

[2078] 靱性に依存する鉄筋コンクリート造骨組の耐震設計 と応力再配分

正会員 ○小谷俊介 (東京大学工学部)

李 声柳 (東京大学研究生)

正会員 青山博之 (東京大学工学部)

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材が降伏すると、降伏を生じる場所の応力は線形弾性解析による応力に比べて小さくなり、その他の場所の応力負担が大きくなる。このことを考慮し、降伏を想定する部材の靱性に依存する構造設計において、降伏耐力を超えた弾性応力を、外力との釣合条件を満たして、降伏を想定していない部分に移動させて設計用応力を定める手法を応力の再配分と呼ぶ。

構造物の耐用年限に1回経験する可能性のある大地震動に対する耐震設計では部材が降伏することは許容している。そこで、線形解析で得られる応力を他部材に再配分してもよい。本研究では、靱性に依存する梁曲げ降伏先行型の鉄筋コンクリート造骨組の耐震設計法を開発する目的で、ニュージーランド基準[1]を参考にした応力再配分の方法を用いて中・高層建物を設計し、応力再配分が地震応答に与える影響および設計で許容できる応力再配分の限度について検討した。

2. 応力再配分の方法

背景：本研究で取上げたニュージーランドの耐力設計法[1]では、靱性の高い梁曲げ降伏先行型の崩壊機構を有する骨組を設計する手段として、鉛直荷重と地震荷重による弾性応力を再配分することを許容している。その目標は

- 1) 必要保有耐力ぎりぎりの耐力を確保した合理的な配筋とする、
- 2) 梁の上端および下端の主筋をほぼ同程度にし、圧縮鉄筋による靱性の向上を図る、
- 3) 梁主筋を内柱梁接合部の両側で等量にし、通し配筋として施工性を向上させる、
- 4) 梁の配筋が1つの層ではほぼ均質にする、

ことなどである。ところで、梁端では鉛直荷重により上端引張り応力が生じ、上端と下端の必要鉄筋量が異なるので応力再配分が必要になる。その方法[3]は、ひび割れの発生を考慮した部材剛性を用いて骨組の線形応力解析を行なった後、骨組を各層の上下柱の反曲点で切出した構造部分(連続梁)について、各節点の釣合条件を満足させ、しかも層せん断力を変化させないように、梁の曲げモーメントを

- 1) それぞれの梁・柱節点の両側で、1端の梁上端モーメントの一部を他端の梁下端に移動する(梁再配分)、
- 2) 2つの梁・柱節点の間で、柱のせん断力の再配分に伴って梁曲げモーメントを移動する(柱再配分)。

これらの2つの操作を繰り返し、上記の応力再配分の目標を達成するように努力する。

応力再配分の制限：一般に、梁再配分は主として内柱節点で、柱再配分は外柱節点で必要になる。また、梁再配分ではその節点の梁モーメントの和が不変なので、その節点に接続する柱のモーメントとせん断力は影響を受けない。しかし、外柱節点で梁のモーメントを移動すると、その節点に接続する柱のモーメントを変化させる結果になり、柱の反曲点位置が変わらなければ、その柱の負担するせん断力が変化してしまう。そこで、柱再配分に対しては梁再配分にくらべて厳

しい規制が必要になる。

大地震用の設計地震力に対して応力の再配分を無制限に行なうと、応力を過度に小さくした場所で、中小地震動のときでも降伏が生じたり、大地震動のときに塑性変形が集中する恐れが生じるので、ニュージーランド基準[1]では梁および柱の応力再配分割合に

1) 梁再配分：その梁スパンの最大弾性モーメントに対する応力再配分モーメントの大きさの比（梁再配分比）を30%以内、

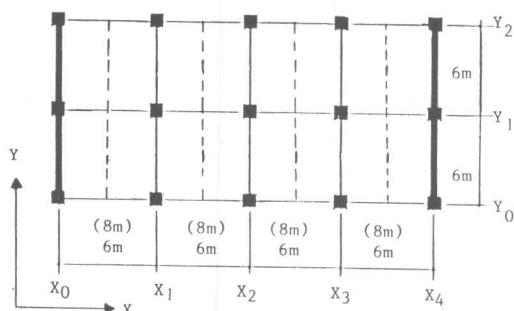
2) 柱再配分：柱の弾性せん断力に対する再配分せん断力の比（柱再配比）を15%以内、

という制約を設けている。これらの再配分比の限度を梁再配分限度 β_b 、柱再配分限度 β_c と呼ぶ。これらの数値 β_b 、 β_c には明確な根拠がある訳ではなく、暫定的な性格のものである。

応力再配分の影響：日本の設計基準に従って設計される建物[3,4]では、鉛直荷重に比べて地震荷重による応力が大きいため、鉄筋コンクリート造骨組として大スパンの8mの場合でも、梁再配分限度30%の制限に支配されるのは最上階に限られ、柱再配分限度が10%を超える場合はなかった。そのため、応力再配分をしない場合に比べて、応力再配分を許容しても、地震応答解析で梁端の塑性率が特に大きくなることはなかった。大きな応力再配分が地震応答性状に及ぼす影響を調べるためには、設計用地震荷重が極めて小さい構造について検討する必要がある。

3. 対象建物の設計

対象建物：本研究では文献[3,4]と同様に、第2種地盤に建つ、8階建物A、B、20階建物Cの3棟（事務所建築）を取上げた。建物は、X方向が4スパンの均等ラーメン構造、2スパンのY方向は両妻面が連層耐震壁構造、内構面はラーメン構造である（図1）。X方向のスパン長さは、建物AとBでは6.00mと8.00mと変え、建物Cでは6.00mスパンとした。Y方向スパンはすべて6.00mである。X方向の梁の鉛直荷重の負担を大きくするため、特に小梁をY方向にかけた。建築用階高は全階共通で3.3mである。各階の梁と柱の断面寸法を表1に示す。本研究ではX方向について検討する。



() 内は建物B

図1：建物の伏図

表1：柱と梁の断面寸法 (cm)

建物	階	梁	柱
8階建て A、B	8-6	30x50	50x50
	5-3	30x60	60x60
	2-1	40x65	65x65
20階建て C	20-16	30x50	50x50
	15-11	40x60	60x60
	10-1	40x70	70x70

設計用荷重：設計は建築基準法・同施行令に従う許容応力度法により固定荷重と積載荷重（事務所用）に対する必要最小耐力を求め、次に、鉛直荷重と必要保有水平耐力（ A_i 分布）相当の地震力に対する弾性応力を再配分して終局強度設計を行った。即ち、応力再配分量を制限することにより、中小地震動に対する安全性を確保できるものと判断し、許容応力度法による1次設計は設計を省略した。

応力再配分は、地震荷重と鉛直荷重による梁応力の割合に支配される[3,4]。そこで、大きな

応力再配分が地震応答性状に及ぼす影響を調べるために、低地震帯の構造を取上げた。即ち、設計用の地震動として最大速度 10 cm/sec程度 of 強さを想定し、設計用地震力として建築基準法・同施行令の標準せん断力係数 C_0 として 0.3 とした。靱性のある部材から構成される建物を想定して構造特性係数 D_s は 0.3 とし、地震地域係数 $Z = 1.0$ 、振動特性係数 R_t は建物周期に従い建物 A、B では 1.0、建物 C では 0.73 とした。

線形応力解析および弾塑性地震応答解析では、部材の曲げ・せん断、柱の軸方向変形と剛域を考慮し、基礎は固定とした。ただし、鉛直荷重に対する応力解析では軸方向変形と剛域を無視し、梁の剛性に寄与するスラブの協力幅はスパンの 0.1 倍とした。

4. 応力再配分の影響

応力再配分：建物 A、B、C について、梁再配分限度 $\beta_b = 0.3$ 、柱再配分限度 $\beta_c = 0.15$ に制限して弾性応力の再配分を行い、梁の断面算定は柱のフェイス位置とした。上階で鉛直荷重による応力が大きい所では、鉛直荷重のみに対して長期許容応力度設計で決まる主筋量を下回らないようにし、梁の下端では最小配筋規定を準用した。再配分された応力の大きさを表わす指標として、梁あるいは柱再配分比を用いる。

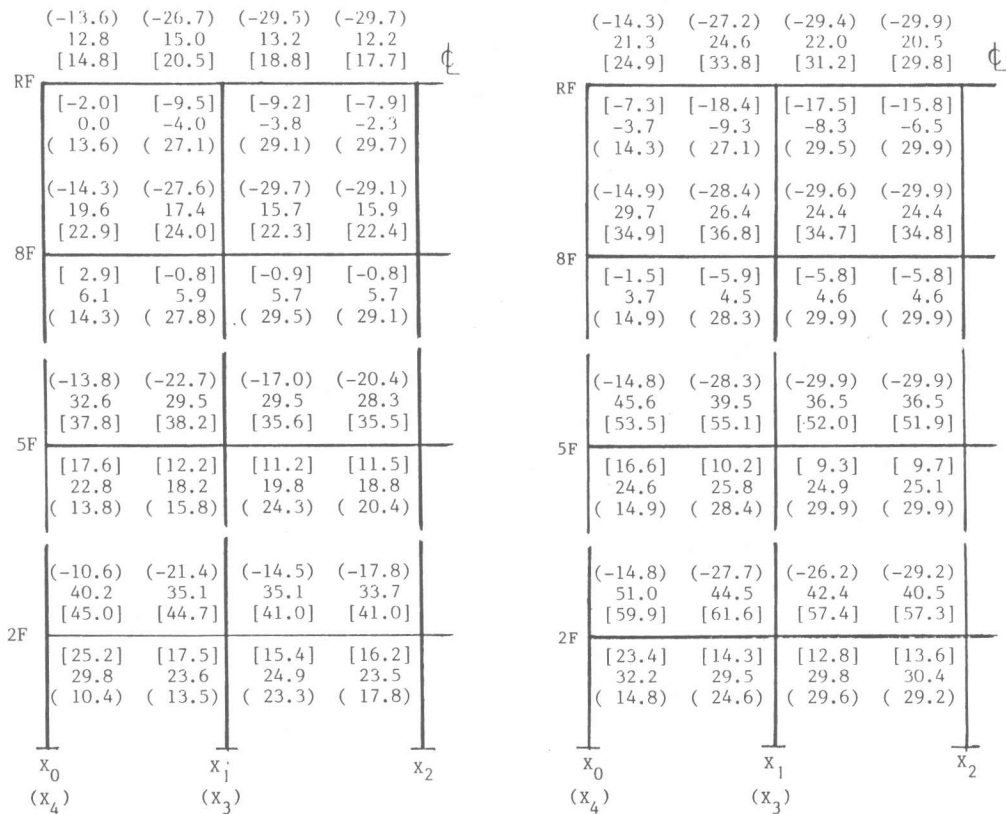
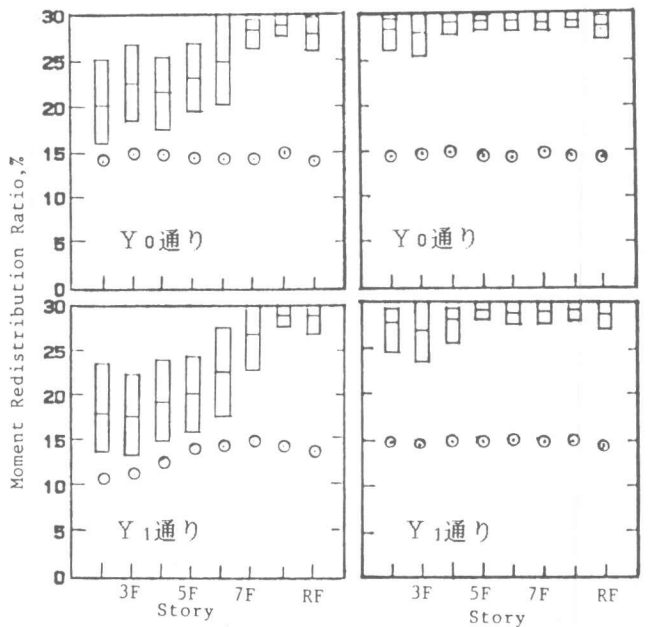


図 2 : フレーム Y₁ の応力再配分 (単位 : tonf-m)

応力再配分の傾向：建物A、B、Cの中構面フレームY₁から代表的な階を取りだし、梁の危険断面（柱フェース位置）における弾性解析モーメント、再配分後の設計用モーメント、梁あるいは柱再配分比(%)を、地震荷重により引張りが生じる側に示した(図2)。モーメントが負の場合には地震力で引張りが生じる側に圧縮が生じたことを示す。

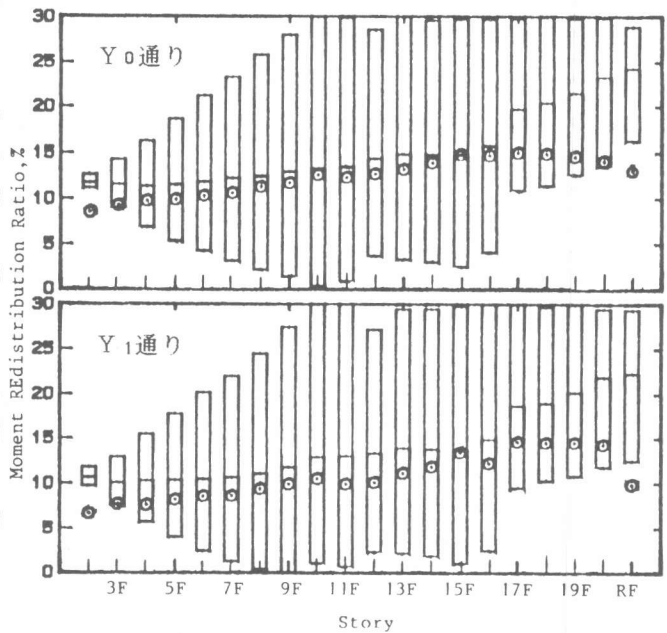
弾性応力と設計用応力を比較すると、梁の上端ではモーメントが減少し、下端では増加しているが、それでも上階では地震荷重に比べて鉛直荷重の応力が大きいので、最小配筋規定で梁の下端筋が決まった。また、最上階では鉛直荷重に対する長期許容応力度で必要最小耐力が決るので、再配分比が小さくなり、最上階の保有水平耐力が上昇した。一般的に、梁あるいは柱の再配分比は下階に行くに従い小さくなる傾向があり、地震荷重応力の増加と対応している。X₂通り内柱は建物の対称軸になり、その両側の梁再配分比は下端と上端で同じ値である。外柱に接合する梁端でも、柱再配分比は梁の上端と下端ではほぼ同じ値になっており、両端の外柱節点の間で応力再配分が行われたことを示す。

建物A(8階、6.0mスパン)では、X₁(X₃)通り内柱の両側の梁端についてみると、外スパン側では上端の梁再配分比が下端より大きく、下階に行くに従いその差が大きくなる。内スパン側では、逆に、下端の再配分比が上端より大きい。建物B(8階、8.0mスパン)では、鉛直荷重による応力の割合が大きいため、建物A、Cに比べて応力再配分比が大きく、梁再配分限度の制約により応力再配



(a) 建物A

(b) 建物B



(c) 建物C

□ : 梁再配分比

○ : 柱再配分比

図3：応力再配分比

分の目標が達成できていない。図2に示していないが、建物C（20階、6.0mスパン）では、建物Aとは逆に、 X_1 (X_3) 通り内柱の両側で、外スパン側では下端の梁再配分比が上端より大きく、その差は中間階で大きい。内スパン側では、逆に、上端の再配分比が下端より大きく、その差は中間階で大きい。

応力再配分の傾向：各層の梁再配分比の最大値、平均値、最小値、および柱再配分比を図3に示す。再配分比は鉛直荷重応力が大きい上階で大きく、地震力が支配的になる下階では小さくなる。即ち、応力再配分量は鉛直荷重と地震荷重による応力の割合が支配的な要因である。

建物A（8階、6.0mスパン）では、外柱の再配分比は10～15%の範囲にあり、弾性応力が大きくなる外構面 Y_0 、 Y_2 に比べて、内構面 Y_1 の方が柱再配分比が小さい。内柱に接合する梁の再配分比は、階が下がるに従い場所によりばらつき傾向が見られた。建物B（8階、8.0mスパン）

では、地震荷重に比べて鉛直荷重による応力が支配的で、外柱に接合する梁端の柱再配分比はすべての階で14%以上、内柱に接合する梁端ではほとんどの場所で25%以上であった。建物C（20階、6.0mスパン）では、梁再配分比は場所によりばらつきが大きく、同じ階であっても、ほとんど再配分を行わない場所と、梁再配分限度まで応力再配分する場所が見られた。

5. 地震応答解析と結果

解析方法：建物A、B、Cについて、弾性応力をそのまま設計用応力とした場合（建物A'、B'、C'）と、応力再配分をして設計用応力を定めた場合（建物A、B、C）を取り上げ、応力再配分が非線形地震応答に及ぼす影響を検討した。建物の断面算定は行わず、設計用モーメントを梁および1階柱脚の降伏モーメントとした。柱は1階の柱脚を除き弾性と仮定した。

骨組の地震応答解析では、平面骨組解析プログラム[5]を用い、各部材を材端弾塑性パネモデルで表わし、せん断変形を無視し、接合部は剛とし、基礎は固定とした。材端弾塑性パネの履歴モデルはTAKEDAモデル（除荷剛性低下係数は0.4）とした。梁の鉛直荷重による初期曲げモーメントを考慮した。減衰は接線剛性比例型とし、弾性時の1次モードの減衰定数は8階建物では5%とし、20階建物では3%とした。入力地震波はEL CENTRO (NS) 1940記録とし、

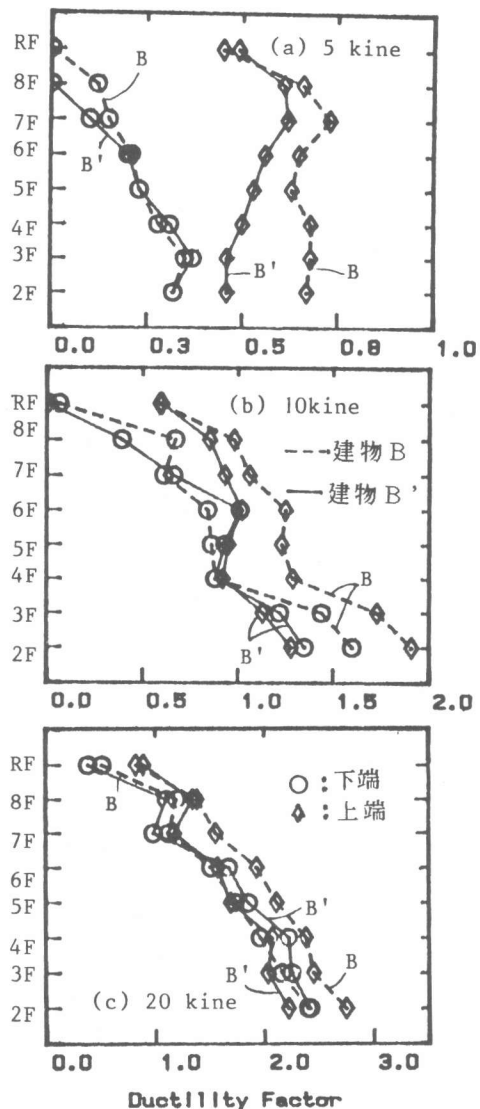


図4：建物Bの梁塑性率

地震動の強さは設計用の地震荷重との関係から、地動最大速度で規準化して、中小地震動では5cm/sec (最大加速度43.3cm/sec²)、大地震動では10cm/sec (86.5cm/sec²)、予想外の強さの地震動では20cm/sec (173.1cm/sec²)とした。

応力再配分が最も大きい建物B (8階、8.0mスパン)では、地震応答も建物A、Cよりも大きいので、建物Bの各階の梁の最大塑性率を図4に示す。応力再配分により降伏回転角が異なることに注意する。

中小地震動に対する応答：応力再配分が大きい場合には中小地震動でも降伏が生じる恐れがある。中小地震動では応力再配分した建物A、B、Cの梁は、全階で上端引張り時の塑性率が0.8以下、下端引張り時では0.5以下であり、特に降伏の恐れはなかった。

大地震動に対する応答：大地震動では応力再配分した建物A、B、Cの塑性率が建物A'、B'、C'より大きくなったが、塑性率は2.0以下で、その増大の割合は小さかった。建物BとB'では最上層から3階の部分の塑性率が減少するのは鉛直荷重により降伏強度が支配されたためである。建物Aでは、鉛直荷重による応力の割合が小さいので、塑性率が1.6程度以下におさまる。建物CとC'では周期が長く、梁の塑性率はほぼ1.0以下だったが、建物Cの最上層から3階の梁では降伏に達した。

予想外の地震動に対する応答：建物AとA'、BとB'では塑性率の違いは少なかった。

6. 結論

本研究では、3つの均等ラーメンの構造について応力再配分の影響を検討し、次のことが明らかになった；

- 1) 中小地震動では応力再配分しても特に降伏が生じなかった。
- 2) 大地震動では応力再配分により、梁の塑性率が大きくなったが、その増加割合は大きくなかった。
- 3) 梁再配分限度 $\beta_b = 0.3$ 、柱再配分限度 $\beta_c = 0.15$ 程度の応力再配分を設計で許容しても、耐震性の問題は見られなかった。

7. 参考文献

- 1) Standards Association of New Zealand, "Code of Practice for the Design of Concrete Structures", NZS 3101 Part 1, 1982.
- 2) Paulay, T., "Moment Redistribution in Continuous Beams of Earthquake Resistant Multistory Reinforced Concrete Frames", Bulletin New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol.9, No.4. December 1976, pp.205-212.
- 3) 李声抑、小谷俊介、青山博之：鉄筋コンクリート建物の設計応力再配分に関する研究、日本建築学会昭和61年度大会（北海道）学術講演梗概集、構造II、pp.687-688、1986.08.
- 4) 李声抑、小谷俊介、青山博之：鉄筋コンクリート造骨組の耐震設計における応力再配分、構造工学論文集 Vol. 33.B、1987年3月。
- 5) 壁谷沢寿海：「一日米共同研究—鉄筋コンクリート造実大7層試験体の耐震性に関する研究（その3）疑似動的解析」、第6回日本地震工学シンポジウム講演集、1982年。