

1号館・23号館の地震時実挙動観測

桂本孝久*1、山本俊雄*1、栗山利男*2

(*1：神奈川大学工学部建築学科、*2：(株)構造計画研究所地震防災グループ)

1. はじめに

阪神・淡路大震災を契機として、大地震時における建物の安全性や機能保持に対する要求が高まっている。そのため、構造物の地震時動的挙動に関連して建物の剛性および減衰の評価や動的相互作用効果などに関する情報のより多くの蓄積が望まれている。特に、構造耐力上の安全性のみならず、建物に作用する床応答加速度が低減し機器・什器・備品類の移動や転倒等が少なく、地震時の建物の機能保持が容易であるという特徴から、急激に免震構造建物が普及している。この種の新しい免震構造物の動的挙動観測についても情報の蓄積は極めて重要と考えられる。

本学横浜キャンパスに新築された1号館は角型鋼管 CFT 柱と鉄骨梁で構成される複合構造で、23号館は免震構造を有する RC 造建物として竣工され、2001 年 4 月以降、強風・地震時の動的挙動を明らかにすることを目的として振動観測が行われている。本研究では、2001 年 12 月までに観測された地震観測記録に基づくデータから1号館および23号館の地震時動的挙動を検討した。

2. 建物概要

動的挙動観測システムを設置した1号館および23号館建物の概要を以下に記す。

(1) 1号館建物概要

構造形式：角型鋼管の CFT 柱＋鉄骨梁構造の上部構造と鉄筋コンクリート造の下部構造

建物規模：階数：地下1階、地上8階、塔屋1階

建築面積：1,044 m²、延床面積：9,000 m²

全長：29.0m (X方向)、36.0m (Y方向)、全高：30.95m

基礎構造：場所打コンクリート杭 (GL-13mの土丹層を支持層とする)

なお、対象建物の平面図、立面図を図-1に示す。

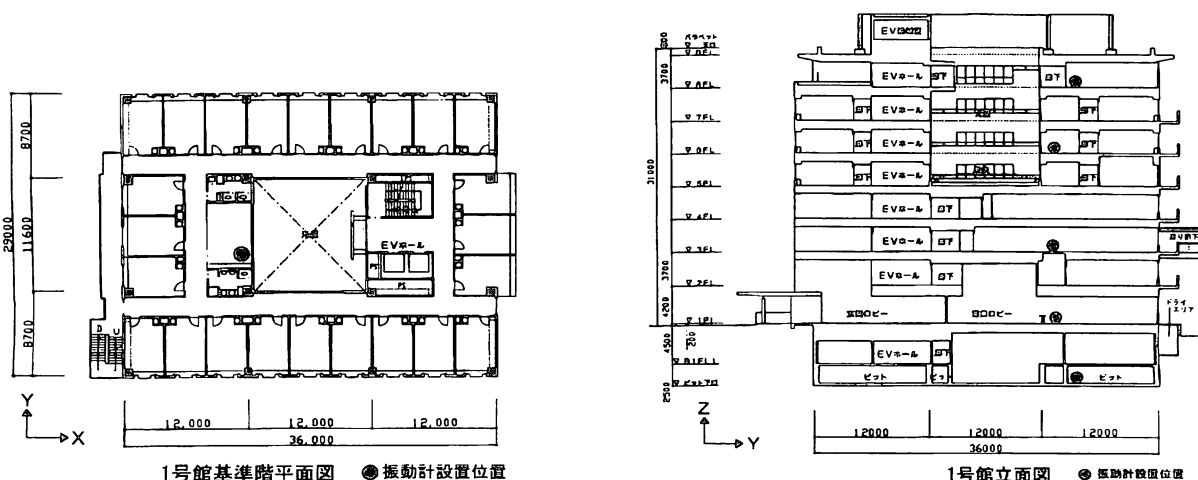


図-1 1号館の平面図と立面図および振動計設置位置

(2) 23号館建物概要

構造形式：鉄筋コンクリート造の上部構造と下部構造の間に（積層ゴムアイソレータ＋鋼棒ダンパー＋鉛ダンパー）で構成された免震層（写真1,2）を入れた免震構造。

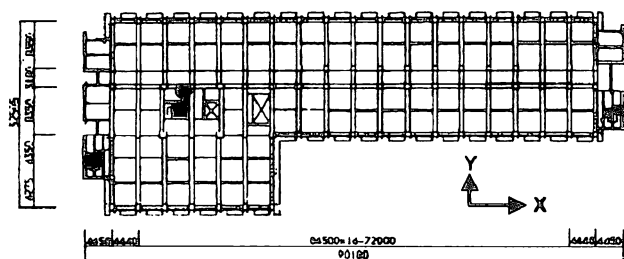
建物規模：階数：地下2階、地上8階、塔屋2階

建築面積：2,221 m²、延床面積：20,856 m²

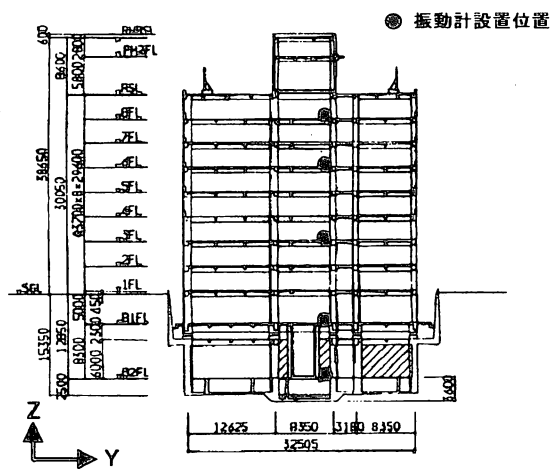
全長：90.3m（X方向）、32.5m（北側19.9m）（Y方向）、全高：54.6m

基礎構造：直接基礎

なお、対象建物の平面図、立面図を図-2に示した。



23号館基準階平面図



23号館立面図

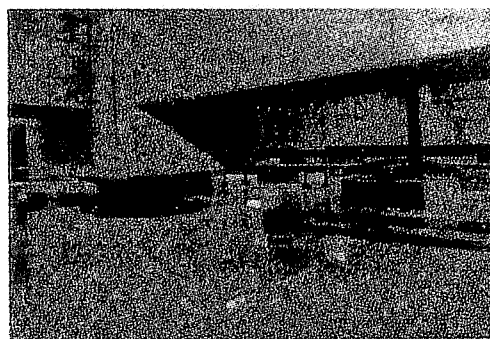


写真-1 積層ゴムアイソレータと鋼棒ダンパー



写真-2 鉛ダンパー

図-2 23号館の平面図と立面図および振動計設置位置

図-1 および図-2 に示すように、1号館の平面形状はほぼ正方形の形状であり、23号館は“L”型形状を示している。1号館、23号館ともGL-13m～GL-15mの土丹層を支持層とする杭基礎と直接基礎による基礎構造を有している。

3. 動的挙動観測システム

動的挙動観測システムは、図-3 に示すように1号館および23号館の建物内に各々5箇所（各3成分）と両号館の中間に位置するキャンパス内の地盤中に2箇所（地表、工学的基盤レベル位置で各3成分）に振動計を配置し、合計12箇所において強風・強震時の振動計測を行っている。また、23号館免震層の上下階（B2

階および B1 階) 2 箇所の柱の柱頭部において合計 16 箇所の歪計測を同時に実施している。全体の観測システムは図-4 に示すように構成されており、強風・強震時に設定したトリガーレベルを超える計測信号を感知した場合に全観測記録(72 成分)が 1 号館 B1 階に設置された収録装置に転送・収録される。また、学内 LAN を通して 8 号館および 12 号館の研究室において観測記録のモニターおよび収録が可能となっている。

振動計は建物内および地盤内ともにサーボ型加速度計(東京測振:SV-355T)を用い、両号館とも最上階と最下階にはサーボ型速度計(東京測振:VSE-355EI)を併置し、加速度成分とともに速度成分の観測記録を同時収録する。なお地震加速において、トリガーは B2 階の振動計で観測された最大水平加速度値が 1gal を超える地震動を観測した時に作動するようになっている。また、ブリトリガーは 20 秒に設定されている。

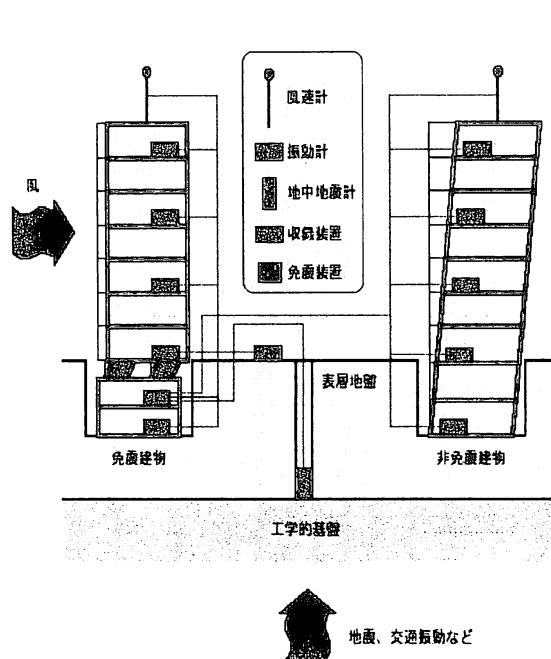


図-3 動的挙動観測システムの概要図

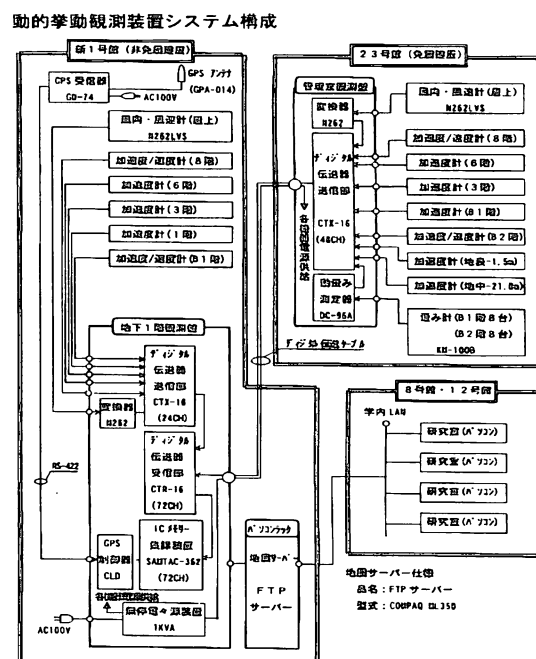


図-4 動的挙動観測システムのシステム構成図

(1) 地中観測位置

地中および地表での振動計測はボーリング坑を利用して、工学的基盤レベル(GL-21.8m)と地表レベル(GL-1.5m)において各々3成分の振動計測を行っている。工学的基盤以浅の地盤は主にローム層で構成され、N値10以下の軟弱層がGL-21.8mまで堆積している。

(2) 1号館観測位置

1号館は角型鋼管のCFT柱と鉄骨梁で構成された複合構造となっている。振動計(サーボ型加速度計)は8階、6階、3階、1階およびB1階に配置されており、各階において長手方向(X方向)、短手方向(Y方向)および上下方向(Z方向)の3成分の観測を行っている。設置位置および観測成分(X,Y,Z方向)は図-1中に示してある。

(3) 23号館観測位置

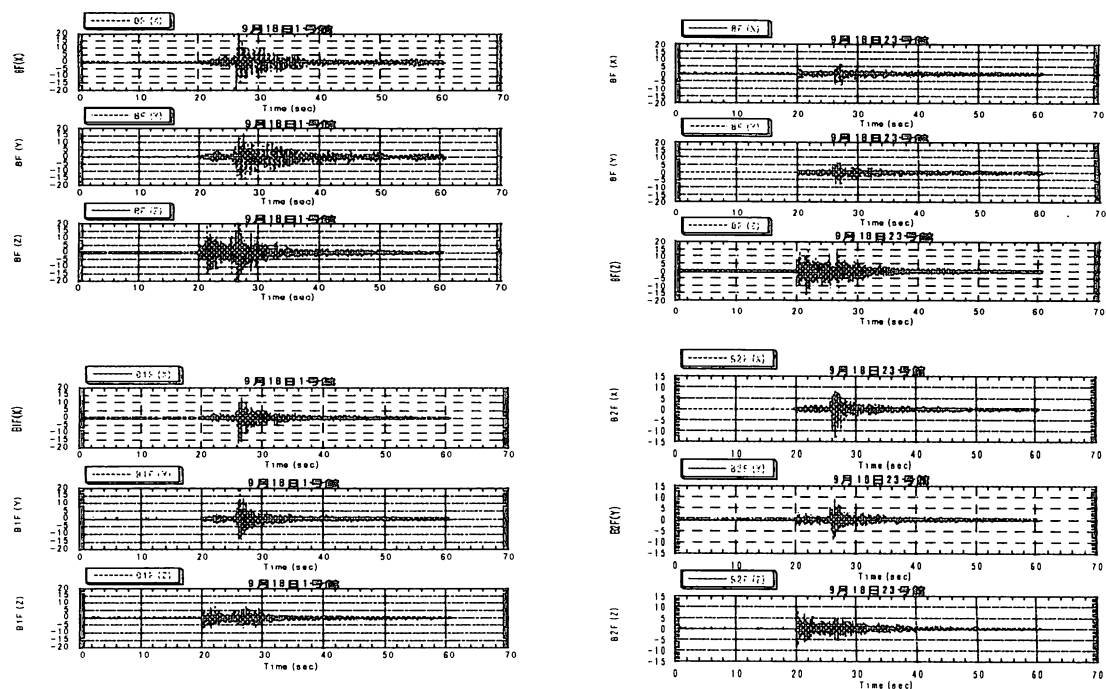
23号館は地下2階地上8階、塔屋2階のRCラーメン構造でB2階とB1階の間に免震層を有する中間免震構造となっている。設置した地震計はサーボ型加速度計(一部サーボ型速度計を併置)で8階、6階、3階、B1階、B2階の5箇所に、各設置階ともにほぼ同位置に設置してある。なお、設置位置および観測成分(X,Y,Z方向)は図-1中に示してある。

4. 観測記録の概要（最大加速度 A_{max} ）

観測記録は、地盤内の地中（GL-21.8m）、地表（GL-1.5m）、1号館の地下1階（B1F）、地上1, 3, 6, 8階1F, 3F, 6F おとび 8F） および 23号館の地下1, 2階（B2F, B1F）、地上3, 6, 8階（3F, 6F おとび 8F）の12箇所に設置された地震計で得られた加速度を各階ごとにX(NS方向), Y(EW方向), Z成分(上下方向)で表している。2001年4月以降、観測された地震は表-1に示した合計16地震である。2001年9月18日に観測されたNo.7の地震観測記録の1例を図-5に示す。観測記録は全チャンネルともP波初動時から良好な記録が得られている。また、表-2(a)には1号館で観測された各階の最大水平加速度(A_{max})値と8階と地下1階の A_{max} の比(8F/B1F)を示す。表-2(b)には23号館で観測された各階の最大水平加速度(A_{max})値と8階と地下階の A_{max} の比(8F/B1Fと8F/B2F)および免震層上下階の A_{max} の比(B1F/B1F)を示した。なお、図-6には1号館と23号館の各階の A_{max} を工学的基盤である地中(GL-21.8m)の A_{max} を基準とした時の比率をそれぞれ示す。

表1 観測地震リスト

No	観測日時	震源	緯度 経度	M
1	4月10日 10:04	千葉県南部	N35.5° E140.4°	4.7
2	6月25日 01:27	神奈川県東部	N35.6° E129.5°	3.9
3	7月20日 06:02	茨城県南部	N36.2° E139.8°	5.1
4	7月26日 03:33	茨城県南部	N36.1° E139.8°	4.5
5	8月28日 14:21	千葉県西部	N35.6° E139.5°	4.0
6	9月12日 05:46	神奈川県東部	N35.2° E139.8°	3.8
7	9月18日 04:24	東京湾	N35.4° E139.8°	4.4
8	9月25日 04:35	茨城県南部	N36.3° E140.1°	4.4
9	10月02日 23:02	埼玉県南部	N35.9° E139.5°	4.1
10	10月18日 06:31	茨城県南部	N36.1° E139.8°	4.4
11	11月12日 17:48	千葉県北西部	N35.6° E140.1°	3.7
12	11月17日 01:32	千葉県北西部	N35.6° E140.2°	4.5
13	12月01日 11:27	埼玉県北部	N36.1° E139.0°	4.2
14	12月02日 14:24	千葉県北西部	N35.6° E140.1°	3.9
15	12月02日 22:03	岩手県内陸南部	N39.4° E141.3°	6.3
16	12月08日 04:07	神奈川県東部	N35.5° E139.1°	4.6



(a) 1号館（上：8F，下：B1F）

(b) 23号館（上：8F，下：B2F）

図-5 地震観測記録（No.7：2001年9月18日 M4.4）

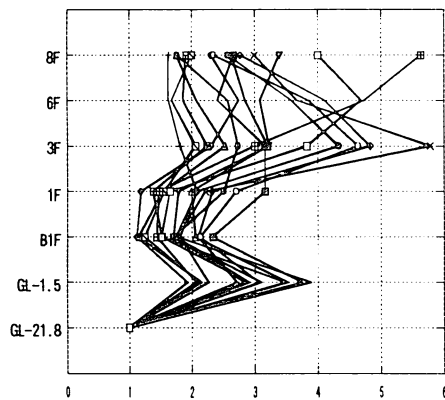
表-2 地震観測記録の水平最大加速度 (Amax) 値リスト

(a) 1号館 (Amax 値)

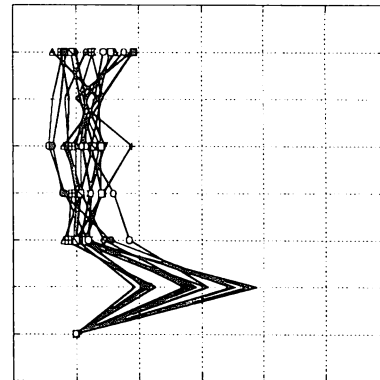
No	方向	最大加速度(gal)					比率
		8F	6F	3F	1F	B1F	8F/B1F
1	X	7.81	13.79	15.44	9.16	9.16	0.85
	Y	7.02	8.00	13.98	7.32	7.32	0.96
2	X	3.36	4.88	5.19	4.76	3.24	1.04
	Y	4.52	7.63	6.53	6.78	5.98	0.76
3	X	4.21	4.09	4.94	3.05	3.36	1.25
	Y	6.96	6.53	6.47	5.37	5.07	1.37
4	X	3.05	4.52	5.31	2.56	2.32	1.32
	Y	2.63	3.42	2.93	3.24	2.69	0.98
5	X	1.65	2.01	3.17	1.22	0.98	1.69
	Y	1.40	1.65	2.01	1.10	0.98	1.44
6	X	1.10	1.10	1.22	1.40	1.22	0.90
	Y	0.61	0.85	0.67	0.85	0.73	0.83
7	X	21.12	22.83	25.70	15.99	16.48	1.28
	Y	15.69	20.39	17.46	24.05	20.26	0.77
8	X	1.89	2.63	3.17	1.53	1.28	1.48
	Y	1.95	2.01	2.93	1.58	1.28	1.52
9	X	1.95	1.77	2.32	2.32	1.71	1.14
	Y	1.40	2.26	2.14	2.32	2.26	0.62
10	X	2.26	2.69	2.26	1.16	1.10	2.05
	Y	2.08	1.71	1.89	1.47	1.34	1.55
11	X	1.40	1.65	2.01	1.22	0.92	1.53
	Y	1.47	1.59	2.01	1.71	1.40	1.04
12	X	9.95	9.03	9.46	5.25	5.01	1.99
	Y	7.51	5.37	7.39	6.59	6.23	1.21
13	X	2.01	3.30	3.97	2.32	1.65	1.22
	Y	2.75	3.11	5.01	2.69	2.38	1.15
14	X	1.95	1.65	2.01	1.53	1.22	1.60
	Y	1.28	1.28	1.95	1.40	1.28	1.00
15	X	9.28	7.81	4.94	2.44	2.38	3.90
	Y	5.74	4.27	4.76	2.38	2.26	2.54
16	X	7.08	8.30	6.78	2.93	2.69	2.64
	Y	7.87	6.59	7.39	3.54	3.24	2.43

(b) 23号館および地盤 (Amax 値)

No	方向	最大加速度(gal)							比率	
		8F	6F	3F	B1F	B2F	GL-1.5m	GL-21.8m	8F/B1F	8F/B2F
1	X	3.42	2.69	2.44	3.48	5.00	12.78	4.21	0.98	0.68
	Y	2.93	1.83	2.62	4.03	3.66	19.17	4.21	0.73	0.80
2	X	1.46	1.71	1.65	1.89	1.83	5.37	1.89	0.77	0.80
	Y	1.83	1.71	2.08	1.95	2.93	11.05	2.75	0.94	0.62
3	X	2.56	1.83	1.95	2.38	3.17	6.41	2.20	1.08	0.81
	Y	2.14	1.65	1.89	2.14	2.32	6.04	2.87	1.00	0.92
4	X	1.40	1.16	1.53	1.34	1.34	2.99	1.10	1.04	1.04
	Y	1.04	0.92	1.10	1.10	1.46	5.25	1.65	0.95	0.71
5	X	1.04	0.55	1.04	0.79	0.55	2.14	0.55	1.32	1.89
	Y	0.58	0.61	0.85	0.67	0.67	2.69	0.79	0.87	0.87
6	X	0.43	0.92	0.55	0.73	0.55	1.53	0.67	0.59	0.78
	Y	0.43	0.37	0.61	0.55	0.55	2.38	0.55	0.78	0.78
7	X	6.77	6.16	5.07	6.35	12.45	28.20	8.00	1.07	0.54
	Y	7.51	5.55	7.57	9.64	9.16	28.38	13.43	0.78	0.82
8	X	1.40	1.04	0.92	1.04	0.85	2.14	0.73	1.35	1.65
	Y	1.10	0.67	0.67	0.98	0.85	2.20	1.22	1.12	1.29
9	X	0.73	0.85	0.79	0.79	0.73	2.75	0.73	0.92	1.00
	Y	0.85	0.73	1.10	1.04	1.22	2.81	0.98	0.82	0.70
10	X	1.59	1.16	0.98	0.98	0.98	1.89	0.98	1.62	1.62
	Y	1.16	0.85	0.92	1.04	0.85	3.36	0.73	1.12	1.36
11	X	5.25	0.92	1.16	0.98	0.85	1.71	0.79	5.36	6.18
	Y	1.71	0.67	0.92	1.04	0.73	3.05	0.85	1.64	2.34
12	X	5.19	3.36	3.42	4.70	5.43	9.09	2.93	1.10	0.96
	Y	3.23	2.50	2.87	3.17	4.15	17.58	3.85	1.02	0.78
13	X	0.79	0.92	1.10	0.92	0.85	2.62	0.85	0.86	0.93
	Y	0.98	0.67	1.04	1.04	0.98	3.78	1.28	0.94	1.00
14	X	1.22	1.40	0.92	0.92	0.85	2.08	0.98	1.33	1.44
	Y	0.92	0.55	0.79	0.85	0.73	2.50	0.67	1.08	1.26
15	X	2.56	2.26	2.32	2.32	1.89	3.42	1.65	1.10	1.35
	Y	2.56	2.08	1.83	1.89	1.28	4.21	1.46	1.35	2.00
16	X	2.56	2.32	1.95	2.20	2.14	6.16	1.77	1.16	1.20
	Y	2.99	2.08	2.50	3.17	2.01	5.62	1.71	0.94	1.49



(a) 1号館



(b) 23号館

図-6 最大水平加速度値 (Amax 値) の鉛直方向の分布 (GL-21.8mで基準化)

表-2 (a)、(b) に示したように、観測された 16 地震中の最も大きい加速度振幅を示した地震は No.7 の地震であり、GL-21.8m で 8.00gal (X), 13.43gal (Y) であり、1号館 B1F で 16.48gal (X), 20.26gal (Y)、8F において 21.12gal (X), 15.69gal (Y) であった。また、23号館では B2F で 12.45gal (X), 9.16gal (Y)、8F において 6.77gal (X), 7.51gal (Y) となっている。また、図-6 に示したように GL-21.8m での Amax 値を基準とした各観測位置での Amax 値の比率では、GL-1.5m では約 2～4 倍を示し、工学的基盤より上部表層地盤の地震動の増幅が明瞭である。一方、1号館、23号館ともに建物最下層で基礎上面にあたる B1F (1号館) と B2F (23号館) において Amax 値は減少しており、相互作用効果による入力損失の影響と考えられる。23号館免震層の上下階においては、B2F の Amax 値が大きいほど B1F の Amax 値は減少する傾向が認められる。また、上部構造の Amax 値は、1号館においては上層階で大きく増幅し、特に 3F において大きな応答を示す。これは、地盤構造による地震動の周期特性により 2 次モードが励起されているためと考えられる。23号館では B1F 以上の上層階において大きな Amax 値の増加は認められず、免震構造の特徴が明確に認められる。

5. 伝達関数の検討

(1) 地盤の伝達関数

図-7に地盤の伝達関数として、地表面（Gs：GL-1.5m）と工学的基盤面（Gb：GL-21.8m）での観測記録のフーリエスペクトル比（Gs/Gb）により算定した結果を示す。

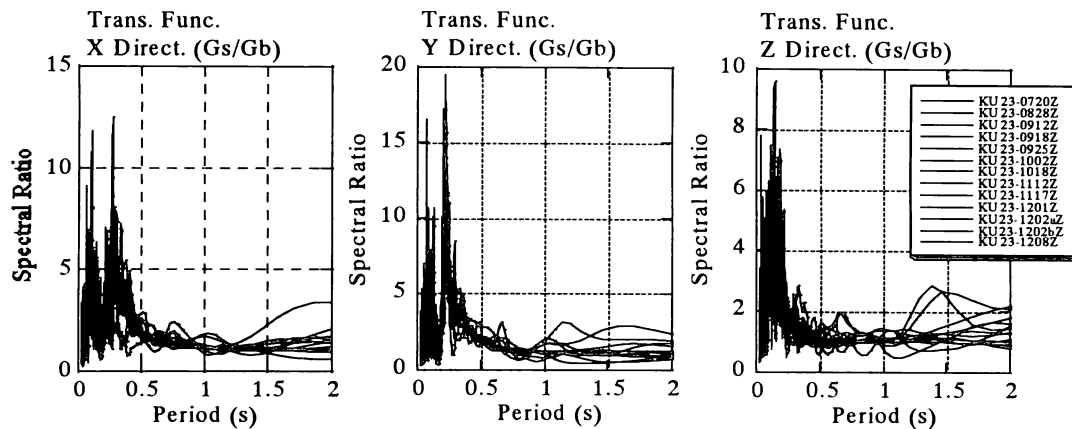


図-7 地盤の伝達関数

図-7より、X方向においては約0.25秒、0.09秒、Y方向では約0.24秒、0.08秒付近に明瞭なピークが認められ、それぞれ工学的基盤で浅の表層地盤の卓越周期と考えられる。Z方向においては、バラツキがあるが約0.15秒付近にピークが認められる。

(2) 1号館の伝達関数

図-8は1号館において観測された強震記録から、1号館建物の伝達関数として8階と地下1階のフーリエスペクトル比（8F/B1F）により算定した結果を示す。また、図-9に周辺地盤と1号館建物間の伝達関数として、地下1階と地表面での観測記録のフーリエスペクトル比（B1F/Gs）により算定した結果を示す。

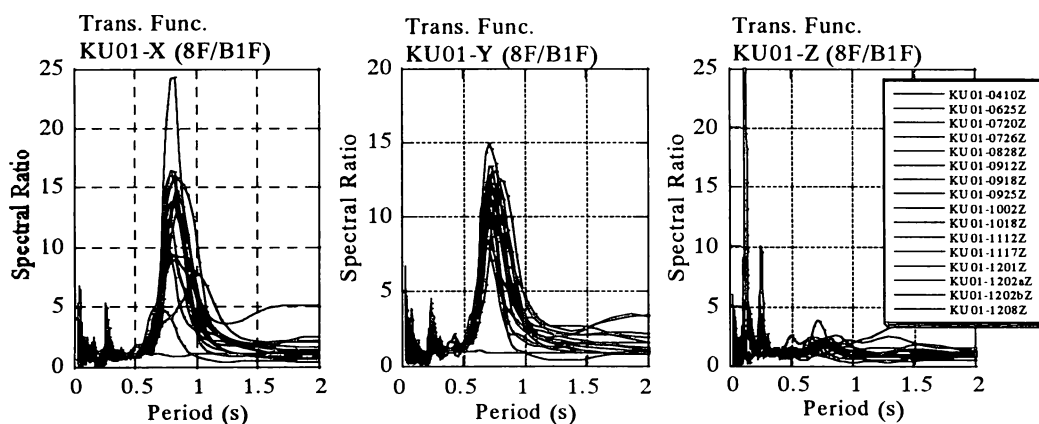


図-8 1号館上部構造の伝達関数

図-8より、8F/B1FではX方向約0.8秒、Y方向約0.7秒付近に明瞭なピークが認められ、両方向の1次モードの固有周期を示している。これは、微動観測から推定された固有周期（X方向0.752秒、Y方向0.660秒）とも整合する。また、X、Y両方向とも約0.24秒付近に2次モードのピークが認められる。

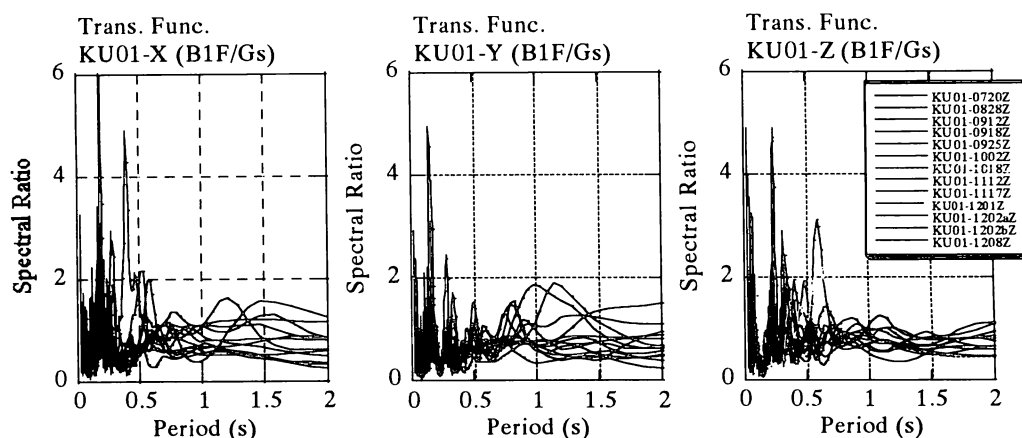


図-9 1号館建物と地盤の伝達関数

図-9より、B1F/Gsでは、周期0.5秒以下の短周期領域において表層地盤の卓越周期との関係でやや複雑なスペクトル比の形状を示しているが、全体的にはスペクトル比は1.0以下の値を示しており、B1Fが約GL-4.5mで、地表面観測点であるGL-1.5mより下位にあることを考慮しても、周辺地盤の地震動振幅に比べB1Fでは振動振幅は減少し、建物と地盤の相互作用による入力損失効果によるものと考えられる。

(3) 23号館の伝達関数

図-10および図-11は、23号館における観測記録から、23号館免震建物の免震層上部階の伝達関数として8階と地下1階のフーリエスペクトル比(8F/B1F)と免震層を含む上部構造の伝達関数として8階と地下2階のフーリエスペクトル比(8F/B2F)の算定結果を示す。また、図-12には免震層上下階の伝達関数として地下1階と地下2階のフーリエスペクトル比(B1F/B2F)の算定結果を示す。さらに、図-13に建物周辺地盤と23号館建物間の伝達関数として、地下2階と地表面での観測記録のフーリエスペクトル比(B2F/Gs)により算定した結果を示す。

図-10に示した8F/B1Fでは、X方向で約0.6秒、Y方向で約0.55秒付近に明瞭なピークが認められ、観測された16地震の多くの地震記録において共通したピークとなっており、免震層上部であるB1F以上の上部構造の1次固有周期に対応する。一方、図-11に示したように免震層を含む23号館上部構造全体の伝達関数である8F/B2Fにおいては、X方向で約0.6~1.0秒、Y方向でも約0.55~1.0秒付近にピーク周期が分布し、B2Fで観測されたAmax値の振幅レベルによりピーク周期およびピーク値(スペクトル比)が変動している。これは、免震層の復元力特性に依存する免震効果によるものと考えられる。

また、図-12に示した免震層を挟む上下階のスペクトル比であるB1F/B2Fは、X、Y方向において表層地盤の卓越周期(約0.24秒、0.09秒付近)と上部構造のピーク周期(約0.6秒、1.0秒付近)で大きく変動するものの、周期約1.0秒以上の周期領域では伝達関数(スペクトル比)は約1~2倍程度で安定する傾向を示している。一方、Z方向では表層地盤の卓越周期(約0.15秒、0.05秒)で大きな変動を示すほかは、スペクトル比で約1倍を示し、全周期領域で増加は認められない。

図-13には、23号館建物と周辺地盤の伝達関数として、建物基礎上部と地表面位置での観測地点のスペクトル比であるB2F/Gsを算定した結果を示した。同図によれば、1号館におけるB1F/Gsの場合と同様に周期約0.5秒以下で大きく変動し、周期の増加とともにスペクトル比は増加傾向を示している。また、B2Fにおいて大きな入力レベルを観測した場合に、免震層を含む23号館全体の上部構造の伝達関数(8F/B2F)において見られた周期約1.0秒付近において、やや大きく変動した後スペクトル比はほぼ平坦となる傾向を示している。これらの傾向は、建物と周辺地盤の相互作用によるものと考えられる。

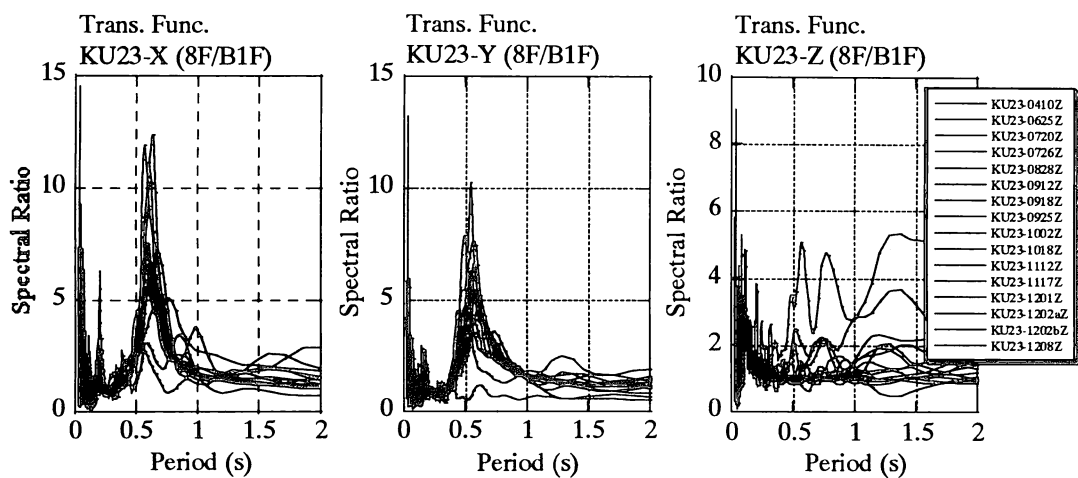


図-10 23号館の免震層上部層階の伝達関数 (8F/B1F)

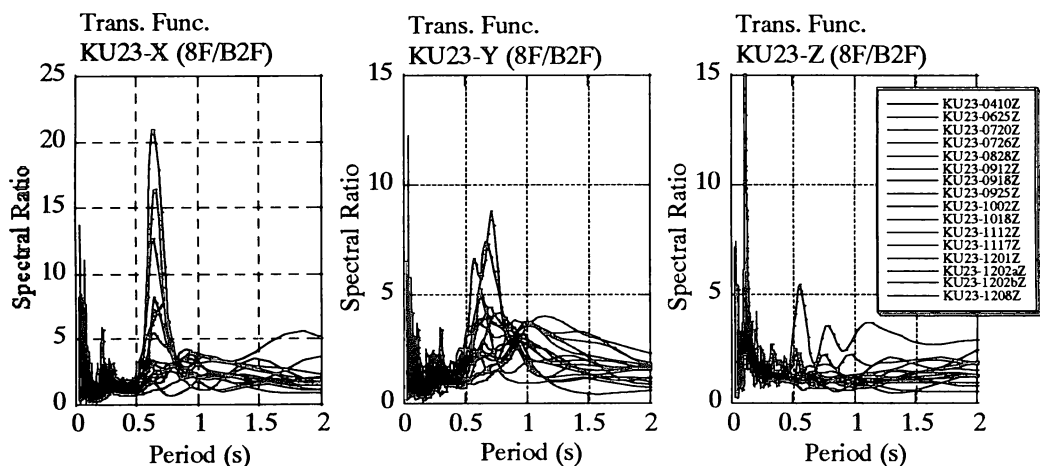


図-11 23号館の上部構造の伝達関数 (8F/B2F)

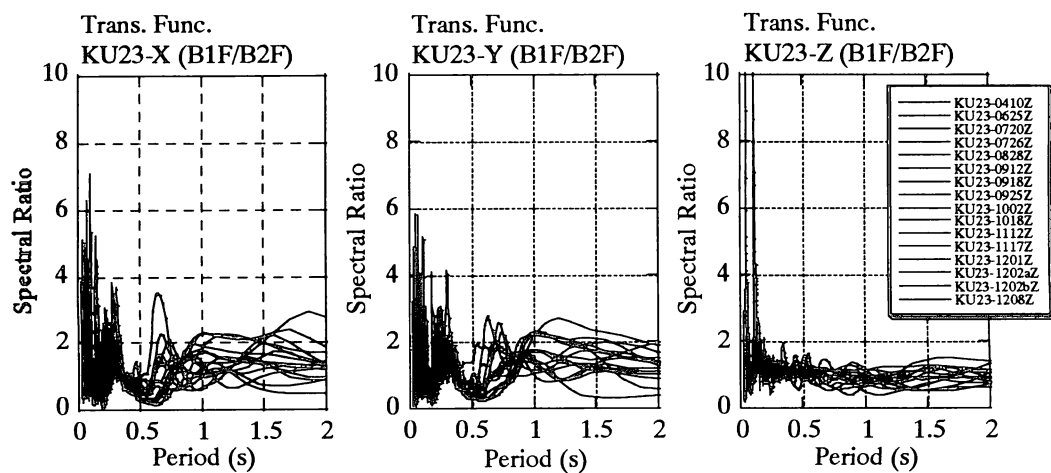


図-12 23号館の免震層上・下階層の伝達関数 (B1F/B2F)

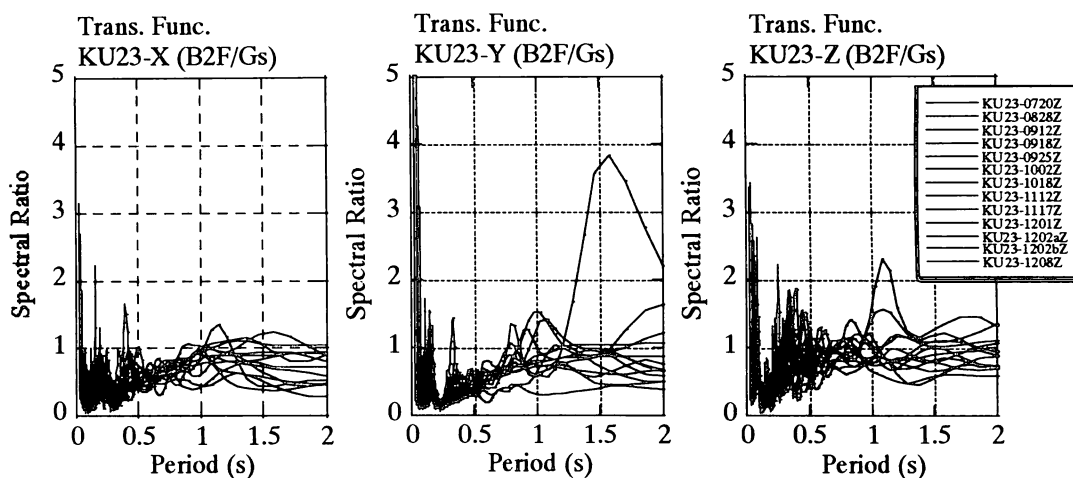


図-13 23号館建物と周辺地盤の伝達関数 (B2F/Gs)

6. 23号館免震建物の動的挙動

図-6 (b) に示したように、23号館においては地中 (GL-21.8m) から地表 (GL-1.5m) までの加速度が増幅し、地表 (GL-1.5m) から B2F で低減され、それより上の階ではそれほど増幅することなく、また B2 階で比較的大きな A_{max} を示す場合 (No.7, No.15) には、B1F での A_{max} は減少する傾向を示している。図-6 (a) には非免震建物の 1 号館の加速度応答比率を示してあるが、23号館と同様に地中に比べ B1F では A_{max} が低減されているがそれより上の階では、ばらつきが生じるものの 23号館と比較すると A_{max} の分布に顕著な違いが認められる。この差異は、23号館建物の免震層の効果によるものと思われる。特に 2001、年 9 月 18 日に観測された比較的大きな No.7 地震では、免震層の効果が明瞭である。図-14 では、7 月 26 日 (No.4) と 9 月 18 日 (No.7) の観測記録について、免震層を含む 8F/B2 での伝達関数と免震層を含まない 8F/B1 のそれを示したもので、後者の 8F/B2F では 1 秒強に卓越するピークが見られ長周期側にシフトしている。このことから免震層の効果を確認することができる。

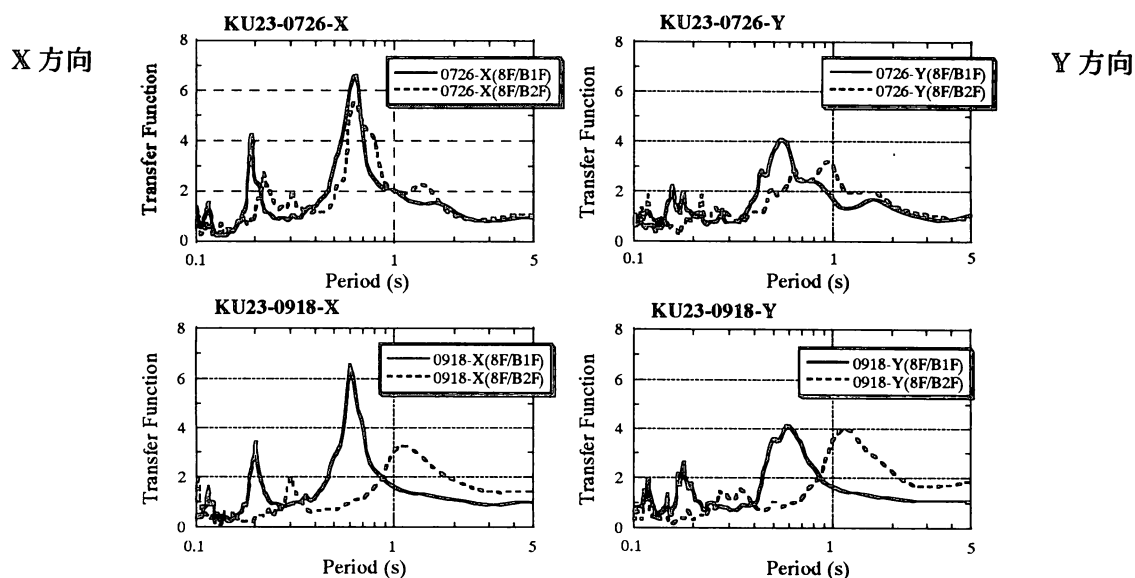


図-14 免震層の有無による上部構造の伝達関数の相違 (上: No.4, 下: No.7)

また、図-15 には、同地震による最上階（8 階）の観測記録から水平面（床面）での応答を加速度記録から積分して求めた変位による応答性状について検討した結果を示した。

図より、新 1 号館では 23 号館に比べて変位振幅が約 3～4 倍程度大きく生じており、X 方向、Y 方向ともに比較的大きく振動する。一方、23 号館では Y 方向に比べ X 方向の振幅が大きく振動性状を示している。これは、両号館の平面形状の相違によるものと考えられるが、動的挙動の相違を明瞭に示しているものと考えられる。

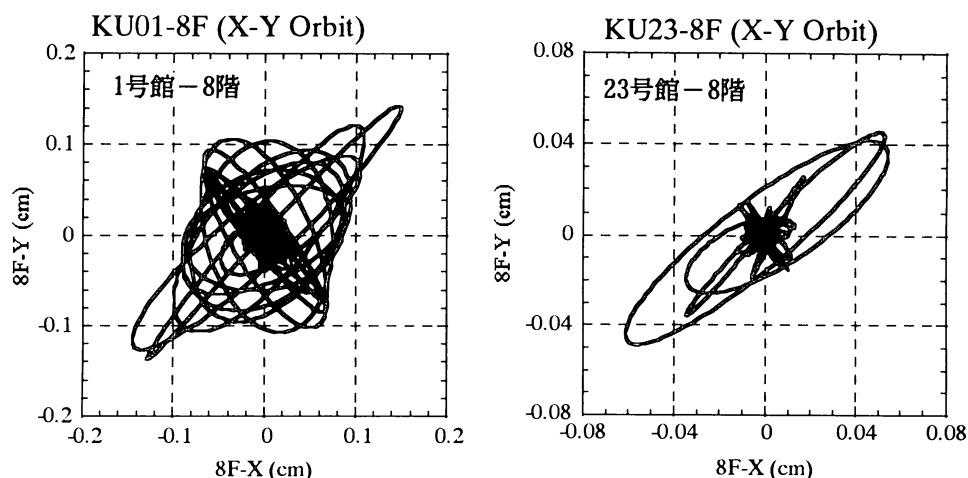


図-15 新 1 号館および 23 号館最上階の水平方向の動的挙動

7. 結論

神奈川大学横浜キャンパスの 1 号館および 23 号館に設置された動的挙動観測システムにより、2001 年 4 月から観測された 16 地震の地震観測結果から以下の結果が得られた。

- 1) 建物周辺地盤は明瞭なコントラストを有する支持層（土丹層）が存在し、これより上層の表層地盤の卓越周期は、1 次振動で約 0.24 秒、2 次振動で約 0.08 秒と推定される。
- 2) 建物基礎の振動振幅は周辺地盤の振動振幅に比べ減少し、建物最下層位置と GL-1.5m 位置での観測記録のスペクトル比（伝達関数）から相互作用による入力損失効果が認められる。
- 3) 観測された地震動の水平最大加速度（ A_{max} ）値の鉛直方向の分布より、非免震構造である 1 号館に比べて 23 号館では免震層上部で振動振幅が増幅しないことが確かめられた。
- 4) 1 号館の上部構造の固有周期は、X 方向約 秒、Y 方向約 秒であり、23 号館では免震層上部の固有周期は X 方向 0.60 秒、Y 方向 0.55 秒であるが、免震層を含む上部構造では、建物最下層の入力地震動レベルにより異なり、X 方向 0.60～1.0 秒、Y 方向 0.55～1.0 秒に大きなピークが認められた。これらの結果は、常時微動測定や起振器実験により事前に確認された結果とほぼ整合する。
- 5) 23 号館免震層の復元力特性は微小振幅レベルから変化し、起振器実験においても認められた微小な相対変形レベルにおいても等価せん断剛性は低下する傾向がある。免震装置の特徴を考慮して、微小振幅レベルにおいて剛性と減衰の影響を考慮する復元力特性の検討が必要であると考えられる。

<参考文献>

- 1) 吉田和彦 他、「神奈川大学 23 号館(免震棟)および新 1 号館の振動実験(その 1)(その 4)」日本建築学会大会、2001 年 9 月
- 2) 鹿島技術研究所、「神奈川大学（仮称）新 3・4 号館振動性状確認実験報告書（概要版）」、2001 年 2 月
- 3) 日本建築学会基礎構造系振動小委員会、「入門・建物と地盤の動的相互作用」、日本建築学会、1996 年 4 月