

中間層免震構造物における地震時応力に関する研究  
その2 地震時応力を考慮した設計手法の提案

A Study on Stresses during an Earthquake of Structure with Mid-story Isolation System  
Part2 Proposed Design Method considering the Earthquake Stress

○川口剣斗<sup>3</sup>, 古橋剛<sup>1</sup>, 登坂遼太郎<sup>2</sup>, 岡部丈<sup>3</sup>

\*Kento Kawaguti<sup>3</sup>, Takeshi Furuhashi<sup>1</sup>, Ryotaro Tosaka<sup>2</sup>, Jo Okabe<sup>3</sup>

In this paper, we reveal that the earthquake stress that exceeds the design stress occurs. And we propose the design method considering the earthquake stress.

2.1 はじめに

前報その1では、様々な中間層免震モデルにおいて、設計応力を大きく超える地震時応力が生じる部材が存在し、現行の設計が危険側となり得ることを示した。

そこで本報その2では、危険側となる原因を明らかにし、地震時応力を考慮した設計手法の提案を行う。

2.2 設計応力を超える地震時応力が生じる原因

2.2.1 抽出モデル

抽出モデルは、1.0s model (Figure1-1, Table1-1~1-2) とし、免震層諸元を免震設置層 5 層目、免震塑性周期 6s, バイリニア係数 0.05, 降伏せん断力係数 0.03 とした中間層免震モデルを用いる。なお、部材減衰及び応力を算出する際のフレームモデルは前報その1と同様とする。また、入力地震動は、El Centro 1940 NS を 50cm/s に基準化した地震動のみによる検討とする。

2.2.2 抽出モデルにおける地震時応力の検討結果

抽出モデルの設計応力と最大地震時応力を Table2-1 に示す。この結果から免震層の直上・直下の柱が危険側の設計となることが分かる。そこで、これらの部材における各応力の地震力応力及び P-Δ 応力を Table2-2 に示す。以下、各応力を下記のように呼称する。

- ・設計応力の地震力応力 → 設計地震力応力
- ・設計応力の P-Δ 応力 → 設計 P-Δ 応力
- ・地震時応力の地震力応力 → 地震時地震力応力
- ・地震時応力の P-Δ 応力 → 地震時 P-Δ 応力

まず、直上柱頭・直下柱脚の地震力応力 (Table2-2 a) d) に着目する。最大層せん断力を超えるせん断力は発生しないため、設計地震力応力を超える地震時地震力応力が生じる原因は、反曲点高さのばらつき<sup>原因(A)</sup>が考えられる。また、直上柱頭・柱脚の P-Δ 応力 (Table2-2 a) b) に着目すると、設計 P-Δ 応力は地震時 P-Δ 応力と比較して値は大きいですが、設計地震力応力と符号が異なり足し合わせた際に設計応力は大きく低減される。

したがって、単純な応力の足し合わせは、設計 P-Δ 応力により設計応力を大きく減らし危険側の設計となる場合がある<sup>原因(B)</sup>。さらに、直下柱頭・直下柱脚の P-Δ 応力 (Table2-2 c) d) に着目すると、設計 P-Δ 応力は設計地震力応力と異符号なのに対して、地震時 P-Δ 応力は地震時地震力応力と同符号であり、地震時応力が増大する場合がある<sup>原因(C)</sup>。以上の原因を以下にまとめる。

- (A) 反曲点高さがばらつくことによって設計地震力応力を超える地震時地震力応力が生じる。
- (B) 地震時 P-Δ 応力が小さい場合が存在するが、現行の設計では設計地震力応力と設計 P-Δ 応力の符号が異なり、設計応力が大きく低減する。
- (C) 地震時地震力応力と地震時 P-Δ 応力が同符号で、加算となる場合があるが、現行の設計では設計地震力応力と設計 P-Δ 応力の符号が異なり、設計応力が低減する。

Table2-1 Maximum earthquake stress and design stress of extraction model

| FL  | 設計応力[kN・m] |        |       | 最大地震時応力[kN・m] |       |      | 地震時応力/設計応力 |      |      |
|-----|------------|--------|-------|---------------|-------|------|------------|------|------|
|     | 柱          |        |       | 柱             |       |      | 柱          |      |      |
|     | 柱頭         | 柱脚     | 梁     | 柱頭            | 柱脚    | 梁    | 柱頭         | 柱脚   | 梁    |
| 8   | 754        | -349   | -377  | 753           | 351   | 377  | 1.00       | 1.00 | 1.00 |
| 7   | 1013       | -802   | -681  | 1010          | 812   | 680  | 1.00       | 1.01 | 1.00 |
| 6   | 876        | -1009  | -839  | 868           | 980   | 830  | 0.99       | 0.97 | 0.99 |
| 5   | 468        | -497   | -739  | 576           | 801   | 743  | 1.23       | 1.61 | 1.01 |
| 免震層 | -          | -      | -717  | -             | -     | 630  | -          | -    | 0.88 |
| 4   | 4247       | -1427  | -2592 | 4786          | 1901  | 2176 | 1.13       | 1.33 | 0.84 |
| 3   | 7987       | -4483  | -4707 | 7964          | 4496  | 4626 | 1.00       | 1.00 | 0.98 |
| 2   | 10188      | -8178  | -7335 | 10226         | 8159  | 7280 | 1.00       | 1.00 | 0.99 |
| 1   | 9508       | -12780 | -8843 | 9514          | 12774 | 8832 | 1.00       | 1.00 | 1.00 |
| B   | -          | -      | -6390 | -             | -     | 6387 | -          | -    | 1.00 |

Table2-2 P-Δ stress and seismic force maximum stress of earthquake stress and design stress

| a)直上柱頭 |             |              |      | b)直上柱脚 |             |              |      |
|--------|-------------|--------------|------|--------|-------------|--------------|------|
| 応力の種類  | 設計応力 [kN・m] | 地震時応力 [kN・m] | 倍率   | 応力の種類  | 設計応力 [kN・m] | 地震時応力 [kN・m] | 倍率   |
| 地震力応力  | 581         | -666         | 1.15 | 地震力応力  | -873        | -876         | 1.00 |
| P-Δ応力  | -113        | 90           | 0.79 | P-Δ応力  | 376         | 75           | 0.20 |
| 合計値    | 468         | -576         | 1.23 | 合計値    | -497        | -801         | 1.61 |

| c)直下柱頭 |             |              |      | d)直下柱脚 |             |              |      |
|--------|-------------|--------------|------|--------|-------------|--------------|------|
| 応力の種類  | 設計応力 [kN・m] | 地震時応力 [kN・m] | 倍率   | 応力の種類  | 設計応力 [kN・m] | 地震時応力 [kN・m] | 倍率   |
| 地震力応力  | 4624        | 4584         | 0.99 | 地震力応力  | -1540       | 1880         | 1.22 |
| P-Δ応力  | -376        | 202          | 0.54 | P-Δ応力  | 113         | 21           | 0.18 |
| 合計値    | 4247        | 4786         | 1.13 | 合計値    | -1427       | 1901         | 1.33 |

1: 日大理工・教員・建築 2: 織本構造設計 3: 日大理工・学部・建築

## 2.3 地震時応力を考慮した設計手法の提案

### 2.3.1 設計地震力応力の割増率の検討概要

前節で明らかにした原因を基に地震時応力を考慮した設計手法を提案する。

原因(B)・(C)は、設計地震力応力と設計 P-Δ 応力の絶対値を足す方法が提案でき、原因(A)は、設計地震力応力に割増率を乗じる方法が提案できる。ここで、前報で示した全中間層免震モデルの設計地震力応力に対する地震時地震力応力の最大値（以降最大地震時地震力応力）の倍率を算出することで、設計地震力応力に乘じる必要がある割増率の検討を行う。

### 2.3.2 設計地震力応力の割増率の検討結果

中間層免震モデルにおける設計地震力応力に対する最大地震時地震力応力の倍率を Figure2-1 に示す。

まず、直上柱頭・直下柱脚に着目すると、モデル周期が長いほど倍率が上昇し、他と比較して倍率が大きくなっている。次に、直上柱脚・直下柱頭に着目すると、モデル周期に依存せず、倍率はやや 1 を超えた値となる。また、梁については倍率が 1 以内に収まるため、割増率を乗じる必要がないことが分かる。

以上より、全ての倍率を満足するように設定した割増率の式((2-1)~(2-4)式)が提案できる。

以上に示した提案設計手法は、下記の通りとなる。

- I 免震層の直上・直下の柱の設計地震力応力に(2-1)式~(2-4)式より算出される割増率を乗じる。
- II 設計地震力応力と設計 P-Δ 応力をそれぞれ絶対値をとって足し合わせる。

$$\alpha_1 = 1.1 + 0.2T \quad (2-1) \quad \alpha_2 = 1.1 \quad (2-2)$$

$$\alpha_3 = 1.1 \quad (2-3) \quad \alpha_4 = 1.3 + 0.2T \quad (2-4)$$

$\alpha_1$  : 直上柱頭の割増率,  $\alpha_2$  : 直上柱脚の割増率,  $\alpha_3$  : 直下柱頭の割増率

$\alpha_4$  : 直下柱脚の割増率,  $T$  : 建物の周期[s] (Table1-1 に示す基本モデルの 1 次固有周期)

## 2.4 提案設計手法の有効性の確認

前報その 1 で示した全モデル・全入力地震動に対して、前節で示した提案設計を行い、提案設計応力に対する最大地震時応力の倍率の結果を Figure2-2 に示す。

この結果より、全ての中間層免震モデルにおいて提案設計応力に対する最大地震時応力の倍率が 1 以内に収まっており安全側の設計となっていることが分かる。したがって、提案設計手法は中間層免震構造物の地震時応力を考慮した有効な設計手法であると言える。

## 2.5 まとめ

本報その 2 では、現行の中間層免震構造物の設計が応力の観点で危険側となる原因を明らかにした。さらに、それを基に地震時応力を考慮した設計手法を提案し、その有効性を確認した。

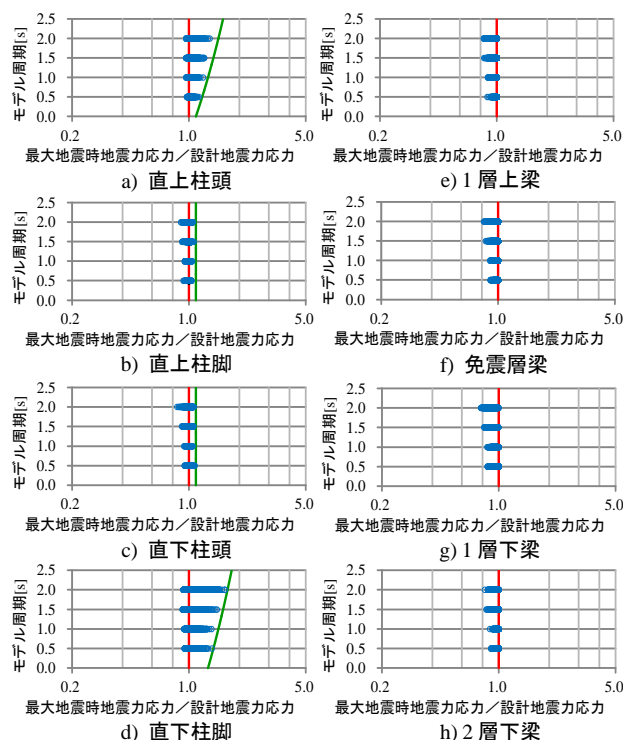


Figure2-1 Maximum earthquake seismic force stress / Design seismic force stress

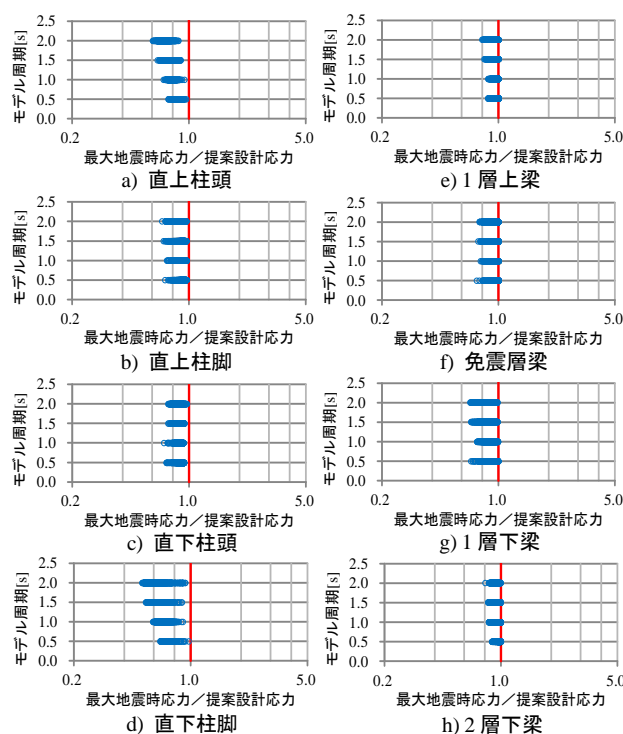


Figure2-2 Maximum earthquake stress / Proposed design stress

## 2.6 参考文献

- [1] 稀代康平, 石丸辰治, 古橋剛ら : 中間層免震構造物の逆位相問題に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 459-464, 2013.8
- [2] 日本建築学会関東支部 : 免震・制震構造の設計 学びやすい構造設計, 2007.1
- [3] 藤井大地 : Excel で解く 3 次元建築構造解析, 丸善出版, 2005.3