

【3.3.1 地震応答シミュレーション】成果

神奈川大学23号館（免震棟）の地震時挙動

－地震観測記録による地震応答シミュレーション－

栗山利男^{*1}、荏本孝久^{*2}、山本俊雄^{*2}

^{*1}：構造計画研究所 防災・環境部、^{*2}：神奈川大学 工学部建築学科

1. はじめに

神奈川大学23号館は、地下2階と地下1階の間に免震層を有する鉄筋コンクリート造建物であり、地震時の振動特性を明らかにすることを目的として2001年4月より地震観測が実施されている。本研究では、得られた地震観測記録を用いて23号館の地震応答シミュレーションを行い、主に23号館の地震時振動特性（周期特性）についての検討を行なった。

本研究では、まず、23号館の設計資料に基づいてモデル化した多質点等価せん断型モデルに、観測された地震記録を入力とした地震応答解析を行い観測記録との比較を行なった。次に、振動実験結果および地震観測結果に基づいて微小振幅レベルにおける免震層の復元力特性を検討し、検討した復元力特性を用いて地震応答解析を行ない観測記録との比較を行った。また、本建物は地下2階を有しており、基礎床付けレベルは設計GL-16m程度の深い埋め込みを有することから、建物周辺地盤の影響を考慮した地盤－建物連成系モデルにより地震応答解析を行った。以下に、各研究内容の概略を示す。

2. 地震観測記録に基づく地震応答解析

2.1 建物モデル

地震応答解析に用いた建物モデルは、図1に示すように各層ごとにひとつの質点を設けた基礎固定の等価せん断型モデルとした。各層の質量および剛性は建物設計時の参考に構造図書をして設定し、免震層の復元力特性は設計時に設定されたトリリニア型の復元力特性を用いた。また、建物の非線形特性については、入力となる観測記録の地震動レベルが小さいことから線形とした。

2.2 設計値モデルによる解析結果

2001年9月18日東京湾を震源とする地震により観測された地下2階での観測波形を入力として、地震応答解析を行った。図2に地震応答解析により得られた建物8階における加速度応答波形のフーリエスペクトルを同じく建物8階で観測された地震波形のフーリエスペクトルと比較して示す。図2より解析結果の卓越周期は1.4秒および0.4秒付近であり、この周期は設計時の建物固有周期とほぼ整合する。しかし、応答波形の卓越周期は、観測波形の卓越周期よりもやや長くなっている。

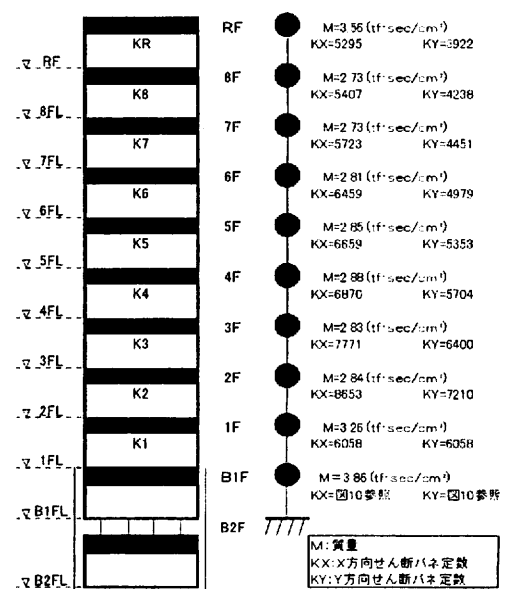


図1 建物モデル

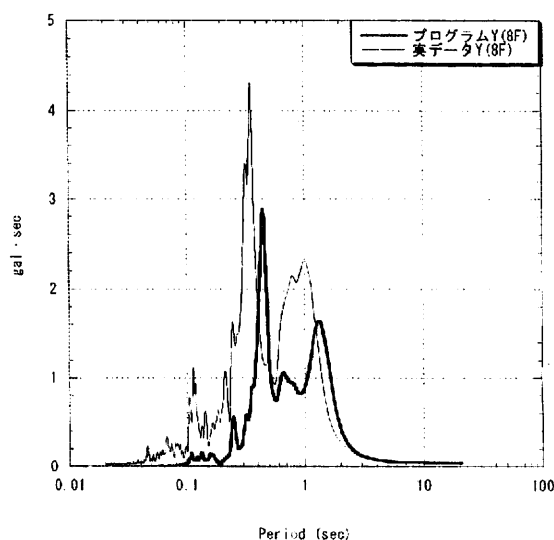
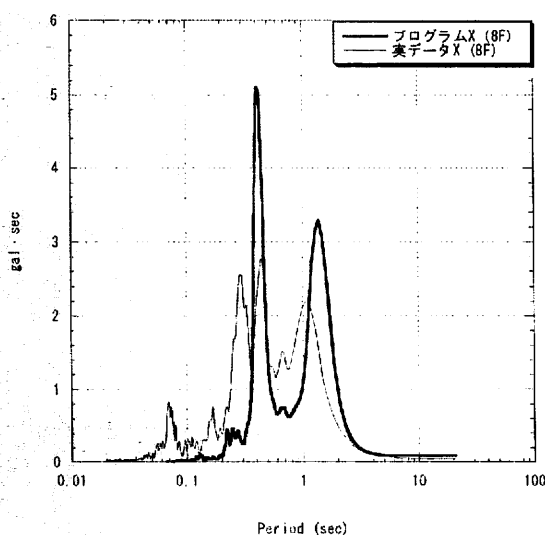


図2 解析結果と観測記録のフーリエスペクトルの比較(設計値モデル)

2.3 復元力特性の検討

23号館の振動実験結果によれば、免震層の等価せん断剛性は、微小な相対変位から非線形を有することが明らかとなっている。そこで、観測波形から算出した免震層上下階の相対変位と、地震計設置階に集約した質量を乗じた総和から求めた層せん断力との関係から、免震層の等価せん断剛性と変位との関係を求め、免震層の復元力特性を設定した。図3に振動実験結果および地震観測から得られた免震層の等価せん断剛性と変位の関係を示す。図より、観測記録より得られた等価せん断剛性は、振動実験による結果と設計値を補間した結果となっている。図4に地震観測記録に基づき設定した免震層の復元力特性を示す。

2.4 地震観測記録との比較

前節で求めた免震層の復元力特性を用いて地震応答解析を行った結果から得られた建物8階でのフーリエスペクトルを図5に示す。図5より観測記録と解析結果は振幅レベルに若干の差が認められるものの、周期特性は概ね整合した結果が得られ、免震層の復元力特性を適切に評価することにより、観測記録をより良くシミュレーションすることが可能であることがわかった。

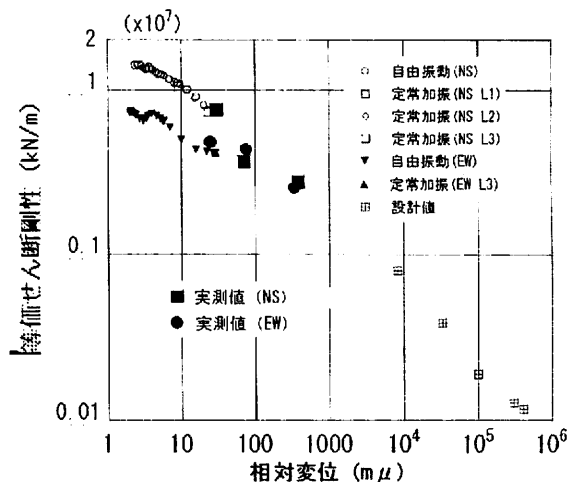


図3 等価せん断剛性と相対変位の関係

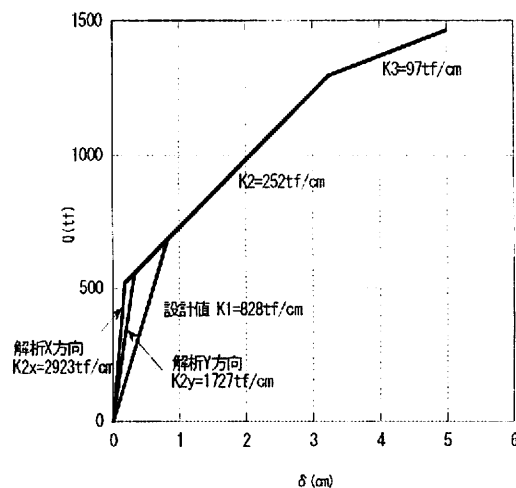


図4 地震観測記録に基づき設定した復元力特性

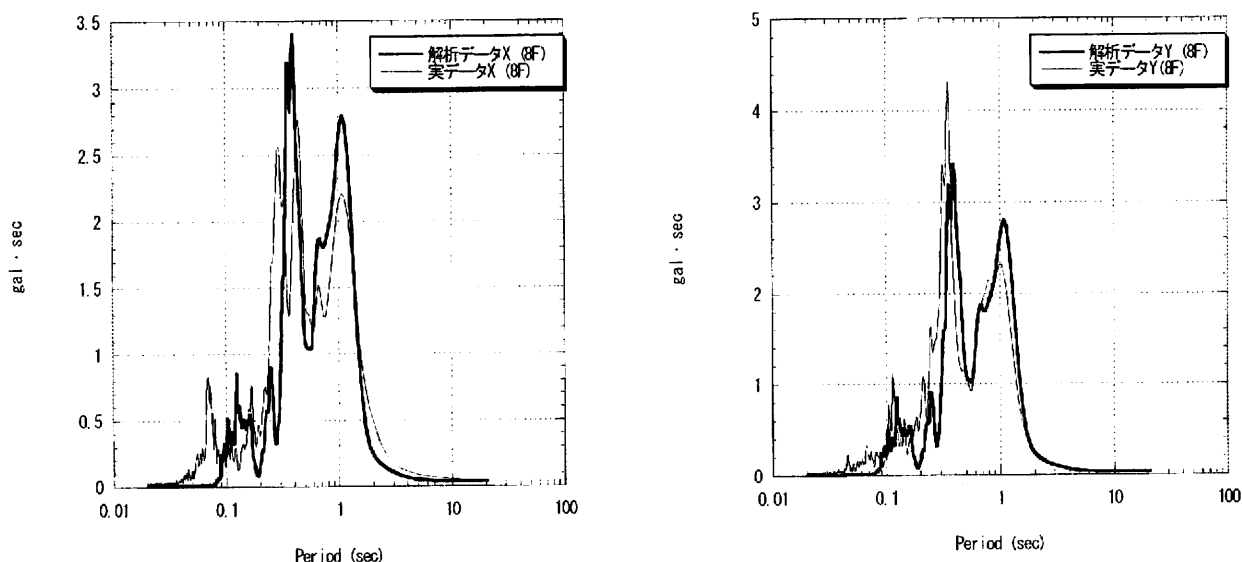


図5 解析結果と観測記録のフーリエスペクトルの比較

3. 地震観測記録に基づく復元力特性の検討

3.1 復元力特性のモデル化

本検討では、前章と同様の方法により地震観測記録を用いて免震層の等価せん断剛性と変位の関係を求め、振動実験結果も含めて等価せん断剛性と変位との関係の回帰直線を算定し、回帰直線に合うように骨曲線をべき関数に仮定して求めた。等価せん断剛性と変位の関係および算定した骨曲線に基づいて、免震層の復元力特性をモデル化し、設計時における復元力特性を含めて下記の3つの復元力特性を設定した。図6に設定した復元力特性（モデルⅡおよびモデルⅢ）を示す

モデルⅠ：設計値復元力特性

モデルⅡ：微小変位時の等価せん断剛性の変化による復元力特性を考慮したトリリニア型復元力特性

モデルⅢ：骨曲線に沿うように回帰したべき関数を近似的に5つの折れ曲がりを持つ復元力特性

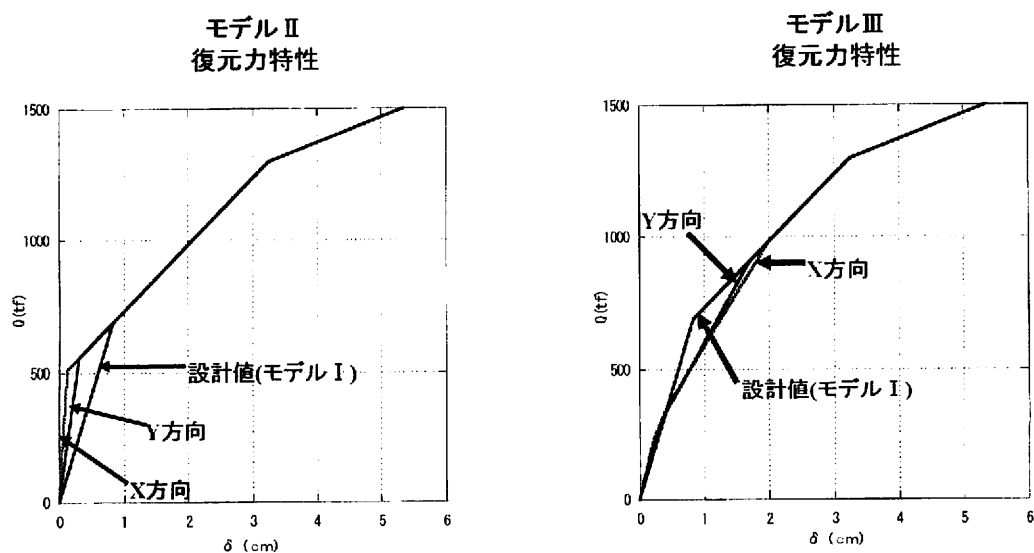


図6 設定した復元力特性

3.2 地震応答解析

前節で設定した復元力特性を用いて地震応答解析を行い、観測記録のフーリエスペクトルと比較を行った。図7に2002年5月4日に観測された地震を用いて検討した結果を示す。図よりモデルⅢよりモデルⅡの方が観測記録の周期特性をよくシミュレーションできた。地震観測により得られた記録はいずれも地表で数 cm/s² 程度の小さな地震であり、小地震時には微小変形時の等価せん断剛性の変化を考慮した復元力特性を用いることにより観測記録をよりよくシミュレーションできる。

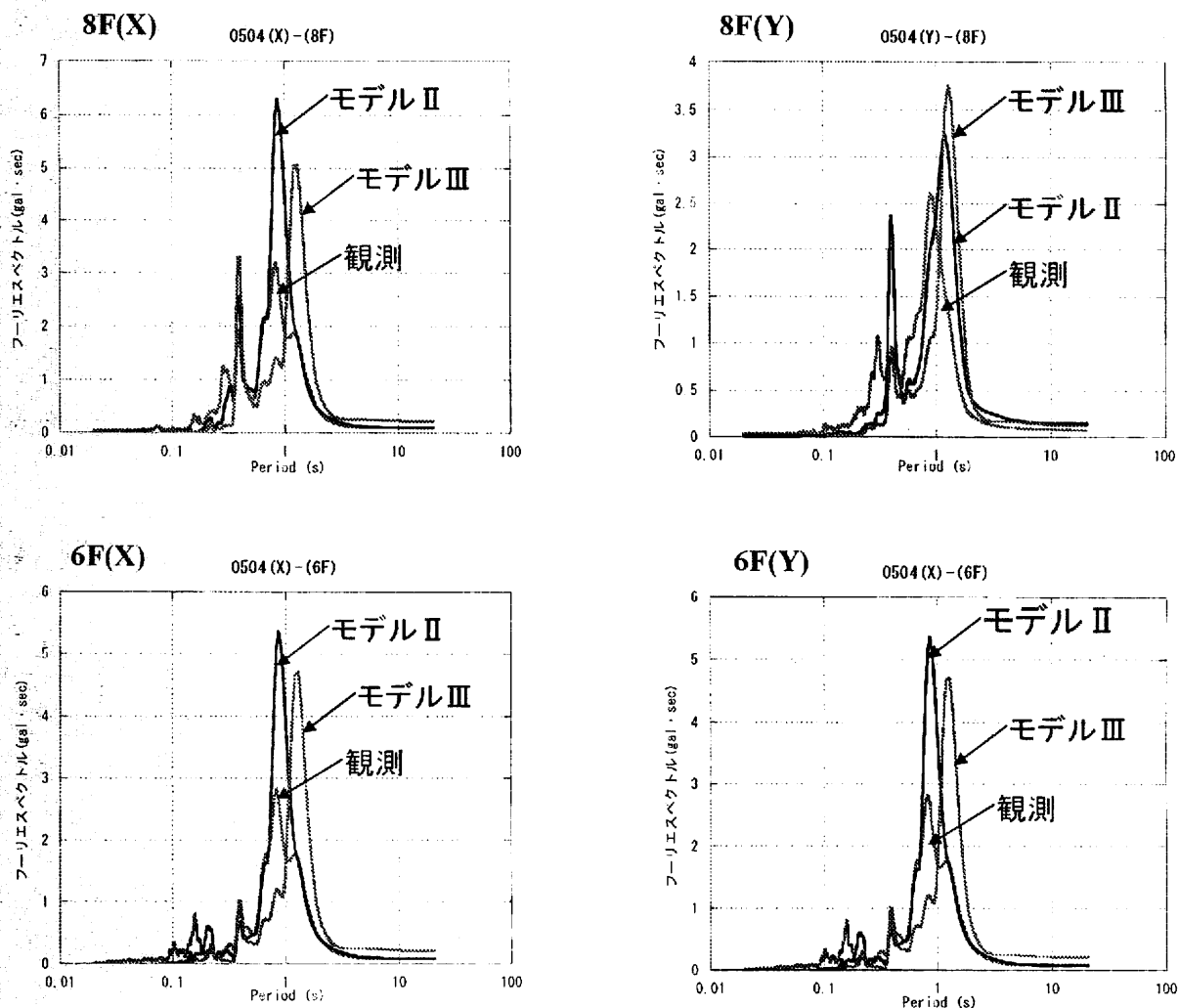


図7 解析結果と観測記録のフーリエスペクトルの比較(復元力特性の違いによる検討)

4. 地盤との連成を考慮した基礎的検討

前章までの検討は、いずれも基礎固定モデルによる検討で建物周辺の地盤の影響は考慮されていない。23号館は地下2階を有しており、GL-15m程度までの埋め込みを有している。そこで、地盤の影響を考慮するために地盤-建物連成系モデルによる地震応答解析を行った。なお、解析には2次元有限要素法による地盤と構造物の動的相互作用解析プログラム SuperFLUSH/2D を用いた。

4.1 モデル化

設定した2次元FEMによる地盤－建物連成系モデル(X方向)を図8に示す。

地盤は、ボーリング調査結果より作成された推定地質断面図からモデル化を行ない、解析に必要なせん断波速度、密度などの地盤物性値は地盤調査報告書より設定した。解析モデルの側方には自由地盤を設け、底面は半無限地盤とし、境界条件としては粘性境界を用いてモデル境界面での地震波の逸散を考慮した。

建物モデルは、前章までと同様の多質点等価せん断型モデルとし、建物埋め込み部分の側方と地盤はバネ要素で連結した。また、免震層の剛性については、前章までの検討結果における微小変形時の等価せん断剛性を用いた。本検討では扱う入力地震動レベルが小さいことから、地盤、建物、免震層ともに線形と仮定して計算を行った。

入力地震動は、GL-1.5mで観測された加速度波形を解析モデル自由地盤のGL-1.5m位置に定義し、モデル底面まで引き戻し計算を行うことにより設定した。

4.2 地盤－建物連成解析結果

ここでは、観測された最大加速度が比較的大きな地震(地表での最大加速度 30cm/s^2 程度)として2003年9月20日に観測された地震波形(No.9)を入力とした場合と、同じく最大加速度が数 cm/s^2 程度の小さな地震として2003年9月30日に観測された地震波形(No.11)の2ケースについて検討した結果を示す。図9に各地震観測位置での観測記録と計算結果の最大加速度を、図10に建物8階でのフーリエスペクトルの比較を示す。

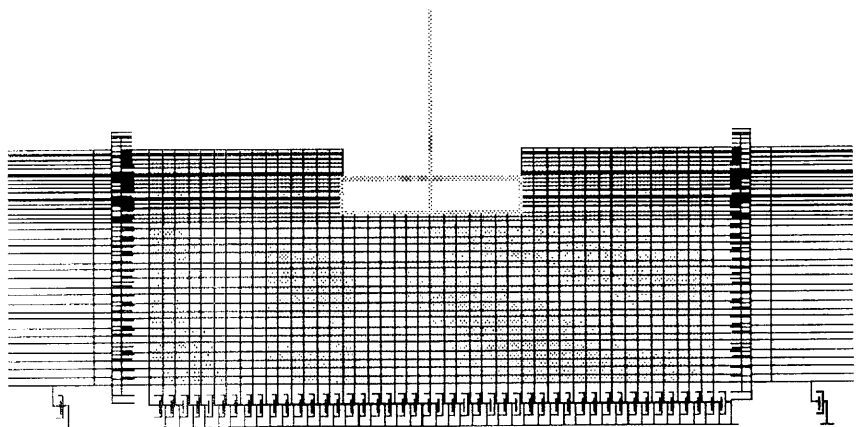


図8 地盤－建物連成系モデル(X方向)

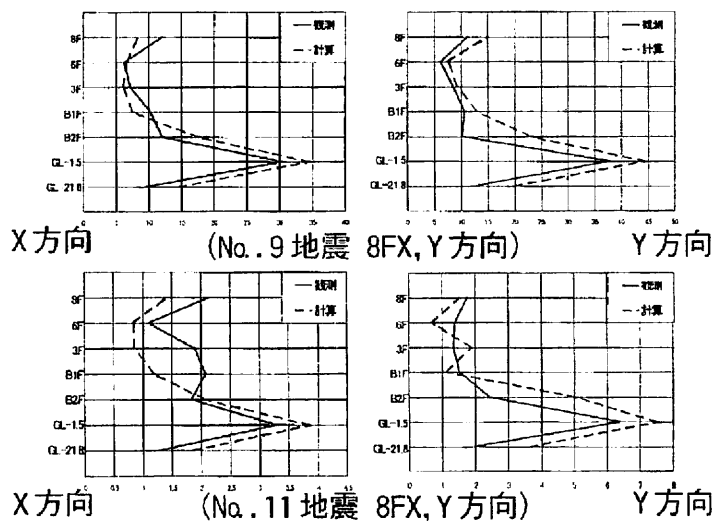


図9 最大加速度値の比較

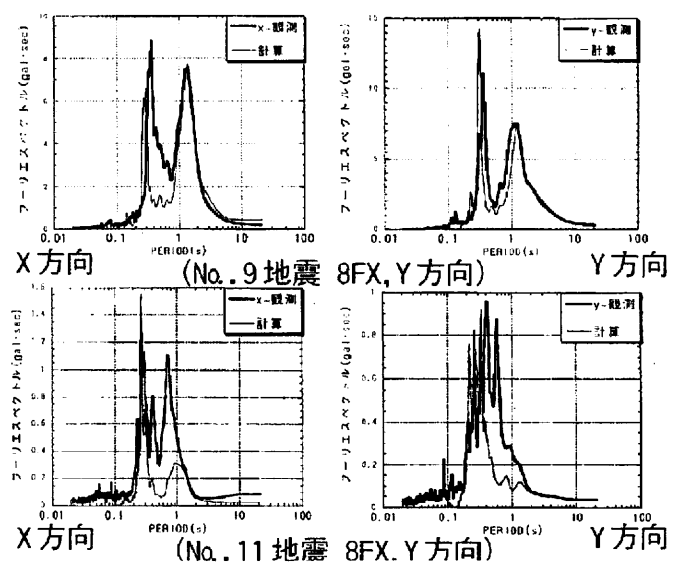


図10 フーリエスペクトルの比較

No. 11 地震については、計算結果は 0.3 秒付近の短周期成分では観測記録を比較的良好に説明できるが、0.8~0.9 秒付近の卓越については、計算結果は観測結果よりも小さな振幅となっている。一方で、比較的大きな入力レベルである No. 9 地震については図 10 に示すように計算結果のフーリエスペクトルは X 方向、Y 方向ともに観測記録のフーリエスペクトルの周期特性、振幅ともによくシミュレーションできた。

5. まとめ

本研究では、23 号館で実施されている地震観測記録を用いて、地震応答シミュレーションを行なった。観測された地震、すなわち検討に用いた地震はいずれも小さな最大加速度値を示す小地震記録であるが、本建物の免震層は微小変形時より非線形性を示すことが振動実験などから明らかにされており、免震層の復元力特性を地震観測記録に基づいて詳細に設定することにより、観測記録を比較的良好にシミュレーションすることができた。

さらに、周辺地盤の影響を考慮するために 2 次元有限要素法により地盤と建物の連成解析を行った。その結果、本研究で扱ったような小さな入力レベル（数 cm/s^2 ~ 数十 cm/s^2 ）での地震応答シミュレーションにおいては、周辺地盤の影響よりも微小変形時から特性を示す免震層の非線形性（復元力特性）の評価の方が重要であり、免震層の非線形特性を適切にモデル化することにより精度よい地震応答シミュレーションが可能となる。

参考文献

- 1) 吉田和彦他：神奈川 23 号館(大学免震棟)および新 1 号館の振動実験 その 1~その 3、日本建築学会大会、B-2、pp. 807-812、2001 年
- 2) 栗山利男他：RC 造免震構造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
- 3) 荏本孝久他：神奈川大学 23 号館（免震棟）の地震時挙動 その 1. 地震観測システムおよび観測結果の概要、日本建築学会大会、B-2、pp. 567-568、2002 年
- 4) 内山正次他：神奈川大学 23 号館（免震棟）の地震時挙動 その 2. 免震層の地震時復元力特性、日本建築学会大会、B-2、pp. 569-570、2002 年
- 5) 栗山利男他：神奈川大学 23 号館（免震棟）の地震時挙動 その 3. 地震観測記録による動的解析結果、日本建築学会大会、B-2、pp. 571-572、2002 年