

振動実験及び強震観測に基づく実在免震建物の振動特性に関する研究

名古屋大学工学部社会環境工学科建築学コース

福和研究室 野川大輔

1. 序論

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震において多くの住宅が倒壊し、多数の被害者が出て以降、住宅の耐震安全性に対する市民の意識は高まり、免震建物の需要が急増し、その数は1000棟に達しようとしている。また、2000年10月の免震構造物関連告示により、これまで大臣認定のみであった免震設計が、一般の建築物と同様に、通常の建築手続きで建設することが可能となり益々の増加が予想される。大臣認定を得る際に必要であった地震応答解析を行わない免震建物が出てくることになり、免震建物の地震時の応答性状を詳細に把握することが重要となる。これまでの研究で、上部構造の基本振動特性や免震装置の特性についてはかなりのことが解明されてきた。しかし、ねじれやロッキングおよび杭を含めた地盤との動的相互作用についての振動実験・地震観測記録は少ない。

このような観点から、本論は、名古屋市南東部に建設された実際の免震建物を利用して振動実験を行い、それに基づいて免震建物の振動性状の把握を試みた。実験は免震建物の免震装置特性および基本振動特性の確認を目的として、静的加力実験、常時微動測定、自由振動実験を行った。これらの実験はダンパーを取り外した状態と設置した状態で行われているため、ダンパーの振動性状への影響の検討も行う。また、地震時の免震建物の挙動を把握する目的で強震観測システムが構築されており、ねじれ、ロッキングおよび動的相互作用も考慮できるように建物、地中に強震計が、さらに杭の挙動を把握する目的で側杭と中杭の杭頭部にひずみ計が設置されている。本論では、これら各種実験内容、実験結果とあわせて強震観測システムで得られた地震記録について、振動特性を中心に検討している。

2. 建物・免震装置概要

対象建物は4階、塔屋1階の鉄筋コンクリート造純ラーメン構造で、長辺方向26.5m(3スパン)、短辺方向12.1m(1スパン)の長方形平面を持った整形な建物である。設計上、重心と剛心はほぼ一致している。図1に断面図を示す。

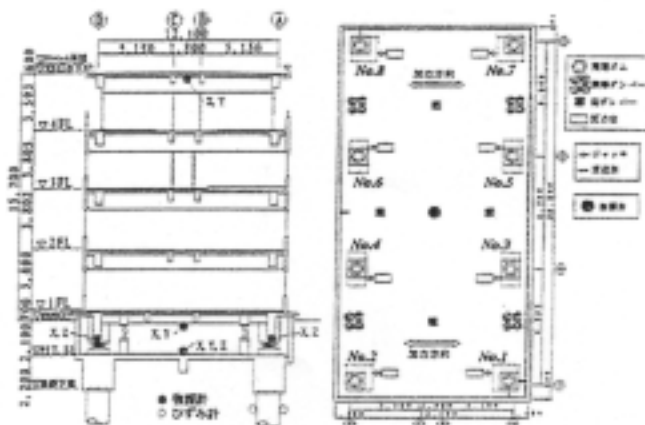


図1 断面図

図2 免震装置配置図

免震装置はアイソレータに天然ゴム系積層ゴム、減衰装置に鋼棒ダンパー及び鉛ダンパーを採用し、1階床下部と基礎との間に設置した基礎免震となっており、図2に免震装置配置図を示す。積層ゴム8基、鋼棒ダンパー、鉛ダンパーがそれぞれ4基設置されている。免震装置の復元力特性はTri-linear型で、第1、第2降伏点はそれぞれ鉛ダンパー(降伏変位1cm)、鋼棒ダンパー(降伏変位3cm)に対応している。

3. 実験・強震観測概要

図4に微動計測位置を、図5に自由振動計測位置を、図1~3に強震観測位置をあわせて示す。自由振動実験は急速解放付弁付き油圧ジャッキを使用し、所定の変形量まで水平変形させた後、急速解放を行なって自由振動を発生させる方法で行なった。初期変形量は20、50、70mmである。振動レベル計とサーボ型加速度計を用いて計測を行なった。強震観測は建物及び地盤にサーボ型加速度計を設置し、建物のねじれ・ロッキングも検出できるようにになっている。また、ピットと1階の相対変位を計るひずみゲージ式変位計と、杭の挙動の把握を目的としたひずみ計(鉄筋計)も併せて設置されている。

4. 免震建物の振動性状

ここでは免震建物の振動性状として、特に固有振動数・減衰定数の振幅依存性、ねじれ振動、地盤と杭の動的相互作用を選んで説明する。

まず、振幅依存性を見るため、それぞれの実験、地震観測の記録から固有振動数、減衰定数を求めた。自由振動実験はゼロ・クロッシング法により固有振動数を、対数減衰率より減衰定数を求め、常時微動における固有振動数・減衰定数はRD法から求めた。また、地震記録については、固有振動数はフーリエスペクトル比の卓越振動数から、減衰定数は簡易的に出すため1/2h法を用いた。結果を図6に示す。積層ゴムのみでは固有振動数は0.3Hz、減衰定数は4%付近に集中しており振幅依存性は認められない。一方、積層ゴム+ダンパーでは、振幅が大きくなるにつれ固有振動数は低下し、減衰定数は増大して

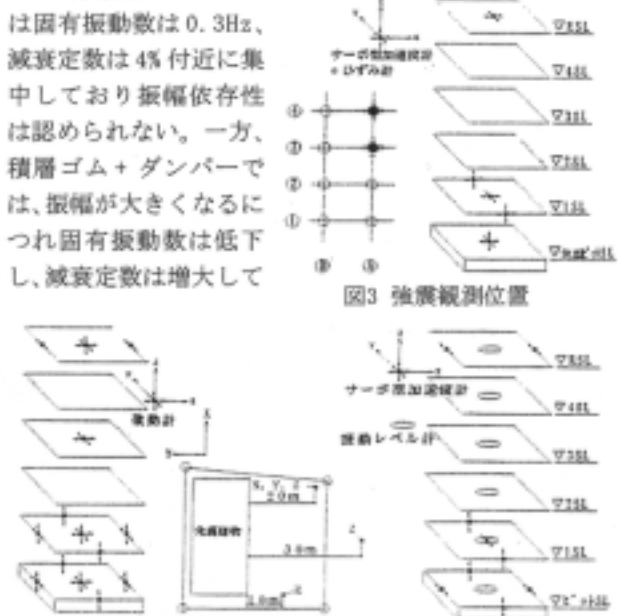


図3 強震観測位置

図4 微動計設置位置

図5 自由振動計測位置

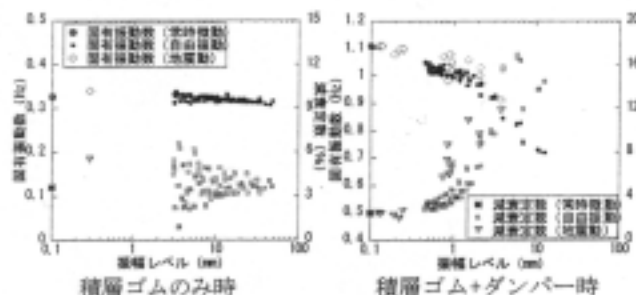


図6 固有振動数・減衰定数の振幅依存性

おり、顕著な振幅依存性が認められる。また、減衰定数には乱れがほとんど見られず、ダンパーにより安定した減衰が与えられていることが分かる。

次に、ねじれ振動の影響を検討するため、地震記録を用い、1階南北端EW成分の差の1/2をねじれ成分とし、1階中央のEW方向を並進成分として分析を行なう。図7に並進成分とねじれ成分の加速度波形とフーリエスペクトルを示す。図7より、ねじれ成分のスペクトルのピークは並進成分の1次固有振動数に近接して現れており、振幅が並進成分の1割程度と大きな割合で励起されている。ここで常時微動記録から、1次固有振動数における振動挙動を見るため、固有周期の1/4秒毎の1階の変位を図8に示す。この図は平面図を表し、1階の中央・東西南北端の観測5地点を結び十字型となっており、各点において観測された速度記録を変位に変換し、変位倍率(5.0×10⁶)を掛けて表してあり、濃線、薄太線、細濃線の順で振動している。図7より、微動時にはねじれ成分が並進成分よりも大きな割合で現れており、並進とねじれが連成して振動していることが分かる。また、図8の地震記録において、並進・ねじれ両成分の後続位相のおいてうなりを伴う振動が長く続いている。この原因も並進・ねじれの連成モードが大きく関与していると考えられる。これらの実記録をふまえた上で、設計時における解析との比較を行なう。固有値解析の1次における結果を図10に示す。これより、1次モードには大きな割合でねじれ成分が含まれていることが分かる。また、並進する方向が建物の長辺方向・短辺方向といった軸と関係のない方向に動いており、免震層には方向性がないことが明確に現れている。このことが並進・ね

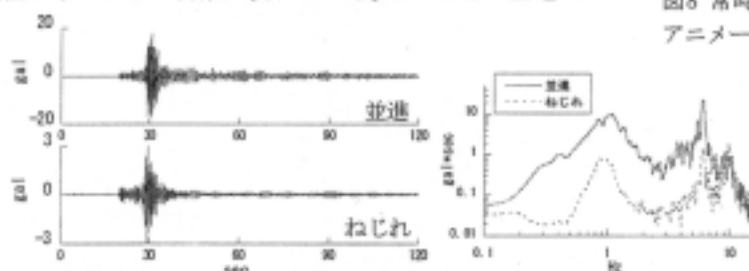


図7 地震時の並進・ねじれの波形とフーリエスペクトル



図9 解析結果(モード図)

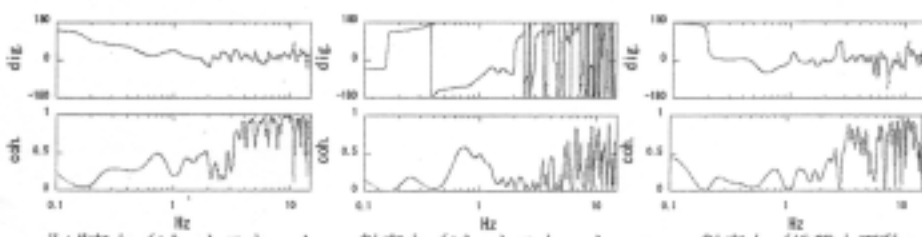


図11 建物及び地盤に対する杭頭部応力度位相遅れ・コヒーレンス

じれの連成モードが励起されやすい原因と考えられる。本建物は偏心率が小さいにも関わらずねじれが励起されているため、免震建物の設計においてねじれ振動を十分留意しなければならないことを示している。

地震時の地盤と杭の動的相互作用の特性を検討するため、杭断面の端部における応力の差の1/2から曲げ応力度を、平均値から杭の軸応力度を求めた。図10にピットのスウェイ、GL-1nの上下動と共に杭応力を示す。図12にピットのスウェイや地盤に対する杭応力の位相遅れとコヒーレンスを示す。ピットのスウェイと杭の曲げ応力の波形はととても似ている。また、高いコヒーレンスが得られており、位相についても同位相となっていることから、ピットのスウェイによって杭頭部に曲げ応力が生じたものと考えられる。また、軸応力度に関しては地盤の上下動に対して同じようなことが見られ、相関が高いように思われる。軸応力度に比べ曲げ応力の方が大きくなる傾向にあり、ピットのスウェイが杭の変動応力に大きな影響を与えていることが分かる。また、中杭よりも側杭の方が大きくなっており、群杭効果によるものと考えられる。

5. 結論

免震建物における振動実験及び強震観測に基づいて建物振動特性について考察を行ない、以下の知見が得られた。複数の実験と地震観測から、固有振動数と減衰定数は設計値とほぼ一致しており、ダンパーの設置時には顕著な振幅依存性が確認された。免震建物においては偏心が十分小さい建物であるにも関わらず、ねじれが大きく励起され、並進・ねじれの連成モードが大きく関与している結果となった。このことは、免震建物の設計時には十分留意しなければならないことを示している。地震記録から得られた動的相互作用効果として、杭の変動応力とピットのスウェイが高い相関性が確認された。

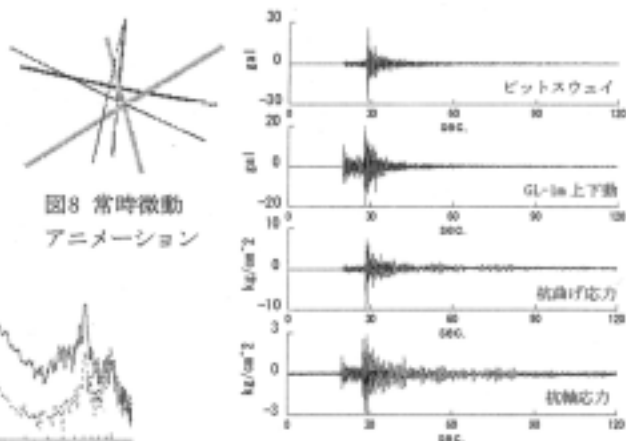


図10 スウェイ、地盤上下動、及び杭応力波形