

平成 22 年 6 月 21 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：19360255

研究課題名（和文） 解体建物を利用した地震時被災建造物の損傷評価手法の開発

研究課題名（英文） Development of damage detection method of structure with artificial seismic damage using actual buildings

研究代表者

鈴木 康嗣（SUZUKI YASUTSUGU）

鹿島建設株式会社 技術研究所 都市防災・風環境グループ 上席研究員

研究者番号：70416767

研究成果の概要（和文）：4棟の実建物の耐震壁や梁に擬似地震時損傷を与え、損傷の前後で起振機加振試験と常時微動測定を行った。得られた振動データの整理・分析および損傷検知のための解析を行い、以下の知見を得た。(1)耐震壁の大きな損傷は、加振試験におけるピーク振動数の変化と層間変位の増加という明らかな応答値の変化から損傷を検知できる。(2)鉄骨梁端部の損傷は、加振試験における梁の上下動の変化から損傷の有無を検知できる。

研究成果の概要（英文）：This paper describes forced vibration tests and microtremor measurements performed to 4 actual buildings before and after earthquake resisting walls or a steel beam were damaged artificially. The dynamic characteristics change is investigated using these data and the damage detection analysis is applied. It is shown that (1) The damages can be clearly detected from changes of resonant frequency and relative displacement between stories; (2) It is possible to detect the damage based on the vertical response change on damaged beam between before and after the forced vibration test.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
年度			
年度			
総計	7,500,000	2,250,000	9,750,000

研究分野：建築構造

科研費の分科・細目：建築学 建築構造・材料

キーワード：損傷評価, 耐震, 健全性, 振動試験, 常時微動, システム同定

1. 研究開始当初の背景

地震被災後の建物の被害状況は、外観だけでは判断が難しいので、合理的な補修・補強のため建物の健全性評価手法の開発が望まれている。長期間の地震観測により、建物は経年で1次周期が伸びていること（剛性の低

下）が確認されている。経年変化と同様に、地震被害により建物の振動特性は変化しているはずであるが、振動特性の変化を被災前後の実建物で測定した事例は地震計の記録を除けば非常に少ないため、建物被害が振動特性に与える影響は殆んど分かっていない。

2. 研究の目的

(1) 地震による建物損傷前後の振動特性の変化を実測する。具体的には、解体される建物に擬似的な地震時損傷を加え、損傷前後の振動特性の変化を起振機加振試験と常時微動測定により実測し、その振動特性データの変化から、損傷検知の可能性を検討する。

(2) 起振機試験データと常時微動測定データを利用した各種システム同定やシミュレーション解析を行い、地震時損傷検知手法の高度化を目指す。

3. 研究の方法

(1) 下記4棟の実建物において、擬似地震時損傷が建物の振動特性に与える影響を実測し、貴重な実建物振動データを得た。

(a) A建物

RC造地上4階・地下1階の解体建物において、2階と3階の耐震壁4枚の3辺を切断し、損傷前(ライブロード撤去前後)と損傷後(3段階)で起振機加振試験と常時微動測定を実施した。

(b) B建物

RC造3階・地下無の解体建物において、2階の1枚の耐震壁に順次水平損傷を加え、損傷前(ライブロード撤去前後)と損傷後(4段階)で起振機加振試験と常時微動測定を実施した。

(c) C建物

柱RC梁鉄骨造地上9階、地下2階の解体建物において、5階鉄骨梁端部1箇所損傷を加え、その前後で2方向の起振機加振試験と常時微動測定を実施した。

(d) D建物

可変剛性システムを有する地上3階、地下1階の鉄骨造建物の可変剛性(6箇所)のon/offによる剛性変化を利用し、剛性の組み合わせを変えた状態で起振機加振試験と常時微動測定を行い、建物内のさまざまな位置に擬似地震時損傷が生じた場合の動的応答の変化を実測した。

(2) 上記4棟の実建物における振動実測データに基づき、下記の解析を実施し、損傷検知の可能性を検討した。

(a) 柔性マトリックスを用いた手法

(b) 特異値分解を用いた手法

(c) 共振曲線の比較法

4. 研究成果

(1) 擬似被災建物の振動特性変化の実測

(a) A建物

A建物には、振動特性に相応の変化を与える損傷として、図1に示す2階および3階の耐震壁の側面と上面を切断し、その前後で最大加振力30kNの回転型水平起振機を用いて、

切断した耐震壁が効く南北方向に加振する試験を行った。試験ケースは、内部の仕切り壁を除いた段階を初期段階(ケースD0)とし、3階東北の耐震壁を切断(ケースD1)、同じく3階西北の耐震壁を切断(ケースD2)、最後に2階北側の2枚の耐震壁を同時に切断した状態(D3)である。

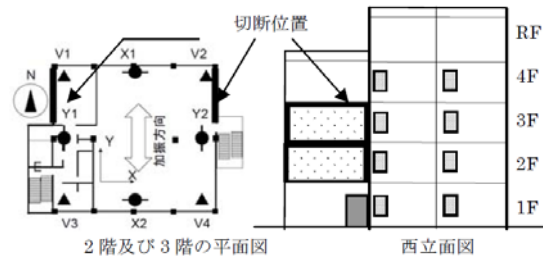


図1 A建物と損傷・測定点位置

代表的な試験結果として、各ケースの屋上における水平方向の共振曲線を、ピーク付近で比較して図2に示す。耐震壁切断の進行に伴い、加振方向の1次、2次ピーク振動数が低振動数側に移動するとともに振幅が増大すること、加振直交方向では1次ピークは変化しないが、加振方向と連動する振れモードである2次ピークは低振動数側に移動しながら振幅を増すなど、屋上の応答だけでも擬似地震時損傷による構造性状の変化が認められる。

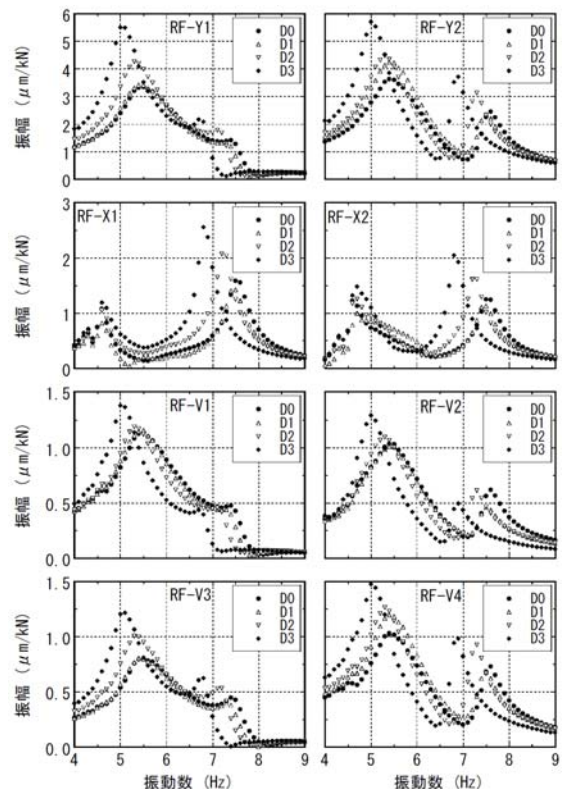


図2 A建物損傷の進行と共振曲線の変化(上から:屋上加振,加振直交,上下方向)

また、1次、2次ピーク振動数で振動モードを抽出して層間変位を調べると、図3に示すように耐震壁が切断されるとほぼ全ての層間変位が増加し、さらに壁を切断した直上位置での変位が急増することから、損傷位置も検知できるものと判断される。

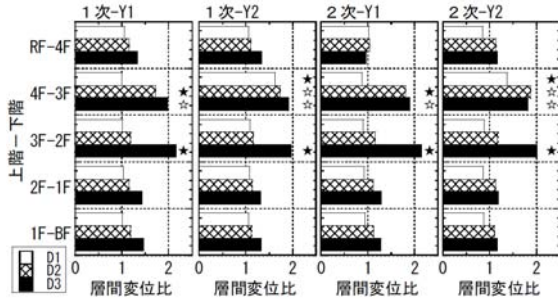


図3 D0を基準とした層間変位比の比較
(★：耐震壁切断，
☆：以前のケースで耐震壁切断)

(b) B建物

RC造について、軽微な損傷の検知の可能性を調べるため、図4に西立面、図5に平面を示すB建物を対象に振動試験を行った。試験では、地震による損傷形態を模擬してはいないが、剛性変化の程度が分かりやすく、単純で比較的容易に与えられる損傷として、西側2階の耐震壁に図6に示す水平スリットを4段階に分けて入れ、損傷前(ケースD0)および各損傷段階(ケースD1~D4)において、加振・計測を実施した。また、ばらつきをみるため、第1段階の計測を2回実施した(ケースD1')。加振は、スリットを入れた耐震壁が効く南北方向に対して、屋上に設置した30kN回転型水平起振機を最高出力の1/3程度の出力で実施した。また、3階床に設置した2台の小型往復型水平起振機(0.49kN)を使い、同様の加振試験を実施した。計測は、図5に示すとおり、各階の水平方向それぞれ2成分、四角の上下方向に加え、1階を除く各階にはその変化から損傷位置を特定できるかを調べる目的で多数の上下方向計測点を配置し、合計47成分で実施した。

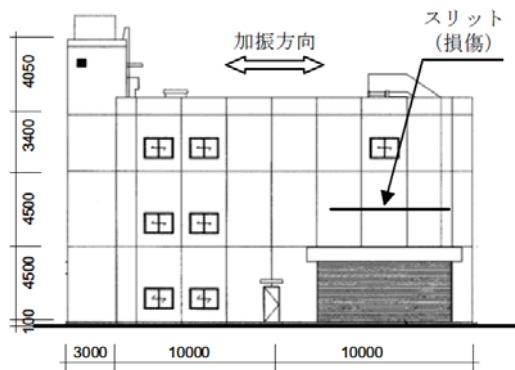


図4 B建物の西立面図と損傷位置

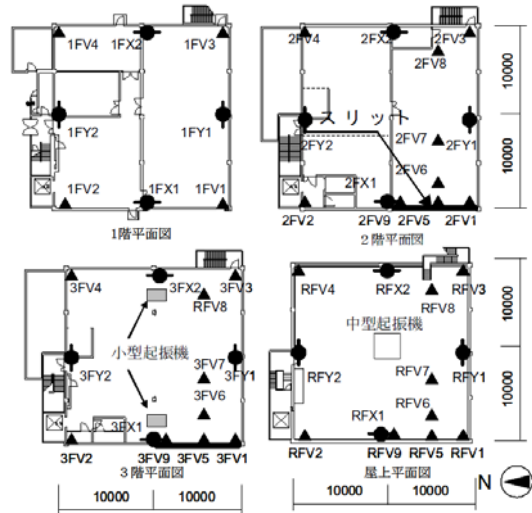
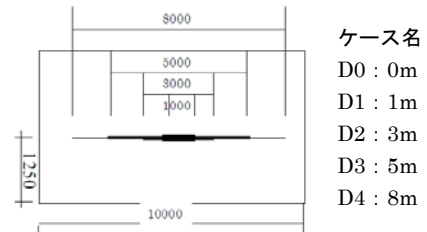


図5 B建物平面と損傷・測定点位置



室内側床面から1250mmの高さに幅約0.5cmの水平スリット4段階(1m, 3m, 5m, 8m)に分けてウォールソーで切断

図6 損傷の与え方

スリット長さとの関係を確認するため、有限要素法(FEM)による解析を行った。損傷を与える壁について、まわりの柱梁を含め図7に模式的に示すようにモデル化し、壁の下側を固定して上端部を水平に加力したときの先端部中央の変位から水平剛性(スリットを入れない状態を1とする)を計算した。壁剛性とスリット長さの関係を図8に示す。各損傷段階における壁剛性は、損傷前に対して99%、90%、70%、40%程度と評価された。

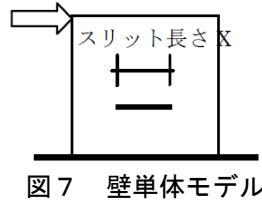


図7 壁単体モデル

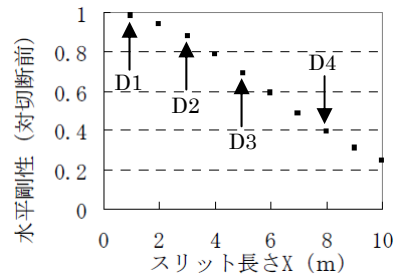


図8 壁剛性とスリット長さの関係

代表的な試験結果として、中型起振機による試験結果のうち、屋上の加振方向成分(RFX1)、加振直交方向成分(RFY1)の共振曲線を、ケースD0からケースD4まで重ねて図9に示す。一次ピークである6Hz近傍に着目すると、D0→D1はそれ以外と逆方向である短周期側にピークが変化し、D1以後は切断の進行とともに長周期側にピークが移動した。共振曲線の単純な比較から損傷を検出できる可能性があるのは、ケースD3で与えたよりも大きな変化があった時と考えられる。

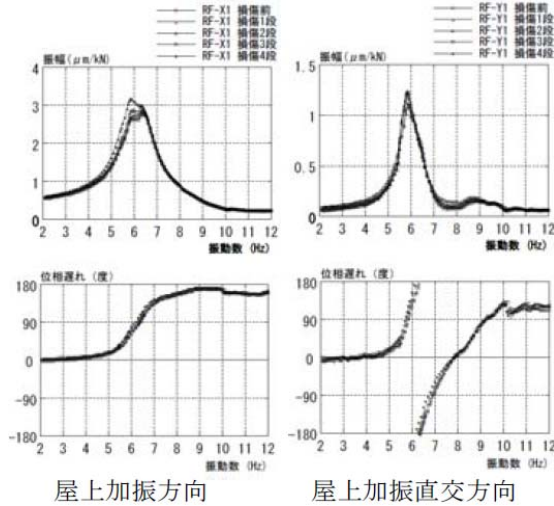


図9 中型起振機試験から得られた共振曲線と位相曲線

(c) C建物

外観の目視からは見つけられない軽微な損傷を対象に、図10に立面を示す柱RC梁S造の地上9階地下2階建て事務所ビルで試験を実施した。地上階平面は図11に示すような長辺方向6スパン、短辺方向1スパンである。

試験は、内部の仕器、間仕切りや天井などを取り除いた段階で加振と計測を行い、その後、擬似地震時損傷として5階床下の7通りの鉄骨梁の一端の下フランジをガス切断し、加振・計測を行った。加振は、最上階である9階の床に4台の小型往復型水平起振機を設置し、1.8Hz以上では最大加振力1.8kNで、1.8Hz以下では振動数に比例して小さな加振力で行った。計測点は図10、11に示すとおりである。ここでは、試験結果とともに、試験を模擬した数値解析を利用して、損傷が振動データに与える影響について考察する。

損傷の影響がわかりやすい短辺方向の試験を対象に、FEM周波数応答解析コードを利用して数値解析を行った。建物全体のモデルを図12に示す。床と壁はシェル要素、柱梁はビーム要素でモデル化し、損傷を与えた梁端に位置するビーム要素(要素の長さ0.5m)の断面積を半減させることで損傷を表現し

た。また、地盤条件に対応した周波数依存の地盤ばねを考慮した。

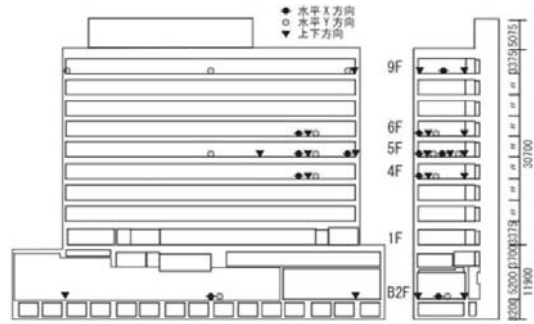


図10 C建物の立面と計測点位置

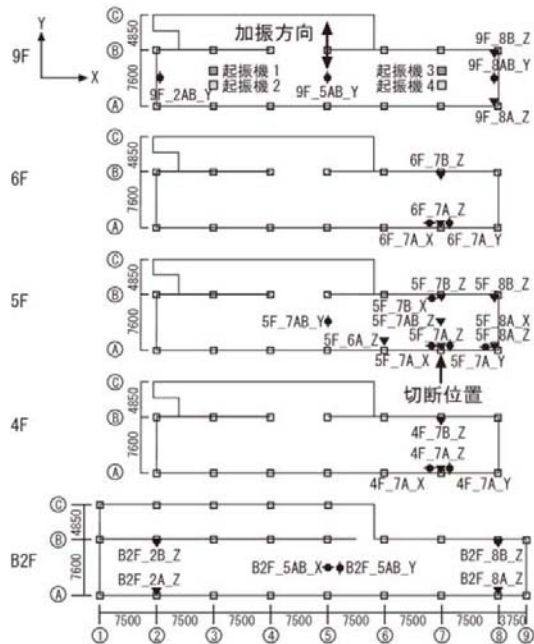


図11 C建物平面と損傷・計測点位置

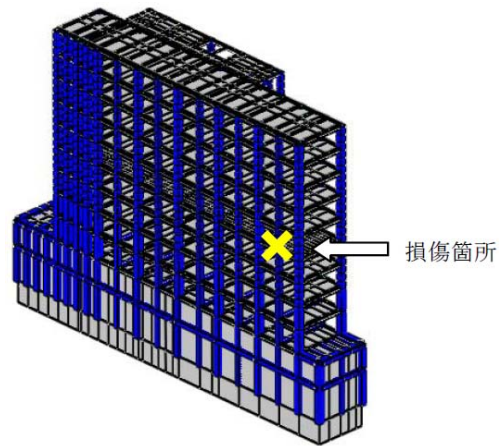
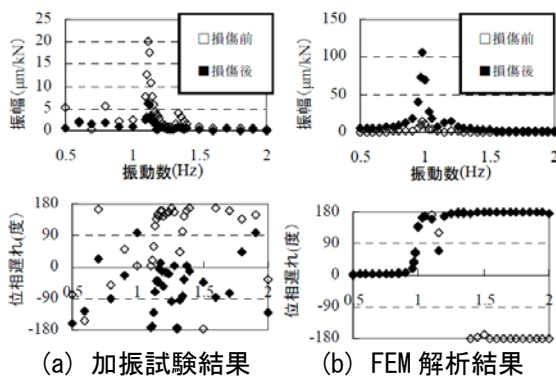


図12 C建物のFEM解析モデル

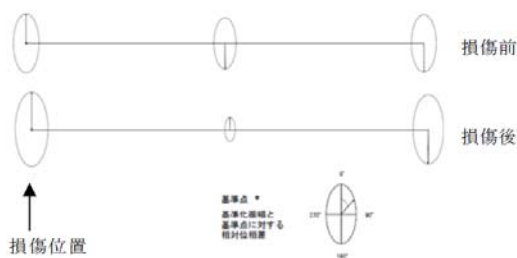
試験では、損傷を与えた梁中央部の上下方向共振曲線の振幅に、図13(a)に示す損傷前後で顕著な変化が確認できた。このメカニズムを検討するため、解析でも同様の共振曲線

を確認するとやはり図 13(b)のように変化が認められた。しかし、両者の振幅の大小関係が異なっているため、試験、解析それぞれの1次固有周期における梁の変位を描いたところ、図 14 のようになった。ここで、両図ともそれぞれ梁左端の変位を基準にして変形モードを描いている。さらに、損傷による変形モードの変化をみるために、これらの変位を垂直面に投影し、損傷前後の差をとって図 15 に比較した。図 15 では、絶対値が4倍ほど違うものの、試験と解析で全体的な傾向はよく似ている。図 13(b)に示した解析における変位を詳細にみると、損傷前後で梁の変形モードが変化し、中央の変位の違いに繋がることが分かる。

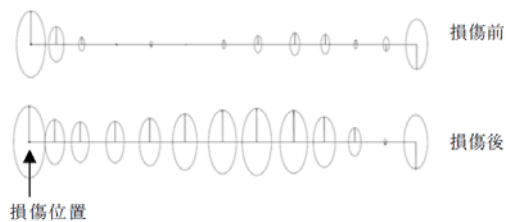
さらに、損傷を与えた梁両隣に配された、損傷を与えない梁の中央部でも上下方向共振曲線の変化を解析結果で確認したところ、図 16 のように損傷前後でほとんど差が表れておらず、梁中央部の共振曲線の変化は、梁端の損傷を示すよい指標となるものと判断される。



(a) 加振試験結果 (b) FEM 解析結果
図 13 切断した梁中央部上下動共振曲線における損傷前後の比較

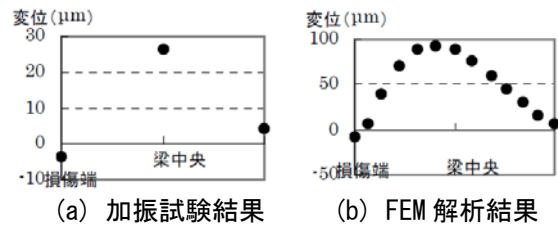


(a) 加振試験結果



(b) FEM 解析結果

図 14 損傷前後の針の変形モードの比較



(a) 加振試験結果 (b) FEM 解析結果
図 15 損傷前後の変位差の比較

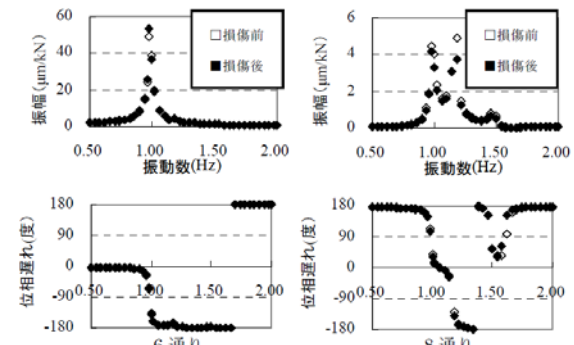


図 16 損傷を与えた梁両側位置の梁中央部における上下動共振曲線の変化 (FEM 解析)

(d) D建物

R階と3階の測定点位置を図 17 に、加振試験結果の屋上階の共振曲線の比較を図 18 に示す。6箇所の変剛性の on/off による剛性変化の組み合わせを変え、建物内のさまざまな位置に擬似地震時損傷が生じた場合の動的応答の変化を実測し、システム同定手法等のチェックに用いるデータを得た。

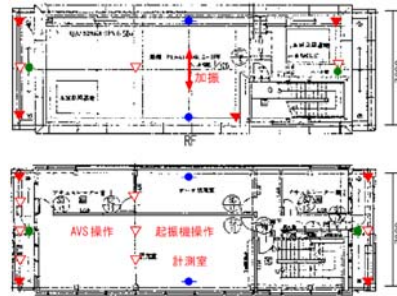


図 17 D建物R階・3階平面と計測点配置

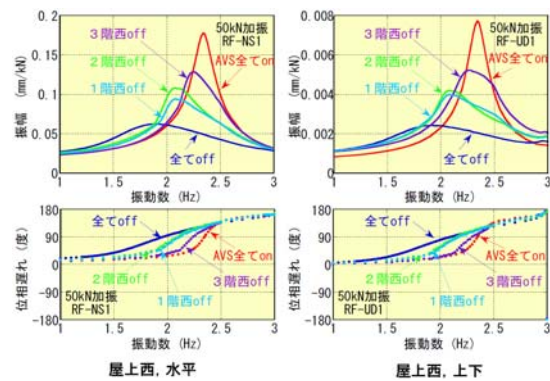


図 18 R階の共振曲線の比較

(2) 解析的検討

各種解析的検討を行い、損傷検知の可能性を検討した。いずれの手法も、一部の損傷を検知できるが、まだ全ての損傷を検知できるレベルに無いことが明らかとなった。それらの結果は、〔雑誌論文〕②と〔学会発表〕①で報告している。

本研究により、損傷前後における実際の現象であるところの実建物振動データを取得できたので、これらのデータを利用して、今後、解析手法の更なる高度化を目指す予定である。

(3) 研究成果のまとめ

4棟で行った振動試験結果から、①RC造耐震壁に大きな損傷が生じた場合には1次固有周期の変化や層間変位の変化から、②鉄骨梁端の損傷は梁の上下応答の変化から損傷の有無を検知可能であることを示した。また、特異値解析やシステム同定などの解析から、損傷検知の可能性を示した。

なお、損傷前後における実建物振動データを取得できたことが、本研究の最大の成果であり、今後も各種解析手法を適用し、損傷検知手法の更なる高度化を目指す予定である。

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)

〔雑誌論文〕(計3件)

- ① 鈴木康嗣、安達直人、野澤貴、池浦友則、日下彰宏、起振機試験と常時微動測定に基づく鉄骨梁に擬似地震時損傷を与えた実建物の損傷推定、日本建築学会技術報告集、第16巻、第33号、PP.473-478、2010年6月(掲載予定)、(査読有)
- ② 池田芳樹、鈴木芳隆、鈴木康嗣、安達直人、野澤貴、常時微動応答のパワースペクトル密度関数行列の特異値分解を用いた実建物の損傷検知、日本建築学会技術報告集、第16巻、第32号、PP.69-74、2010年2月、(査読有)
- ③ 鈴木康嗣、安達直人、池浦友則、野澤貴、日下彰宏、起振機試験と常時微動測定に基づく擬似地震時損傷を与えたRC造建物の動特性変化の推定、日本建築学会技術報告集、第16巻、第32号、PP.101-106、2010年2月、(査読有)

〔学会発表〕(計1件)

- ① ニウシヤ アリ、鈴木康嗣、安達直人、System identification of a RC building with intentional damages、日本建築学会学術講演梗概集、構造II、PP.79-80、

2007年8月、(査読無)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 康嗣 (SUZUKI YASUTSUGU)
鹿島建設株式会社技術研究所・上席研究員
研究者番号：70416767

(2) 研究分担者

安達 直人 (ADACHI NAOHITO)
鹿島建設株式会社技術研究所・主任研究員
研究者番号：60443701

(H19→H20, H21: 連携研究者)

Niousha Ali

鹿島建設株式会社技術研究所・主任研究員
研究者番号：50443700

(H19)

小鹿 紀英 (KOSHIKA NORIHIDE)

(H19, H20→H21: 連携研究者)

鹿島建設株式会社小堀研究室・

研究者番号：40416855

宮本 裕司 (MIYAMOTO YUJI)

(H19)

研究者番号：50416856

池田 芳樹 (IKEDA YOSHIKI)

鹿島建設小堀研究室・上席研究員

研究者番号：70416866

(H19→H20, H21: 連携研究者)

酒向 裕司 (SAKO YUHJI)

鹿島建設小堀研究室・上席研究員

研究者番号：40416871

(H19→H20, H21: 連携研究者)

鈴木 芳隆 (SUZUKI YOSHITAKA)

鹿島建設小堀研究室・主任研究員

研究者番号：70416874

(H19→H20, H21: 連携研究者)

(3) 連携研究者

池浦 友則

鹿島建設株式会社技術研究所・上席研究員

研究者番号：80443703

(H20, H21)

野澤 貴 (NOZAWA TAKASHI)

鹿島建設株式会社技術研究所・上席研究員

研究者番号：80463587

(H20, H21)

日下 彰宏 (KUSAKA AKIHIRO)

鹿島建設株式会社技術研究所・主任研究員

研究者番号：70416733

(H21)