では、2.4節で述べたモーメントによる付加軸力は-0.05程度である。さらに右加力による変動軸力(-0.95)が追加されて、Ni/Noは-2.4まで増加している。この荷重状態のmax時では、C2の鉛直変位は0.3mmで、柱の軸ひずみでは-0.015%と小さく、圧縮の軸ひずみがほとんど生じないことになる。これにより、C2の柱が単独の柱としてはせん断破壊後も鉛直支持力を発揮できる性能を有していても、架構の内柱においてはその性能をほとんど発揮されないことが確認できる。

Case3 ; C3 の柱がせん断破壊する場合

鉛直荷重時では、Case2と同様にC3の軸力が左右の隣接柱C2とC4に等しく分担され、それらのNi/Noは約-1.5となっている。しかし、これらの隣接柱には水平荷重による変動軸力の増加は生じないで、むしろC2の柱ではNi/Noが-1.3に減少している。C3の鉛直変位もCase2と同様で水平加力により圧縮の軸ひずみが減少している。

Case4 ; C4 の柱がせん断破壊する場合

鉛直荷重時と右加力時についてはCase3と同様であるが、左加力時()でC3のNi/Noが-1.7と増加している。この現象は、せん断破壊する柱の位置が架構の中央に近づくCase5では緩和されている。

(3) 2本の柱が連続してせん断破壊する場合

図-11にせん断破壊する柱または耐震壁を意図して2本の柱が連続して外された架構の分布を示す。

Case1-2 ; C1, C2 の柱がせん断破壊する場合

鉛直荷重時(太実線)に隣接柱のC3のNi/Noが-3.8になっている。これはC3の軸力(-1.0)にせん断柱に該当するC1とC2に生じていた軸力(-2.0)と2.4節で述べたモーメントによる付加軸力(-0.8)が加算されている。この付加軸力はCase1より大きく

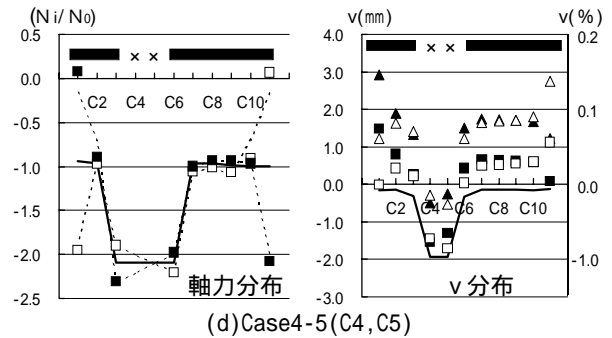
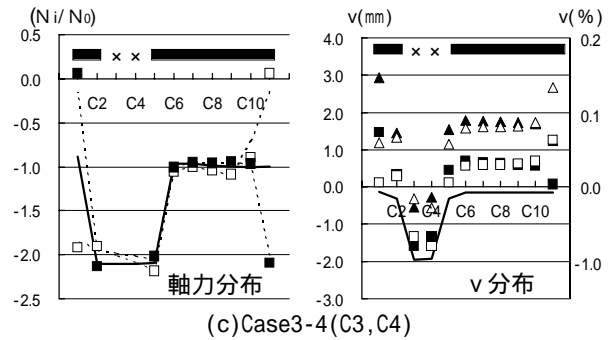
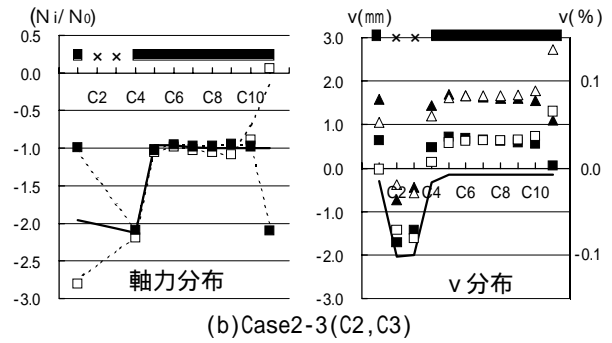
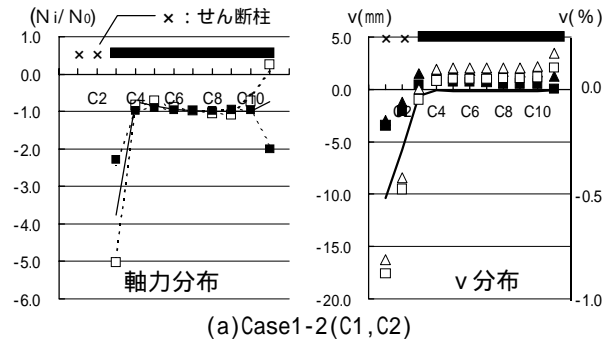


図-11 2本の柱がせん断破壊する場合の柱軸力分布と柱頭の鉛直変位分布

なっている。さらにCase1と同様に右加力()による変動軸力(-1.2)が加算されて、Ni/Noは-5.0まで増加している。C1-C2間がせん断破壊する耐震壁の場合には、C1, C2の軸ひずみがそれぞれ0.80, 0.48%と大きく生じており、せん断破壊後の鉛直支持力はある程度発揮される状況にある。

Case2-3 ; C2, C3 の柱がせん断破壊する場合

鉛直荷重時では、隣接柱のC1とC4のNi/NoはC1で-1.95, C4で-2.15となっている。内柱のC4で

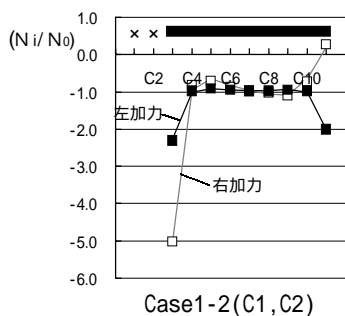


図 - 12 梁の剛性を变化させた場合の柱軸力分布 (max)

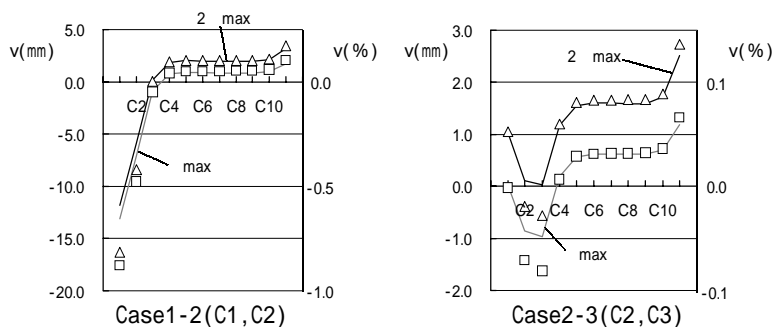


図 - 13 梁の剛性を变化させた場合の鉛直変位分布

は、2.4節で述べたモーメントによる付加軸力は -0.1 生じている。さらに右加力により、C1 では変動軸力 (-0.85) が加算されて、 N_i/No は -2.8 となっているが、Case0 や Case2 で生じた変動軸力より小さくなっている。これは C2 と C3 の柱を外すことにより C1 と C4 の間の架構部分の鉛直剛性が低下したことによる。max 時では C2 と C3 の鉛直変位は約 -1.6mm で、軸ひずみでは -0.075% である。これ以降、水平変位の増加に伴い鉛直変位はさらに減少することを考えると、C2 と C3 にせん断破壊する柱や耐震壁が存在する場合、その破壊後の鉛直支持力を発揮できない状況にある。

Case3-4 ; C3, C4 の柱がせん断破壊する場合

Case2-3 と同様で鉛直荷重時ではせん断破壊する C3 と C4 の軸力が左右の隣接柱 C2 と C5 にほぼ等しく分担されている。2.4 節で述べたモーメントによる付加軸力は -0.15 生じている。

Case4-5 ; C4, C5 の柱がせん断破壊する場合

左加力で C3 の N_i/No が -2.35 となり、内柱では最も大きくなっている。この現象は 1 本の柱を外した Case4 の場合でも観られ、水平荷重の風上側に 2 スパンの健全な骨組が存在する場合に生じた。

(4) 梁の剛性の影響

図 - 12 梁の剛性を弾性剛性の 70% にした場合の軸力分布の一例を折れ線で示す。示したものは Case1-2 の最大耐力時 (max) のものである。○ の記号は弾性剛性の 30% にした場合の分布である。梁の剛性を増加させても柱の軸力分布は変化していない。この傾向は他の架構でも同様であった。図 - 13 に梁の剛性を弾性剛性の 70% にした場合の鉛直変位分布の例を太実線で示す。示したものは Case1-2 と Case2-3 の右加力時の max 時と 2 max 時のものである。

○ の記号は弾性剛性の 30% にした場合の分布である。梁の剛性を増加させることにより、柱を外した位置の鉛直変位は減少し、せん断破壊後、より鉛直支持力を発揮しにくい状況になっている。

5 . まとめ

学校建築の桁行き方向の壁梁形式架構で、梁の剛性・強度が充分大きく、鉛直支持系の柱や壁が水平荷重により破壊する層において、柱や耐震壁がせん断破壊する場合の隣接柱の変動軸力について解析的に検討した。

- 1) 内柱群で柱や耐震壁がせん断破壊する場合には、曲げ破壊形式の隣接柱の材長の伸びや壁梁の変形拘束により、それらの部材には圧縮の軸ひずみが生じにくくなり、単独の部材としてはせん断破壊後も鉛直支持力が発揮できても、架構中においてはそれを発揮できない可能性が大きい。
- 2) せん断柱が負担していた鉛直荷重のモーメントにより隣接柱へ付加軸力が生じ、それは、外柱がせん断破壊する場合が最も大きく、外柱 1 本だけがせん断破壊する場合には長期柱軸力の約 30%、外柱から 2 本連続してせん断破壊する場合には約 80%、圧縮軸力が増加する可能性がある。
- 3) 外柱がせん断破壊する場合、地震力による圧縮・引張の繰り返しの変動軸力により、せん断破壊後の鉛直支持耐力が劣化する可能性がある。

参考文献

- 1) 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説、日本建築防災協会、pp.86-92、2001 年改訂版
- 2) 芳村 学ほか：鉄筋コンクリート柱の軸力保持能力喪失に関する研究、日本建築学会大会、構造、pp.409-410,2001,9