

論文 鉄筋コンクリート造耐震壁付きフレームの耐震性能に関する解析的研究

大村哲矢^{*1}・林静雄^{*2}

要旨：開口を有する鉄筋コンクリート造耐震壁付きフレームを設計する際に、耐震壁開口の高さが高い場合はその周囲の梁に大きな応力が生じるため詳細な検討が必要である。開口を有する耐震壁付きフレームを開口部の梁を介し 2 つに分割してモデル化し、2 次元静的弾塑性フレーム解析を行い、モデル化をする際には十分な検討を要することがわかった。

キーワード：耐震壁、保有水平耐力、マルチスプリングモデル、支点バネ

1. はじめに

鉄筋コンクリート造建物において耐震壁は建物の剛性と強度を高める有効な耐震要素である。高層建物において耐震壁付きフレーム構造にしようとする大きな転倒モーメントが発生するため耐震壁を用いることができない場合があるが、中低層建物において耐震壁付きフレーム構造は多く用いられる。

建物の平面計画の多様化により耐震壁に開口を設ける必要が生じ、その開口部周囲に発生する応力に対して開口補強筋により補強するよう RC 規準¹⁾に明記されている。

開口部のサイズが比較的小さい場合には RC 規準の規定により補強すれば安全であると考えられるが、耐震壁開口の高さが高い場合はその周囲の梁に大きな応力が生じるため詳細な検討が必要であると思われる。

また、一般的にフレームの支点はピン支持とし、支点の鉛直および水平変位を考慮しない場合が多いが、耐震壁付きフレームの圧縮軸力が生じる支点には過大な鉛直力が生じる場合が見受けられ、支点の鉛直および水平変位を考慮しない場合に安全性を確保できているかは疑問が残る。

本論では、開口の高さが高い耐震壁付きフレームをモデル化し 2 次元静的弾塑性フレーム解析を行うものとし、支点の鉛直および水平変位を考慮した場合、また梁のモデル化を変動させた場合、どのような解析結果の相違が見られるかを比較検討する。

2. 解析

2.1 解析対象フレーム

開口を有する耐震壁のケースは様々な場合が考えられるが、本論では図-1 に示すフレームを対象とし線材を用いて図-2 のようにモデル化する。

図-1 のフレームはある建物の 1 フレームを取り出したものである。建物は不整形な形状をしており、X、Y 方向とも耐震壁付きフレームと純ラーメンフレームが混在している。図-1 のように剛性の大きい耐震壁付きフレームをバランス良く配置することにより偏心率を抑えるような構造計画となっているため、このフレームは多くの水平力を負担する。

図-1 のフレームのスパン数は 2 スパンであり、通り名を 1 通りから 3 通りとする。1~2 通り間に開口を有する耐震壁があり、2~3 通り間は純ラーメンとなっている。階数は 4 階建てであり、杭基礎を想定している。

断面リストを図-3 に示す。部材断面は図に示すとおりであるが、柱断面は直交フレームも考慮して断面が決定されている。本論のフレームではすべての部材は A ランク部材になるように配筋を決めている。詳細は後述によるが耐震壁開口部下の基礎梁にヒンジが生じることによってフレームの耐力が決まるため、必要保有水平耐力の 1.05 倍を確保するようにそれぞれの解析モデルによって基礎梁を設計しているため基礎梁はリストから省略した。

*1 西松建設(株)

博士(工学) (正会員)

*2 東京工業大学建築物理研究センター・教授

工博 (正会員)

2.2 解析フレーム

解析フレーム一覧を表-1 に示す。解析フレームは図-1 に示すフレームをモデル化するものとし、梁および支点のモデル化を変え、表に示す 3 フレームを解析した。モデル化は図-2 に示すような線材を用いる。図-2 は model C

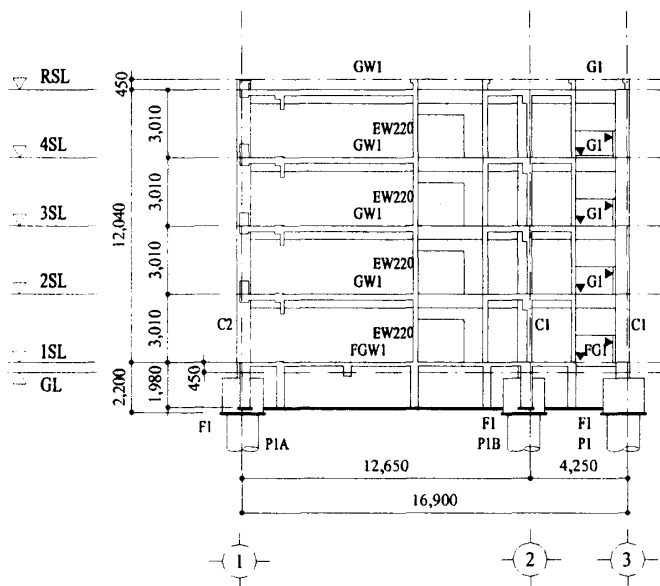


図-1 解析対象フレームの軸組図

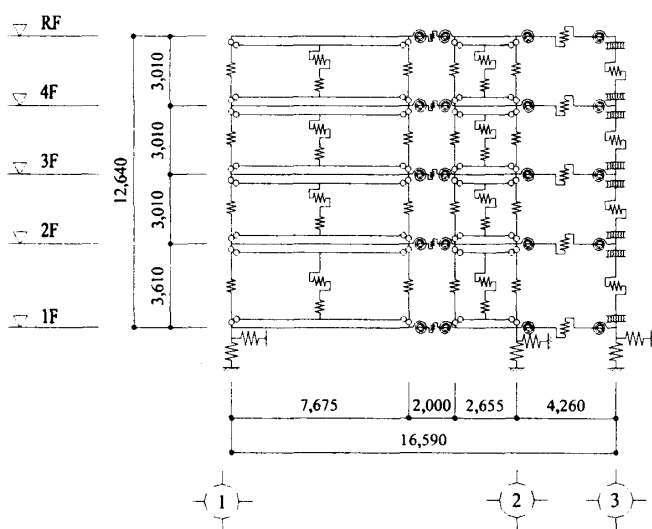


図-2 解析対象フレームのモデル化

表-1 解析フレーム一覧

モデル名	梁のモデル	支点
A	MSモデル	支点バネ考慮
B	材端弾塑性バネモデル	ピン
C	材端弾塑性バネモデル	支点バネ考慮

の例である。model A は図-2 の梁に 3 通り柱のようなマルチスプリング(以下, MS)モデルを用いたものである。model B は図-2 の支点をピン支持としたものである。

耐震壁のモデル化は様々なものが提案されており、一般的に開口を有する耐震壁は開口低減率により剛性と耐力を低減させ、耐震壁とその周囲の柱および梁は一体化しているものとしてモデル化することが多い。本論では、図-1 に示すように耐震壁開口部の高さが高い場合、耐震壁とその周囲の柱および梁が必ずしも一体化して挙動しないものとし、図-2 のように開口部を挟んで耐震壁を分割するような形状でモデル化した。

実務設計レベルでは建物全体を 3 次元擬似立体フレームなどにモデル化して解析を行うことが多いが、本論の解析では、ある 1 フレームのみを取り出し、2 次元フレームとして静的弾塑性解析を行う。本論の解析に用

符 号	G1	CW1
主 筋	通 部 中 央	1 通 中 央・2 通
2・R 階		 耐震壁開口部廻りは □-S13@100 とする
上 端 筋	4-D25 3-D25	4-D25 6-D25
下 端 筋	3-D25 3-D25	4-D25 6-D25
スタールップ	□-D13@200	□-D13@200
腰 筋	2-D13	2-D13
巾止筋	D10@1,000	D10@1,000

符 号	C1	C2
1~4 階		
主 筋	12-D25	12-D25
帯 筋	□-S13@100	□-S13@100
補助帯筋	+ -D10@500	+ -D10@500

符 号	EW220
断 面	
タテ筋	D13@200 タフル
ヨコ筋	D13@100 タフル

$S13\sigma_y = 735\text{N/mm}^2$ を示す

図-3 断面リスト

いた水平力は、実務設計において3次元擬似立体フレームにモデル化して解析（外力分布はAi分布による。）を行った際に、図-1のフレームが負担した水平力を本論の解析に用いた。解析対象フレームの方向は比較的壁量が少ないため、建物全体としては、構造特性係数 $D_s=0.3$ 、形状係数 $F_{es}=1.0$ であった。

model A および C に用いた支点の鉛直および水平バネは杭基礎を想定しており、建築基礎構造設計指針²⁾により剛性を算出した。

長期応力は柱軸力のみ考慮する。水平力加力時の杭頭曲げモーメントは基礎梁に加算しない。

3. 解析結果および考察

3.1 層せん断力-層間変位関係の比較

図-4~6 に model A~C の各階層せん断力-層間変位関係を示す。すべてのモデルにおいて

耐震壁開口部下基礎梁にヒンジが生じることにより最大層せん断力に達したという解析結果が得られた。

前述のように開口を有する耐震壁付きフレームの一般的に用いられるモデルは、図-1のフレームの場合で述べるとすると、耐震壁部分を開口低減率により剛性と耐力を低減させ、1~2 通り間の耐震壁フレームは一体として地震時に挙動するものとして設計することが多いため、開口部下の基礎梁のヒンジ形成により最大耐力が決まることはない。そのため、一般的なモデル化による建物の崩壊形とは異なる結果となった。

各モデルとも1階から順に保有水平耐力が大きいくことが分かる。各モデルにおいて長期の柱軸力を考慮し、model A と model C は支点バネを考慮しており、増分解析の第1ステップにおいて柱軸力をかけるので、層せん断力が0のと

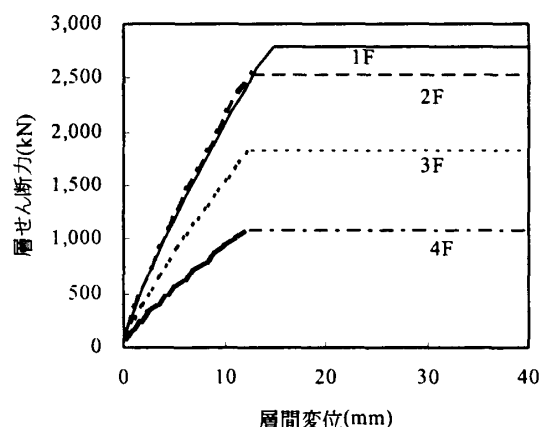


図-4 層せん断力-層間変位関係(Model A)

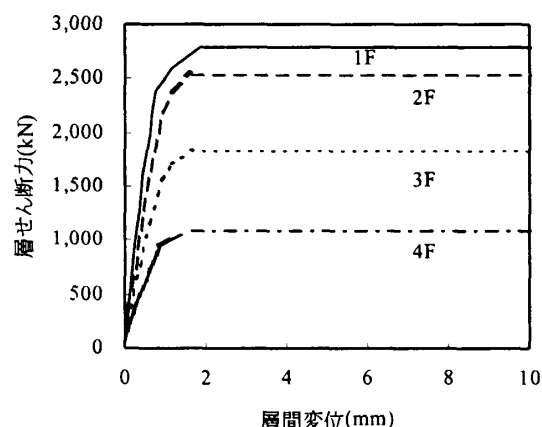


図-5 層せん断力-層間変位関係(Model B)

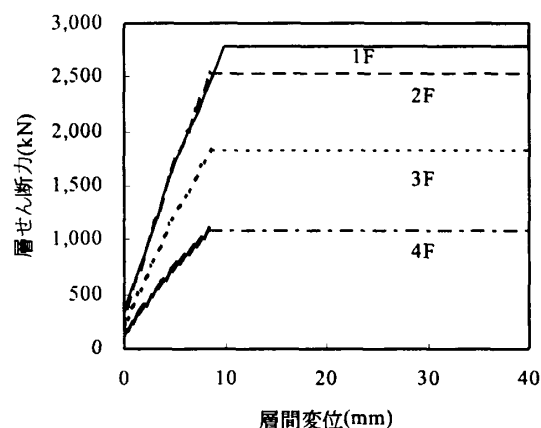


図-6 層せん断力-層間変位関係(Model C)

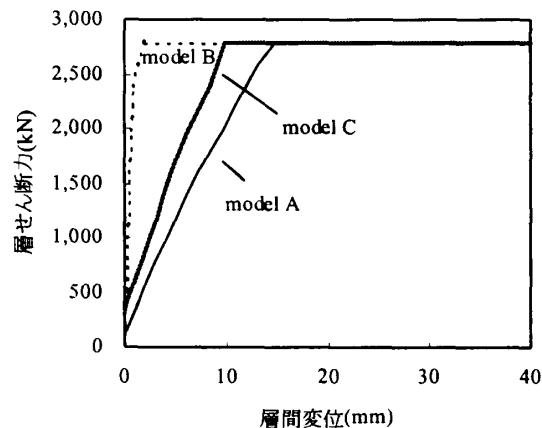


図-7 層せん断力-層間変位関係(1階の重ね)

き層間変位は0にならない。model Cは支点をピン支持としているため層せん断力が0のとき層間変位はほぼ0になる。

本論のフレームの場合、1通りの支点は上方向に変位が増えるものの、杭の終局引抜耐力を超えることはなかった。

図-7に各モデルの1階における層せん断力一層間変位関係を重ね合わせたものを示す。model Bは支点バネを考慮していないため、他のモデルよりも剛性が大きく、梁にMSモデルを用いたmodel Aは材端弾塑性バネモデルを用いたmodel Cよりも剛性が小さいことがわかる。

支点バネを考慮せずにモデル化をした場合、そのフレームの剛性は大きくなるものと考えられる。このことは建物が整形である場合は問題になることは少ないと思われるが、不整形な建物に耐震壁付きフレームのように剛性の大きいフレームが存在する場合、期待した剛性を負担せずに各層において平面的な捩れを生じさせるなどの悪影響を及ぼすことが考えられるので詳細な検討を要する。

梁にMSモデルなどを用い、梁の軸方向変形を考慮すべきであることは既往の研究³⁾で述べられており、特に本論のフレームのように耐震壁開口幅をスパンとする短スパン梁では梁の軸力の影響は大きいと考えられる。さらに基礎梁は一般階の梁よりもせいが大きいため、より大きい軸力が生じることが予測される。その影響を考慮したmodel Aは最も剛性が低くなる傾向が見られた。

モデルBの場合には一般階の梁から順にヒンジが生じ、最後に基礎梁にヒンジが生じることにより最大層せん断力に達するため徐々にフレーム剛性が低下する傾向を示すが、他のモデルはほぼ同時に一般階の梁と基礎梁にヒンジが生じるために層せん断力一層間変位関係はバイリニア型に近い傾向を示した。

3.2 節点変位の比較

図-8～10に各モデルの節点変位図を示す。図は保有水平耐力に達したときの変位を示している。

model Aは梁にMSモデルを用い、支点バネを考慮したモデルであるため、1通りの支点が上方向に浮き上がり、2通りおよび3通りの支点が下方向に沈下していることがわかる。2通りは耐震壁の圧縮側の支点であり大きな圧縮軸力を受けるために沈下する傾向が見られた。開口を有する耐震壁を開口部の梁を介して2つに分割してモデル化したが、それらは一体化した節点変位を示した。

model Bは梁に材端弾塑性バネを用い、支点をピン支持としたモデルであるため、支点は変位しない。また、耐震壁開口部がせん断変形する傾向が見られ、開口部の梁を介して2つに分割してモデル化した「開口部を有する耐震壁」は一体化した節点変位を示しているとは言い難い。

model Cは梁に材端弾塑性バネモデルを用い、支点バネを考慮したモデルであるため、1通りの支点が上方向に浮き上がり、2通りおよび3通りの支点が下方向に沈下していることがわかる。前述のように基礎梁にヒンジが生じることにより崩壊形が形成され保有水平耐力が決まるが、model Cは梁の軸力を考慮していないため、基礎梁の曲げ終局耐力を増加させようとする基礎梁断面は大きくなる傾向があり、後述するが2～3通り間の基礎梁の曲げモーメントが他のモデルより大きくなる傾向があるため、2～3通り間の基礎梁断面も大きくなる。そのため、model Aより基礎梁の剛性は大きくなるので、1～3通り間の基礎梁の変位は直線状になる。一方、model Aでは1～3通り間の基礎梁の変位は2通りの支点が沈下し折れ線状になる傾向が見られた。

2通りは耐震壁の圧縮側の支点であり大きな圧縮軸力を受けるが、model Cは基礎梁の剛性が他のモデルより大きいため3通りの支点にも圧縮軸力が伝達される傾向が見られた。開口を有する耐震壁を開口部の梁を介して2つに分割

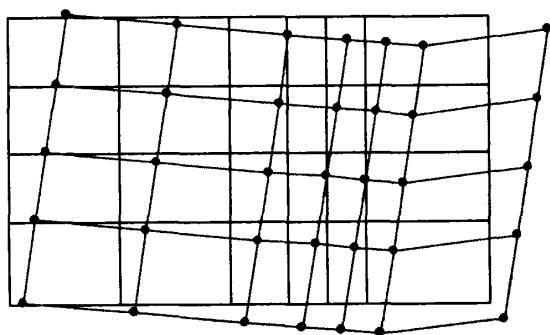


図-8 model A の保有水平耐力時の変位図

(1 階層間変位 14.8mm)

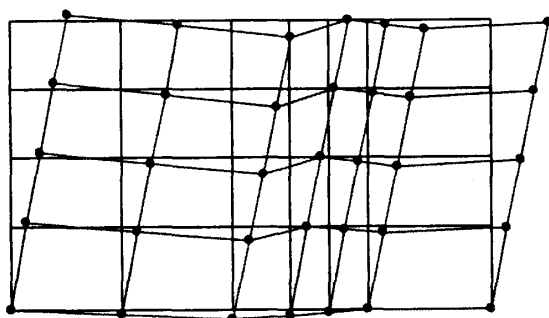


図-9 model B の保有水平耐力時の変位図

(1 階層間変位 1.9mm)

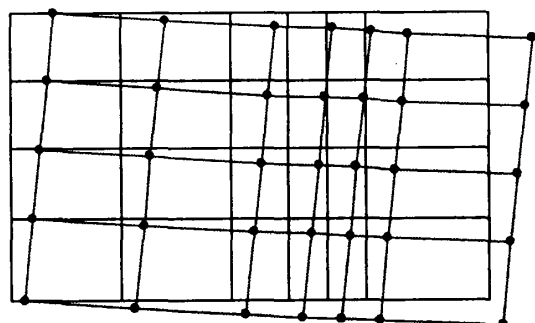


図-10 model C の保有水平耐力時の変位図

(1 階層間変位 9.9mm)

してモデル化したが、それらは一体化した節点変位を示した。

耐震壁開口部の幅、フレーム支点の剛性およびフレームの負担せん断力によって耐震壁開口部に接する柱および梁の変位は大きくなり、応力が大きくなると考えられる。フレームの支点をピン支持としたモデル（地盤が岩盤などのように強固である場合）と、支点にバネを設けた場合（杭基礎などで地震時支点鉛直変位を無視

し難い場合）を比較して分かるように、開口を有する耐震壁を開口低減率により耐力と剛性を低減した無開口耐震壁にモデル化する場合には注意が必要であると考えられる。

3.3 フレームの応力の比較

図-11～13 に各フレームの保有水平耐力時曲げモーメント図を示す。2 つに分割した耐震壁のそれぞれの壁芯に発生している曲げモーメントは参考に壁部分のみの曲げモーメントを示したため、耐震壁付帯柱を含めた曲げモーメントではない。杭頭曲げモーメントは基礎梁の最大曲げモーメントに対して 7～9%であったが、応力図には加算していない。曲げモーメントの数値は基礎梁の最大の値を示している。各フレームごとにモーメント図の倍率は多少異なる。

図-11 は梁を MS モデルとし支点バネを考慮した model A であり、耐震壁開口部を挟んで左側の壁が転倒するようになるため耐震壁開口部下の基礎梁に大きな曲げモーメントが生じる。梁は MS モデルとし軸力を考慮しているため、耐震壁開口部下の基礎梁には 5923kN の大きな軸力が発生した。2～3 通り間のラーメンフレームの曲げモーメントは比較的小さい傾向が見られた。

図-12 は梁を材端弾塑性バネモデルとし支点をピン支持とした model B であり、耐震壁開口部を挟んで左側の壁が転倒するようになるため耐震壁開口部下の基礎梁に大きな曲げモーメントが生じる。梁は材端弾塑性バネモデルであるため、耐震壁開口部下の基礎梁に軸力は発生しない点が model A と異なる。2～3 通り間のラーメンフレームの曲げモーメントは比較的小さい傾向が見られた。

図-13 は梁を材端弾塑性バネモデルとし支点バネを考慮した model C であり、耐震壁開口部を挟んで左側の壁が転倒するようになるため耐震壁開口部下の基礎梁に大きな曲げモーメントが生じ、2～3 通り間の基礎梁にも他のモデルより大きい曲げモーメントが生じる。梁は材端

弾塑性バネモデルであるため、耐震壁開口部下の基礎梁に軸力は発生しない点が model A と異なり、2～3 通り間の基礎梁にも軸力が発生しない。軸力が 0 であるため model A より基礎梁の曲げ終局耐力小さくなり、早期にヒンジが生じてしまわないように基礎梁の断面を大きくしたため、前述のように図-10 において 1～3 通りの基礎梁の変位が直線状となっていることから、

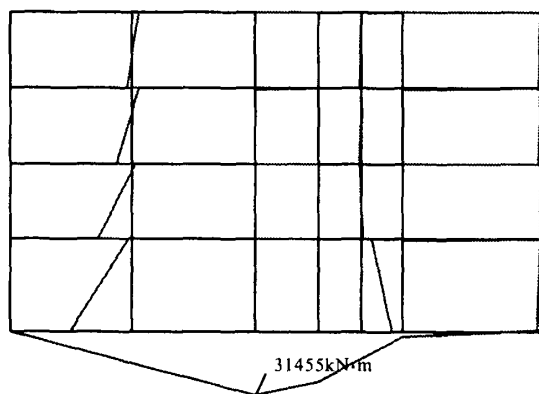


図-11 model A の保有水平耐力時
曲げモーメント図

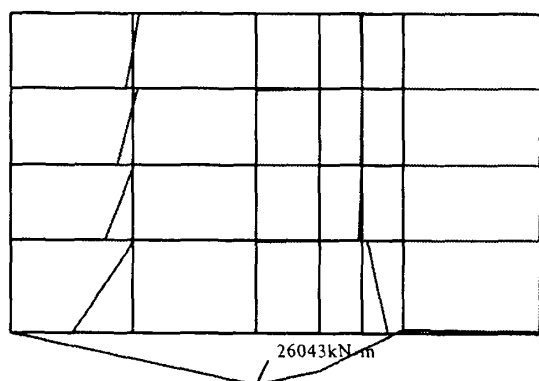


図-12 model B の保有水平耐力時
曲げモーメント図

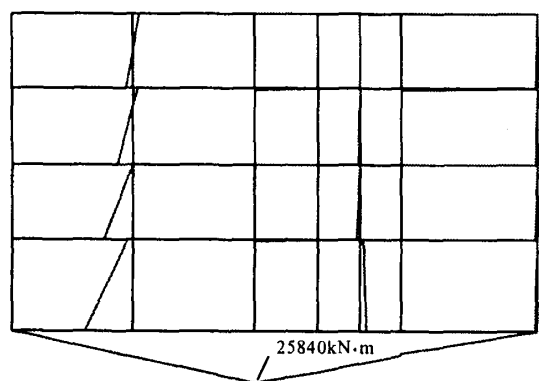


図-13 model C の保有水平耐力時
曲げモーメント図

基礎が剛体ようになるため、2～3 通り間の基礎梁の曲げモーメントが他のモデルより大きくなる傾向が見られた。2～3 通り間における基礎梁以外のラーメンフレームの曲げモーメントは比較的小さい傾向が見られた。

4. 結論

本論では、開口の高さが高い耐震壁付きフレームを開口部の梁を介し 2 つに分割してモデル化した。支点の鉛直および水平変位を考慮し、梁のモデル化を変動させ、2 次元静的弾塑性フレーム解析を行い、以下を得た。

- 1) 不整形な建物に耐震壁付きフレームのように剛性の大きいフレームが存在する場合、期待した剛性を負担せずに各層において平面的な振れを生じさせるなどの悪影響を建物に及ぼすことが考えられるので十分な検討が必要である。
- 2) 支点バネの有無、梁のモデル化の相違により変位や曲げモーメントが異なる場合が考えられるので、モデル化を決定する際には十分な検討が必要である。
- 3) 本論の解析結果では基礎梁に過大な応力が生じるということが分かり、耐震壁開口部付近の基礎梁の設計には十分な検討が必要であり、場合によっては耐震壁開口部際に杭を設けることも有効であると考えられる。

本研究は東京工業大学建築物理研究センター共同利用研究の一貫で行われたものである。研究費の一部は文部科学省科学研究費の補助を頂いている。関係各位にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説—許容応力度設計法—，1999 年
- 2) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001 年 10 月
- 3) 坂田弘安，和田章，他：曲げ降伏する梁の軸方向伸びを考慮した鉄筋コンクリート骨組の弾塑性性状に関する解析研究，日本建築学会構造系論文集，第 393 号，1988 年 11 月，pp25～34