

平面的に不整形性を有する建築構造物の 耐震性能に関する研究

日野泰道¹・中埜良昭²・楠浩一³

- 1 修(工) 東京大学大学院生 工学系研究科 建築学専攻 (〒106 東京都港区六本木 7-22-1)
2 工博 東京大学助教授 東京大学生産技術研究所 第一部 (〒106 東京都港区六本木 7-22-1)
3 博(工) 東京大学助手 東京大学生産技術研究所 第一部 (〒106 東京都港区六本木 7-22-1)

構造設計時には、建物重量、剛性、耐力等の平面的なバランスを考え、構造要素の配置を計画することが基本となる。しかし、弾性範囲においてのみ偏心に対する検討を行うのが一般的であり、耐力の平面的な偏在を直接的に考慮していないのが通例である。したがって、建物が塑性化するような大地震を受けた場合には、計画時に建物に見込んだ耐震性能が必ずしも発揮されない可能性もある。そこで本研究では、構造設計時において十分な検討がなされていない終局時の特に耐力の偏在が、建物の耐震性能に与える影響を明らかにすることを目的とし、その第一段階として簡略化した建物モデルから、耐力偏在による耐震性能低下の可能性を明らかにした。

*Key Words : Eccentricity of Strength, Seismic Capacity, Ductility Factor
Aseismic Strengthening of Structures*

1. 序論

終局強度型耐震設計¹⁾においては、大規模な地震に対して建物が安全な崩壊形を形成する事を許容している。このような崩壊形は、終局時における建物の耐震性能を適切に評価することで、実現が可能となるが、建物が立面的あるいは平面的な不整形性を有する場合には、局部的な構造要素への損傷集中が生じ、安全な崩壊形を形成できない可能性もある。そのため、終局時における立面的、平面的な不整形性が、建物全体の耐震性能にどのような影響を与えるのかを把握する必要がある。一方構造設計時には、建物重量、剛性に対する平面的な不整形性について、弾性範囲内でのみ検討が行われるのが通例であるが、弾塑性終局時の耐力偏在が計画した崩壊形の実現を妨げ、設計時に期待した耐震性能が発揮できない可能性もある。しかし、これらは終局強度型耐震設計のみならず、既存建物の耐震補強においても生じうる。

1995年兵庫県南部地震では、現行の設計基準制定以前に設計された建物の被害が多く見られ、これに伴い全国的に既存建物の耐震補修・補強が推

進されつつあり、各地において、建物の耐震補強が行われるようになった。補強を行う際にも、建物重量、剛性、耐力等の平面的なバランスを考え、耐震補強計画が行われるが、現実的には建物躯体形状や使用性等の要因から上記の条件を満足させ、整形建物とすることが難しい場合も予想される。

また、近年増加傾向にある鉄骨ブレースによる既存鉄筋コンクリート造建物の耐震補強²⁾では、構造計画時にはその弾性剛性に立脚した検討が主体であるため、鉄骨ブレース付加により生じる部分的な耐力上昇の影響は直接的には考慮しないのが通例である。しかしながら、補強要素の偏在による影響は、終局時には耐力偏心が生じると考えられ、計画時に期待していた耐震性能が必ずしも発揮されない可能性もある。この種の問題は、現在進められている補強事例において少なからず見られるものの、定量的な検討が不十分であるのが現状である。

そこで本研究では、構造設計時において十分な検討がなされていない終局時の特に耐力の偏在が、建物の耐震性能に与える影響を明らかにすることを目的とする。その第一段階として簡略化した建物モデルに対し、整形建物と耐力偏心建物への全

体の地震入力エネルギー量が等しいという仮定から耐力偏心建物の弾塑性最大変形量、塑性率を算定し、両者の比較から耐力偏在による建物全体の耐震性能低下の可能性を明らかにするとともに、耐力が偏在する建物の基本的な建物特性について検討を行い、構造設計時における耐力偏在の考慮の必要性を明らかにする。

2. 対象建物諸元

まず研究の第一段階として、終局時における耐力の偏在が、建物全体の耐震性能に与える影響を概略的に把握する目的で、1スパン1層建物をモデル化した図1に示す建物モデルを検討対象として選定した。検討においては、建物全体に対する各構面の耐力の偏在のみを変動因子とし、その指標 γ （以下、耐力偏在指標）を0～0.5の範囲で変化させることで、平面的な不整形性を持たせた。つまり、この建物モデルは弾性時には整形建物となっており、片側構面が降伏に至ると建物の剛心位置と重心位置が一致しなくなり、1軸偏心建物になる。

3. 数式展開による耐力偏心建物の検討

終局時における地震荷重効果は複雑であり、建物周期や減衰はもちろんのこと、耐力偏在の影響によっても、建物全体に入力される地震エネルギー量が変動することも考えられる。そのため、どの程度の地震エネルギー量が建物に入力されるのかは、その建物の偏心の程度のみならず、入力地震波特性に依存するところが大いと思われる。そこで建物の耐力偏在のみによる耐震性能への影響を明らかにするために、本研究では以下の仮定を用いた。

仮定1：耐力偏心建物に対して入力される地震エネルギー E は、整形建物に入力されるエネルギーと同量である。

仮定2：弾塑性系に入力される地震入力エネルギー E は、弾性系に入力されるエネルギーと同量である。

上記の仮定に基づけば、地震入力に対する耐力偏心建物の消費エネルギー E は、(1)式で表される。

$$E = \frac{1}{2} \left(\frac{Q_0^2}{k} \right) \quad (1)$$

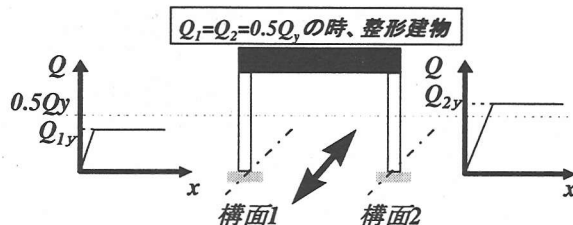


図-1. 建物モデル

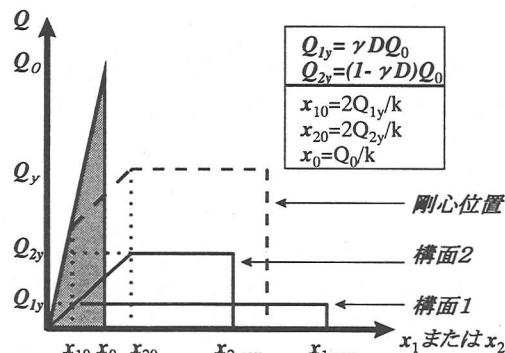


図-2. 耐力偏心建物

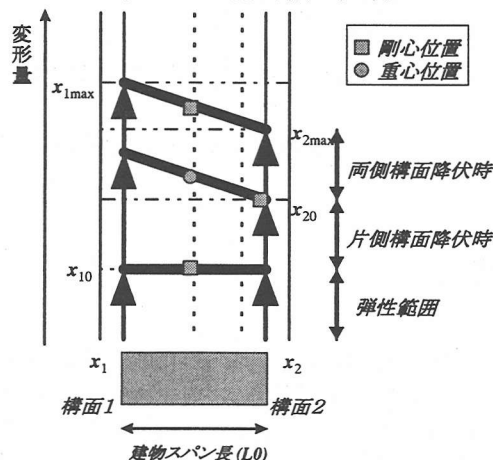


図-3. 概念図

ここで Q_0 は整形建物の最大せん断耐力、 k は建物全体剛性であり、 E は図2の斜線で示す面積である。一方、図3より耐力偏心建物は弾性時には、重心位置(○)と剛心位置(□)が一致しているため、各構面の変形と剛心位置の変形は同量になるが、構面1が降伏すると重心位置と剛心位置の距離が次第に離れて回転が生じる事になり、各構面の変形量は等しくならなくなる。したがって、弾性範囲・片側構面降伏後・両構面降伏後では各構面のエネルギー消費が異なる。そこで本研究では3種類の状態を考え、各ケースに対する検討を行う。

Case1：構面1、2とも弾性範囲($x_1 = x_2 = x_{10}$)

Case2：構面1の降伏後から構面2が降伏するまでの範囲($x_2 = x_{20}$)

Case3: 構面 1, 2 ともに降伏以降の範囲

$$(x_1 = x_{1\max}, x_2 = x_{2\max})$$

よって、耐力偏心建物の消費エネルギーは、Case1~3 の消費エネルギーの和で表されることから、(2)式で与えられる。

$$E = E_E + E_{P1} + E_{P2} \quad (2)$$

E_E : Case1 の消費エネルギー

E_{P1} : Case2 の消費エネルギー

E_{P2} : Case3 の消費エネルギー

ここで、 $E_E = n_1 E$ 、 $E_{P1} = n_2 E$ 、 $E_{P2} = n_3 E$ とおくと、(3)式が得られる。

$$n_1 + n_2 + n_3 = 1 \quad (3)$$

n_1, n_2, n_3 (以下、エネルギー消費割合) は、各状態における地震エネルギー量の消費割合を示しており、この割合を計算する事により各構面のエネルギー消費量が算定され、各状態における最大変形量、回転変形等を導くことが可能となる。そこで、各 Case について検討を行う。

(1) 構面 1, 2 ともに弾性範囲 (Case1) の場合

弾性範囲では、耐力偏在指標 γ を変化させても整形建物であるから、各構面の消費するエネルギーは同量である。構面 1 が消費するエネルギー量を E_1 、構面 2 が消費するエネルギー量を E_2 とすれば、Case1 における各構面のせん断耐力、剛性は $Q_1 = Q_2 = \gamma D Q_0$ 、 $k_1 = k_2 = \frac{1}{2} k$ なので、消費エネルギー量は(4)式で表される。

$$E_1 = E_2 = \frac{1}{2} Q_1 \cdot \left(\frac{Q_1}{k_1} \right) = \gamma^2 D^2 \left(\frac{Q_0^2}{k} \right) \quad (4)$$

ここで、 Q_0 : 弾性系建物の最大せん断耐力、 D : 整形建物の降伏耐力と Q_0 の比、 k : 建物の全体剛性、 γ : 構面 1 の全耐力に対する比 ($\gamma = \frac{Q_1}{Q_y}$)

である。よって、弾性時におけるエネルギー消費割合 n_1 は、 $E_1 + E_2 = n_1 E$ と(1)式より、

$$\therefore n_1 = 4\gamma^2 D^2 \quad (5)$$

(2) 構面 1 のみが降伏した範囲 (Case2) の場合

次に、構面 1 のみが降伏した状態における各構面の消費エネルギー量について求め、 $E_1 + E_2 = n_3 E$ との関係から構面 1 の変形を算定する。構面 1, 2 ともに降伏剛性を 0 に仮定したので、この範囲では剛心位置が、構面 2 の位置まで移動する。ここで、検討対象建物の弾性剛性は各構面等しいので、静的外力を想定すると構面 2 には地震力が入

力されないことになり、回転が無限大となる。しかし、実現象としては動的荷重が作用し、構面 2 にも地震力が作用する事になるので、構面 1, 2 ともに降伏に至る。したがって、片構面のみ降伏したときの地震エネルギー消費割合が、どの程度であるのかを把握する為には、動的外力下における検討が必要である。ただし、各地震波の入力地震波特性は異なるので、すべての地震波における Case2 のエネルギー消費割合を一定値で表現することは困難であると思われる。

そこで、Case2 におけるエネルギー消費分担の大きさについては今後の課題とし、本研究では構面 1 が降伏しても地震エネルギーの集中が起きないとした場合 ($E_1 = E_2$) について検討を進める。構面 2 の降伏耐力、降伏変形は $Q_2 = Q_{2y}$ 、 $x_2 = x_{20}$ で、構面 1 の降伏耐力は $Q_1 = Q_{1y}$ なので、構面 2 の消費エネルギーは、

$$E_2 = \frac{1}{2} Q_{2y} x_{20} - \frac{1}{2} Q_{1y} x_{10} \\ \therefore E_2 = (1 - 2\gamma) D^2 \left(\frac{Q_0^2}{k} \right) \quad (6)$$

また、構面 1 の消費エネルギーは(1)、(6)式と $E_1 + E_2 = n_2 E$ の関係から、

$$\therefore E_1 = \left\{ \frac{n_2}{2} - (1 - 2\gamma) D^2 \right\} \left(\frac{Q_0^2}{k} \right) \quad (7)$$

構面 1 の変形量は、 $E_1 = Q_1 (x_1 - x_{10})$ より

$$x_1 = \frac{1}{\gamma D} \left\{ \frac{n_2}{2} - (1 - 2\gamma) D^2 + 2\gamma^2 D^2 \right\} \left(\frac{Q_0}{k} \right) \quad (8)$$

ここで、上記の仮定 $E_1 = E_2$ より、

$$n_2 = 4(1 - 2\gamma) D^2 \quad (9)$$

(3) 構面 1, 2 の降伏後の範囲 (Case3) の場合

まず、(3)、(5)、(9)式より Case3 におけるエネルギー消費割合は、下式で与えられる。

$$n_3 = 1 - 4\gamma_2 D^2 - 4(1 - 2\gamma) D^2 \quad (10)$$

また、両構面降伏後には、各構面の水平剛性およびねじれ剛性が 0 になるので、各構面の変形は等しくなる。よって、構面 1 と構面 2 のエネルギー消費割合は、

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\gamma D Q_0 \cdot x_1}{(1 - \gamma) D Q_0 x_2} = \frac{\gamma}{1 - \gamma} \quad (11)$$

(1)、(11)式と $E_1 + E_2 = n_3 E$ の関係から、構面 1, 2 のエネルギー消費量は、

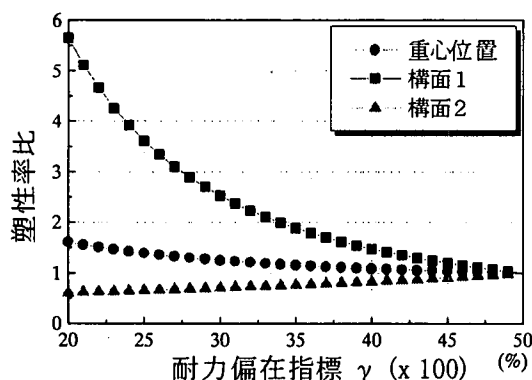


図-4. 塑性率比と偏在指標の関係

$$\therefore E_1 = \frac{m_3}{2} \left(\frac{Q_0}{k} \right) \quad (12)$$

$$\therefore E_2 = \frac{(1-\gamma)n_3}{2} \left(\frac{Q_0}{k} \right) \quad (13)$$

また、 $E_1 = Q_1(x_{1\max} - x_1)$ 、 $E_2 = Q_2(x_{2\max} - x_2)$ の関係より $x_{1\max}$ 、 $x_{2\max}$ が得られる。

$$x_{1\max} = \frac{1}{\gamma D} \left\{ \frac{m_3}{2} + \frac{n_2}{2} - (1-2\gamma)D^2 + 2\gamma^2 D^2 \right\} \left(\frac{Q_0}{k} \right) \quad (14)$$

$$x_{2\max} = \frac{1}{D} \left\{ \frac{n_3}{2} + 2(1-\gamma)D^2 \right\} \left(\frac{Q_0}{k} \right) \quad (15)$$

4. 耐力偏心建物の耐震性能

整形建物と比較して要求される塑性変形能力がどの程度増大するのかを調べる為に、各建物で最大変形に対する降伏変形の割合（塑性率 μ_0, μ ）を求め、その比（以下、塑性率比）と耐力偏在指標 γ の関係について検討を行った。塑性率比と耐力偏在指標との関係を図4に示す。塑性率比は、重心位置で見れば大きな増加が見られないが、構面で見ると、建物にかなり大きな塑性変形が要求されることになる。したがって、整形建物の耐震性能を建物強度ではなく、塑性変形能力に期待する場合は、大きな耐力偏在に対する十分な考慮が必要である。また、各状態における地震エネルギーの消費分と耐力偏在指標 γ の関係を図5に示す。 γ が増すに連れて、両側構面降伏後の消費エネルギーの割合が小さくなり、逆に片側構面降伏後のエネルギー消費の割合が大きくなるのが分かる。これは、耐力の偏在が大きいほど塑性後の重心位置と剛心位置の距離が大きくなる事により大きな偶力が生じ、その結果として回転変形が増大することが原因であると思われる。つまり、

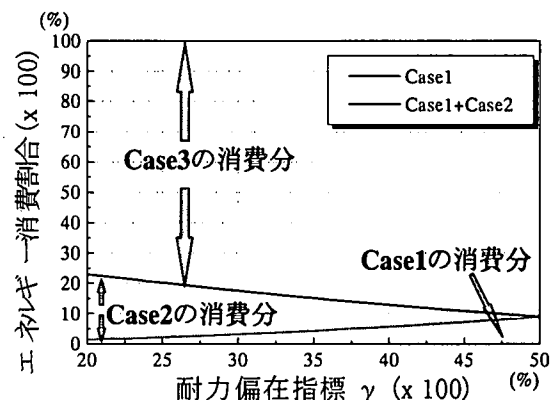


図-5. 消費エネルギーと偏在指標の関係

耐力偏心建物の耐震性能は、片側構面降伏後から両側構面降伏までの間に、どの程度のエネルギーを消費するかに大きく依存すると言える。以上の結果から、耐力偏在を有する建物が塑性化を生じようような大地震を受けた場合、建物の構造部材の塑性率が増大し、局所的な損傷集中により建物全体の耐震性能が低下することが定量的に評価された。

5. 結論

耐力偏心建物の弾性範囲、片側構面降伏後、両側構面降伏後のエネルギー消費の違いに着目し、そのエネルギー消費割合との関係から以下の知見を得た。

- 1) 塑性率比は、重心位置で見れば大きな増加が見られないが、構面で見ると大きな塑性変形が要求される。
 - 2) 片側構面降伏後から両側構面降伏後までの間にどの程度のエネルギーを消費するかで、耐力偏心建物の耐震性能が大きく左右される。
- これらの結果から、塑性化が生じる大地震を受けると、建物全体の耐震性能は構造計算時に期待したものより小さくなることが明らかとなった。今後は入力地震波特性による影響について検討し、定量的な評価を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説
- 2) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建物の耐震診断基準・同解説
- 3) 日本建築センター：建築物の構造規定