

論文 梁崩壊型 RC 建造物の火災による部分的性能劣化が崩壊機構に及ぼす影響

卯野 恵美^{*1}・衣笠 秀行^{*2}

要旨：火災により建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 9 層 3 スパンの梁崩壊型 RC 建造物に対して地震応答解析を行い、曲げ余裕度及びせん断余裕度を用いて、部分的性能劣化が崩壊機構へ及ぼす影響について検討を行った。また、層間変形角に着目し建造物の安全性・復旧性について検討を行った。その結果、柱劣化は周辺柱の曲げ余裕度・せん断余裕度を低下させ 1 層の層崩壊を形成する可能性がある、梁劣化は劣化させた梁に取り付く柱以外の柱の余裕度を低下させ 2 層の層崩壊を形成する可能性がある、中間階及び最上階を劣化させた場合層間変形角の総和が増加することが明らかになった。

キーワード：防火区画、梁崩壊型、部分的性能劣化、曲げ余裕度、せん断余裕度

1. はじめに

建造物において火災が発生し防火区画が機能した場合、損傷を受ける部材は建造物の一部に限られ、その劣化には剛性劣化や耐力劣化といったものが考えられる。前報では、崩壊機構が変化しないモデルを用いて地震応答解析を行った結果、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ことを明らかにした。そこで本研究では崩壊機構の移行を許容したモデルに対して地震応答解析を行い、せん断余裕度及び曲げ余裕度を用いて部分的性能劣化が崩壊機構に及ぼす影響について、また層間変形角に着目し建造物の安全性・復旧性に及ぼす影響について把握することを目的としている。

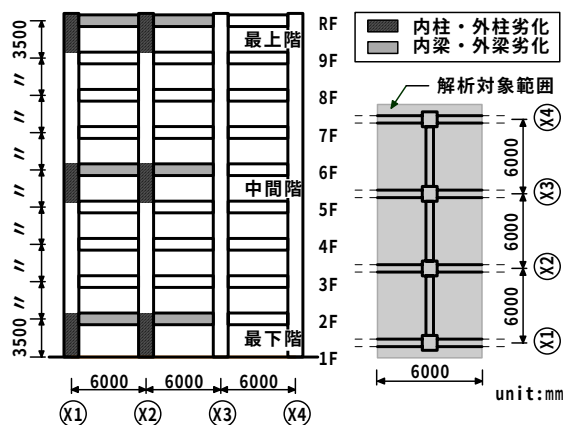


図-1 解析対象建造物の立面・平面図

表-1 柱・梁の寸法及びコンクリート強度

階	柱寸法 [mm]	梁せい [mm]	梁幅 [mm]	コンクリート 強度[kg/cm ²]
n, n-1	530×√An	560×√An	310×√An	190×√An
n-2, n-3	560×√An	580×√An	340×√An	230×√An
それ以下	600×√An	600×√An	370×√An	280×√An

n：最上階階数 An：最上階のAi値

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3.5[m]、1スパン6[m]の9層3スパンの純ラーメンRC建造物である。単位床面積あたりの重量は12[kN/m²]とし、各部材の寸法は表-1に示すようにAi分布を基に決定した¹⁾。建物のモデル化にあたり、各部材は材端バネ法によりモデル化を行った。各バネの復元力特性として、曲げバネにはDegrading bilinear型、せん断バネはせん断破壊を想定していないため弾性バネを使用し、軸バネには圧縮側が弾性、引張側がbilinear型のバネを用いた。また、接合部は剛とする。減衰

*1 大成建設株式会社

(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)

は弾性一次モードに対して 5%とし、数値積分法には Newmark- β 法 ($\beta=1/4$) を用いた。

降伏機構は梁崩壊型とし、最上階の柱頭・最下階の柱脚及び最上階を除く各層梁端にヒンジを計画した。また、降伏機構は梁崩壊型から層崩壊型への移行を許容するが、部材の破壊形状は曲げ破壊先行型でせん断破壊はしないものとする。各部材の曲げ強度は表-2 に示すようにひび割れ等による剛性低下を考慮して、 A_i 分布に基づいて $R=1/300$ まで静的漸増解析を行い、ヒンジ部材では各層で最小のもの、ヒンジを計画しない部材では最大のものとして算出された値に対して、動的増幅係数を乗じることにより曲げ強度を決定した。ここで、今回のモデルでは降伏機構の変化について捉えることを目的としているので、ELCENTRO.NS を 50kine で入力した際に明快な梁崩壊型を示すように、下層 3 層のヒンジ部材については算出された曲げ強度を 8 割程度に低減した。これにより得られた曲げ強度を代表階について表-3 示す。

2.2 検討対象について

前節で述べた対象建物を標準モデルとし、これら架構の一部の剛性あるいは耐力を低下させ、標準架構と比較することにより検討を行う。劣化対象箇所は、最上階・中間階・最下階の内柱・外柱及び内梁・外梁の計 12 箇所とし(図-1 参照)、劣化状態は標準状態の剛性を $2/3$, $1/3$, $1/10$ 低下させたもの及び耐力を $2/3$, $1/3$ 低下させたものの計 5 種類について検討を行った。なお、剛性劣化については曲げバネ及びせん断バネの剛性を低下させ、耐力劣化については曲げ強度を低下させることにより行う。なお、入力地震動には ELCENTRO.NS, KOBE.NS(以下, ELCE50, KOBE50)を 50kine に基準化したものを用いた。

2.3 検討方法

梁降伏型 RC 建造物の降伏機構へ及ぼす影響として、「降伏機構の保証」について検討を行う。「降伏機構の保証」では、作用せん断力に着目し、劣化箇所及び劣化状態によるせん断力の増加箇所、増加量について検討を行う。また、せ

表-2 部材の剛性低下率

	柱			梁	
	曲げ	せん断	軸	曲げ	せん断
最上階	* 0.7/1.0	0.7	1.0	1.0	1.0
中間階	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5
最下階	* 1.0/0.7	0.7	1.0	*(柱頭)/(柱脚)	

表-3 代表階の部材の曲げ強度

	柱		梁[kN・m]
	外柱[kN・m]	内柱[kN・m]	
最上階	520.8	970.7	722.9
中間階	1044.3	2147.2	1143.5
最下階	619.2	1297.3	1734.4

ん断余裕度及び曲げ余裕度を用い層崩壊型へ移行する危険性について検証する。ここで、せん断余裕度及び曲げ余裕度は部材が曲げ又はせん断崩壊にどの程度近づいたかを表す指標として式(1)、式(2)によって定義する。

$$\text{せん断余裕度} = 1 - \frac{Q_E}{Q_{Ai}\omega} \quad (1)$$

Q_E : 地震応答解析時の作用せん断力[kN]

Q_{Ai} : $R=1/120$ 時の作用せん断力[kN]

ω : 動的増幅係数

$$\text{曲げ余裕度} = 1 - \mu_s \quad (2)$$

μ_s : 柱頭又は柱脚の小さい曲げ塑性率

また、耐震性能へ及ぼす影響として「構造物の安全性・復旧性」について最大層間変形角及び層間変形角の総和に着目して検討を行う。なお、本解析において、剛性劣化及び耐力劣化ならびに、ELCE50 及び KOBE50 がおよぼす傾向についてはほぼ同様であったことから、以下に示す内容は特に明記しない限り ELCE50 入力時、剛性劣化 $1/10$ の結果を基に考察を行う。

3. 降伏機構の成立性

3.1 せん断余裕度と曲げ余裕度

(1) 柱の劣化が及ぼす影響

図-2 に内柱を劣化させた場合のせん断余裕度及び曲げ余裕度を示す。図より、最下階を劣化させた場合、劣化させた柱と同階の柱は曲げ・せん断余裕度ともに低下し、その低下率はほぼ等しい。また、劣化させた柱の直上階の柱は曲げ・せん断余裕度ともに低下するが、曲げ

余裕度の低下率に比べせん断余裕度の低下率が大きい。

中間階の劣化においても最下階を劣化させた場合と同様に、劣化させた柱と同階の柱では曲げ・せん断余裕度が低下し、劣化させた柱の直上下階の柱でも曲げ・せん断余裕度が低下するが同階の柱に比べせん断余裕度の低下が顕著である。また、余裕度が上昇した箇所に着目すると、劣化させた層の上層（6層）ではせん断余裕度が大きく上昇するが曲げ余裕度はほとんど変化しない。一方、下層（4層）ではせん断・曲げ

余裕度ともに上昇していることがわかる。

最上階の劣化においては、劣化させた内柱以外の内柱（X3 通り）では曲げ・せん断余裕度ともに低下しているのに対して、外柱ではせん断余裕度のみ低下していることがわかる。しかし、劣化させた層の下層の柱ではせん断余裕度は変化しないが、曲げ余裕度が大きく低下していることがわかる。

図-3 に外柱を劣化させた場合のせん断余裕度及び曲げ余裕度を示す。図より、最下階及び中間階を劣化させた場合、内柱を劣化させた場

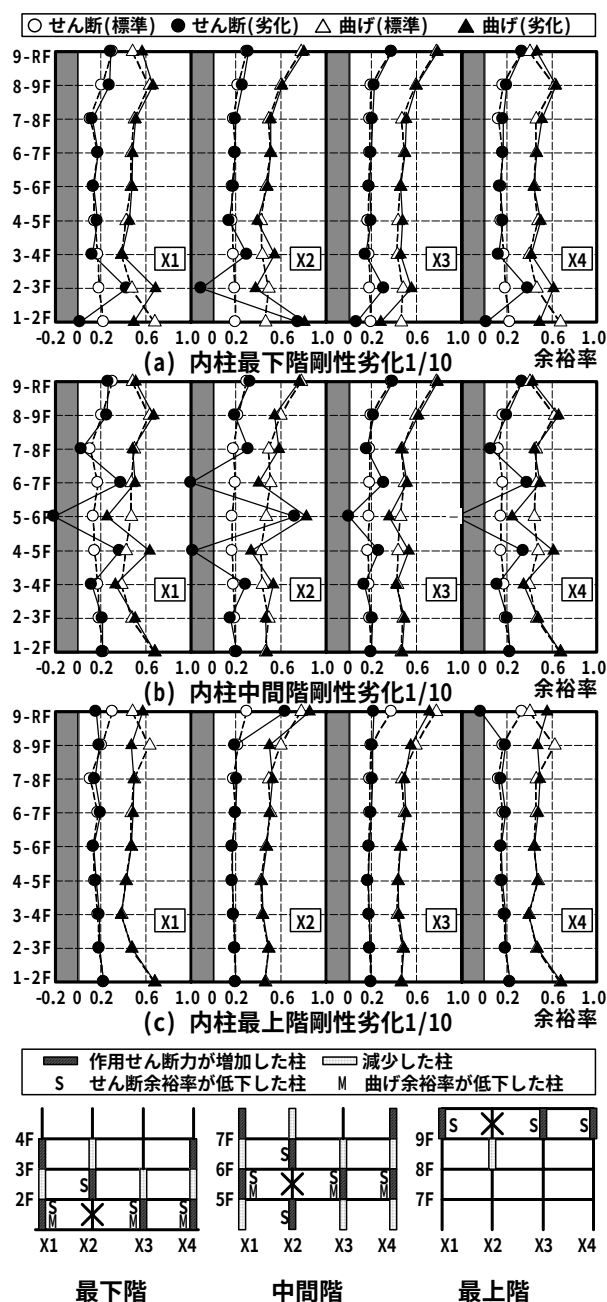


図-2 内柱劣化時の曲げ・せん断余裕率

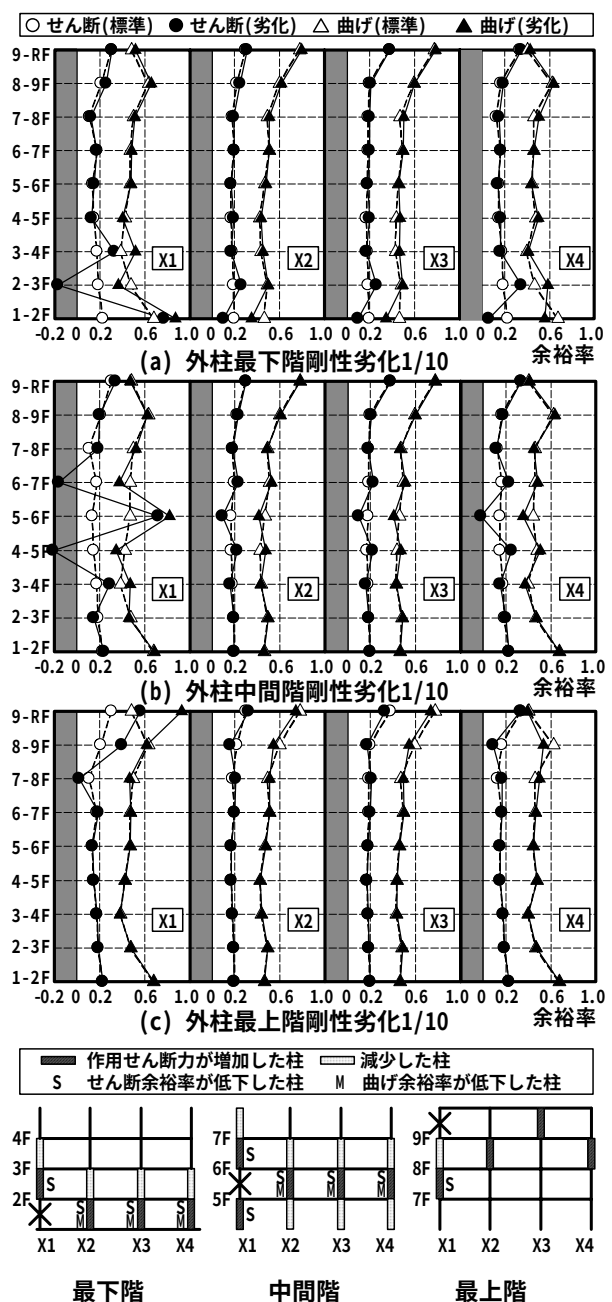


図-3 外柱劣化時の曲げ・せん断余裕率

合と同様に劣化させた階と同階の柱では曲げ・せん断余裕度ともに低下し、劣化させた柱の直上下階の柱ではせん断余裕度が著しく低下する。一方最上階を劣化させた場合では、劣化させた柱の直下柱においてせん断余裕度が上昇する。

これらより柱を劣化させた場合、内柱・外柱に関わらず、劣化させた柱と同階の柱は曲げ・せん断余裕度ともに低下し、劣化させた柱に取り付く直上下階の柱ではせん断余裕度が著しく低下することがわかる。しかし、外柱劣化は内柱劣化と比較して変化の割合は小さい。また、

劣化層が各余裕度へ及ぼす影響は、中間階、最下階、最上階の順に小さくなる。

(2) 梁の劣化が及ぼす影響

図-4に内梁を劣化させた場合のせん断余裕度及び曲げ余裕度を示す。図より、劣化させた層に関わらず劣化させた梁に取り付く柱では曲げ・せん断余裕度ともに上昇する。劣化箇所別に見ると、最上階及び最下階を劣化させた場合劣化させた梁に取り付く柱以外ではせん断余裕度が低下する。また、中間階を劣化させた場合も同様に劣化させた梁に取り付く柱以外ではせ

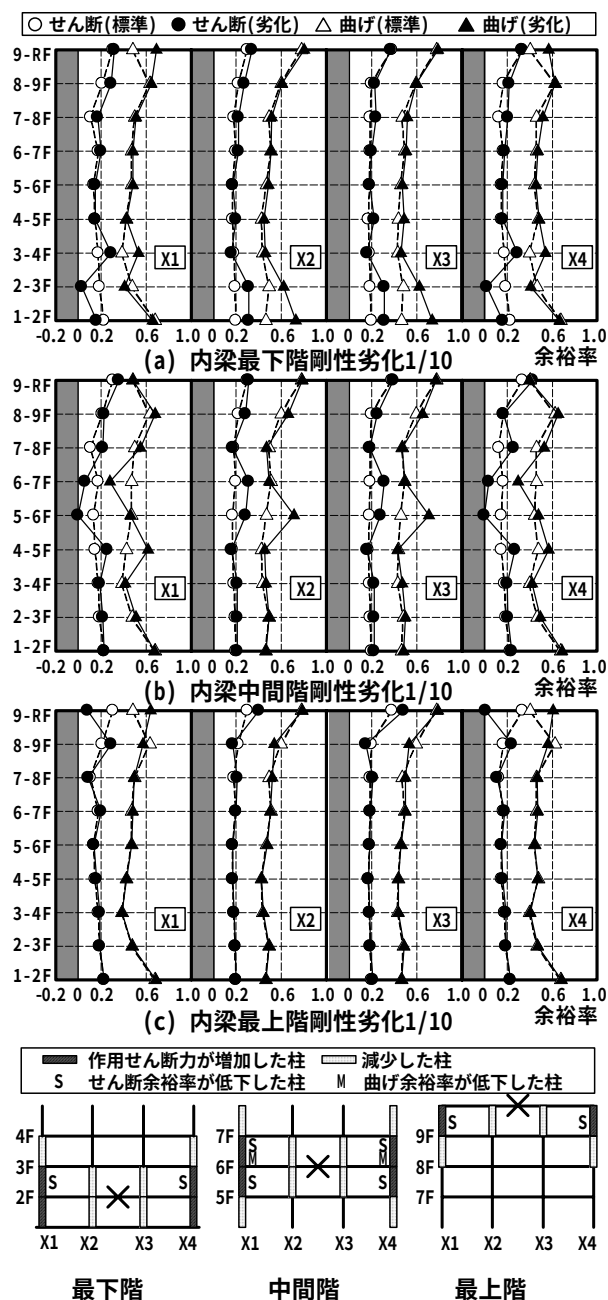


図-4 内梁劣化時の曲げ・せん断余裕率

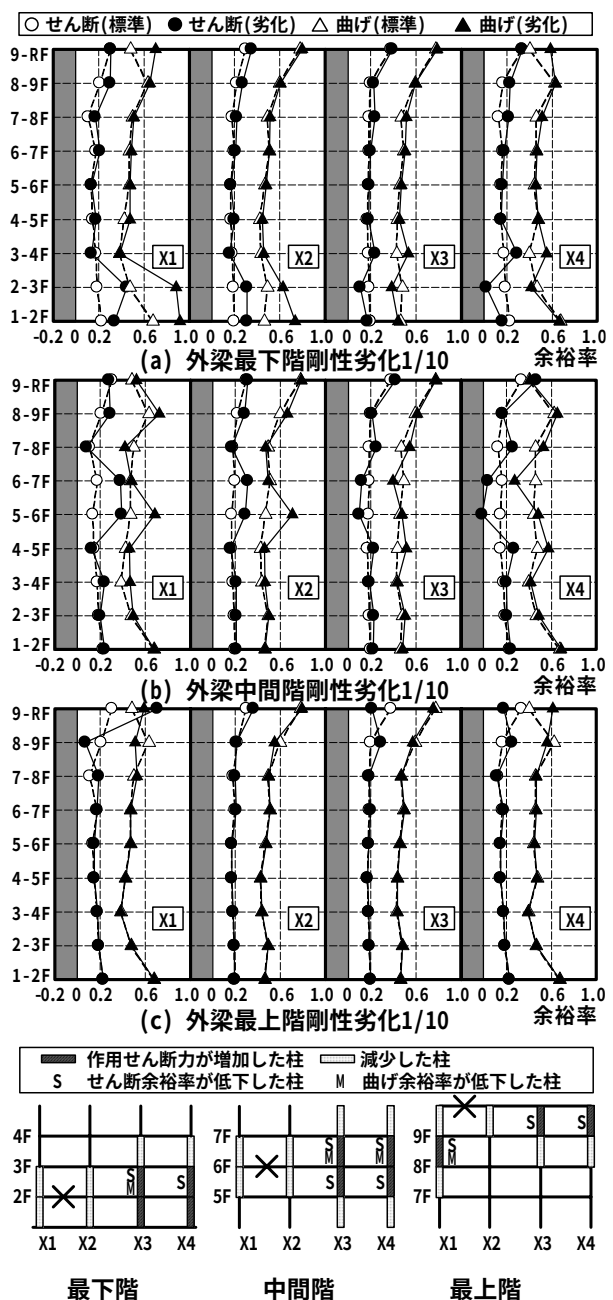


図-5 外梁劣化時の曲げ・せん断余裕率

せん断余裕度が低下するが、劣化させた梁の上層では曲げ余裕度も低下することがわかる。

図-5に外梁を劣化させた場合のせん断余裕度及び曲げ余裕度を示す。図より、外梁を劣化させた場合の余裕度の変化は内梁と同様の傾向となることがわかる。なお、内梁・外梁劣化ともに劣化層が各余裕度へ及ぼす影響は柱を劣化させた場合と同様、中間階、最下階、最上階の順に小さくなる。

柱劣化と梁劣化を比較すると、梁劣化は柱劣化に比べ曲げ・せん断余裕度低下に及ぼす影響は大きくない。また、柱劣化では劣化させた層の余裕度を低下させるが、梁劣化では劣化させた梁に取り付く2層分の柱の余裕度を低下させることがわかる。

3.2 ヒンジ状態図

前述のように地震波が崩壊機構へ及ぼす影響はほぼ等しいが、ELCE50に比べKOBE50が及ぼす影響が顕著であったため、図-6にKOBE50入力時、中間階の内柱及び内梁を劣化させた際のヒンジ状態図を示す。図より、内柱を劣化させた場合、外柱の柱脚・柱頭でヒンジが発生し、劣化させた柱の上下階の柱で塑性率が1に近づいている。これより、内柱ではまだ塑性するに至っていないが、大きい地震動が入力された場合には1層の層崩壊を形成する可能性が考えられる。次に内梁を劣化させた場合についてみると、劣化させた下階の柱脚にヒンジが発生しており、上階の柱頭で塑性率が1に近づいている。これより、柱が劣化した場合と同様に層崩壊を引き起こす危険性が考えられるが、柱劣化とは異なり2層の層崩壊を形成する可能性が考えられる。なお、図には示していないが外柱・外梁を劣化させた場合、塑性率は増大するが崩壊型を形成するには至っていない。また、最上階・最下階を劣化させた場合は、あらかじめ計画していたヒンジ部分の塑性率が増大するため、中間階を劣化させた場合に比べ、崩壊機構へ及ぼす影響は大きくない。

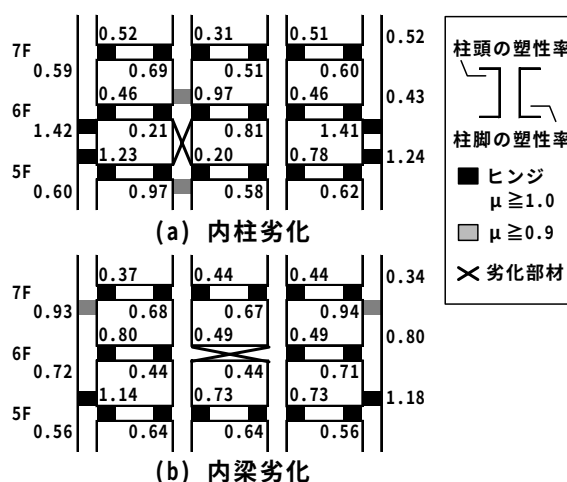


図-6 ヒンジ状態図

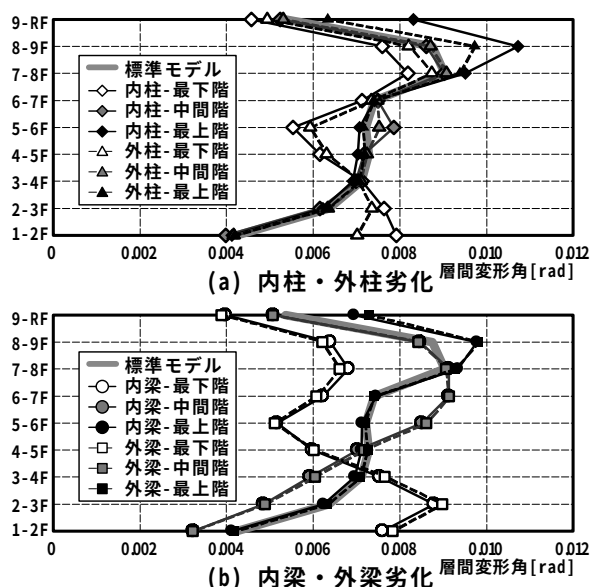


図-7 層間変形角の変化

4. 構造物の安全性・復旧性

4.1 劣化箇所が層間変形角に及ぼす影響

(1) 柱の劣化が及ぼす影響

図-7(a)に柱を劣化させた場合の層間変形角の変化を示す。図より、最下階及び最上階を劣化させた場合、劣化させた階とその上の階が増加する。また、中間階を劣化させた場合、絶対変化量はどの劣化よりも小さく、劣化させた階のみ増加しその他の層では変化は見られない。また、外柱と内柱を劣化させた場合傾向はほぼ同じであるが、その程度は内柱と比較し外柱では小さい。

(2) 梁の劣化が及ぼす影響

図-7(b)に梁を劣化させた場合の層間変形角の変化を示す。図より、最下階を劣化させた

場合、1, 2 層の層間変形角が増大する一方で、その上部の層間変形角が減少する。中間階を劣化させた場合、劣化層付近では増加するがそれ以外の層では減少するかもしれない。最上階劣化においても劣化層では増加するが、それ以外の層では変化は見られない。また、内梁・外梁劣化による違いは見られないが、柱劣化と比較すると梁劣化が層間変形角に及ぼす影響は大きい。

4.2 ΣR と R_{max} について

図-8 に各部材を劣化させた際の最大層間変形角（以下、 R_{max} ）と層間変形角の総和（以下、 ΣR ）を図示したものと及び $R_{max}/\Sigma R=1.5$ を示す直線、ELCE50・KOB50 入力時の標準モデルの層間変形角を示す。なお、 R_{max} の増加は安全性の低下を、 ΣR は復旧性の低下の目安となると考えられる。図より、 ΣR は地震波によらず、最下階を劣化させた場合は減少し、中間階、最上階を劣化させた場合は増加する傾向が見られる。一方、 R_{max} についてみると、中間階の劣化が及ぼす影響はほとんど見られないが、最下階と最上階劣化は地震波による違いが見られる。ELCE50 では最上階を劣化させた場合 R_{max} が増加するが、KOB50 では最下階を劣化させ

た場合に増加する傾向が見られる。これは、標準モデルにおける層間変形角よりわかるように ELCE50 入力時は上層部分の変形角が他の層に比べ卓越しているのに対して、KOB50 では下層部分の変形角が卓越しているため、それらの層の部材が劣化すると層間変形角が増加するためであると考えられる。これより、性能劣化が構造物の安全性へ及ぼす影響は地震波で異なるが、復旧性に関しては中間階・最上階を劣化させた場合において低下することがわかる。

5. まとめ

崩壊機構の移行を許容した部分的性能劣化を有する構造物に対して地震応答解析を行い、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) 柱劣化は劣化させた柱と同階の柱の曲げ余裕度及びせん断余裕度を低下させ、劣化させた柱の直上下階の柱ではせん断余裕度を著しく低下させる。また、1 層の層崩壊を形成する可能性が考えられる。
- (2) 梁劣化は劣化させた梁に取り付く柱以外の柱のせん断余裕度及び曲げ余裕度を低下させ、2 層の層崩壊を形成する可能性が考えられるが、崩壊機構へ及ぼす影響は柱劣化に比較し小さい。
- (3) 層間変形角に及ぼす影響は、柱劣化と比較し梁劣化が大きい。また、最下階劣化に比べ最上階を劣化させた場合、構造物の層間変形角の総和が増加（復旧性が低下）することがわかった。

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) 梅野達三, Abimanyu R.D., 市之瀬敏勝：RC 純フレーム構造物における層せん断余裕率（その 1）、日本建築学会学術講演梗概集、C-2、構造IV, pp.44-42, 1998.9

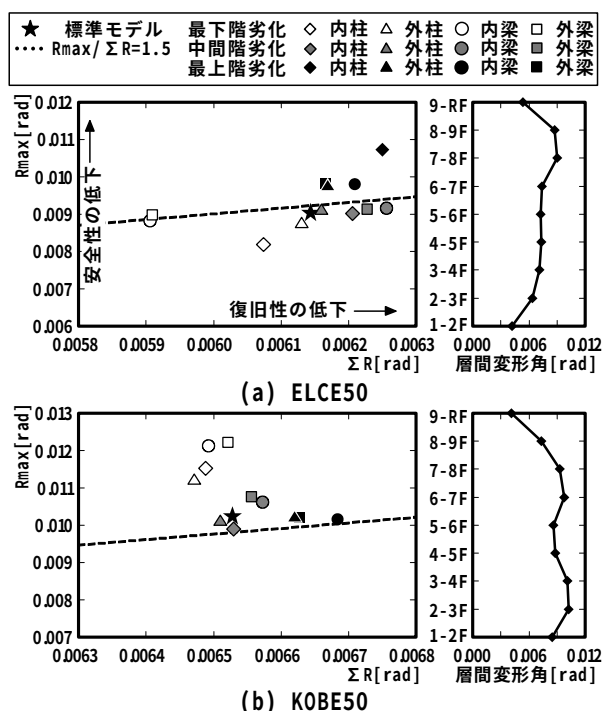


図-8 ΣR と R_{max} 及び標準モデルの層間変形角