

# 福岡市における免震構造物の性状

## 1. 福岡市における免震建物の概要

2005年3月20日10時53分頃、福岡県西方沖の玄界灘においてマグニチュード7.0の地震が発生した。この地震により福岡市や佐賀県の一部で震度6弱を観測した。震源に近い玄海島では多くの家屋に被害が発生し、福岡市街地でも建物に亀裂が入ったり、ガラスが割れたりするなどの被害が発生した。福岡市内にあるK-Net観測点(FKO006)における最大加速度は277gal(NS成分)となっている。福岡県における歴史地震について古文書に基づいた調査によれば、1898年に糸島半島で発生した地震が記録されており、震源近傍で震度5強～6弱と推定されている。今回の地震は1904年に近代的な地震観測が始まって以来最大のものであり、歴史地震から数えて107年ぶりの地震となった。

福岡市内には免震建物が13棟建設されている。北九州にも少なくとも2棟(いずれも病院施設)、太宰府市には1棟(博物館)の免震建物がある。免震建物の地震時の挙動を調査するために、3/21～3/24にかけて福岡市内の免震建物を調査したので、その概要について報告する。

福岡市内にある免震建物の概要を日本建築センター発行のビルディングレターを参考に表1.1に示す。福岡市内には阪神淡路大震災以降、免震建物の建設が進められてきていることがわかる。建物の用途は事務所、共同住宅、病院、ホテルと幅広く、建物の規模や使用されている免震部材の種類も多様である。

設計用地震動としては、ELCENTRO等に代表される観測波と模擬地震動を用いた解析が行われている。応答解析用地震波の入力レベルとしては最大速度で40cm/sから50cm/sを用いる場合が多いが、F建物の場合にはレベル1入力として最大速度30cm/s～50cm/s、レベル2入力として最大速度50cm/s～76cm/sの入力地震波を用いた検証が行われている。レベル2時の最大応答変位としては、18cm程度から34cm程度と多少幅がある。これは免震部材の設計との関係と思われる。

図1.1には福岡市街に建つ免震建物と警固断層の位置を示す。C建物とJ建物は警固断層にも近く、在来構造に被害が多く発生している地域に近接しているか、その地域内にある。

## 2. 免震構造物の地震後の状況

地震発生後に建物を調査した概要を以下に示す。なお、調査は外観検査を主としており、建物内部に入れた場合や地震

時の挙動について得られた情報があればあわせて示す。

### 2.1 A建物

地震時には管理人が引越中で、玄関にいた。最初は建物の近くを通っているJRの振動かと思ったとのこと。棚類の転倒なし。免震部材に異常はなく、免震層が大きく変形した形跡は認められなかった。

### 2.2 B1～B4建物・H建物

同じ団地内にある免震建物。震源から離れているため、免震層の変形は小さかったと推定される。建物の8階に住んでいる住人は、家具類の転倒もなく、平常であったとのこと。B1建物は地下駐車場を利用した柱頭免震であったため、ダンパーの外観を観察できたが、何も異常はなかった。

### 2.3 D建物

写真2.1に建物の外観を示す。地震観測が行われており、免震層基礎部での最大加速度は146gal(EW方向)に対して、1階で45gal、R階で71galの加速度を記録した。写真2.2はエントランス部分の写真であり、縁石が15cmほど南に移動していた。これは観測された最大変位145mmに対応している。応答変形からみれば、レベル1(最大速度25cm/s)入力時の応答変位(11cm)を超えた入力であったと推定される。上部構造の加速度は1/3～1/2に低減され、免震効果が発揮された。最上階の執務室の揺れも小さく、室内の書庫や書籍などの転倒もなかったとのこと。

### 2.4 C建物

警固断層の近傍に建つ建物。写真2.3に建物の外観、写真2.4に玄関部分の損傷を示す。これは上下のクリアランスが不足したために階段のタイルに損傷が発生したと考えられる。階段部分の損傷幅は25cm程度であり、少なくともそれくらいは移動したものと推定される。また、建物の通用口へのアクセス部分に載せてあった鉄板の角で描かれたオービットも発見した(写真2.5)。南側の変位軌跡は残っていないものの、免震建物の応答は東西方向よりも南北方向が大きく、最大30cm程度に達している。この応答変位は評定シートに記載されている応答結果によればレベル2入力(最大速度50cm/s)時に相当すると思われる。この建物には地震計が設置されている。加速度はNS成分が大きく、地下65mで203gal、免震基礎部で489gal、1階で238gal、最上階(7階)で234galの最大加速度が記録されている。免震層基礎部の最大加速度から

もレベル2に相当する地震動レベルであったと言える。

## 2.5 E 建物

小さな通信施設であり、内部には人は居住していない。外観上からは何ら異常は見られなかった。

## 2.6 F 建物

本建物は写真2.6に建物外観を示すように、大規模な病院施設である。南側のエントランスブリッジは、エキスパンション構造になっているが、手摺り部分がうまく機能せず、手摺りと外壁が損傷した(写真2.7)。免震機能に支障はなかったと思われる。6階の入院患者の方は揺れは感じたと言われたが、棚類の転倒・損傷はなかったとのこと。隣接する耐震構造の病棟では本棚の転倒、壁に亀裂などが入ったとのこと。写真2.8には、免震層に設置してあるオービットによる軌跡を示す。免震層の変位は南北軸が大きく、最大15cm程度で、2サイクル程度の繰り返しが見られる。本建物の評定シートによればレベル1入力時の応答変形は18cm程度であり、今回の地震入力はそれよりも小さいようだ。

## 2.7 G 建物

本建物は警固断層から東に約600mの位置にある。写真2.9に建物外観を示す。免震クリアランスに残る痕跡から、南北方向に約10~12cm、東西方向に約7cmの最大変形が推定され

る。この応答変形はレベル1入力(最大速度25cm/s)時の応答変形に相当している。従業員の話によれば、地震の時はゆっくり前後に揺れる感じがした、お客は10組ほど宿泊していたがクレームなどはなかった、エレベータは5分間停止したが自動復旧した、家具類の転倒も無かったとのこと。写真2.10に免震部材の写真を示す。免震部材に損傷は見られず、残留変形もほとんど認められなかった。

## 2.8 I 建物

免震層の変形は10cmくらいと推定される。免震クリアランス部分は跳ね上がり式であるが、ほぼ原状に復帰していた。免震層基礎部で観測された水平方向の最大加速度121~139galに対し、1階床では91~118galと低減し、12階床では145~167galと多少増幅していた。しかし、揺れ方はゆっくりとしており、家具類の転倒、コンピュータの異常などもなかったとのこと。

## 2.9 J 建物

建物は警固断層から西に200mくらいの位置にある。免震クリアランスに軽微な損傷が認められたものの、オフィス内部の家具類の転倒もなく、10階にある食堂では20cmくらいまで積み重ねた茶碗が倒れなかったとのこと。免震層の変形は南北方向に±10cm程度であった。

表 1.1 福岡市内の免震建物一覧

名称	建設地	用途	階数	構造種別	免震部材 <sup>*1</sup>	評定年
A	博多区	寄宿舍	4	RC	HDR <sup>*2</sup>	H7年
B1	南区	共同住宅	14	RC	NRB+SD+LD	H8年
B2			14	RC	LRB	
B3			12	RC	LRB	
B4			6	RC	HDR	
C	中央区	事務所	7	RC	HDR	H8年
D	中央区	事務所	9	SRC	NRB+SD+LD	H8年
E	博多区	通信施設	2	RC	LRB	H9年
F	東区	病院	11+B1	SRC+S	NRB+SD+LD	H10年
G	中央区	ホテル	13	RC	NRB+SD+LD	H11年
H	南区	共同住宅	13	RC	NRB+SD+LD	H12年
I	西区	事務所	12	S	HDR+SL	H13年
J	中央区	事務所	10	S	NRB+SL+LD	H15年 <sup>*3</sup>

\*1 HDR:高減衰ゴム系積層ゴム, NRB:天然ゴム系積層ゴム, LRB:鉛プラグ挿入型積層ゴム, SL:弾性すべり支承, SD:鋼棒ダンパー, LD:鉛ダンパー

\*2 正確には周囲拘束型高減衰積層ゴム

\*3 建設年を示す

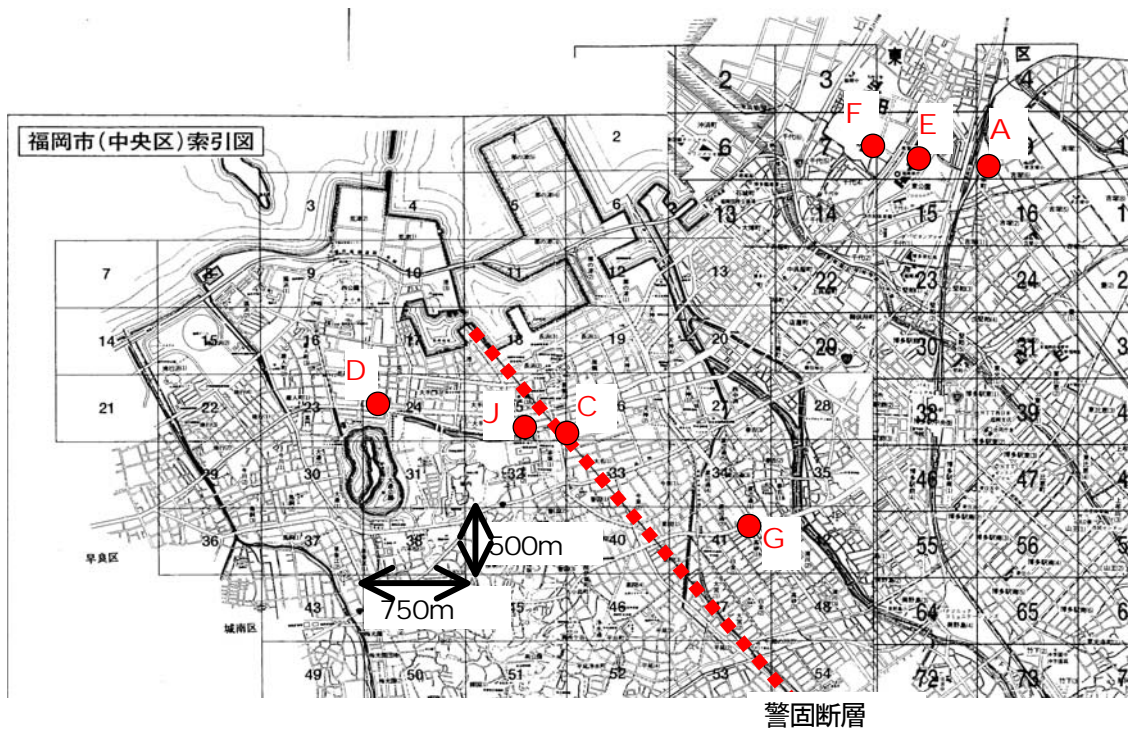


図 1.1 福岡市街地にある免震建物と警固断層の位置関係（図中の記号は表 1.1 に対応している）



写真 2.1 D 建物の外観



写真 2.2 D 建物の玄関アプローチと車庫入り口





写真 2.3 C 建物の外観

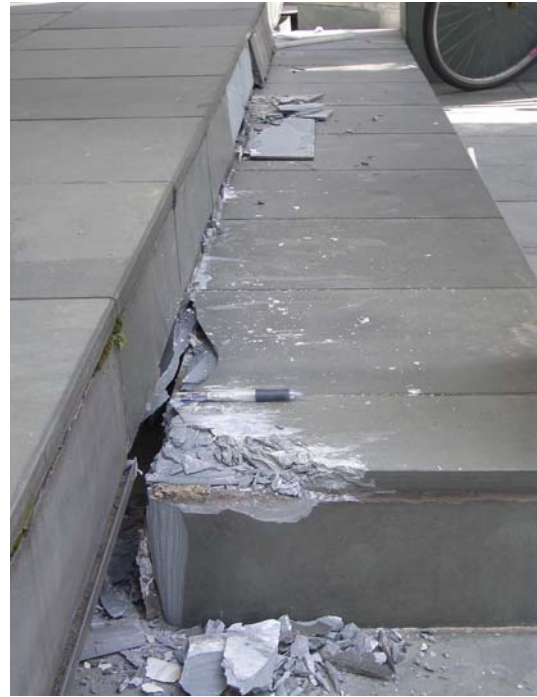


写真 2.4 C 建物の玄関周辺の損傷

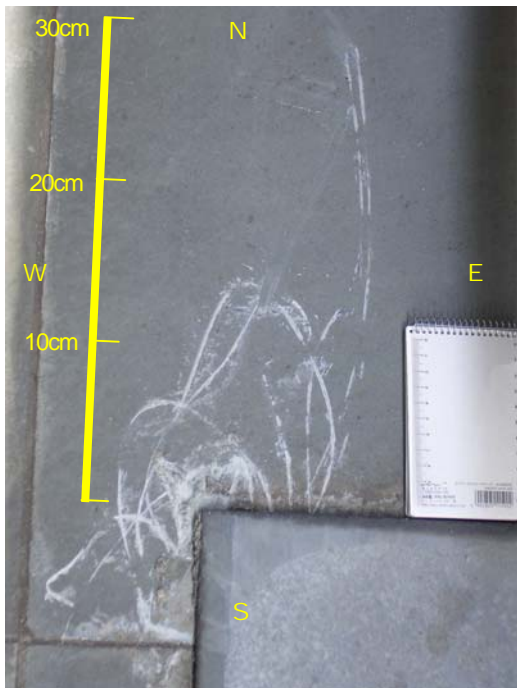


写真 2.5 C 建物での免震建物の移動痕跡

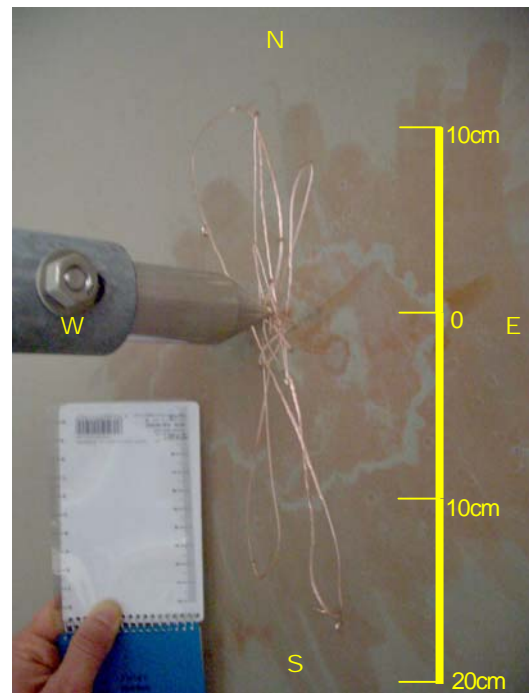


写真 2.8 F 建物の免震層でのオービット



写真2.6 F建物の外観



写真2.7 F建物のエキスパンションブリッジ



写真2.9 G建物の外観



写真2.10 G建物の免震部材

### 3. 免震構造物で観測された地震記録

#### 3.1 C 建物での地震観測記録

##### (1)C 建物の構造概要

本建物は地上7階建て(高さ29.2m)の鉄筋コンクリート造・耐震壁併用ラーメン構造である。建物重量は約6800tonの基礎免震構造である。免震部材には高減衰ゴム系積層ゴムが21台(直径750mmが19台,直径900mmが2台)用いられている。使用されている積層ゴムの概要を表3.1に示す。積層ゴムのゴム材料はいずれもせん断弾性率Gで約6kg/cm<sup>2</sup>である。

上部構造の弾性時1次周期は0.45秒(X方向),0.70秒(Y方向)となっている。地盤種別は2種地盤である。設計用せん断力は時刻歴応答解析の結果を参考に1階で0.134を採用している。

動的解析では,入力地震波のレベルとして25kineと50kineの2水準で検討されている。50kine入力時の免震層の最大応答変位は約30cmである。この時の免震周期(積層ゴムの等価剛性に基づく周期)は約3秒となる。

表3.1 C 建物の積層ゴム

直径	ゴム厚	ゴム層数	長期面圧
750mm	6mm	27	47~97kg/cm <sup>2</sup>
900mm	8mm	20	93kg/cm <sup>2</sup>

##### (2)C 建物の地震記録

地震観測は地下65m(Vs=500m/sの基盤上),免震基礎部(地表面-1.8m),建物1階床および7階の屋上の4カ所で実施されている。

観測された最大加速度を表3.2に示す。同表より,水平方向に関して,基礎部の加速度は地下65mの約2.5倍に増幅していること,基礎部に対して上部構造の加速度は1/2以下に低減されていること,1階と7階の加速度はほぼ同じであり,上部構造は一体的に挙動していることが分かる。上下方向の加速度に関しては,基礎部に対して上部構造の加速度は1/1.3~1/1.5に低減されている。通常免震構造では上下方向に関しては加速度は増幅すると言われているが,今回の観測記録は上下方向に関してもある程度の免震効果を発揮したといえる。

図3.1にNS方向の加速度波形を示す。1階と7階の波形が殆ど同じであり,同位相で揺れていること,揺れの周期は約3秒程度であることもわかる。

##### (3)C 建物の免震層の変形

基礎部と1階床で観測された加速度データを積分し,絶対変位波形を算出し,両者の差をとることで免震層の相対変位波形を求めた。図3.2に免震層の相対変位を示す。同図を写真

2.5と比較してみると,北側の最大変形はほぼ対応しているが,最大変形前後の軌跡の描き方が異なっている。写真2.5は単に鉄板が載せてあるだけであり,最大変形前後での動きが早く痕跡が残っていないためではないかと思われる。

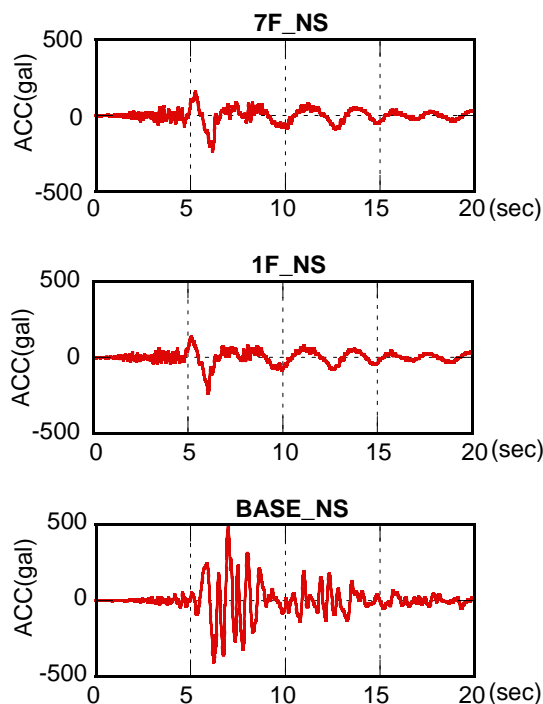


図3.1 C 建物の観測波形(NS方向)

表3.2 C 建物での最大加速度(gal)

観測位置	NS方向	EW方向	UD方向
7階	233.8	126.1	172.2
1階	237.6	140.0	151.6
基礎部	488.8	310.8	225.8
地下65m	202.8	124.5	85.9

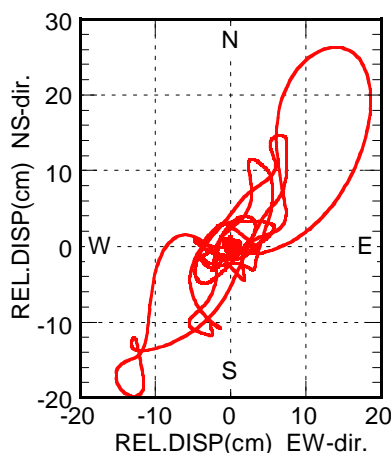


図3.2 C 建物の免震層の層間変形

免震層の最大変形は約30cmであり,設計変位相当の変形を



受けたことがわかる。また、免震層の動きは北東方向の直線的な動きをしていることもよく分かる。

### 3.2 D 建物での地震観測記録

#### (1)D 建物の構造概要

本建物は、福岡市中央区に建設された地上9階、高さ約37mの鉄骨鉄筋コンクリート構造で、GL-15m以深の風化砂岩を支持地盤とする事務所ビルである。建物形状は、4×2スパンで、平面、立面形状ともほぼ整形である。

免震部材は、1階と基礎との間に設置してあり、免震部材には、直径800～900mmの天然ゴム系積層ゴム支承を15台、ダンパーとしては鋼棒ダンパー（φ70mm）と鉛ダンパー（φ180mm）がそれぞれ8基設置してある。表3.3に積層ゴムの概要を示す。直径900mmはゴム硬度が異なる2種類が使用されている。

上部構造の弾性時1次周期は0.73秒（X方向）、0.76秒（Y方向）となっている。地盤種別は2種地盤である。設計用せん断力は時刻歴応答解析の結果を参考に1階で0.11を採用している。

動的解析では、入力地震波のレベルとして25kineと50kineの2水準で検討されている。50kine入力時の免震層の最大応答変位は約33cmである。この時の震周期（積層ゴムの等価剛性に基づく周期）は約3.5秒となる。

表3.3 D建物の積層ゴム

直径	台数	ゴム層厚	長期面圧
800mm	4	15.6cm	70～78kg/cm <sup>2</sup>
900mm	8	17.7cm	85～107kg/cm <sup>2</sup>
900mm	3	17.7cm	138～151kg/cm <sup>2</sup>

#### (2)D 建物の地震記録

本建物の地震観測は、地中、免震基礎部、1階、屋上階で実施されている。観測された最大加速度を表3.4に示す。

水平方向の加速度は、NS方向では基礎部で110gal、1階で66gal、EW方向では免震基礎部で146gal、1階で45galが記録されている。免震層の上下で、NS方向で約40%、EW方向で約70%揺れが低減されている。また、屋上階の加速度は、101gal（NS方向）、70gal（EW方向）と基礎部の値より小さくなっている。

鉛直方向の揺れは、免震基礎部で168gal、1階（免震層上部）で120galが記録され、免震層の上下で約30%低減されている。

EW方向の加速度波形を図3.3に示す。入力加速度が大きい25秒から30秒間では周期が3秒程度であるが、それ以降は周期2秒程度で振動していることが読み取れる。

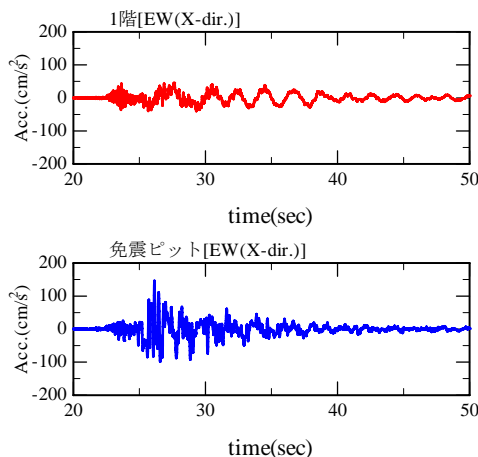


図3.3 D建物での加速度記録(EW方向)

表3.4 D建物での最大加速度 (gal)

観測位置	NS 方向	EW 方向	UD 方向
最上階	101.5	70.7	214.2
1階	66.0	45.4	119.8
基礎部	110.5	146.2	168.4

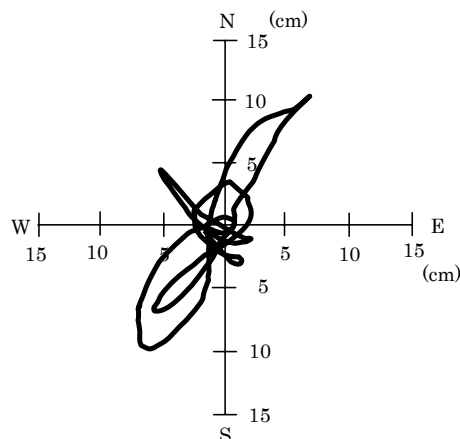


図3.4 D建物の免震層の層間変形

#### (3)D 建物の免震層の変形

D建物でははげがき式変位計が設置されており、地震時の免震層の層間変形を記録できるようになっている。今回の地震で記録された免震層の変形を図3.4に示す。最大で約27cm(南方向13cm、北方向14cm)の変位が記録された。

### 3.3 F建物での地震観測記録

#### (1)F建物の構造概要

本建物は、福岡市東区に建設された地上11階、地下1階の鉄骨鉄筋コンクリート構造で、GL-15m以深の砂岩を支持層としている。平面形は約109m×72mをもつ大規模な病院建築である。現在は第二期工事が進行中で、完成すれば我が国でも

最大級の病院建築となる。

免震層は地下1階の下に設置されており、天然ゴム系積層ゴム116台、ダンパーには鋼棒ダンパー(φ70mm)が66台と鉛ダンパー(φ180mm)が48台設置されている。表3.5に積層ゴムの概要を示す。積層ゴムの直径は800mm~1200mmで、比較的高い面圧(平均面圧は119kg/cm<sup>2</sup>)で使用している。

上部構造の弾性時1次固有周期は0.65秒(X方向)、0.80秒(Y方向)となっている。地盤種別は2種地盤である。設計用せん断力係数は最下階で0.13としている。

応答解析での検討地震波には、レベル1で30~50cm/s、レベル2で50~76cm/sの波が使用されている。レベル1時の免震層の最大応答変形は約18cmで、この時の免震周期は約3.2秒程度、レベル2時の最大応答変形は約29cm、免震周期は3.6秒となっている。

表3.5 F建物の積層ゴム

直径	台数	最大の長期面圧
800mm	27	145kg/cm <sup>2</sup>
900mm	42	147kg/cm <sup>2</sup>
1000mm	31	147kg/cm <sup>2</sup>
1100mm	11	145kg/cm <sup>2</sup>
1200mm	5	133kg/cm <sup>2</sup>

(2)F建物の地震記録

本建物には、自由地盤表面、免震層基礎上、地下1階、1階、5階、11階に地震計が設置されている。1階、5階、11階にはねじれ応答観測のため東西方向に2台の地震計が設置され、全部で27成分の観測が行われている。観測された最大加速度を表3.6に示す。1階から11階の各階に設置された2台の加速度計で記録された最大加速度は±10%程度の差異しかないため、表中では平均値で示している。

水平方向の加速度はNS方向では基礎部で195gal、B1階~5階では82gal~95galと半分以下に低減されている。EW方向では基礎部175galに対し、45gal~61galと35%に低減されている。UD方向では免震基礎部で126galに対し、上部構造で多少増幅している程度である。

11階におけるNS、EW方向の応答は5階に比べれば大きくなっている。UD方向の増幅は著しい。5階より上部は平面形状が十字形となり、応答特性が異なっている可能性も含め、今後詳細な検討が必要である。

図3.5にNS方向の加速度波形を示す。B1階~11階の加速度波形はほとんど同じ形状であり、各階が同じようにゆっくりと揺れていることが分かる。応答加速度波形からも上部構造は3秒程度で振動していることが読み取れる。

表3.6 F建物での最大加速度 (gal)

観測位置	NS方向	EW方向	UD方向
11階	112.1	93.7	446.5
5階	94.8	61.3	172.2
1階	81.8	47.7	132.3
B1階	84.9	45.1	153.7
基礎部	195.2	175.4	125.9

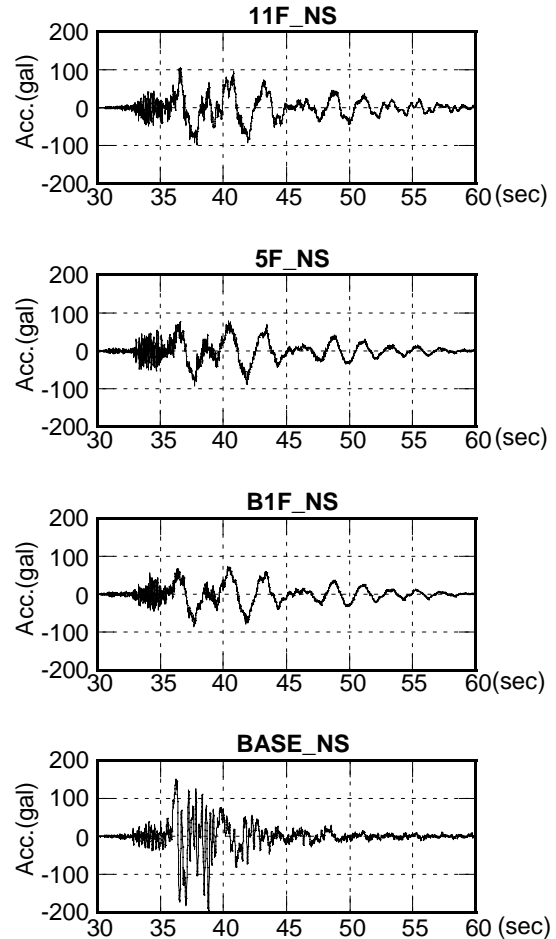


図3.5 F建物での加速度記録 (NS方向)

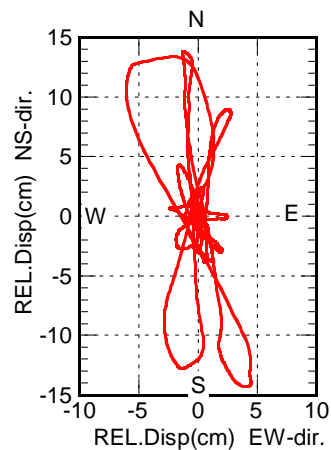


図3.6 F建物の免震層の層間変形



### (3) F 建物の免震層の変形

C 建物と同様に観測された加速度波形を用いて、免震層の層間変形を求めた結果を図 3.6 に示す。F 建物の揺れは南北方向に集中しており、約±15cm 程度の変形が 2~3 回ほど生じたことが分かる。同図は写真 2.8 の軌跡とほぼ一致し、免震層の挙動を加速度波形の積分から推定できることが確認された。

### 3.4 J 建物での地震観測記録

本建物は建築センター発行のビルディンググレーがなく、公表されている建物データは入手できていない。本建物には免震層にけがき棒が設置され、免震層基礎部、1 階、塔屋に地震計も設置されていた。

図 3.7 が免震層の層間変形を示している。コピーのため鮮明でないものの、北側に 98mm、南側に 93mm、東側に 45mm、西側に 86mm の最大変形が記録されている。この建物でも最大変形点を結ぶ直線は北東方向である。

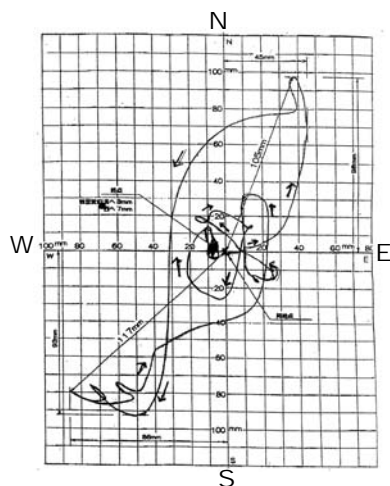


図 3.7 J 建物の免震層の層間変形

表 3.7 J 建物での最大加速度 (gal)

観測位置	NS 方向	EW 方向	UD 方向
塔屋 2 階	188.9	141.2	169.9
1 階	123.1	114.9	137.4
基礎部	253.6	181.0	114.0

表 3.7 に記録された最大加速度の値を示す。水平方向については基礎部での加速度が 1 階では 48%~64% に低減されており、免震効果が発揮されたといえる。

## 4. 免震構造物の地震特性と課題

今回の福岡県西方沖地震による福岡市内の免震建物の調査を行った結果、いくつかの建物で応答変位がレベル 1 相当に達し、その中の 1 つの建物はレベル 2 相当の応答変形を受けていたことが判明した。いずれの建物でも家具類の転倒は発生しておらず、想定した免震効果が発揮されたことが検証された。免震クリアランスに軽微な損傷を被った建物もあり、エキスパンション部分の設計には細心の注意が必要である。

今回の地震で免震部材の取り付け部が損傷した。原因を究明し今後の設計・施工に教訓を活かすことが重要である。免震部材の品質が十分高くなっても構造体との接合部が損傷するようでは意味がない。今後は設計者・施工者は細心の注意をはらって設計・施工に取り組むべきである。

なお、免震建物の地震時応答を記録できるようにしておくことは免震層の健全性を評価する上でも効果的である。地震計でなくても「けがき棒」による免震層の変形を追跡できるようにしておくことが今後も重要になる。免震設計の際には是非検討をお願いしたい。

最後に、北九州市にある免震建物 2 棟と太宰府市にある建物も調査を行ったが、いずれも入力レベルが小さく免震層が大きく変形することはなかった。いずれの建物でも上部構造と免震層を含め異常は全く観察されなかった。

今回の免震建物の応答挙動が今後の免震構造の発展・普及に役立つことを期待したい。

### 謝 辞

今回の調査にあたり、ご協力を頂いた関係者の皆様に感謝致します。C 建物の強震記録は(株)建設技術研究所九州支社 (CTI 福岡ビル) から、D 建物の観測値に関しては鉄建建設(株) から、J 建物の観測値は読売新聞西部本社から、F 建物の強震記録、建物図面、試験データなどは九州大学施設部からご提供頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 入江, 松田: 福岡県西方沖地震における大名地区の免震建物の挙動, AIJ 大会梗概集, 2005 (投稿中)
- 2) 尻無濱, 林ほか: 2005 年福岡県西方沖地震における福岡市内の免震建物の地震時挙動, AIJ 大会梗概集, 2005 (投稿中)
- 3) 尻無濱, 林, 森本: 福岡県西方沖地震による大濠公園 (免震) ビルの速報, 免震構造協会誌, No.48, 2005