

# 論文 火災による部分的性能劣化が梁降伏型 RC 構造物の耐震性能に与える影響

卯野 恵美\*1・衣笠 秀行\*2

**要旨** : 火災により構造物の一部の柱または梁に剛性劣化や耐力劣化などの部分的性能劣化が生じた 5 層 3 スパンの梁崩壊型 RC 構造物に対して地震応答解析を行い, 「降伏機構の保証」と「損傷度の増加」の 2 面から部分的性能劣化が耐震性能へ与える影響について検討を行った。その結果, 柱の部分的性能劣化は周辺柱の作用せん断力を増加させ崩壊機構を変化させる恐れがある, 梁の部分的性能劣化は層間変形角を増大させる, 耐力劣化は剛性劣化と比較し, 耐震性能へ及ぼす影響が大きいということが明らかになった。

**キーワード** : 防火区画, 梁降伏型, 部分的性能劣化, 耐力劣化, 剛性劣化

## 1. はじめに

火災時において防火区画が機能した場合, 高温に曝される柱や梁は構造物の一部に限られる。このような場合, 火災後架構を形成する一部の柱や梁の性能が低下することが考えられる。火災時の長期荷重に対する研究<sup>1)</sup>は多く行われており設計法にも反映されている一方で, 火災後架構の一部が性能劣化することによる耐震性能への影響については十分に明らかにされていないのが現状である。また, 近年 RC 構造物の耐震設計法は高度化しており, 梁降伏型設計法に見られるようなあらかじめ崩壊機構を計画するものでは, 水平耐力の確保だけでなく, 計画した崩壊機構の実現が非常に重要となる。そこで, 本研究では地震応答解析に基づき, 火災による架構の部分的性能劣化が梁降伏型 RC 構造物の耐震性能に及ぼす影響について検証する。

## 2. 研究方法

### 2.1 解析対象建物モデル

解析対象建物は図-1に示すような, 階高が 3.5m, スパンが 6m の 5 層 3 スパンの純ラーメン RC 構造物であり, 一次固有周期は 1.058[s]である。重量は単位床面積あたり 12kN/m<sup>2</sup>とする。

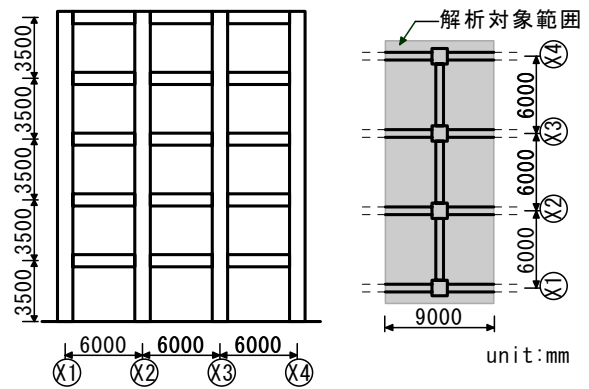


図-1 解析対象建物の立面・平面図

部材のモデル化に当たり, 梁には両材端に曲げバネ及び部材中央にせん断バネを設けた。ただし, 本モデルにおいては梁の曲げ強度にスラブの強度を含んでおり, 梁の熱劣化は梁及びスラブの劣化を意味する。柱には両材端に曲げバネ, 中央にせん断バネに加え軸方向変形を考慮するために軸バネを設けた。各バネの復元力特性として, 曲げバネには Degrading-Bilinear 型, せん断バネにはせん断破壊を生じさせないとしているため弾性バネを使用し, 軸バネには圧縮側が弾性, 引張側は bilinear 型のバネを用いた。また, 接合部は剛と仮定した。減衰は瞬間剛性比例型で弾性 1 次モードに対し 5%とする。なお, 数値

\*1 東京理科大学大学院生 理工学研究科建築学専攻 (正会員)

\*2 東京理科大学 理工学部建築学科 助教授 工博 (正会員)

積分には Newmark- $\beta$ 法 ( $\beta=1/4$ )を用いる。

降伏ヒンジは最上階を除く各層梁端及び1階柱脚・5階柱頭に計画した。各部材のひび割れ発生による剛性低下を考慮して、 $A_i$ 分布に基づく外力分布での静的線形解析を行い、保有水平耐力がベースシア係数のおよそ0.3程度となるような各層梁端及び1階柱・5階柱の曲げ強度を具体的な配筋は決めずに直接仮定した。なお、各層梁の曲げ強度は各スパンで強度を算出し、最大の強度をその層の曲げ強度とした。図-2、3はJMA神戸(NS方向)による地震応答解析の結果より得られた各柱の作用せん断力分布及び各層の最大層間変形角分布を示している。

## 2.2 検討対象について

前節で述べた解析対象建物を標準として(以下、標準架構)、この架構の一部の剛性あるいは耐力を劣化させ標準架構と比較することによって耐震性能に及ぼす影響について検討を行う。表-1に本研究で検討した部分的性能劣化について示す。剛性劣化は標準架構の1/3、2/3、1/10の3レベル、耐力劣化は標準架構の1/3、2/3の2レベルである。なお、剛性劣化の1/10は柱及び梁の極度の劣化状態を相対比較する目的で設定したものである。柱は外柱及び内柱の1階(最下階)、3階(中間階)、5階(最上階)、梁も同様に外梁及び内梁の1階(最下階)、3階(中間階)、5階(最上階)に劣化を想定した。以下、解析ケースを「外柱1F剛性1/3」というように、「外 or 内」+「柱 or 梁」+「階数」+「剛性 or 耐力」+「劣化レベル」をつなげて呼ぶこととする。なお、劣化が起こった場合でも梁降伏機構及びヒンジ位置は標準架構から変化しないものとした。このため、耐力劣化はヒンジ位置のみに適用し、ヒンジを有しない柱・梁に関しては剛性劣化のみ検討を行うこととした。また、剛性劣化は曲げバネ、せん断バネ及び軸バネの剛性を低下させ、耐力劣化は曲げバネの降伏耐力を低下させることで解析を行った。

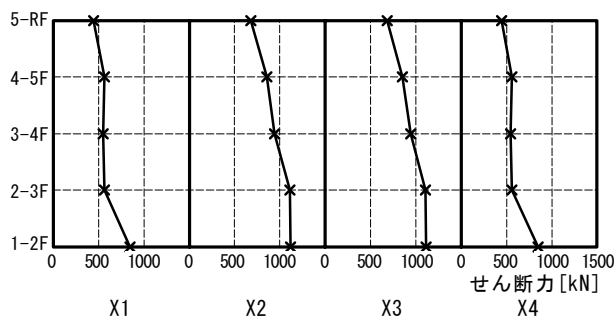


図-2 作用せん断力分布(標準架構)

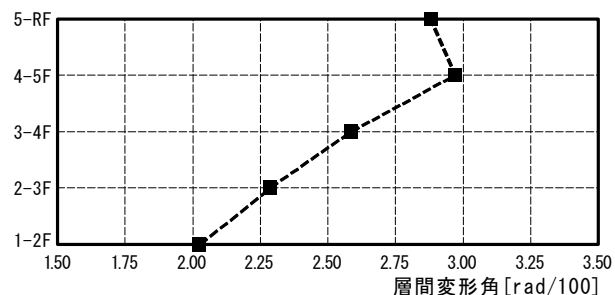


図-3 最大層間変形角分布(標準架構)

表-1 解析ケース

		外柱			内柱			外梁			内梁		
		1F	3F	5F	1F	3F	5F	1F	3F	5F	1F	3F	5F
剛性劣化	2/3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	1/3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	1/10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
耐力劣化	2/3	○	-	○	○	-	○	○	○	-	○	○	-
	1/3	○	-	○	○	-	○	○	○	-	○	○	-

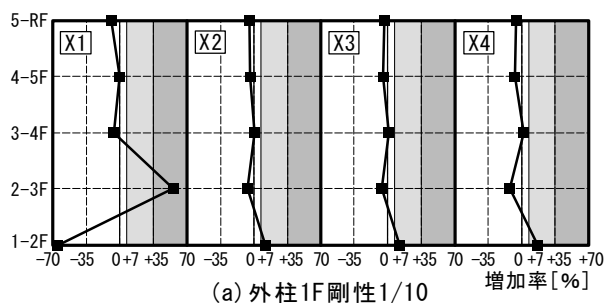
## 3. 耐震性能に及ぼす影響

### 3.1 検討方法

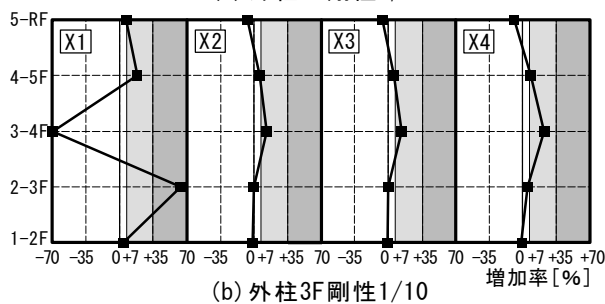
梁降伏型 RC 構造物の安全性は、計画した降伏機構の確実な実現によるエネルギー吸収能力の確保と保有水平耐力を確保することによる層間変形角の抑制によって保証される。ここでは、部分的性能劣化が耐震性能に及ぼす影響を、「降伏機構の保証」及び「損傷度の増加」の2面から検討を行う。柱の作用せん断力の増加は降伏機構が梁崩壊型から層崩壊型へ移行する可能性の増加を意味する。そこで「降伏機構の保証」に関しては、部分的性能劣化により各階柱に作用するせん断力がどの程度増加したかについて検討する。また、「損傷度の増加」に関しては、層間変形角の増加について検討を行い、架構の

部分的性能劣化が建物の損傷増加及び安全性の低下にどのように影響するかを明らかにする。なお、標準架構を1種類としたことなど解析ケースが限られていることから、劣化箇所や劣化レベルが異なることによる耐震性能低下の定性的比較を中心に行うこととした。また、耐力劣化と剛性劣化が架構に及ぼす定性的傾向は本解析の範囲でほぼ同様であったことから、耐力劣化と剛性劣化の影響比較以外は、剛性劣化 1/10 の解析結果を中心に考察を行うこととする。

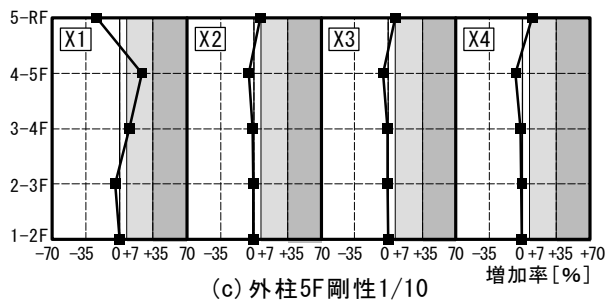
### 3.2 柱の作用せん断力に与える影響



(a) 外柱1F剛性1/10



(b) 外柱3F剛性1/10



(c) 外柱5F剛性1/10

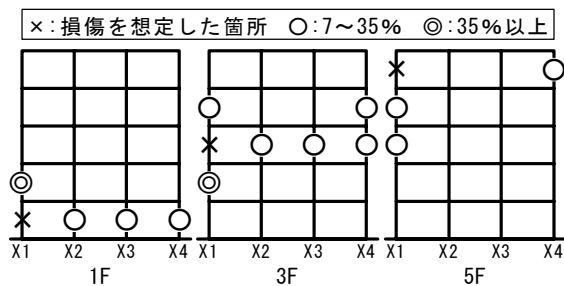
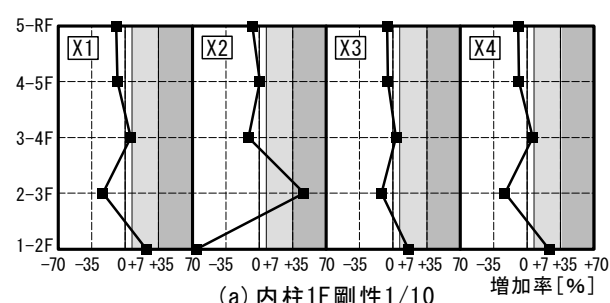


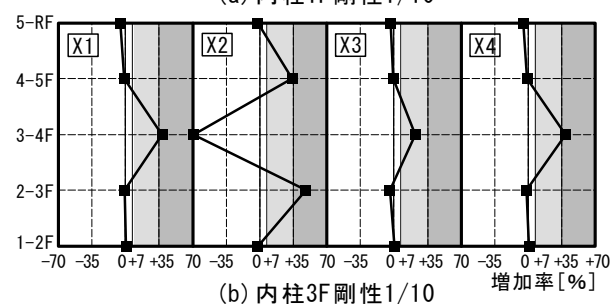
図-4 外柱の剛性劣化 1/10 による柱のせん断力増加率

### (1) 柱の劣化が及ぼす影響

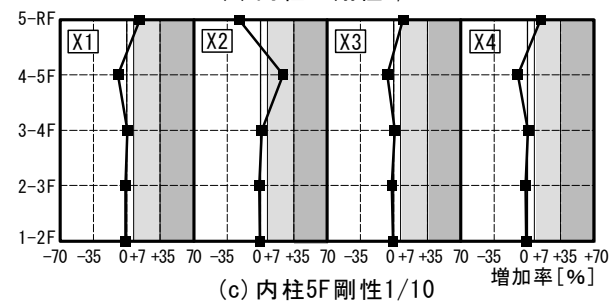
図-4, 5は柱に対して部分的性能劣化が起こった場合における柱の作用せん断力の変化を示したものである。図は各階柱の作用せん断力の増加を標準架構における値(図-2)を基準に百分率で表したものである。図-4は外柱に剛性劣化 1/10 を想定した場合における周辺柱の作用せん断力の変化を示したものである。なお、図中の×印は剛性劣化を想定した柱を示し、作用せん断力が 35%以上増加した柱には◎印, 7~35%増加した柱には○印で示した。ここに示す



(a) 内柱1F剛性1/10



(b) 内柱3F剛性1/10



(c) 内柱5F剛性1/10

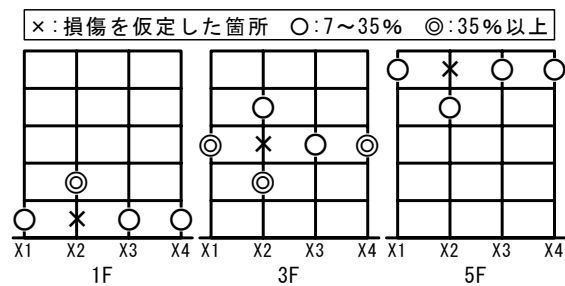


図-5 内柱の剛性劣化 1/10 による柱のせん断力増加率

7%, 35%とは、靱性指針において許容される動的増幅率を目安にしたものである。図-4より劣化させた柱の上下階の柱(最下階であれば2階、最上階であれば4階)及び、同階の剛性を劣化させていない柱の作用せん断力が増加していることが分かる。この現象は特に劣化させた柱の上下階の柱において増加率が35%を超えるものとなっていることが分かる。また、この現象は1階及び3階の柱が劣化する場合に特に顕著であった。図-5は内柱に剛性劣化1/10を想定した場合における周辺柱の作用せん断力の変化を示

したものである。外柱を劣化させた際と同様に周辺柱の作用せん断力が増加する傾向が見られた。特に、3階の内柱が劣化する場合、ほとんどの周辺柱の作用せん断力が35%以上となっており、ある特定層への負担増加が明白であることから崩壊機構が梁崩壊型から層崩壊型へ移行する可能性が大きいと考えられる。

(2) 梁の劣化が及ぼす影響

図-6は最下階・中間階・最上階の外梁の剛性を1/10にした場合における、周辺柱の作用せん断力の変化を示している。柱の検討同様に増

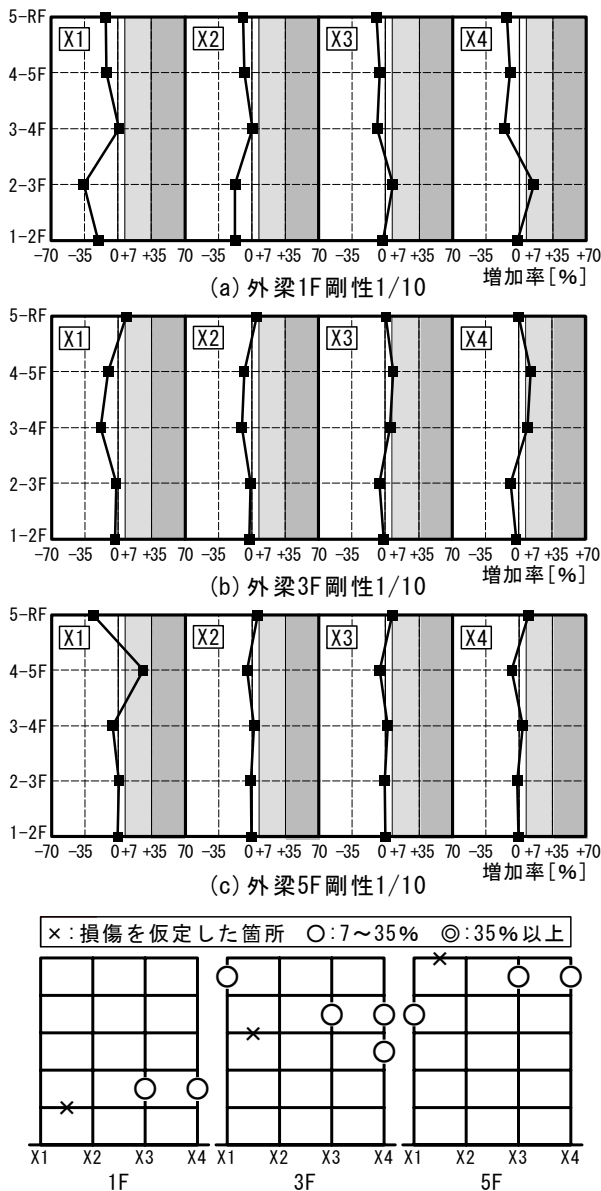


図-6 外梁の剛性劣化 1/10 による柱のせん断力増加率

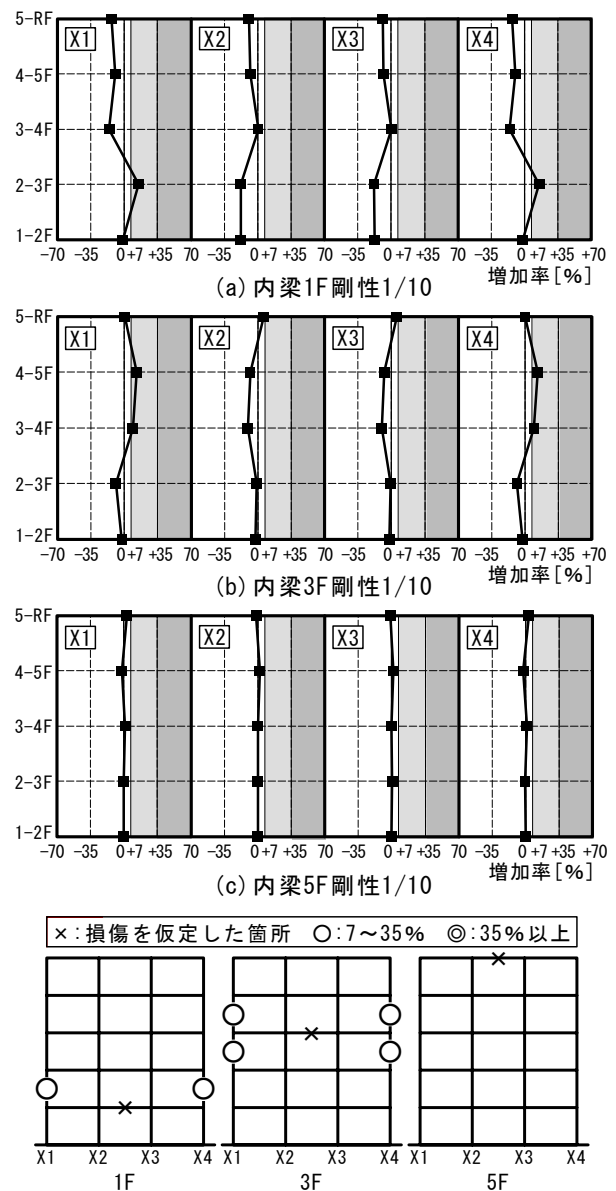


図-7 内梁の剛性劣化 1/10 による柱のせん断力増加率

加した柱の位置を図中に示した。図から分かるように劣化させた梁に取り付く柱以外の柱で、最下階であれば2階柱、中間階であれば3・4階柱、最上階であれば5階柱で、作用せん断力が増加していることが分かる。また、内梁の剛性を1/10とした図-7からも同様の結果が見られた。

梁が劣化した場合における、周辺柱の作用せん断力の増加は柱を劣化させた場合(図-4, 5)と比較し大きくはなく、増加率が35%を超えるものはなかった。この結果より、梁の剛性劣化は柱の剛性劣化に比べて、降伏機構へ及ぼす影響は小さいと考えられる。

### (3) 剛性劣化と耐力劣化の比較

図-8に外柱1Fの剛性を1/3にしたものと、耐力を1/3としたものを示した。剛性劣化と耐力劣化を比較すると、劣化を想定した柱の直上階の柱(X1通り2-3F)において耐力劣化の際に発生する作用せん断力が剛性劣化の1.3倍となっていることが分かる。また、他の柱を劣化させたケースにおいても同様の傾向が見られることから、耐力劣化は剛性劣化と比較し作用せん断力に大きな影響力を有していると考えられる。

## 3.3 層間変形角に与える影響

### (1) 柱の劣化が及ぼす影響

図-9は外柱及び内柱の剛性を1/10とした場合における層間変形角の変化を標準架構(図-3)と比較したものである。図より、外柱において、1階の剛性を劣化させた場合2層の層間変形角が、3階の剛性を劣化させた場合4層、5階の剛性を劣化させた場合最上層の層間変形角が最も増加していることが分かる。内柱に関しては、1階を劣化させた場合は1層の層間変形角が最も増加しているが、3階・5階が劣化した場合は外柱と同様の結果が見られた。

### (2) 梁の劣化が及ぼす影響

図-10は外梁及び内梁の剛性を1/10とした場合における層間変形角の変化を標準架構(図-3)と比較したものである。柱と同様に劣化箇所

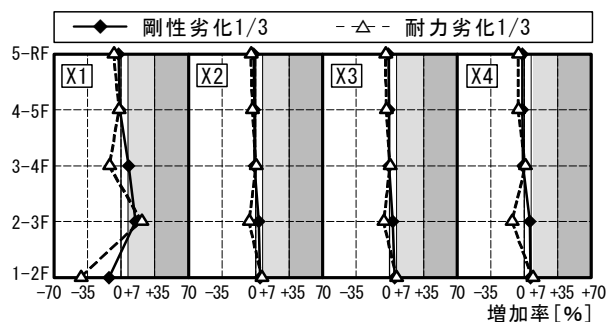
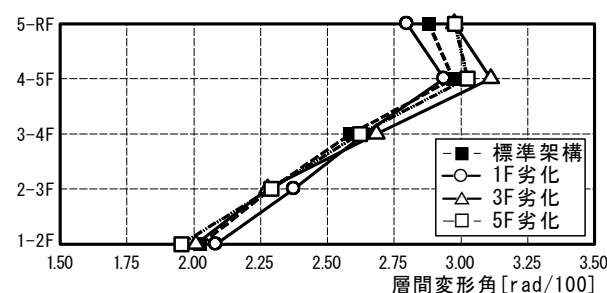
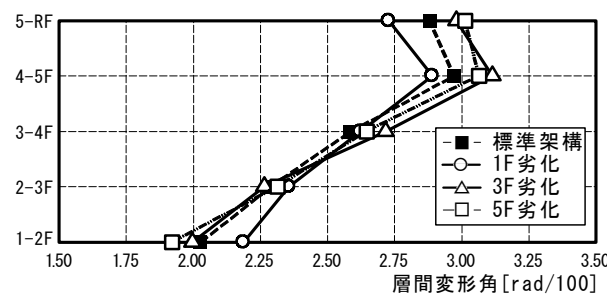


図-8 外柱1F 剛性1/3と耐力1/3による柱のせん断力増加率

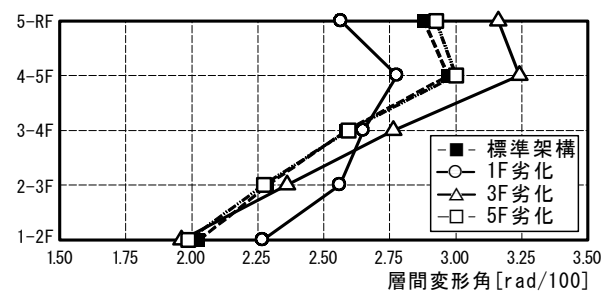


(a) 外柱剛性劣化1/10

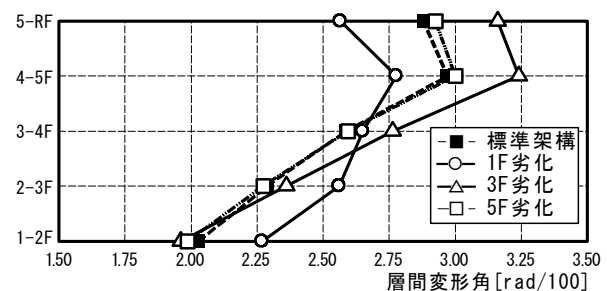


(b) 内柱剛性劣化1/10

図-9 柱剛性劣化1/10による層間変形角



(a) 外梁剛性劣化1/10



(b) 内梁剛性劣化1/10

図-10 梁剛性劣化1/10による層間変形角

が1階の場合には1層の層間変形角が、3・5階の場合には最上層の層間変形角がもっとも増加していることが分かる。外梁、内梁ともに1階と3階が劣化した際に最も大きな影響を層間変形角に及ぼし、5階の劣化が及ぼす影響は小さいことが分かる。また、外梁と内梁を比較すると両者とも大差はないことが分かる。

### (3) 柱の劣化と梁の劣化の比較

図-11は1Fの外柱、内柱、外梁、内梁の剛性を1/10とした場合における層間変形角の変化を標準架構と比較したものである。全ケースにおいて、1層から3層の変形角が増加した。また、変形増加が最大となった2層について比較すると外梁・内梁、次いで外柱、内柱の順に変形が大きいくことが分かる。

### (4) 剛性劣化と耐力劣化の比較

図-12に外柱1階の剛性を1/3にしたものと、耐力を1/3としたものを示した。1層の層間変形角について見てみると、剛性劣化では層間変形角が増加していないが、耐力劣化では増加していることが分かる。これより、耐力劣化は剛性劣化と比較し層間変形角に大きな影響を及ぼすと考えられる。

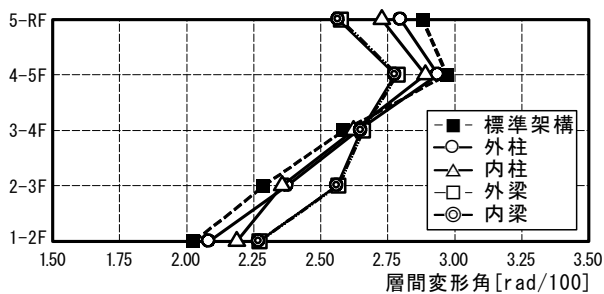


図-11 剛性劣化による層間変形角

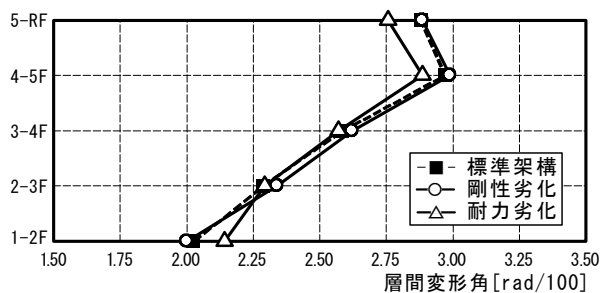


図-12 外柱1F剛性1/3と耐力1/3による層間変形角

## 4. まとめ

地震応答解析に基づき部分的性能劣化が梁降伏型 RC 構造物の耐震性能に及ぼす影響について検討を行った。以下に、得られた知見を示す。

(1)柱の部分的性能劣化は梁の劣化と比較し、層間変形角へ及ぼす影響が大きくないが、周辺柱の作用せん断力を大きく増加させる傾向にある。柱の部分的性能劣化は、崩壊機構の変化を引き起こし、安全性を低下させる可能性がある。また、最下階や中間階の劣化は同じ程度の影響を架構に及ぼし、その影響は最上階の性能劣化と比較し大きい。

(2)梁の部分的性能劣化は柱の劣化と比較し、周辺柱の作用せん断力へ及ぼす影響は大きくないが、層間変形角を大きく増加させる傾向にある。梁の部分的性能劣化は層間変形角の増加を引き起こし、安全性を低下させる可能性がある。また、最下階や中間階の劣化は同じ程度の影響を架構に及ぼし、その影響は最上階の性能劣化と比較し大きい。

(3)耐力劣化は剛性劣化と比較し、崩壊機構の変化と層間変形角の増加の両者に対して大きな影響を及ぼす。

## 謝辞

解析には李康寧博士の立体骨組解析プログラム CANNY99 を使用させていただきました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 国土交通省住宅局建築指導課, 国土交通省建築研究所, 日本建築主事会議, 財団法人日本建築センター: 2001年版 耐火性能検証法の解説及び計算例とその解説, 井上書院, 2001.3