

真柄建設技術研究所

NTTファシリティーズ 齊藤 賢二



同 齋藤 堅二郎



真柄建設 田中 伸幸



1. はじめに

阪神・淡路大震災を契機に、免震建物の計画が急増している。特に最近では戸建住宅など比較的小規模な建物への免震構法の採用も見られるようになってきている。FPS (Friction Pendulum System) も、主に軽量建物用に開発された免震部材である。

本建物は、真柄建設株式会社が自社研究施設として「いしかわサイエンスパーク」内に建設する免震建物であり、建築物としては国内で初めてFPSを免震部材として採用しており、平成9年9月に建設大臣認定を取得し、同11月に着工している。



図1-1 完成パース

2. 建築概要

本建物は石川県能美郡辰口町「いしかわサイエンスパーク」内に位置する。本建物は2階建てで主要用途は研究施設である。建物の平面形状は長辺方向を4スパン、短辺方向を1~2スパンとした整形な長方形とし、長辺28.0m、短辺12.8mとしている。

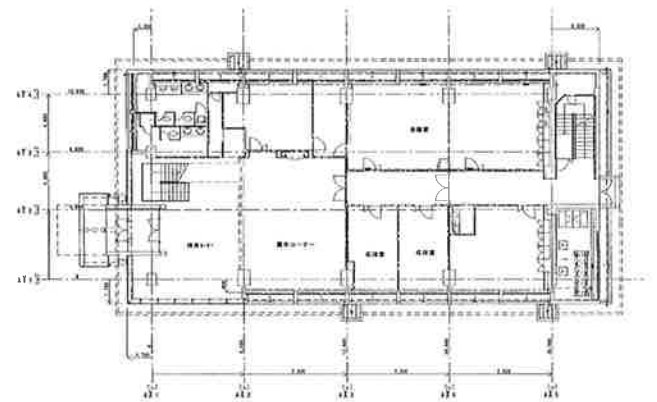


図1-2 基準階平面図

建築名称	真柄建設技術研究所
建築場所	石川県能美郡辰口町字旭台二丁目14番
地区地域	指定無し
建ぺい率	4.00% (法定40%)
容積率	7.40% (法定120%)
用途	研究所
建築主	真柄建設株式会社
設計・監理	株式会社 エヌ・ティ・ティ・ファシリティーズ 真柄建設株式会社一級建築士事務所
施工者	真柄建設株式会社
面積	建築面積 490.93㎡ 延べ面積 903.01㎡
階数	地上2階、地下なし、塔屋なし
高さ	軒高 8.60m 最高高さ 10.80m
構造	基礎 既製鋼管コンクリート杭基礎 上部 鉄筋コンクリート造 (はりの一部PRC造)

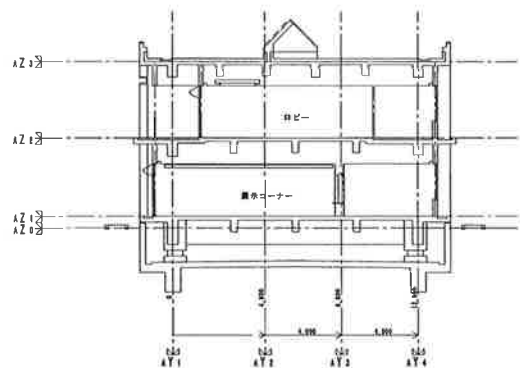


図1-3 断面図

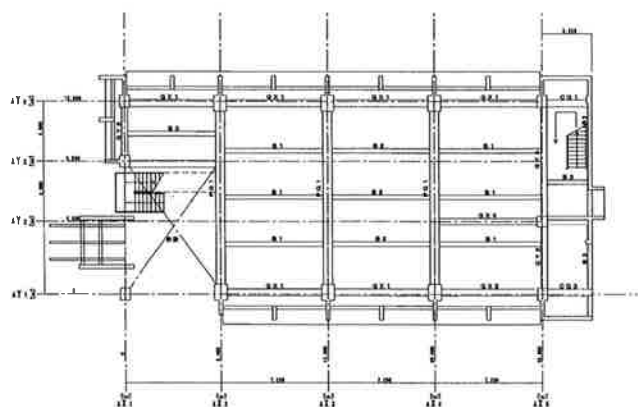


図2-1 基準階伏図

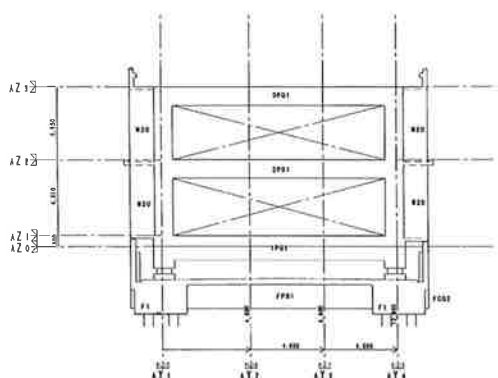


図2-2 軸組図

3. 構造設計概要

3.1 上部構造の設計

上部構造は地上2階建の鉄筋コンクリート造(Y方向のロングスパンの大梁はPRC)であり、免震部材を設置する階層は1階床下とし、建物全体を免震化している。

上部構造はXY両方向ともラーメン構造とし、予備応答解析の結果により設計用せん断力係数を最下階で0.20、最上階で0.30の直線分布とした。

表3-1 構造設計目標

	レベル1	レベル2
上部構造	許容応力度以下	許容応力度以下
免震装置	許容変形量以下	許容変形量以下
基礎構造	許容応力度以下	許容応力度以下

許容変形量=35cm

3.2 基礎の設計

基礎はGL-10m以深の凝灰岩層を支持層とする杭基礎(既製鋼管コンクリート杭基礎)とし、設計用震度は $K=0.3$ とした。

4. 球面滑り支承

4.1 FPSの概要、特徴

FPSは球面滑り支承とも呼ばれ、振り子運動の原理を応用した免震部材である。図4-1にFPSの概略的

な構造を示す。FPSは板状の2つの部材(球面板)と、可動子により構成される。球面板の摺動面には特殊コートが施されており、低摩擦材および防錆処理材として用いられている。中程度以上の地震を受けた場合、可動子と球面板との間に滑りがおこり、摺動を開始する。このことにより、基礎地盤と建物との間に相対的な変形が許容される。可動体が凹球面上を滑らかに動くことにより、基礎と建物の相対的な振り子運動が実現される。

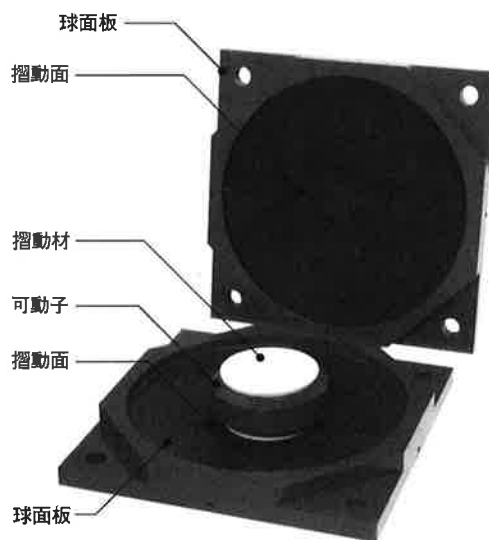


図4-1 FPS概略

FPSは、球面板の曲率半径寸法と摩擦係数を適宜に選定することにより、周期と摩擦減衰力を任意に設定することが可能となる。装置に設定される周期は球面部分の曲率半径により決定され、搭載する重量には依存しない。このため単体ごとの支持荷重が大幅に変化するような事例においても、個々の部材の基本的構造を変更することなく適用が可能となる。

4.2 FPSの作動原理

1) 作動のメカニズム

FPSに支持された構造物が地震動により水平方向に運動した時、上下球面板は水平に相対変位を強制される。可動子は上下球面板上を互いに円弧運動を起し滑動することとなる。このとき可動子は球斜面を上がる状態となり水平運動に対し、荷重 W による水平方向成分が復元力として現れるとともに球面板と可動子の滑り摩擦抵抗が生じる。この復元力と摩擦抵抗力を免震部材の要素として利用している。

2) 振り子理論

図4-2に単振り子の模式図を示す。重力 $W=mg$ 、張力(球面の反力) Q 、糸の長さ(曲率半径) l とすると、

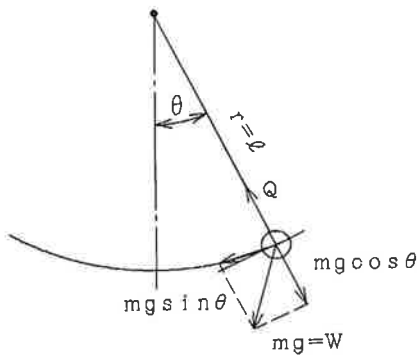


図4-2 単振り子模式図

運動方程式は、 $r = l$ (一定) で θ の変数として表され、

$$r \text{ 成分: } m \cdot a \cdot r = m \cdot l \cdot \ddot{\theta}^2 = -mg \cdot \cos \theta + Q \dots (1)$$

$$\theta \text{ 成分: } m \cdot a \cdot \theta = m \cdot l \cdot \ddot{\theta} = -mg \cdot \sin \theta \dots (2)$$

角振幅が小さい時 ($\theta \ll 1$) は (2) 式より、

$$\ddot{\theta} + \frac{g}{l} \theta = 0 \dots (3)$$

と近似することができる。

従って初期条件 $\theta_{t=0} = 0, \theta_{t=1} = \theta_0$ (振幅角) としてこれを解けば、変位角は

$$\theta = \theta_0 \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{g}{l}} \cdot t\right) \dots (4)$$

となる。したがって周期は $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \dots (5)$

で与えられる。(5) 式をバネ-質点系の固有周期と対比して分かる様に単振り子の質点 m に作用する力 K は、

$$K = \frac{mg}{l} = \frac{W}{l} \dots (6)$$

で与えられ、履歴特性上の剛性として与えられる。

本FPSは上下の二滑動球面を有する。下球面板のみ支持された構造物の模式図を図4-3(a)に、上球面板のみで支持された構造物の模式図を(b)に示す。

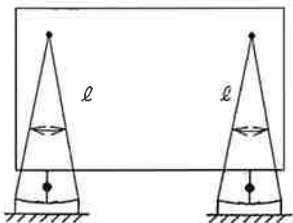


図4-3 (a) 下球面板

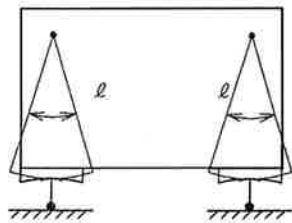


図4-3 (b) 上球面板

(a)、(b) いずれの取付様態をとってもFPSに支持された構造物の運動はあたかも構造物を長さ l のケーブルで吊上げた時の振り子運動を起こすこととなる。す

なわち、上下二球面で支持された構造物は一種の多段振り子状態となりその周期は2倍の l を有する振り子周期として与えられることになる。

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{2 \cdot l}{g}} \dots (7)$$

また水平剛性 K は、

$$K = \frac{W}{2 \cdot l} \dots (8)$$

で与えられる。従って水平力 H は、

$$H = \frac{W}{2 \cdot l} \cdot \chi \pm \mu W \dots (9)$$

(χ は水平変位)

となる。

4.3 FPSの種類

現在FPSには2種類の機構が考えられている(図4-4、図4-5)。

片球面タイプは、摺動球面を一方のみに設定した形である。このため、球面板側の平面寸法を比較的大きく取る必要がある反面、保持板側は小さなスペースでも十分に取付け可能となる。この機構では長期供用における球面板の防塵保護の観点より図4-4に示すように球面板を上側に取付ける方法が有利となる。

両球面タイプは、他の免震方式(特に弾性支持型免震部材)と比較して、コンパクトに部材設計ができるFPSの長所をより明確にしたものである。摺動球面を上下に均等にとることにより、片球面タイプと同じ絶対変位量にて2倍の相対変位を吸収することができるため、部材全体寸法がさらに小型化(半分の絶対変位量)されている。

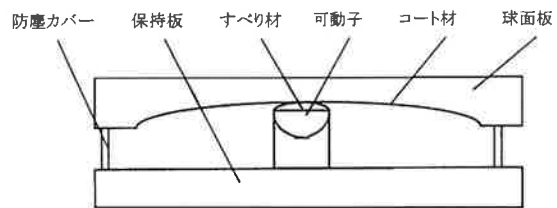


図4-4 片球面タイプ

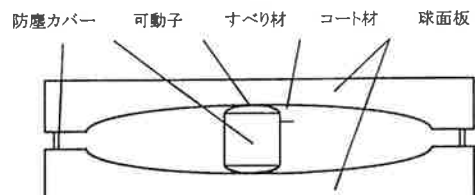


図4-5 両球面タイプ

4.4 FPSの性能確認

本物件に採用したFPSと同形状(φ350の滑り板)の部材を用いて試験した結果を図4-6に示す。

一般に樹脂系滑り材料は面圧が上がるほど、速度が下がるほど摩擦係数は低くなる特性を持っている。

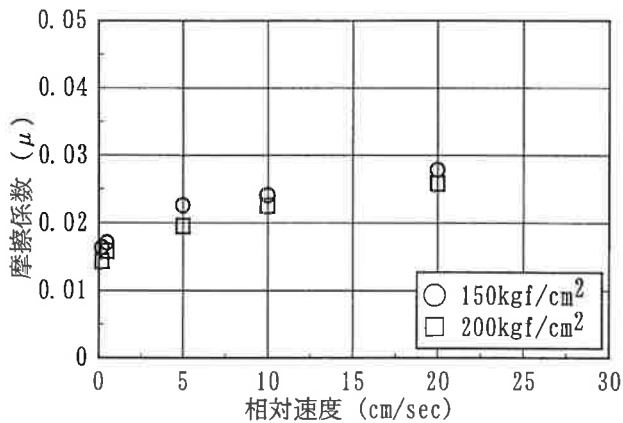


図4-6 FPSの速度特性

本部材は可動子が一定曲率半径をもつ球面板内を滑動するため、図4-7に示すように、いかなる滑動位置においても一定の復元バネを再現する。

図4-8に試験状況を示す。

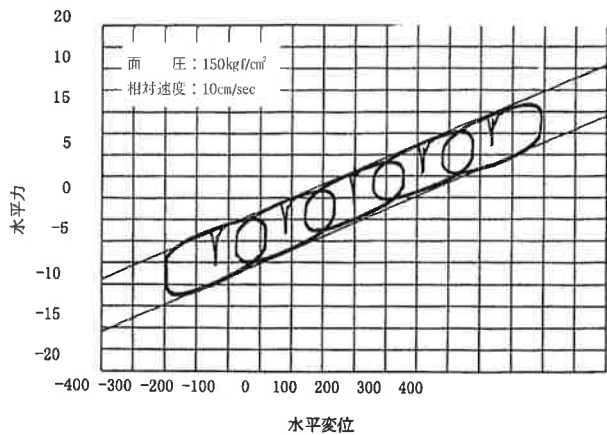


図4-7 復元バネ(第二剛性)の確認

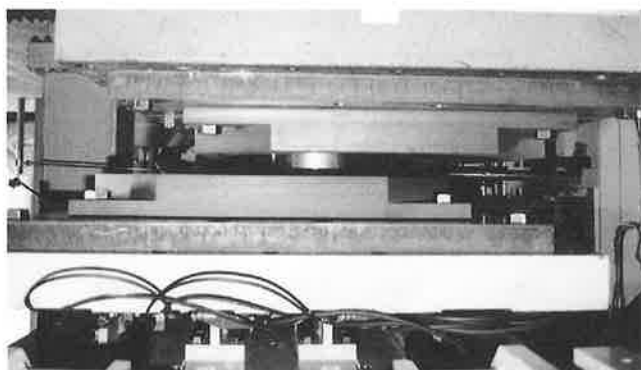


図4-8 試験状況

5 免震層の設計

5.1 滑り発生せん断力の設定

滑り材摺動試験及び予備振動解析の結果により、安

定した摩擦減衰効果を期待でき風荷重時に降伏しない範囲で、滑りせん断力(降伏せん断力)を設定した。

5.2 免震部材の配置

免震部材の配置は、以下の事項を十分に考慮し最適な配置とした。

- i) 全部材の面圧を均等にする。
- ii) 球面滑り部材の各変形時(微小変形~許容変形)において、免震層の偏心率が最小になるようにする。

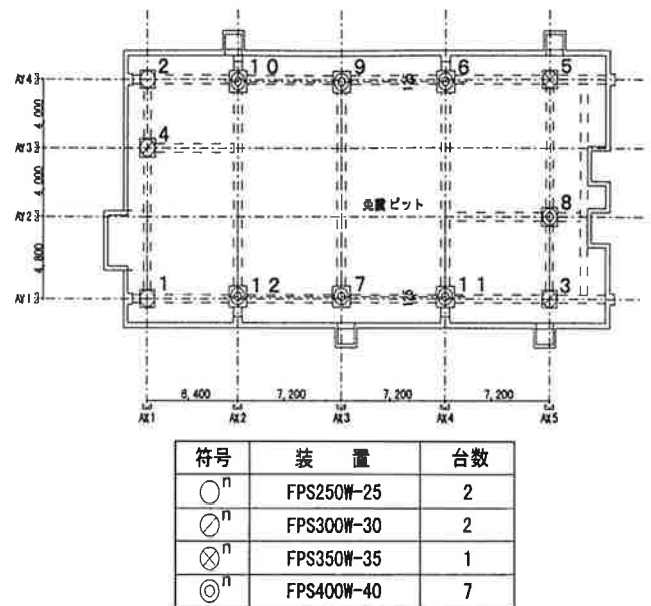


図5-1 免震部材配置図

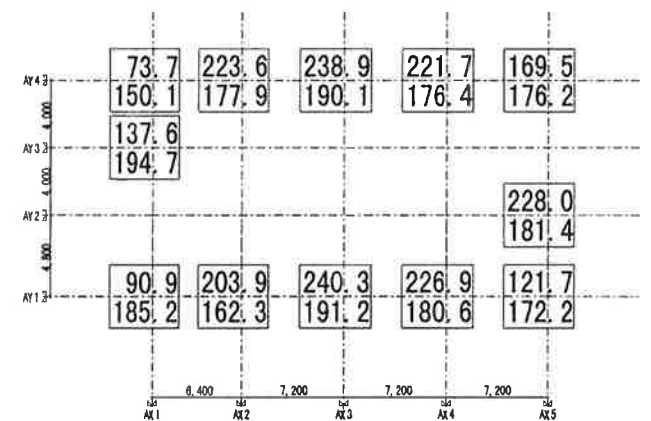


図5-2 免震部材の支持荷重及び面圧 上:支持重量(t) 下:面圧(kg/cm²)

表5-1 免震層の偏心率

加力方向	段階	重心	剛心	偏心距離	弾性半径	偏心率
X	1cm変形時	1,521.6	1,506.2	-15.5	1,128.2	0.0004
	25cm変形時	1,521.6	1,521.4	-5.2	1,117.6	0.0011
Y	1cm変形時	614.2	614.2	-1.2	1,128.2	0.0047
	25cm変形時	614.2	614.2	-0.3	1,117.6	0.0137

5.3 固有周期の設定

免震層の復元力特性は摩擦係数に速度依存性を考慮したバイリニア型とする。第2勾配は接線剛性で周期4.49秒とし長周期化を図り、第1剛性は第2剛性の1,000倍とした。

6 地震応答解析

6.1 解析モデル

応答解析モデルは、図6-1に示すように上部構造2層に免震層1層を加えた3質点系等価せん断モデルとし、上部構造は弾性、免震層は図6-2に示す摩擦係数に速度依存性を考慮したバイリニア型の復元力特性とした。

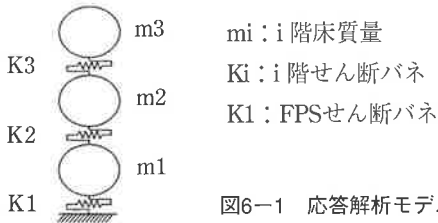


図6-1 応答解析モデル

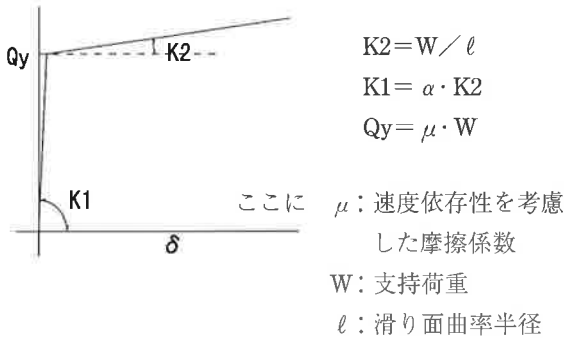


図6-2 免震装置の復元力特性

6.2 固有値解析結果

表6-1に基礎固定時、15cm変形時(レベル1)及び25cm変形時(レベル2)の固有値解析結果を示す。

表6-1 固有値解析結果

免震構造の変位レベル (FPSの剛性)	周期振動数 刺激係数	X方向			Y方向		
		1次	2次	3次	1次	2次	3次
上部構造体の剛性 (K-fix)	T(s)	0.398	0.150	—	0.359	0.134	—
	f(Hz)	2.515	6.659	—	2.786	7.444	—
	β	1.169	0.412	—	1.166	0.386	—
15cm変形時 等価剛性	T(s)	3.411	0.255	0.135	3.408	0.228	0.122
	f(Hz)	0.293	3.921	7.394	0.293	4.387	8.183
	β	1.007	0.008	0.002	1.006	0.006	0.002
25cm変形時 等価剛性	T(s)	3.744	0.255	0.135	3.741	0.228	0.122
	f(Hz)	0.267	3.919	7.394	0.267	4.385	8.182
	β	1.006	0.006	0.002	1.005	0.005	0.001

6.3 設計用入力地震動

表6-2に設計用入力地震動を示す。標準的な3波に加

え当該地域に発生するであろう地震を想定し、敷地の地盤特性を考慮して作成した模擬地震動を設計用入力地震動として採用した。模擬地震動は河野、土肥、松田¹⁾²⁾による波動伝播理論に基いた理論地震評価法により作成した。

表6-2 設計用入力地震動

記録地震動	入力地震動	レベル1 25 (cm/s)	レベル2 75 (cm/s)
	記録地震動	EL CENTRO 1940 NS	255.4 (cm/s ²)
TAFT 1952 EW		248.4 (cm/s ²)	745.1 (cm/s ²)
HACHINOHE 1978 EW		160.1 (cm/s ²)	495.2 (cm/s ²)
模擬地震動	MOGI-X	712.4 (cm/s ²) 46.3 (cm/s)	
	MOGI-XO	604.4 (cm/s ²) 44.0 (cm/s)	

6.4 応答解析結果

1) 水平地震動

図6-3にX方向(長辺方向)の各層の最大応答せん断力係数、最大応答変位及び最大応答加速度を示す。上部構造の最大応答せん断力係数は、レベル1及びレベル2で設計せん断力係数以下であり耐力上十分な安全性を有している。最大応答加速度はレベル2でも137.8 (cm/sec²)と小さく、入力地震加速度の約1/4~1/5となっており、十分な免震効果が現れている。また、免震層の最大応答変位はレベル2で最大18.2cmで許容変形量以下であり、十分な安全性を有している。

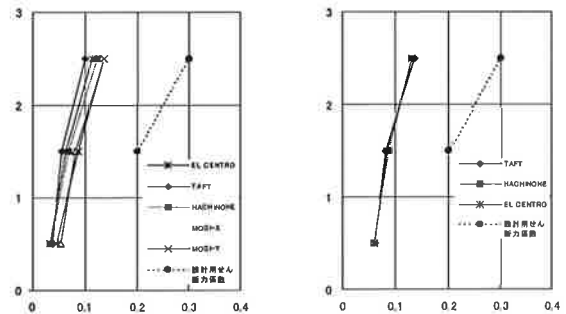


図6-3(a) 最大応答せん断力係数

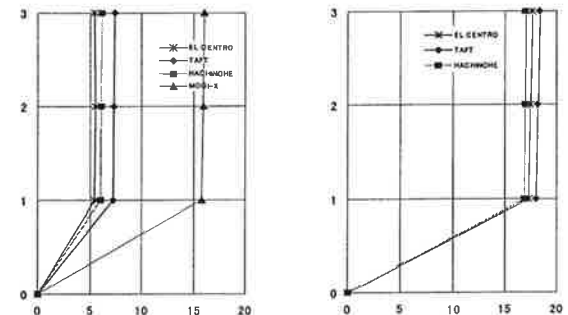


図6-3(b) 最大応答変位 (cm)

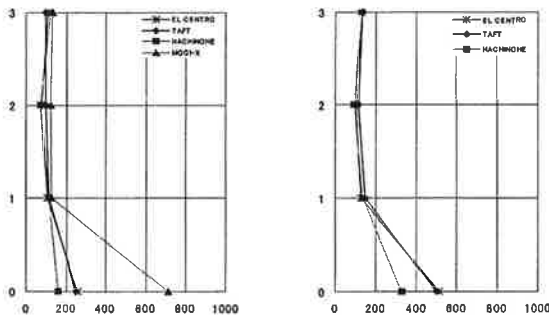
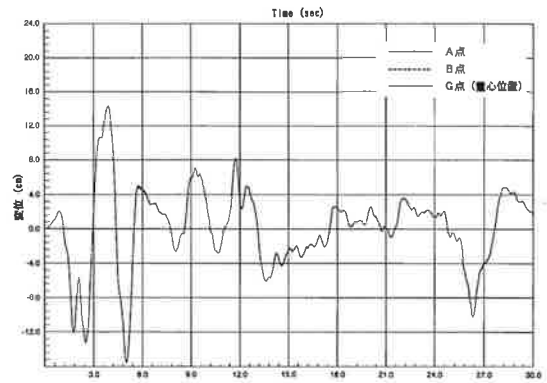


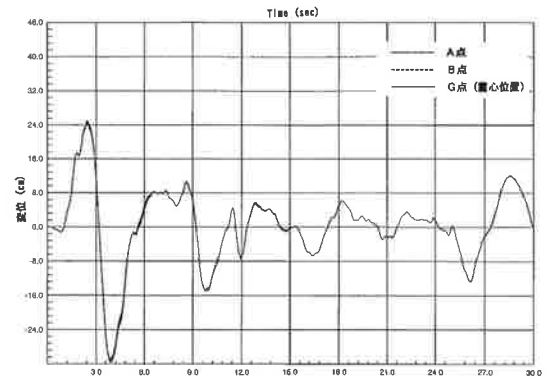
図6-3(c) 最大応答加速度 (cm/s²)

2) 捻れ振動に関する検討

免震層の偏心の影響による免震層の捻れ振動の検討を行った。解析モデルを図6-4に示す。上部構造を3次元立体弾性モデル、免震部材の復元力特性はノーマルバイリニア型とし、降伏せん断力には速度と面圧依存性を考慮している。入力地震動は、レベル2相当の水平動入力としX・Y両方向について解析を行った。1階床レベル変位応答時刻歴を図6-5に示す。1階床レベルの建物対角位置A・B及び建物重心位置Gにおける変位は、若干の捻じれによる影響は見られるものの、変形量は許容変形量を下回っており、捻れの影響は小さい。



捻れ振動時



水平動+上下動加力時

図6-5 1階レベルの変位応答時刻歴

3) 水平動+上下動に関する検討

地震時の転倒モーメントによる軸力変動と地震上下動による面圧変動の影響に関する検討を行った。解析モデルは「2) 捻れ振動に関する検討」と同じとし、レベル2相当の水平動及び上下動の同時入力により解析を行った。1階床レベル変位応答時刻歴を図6-5に示す。最大変位は面圧の軸力変動及び上下動の影響による摩擦係数の低下により、やや大き目の応答値となっているが、許容変形量を下回っており、水平動+上下動の応答による影響は小さく、設計用振動解析モデルで基本応答性状は、十分評価できると考えられる。

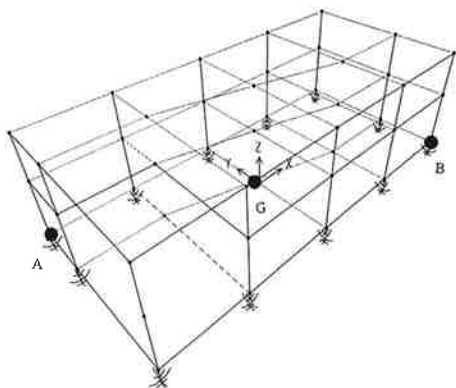


図-6-4 解析モデル

7 おわりに

本稿では、球面滑り支承による免震構法の適用例を紹介した。振り子の原理を利用した本構法は、建物重量に左右されず、本建物のように小規模な建物に対しても長周期化が可能である。部材構造がシンプルでコストも低廉であり、今後戸建住宅等軽量な建物の免震構法に大いに利用価値があると考えられる。

参考文献：

- 1) 土肥・河野・松田/「兵庫県南部地震における多点観測記録の同時シミュレーション」建築学会 梗概集1996
- 2) 土肥・河野・松田/「地震動モデルによる千葉県東方沖地震の予測的検証」建築学会 梗概集