

中間層免震構造物の逆位相問題に関する研究

その3 逆位相問題における挙動の把握

A Study on the reverse phase problem of mid-story isolated buildings

Part3: Understanding of the behavior in the reverse phase problem

○平松勇人<sup>4</sup>, 古橋剛<sup>1</sup>, 稀代康平<sup>2</sup>, 登坂遼太郎<sup>3</sup>, 伊川大貴<sup>4</sup>, 鈴木雄太<sup>4</sup>

\*Hayato Hiramatu<sup>4</sup>, Takeshi Furuhashi<sup>1</sup>, Kohei Kitai<sup>2</sup>, Ryotaro Tosaka<sup>3</sup>, Daiki Igawa<sup>4</sup>, Yuta Suzuki<sup>4</sup>

In this report, the behavior in the reverse phase problem is clarified from the viewpoints of vibration modes and stress. Firstly, the lumped mass model that had a reverse phase problem in the previous report is examined based on eigenvalues and participation vectors to find the cause of the problem. Secondly, it is proved that a building stands in danger at the moment of the reverse phase by using frame models and a new design method in consideration of the problem is derived.

3.1 はじめに

前々報その1では、逆位相問題を定義し、その評価指標を提案した。また、前報その2では、その1で示した指標を用いて様々な免震層パラメータの中間層免震モデルを評価し、免震層と逆位相問題の起こりやすさの関係を示した。本報その3では、その2で示した解析結果において逆位相が生じたモデルに対して検討を行い、振動モードや応力の観点から逆位相問題の原因や危険性を把握し、新たな設計法を提案する。

3.2 応答値・振動モードと逆位相問題の関係

前報で示した解析結果における免震設置層4層、免震周期 $T_f=5.0s$ 、降伏せん断力係数 $\alpha_s=0.05$ 、バイリニア係数 $p=0.1$ のモデルについて考える。このモデルはJMA KOBE 1995 NSの際にFigure3-2の $P_j(t)-P_i(t)$ 曲線となり、逆位相が生じる。この際、最も厳しい逆位相状態である $-P_{ij}(t)_{min}$ となる時刻の応答値(Figure3-1)、固有値(Table3-1)、刺激関数(Figure3-3)を確認し、設計値(最大応答値)と比較する。また、JMA KOBE 1995 NSの擬似速度応答スペクトル(Figure3-4)と固有周期との関係についても確認する。

まず、Figure3-1に着目すると上部構造と下部構造が逆方向に変形しており、逆位相状態である。また、上部構造と下部構造の層せん断力が逆方向に働いていることが分かる。これは、従来の設計では考慮されておらず、部材単位の応力として危険側になる恐れがある。

また、Figure3-1とFigure3-3から、2次モードが応答に非常に大きく影響を与えていることが分かる。これには3つの理由が考えられる。まず、Figure3-3より2次モードの刺激関数が大きいことが要因であると言える。また、Figure3-4より2次モードが卓越周期に当たっていることも大きな要因となっている。

さらに、Table3-1に示すhcsとは履歴減衰を粘性減衰定数に換算した値である(参考文献3参照)が、免震による履歴減衰はほぼ全て1次モードの履歴減衰であり、2次モードの履歴減衰が小さいことも大きな要因であると考えられる。

よって、中間層免震建物における逆位相問題の原因は2次モードであり、2次モードの刺激関数が大きく、履歴減衰がほとんど効かない為、パルス地震動の卓越周期と重なると非常に極端な逆位相が生じる。

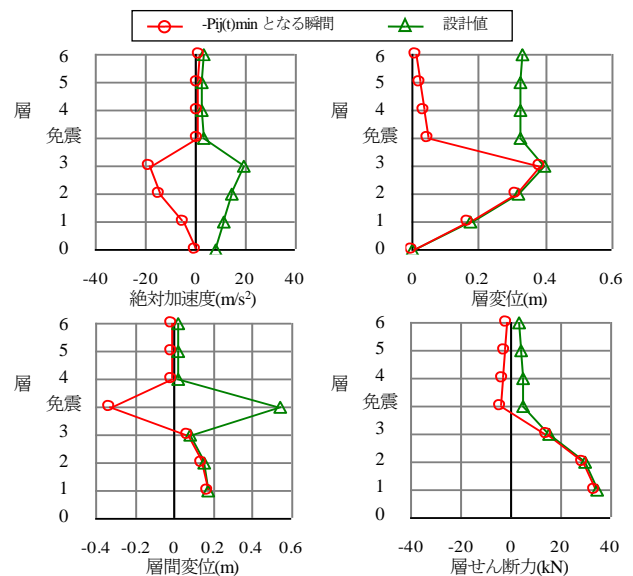


Figure3-1 Response of time of  $-P_{ij}(t)_{min}$

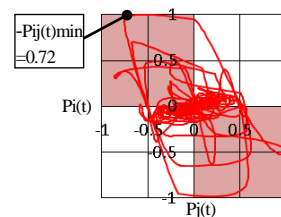


Figure3-2  $P_j(t)-P_i(t)$  line

Table3-1 Result of complex eigenvalue analysis

mode	T(s)	h	hcs
1次	4.15	0.00	0.24
2次	0.94	0.02	0.04
3次	0.57	0.03	0.01
4次	0.36	0.06	0.00
5次	0.31	0.07	0.00
6次	0.25	0.09	0.00
7次	0.24	0.09	0.00

1: 日大理工・教員・建築 2: 株式会社大成建設 3: 日大理工・院(前)・建築 4: 日大理工・学部・建築

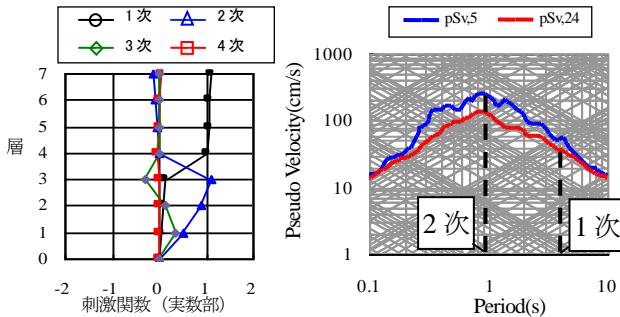


Figure3-3 Participation vector

Figure3-4 Response spectrum of JMA KOBE 1995 NS (h=5%,24%)

### 3.3 逆位相問題における応力の増加

前節のモデルを魚骨モデル (Figure3-5) に再構築し、下記の3つの水平荷重 (Table3-2) を与えることによって、逆位相問題における応力増加の危険性を確かめる。なお、免震層変位の P- $\Delta$ 効果による曲げは節点の水平変位を拘束したモデルで考慮する。

- ①最大層せん断力より求める全て同一方向の水平荷重 (従来の設計荷重)
- ②-Pij(t)min の時刻における層せん断力より求める位相の方向を考慮した水平荷重 (逆位相状態の荷重)
- ③最大層せん断力より求める位相の方向を考慮した水平荷重 (本研究にて提案する荷重)

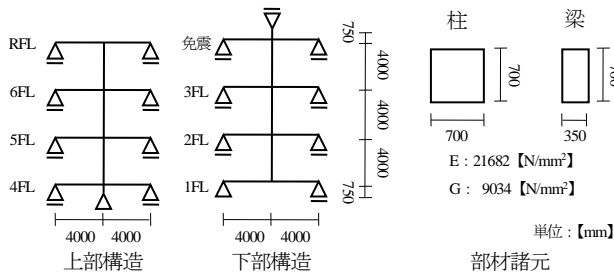


Figure3-5 Fishbone-shaped model

結果を Table3-3 に示す。まず、a)に着目すると、3階の柱部材において上下端ともに 1 を超えていることが分かる。つまり、-Pij(t)min の時刻において設計以上の応力が生じている。これは、従来の設計応力では、水平荷重による応力と P- $\Delta$ による応力が引き算になるのに対して、-Pij(t)min の時刻では下部構造に生じる水平荷重の方向と免震変位方向が異なる為水平荷重による応力と P- $\Delta$ による応力が足されることが原因である。

また、b)に着目すると、3階の柱部材において、位相の方向を考慮した設計荷重を用いることで、-Pij(t)min の時刻の応力を満たしていることが分かる。しかし、3階の梁部材においては満たしていない。

したがって、逆位相問題を考慮した設計を行う為には、従来の設計荷重に加え、位相の方向を考慮した設計荷重で応力を検討する必要があると言える。

Table3-2 story-shearing force and horizontal load

FL	層せん断力Q(kN)			水平荷重P(kN)		
	①	②	③	①	②	③
6	3.19	-1.52	-3.19	3.19	-1.52	-3.19
5	4.24	-2.35	-4.24	1.05	-0.83	-1.05
4	4.57	-3.26	-4.57	0.33	-0.92	-0.33
免震	5.14	-3.88	-5.14	0.57	-0.61	-0.57
3	15.39	14.78	15.39	10.25	18.66	20.52
2	29.34	28.86	29.34	13.96	14.08	13.96
1	34.11	33.71	34.11	4.77	4.85	4.77

Table3-3 Stress ratio

a) ②の応力/①の応力

FL	柱		左梁		右梁	
	下端	上端	左端	右端	左端	右端
6	0.42	0.50	-	0.50	0.50	-
5	0.51	0.60	-	0.55	0.55	-
4	0.75	0.79	-	0.63	0.63	-
免震	-	-	-	0.68	0.68	-
3	1.02	1.24	-	0.72	0.72	-
2	0.97	0.97	-	0.98	0.98	-
1	0.99	0.99	-	0.98	0.98	-
B	-	-	-	0.99	0.99	-

b) ②の応力/③の応力

FL	柱		左梁		右梁	
	下端	上端	左端	右端	左端	右端
6	0.42	0.50	-	0.50	0.50	-
5	0.51	0.60	-	0.55	0.55	-
4	0.75	0.79	-	0.63	0.63	-
免震	-	-	-	0.68	0.68	-
3	0.92	0.93	-	1.03	1.03	-
2	0.98	0.99	-	0.98	0.98	-
1	0.99	0.99	-	0.99	0.99	-
B	-	-	-	0.99	0.99	-

### 3.4 結論・まとめ

その 1 では、逆位相問題が現行の設計法で考慮されていないことを示し、また逆位相問題を簡易的に評価する手法を提案した。その 2 では、中間層免震建物において逆位相問題が発生すること、またその傾向を示した。その 3 ではまず逆位相問題の原因を探るため、その挙動を把握した。さらに応力的に危険となることを証明し、逆位相問題を考慮した設計法を提案した。

### 3.5 今後の検討

逆位相問題は、基礎免震建物における基礎と杭との関係においても起こりうる可能性がある。また、阪神淡路大震災で多くの中高層建物に生じた中間層の柱の降伏においても、逆位相問題が発生し、下部構造の柱の応力が危険側となる可能性がある。今後はそれらの検討について進めていきたい。

### 3.6 参考文献

- 1) 日本免震構造協会：免震構造-部材の基本から設計・施工まで- オーム社
- 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
- 3) 石丸辰治：対震設計の方法 ダイナミックデザインの誘い 建築技術