

長周期地震動を考慮した免震建築物 —セミ免震の提案—

永 野 康 行*・田 村 和 之**

Considerations on Seismic Isolation Building under Long Period Strong Ground Motions — A Proposal of 'Semi-Isolated Building System' —

Yasuyuki Nagano and Kazuyuki Tamura

The purpose of this paper is to propose that way of having it as "Semi-Isolated Building System". Initial stiffness of isolated layer is compared with usual isolated structure, and semi-isolated to propose by this paper is set up in stiffer. There is a strong point which can cope with a head periodic area shock, too, after safety can be secured from the aseismatic structure though the maximum acceleration of the superstructure and displacement grow big. Semi-isolated can decrease clearance width though effect on isolated structure is worse than usual isolated structure. The seismic load of semi-isolated was much smaller than aseismatic structure, and it proposed "Semi-Isolated Building System" in a positive light that the number of reinforcing bars of the superstructure could be reduced.

1. 序

本論文の目的は、長周期地震動を受ける免震構造物の地震的挙動について考察し、そのあり方を「セミ免震」として提案することである。

従来の免震構造は免震層の初期剛性を低く設定して効きのよい免震層を目指してきた。しかし、長周期地震動を受けると建物周期の長い免震構造に同調してしまい、積層ゴムの変形限界を超え、クリアランスを越え擁壁に建物が衝突してしまう問題が起きる可能性が出てきた^{[1],[2]}。そこで本論文で提案する「セミ免震」は免震層の初期剛性を従来の免震構造よりやや高く設定し、長周期地震動の固有周期と建物の固有周期を外すことにより揺れ幅を抑える。免震効果としては、従来の免震構造と比べると効果が悪く、上部構造のせん断力も増える構造になるが、耐震構造より上部構造のせん断力は小さくなる。また、耐震構造よりかは上部構造の鉄筋が減らすことができる。従来の免震構造のクリアランスの幅より少なくできることが考えられる。

セミ免震は免震構造と耐震構造の中間に位置する免震構造の一提案する。免震構造とセミ免震と耐震構造の特徴のイメージを Fig. 1 に示す。各構造の特徴を Table 1 に示す。

この問題となる長周期地震動とは、2-10 秒周期の船酔いのような、ゆったりとした揺れである。長周期地震動については、1923 年の関東大震災でも周期 5 秒を越える揺れが大きかったことが確認されているが、当時は固有周期の長い構造物が少なく、被害が限定的であったことなどから注目されてなかった。

* 建設工学科 建築学専攻 ** 株式会社 真柄建設

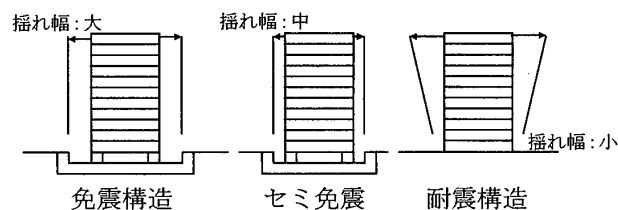


Fig. 1 Image figure

Table 1 The characteristics of each structure

		免震	セミ免震	耐震
免震層	免震層の変位	大	中	—
	クリアランス	大	中	不要
上部構造	上部構造のせん断力	小	中	大
	上部構造の鉄筋量	小	中	大

2. 免震層の変位に着目した地震応答解析

2.1 構造物モデル

構造物モデルは、免震建物の1例として、11層モデルを使用する。免震層は天然系積層ゴムと鉛プラグ入り積層ゴムで構成され、免震層全体の初期剛性は185kN/cmである。建物固有周期は免震層変形40cmの時3.15秒である。ここでは、免震層の初期剛性の値が違うパターンを9種類用いる。Table 2にモデルの種類を示す。

Table 2 Model

モデル名	免震層の初期剛性 (kN/cm)
A	25
B	50
C	75
D	100
E	150
F	185 (基準)
G	200
H	250
I	300

2.2 入力地震動

長周期地震動として、2003年9月、北海道の苫小牧で観測された十勝沖地震を採用する。その速度応答スペクトル（減衰定数1%）^[3]をFig. 2に示す。

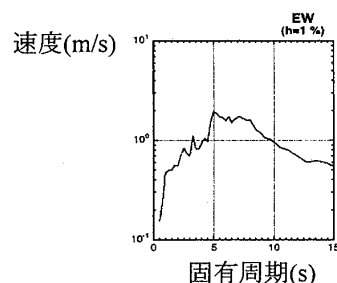


Fig. 2 Velocity response spectrum

Fig. 2 より, 5~8 秒にかけて長周期成分が卓越していることがわかる.

2.3 免震層の初期剛性を変えたときの変位と固有周期

免震層の初期剛性を基準のモデル F で行った結果, 加速度応答, 変位応答をそれぞれ Fig. 3, Fig. 4 に示す.

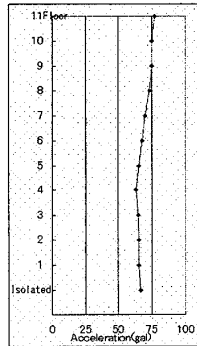


Fig. 3 Acceleration response

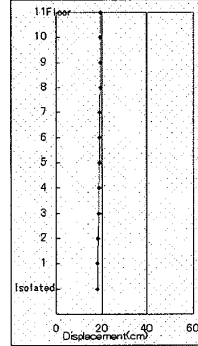


Fig. 4 Displacement response

基準より初期剛性値が低いモデル A, B, C, D, E で行った結果, 加速度応答, 変位応答をそれぞれ Fig. 5, Fig. 6 に示す.

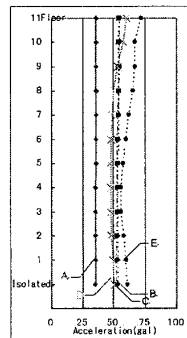


Fig. 5 Acceleration response

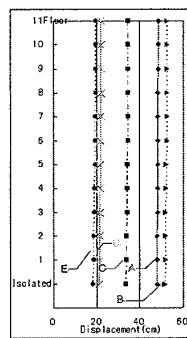


Fig. 6 Displacement response

基準より初期剛性値が高いモデル G, H, I で行った結果, 加速度応答, 変位応答をそれぞれ Fig. 7, Fig. 8 に示す.

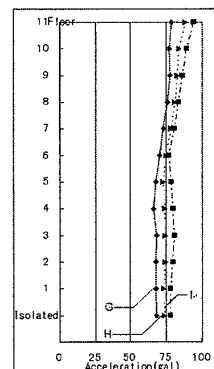


Fig. 7 Acceleration response

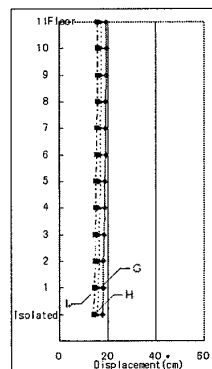


Fig. 8 Displacement response

以上の結果を Table3 にまとめて示す.

Table 3 Period of building, and maximum displacement of isolated layer

モデル名	建物の固有周期	免震層の最大変位
I	1.24	13.93
H	1.33	15.63
G	1.45	17.85
F	1.50	18.05
E	1.63	18.27
D	1.95	21.15
C	2.22	33.37
B	2.68	51.47
A	3.74	47.72

2.4 苫小牧の地震動をレベル2 相当と仮定した時の挙動

2003 年 9 月, 十勝沖地震時, 苫小牧で記録された速度波形^[3]を Fig. 9 に示す.

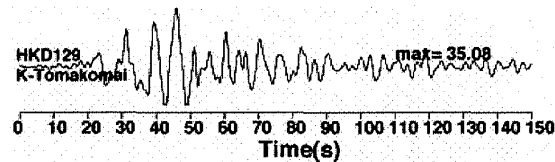


Fig. 9 Velocity wave of Tokachi-oki earthquake 2003

(1)式を用いて, 苫小牧のレベル2 の最大加速度を求める. その結果を(2)式で示す.

苫小牧のレベル2(最大50cm/s)の最大加速度 =

$$\frac{\text{レベル2の最大速度}}{\text{苫小牧の最大速度}} \times \text{苫小牧の最大加速度} = \quad (1)$$

$$\frac{50\text{cm/s}}{35.08\text{cm/s}} \times 69.929\text{Gal} = 99.67\text{Gal} \quad (2)$$

苫小牧のレベル2 相当の最大加速度の入力地震動を用いて, 基準のモデル F で地震応答解析を行った結果, 加速度応答, 変位応答をそれぞれ Fig. 10, Fig. 11 に示す.

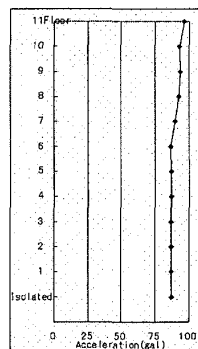


Fig. 10 Acceleration response

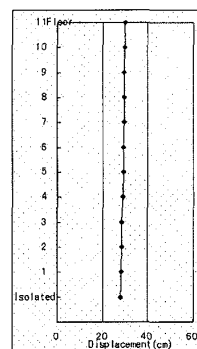


Fig.11 Displacement response

建物固有周期は 1.5 秒であった。加速度応答、変位応答の結果より、免震層の最大変位が 27.98cm となり、限界変形 40cm 以下となった。

2.5 免震材料の限界変形を超える最大加速度

レベル 2 相当の苫小牧の地震動で、免震装置の性能保障変形 40cm を超える最大加速度を調査してみる。モデルは免震層の初期剛性が 185kN/cm を用いる。入力地震動の最大加速度を 110cm/s^2 、 115cm/s^2 、 120cm/s^2 と変化させた場合、それぞれの結果を Table 4 に示す。入力地震動の最大加速度が 120cm/s^2 の時に、限界変形 40cm を超えた。

Table 4 Displacement response

入力地震動の最大加速度 (cm/s^2)	免震層の最大変位 δ (cm)
110	35.59
115	38.96
120	42.48

3. 上部構造のせん断力応答

3.1 序

上部構造のせん断力応答に着目し、免震層の初期剛性を上げたときに、上部構造のせん断力応答がどのように変化するのかを調べるために、地震応答解析を実施する。また、免震構造、セミ免震、耐震構造のせん断力応答を比較する。

3.2 構造物モデル

免震層の初期剛性をやや高く設定した時のモデル三種類を Table 5 に示す。

Table 5 Model

モデル名	免震層の初期剛性 (kN/cm)
J	370(モデル F の 2 倍)
K	740(モデル F の 4 倍)
L	1,480(モデル F の 8 倍)

3.3 せん断力応答の変化

モデル F, J, K, L に最大加速度 69.929cm/s^2 の時の苫小牧の地震動で解析した結果、最大せん断力応答を Fig. 12, Table 6 に示す。

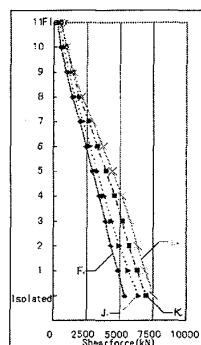


Fig. 12 Shear force response

Table 6 Maximum shear force

モデル名	免震層の初期剛性(kN/cm)	最大せん断力(t)
F	185	543.16
J	370	651.11
K	740	708.51
L	1480	771.88

3.4 免震構造とセミ免震と耐震構造

免震構造とセミ免震と耐震構造における上部せん断力応答を比べてみる。耐震構造のモデルは、2.3 節のモデルの免震層を取り除き耐震にしたものとする。免震の対象としてモデルFを用いる。セミ免震の対象としてモデルLを想定する。このときの、せん断力係数を Fig. 13, Table 7 に示す。なお、耐震構造のせん断力係数は A_i 分布により算定した。

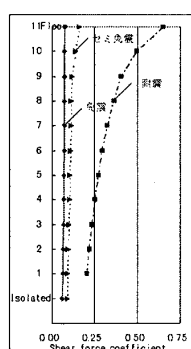


Fig. 13 Shear force coefficient

Table 7 Shear force coefficient

階	免震	セミ免震	耐震
11	0.077	0.16	0.648
10	0.075	0.139	0.492
9	0.074	0.117	0.402
8	0.073	0.112	0.362
7	0.072	0.11	0.32
6	0.071	0.107	0.292
5	0.069	0.104	0.27
4	0.068	0.102	0.248
3	0.067	0.098	0.23
2	0.065	0.095	0.216
1	0.064	0.092	0.2
免震層	0.062	0.089	—

3.5 余裕度の検討

モデル J, K, L のように免震層の初期剛性をやや高くした場合、レベル 2 相当の 1.5 倍に当たる余裕度に対応できるか調査してみる。モデル J, K, L にレベル 2 相当の 1.5 倍の余裕度を想定した最大加速度 150cm/s^2 で行った結果、加速度応答、変位応答をそれぞれ Fig. 14, Fig. 15 に示す。また初期剛性の変化による建物固有周期と免震層の最大変位を Table 8 に示す。

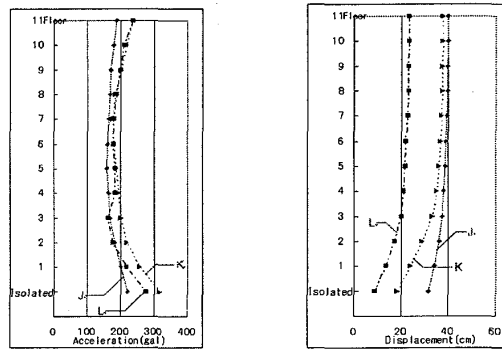


Fig. 14 Acceleration response Fig.15 Displacement response

Table 8 Period of building, and maximum displacement of isolated layer

モデル	免震層の初期剛性 K (kN/cm)	建物の固有周期 T (s)	免震層の最大変位 δ (cm)
J	370	1.16	31.19
K	740	0.95	18.04
L	1480	0.83	8.17

変位応答の結果より、モデル J, K, L 共に余裕度において、限界変形 40cm を超えていない。加速度応答のばらつきより、免震層の初期剛性設定に際しては、設計用入力地震動を考慮した上で、慎重に検討する必要がある。

3.6 標準 3 波に対するセミ免震の地震時挙動

セミ免震の対象としてモデル L を想定し、入力地震動としてレベル 2 (最大速度: 50cm/s) の El Centro 1940 NS, Taft 1952 EW, Hachinohe 1968 NS を採用し、地震応答解析を行う。その解析結果、加速度応答と変位応答を Fig. 16, Fig. 17 にそれぞれ示す。また、各入力地震動に対する最大加速度と免震層の最大変位を Table 9 に示す。Table 9 に示す解析結果の最大変位より、どの地震動においても、免震層の限界変形の 40cm を超えなかった。

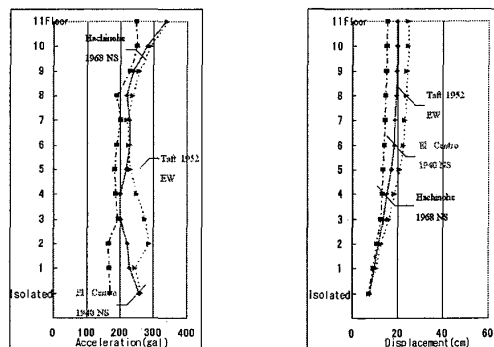


Fig. 16 Acceleration response Fig.17 Displacement response

Table 9 Maximum acceleration and displacement of isolated floor

入力地震動	最大加速度 (cm/s ²)	免震層の最大変位 δ (cm)
El Centro 1940 NS	334.64	7.46
Taft 1952 EW	339.00	7.14
Hachinohe 1968 NS	248.00	6.81

4. セミ免震の設計

免震層の初期剛性を増加させることにより、変位量は少なくなり、固有周期も短くなった。しかし、上部構造におけるせん断力応答が大きくなり、加速度応答も大きくなった。

セミ免震を設計する際、免震層の設計は長周期地震動を考慮して、免震層の初期剛性をやや高く設定し、クリアランスを設定する。上部構造は、設計用入力地震動に対するせん断力応答に応じて部材設計すればよい。

5. 結論

長周期地震動の同調によって揺れが増幅され、想定外の大きな変位が生じ、積層ゴムの損傷や建物がクリアランスを越えて擁壁に激突などの問題が起こる可能性がある。免震層の初期剛性を増加させることにより、免震層の変位量は少なくなり、建物固有周期も短くなるが、上部構造のせん断力応答は大きくなる。

本論文で提案するセミ免震は、免震層の初期剛性を通常の免震構造に比べて「硬め」に設定する。上部構造の最大加速度や変位が大きくなるが、耐震構造より安全を確保できる上、長周期地震動にも対応できる長所がある。セミ免震は、通常の免震構造より免震効果は悪いものの、クリアランス幅が減少出来る。さらにセミ免震は、耐震構造より地震力が小さく、上部構造の鉄筋の数を減らすことができるなど、前向きに「セミ免震」を提案した。

本論文で提案する「セミ免震」という新しい免震構造の位置づけにより、いっそう地震災害に対し安全・安心な生活空間が実現されることを願う。

謝辞

時刻歴応答解析に使用したデータは、港湾地域強震観測 (<http://www.eq.ysk.nilim.go.jp/>) による。本研究は一部、平成 18 年度 福井工業大学 学内特別研究費（個人研究）研究費 A により実施した。

参考文献

- [1] 竹脇出, 有賀敏典, 寒野善博: 長周期地震動に対する高層免震建物の振動特性, <http://www.archi.kyoto-u.ac.jp/~bge/pdf/a25.pdf>, 2005.
- [2] 杉江隆明: 長周期地震動時における免震建物の挙動に関する研究, 新潟大学工学部建設学科建築学コース卒業研究梗概 平成 16 年度, 2005.
- [3] 畑山健, 座間信作: 2003 年十勝沖地震の際の長周期地震動, http://www.fri.go.jp/bosai/tokachi_lpqm.html, 2003.

(平成19年 3 月23日受理)