

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20760380
 研究課題名（和文） 地盤・杭・建物連成系一体解析による杭頭免震建物のモード連成作用と制御に関する研究
 研究課題名（英文） A study on modal coupling effect of seismic isolated building with inclination of pile top by monolithic analysis of soil-pile-structure interaction and its control
 研究代表者
 小林 正人（KOBAYASHI MASAHIITO）
 明治大学・理工学部・准教授
 研究者番号：50373022

研究成果の概要（和文）：杭基礎で支持された免震建物においても、中間層免震構造と同様にモード連成作用による応答増幅が生じる。しかし、その増幅量は小さく、動的相互作用の影響も小さいので、従来通りの設計法で対応可能である。また、杭頭免震構造において、基礎簡略化により、積層ゴム端部に回転が生じる場合、回転が生じない場合に対して80%程度に剛性が低下するため、それによる変形量の増大に注意が必要となる。

研究成果の概要（英文）：Seismic response of isolated buildings supported by a pile foundation like a mid-story isolated building is amplified by modal coupling effects. However, because the amplification and effect of soil-structure interaction are very small, an existing design method is able to be applied. In addition, the horizontal rigidity of base isolated building with inclination of pile top decreases to 80% when the rotation occurs at the edge of laminated rubber as compared with the condition without rotation. Therefore, it is necessary to consider amplification of deformation of laminated rubber by that effect.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	600,000	180,000	780,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,300,000	390,000	1,690,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学、建築構造・材料

キーワード：免震構造、杭基礎、モード連成作用、動的相互作用、

杭頭免震構造、積層ゴム端部回転、P- δ 効果、水平剛性評価

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、免震建物の普及とともに免震部材の高性能化が進み、従来は敬遠されてきた高層建物の免震や軟弱地盤上の高層建物の

免震が行われるようになってきている。また、基礎簡略化によるコストダウンを可能とする杭頭免震構造が注目されている。このように新しい免震部材および免震構法により、免

震構造の適用範囲が拡大している。

(2) 申請者らは、中間層免震構造の地震応答の分析から、免震化された上部構造部にも地震応答（加速度、層せん断力）の増幅が生じる場合があることを明らかにしている（モード連成作用）。杭基礎で支持された免震建物は、杭・地盤系を下部構造と捉えることで、中間層免震同様、免震層下部に振動系を有する構造とみなせるので、モード連成作用の発生が考えられる。

2. 研究の目的

(1) 杭基礎を有する軟弱地盤上の高層免震建物の地震応答を地盤・杭・建物連成系の一体解析により算出し、モード連成作用の影響を明らかにする。

(2) 杭頭免震構造を対象に、基礎簡略化の与える影響、特に免震装置端部の回転に着目し、静的荷重増分解析により、その影響を把握する。

3. 研究の方法

(1) モード連成作用

① 解析モデル

図1に示す修正ペンゼンモデルを用いて地震応答解析を行う。解析パラメータは、日本建築センターのビルディングレターより、近年の免震建物の平均高さが60m近いこと、軟弱な第3種地盤にも建設されていることを考慮し、以下に示すものとする。

- ・建物：地上17階建RC造
- ・免震層：積層ゴムと鋼材ダンパー
- ・杭：杭径2m、杭長25mのRC杭
- ・地盤：N値5の軟弱な一様砂質土地盤

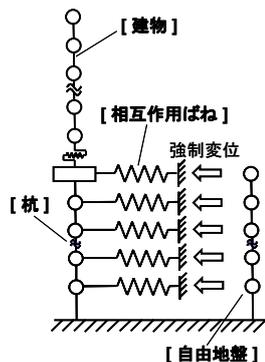


図1 修正ペンゼンモデル

② モード連成作用の検討方法

上部構造の剛性に倍率 α を一律に乘以、上部構造の周期を変化させる。各 α に対する上部構造の両端自由振動モードの2次周期（モード連成作用の発生が懸念される周期） nT_2 と応答との関係を考察する。

(2) 杭頭免震構造

① 解析モデル

解析モデルは、実在する杭頭免震建物は倉

庫などアスペクト比が小さく、軸力変動の影響が小さいと言えることから、図2に示すように、免震装置一基を中心とした周辺架構をモデル化する。解析パラメータは以下に示す通りとする。

- ・免震層：鉛プラグ入り積層ゴム（1100φ）
- ・杭：杭径1.2m、杭長14mの鋼管杭
- ・地盤：N値5の軟弱な一様砂質土地盤
- ・基礎マットスラブ：杭頭を剛とするもの（純せん断）、杭頭をピンとするもの（スラブ無し）、およびその中間2つ（スラブ厚60cm、30cm）の計4パターン

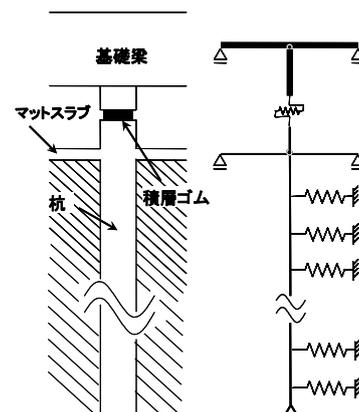


図2 解析モデル

② 検討方法

建物慣性力のみを考慮した静的荷重増分解析を行う。解析の際は、文献1)を参考に、積層ゴムの曲げ剛性、積層ゴムの端部回転を考慮する。また、P- δ 効果を考慮した収斂計算を行う。

4. 研究成果

(1) モード連成作用

① 下部構造を弾性とした場合

下部構造（杭、地盤）を弾性として扱った結果について述べる。

図3に各 α に対する両端自由振動モードの2次周期 nT_2 を横軸としてプロットした建物最上階の加速度応答を示す。全体的な傾向として、 $nT_2=0.7\sim 0.8$ 程度を頂点とした山形の分布形状が見て取れる。これより、モード連成作用による応答増幅が $nT_2=0.7\sim 0.8$ 付近で生じているものと予想できるが、ここに一つの問題点がある。それは、上部構造の剛性に剛性倍率 α を一律に乘じているため、振動を最も支配している1次モードの応答も変化していることである。そこで、この1次モードの影響を、相対的にではあるが、可能な限り除去するため、以下の様な方法を取る。

加速度応答の高さ方向の分布形状は、図4に示すように概ね「く」の字形となるので、建物最上階の応答と、上部構造の最小応答（「く」の字の折れ点部分）の差を取ること

で上層部での応答増幅量を評価する。

図3を修正したものが図5である。図5を見ると、 $\#T_2=0.7$ 付近を頂点とした山形の分布形状がはっきりと見て取れる。この図において実際に最大値を与えているのは、 $\alpha=0.8$ ($\#T_2=0.721$) のときの点である。

図6に刺激関数を示す。図6(a)に示すのは、図5で応答増幅が見られた $\alpha=0.8$ の場合、図6(b)に示すのは、今回の解析で最も標準的な $\alpha=1.0$ の場合である。それぞれ1次モードと2次モードを示す。まず、1次モードにおいては、 $\alpha=0.8$ 、 $\alpha=1.0$ どちらの場合も免震層がよく変形した振動形状が見られ、両者の間に差はほとんど見られない。一方、2次モードを見ると、 $\alpha=1.0$ では免震層が変形しているのに対し、 $\alpha=0.8$ では免震層が全体の振動形の腹の位置になり、変形していないことが分かる。これより、図5で見られた $\alpha=0.8$ での応答増幅はモード連成作用によるものであったことが確認できる。図7~図10に、モード連成作用が見られた $\alpha=0.8$ 、最も剛性の低い $\alpha=0.5$ 、最も剛性の高い $\alpha=1.5$ の最大加速度応答、最大層せん断力、最大層間変位、および杭の最大曲げモーメントを示す。

まず最大加速度応答を見ると、最も剛性の高い $\alpha=1.5$ の応答に対して、最も剛性の低い $\alpha=0.5$ の応答は「く」の字形の応答分布形状が右にシフトしており、1次モードの応答が増幅していることが分かる。一方、モードの連成が見られた $\alpha=0.8$ の応答は、1次モードでは、最も剛性の高い $\alpha=1.5$ と比べてあまり差はないが、上層部分でモード連成作用により2次モードが励起され、応答が増幅し、最も剛性の低い $\alpha=0.5$ の応答も上回っている。

最大層せん断力を見ると、2次モードの弓なりの分布形状の応答が $\alpha=0.8$ で大きくなっていることが分かる。この図からも $\alpha=0.8$ において、2次モードの応答が励起されていることがはっきりと見て取れる。

最大層間変位を見ると、上部構造の剛性が低いほど(α が小さいほど)上部構造の変形が増え、逆に免震層の変形は小さくなっていることが分かる。これは上部構造の剛性低下により生じたものである。また層間変位においては1次モードが支配的なため、モード連成作用の影響は顕著に現れない。そのため α の変化に対して応答の傾向も比較的単純に変化する。杭の最大曲げモーメントを見ると、 $\alpha=0.8$ において若干ではあるが、杭頭部の応答が大きくなっている。これはモード連成作用による上部構造の応答増幅により、杭頭部にかかる建物慣性力が増加したためと考

えられる。しかしその増幅量は、上部構造の応答増幅量に対して小さいものと言える。

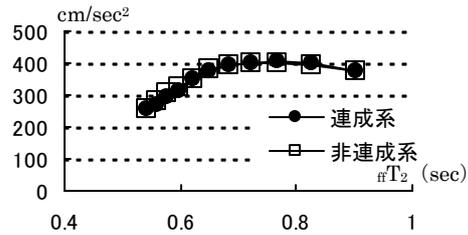


図3 建物最上階の最大加速度応答分布

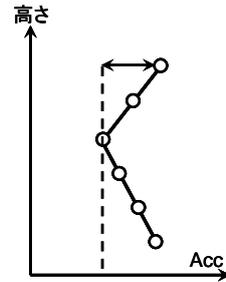


図4 高次モード増幅量評価の概念図

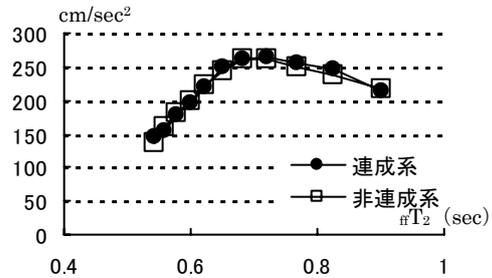
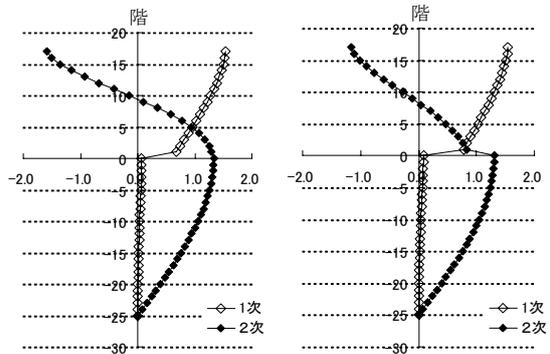


図5 最大加速度の2次モード増幅量



(a) モード連成発生 ($\alpha=0.8$) (b) モード連成未発生 ($\alpha=1.0$)

図6 刺激関数

図11に加速度応答スペクトルを示す。なお、横軸は対数軸としている。

ここに示すのは、 $\alpha=0.8$ における連成系基礎部の加速度応答スペクトル、自由地盤地表面の加速度応答スペクトル、有効入力加速度応答スペクトルである。ここで、有効入力とは、上部構造を無視し下部構造のみとしたモデルにおいて、基礎を無質量としたとき

に得られる基礎部の加速度応答スペクトルである。これを見ると、 $\alpha=0.8$ における上部構造の両端自由振動モードの2次周期0.721秒において、いずれの応答も卓越していることが分かる。これより、モード連成作用は下部構造の1次周期と上部構造の両端自由振動モードの2次周期が連成したことによって生じたことが分かる。また図3、図5において、連成系と非連成系に差があまり見られないのは、上部構造の両端自由振動モードの2次周期と連成する周期帯において、自由地盤と連成系基礎部の間に差が無いためと考えられる。

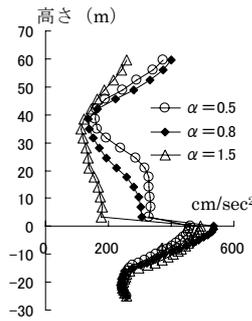


図7 加速度

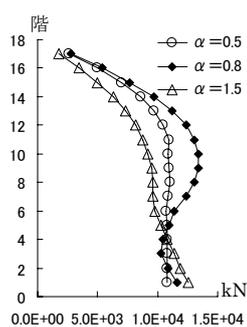


図8 層せん断力

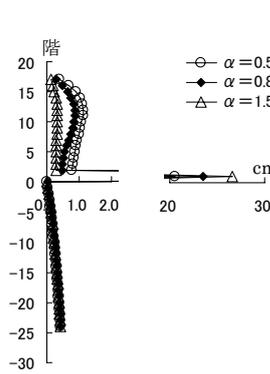


図9 層間変位

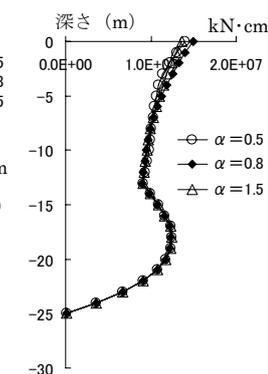


図10 杭モーメント

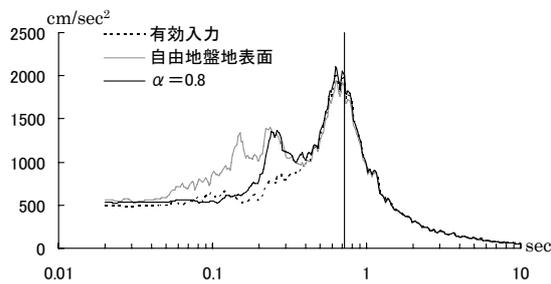


図11 加速度応答スペクトル

②下部構造を弾塑性とした場合

下部構造(杭、地盤)の塑性化を考慮した解析結果について述べる。

下部構造の塑性化を考慮した場合も、建物上層部には、弾性解析時と同様の傾向が見られ、図3、図5と同様に評価すると $\alpha=1.0$

で最大値を与える。

図12~図15に $\alpha=1.0$ のときの最大応答(加速度、層せん断力、層間変位、杭の曲げモーメント)を示す。なお、比較のため、最も剛性の低い $\alpha=0.5$ と最も剛性の高い $\alpha=1.5$ の結果も併せて示す。全体的な応答の傾向としては弾性解析の場合と同様である。

加速度応答を見ると、 $\alpha=1.0$ において、上層部分で2次モードによると考えられる応答増幅が見取れるが、最大応答値としては 250cm/sec^2 以下であり、モード連成作用の影響は非常に小さいものであると言える。

層せん断力を見ると、 $\alpha=1.0$ において、弓なりの応答形状が確認でき、2次モードの影響が出ていることが分かる。しかし、加速度応答と同様、それによる増幅量は小さく、モード連成作用の影響は荷重効果の観点からも小さいものと考えられる。

層間変位を見ると、免震層の変形量に差が生じていることが分かる。これは、上部構造の剛性が変化しているためであり、上部構造の剛性が高いほど(α が大きいほど)、免震層の変形量は大きい。

杭の曲げモーメントも、層間変位と同様、 $\alpha=1.0$ 、 $\alpha=1.5$ の両者の間に差は見られなかった。このことから、モード連成作用が下部構造に与える影響はほとんど無いと考えられ、下部構造への免震効果も変わらないと言える。

図16に加速度応答スペクトルを示す。極短周期帯で有効入力スペクトルが非常に大きくなっており、杭の影響が大きく出ていることが分かる。一方、 $\alpha=1.0$ の両端自由振動モードの2次周期にあたる点においては、有効入力、自由地盤地表面、連成系基礎部の応答がほぼ一致していることが分かる。この傾向は、弾性解析の場合とも一致する。このことから、上部構造の応答増幅は、連成系下部構造と自由地盤とが同様の応答を示す周期に生じるとも考えられる。また、連成系と非連成系の応答に差がほとんど生じないのも、この影響によるものと考えられる。

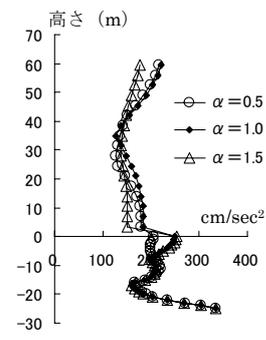


図12 加速度

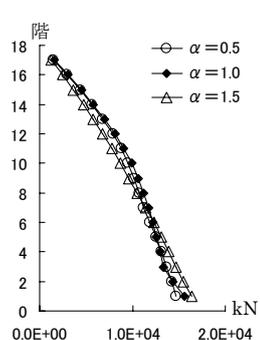


図13 層せん断力

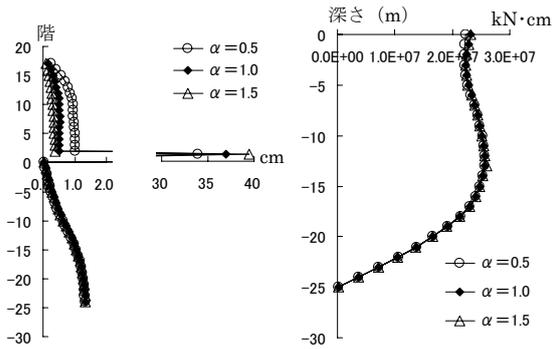


図 14 層間変位 図 15 杭モーメント

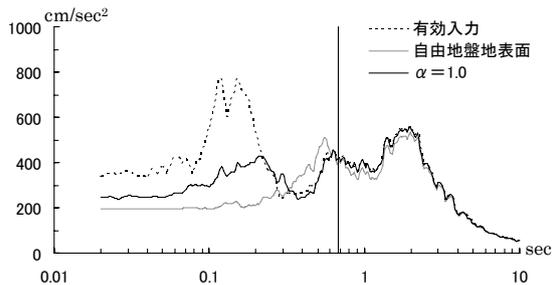


図 16 加速度応答スペクトル

(2) 杭頭免震

図 17 にアイソレータの水平荷重 - 水平変位関係を示す。基礎マットスラブ厚が薄くなるほど、小さい荷重でせん断歪 200%（水平変位 40cm）に至っており、アイソレータの水平剛性が低下していることが分かる。これは、基礎マットスラブが軽微であるほど、杭頭固定度が下がり、杭頭回転角が大きくなるため、鉛直荷重のせん断方向分力が寄与する付加せん断変形量が増大するためである。

表 1 にせん断歪 100%および 200%時における等価剛性を、端部回転を考慮しない純せん断変形の値を 100%としたときの割合として示す。ここで、等価剛性とは、原点と各せん断歪時における点を結んだ直線で評価した剛性である。これを見ると、せん断歪 100%時においては、スラブ厚 60cm で純せん断の場合の 93%、30cm の場合で 89%、スラブ無しの場合で 87%、また、せん断歪 200%時においては、スラブ厚 60cm で純せん断の場合の 84%、30cm の場合で 80%、スラブ無しの場合で 77%に等価剛性が低下しており、せん断歪が大きくなるほど、剛性低下が顕著であることが分かる。

図 18 にアイソレータの水平荷重 - 付加せん断変形関係を示す。付加せん断変形量は全変形量から純せん断変形量を引いた値で表される。スラブ厚 60cm、30cm、スラブ無し、いずれの場合も 10cm 以上の付加せん断変形が確認された。このことから、杭頭免震構造

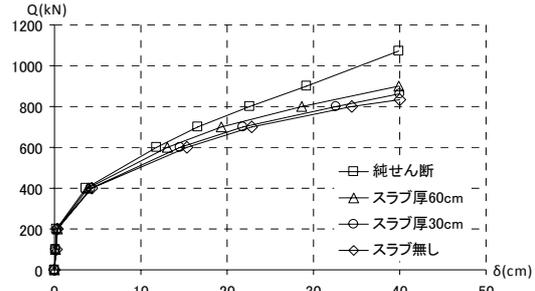


図 17 水平荷重 - 水平変位関係

表 1 純せん断に対する等価剛性の割合

せん断歪 / スラブ厚	100%	200%
60cm	93%	84%
30cm	89%	80%
スラブ無し	87%	77%

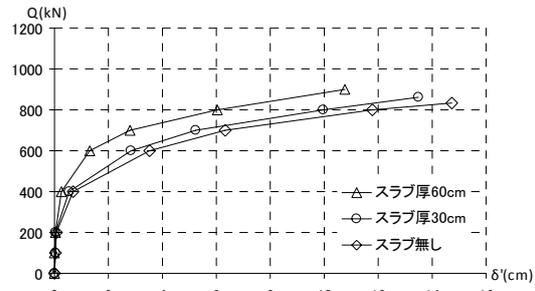


図 18 水平荷重 - 付加せん断変形関係

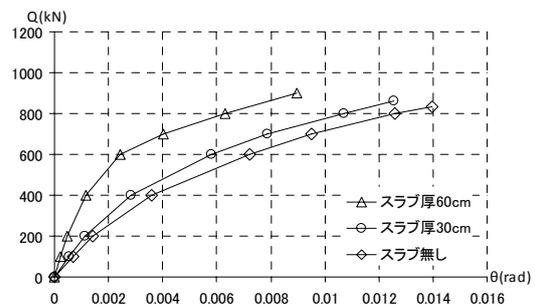


図 19 水平荷重 - 杭頭回転角関係

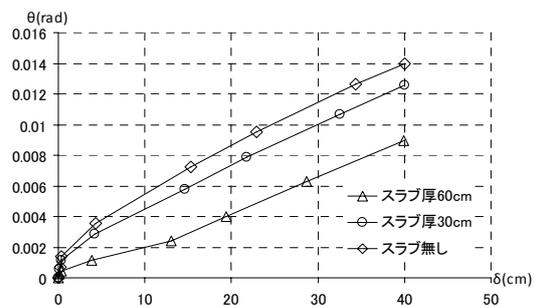


図 20 杭頭回転角 - 水平変位関係

のように積層ゴムの端部回転が問題となる場合においては、この変形量を適切に評価しないと、免震層の変形量を過少評価することになる。

図 19 に水平荷重 - 杭頭回転角関係を示す。スラブ厚 60cm では水平荷重 400kN、スラブ厚 30cm では水平荷重 200kN 程度までは、直線的に変化しているが、それ以降では、いずれの場合も、回転角が急増している。これは、前述したとおり、基礎マットスラブにひび割れが生じ、杭頭固定度が低下したことによると考えられる。

図 20 に杭頭回転角 - アイソレータ水平変形の関係を示す。基礎マットスラブひび割れ発生後（水平変位でおおよそ 4cm 以上の領域）はおおよそ水平変位に比例するように杭頭回転角も増大する。また、積層ゴム端部回転を考慮した既往の研究や実在する杭頭免震建物の設計では、杭頭回転角を 1/100 以下に抑えるという一つの目標値が見て取れるが、今回の解析では、スラブ厚 30cm およびスラブ無しではアイソレータのせん断歪 200%時に杭頭回転角 1/100 を越えており、この目標値を満足しないという結果になった。

図 21 に杭の最大曲げモーメントを示す。スラブ厚が薄くなると杭頭固定度が低下するため、杭頭部における曲げモーメントは小さくなる。しかし、地中部における曲げモーメントが増加することが確認された。特にスラブ無しの場合においては、地中部の最大曲げモーメントは杭頭部の約 2 倍となっている。なお、今回の解析では、建物慣性力のみを与え、地盤の強制変位を考慮していないこともあり、杭体は弾性範囲内に収まっている。

図 22 に杭の相対変位を示す。スラブ厚が薄くなると杭頭部の変位量は増加するが、今回の解析ではさほど大きな差は見られなかった。

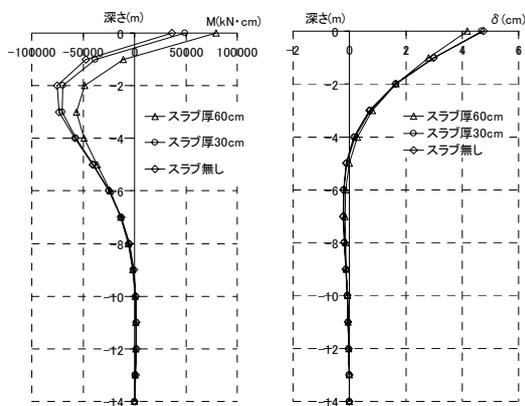


図 21 杭モーメント 図 22 杭の相対変位

[参考文献]

1) 浅野三男、嶺脇重雄：取付部の柔性を考慮した免震用積層ゴムの水平剛性評価、日本建築学会技術報告集、第 8 号、pp57-62、1999. 6

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 3 件)

①三橋一、小林正人、地盤 - 杭 - 建物連成系 一体解析による免震建物のモード連成作用に関する研究、日本地震工学会大会、2009 年 11 月 14 日、オリンピック記念青少年総合センター

②御手洗達也、三橋一、小林正人、地盤 - 杭 - 建物連成系 一体解析による免震建物のモード連成作用に関する研究 (その 1) 地盤 - 建物におけるモード連成作用の検討、日本建築学会大会 (東北)、2009 年 8 月 29 日、東北学院大学

③三橋一、小林正人、地盤 - 杭 - 建物連成系 一体解析による免震建物のモード連成作用に関する研究 (その 2) 杭基礎と杭の付加質量による影響、日本建築学会大会 (東北)、2009 年 8 月 29 日、東北学院大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 正人 (KOBAYASHI MASAHIITO)
 明治大学・理工学部・准教授
 研究者番号：50373022

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

中里 一行 (NAKAZATO KAZUYUKI)
 明治大学・大学院理工学研究科・大学院生
 三橋 一 (MITSUHASHI HAJIME)
 明治大学・大学院理工学研究科・大学院生