偏差係数法を用いた地震による建築物の中間層崩壊現象の検討

STUDY ON DAMAGE OF BUILDINGS IN INTERMEDIATE STORIES BY EARTHQUAKE USING DEVIATION COEFFICIENT METHOD

益野英昌 — *1 柴田明德 — *2

Hidemasa MASUNO — *1 Akenori SHIBATA — *2

キーワード:

偏差係数, 中間層崩壊, 弾塑性応答解析, 塑性率, 多自由度モデルシステム

Keywords:

Deviation coefficient method, Intermediate-story damage of buildings, Inelastic response analysis, Ductility factors, MDOF-systems

Inelastic response behavior of building models with weak intermediate stories is investigated using deviation coefficient method. The method can explain well the large damage in intermediate stories and the possibility of predicting the response behavior of buildings with irregular strength distribution is shown. Also, the inelastic mode estimation method is applied to interpret the response behavior of intermediate story damage.

1. はじめに

兵庫県南部地震の際に起こった10階建て程度の多くのビル建築において, 中間層崩壊現象^{1) 2)}が生じた。この現象に対して, 中間層耐力低減モデルを用いた弾塑性地震応答解析を行い, 弾性層間変位及び降伏変位に基づいた偏差係数法による応答性状の検討を行った。さらに, 弾塑性モード解析^{3) 4) 5)}による検討もあわせて行った。

2. 偏差係数法による地震応答性状の検討

本論では, 梅村・柴田^{6) 7)}が示したせん断多質点系の弾塑性応答性状を推定する偏差係数法を用いて, 応答層塑性率が不均一な場合の弾塑性応答を推定した。ここでは, 中間層の耐力が低く, 中間層崩壊現象を起こしうる建物モデルを設定した。

2.1 解析モデルと地震応答解析

解析モデルは, 等質量分布で1次モード逆三角形分布となるような剛性分布をもつ6質点せん断型モデル⁷⁾であり, 降伏時周期は0.60秒とした。また, 履歴特性を修正トリリニア型(修正takeda型)⁸⁾とし, 降伏後剛性 K_p との初期剛性 K_0 との割合1%, 減衰特性は質量比例型とし, 1次の初期減衰 h_1 は5%とした。修正トリリニアモデルは, 降伏前は原点指向型であり, 降伏後は最大点指向型として再荷重時の剛性低下を表現したモデルである。ここではひび割れ点の耐力(荷重) Q_c を降伏耐力(降伏荷重) Q_y の1/3倍($Q_c = Q_y/3$)としている。また, 降伏時剛性 K_y は初期剛性 K_0 (=ひび割れ点剛性 K_c)の0.3倍($K_y = 0.3K_0$)としている。〔図1〕

耐力分布は A_i 分布, ベースシャは0.4とした。この耐力分布のモデルを原モデル(100%モデル)として, 中間層である3, 4層の耐力を低減したモデルを2種類設定した。すなわち, 25%低減した

低減モデルA(75%モデル), 50%低減した低減モデルB(50%モデル)及び原モデルの3つの解析モデルを設定した。これらの解析モデルに対して, それぞれ地震波10波による地震応答記録30ケースの計算を行った。使用した入力地震波は, 模擬地震波10波⁸⁾を使用した。模擬地震波10波の最大加速度の平均値は405.6gal, 変動係数は0.09である。3つのモデルについて, 模擬地震波10波の応答計算による各層塑性率の平均(以後応答塑性率 μ_i)と変動係数を表1に示した。原モデルでは, 層塑性率は全層でほぼ2であり, 低減モデルでは, 3, 4層の塑性率が大きく, 2, 5層の塑性率は小さくなっている。

図1 修正トリリニアモデル

2.2 偏差係数法

弾性層間変位及び降伏変位の偏差係数 α (ある層の値と全体の平均値の比)を用いて, 弾塑性の塑性率 μ_i を推定する方法を次に示す。 μ_i を偏差係数法による推定塑性率と呼ぶこととする。

*1 仙台第二工業高等学校 教諭・博士(工学)
(〒983-0042 仙台市宮城野区東宮城野3-1)

*2 東北大学 名誉教授, 東北文化学園大学 教授・工博

*1 Instructor, Sendai Second Technical High School, Dr. Eng.

*2 Prof. Emeritus, Tohoku Univ., Prof., Tohoku Bunka Gakuen Univ., Dr. Eng.

弾性層間変位の偏差係数

$$\alpha_{Li} = \frac{\delta_{Li}}{\sum_{j=1}^n \delta_{Lj}} \dots [1]$$

ここに δ_{Li} ; 弾性層間変位, n ; 層数

降伏変位の偏差係数

$$\alpha_{Yi} = \frac{\delta_{Yi}}{\sum_{j=1}^n \delta_{Yj}} \dots [2]$$

ここに δ_{Yi} ; 降伏変位

推定塑性率

$$\bar{\mu}_i = \frac{\left(\frac{\alpha_{Li}}{\alpha_{Yi}}\right)^m \times \delta_{Li}}{\delta_{Yi}} \dots [3]$$

ここに m ; 係数

推定層間変位

$$\bar{\delta}_{Ni} = \delta_{Yi} \cdot \bar{\mu}_i = \left(\frac{\alpha_{Li}}{\alpha_{Yi}}\right)^m \times \delta_{Li} \dots [4]$$

推定層間変位和

$$D_i = \sum_{j=1}^i \bar{\delta}_{Nj} \dots [5]$$

2.3 偏差係数法による塑性率及び応答変位の推定

(1) 塑性率の推定

3つのモデルに対して, [3] 式により, m の値を 1.0 および 2.0 として求めた推定塑性率 $\bar{\mu}_i$ の 10 波平均の値をその変動係数とともに表 1 に示した。さらに, 弾塑性応答のみかけの塑性率 μ'_i (= 弾性層間変位 δ_{Li} / 降伏変位 δ_{Yi} , 以後みかけの塑性率) を表 1 に示した。なお, みかけの塑性率 μ'_i は, [3] 式の $m=0$ の場合である。また, 図 2 に, グラフ化した 10 波の推定塑性率 $\bar{\mu}_i$, みかけの塑性率 μ'_i , 応答塑性率 μ_i を示す。

これをみると, 3つのモデルとも推定塑性率 $\bar{\mu}_i$ は, みかけの塑性率 μ'_i より, 応答塑性率 μ_i に近くなっている。低減モデル A, B では, 中間層 (3, 4 層) の応答塑性率 μ_3, μ_4 の突出傾向を, 推定塑

表 1 各層の塑性率の平均と変動係数

原モデル (100%モデル)				
層	推定塑性率 $\bar{\mu}_i (m=1)$	推定塑性率 $\bar{\mu}_i (m=2)$	応答塑性率 μ_i	みかけの塑性率 μ'_i
6	2.23 (0.18)	2.28 (0.24)	1.78 (0.36)	2.18
5	2.28 (0.12)	2.36 (0.16)	2.40 (0.33)	2.22
4	2.16 (0.08)	2.16 (0.10)	2.25 (0.21)	2.15
3	2.10 (0.06)	2.08 (0.09)	2.26 (0.22)	2.13
2	2.10 (0.07)	2.09 (0.10)	2.26 (0.21)	2.13
1	2.06 (0.08)	2.02 (0.13)	2.26 (0.17)	2.10

低減モデル A (75%モデル)				
層	推定塑性率 $\bar{\mu}_i (m=1)$	推定塑性率 $\bar{\mu}_i (m=2)$	応答塑性率 μ_i	みかけの塑性率 μ'_i
6	2.05 (0.18)	1.93 (0.24)	1.38 (0.15)	2.18
5	2.10 (0.12)	2.00 (0.16)	0.99 (0.08)	2.22
4	3.53 (0.08)	4.34 (0.10)	5.65 (0.27)	2.87
3	3.44 (0.06)	4.18 (0.09)	5.30 (0.27)	2.83
2	1.94 (0.07)	1.77 (0.10)	0.93 (0.08)	2.13
1	1.90 (0.08)	1.71 (0.13)	1.13 (0.21)	2.10

低減モデル B (50%モデル)				
層	推定塑性率 $\bar{\mu}_i (m=1)$	推定塑性率 $\bar{\mu}_i (m=2)$	応答塑性率 μ_i	みかけの塑性率 μ'_i
6	1.87 (0.18)	1.61 (0.24)	0.79 (0.18)	2.18
5	1.92 (0.12)	1.66 (0.16)	0.61 (0.08)	2.22
4	7.25 (0.08)	12.23 (0.10)	9.02 (0.13)	4.31
3	7.07 (0.06)	11.77 (0.09)	8.98 (0.15)	4.25
2	1.77 (0.07)	1.47 (0.10)	0.62 (0.11)	2.13
1	1.73 (0.08)	1.43 (0.13)	0.77 (0.11)	2.10

() 内は変動係数

性率 $\bar{\mu}_3, \bar{\mu}_4$ でよく推定している。さらに, 3 層の応答塑性率 μ_3 より, 4 層の応答塑性率 μ_4 が大きくなる傾向を推定塑性率 $\bar{\mu}_3, \bar{\mu}_4$ でよく推定している。しかし, 2 層, 5 層では, 推定塑性率 $\bar{\mu}_i$ は応答塑性率 μ_i より, やや大きめになっている。また, 中間層 (3, 4 層) の推定塑性率 $\bar{\mu}_3, \bar{\mu}_4$ について, ($m=2$) による推定値は, 低減モデル A (75%モデル) では, 応答値より小さくなっているのに対し, 低減モデル B (50%モデル) では, 応答値の方が大きくなっている。 m の妥当な値については, 今後検討の必要がある。

(2) 応答変位の推定

基礎からの応答変位の推定について考察する。

[4], [5] 式により, m の値を 1.0 および 2.0 として求めた推定層間変位和 D_i の 10 波平均の値を表 2, 図 3 に示した。この値に対し, 応答計算による基礎からの最大変位 $Y_{i\max}$ および [6] 式による最大層間変位和 $Y'_{i\max}$ を比較した。

$$Y'_{i\max} = \sum_{j=1}^i \delta_{Nj} \dots [6]$$

ここに δ_{Ni} ; 応答最大層間変位

最大層間変位和 $Y'_{i\max}$ は, 位相ずれの分だけ, 基礎からの最大変位 $Y_{i\max}$ より大きくなっている。

表 2 各モデルの推定層間変位和 D_i と基礎からの最大変位 $Y_{i\max}$, 最大層間変位和 $Y'_{i\max}$ (cm)

原モデル (100%モデル)				
層	推定層間変位和 $D_i (m=1)$	推定層間変位和 $D_i (m=2)$	基礎からの最大変位 $Y_{i\max}$	最大層間変位和 $Y'_{i\max}$
6	13.41 (0.06)	13.39 (0.06)	12.34 (0.15)	13.62 (0.36)
5	10.78 (0.04)	10.74 (0.04)	10.72 (0.17)	11.52 (0.33)
4	8.41 (0.04)	8.30 (0.04)	8.66 (0.18)	9.02 (0.21)
3	6.26 (0.06)	6.15 (0.06)	6.57 (0.19)	6.78 (0.22)
2	4.20 (0.07)	4.11 (0.07)	4.46 (0.18)	4.56 (0.21)
1	2.10 (0.08)	2.05 (0.08)	2.31 (0.17)	2.31 (0.17)

低減モデル A (75%モデル)				
層	推定層間変位和 $D_i (m=1)$	推定層間変位和 $D_i (m=2)$	基礎からの最大変位 $Y_{i\max}$	最大層間変位和 $Y'_{i\max}$
6	13.63 (0.05)	14.10 (0.05)	10.88 (0.10)	12.87 (0.15)
5	11.22 (0.04)	11.85 (0.04)	9.80 (0.10)	11.24 (0.08)
4	9.03 (0.04)	9.78 (0.04)	8.99 (0.11)	10.21 (0.27)
3	6.40 (0.06)	6.56 (0.06)	5.46 (0.23)	6.00 (0.27)
2	3.86 (0.07)	3.48 (0.07)	2.05 (0.13)	2.09 (0.08)
1	1.94 (0.08)	1.74 (0.08)	1.16 (0.21)	1.16 (0.21)

低減モデル B (50%モデル)				
層	推定層間変位和 $D_i (m=1)$	推定層間変位和 $D_i (m=2)$	基礎からの最大変位 $Y_{i\max}$	最大層間変位和 $Y'_{i\max}$
6	14.82 (0.05)	18.33 (0.05)	10.03 (0.09)	11.88 (0.18)
5	12.61 (0.04)	16.46 (0.04)	9.46 (0.09)	10.95 (0.08)
4	10.61 (0.04)	14.74 (0.04)	8.96 (0.10)	10.31 (0.13)
3	7.01 (0.06)	8.67 (0.06)	5.16 (0.13)	5.83 (0.15)
2	3.53 (0.07)	2.91 (0.07)	1.39 (0.11)	1.41 (0.11)
1	1.77 (0.08)	1.45 (0.08)	0.79 (0.11)	0.79 (0.11)

() 内は変動係数

表 3 弾性モデルの基礎からの最大変位 $Y_{i\max}$, 最大層間変位和 $Y'_{i\max}$

弾性モデル				
層	弾性層間変位 δ_{Li}	基礎からの最大変位 $Y_{i\max} = \sum \delta_{Li}$	最大層間変位和 $Y'_{i\max}$	
6	2.58 (0.11)	12.73 (0.06)	13.37 (0.11)	
5	2.30 (0.08)	10.44 (0.05)	10.80 (0.08)	
4	2.14 (0.06)	8.33 (0.04)	8.50 (0.06)	
3	2.09 (0.04)	6.31 (0.04)	6.35 (0.04)	
2	2.11 (0.04)	4.26 (0.05)	4.26 (0.04)	
1	2.15 (0.05)	2.15 (0.05)	2.15 (0.05)	

() 内は変動係数

表2, 図3より, 最大層間変位 $Y'_{i\max}$ と偏差係数法による推定層間変位 D_i ($m=2$)は, 中間層の層間変位が大きくなる傾向がよく一致している。しかし, 頂部の層間変位 D_6 については, 低減モデルAでは, 頂部の最大層間変位 $Y'_{6\max}$ とほぼ一致しているが, 低減モデルBでは, その差が大きい。

また, 3つのモデルとの比較のため, 復元力特性を弾性とした弾性モデルの基礎からの応答変位 $Y_{i\max}$, 最大層間変位 $Y'_{i\max}$ を表3に示した。表2と比べると, 原モデルと弾性モデルは, ほぼ同じ変位となっており, この場合は, ほぼ変位一定則に従っている。(表2の■部分, 表3の■部分)

3. 弾塑性モード解析による検討

(1) 弾塑性モードの推定

3つのモデルの模擬地震波10波に対する弾塑性地震応答記録 $\{y(t)\}$ から, [7]式による推定1次モードベクトル $\{v_1\}$ の10波平均

を求めた。弾塑性モード解析は, 各階の弾塑性応答波形から共分散マトリクスを作成し, これを直交化することにより, 近似的な弾塑性モードと時刻関数の積の総和で, 応答を表現する方法である(文献[3], 文献[4]参照)。また, 推定1次モードの最上層の値 v_1 が, 最上層層間変位 D_6 と一致するような1次の分布 V'_i を求めた。

$$\begin{aligned} \{y(t)\} &= \{v_1\} a(t) + \{v_2\} a(t) + \cdots + \{v_n\} a(t) \\ &= \sum_{s=1}^n \{v_s\} a(t) \\ &= [V] \{a(t)\} \quad \cdots [7] \end{aligned}$$

$a(t)$; s 次の時刻 t における推定モード振幅

$\{v_s\}$; s 次の推定モードベクトル ($\{v_s\}^T [M] \{v_s\} = 1$ に正規化)

$[V]$; 推定モードマトリクス ($\{v_s\}^T [M] \{v_s\} = 1$ に正規化)

$\{y(t)\}$; 弾塑性地震応答記録 (基礎からの相対変位応答値)

$[M]$; 質量マトリクス (対角)

図2 各モデルの推定塑性率 $\bar{\mu}_i$

図3 各モデルの推定層間変位 D_i , 基礎からの最大変位 $Y_{i\max}$, 最大層間変位 $Y'_{i\max}$

表4 各モデルの推定1次モード V'_i と最大層間変位和 Y'_{imax}

i層	原モデル (100%モデル)		低減モデルA (75%モデル)		低減モデルB (50%モデル)	
	推定1次 モード V'_i	最大層間 変位和 Y'_{imax}	推定1次 モード V'_i	最大層間 変位和 Y'_{imax}	推定1次 モード V'_i	最大層間 変位和 Y'_{imax}
6	13.62	13.62	12.87	12.87	11.88	11.88
5	11.70	11.52	11.52	11.24	11.21	10.95
4	9.28	9.02	10.39	10.21	10.57	10.31
3	6.97	6.78	6.10	6.00	5.97	5.83
2	4.65	4.56	2.16	2.09	1.20	1.41
1	2.35	2.31	1.11	1.16	0.60	0.79

図4 各モデルの推定1次モード形 V'_i と最大層間変位和 Y'_{imax} との比較

頂部変位を一致させた推定1次モード V'_i と最大層間変位和 Y'_{imax} を比較した。それらを表4、図4に示した。両者は、かなりよく一致している。

(2) 等価1次周期

各モデルに対して、それぞれ10波の模擬地震動に対して、1次の推定モード振幅が最大となる近傍±1秒の1次の推定モード振幅 $\{a(t)\}$ の波形を取り出し、この波形のスペクトル解析を行った。各モデルごとに、10波に対するスペクトルの平均値を図5に示した。各モデルともスペクトルのピークがはっきり現れ、また、原モデル、低減モデルA(75%モデル)、低減モデルB(50%モデル)となるに従って、つまり中間層の耐力が落ちるほど、ピークの周期が長くなってきている。これら3つのスペクトルのピーク値を表5の等価線形化周期 T_e ²⁾ ³⁾と比較した。ここで、各モデルの等価線形化周期 T_e は、各地震波に対する各層塑性率の建物全体としての平均 $\bar{\mu}$ と降伏時周期 T_y より、以下の式で定義した。

$$T_{eA} = \sqrt{\bar{\mu}} \times T_y \quad \dots [8] \quad \text{[等価線形化周期 } T_{eA}]$$

$$T_{eB} = \sqrt{0.7\bar{\mu}} \times T_y \quad \dots [9] \quad \text{[等価線形化周期 } T_{eB}]$$

いずれのモデルともスペクトルのピーク値は、等価線形化周期 T_{eA} 、 T_{eB} の間の値となっている。

なお、本解析のような塑性率の差が大きいモデルに対して[8]、

[9]式の妥当性に関しては、今後検討をしていきたい。

表5 初期周期、降伏時周期及び各モデルの等価線形化周期と推定モード振幅のスペクトルのピーク(秒)

	1次	推定モード 振幅(1次) のスペクトル のピーク
初期周期(弾性剛性周期; T_c)	0.33	
降伏時周期; T_y	0.60	
原モデル	T_{eA}	0.89
	T_{eB}	0.75
低減モデルA	T_{eA}	0.96
	T_{eB}	0.80
低減モデルB	T_{eA}	1.12
	T_{eB}	0.93

図5 各モデルの1次の推定モード振幅

4. まとめ

偏差係数法による塑性率の推定方法を、層塑性率が中間層で大きくなる中間層崩壊建物モデルの解析例に適用した。10波の地震応答記録により弾塑性応答計算で求めた塑性率と推定塑性率との比較、さらに応答計算で求めた応答変位、最大層間変位和と推定層間変位和との比較を行った。その結果、偏差係数法による推定値がそれぞれの応答値の傾向をよく表していた。また、弾塑性モード解析を行い、推定1次モード形と実際の応答計算による変位を比較した。さらにモデルごとに推定1次モード振幅のスペクトルのピークと等価線形化周期を比較した。

今後は、これらの方法を、周期の異なるモデルや、塑性率の集中場所が上層や下層の場合にも適用し、検討を加えていきたい。

参考文献

- 1) 阪神淡路大震災調査報告 「建築1 鉄筋コンクリート構造」 pp.102-105.
- 2) 益野英昌, 柴田明徳 “弾塑性モード解析を用いた地震による建物の中間層崩壊現象の検討” 日本建築学会大会(東海), pp.409-410, 2003. 9. “同 (その2)” 日本建築学会大会(北海道), pp.965-966, 2004. 9.
- 3) 益野英昌, 柴田明徳 “多質点系の応答記録に基づく弾塑性モード特性”, 日本建築学会技術報告集第15号, pp.89-92, 2002. 6
- 4) 益野英昌, 柴田明徳 「モード分解に基づくペントハウスを有する建物の地震応答性状の検討」, 構造工学論文集 Vol. 45B, pp.65-72, 1999. 3
- 5) 益野英昌, 柴田明徳 “多質点系の応答記録に基づく弾塑性モード解析 (その3)”, 日本建築学会大会(北陸), pp.335-336, 2002. 8
- 6) 柴田明徳 “地震による高層建物の撓み量”, 日本建築学会大会学術講演梗概集号外, 昭和40年9月, pp.133.
- 7) 柴田明徳 “最新耐震構造解析”, 森北出版
- 8) 益野英昌, 柴田明徳, 小川淳二, 渋谷純一 “RC造震害建物の応答解析に基づく付加構造物の制震効果の検討”, 構造工学論文集Vol. 44B, pp.295-300, 1998. 3

[2005年10月18日原稿受理 2006年2月20日採用決定]