

論文 下層部にソフトストーリーを有する RC 造建物の簡易地震応答予測について

馬 華^{*1} 文 雪峰^{*2} 鈴木 計夫^{*3} 大野 義照^{*4}

要旨：下層部にエネルギー吸収能力が大きいソフトストーリーを有する多層 RC 造建物を対象とし、同構造の2次以上の高次振動モードの影響及び上層部とソフトストーリー部のエネルギー吸収配分特性について、2 質点系モデルを用いて検討するとともに、多質点系の応答を1 質点系で簡易な予測方法を提案した。また、実記録地震波を用いた多質点系モデルと1 質点系モデルの地震応答解析を行い、諸応答性状を比べ、ソフトストーリー構造に対して1 質点系モデルの適用範囲を示した。

キーワード：ソフトストーリー、多質点系、1 質点系、簡易地震応答予測

1. はじめに

建物の耐震設計において、耐震規定による地震荷重を用いて静的設計から建物の振動モデルを設定し、複数の地震波形に対して弾塑性応答解析を行い、設計終了までに数多くの計算をすべきであるが、設計の初期段階に部材断面特性を把握するために、より簡便な地震応答の予測法が望まれている。著者らは下層部にエネルギー吸収能力が大きいソフトストーリーを有するコンクリート多層建築物の耐震性について、同構造の諸地震応答特性の解明を図ってきており^{1)~4)}、同構造の下層部の強度・剛性を低減していくにつれて、高次振動モード成分の影響が弱化し、1次振動モードが顕著に現れてくることを報告している。一方、剛性が非常に小さい免震層を持つ免震構造の設計では、1質点振動系モデルを用いた簡易応答予測法が用いられている⁵⁾。すなわち、ソフトストーリーを有する建物については、ソフトストーリーの剛性をある程度小さくすれば、免震構造のように、1質点系モデルを用いて簡易な応答予測ができると考えられる。

そこで、本報では、多質点振動系を1質点系モデルに置換するため、まず、2質点系モデルを用い、ソフトストーリー部の剛性・強度低下によって、固有振動特性及びエネルギー配分特性の変化を考察するとともに、多質点系を1質点系にモデル化する方法を提示した。また実記録地震波を使って、1質点系モデル及び多質点系モデルの地震応答解析を行い、1質点系モデルの応答値を用いて多質点系の応答を予測する方法及びその適用範囲を示した。

2. 1質点系のモデル化

ソフトストーリー部の剛性が低ければ低いほど1次振動モードが卓越し、2次以上の振動モードの影響が小さくなる。そこで、ソフトストーリーを有する多層RC建物の振動系モデルは図-1のように考えられる。すなわち、同図(a)に示す多質点系を同図(c)のように1質点系にモデル化する。ここで、その振動モード特性及びエネルギー配分特性については簡便のため同図(b)に示す2質点系モデルを用いて考察し、多質点系を1質点系にモデル化する可能性及びその

*1 大阪大学大学院生 建築工学科 (正会員)

*2 (株)高橋上田設計事務所 工博 (正会員)

*3 福井工業大学教授 建設工学科 工博 (正会員)

*4 大阪大学教授 建築工学科 工博 (正会員)

方法を考える。

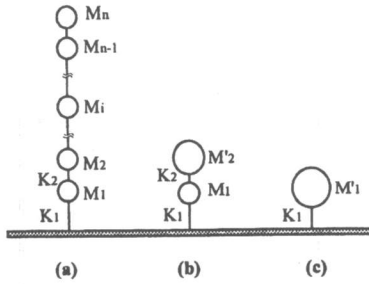


図-1 質点系モデル

2.1 2質点系振動モード特性

図-2 に示す等価せん断型2質点系モデルに対し、地震動 x_g を受けた場合の運動方程式を解く⁶⁾と、1, 2次固有周期、振幅は次のようになる。

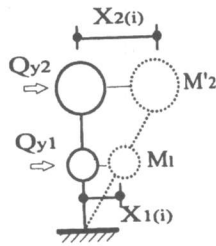


図-2 等価せん断型2質点系モデル

$$T_{Mj} = \frac{2\pi}{\omega_j} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{2\bar{m}M_1}{K_1 \cdot (\bar{k} + \bar{m} + \bar{k}\bar{m} \pm \sqrt{(\bar{k} + \bar{m} + \bar{k}\bar{m})^2 - 4\bar{k}\bar{m}})}} \quad (1)$$

$$\left[\begin{matrix} X_1 \\ X_2 \end{matrix} \right]_j = \frac{\bar{k} - \bar{m} - \bar{k}\bar{m} \mp \sqrt{(\bar{k} - \bar{m} - \bar{k}\bar{m})^2 - 4\bar{k}\bar{m}}}{2\bar{k}} \quad (2)$$

右边で、+を取るときに $j=1$ 、-を取るときに $j=2$ となる。

1次と2次刺激係数は次式ようになる。

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \frac{1 + \bar{m}X_{21}/X_{11}}{1 + \bar{m}(X_{21}/X_{11})^2} \\ \beta_2 &= \frac{1 + \bar{m}X_{22}/X_{12}}{1 + \bar{m}(X_{22}/X_{12})^2} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 $\bar{m} = M_2/M_1$ 、 $\bar{k} = K_2/K_1$

下層部にソフトストーリーを有する建物の場合、ソフトストーリー一部剛性の基準建物（ソ

フトストーリーでない）当該階の剛性に対する比を剛性低減係数^{2)~4)} $\gamma_k = 1/\bar{k}$ (<1) とし、また、 $(\bar{m}\gamma_k)/(1+\bar{m})$ の4乗項の微小量を無視すると、式(1)、(2)、(3)はそれぞれ次の諸式になる。

1次固有周期、

$$T_{M1} = \sqrt{1 + (\bar{m} \cdot \gamma_k / (1 + \bar{m}))^2} \cdot T \quad (4)$$

ここに、 T は1質点系と見なしたときのソフトストーリー構造の固有周期で、次のように表せる。

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{M/K} \quad (4a)$$

固有振動モードの1次振幅比(X_2/X_1)は、次のようになる。

$$\left(\frac{X_{21}}{X_{11}} \right) = 1 + \left(\frac{\bar{m}}{1 + \bar{m}} \cdot \gamma_k \right)^2 \quad (5)$$

刺激係数(β_1 、 β_2)は、2質点系の基本式(3)に式(5)を代入して、1次刺激係数として式(6a)、(6b)、2次刺激係数として式(7a)、(7b)が得られる。

$$\beta_1 = \left\{ 1 - \frac{\bar{m}}{2 + (1 + \bar{m})^3 / \bar{m}^2 \gamma_k^2} \right\} \cdot \frac{1}{X_{11}} \quad (6a)$$

$$= \left\{ 1 + \frac{1}{2 + (1 + \bar{m})^3 / \bar{m}^2 \gamma_k^2} \right\} \cdot \frac{1}{X_{21}} \quad (6b)$$

$$\beta_2 = \left\{ \frac{\bar{m}}{-2 + (1 + \bar{m})^3 / \bar{m}^2 \gamma_k^2} \right\} \cdot \frac{1}{X_{12}} \quad (7a)$$

$$= \left\{ \frac{1}{2 - (1 + \bar{m})^3 / \bar{m}^2 \gamma_k^2} \right\} \cdot \frac{1}{X_{22}} \quad (7b)$$

図-3 に剛性低減係数 γ_k と、多質点と1質点との1次固有周期の比の関係を示す。記号○●は後述の12質点系モデル及び2質点系モデルとみなしたときの1次固有周期と1質点系モデルの固有周期との比で、破線は(4)式の計算値、実線は文献4)に提案した下式による計算値である。

$$T_s = \sqrt{((\gamma_b^8 - 1) \cdot \gamma_k + 1) / (\gamma_k \cdot \gamma_b^8)} \quad (8)$$

但し、 $x_b^s = 1 + 0.52\gamma_k \cdot (n-1)$ 。

同図から γ_k が小になるにつれて、1質点系の固有周期が多質点系の1次固有周期に近づくが、 γ_k は相当に小さくしなければ同じにならないことが分かる。また、計算値は解析値とよく一致している。

図-4、図-5にそれぞれ振幅比及び刺激係数と剛性低減係数との関係を示す。同図から分かるように、 γ_k が小さくなるにつれて振幅比(X_{21}/X_{11})も1に近づく(図-4)、上層部がほぼ剛体移動のような振動モードを示し、1次固有振動モードの刺激が大きく、2次の固有振動成分は殆ど刺激されなくなる(図-5)。

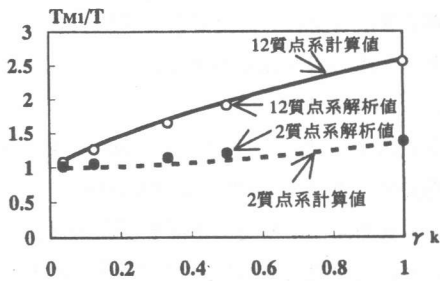


図-3 多質点の1質点に対する固有周期比

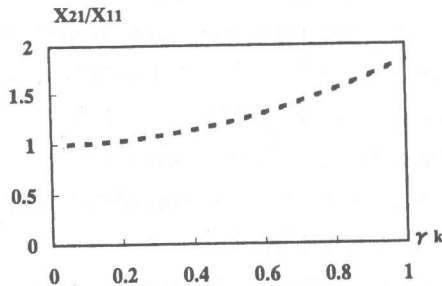


図-4 2質点系の振幅比

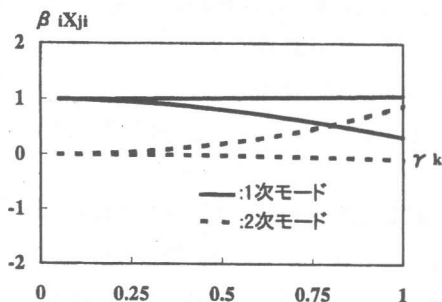
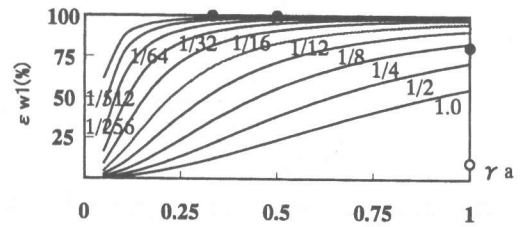


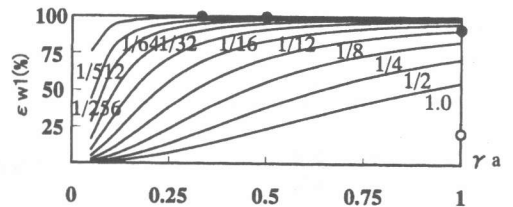
図-5 2質点系の刺激係数

2.2 2質点系のエネルギー配分特性

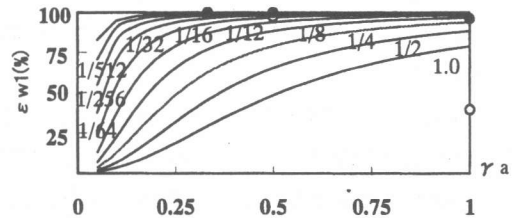
前掲の図-2に示した等価せん断型2質点振動系モデルに対して、第1質点と第2質点の変形



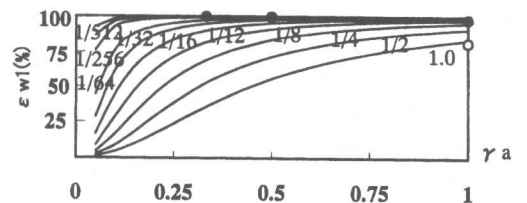
a. $\gamma_k=1$



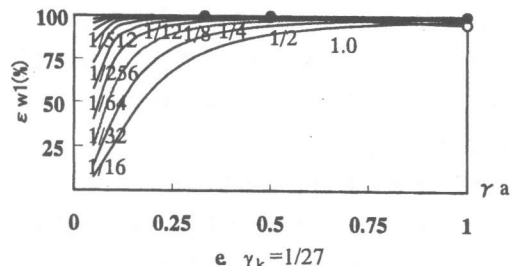
b. $\gamma_k=1/2$



c. $\gamma_k=1/3$



d. $\gamma_k=1/8$



e. $\gamma_k=1/27$

○ : 12質点系の解析値

● : 2質点系の解析値

図-6 エネルギー配分率～剛性低減率の関係

エネルギーの吸収率 ε_{w1} , ε_{w2} は次のように誘導されている⁷⁾。

$$\varepsilon_{w1} = \frac{1}{1 + \bar{\mu} \cdot \gamma_k \left(\frac{\bar{m}}{(1 + \bar{m})\gamma_a} \right)^2} \quad (9a)$$

$$\varepsilon_{w2} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\bar{\mu} \cdot \gamma_k} \left(\frac{(1 + \bar{m})\gamma_a}{\bar{m}} \right)^2} \quad (9b)$$

ここに、 $\gamma_a = 1/\bar{\alpha} (<1)$ は強度低減係数^{2)~4)}で、 $\bar{\mu}$ は第2層と第1層の累積塑性率の比を表す係数である。

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{\bar{m}}{1 + \bar{m}} \cdot \frac{Q_{y2}}{Q_{y1}} \quad (10a)$$

$$\bar{\mu} = \frac{\mu_{c2} - 3/4}{\mu_{c1} - 3/4} \quad (10b)$$

Q_{y1} , Q_{y2} と μ_{c1} , μ_{c2} はそれぞれ第1層と第2層の降伏水平せん断力と正、負方向の累積塑性率の値である。

図-6(a)~(e)に(9a)式より求められた ε_{w1} の推定値と γ_a の関係を $\gamma_k = 1, 1/2, 1/3, 1/8, 1/27$ と変化させて図示している。実線は $\bar{m} = 11$ と $\bar{\mu} = 1, 1/2, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64, 1/128, 1/256, 1/512$ として得られたものである。 $\bar{\mu}$ が小さいほど、すなわち2層の塑性化が1層の塑性化より低いほど ε_{w1} が大きい。○●は後述の12質点系モデルと2質点系モデルとみなしたときの1階のエネルギー配分率の解析値で、 γ_k , γ_a が小さいほど ε_{w1} が大きくなり、 γ_a は1/2以下となると、上層部における塑性エネルギー吸収はほぼ無視できる。また、このような傾向は γ_k の小さい方が大きい方より顕著である。実線を目盛りを読めば、解析値がどの範囲の $\bar{\mu}$ に入っているかが分かる。。

2.3 1質点振動系のモデル化

以上の2質点系モデルの振動モード特性及びエネルギー吸収配分特性から分かるように、ソフトストーリー部の剛性・強度が低ければ1次振動モードが卓越し、入力エネルギーの大部分がソフトストーリー部で消費される。そこで、

ソフトストーリーを有する多層RC建物の地震応答は同一の1次固有周期と減衰定数を有する等価な1質点系モデルの応答を用いて予測できると考えられる。具体的には、ソフトストーリーを有する多層RC建物の全質量を1層に集め、ソフトストーリー部の復元力特性を持つ1質点系モデルで、減衰は(8)式より求める1次固有周期に基づいて設定する。

3. 地震応答解析

ソフトストーリーを有する多層RC建物を1質点系モデルとする方法を前節に示した。ここでは試設計建物に対し、実記録地震波を用いて地震応答解析を行い、その諸応答性状から1質点系モデルの適用性を検討する。

3.1 解析モデル

多質点系モデル(モデルM)：降伏強度の高さ方向分布は現行耐震設計規定に用いられている外力分布 A_i により定める層せん断力係数分布に基づいて設定し、剛性分布は降伏せん断力係数に比例する k_i 分布を基準分布とする。解析建物の階数は12階、各層重量は450t、階高は3.0mとする。層降伏変位角はRC建物では約1/200~1/150である⁶⁾⁷⁾ので、ここでは1/200とする。1層の降伏強度は1440tである。復元力特性はBilinear型とし、降伏後剛性は初期剛性の1/100とする。ソフトストーリー部の剛性と強度は同じ比率をもって低減する。

1質点系モデル：上述のモデルに基づいて2.3節で述べたように1質点系モデルを設定する(モデルA)。比較のためモデルAと同じであるが、1質点系の固有周期に基づいて定めた減衰を有するモデルBを設定する。

モデルAとモデルBの復元力特性はモデルMの1階と同じとする。

減衰は剛性比例型で、減衰定数は弾性1次モードに対して5%とした。地震波はEL CENTRO 1940NS(以下EL波と略記)とし、入力レベルは速度を50cm/sと基準化したものを用い、解析方法

はニューマークの β 法で、 β を1/6とした。

3.2 解析結果及び考察

(1) 入力エネルギーと内部エネルギー

図-7に1質点系モデルへの入力エネルギーと多質点系モデルへの入力エネルギーの比と、剛性と強度低減係数との関係を示す。記号○はモデルAとモデルMと入力エネルギーの比を表し、剛性と強度の低減にほぼ関係なく1となっている。これは地震動の1質点系への入力、多質点系への入力とほぼ同じで、同一の1次固有周期に基づいて設定した減衰を持つモデルAを用いてモデルMの応答を予測することが妥当であることを示している。記号●はモデルBとモデルMとの比を表し、 γ_k, γ_a が小さい範囲ではほぼ1となっているが、大きい範囲では1から離れている。これは周期の違いによる減衰の差によるものと考えられる。

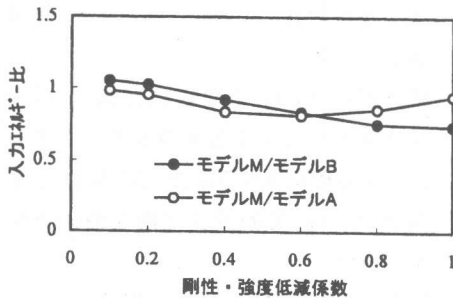


図-7 系への入力エネルギー

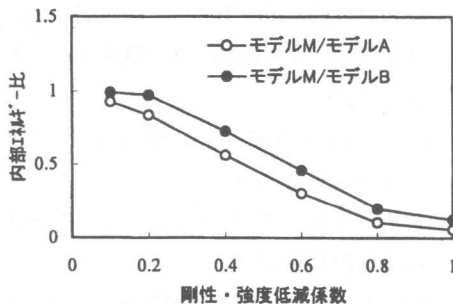


図-8 内部エネルギーの比

図-8に多質点系モデルの1層の内部エネルギーと1質点系モデルの内部エネルギーとの比を示す。内部エネルギーは地震終了時に層に蓄積

された弾性歪エネルギーと塑性歪エネルギーの和である。記号○●はそれぞれモデルAとモデルM及びモデルBとモデルMとの比を表し、 γ_k, γ_a が小さくなるほどその値が1に近づき、剛性と強度の低減に伴い多質点系の1層で消費されるエネルギーの比率が大きくなることが分かる。

(2) 最大層間変位

図-9に多質点系モデルから求めた最大層間変位の分布を示す。 $\gamma_k, \gamma_a=1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.1$ と1階の剛性と強度の低減にともない、

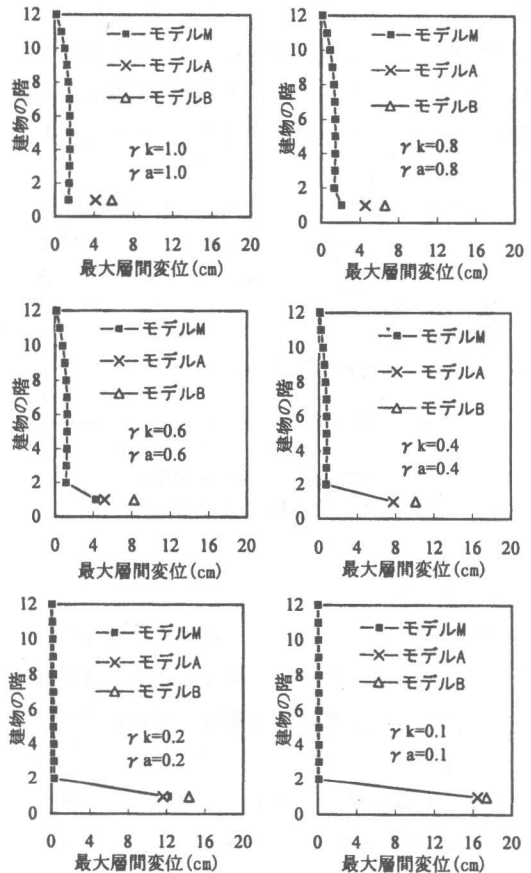


図-9 最大層間変形の分布

1層の最大応答層間変位が1.38, 2.09, 4.28, 7.80, 12.24, 16.57cmと大きくなり、ソフトストーリー構造の設計にあたって、層の最終変形能力の

保障が重要であることを改めて示している。また、1質点系モデルA、Bの応答値も同図に記した。 $\gamma_k, \gamma_a=1$ の場合、上部層を除いて各層ほぼ同様な変形を示し、1層の最大応答層間変位が1質点系のものと大きく異なっている。 γ_k, γ_a が小さくなるにつれて、1層の変形が大きくなり、上層部の変形は小さくなる。また、その値が1質点系のものに近づくことが同図からわかる。

図-10に1質点系モデルと12質点系モデル1層の最大応答層間変位の比を示す。 γ_k, γ_a が小さくなると、その値は1.0に近づく。1質点系モデルAに関しては、 γ_k, γ_a が約0.5以下になると、多質点系モデルと1質点系モデルAの応答値はほぼ一致しているが、1質点系モデルBに関しては、前述のように、入力エネルギーの違いから、多質点系モデルとの差異はモデルAよりやや大きい。

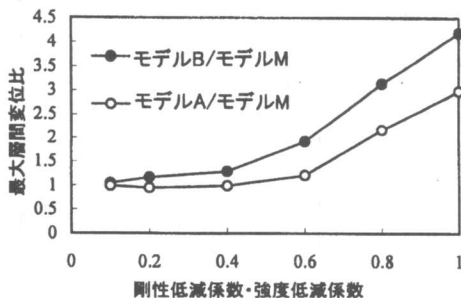


図-10 最大層間変位の比

4. まとめ

以上のことをまとめると、次のようになる。

- 1) ソフトストーリー部の剛性と強度の低減とともに、上層部はほぼ剛性移動の振動モードを呈し、1次モードの刺激が大きく、2次以上の振動成分が刺激されなくなり、系への入力エネルギーの多くはソフトストーリー部で消費される。
- 2) ソフトストーリー部の剛性と強度がある程度小さくなれば、ソフトストーリーを有する多層RC建物の応答は、ソフトストーリー部の復元力特性を用いた同一の1次固有周期と減衰定数を有する等価な1質点系モデルの応答を用いて予測できる。
- 3) 12質点系モデルの地震応答解析から1階の剛性と強度の剛性低減係数 γ_k 、強度低減係数 γ_a ともに1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.1と低減されるにともない、1層の最大応答層間変位は1.38から16.6cmと大きくなり、ソフトストーリー構造の設計にあたって、層の最終変形能力の保障が重要なことが改めて示された。またその応答結果から、1質点系モデルの多質点系モデルへの適用範囲は γ_k, γ_a が0.5以下の範囲であるといえる。

謝辞：本研究は(株)耐震企画設計李振宝氏の協力を得て行ったことを記して謝意を表します。

参考文献：

- 1) 鈴木計夫・文雪峰:PRC 円形柱を用いるエネルギー集中型コンクリート構造の耐震に関する基礎研究,日本建築学会近畿支部研究報告集,1991.5
- 2) 鈴木計夫・Kwon・文雪峰:低層部にソフト・ストーリーを有するコンクリート多層骨組の耐震性に関する研究,(その1)基本応答性状,日本建築学会近畿支部研究報告集,1992.5
- 3) 鈴木計夫・文雪峰・Kwon:低層部にソフト・ストーリーを有するコンクリート多層骨組の耐震性に関する研究,(その2)P-△効果の評価,日本建築学会近畿支部研究報告集,1992.5
- 4) 鈴木計夫・文雪峰・Kwon:低層部にソフト・ストーリーを有するコンクリート多層骨組の不安定化予測,日本建築学会近畿支部研究報告集,1993.5
- 5) 秋山宏:建築物の耐震極限設計,第2版,東京大学出版会,1987
- 6) 武田寿一:建物の免震・防振・制振,技報堂出版,1988.5
- 7) 石丸辰治:構造物の動的解析,建築技術,1982.1, No.375