

上町断層帯地震に対する設計用地震動ならびに設計法に関する研究

その 10 安定係数を用いた PΔ 効果変形増大率に関する検証

正会員○長瀬 正¹⁾ 同 中川佳久²⁾ 同 近藤一雄³⁾同 多田元英⁴⁾ 同 荒木慶一⁵⁾ 同 西山峰広⁶⁾ 同 宮本裕司⁷⁾設計用地震動 上町断層帯 立体モデル応答
PΔ 効果 変形増大率 安定係数

1. はじめに 上町断層帯地震を想定した大きなレベルの設計用地震動に対する応答解析では、強い非線形性を十分に考慮することが求められる。とくに解析モデルにおける減衰や PΔ 効果の扱いに注意を要する。PΔ 効果の影響については、2006 年の長周期地震動に関する土木・建築共同提言¹⁾を契機として、実務設計においても一般に考慮されるようになった²⁾。提言では降伏耐力に達した層では降伏後の剛性が弾性剛性に比べて極めて小さくなるので PΔ 効果の影響を無視することはできないとしている。また PΔ 負剛性による降伏後剛性の低下は、層応答変位の極端な増加など、とくに RC 構造物の瞬間剛性比例減衰モデルの扱いにも配慮が望まれる。

本報は、上町断層帯地震に対する設計法に関する研究として、PΔ 効果の影響についての実務的な扱いから安定係数と変形増大率の相関を、RC43 階建モデルの上町断層帯地震の設計用地震動に対する応答解析により検証する。併せて、質点系モデルにおける減衰モデルについて、立体モデル応答結果との比較から言及する。

2. 安定係数 日本の耐震規定では PΔ 効果について明確な記述はないが、ヨーロッパのユーロコード 8 や米国の ASCE7 では安定係数を用いて規定されており³⁾、以下のように要約できる。P=当該階より上の建物重量、Δ=当該階の層間変形、Q=当該階の層せん断力、h=当該階の階高として安定係数 θ が次のように表わされる。

$$\theta = P\Delta / Qh = \Delta / h \cdot P / Q = \gamma / C \quad (1)$$

ここで γ は当該階の層間変形角、C は当該階のせん断力係数を表わしている。

PΔ 効果が層せん断力に与える影響は $-P\gamma = -(P/h)\Delta$ と表されるので P/h を負剛性とみなすことができる。すなわち PΔ 効果による負剛性を $K_p = P/h$ とし、等価剛性を $K_e = Q/\Delta$ とすれば、次のように書くことができる。

$$\theta = P\Delta / Qh = P/h \cdot \Delta / Q = K_p / K_e \quad (2)$$

ユーロコードでは $0.1 < \theta \leq 0.2$ であれば、関連する効果を $1/(1-\theta)$ 倍することによって 2 次的効果を近似的に考慮している。また係数 θ の値は 0.3 を超えてはならないとする。ASCE7 でも $0.1 < \theta \leq 0.25$ の範囲で同様の扱いを薦めている。安定係数は PΔ 効果の影響を評価する基本的な指標で塑性変形の片側への偏りを表す安定比⁴⁾などへ拡張されている。

3. PΔ 効果による変形増大 ユーロコードの変形増大率 a

$$a = 1 / (1 - \theta) \quad (3)$$

は図 1 のようにせん断力応答一定の仮定を用いて説明できる。

ユーロコードによる変形増大率(3)式は弾性応答に基づくものである。バイリニアモデルで塑性変形が進んだ領域を対象にすれば、図 2 により次式のように表わされる。ここでは、エネルギー一定の仮定を用いている。

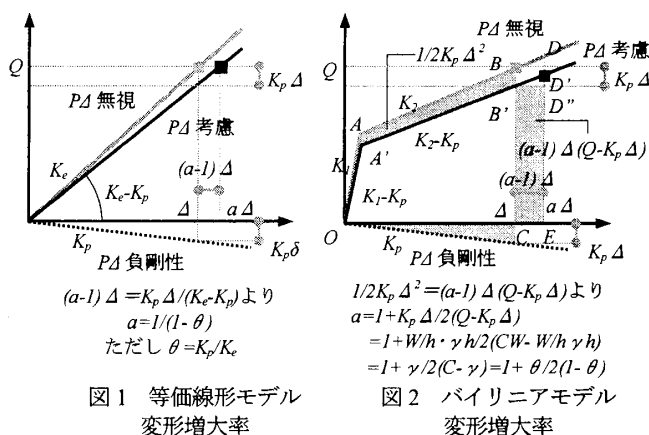
$$a = 1 + \theta / 2(1 - \theta) = (1 - \theta / 2) / (1 - \theta) \quad (4)$$

ユーロコードや ASCE7 では安定係数 θ が 0.1~0.2 の範囲で PΔ 効果を略算評価できるとしているが、実際に応答計算で確かめると以下ようになる。計算に用いた建物モデルは 43 階の RC 耐震構造である⁵⁾。解析モデルは等価せん断型とし、PΔ 効果は各階の支える上部重量を階高で除した剛性を負剛性として加算している。入力地震動は A4 ゾーンの上町断層帯地震を想定した地震動とし、レベル 3A①、レベル 3B①②、レベル 3C①②を用いる⁵⁾。比較のため立体モデルによる応答も追加する。

3.1 PΔ を考慮した最大変形角応答分布 質点系モデルを用いた場合の PΔ 効果考慮の有無による応答比較を示す。図 3 は瞬間剛性比例 3%減衰モデルであり、図 4 は初期剛性比例 1.5%減衰モデルである。なお図 3 および 4 に併記された立体モデルは瞬間剛性比例 3%減衰モデルである。

図 3 に明らかなように、瞬間剛性に比例した減衰モデルでは、PΔ 効果による剛性低下に伴って特定層で減衰がゼロに近くなって過大な変位応答を示している。この現象は等価せん断と減衰モデルに起因するものである。そこで、瞬間剛性に代えて、低減された初期剛性比例減衰、ここでは初期剛性比例 3%減衰を、等価な剛性低下を $1/4$ としてその平方根である $1/2$ に低減した 1.5%減衰とした結果を図 4 に示す。

図 5 は立体モデルによる PΔ 考慮の有無の応答比較を示す。図 3 のような問題は見られないので、大変形領域の応答とな



る場合には、立体モデルを用いることが望ましい。質点系モデルとする場合には、減衰モデルに注意して、たとえば図4のような扱いで近似的な評価も可能である。

3.2 P Δ 効果による変形増大 以上の応答結果についてユーロコードなどで採用されている安定係数を用いた増大率(3)式あるいは(4)式を検証する。図3の質点系瞬間剛性比例3%減衰モデルに対応する増大率を図6(a)に、図4の質点系初期剛性比例1.5%減衰モデルに対応する増大率を図6(b)に、図5の立体瞬間剛性比例3%減衰モデルに対応する増大率を図6(c)にそれぞれ示す。P Δ 効果の考慮によって建物周期が変わるため、とくに応答の小さい領域(安定係数が0.1以下)では増幅率が1以下となることもある。

図6(a)では減衰モデルの問題のためP Δ を検討することは不適当であるが、図6(b)では(3)式が増幅率の上限となり、図6(c)の立体モデルでは(4)式が上限を与えている。

4. 結語 P Δ 効果の影響についての実務的な扱いから安定係数と変形増大率の相関を、応答解析により検証し、(3)式または(4)式が変形増大率の上限をほぼ押さえることを確認した。実務においては、本検討例は特定の建物モデルおよび上町提案波によるものでバラツキも大きいことから、安定係数が0.05~0.1を超えるような場合はP Δ 効果を考慮した応答解析を行うことが望ましい。またP Δ 効果によって降伏後剛性が大きく低下するので、瞬間剛性比例減衰の扱いには十分な注意が求められる。

参考文献

- 1) 土木学会・日本建築学会「海溝型巨大地震による長周期地震動と土木・建築構造物の耐震性向上に関する共同提言」,2006.
- 2) 日本建築学会「長周期地震動と建築物の耐震性」,pp.53-69,2007,丸善株式会社
- 3) 石山祐二「耐震規定と構造力学」,pp.283-335,2008,三和書籍
- 4) 山崎真司・遠藤和明,弾塑性地震応答におけるP Δ 効果と安定比,日本建築学会構造系論文集第527号,PP.71-78,2000.
- 5) 多賀謙蔵ほか,上町断層帯地震に対する設計用地震動ならびに設計法に関する研究 その1~4,日本建築学会大会学術講演梗概集,2011 予定

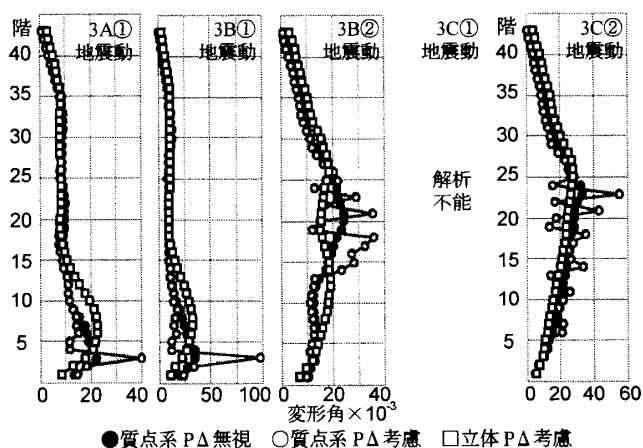


図3 質点系モデル(瞬間剛性比例3%減衰)

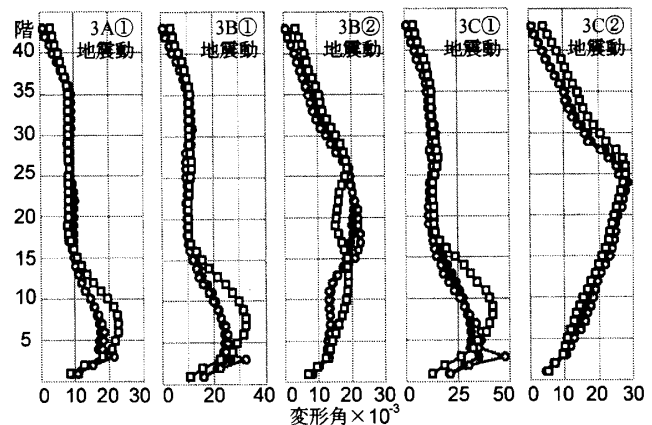


図4 質点系モデル(初期剛性比例1.5%減衰)

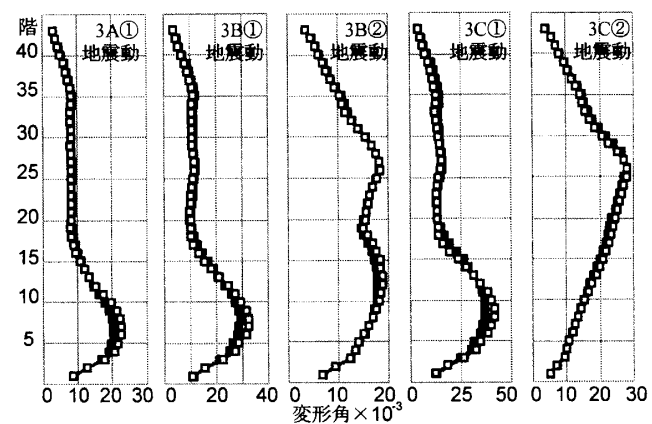


図5 立体モデル(瞬間剛性比例3%減衰)

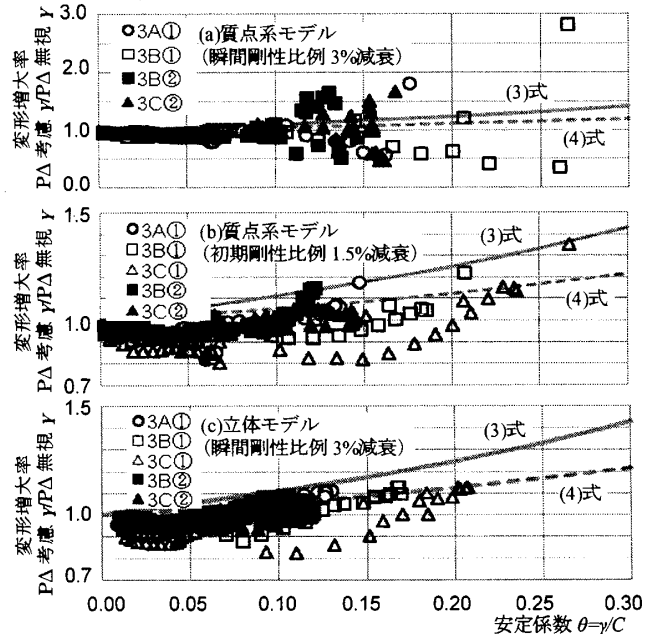


図6 P Δ 効果による変形増大率

*1 竹中工務店
*2 安井建築設計事務所
*3 東畑建築事務所
*4 大阪大学大学院工学研究科,教授,博(工)
*5 京都大学大学院工学研究科,准教授,博(工)
*6 京都大学大学院工学研究科,教授,博(工)
*7 大阪大学大学院工学研究科,教授,博(工)

Takenaka Corporation
Yasui Architects & Engineers, Inc.
Tohata Architects & Engineers, Inc.
Prof.,Dept. Archi.Eng.Osaka Univ., Dr. Eng.
Associate Prof.,Dept. Arch.and Archi.Eng.Kyoto Univ., Dr. Eng.
Prof.,Dept. Arch.and Archi.Eng.Kyoto Univ., Dr. Eng.
Prof.,Dept. Archi.Eng.Osaka Univ., Dr. Eng.