

【3.2.1 地震観測結果】成果①

神奈川大学 23 号館（免震棟）の強震観測結果

— 地震時の動的挙動の検討 —

荏本孝久*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)構造計画研究所防災・環境部

1. はじめに

神奈川大学横浜キャンパスに新築された 23 号館は免震構造を有する RC 造建物（地上 8 階，地下 2 階）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。本報では、地震観測システムの概要と 2003 年 9 月までに観測された地震観測結果から得られた地震時動的挙動について報告する。

2. 地震観測システムの概要

地震観測システムは、図-1 に示すように同時期に新築された 1 号館（地下 1 階，地上 8 階：非免震構造）および 23 号館（地下 2 階，地上 8 階：免震構造）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。全体の観測システムは、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。本報では、主に 23 号館（免震棟）の地震観測結果について報告する。建物概要と地震計設置位置を図-2 に示す。

動的挙動観測装置システム構成

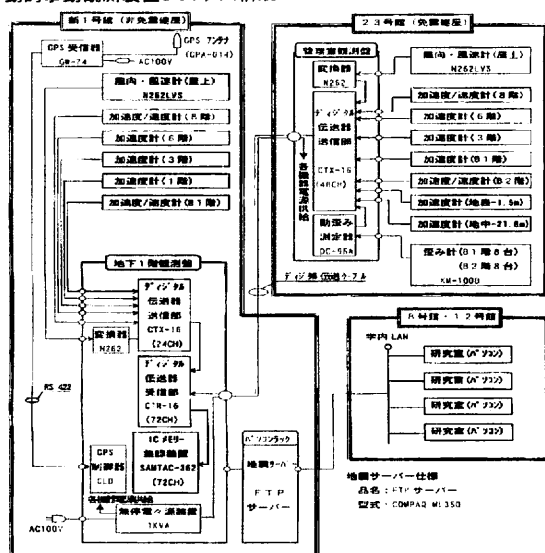


図-1. 神奈川大学地震観測システム

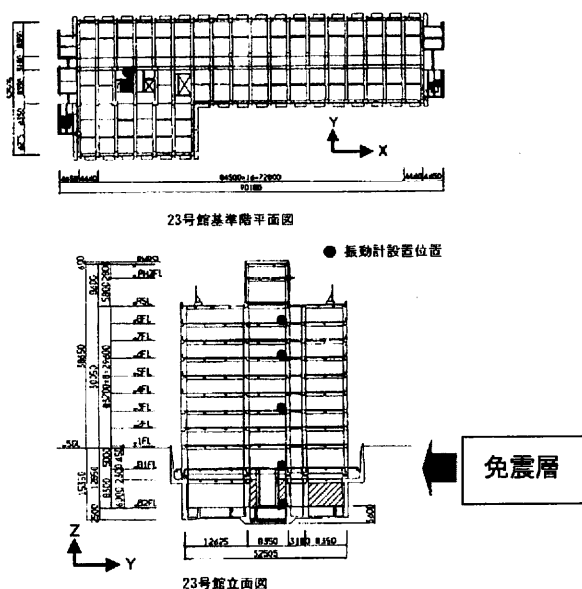


図-2. 23 号館の建物概要と地震計設置位置

3. 観測結果の概要

地震観測記録は、2003年9月までに39地震が観測された。地震の規模は、M3～M4程度の近距離地震が多く、多少M6～M7の遠距離地震を含むが、地震動の振幅は比較的小さい。このため観測記録は、各年毎（01年：Ⅰ期，02年：Ⅱ期，03年：Ⅲ期）に整理している。表-1に2000年12月（Ⅰ期）までに観測された16地震の諸元を示した。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、23号館B2Fで12.45gal（X）、9.16gal（Y）、8Fで6.77gal（X）、7.51gal（Y）となっている。また、図-3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。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、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。

表-1. 地震観測結果（2001.04-2001.12）

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

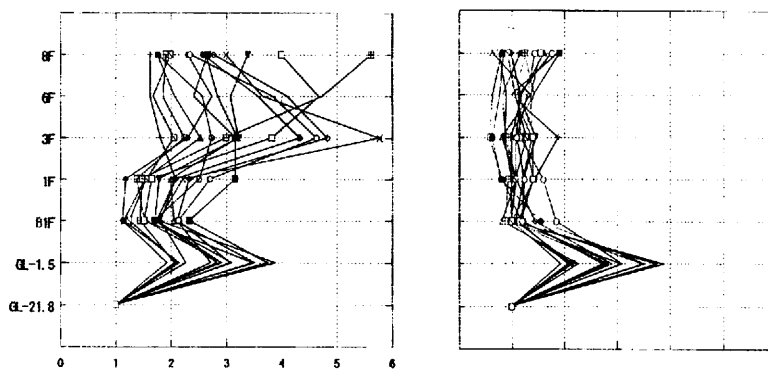


図-3. 最大加速度値の鉛直分布
（左：X方向，右：Y方向）

4. 伝達関数の検討

図-4および図-5は、表-1（Ⅰ期）の観測記録により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。図-4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-5 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。

以上の傾向は、Ⅱ期およびⅢ期における観測記録においても同様な傾向を示している。

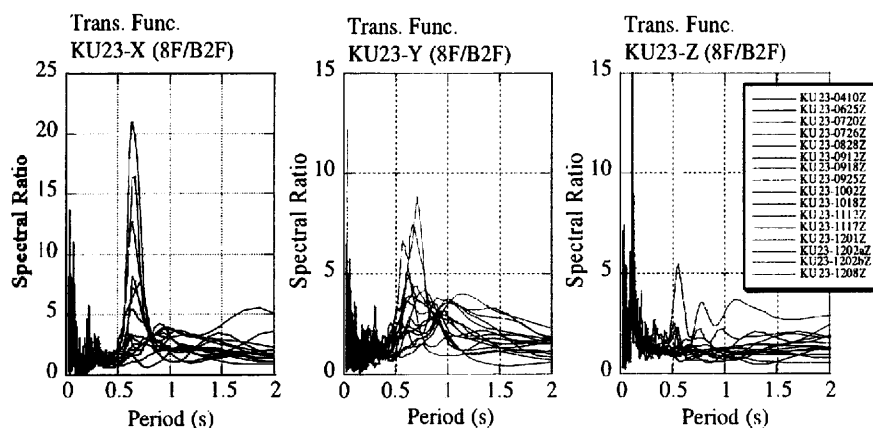


図-4. 伝達関数 (8F/B1F)

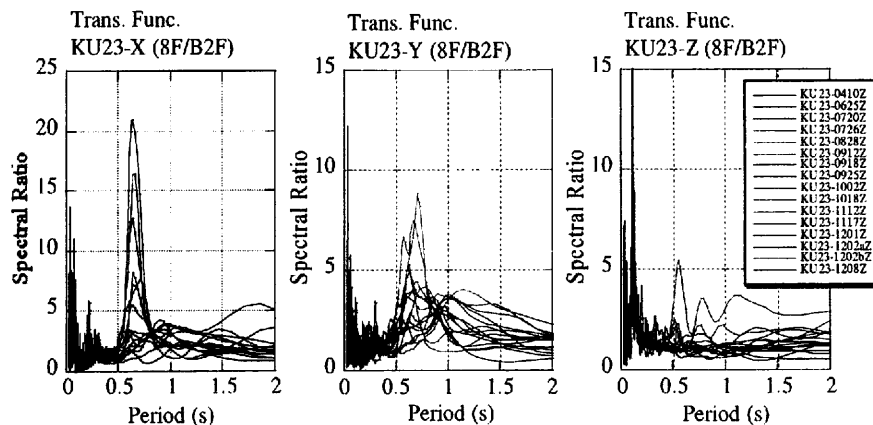


図-5. 伝達関数 (8F/B2F)

5. 23 号館免震建物の動的挙動

図-6 では、2001 年 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、地震動の振幅レベルのより大きなケースである後者の 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みることができる。

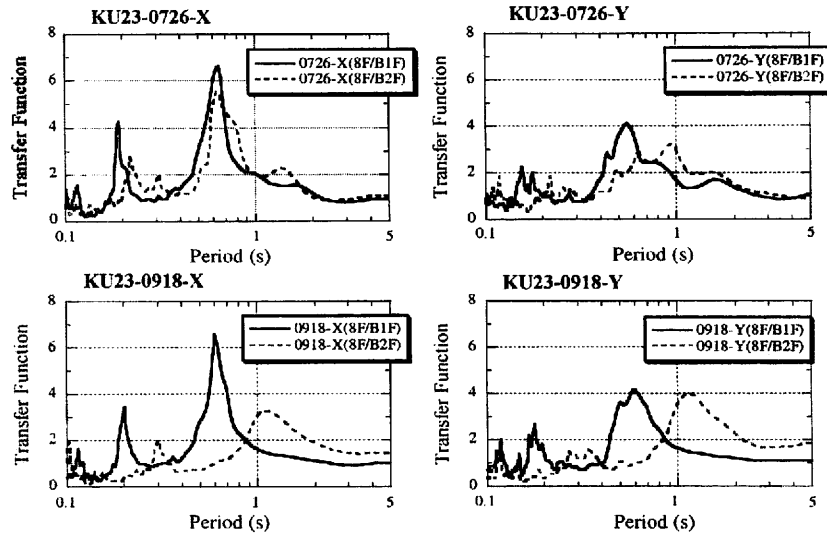


図-6. 免震層の有無による伝達関数の相違
(上 : No.4, 下 : No.7)

6. 免震層の復元力特性

図-6 に示すように、免震層は明瞭な免震性能を示す。本報では免震層の動的挙動に関する初歩的な検討として、免震層の復元力特性について検討した。ここでは、図-7 に示すように建物の質量分布を集約し、観測された地震記録を用いて免震層に生じた層せん断力を(1)式により算定した。また、免震層の層間変位は免震層を挟むB1FとB2Fの絶対加速度の観測記録を各々数値積分して絶対変位を算出した後に(2)式により層間変位を算出した。ここでは、一例としてⅢ期の2003年5月17日と同5月26日の観測記録を用いて算出した結果を示す。図-8 は、両地震時における主要時間帯の免震層の復元力特性を示したものであり、図-9 は算出した層間変位と層せん断力の時系列波形を示したものである。この結果、X 方向に比べて Y 方向に大きな非線形性が認められ、層間変位の振幅レベルの変化に対応する復元力特性の変化が認められる。特に、層間変位の大きかった後者の場合には明瞭な変化が認められた。

$$Q_{B2F(t)} = \sum_{i=B1F}^{RF} \frac{W_i}{g} \ddot{X}_i(t) \quad (1)$$

$$\delta(t) = \delta_{B1F}(t) - \delta_{B2F}(t) \quad (2)$$

$Q_{B2F(t)}$: 免震層に作用する層せん断力

W_i : i 層の重量 g : 重力加速度

$\ddot{X}(t)$: i 層の水平応答加速度

$\delta(t)$: 免震層上下フロア間の相対変位

$\delta_{B1F}(t)$: B 1 F の水平応答絶対変位

$\delta_{B2F}(t)$: B 2 F の水平応答絶対変位

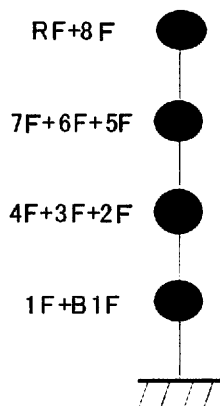


図-7 建物の集約モデル

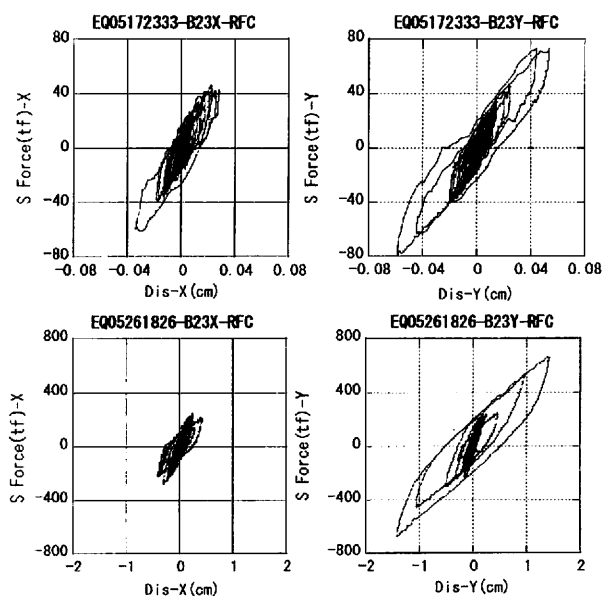
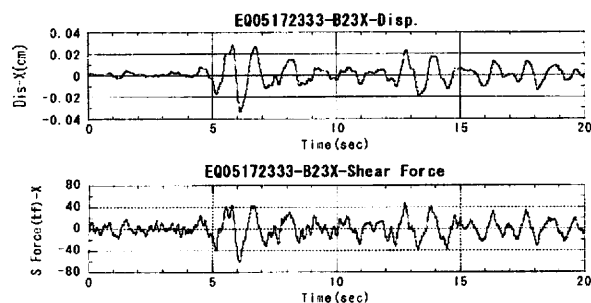
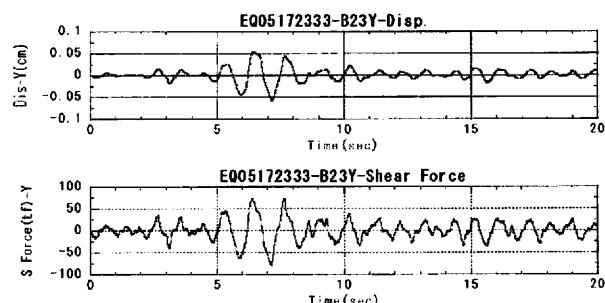


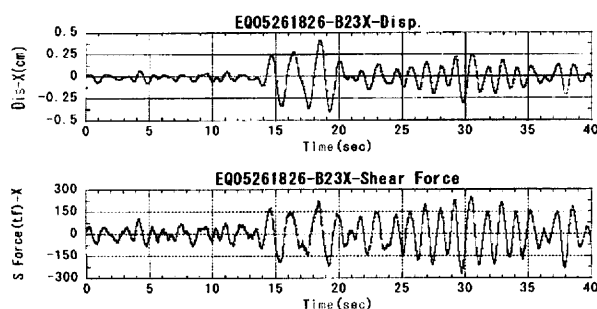
図-8 免震層の復元力特性



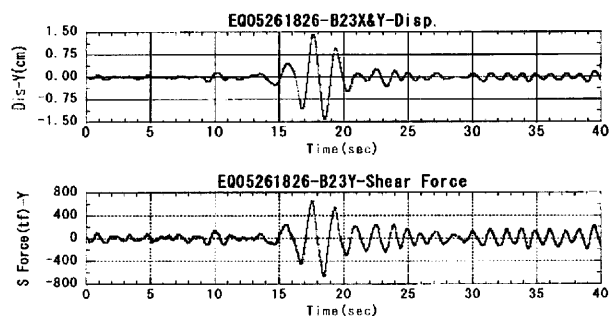
(a)X 方向 (2003 年 5 月 17 日)



(b)Y 方向 (2003 年 5 月 17 日)



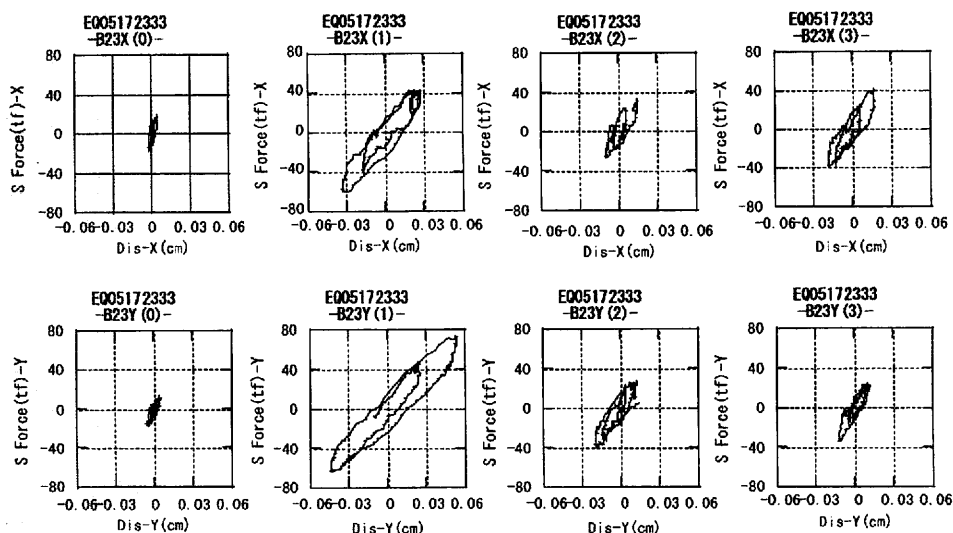
(c)X 方向 (2003 年 5 月 26 日)



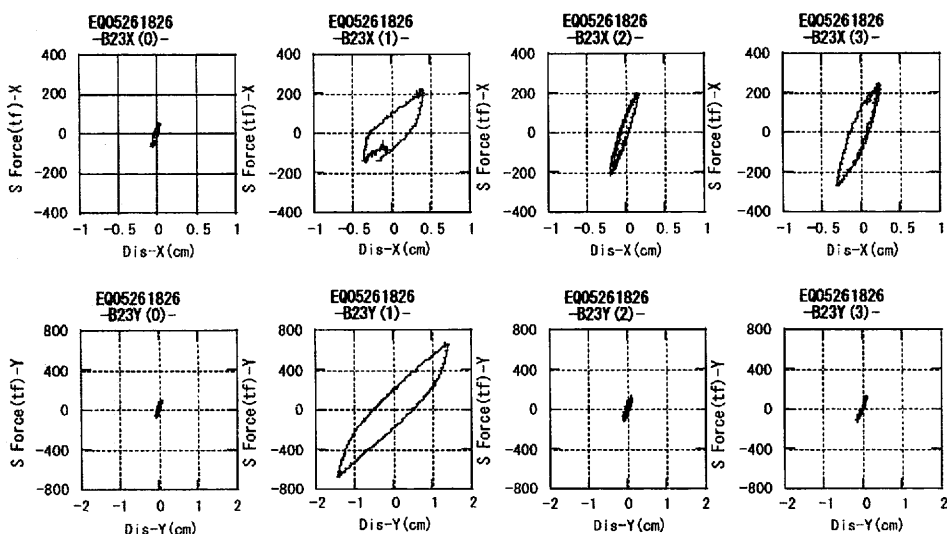
(d)Y 方向 (2003 年 5 月 26 日)

図-9 免震層の層間変位と層せん断力の算定結果

また、図-10 には 2 秒間毎に区切って振幅レベルの相違による復元力特性の変化を示した。比較的に微小な振動レベルにおいても復元力特性が異なり、地震時動的挙動を検討するためには、やや微小な振動レベルも考慮した免震層の動特性の評価が必要である。



(a) 2003 年 5 月 17 日 (上: X 方向, 下: Y 方向)



(b) 2003 年 5 月 26 日 (上: X 方向, 下: Y 方向)

図-10 振幅レベルによる復元力特性の相違

7. 復元力特性のモデル化

免震層の振幅レベルに依存する詳細な復元力特性を求めるため、Ⅱ期の観測記録を用いて上記と同様に、B1FとB2Fの加速度記録を数値積分して免震層上下階の層間対変位(δ)を求めた。この際、バンドパスフィルターにより0.003~1.80秒の周期成分を抽出した。また、免震層での層せん断力(Q_{B2F})は上記同様に質量を集約(図-7)して求めた。得られた Q_{B2F} - δ の関係を図-11に示す。 δ の結果からX方向、Y方向1周期ごと10周期を抽出した。図-11にはNo.3地震を対象として全時間、 δ が大きい時間帯、中間の時間帯、小さい時間帯の Q_{B2F} - δ の関係を示す。最終的にX、Y方向のそれぞれの復元力特性から等価せん断剛性(K_{eq})と等価粘性減衰定数(h_{eq})を算出した。図-12は、層間変位 δ と K_{eq} および h_{eq} の算出結果を示したものである。23号館の起震機実験の結果から得られた結果も同図上に示してある。

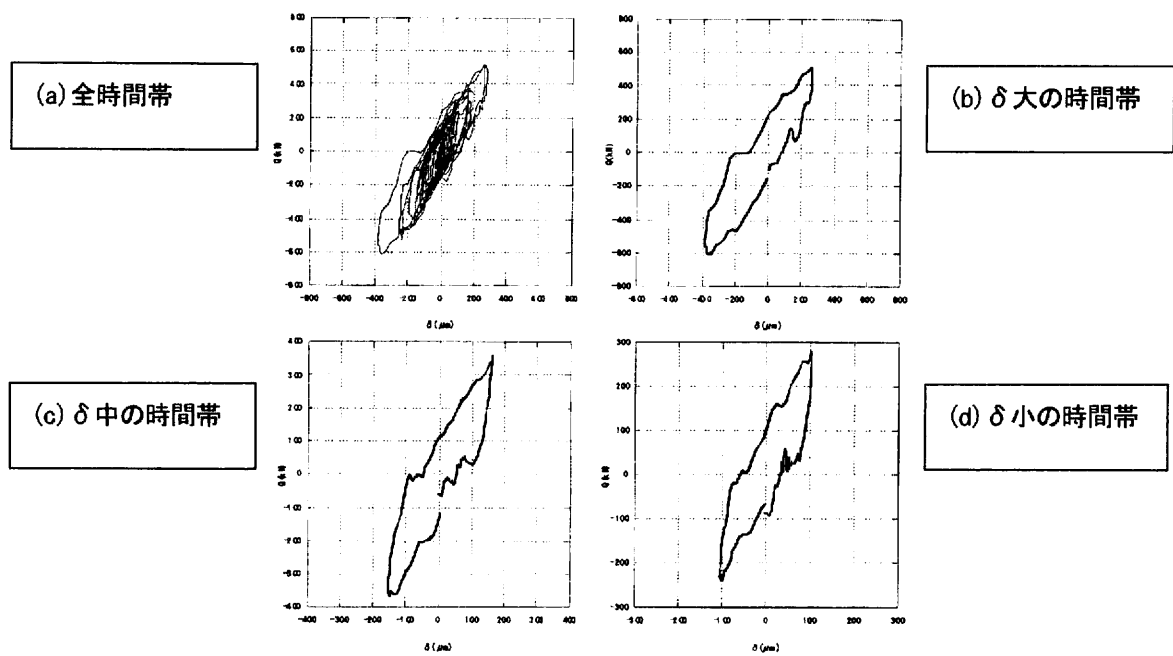


図-11 免震層の復元力特性(No. 3 地震 X 方向)

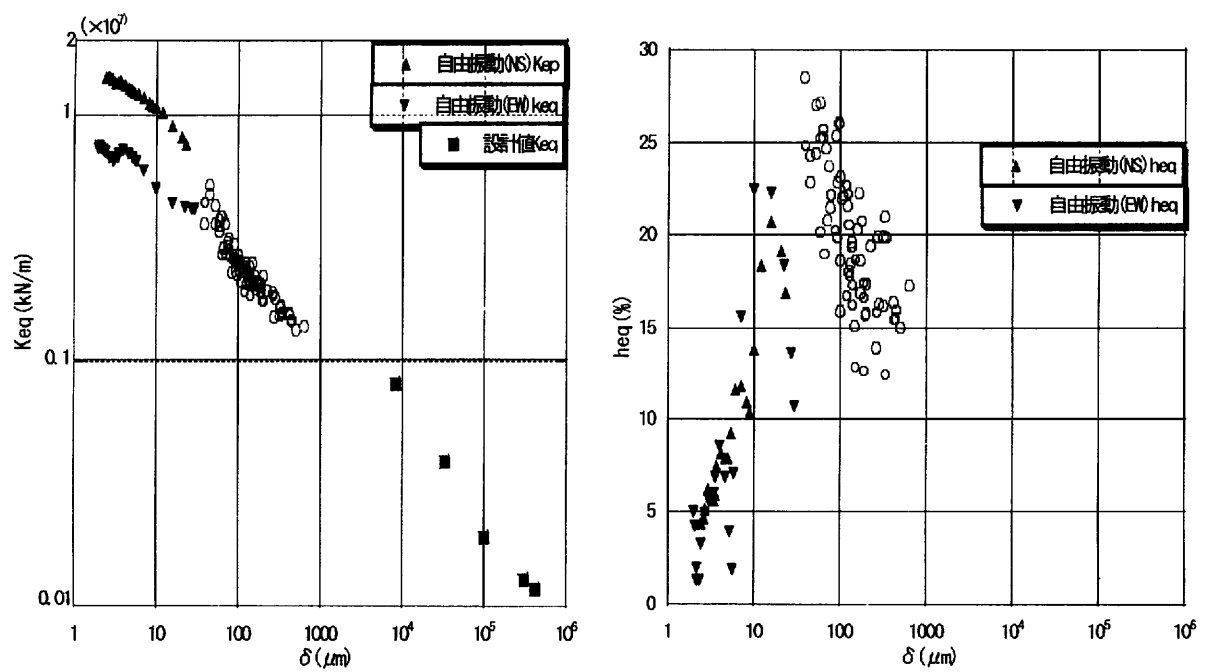


図-12 等価せん断剛性と等価粘性減衰定数の変化

8. まとめ

本報では、以下の結果が得られた。

- 1) 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、免震構造である 23 号館では、比較の入力地震動レベルが小さい段階から免震層上部で振動振幅が増幅しないことが確かめられ、免震層の効果が認められた。
- 2) 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長周期化し、異なる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。
- 3) 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、免震層の層間変位の振幅レベルに応じた動特性の評価が必要である。

前述したように免震層の等価せん断剛性は微小な相対変位から非線形性を示すことから、今後さらに多数の地震観測記録を用いて免震層の特性を明らかにし、最適な復元力特性を設定していく必要がある。

謝辞：本研究は、文部科学省学術フロンティア・横浜市産官学共同研究総合プロジェクト「地震・台風災害の制御・低減に関する研究 (TEDCOM)」によった。記して感謝致します。

【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)」日本建築学会大会, 2001 年 9 月
- 2) 安達直人、引田智樹、内山正次、大熊武司：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 3) 23 号館 (免震棟) 免震層の復元力特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp. 811-812、2001 年 9 月
- 3) 栗山利男、山本俊雄、荏本孝久：RC 造免震構造建物の地震観測結果に基づく動的挙動の検討、第 1 回日本地震工学研究発表・討論会梗概集、p. 136、2001 年 11 月