

論文 下階壁抜け柱の耐震診断方法と RC 巻き立て補強効果に関する解析的検討

関 泰一郎*1・高木 仁之*2・白石 一郎*3

要旨：耐震診断基準では、地震時に過酷な応力状態となる下階壁抜け柱に対する検討を義務づけているが、軸力評価の点などには、なお議論の余地が残されている。本研究では、耐震診断基準の下階壁抜け柱検討方法の妥当性について解析的手法により考察した。また、下階壁抜け柱補強方法の一つである RC 巻き立て補強では、建物の使い勝手等の制約から、柱片側のみを増し打ちする片側補強も実際に施工されている。本研究では、この片側補強の耐震補強効果についても考察を行った。

キーワード：耐震診断, 下階壁抜け柱, RC 巻き立て補強, FEM解析

1. はじめに

図-1のような上階には耐震壁が配置され下階では柱のみとなっている下階壁抜け柱は、地震時に高軸力下で曲げおよびせん断を受けるなど過酷な応力状態となり、兵庫県南部地震をはじめ多くの地震において被害が顕著であったため(写真-1), 耐震診断基準¹⁾では特別な検討を義務づけている。しかし、検討用軸力を当該構面のみで評価し隣接構面の影響が考慮されていない点など、検討方法には議論の余地がある。

本研究では、耐震診断基準における下階壁抜け柱の耐震診断方法の妥当性について解析的に検討した。また、下階壁抜け柱の補強方法の一つである RC 巻き立て補強では、柱全周の補強が原則であるものの、建物の使い勝手や施工性等の制約から、片側のみを増し打ちする片側補強も実際に施工されている。本研究では、この片側補強された柱の耐震補強効果についても考察を行った。

2. 下階壁抜け柱の耐震診断方法に関する考察

2.1 作用軸力への隣接構面の影響

耐震診断基準では、下階壁抜け柱の検討において、隣接構面の影響を適切に考慮すべきとの



図-1 下階壁抜け柱 写真-1 下階壁抜け柱の被害

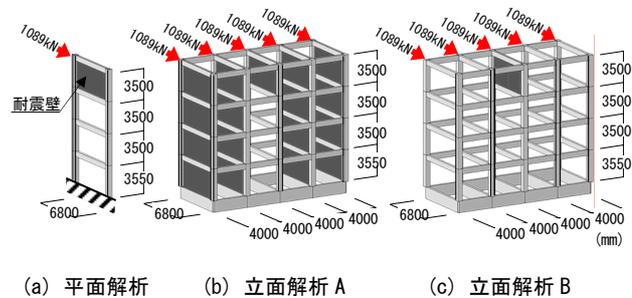


図-2 解析モデル

記述が解説にはあるものの、計算例には下階壁抜け構面のみに対する検討が示されているため、実際の耐震診断・改修設計においても隣接構面の影響が考慮されていないのが実情である。耐震診断基準では、この下階壁抜け柱の検討用軸力として、上部の耐震壁が破壊する場合と、引張側柱が軸降伏する場合のうち小さい値を採用

*1 りんかい日産建設株式会社 (前 日本工業大学大学院工学研究科建築学専攻) 修士(工学) (正会員)

*2 明治大学 理工学部 建築学科 助教授 博士(工学) (正会員)

*3 日本工業大学 工学部 建築学科 教授 工学博士 (正会員)

することとしている。

本章では、図-2(a)のような学校施設の耐震補強マニュアル²⁾の計算例を対象としたが、この例では、検討用軸力は、引張側柱の軸降伏によって決定されている。解析は平面フレームと立体フレームの弾性骨組解析であるが、立体フレーム解析では、隣接構面がすべて連層耐震壁（立体解析A）と、すべて純ラーメン（立体解析B）の2種類で、それぞれ剛床仮定の有無の計4ケースの解析⁴⁾を行った。水平力としては、下階壁抜け構面の引張側柱が軸降伏するときの荷重を各構面に作用させ、長期軸力は計算例と同一軸力を各柱に作用させた。

計算結果の1階圧縮側柱の作用軸力を図-3に示す。図より、平面解析結果は計算例と一致しているのに対して、立体フレーム解析の結果では、隣接構面が純ラーメンの場合と連層耐震壁の場合で大きく異なっている。すなわち、隣接構面が連層耐震壁の場合では、剛強な隣接構面に軸力が伝達されるため、下階壁抜け柱の圧縮軸力は計算例の半分程度まで減少している。一方、隣接構面が純ラーメンの場合には、隣接構面の軸力が、純ラーメンから下階壁抜け構面に伝達するため、計算例よりも大きな軸力となっている。図-4には、立体解析Bで剛床仮定の有無の比較を示しているが、剛床仮定ではより多くの軸力が伝達されるという結果になっている。

このように、検討用軸力には、隣接構面の影響を適切に考慮すべきであると判断される。

2.2 下階壁抜け柱の作用軸力

(1) 解析法概要

本章で用いる解析プログラム⁵⁾は、2次元非線形有限要素法で、図-5、6に鉄筋およびコンクリートの解析仮定を示し、表-1に解析で用いた材料特性を示す。

まず本解析プログラムの妥当性を検証するために、図-7に示す吉村らのRC柱試験体⁶⁾に対して解析を行った。このRC柱試験体は、耐震診断の対象である旧耐震基準による設計を想定しているものである。実験結果と解析結果の比

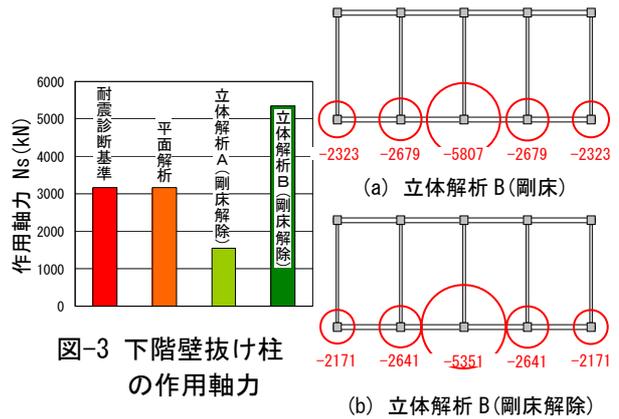


図-3 下階壁抜け柱の作用軸力

(a) 立体解析B(剛床)

(b) 立体解析B(剛床解除)

図-4 作用軸力分布

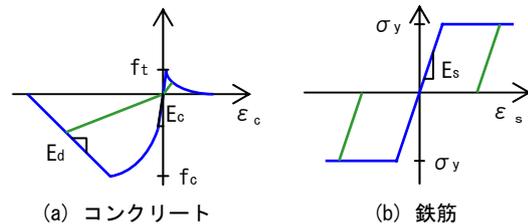


図-5 応力-ひずみ関係

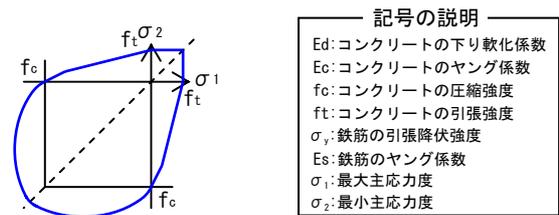


図-6 コンクリートの破壊条件

表-1 材料特性

コンクリート	圧縮強度	30.7	N/mm ²
	ヤング係数	28100	N/mm ²
主筋	降伏強度	388	N/mm ²
	ヤング係数	177000	N/mm ²
せん断補強筋	引張鉄筋比	0.47 - 0.85	%
	降伏強度	392	N/mm ²
	ヤング係数	174000	N/mm ²
	せん断補強筋比	0.14 - 0.20	%
	軸力比	0.2	

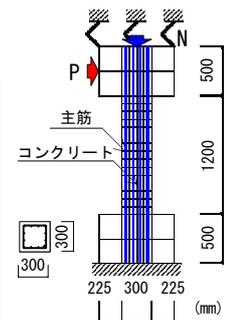
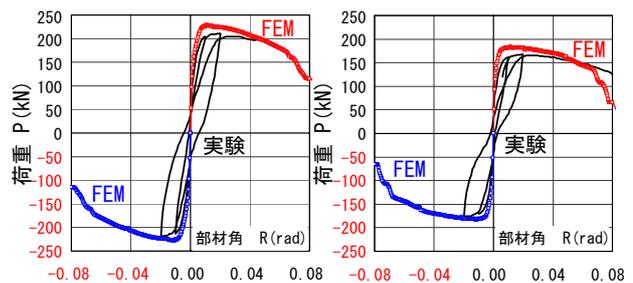


図-7 解析モデル



(a) 試験体No. 6

(b) 試験体No. 8

図-8 実験結果⁶⁾と解析結果の比較

較を図-8に示すが、両者はおよそ対応しており、本解析プログラムは妥当なものと判断した。

(2) 下階壁抜け柱への作用軸力

2章で検討対象としたものと同じ下階壁抜け柱に対する解析モデルを図-9に示し、解析に用いた材料特性を表-2に示す。

解析結果の荷重-変位関係を図-10に、1階柱の軸力の変化を図-11に示す。図より、解析結果の圧縮軸力は、計算例の値よりも小さく半分程度となっている。これは、図-12のように、引張側柱には軸力のみならず曲げモーメントやせん断力が作用するため、全主筋が降伏していないことに起因している。このように、引張側柱の全主筋が降伏するという診断基準の仮定は、検討用軸力を過大評価する傾向となる。

(3) 軸力比制限値に関する考察

耐震診断基準では、検討用軸力と軸力比制限値 0.4（帯筋間隔 10cm 以下では 0.5）の比較から補強の要否を判断しているが、ここでは、この制限値の妥当性について検討する。

図-7の柱単体の解析モデルに対して、作用軸力を変化させたパラメトリック解析を実施した。解析結果の荷重-部材角関係を図-13に示し、耐力が90%に低下したときの部材角と軸力比の関係を図-14に示すが、耐震診断基準の制限値を超えると、変形能力が急激に低下しており、軸力比制限値はおよそ妥当な値と判断される。

以上、本章の解析によれば、耐震診断基準の軸力制限値はほぼ妥当と判断されるものの、検討用軸力は隣接構面の影響により大きく変動し、さらに引張側柱の応力状態によっても変化する可能性があるという結果であった。

3. RC柱片側補強の耐震性能

本章では、下階壁抜け柱に対して、軸支持能力を向上させるためのRC巻き立て補強を対象として、その耐震補強効果について解析的に考察を行う。

RC巻き立て補強は、図-15のように既存柱の全周を鉄筋コンクリートにより補強することが

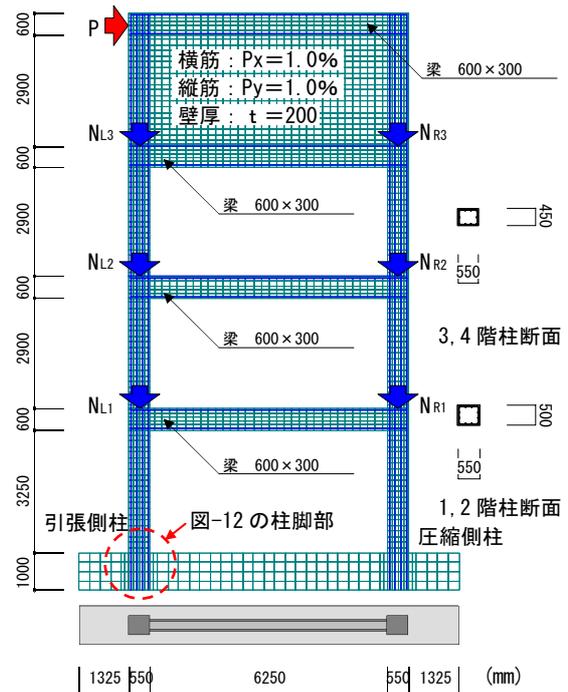


図-9 解析モデル(文献2)の計算例

表-2 材料特性

コンクリート	圧縮強度	20.6	N/mm ²
	ヤング係数	27690	N/mm ²
主筋	降伏強度	300	N/mm ²
	ヤング係数	210000	N/mm ²
せん断補強筋	引張鉄筋比	0.877	%
	降伏強度	300	N/mm ²
せん断補強筋	ヤング係数	210000	N/mm ²
	せん断補強筋比	0.254	%

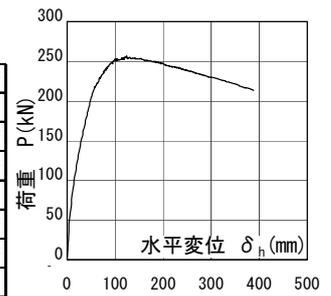


図-10 荷重-変位関係

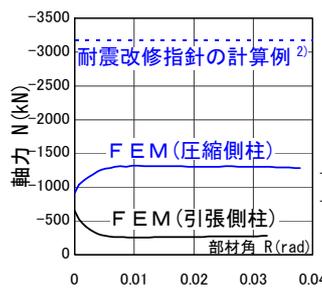


図-11 軸力-部材角関係

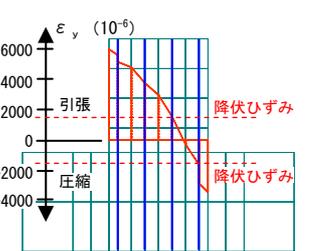


図-12 柱脚部のひずみ状態

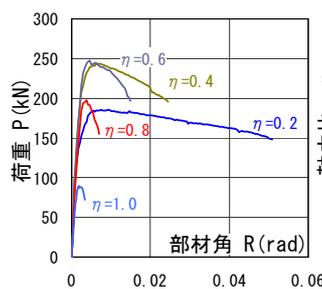


図-13 荷重-部材角関係

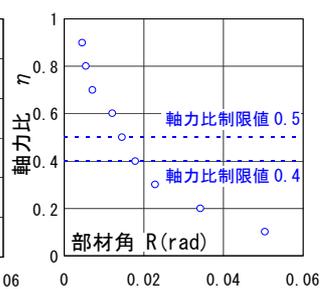


図-14 90%耐力時の変形

原則である³⁾。しかしながら、耐震診断基準における下階壁抜け柱の検討では、補強後の柱断面積から計算される軸力比のみから補強の要否が判断されるため、建物の使い勝手や施工性等の制約で全周補強が困難な場合には、図-16(b), (c)のような外側や内側のみを増し打ちする片側補強が実施されることも多い。

本章では、この片側補強された柱の耐震性能について、解析的な検討を行う。

3. 1 逆対称曲げを受ける柱の補強効果

解析は、図-16のように、補強なし柱、両側補強柱、外側補強柱、内側補強柱の4ケースについて実施した。材料特性を表-3に、解析モデルを図-17に示す。補強部は、既存柱よりコンクリート強度を高めているが、モデル化では既存柱と一体で接合要素等は用いていない。また本報の解析は2次元解析であるため、全周補強を図-16(d)のような両側補強に置き換えているが、補強後の柱断面積は4ケースとも同一となっている。また、柱の軸支持能力を増大させる補強では、できるだけ曲げ強度に影響を与えない工法が採用されることを勘案して、本解析では補強部を無筋としている。

解析結果を図-18～図-21に示す。図-18(a)のせん断力-部材角関係をみると、両側補強柱および片側補強柱は、補強なし柱に比べて耐力が上昇している。また、逆対称曲げ応力状態のため、外側補強柱と内側補強柱とはほとんど同様な補強効果となっている。一方、変形能力についてみると、片側補強柱は、両側補強柱に比べて耐力低下時の変形が小さく、変形能力は劣る結果となっている。図-18(b)の柱の軸方向変位をみても、片側補強柱は、両側補強柱に比べて早期に軸方向変位が伸びから縮みに変化しており、軸支持能力が早期に劣化していることがわかる。これは、逆対称曲げ状態では、柱頭と柱脚の対角位置に曲げ圧縮ゾーンがあり、図-19～図-21の変形状態や応力-ひずみ関係からわかるように、片側補強で補強されていない部分の圧縮側コンクリートが圧壊してしまうことが原因

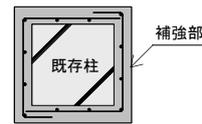


図-15 RC巻き立て補強

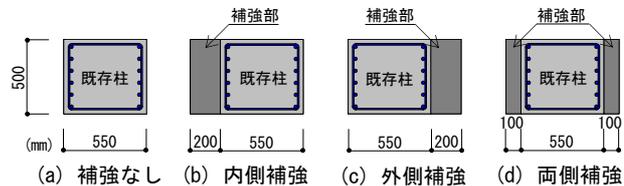


図-16 解析モデルの柱断面

表-3 材料特性

コンクリート	既存部	圧縮強度	18 N/mm ²
		ヤング係数	26100 N/mm ²
補強部		圧縮強度	36 N/mm ²
		ヤング係数	34770 N/mm ²
主筋		降伏強度	300 N/mm ²
		ヤング係数	210000 N/mm ²
		引張鉄筋比	0.877 %
せん断補強筋		降伏強度	300 N/mm ²
		ヤング係数	210000 N/mm ²
		せん断補強筋比	0.2 %

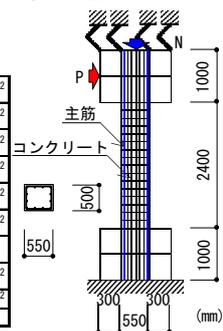


図-17 解析モデル

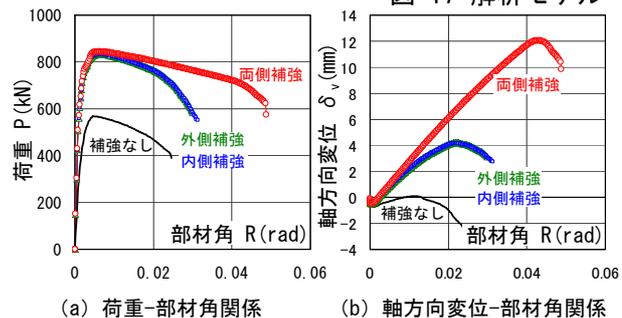


図-18 増し打ち補強効果の比較

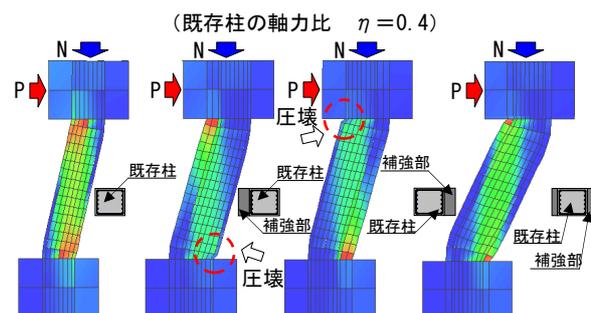


図-19 変形状況

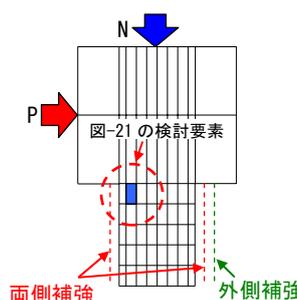


図-20 検討要素位置

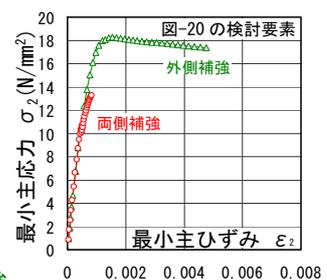


図-21 $\sigma_2 - \varepsilon_2$ 関係

と判断される。なお軸力比 0.2 についても解析を実施したが、結果は同様の傾向であった。

次に、図-22 に示すような 2 階建モデルでの解析を実施したが、解析に用いた材料や配筋は、表-3 と同様である。解析結果は図-23, 24 に示すように、前述の解析結果と同様であった。

このように、片側補強は、補強されていない側の曲げ圧縮ゾーンのコンクリート圧壊に対する補強が不十分と判断される。

3. 2 片持ち柱に近い応力状態での補強効果

ここでは、図-9 のような下階壁抜け構面について、柱の増し打ち補強の効果について検討する。解析は前節と同様の 4 ケースについて実施した。図-25, 26 に解析結果を示すが、外側補強は、内側補強に比べて耐力および変形能力が向上し、同じ片側補強でも、外側補強と内側補強で性状が大きく異なっている。これは、圧縮側柱の曲げモーメント分布が片持ち柱に近くなっているため、柱脚部外側が圧縮ゾーンとなり、その部分が補強されている外側補強柱と両側補強柱の耐震性能が向上したと考えられる。

以上のように、片側補強された柱は、両側補強柱に比べて補強効果が劣るだけでなく、応力状態により補強効果が変わってしまうという問題点がある。

3. 3 増し打ち厚さを増加させた片側補強の効果

前節までの検討によれば、片側補強は両側補強ほどには耐震性能は向上しないという結果であった。本節では、片側補強において、増し打ち厚さを増加させた場合に、どの程度耐震性能が向上するかについて検討を行った。解析モデルの柱断面を図-27 に示すが、前節までの補強厚さ 200mm に比べて、厚さを 250mm と 300mm に増加させている。

解析結果の変形図と荷重-変位関係を図-28, 29 に示すが、補強厚さの増加により、耐力は向上するものの、変形能力はほとんど向上しておらず、増し打ち厚さを増加させても、片側補強は、両側補強に比べて脆性的な破壊性状は改善しないという結果であった。

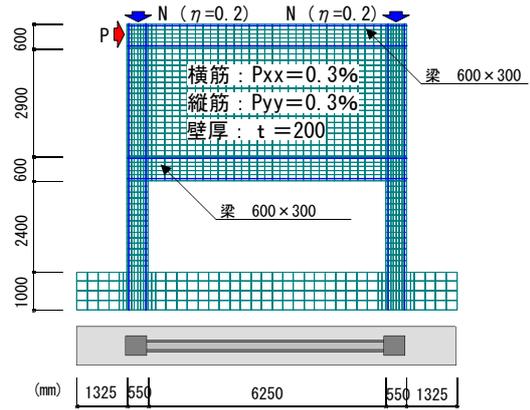


図-22 解析モデル(2階建)

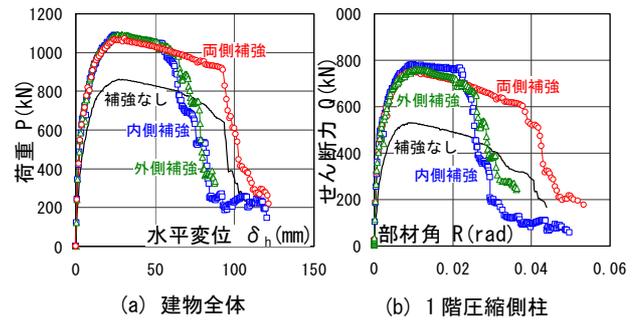


図-23 荷重-変位関係

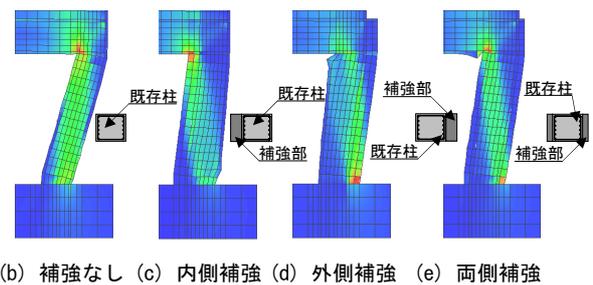
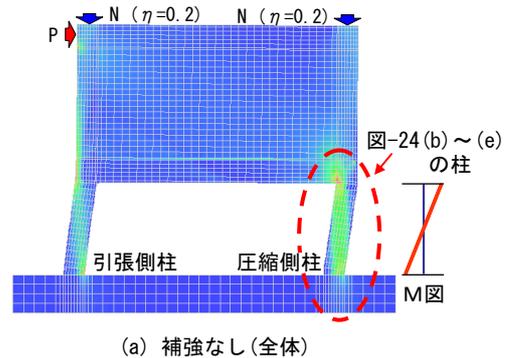


図-24 変形状況

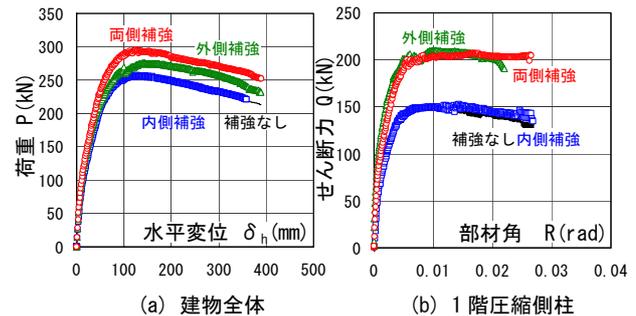
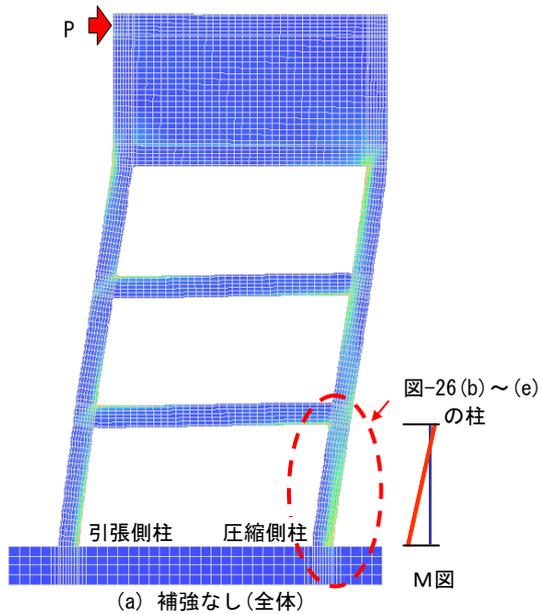
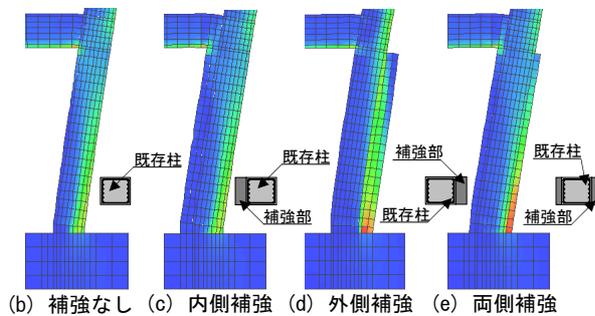


図-25 荷重-変位関係



(a) 補強なし(全体)



(b) 補強なし (c) 内側補強 (d) 外側補強 (e) 両側補強

図-26 変形状況

4. 結論

本報では、耐震診断基準における下階壁抜け柱の検討方法の妥当性について解析的な考察を行った。解析結果によれば、軸力比制限値については、妥当な値という結果であったが、検討用軸力は、隣接構面の状況により大きく異なるものであった。さらに、引張側柱の軸降伏時の軸力についても、応力状態によっては計算例の値と大きく異なるという結果であった。したがって、下階壁抜け柱の検討においては、隣接構面の影響や、部材の応力状態を適切に考慮する必要があると思われる。

また、柱のRC巻き立て補強において、建物の使い勝手等の制約から実施される片側補強は、全周補強ほどには補強効果が期待できないだけでなく、応力状態によっては補強効果がまったくないという可能性もあるなど、補強効果が変わってしまうという問題点がある。さらに、片側補強で、増し打ち厚さを増加させても、変形

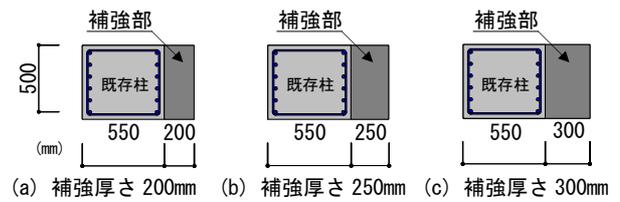


図-27 解析モデルの柱断面

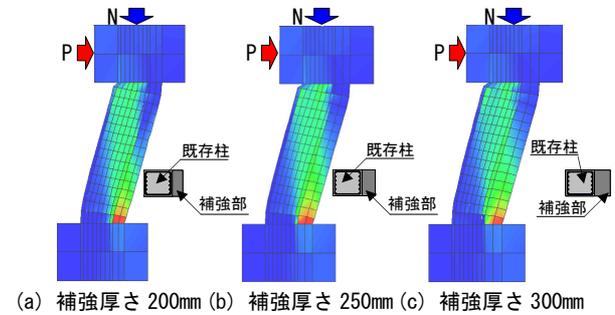


図-28 変形状況

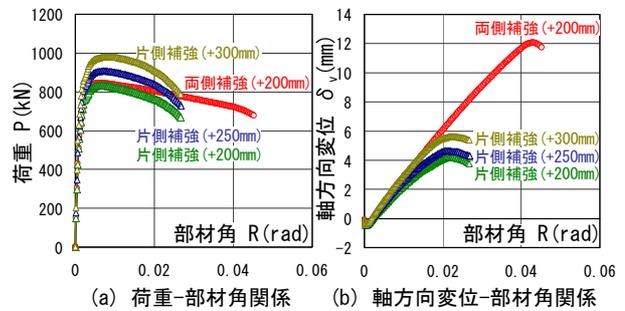


図-29 増し打ち厚さの影響

能力の向上は小さいという結果であった。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会:改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準 同解説, 2001
- 2) 文部科学省:学校施設の耐震補強マニュアル RC造校舎編 2003改訂版
- 3) 文部科学省:既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針 同解説 2001年改訂版
- 4) MIDAS・GEN:プログラムの概要, 2002
- 5) ATENA: Computer Program for Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Cervenka Consulting, Revision Oct.31, 2005
- 6) 高稲 宜和, 芳村 学, 中村 孝也:鉄筋コンクリート柱の崩壊に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 573 号, pp.153-160, 2003年11月