

平成22年 3月31日現在

研究種目：基盤研究(G)
 研究期間：2007 ～ 2009
 課題番号：19560566
 研究課題名（和文） Wavelet 変換を用いたリアルタイム残余耐震性能判定装置の開発
 研究課題名（英文） Development of Real-time Residual Seismic Capacity Evaluation System with Wavelet Transform
 研究代表者
 楠 浩一（ KUSUNOKI KOICHI ）
 横浜国立大学・工学研究院・准教授
 研究者番号：00292748

研究成果の概要（和文）：

本研究では、高次モードが卓越するような中・高層建物を対象に、加速度計を建物に配して、計測結果から地震直後に建物の残余耐震性能を判定する手法を開発した。本手法では、計測結果に Wavelet 変換を適用し、計測結果のモード分解を試みるものであり、建物の実観測記録および鉄骨フレームを用いた振動台実験で有用性を確認した。また、建物の性能評価においては、建物のロッキング振動を分離する必要があることが分かった。

研究成果の概要（英文）：

In this research, Real-time Residual Seismic Performance Evaluation System for medium to high-rise building of which higher vibration mode is not negligible. The performance is evaluated from accelerations measured by accelerometers with Wavelet Transform. The Wavelet Transform is applied to decompose the modal vibrations. The validity of the system is evaluated by the vibration observation with two existing 9-story buildings and shaking table tests with steel structure model.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

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：構造解析, 構造設計, 保全技術, 地震防災

1. 研究開始当初の背景

大地震時には、多くの建物が被災し、その結果、多くの避難民を生む事となる。被災した建物の中には、その損傷ゆえに余震によって更に損傷が拡大し、建物内の人に甚大な2次被害を生じる可能性のあるものがある。また、それとは逆に、工学的な検証により、余震に対して十分な耐震性能を依然保有している建物に対しても、地震に対する恐怖心から住民が建物から避難し、その結果避難民の数を増加させる場合がある。余震による2次被害を低減するとともに、避難民の数を減らすためには、本震後の迅速な建物の応急危険度判定が必要不可欠である。しかし、現状では設計技術者あるいは研究者が目視で1棟ずつ応急危険度判定を実施しているのが現状であり、例えば平成7年兵庫県南部地震の際には、被災地域にの建物が約55万9千棟であったのに対して、判定を行った技術者のべ6000人で、46,000棟を判定するのに3週間が必要であった。判定に必要とした期間も長く、判定建物数も充分とはいえない。また、目視に依るが故に技術者のレベルによって判定が大きくばらつくことが問題である。更に技術者による詳細な調査が必要となる「要注意」という灰色の判定が多く出され、この詳細調査には時間がかかり、その結果、住民の不安を早急に取り除くことができず、避難民の数を増やす事となる。地震直後の2次災害の防止、および避難民の数を減らすという防災対策上も、迅速な応急危険度判定方法の開発が急務である。

2. 研究の目的

本研究では、各建物に数台の安価な加速度センサーを配置し、その加速度センサー計測値から、機械的に建物の地震時の応答を計測し、地震後の残余耐震性能をリアルタイムで判定する技術の確立を目的としている(図-1参照)。特に本研究では、中高層建物への適用を目指し、高次モードの影響をWavelet変換を用いて分離する手法の開発を目的としている。

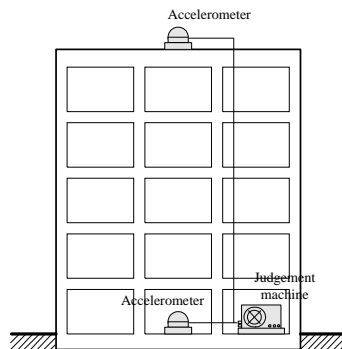


図-1 判定装置のイメージ

3. 研究の方法

(1) Wavelet変換の応用

まず、Wavelet変換を用いた性能曲線の定式化について検討を行う。Wavelet変換とは、ある規定するマザーウェーブレットに対して、信号 $f_{(t)}$ が如何に似通っているかを数学的に示すものであり、時間周波数解析手法の一つである。 N 個のデータを含むある信号 f_0 は、ウェーブレット変換により次式に示すように、ある周波数帯の信号のみを含む要素 g_{-1} と残りの信号 f_{-1} に分解される。

$$f_0 = g_{-1} + f_{-1}$$

変換された g_{-1} および f_{-1} は、 $N/2$ 個のデータを持つ。この変換を繰り返すことにより、信号 f_0 は、

$$f_0 = g_{-1} + g_{-2} + g_{-3} + \dots + g_{-n} + f_{-n}$$

のように分解できる。この時、

$$n = \log_2 N$$

であり、 f_{-n} は定数値となる。分解された信号は、数学的にその直交性が保証されている。このWavelet変換を用いて、既に提案した方法によって計算された性能曲線がどの様に分解されるかを定式化し、更にその分解結果の精度を数値解析を用いて検証する。本手法の元となる考え方は、2000年の建築基準法の改正に伴い設計法のひとつとして加えられた「限界耐力計算法」である。

(2) 振動台実験による検証

定式化した性能曲線の分解方法の適用性を実験的に検討するために、2および3質点でかつ、2次モードも比較的卓越する試験体の設計を行う。また、振動台実験を実施するための計測計画等の、実験計画を立案する。実験では、加速度計により計測した加速度と、それを2階積分して求めた性能曲線をまず作成する。更に、(1)で定式化したWavelet変換により各モードに分解する。一方、実験では直接各層の応答変位も計測できるため、計測した変位を用いて性能曲線を別途作成し、それを2階積分により作成した性能曲線と比較することにより、積分誤差の影響を検討する。また、試験体は鋼板を用いた板ばねによる、単純なモデルを想定している。その為、特に弾性範囲では試験体の挙動は数値解析により比較的精度よく追跡できる。そこでまずは弾性応答において、その数値解析から求めた性能曲線と、Wavelet変換によって分解した各モードの性能曲線を比較することにより、Wavelet変換によるモード分解の精度を検討する。更に試験体の塑性化後の応答から、非線形領域においても安定した応答を得ることが出来るかを検討する。

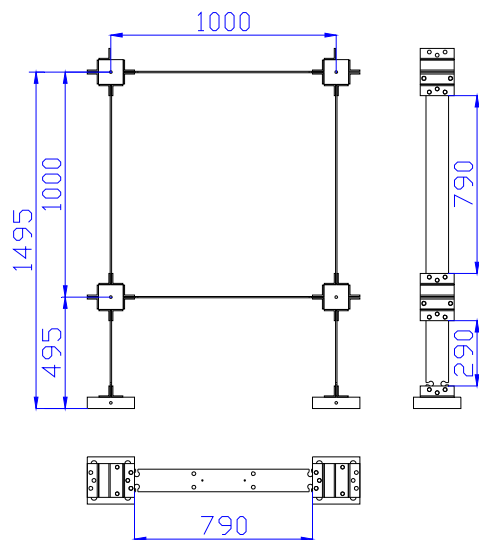


図-2 試験体例

(3) 実建物の振動観測による検証

本装置では数階に1つ加速度計を設置する必要がある。加速度計は $20 \times 10 \times 5$ cm程度の大きさであり、設置には床スラブにアンカーを打設し、緊結することになる。その作業は決して大変ではない。しかし、加速度計は全てが電氣的に結線される必要があり、それらは全て判定装置につながっている必要がある。特に加速度データの時間的な同期は重要であり、その精度は $1/100$ 秒より細かいことが望ましい。その精度を達成するためには、結局全ての加速度計を専用ケーブルで結線する必要があり、そのケーブルの取り廻しが非常に煩雑となり、結果判定装置の普及を阻害することが懸念されていた。

ところが近年、東京大学地震研究所の鷹野澄教授らのIT強震計研究会では、加速度計をインターネットコンセントに直接つなぐことにより、それらの加速度計をLAN上で管理することが可能となる「ITKセンサー」を開発した。本システムは時間の同期精度も $1/100$ 秒以下と画期的なシステムであり、判定装置のケーブル取り廻しの問題を解決することが可能である。但し、建物内に数個設置された場合にデータのトラフィックがどの程度になるのか、想定した精度を必ず達成できるのか、データの欠損は無いのか、などの常時観測はなされていない。そこで、横浜国立大学の建築学棟の各階にこのITKセンサーを設置し、LANトラフィックの状況、同期の状況、データ欠損の有無等について検討を行う。

更に、(1)で定式化したWavelet変換による性能曲線のモード分解機能を備えた残余耐震性能判定装置を作成する。その装置を横浜国立大学 建築学棟に設置することにより、実建物の実応答を元に本装置の有効性を検

討する。この建物は、SRC造地上8階、地下1階建てであるが、地下1階のほぼ全周にドライエリアがあるため、実質は地上9階建てである。平面形状は整形であり、複雑な立体挙動は生じないことが予想される。また、地上9階建てであるため、2次モードの影響がある程度観測されることが予想される。この建物の観測結果を用いることにより、実建物でのWavelet変換を用いたモード分解法の実用性が検証できる。また実建物には、室内の什器や建物内外の仕上げ、間仕切壁やサッシ、色々な積載荷重の影響や、ロッキングやスウェイ等の地盤と建物の相互作用、地盤の逸散減衰などの影響がある。当然これらの影響は、単純化した振動台実験では検討できない項目であり、実構造物に本装置を適用する以外にこれらの影響を検討する方法は無い。



写真-1 建築学棟全景

しかし、実建物では変形を計測することは一般的には困難である。建物の層間変形を測るためには各層の天井面と床面との間の相対変形を計測する必要があり、その為には計測用の治具を天井面と床面の間に設置することとなり、その部屋の使用性を著しく損なうためである。本研究でも、建築学棟で変形を計測することは考えていない。

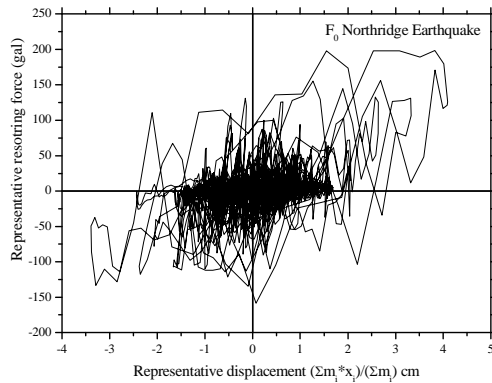
更に、計測データをホームページ等を用いて一般に公開し、その研究とシステムの普及促進を図る。また、今後の検討課題を洗い出す。

4. 研究成果

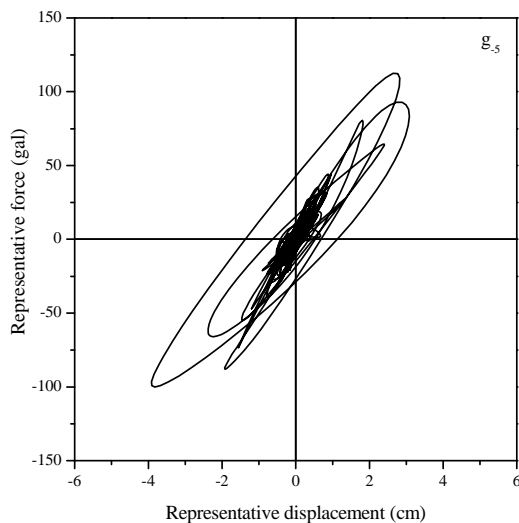
(1) Wavelet変換を用いた定式化

Wavelet変換を用いた性能曲線の定式化について検討を行った。具体的には、Wavelet変換により、1質点系を対象として作成した性能曲線をモード分解し、等価質量比および各モードの性能曲線を理論的に分離できる

ことを明らかにした。ただし、Wavelet 変換では、分解するモードの周期帯は、ステップ数と時間刻みにより確定的に決定する。これは、時間刻みと周波数帯の不確定性を最小値で満足する分解方法であり、この周波数帯より狭い範囲で分離することは、数学的には恣意的となることを示している。その為、分離された成分の中には、明らかに主要な振動成分を含んでいないものも存在する。



(a) 分解する前の性能曲線の例



(b) 分解後の性能曲線の例

図-3 Wavelet 変換を用いた性能曲線

(2) 振動台実験による検証

(1)で定式化した手法を、振動台実験により非線形領域までその適用性を確認した。具体的には、2質点でかつ、2次モードも比較的卓越する試験体の製作を行い、振動台実験を行った。実験では、まず加速度計により計測した加速度と、それを2階積分して求めた性能曲線を作製し、平成19年度に定式化したWavelet変換により各モードに分解した。一方、実験では直接各層の応答変位も計測できるため、計測した変位を用いて性能曲線を

別途作成し、それを2階積分により作成した性能曲線と比較することにより、積分誤差の影響を検討した。また、試験体は鋼板を用いた板ばねによる、単純なモデルとし、試験体数は全部で6体である。材料に鋼板を用いたため、材料特性が安定しており、特に弾性範囲では試験体の挙動は数値解析により比較的精度よく追跡できる。まずは弾性応答において、その数値解析から求めた性能曲線と、Wavelet変換によって分解した各モードの性能曲線と比較することにより、Wavelet変換によるモード分解の精度が充分高いことを確認した。更に試験体の塑性化後の応答から、Wavelet変換を用いる前は、高次モードの影響で、性能曲線から優位な情報を得ることが困難であることが分かった。さらに、Wavelet変換を適用することにより、非線形領域においても安定した応答を得ることが出来ることを確認した。さらに、応答結果の評価に重要な等価質量比に関しても、1次モードに対しては、計測結果から求めた等価質量比は解析結果とほぼ一致した。しかし、2次モードに関しては、ばらつきが大きい結果となった。

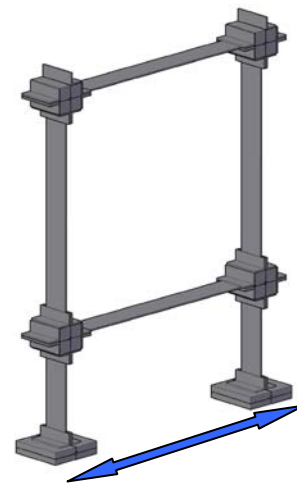


図-4 試験体

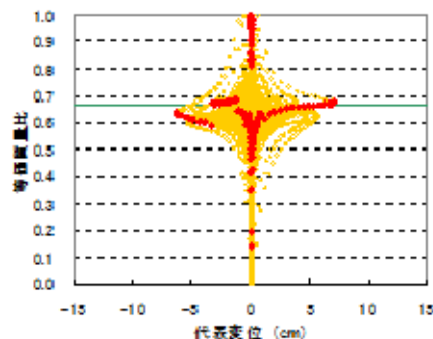
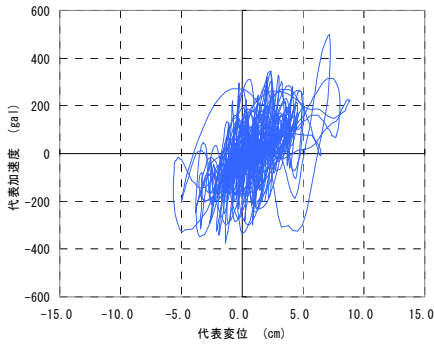
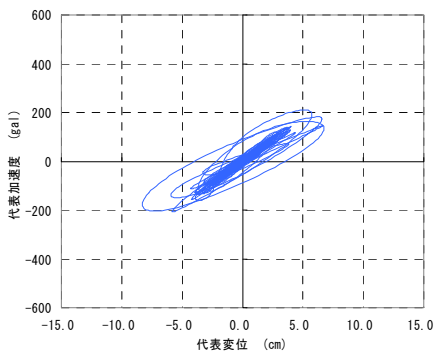


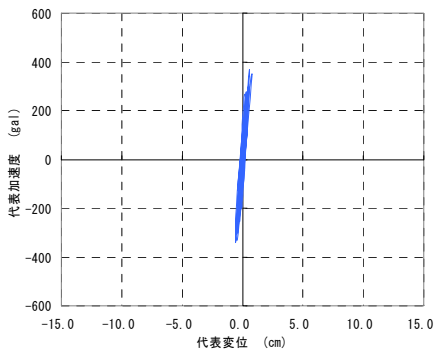
図-5 等価質量比の推移



(a) 分解前の性能曲線の例



(b) 分解された1次モード



(c) 分解された2次モード

図-6 実験結果の例

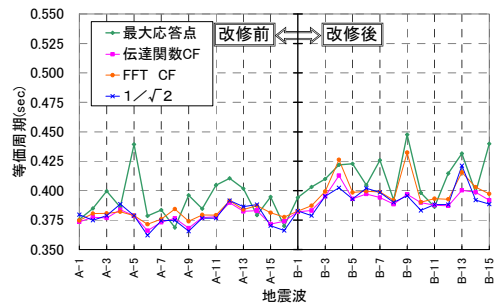
(3) 実建物の振動観測による検証

横浜国立大学建築学棟の各階に ITK センサーを設置し、ネットワーク配線で良好に地震応答が計測できること、およびネットワークトラフィックに致命的な負荷は与えないことを確認した。

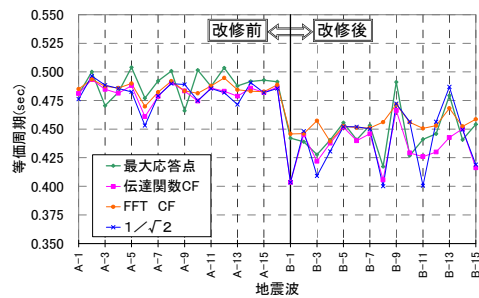
横浜国立大学建築学棟の応答を計測し、性能曲線を作成するためには、各センサーの適切な設置位置を決定する必要がある。実建物ではねじれのような立体振動を少なからず生じるが、ねじれ振動による回転応答により、加速度計の設置位置によって作成される性能曲線が異なる可能性がある。そこで、コンピュータ内に構築した建築学棟モデルの解

析より立体振動が性能曲線に与える影響を検討した。その結果、加速度計は重心に置くのが良く、重心に置けない場合は、各階で複数個の加速度計を設置し、各加速度計の支配面積に応じて重量比を設定すると精度よい性能曲線が得られることが分かった。また、加速度計の設置階は、およそ2階に1つでも十分な精度を得られるが、それ以上計測階を粗にすると誤差が大きくなることが分かった。

平成20年度7月より、建築学棟は耐震補強工事が実施された。震度1以上の地震記録は、耐震補強前で16波観測された。また、耐震補強後、計測を再開した後、震度1以上の地震は15回観測された。最大の記録は、2009年8月11日に発生した駿河湾沖地震(M6.6)で、保土ヶ谷区で震度4を記録した。これら31波の観測記録に対して、Wavelet分解による精度を検討すると共に、補強効果や建物の劣化を検討するため、耐震補強前後の記録に対して、提案する手法に併せて、弾性応答に対する既往の減衰・周期推定手法を適用して、建物の周期および減衰定数の変遷の検討を行った。その結果、Wavelet変換の精度は充分使用に耐えること、建物の周期は耐震補強に併せて、耐震壁を増設した方向では周期が短くなり、逆に雑壁を撤去した方向では周期が長くなっていることを確認した。さらに、観測結果をリアルタイムでインターネットで公開するシステムを構築し運用を開始した。また、建物の耐震性能を判定するためには、建物基部でのロッキング応答を取り除く必要があることが分かった。



(a) X方向等価周期の推移



(b) Y方向等価周期の推移

図-7 等価周期の観測推移



図-7 インターネット公開画面

(4) その他

本年度利用可能となる IT 変換部分とセンサー部分分離型 IT 計測器を用いて、加速度センサーの代わりに熱電対およびひずみゲージを接続し、建物全体の環境状況を含めた常時モニタリングシステムの試用を開始した。

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 10 件)

1. リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その9 1・2次モードが卓越する鉄骨試験体の振動台実験 結果と検討, 松本裕史、前田 礼一郎、楠浩一、田才晃, 日本建築学会大会学術講演梗概集,B-2, pp.703-704, 2009年8月28日
2. リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その10 1・2次モードが卓越する鉄骨試験体の振動台実験 結果と検討, 前田 礼一郎、松本 裕史、楠浩一、田才晃, 日本建築学会大会学術講演梗概集,B-2, pp.705-706, 2009年8月28日
3. Wavelet 変換を用いた性能曲線のモード分解法の有効性に関する実験的研究, 松本 裕史、前田 礼一郎、楠浩一、田才晃, コンクリート工学年次論文集, CD-Rom, 2009年7月8日
4. Evaluation of structural condition using Wavelet transforms, Koichi Kusunoki, Ahmed Elgamal, Masaomi Teshigawara, and Joel P. Conte", 14th World Conference on Earthquake Engineering, CD-Rom, 2008年10月13日
5. リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その8 計測記録からの性能曲線作成と応答評価, 松本 裕史、楠浩一、田中 稲子、伊佐治勝大、田才晃, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 分冊, p.249, 2008年9月18日
6. リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その7 計測計画と性能曲線の作成方法, 楠浩一、松本 裕史、伊佐治勝大、田才晃, 日本建築学会大会学術講演梗概集,

- B-2 分冊, p.251, 2008年9月18日
7. リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その6 加速度計配置についての検討, 伊佐治勝大、楠浩一、松本 裕史、田才晃, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 分冊, p.253, 2008年9月18日
 8. リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その4 性能曲線の精度検討法概要, 松本裕史、茜絢也、楠浩一、田才晃, 日本建築学会大会学術講演梗概集, CD-Rom, 2007年8月29日
 9. リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その5 解析結果の検討, 茜絢也、松本裕史、楠浩一、田才晃, 日本建築学会大会学術講演梗概集, CD-Rom, 2007年8月29日
 10. 加速度計を用いて作成した建物の性能曲線の精度検証", 茜絢也、松本裕史、楠浩一、田才晃, コンクリート工学年次論文集, CD-Rom, 2007年7月13日

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 耐震性能評価方法, 耐震性能評価装置及び耐震性能評価システム

発明者: 楠浩一、勅使川原正臣、荒木正之

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2009-224069

出願年月日: 2010年2月19日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

楠浩一 (KUSUNOKI KOICHI)

横浜国立大学・工学研究院・准教授

研究者番号: 00292748

(2) 研究分担者

田才晃 (TASAI AKIRA)

横浜国立大学・工学研究院・教授

研究者番号: 40155057

勅使川原 正臣 (TESHIGAWARA MASAOMI)

名古屋大学・環境学研究科・教授

研究者番号: 50344007

(H19→H20: 連携研究者)

向井 智久 (MUKAI TOMOHISA)

独立行政法人建築研究所・国際地震工学センター・主任研究員

研究者番号: 30318208

(H19→H20: 連携研究者)

(3) 連携研究者