

## 日本大学生産工学部内における建物の強震観測と地震時振動性状

日大生産工 (院) ○金子 皓樹 日大生産工 師橋 憲貴  
日大総科研 工藤 一嘉 日大生産工 桜田 智之

1. はじめに 実在建物に設置された強震計が破壊的な地震動を記録した例はいまだ限られており、特に大地震時の記録は極めて少ない。従って、実在建物における強震観測の必要性は依然として高いと言わざるを得ない。

本報告は、日本大学生産工学部津田沼キャンパス内のRC造建物とS造建物に設置された強震観測網を紹介するとともに、これまでの観測記録から理解された諸特性の検討を行う。また、簡便に実施できる常時微動観測を両建物で実施し、諸現象の検証・強震観測の補完を行う。本報告では、強震観測記録の解析結果を基準として、微動観測は補足的資料として位置づけ、RC造建物とS造建物の構造特性の違いについて検討する。

### 2. 観測概要

2.1 強震観測 K-NET95型強震計<sup>1)</sup>の第2次利用として、既に多くの例<sup>2)</sup>があるが、本報告もその一例である。RC造4階建ての5号館にはRF・2F・1Fに、S造8階建ての37号館には8F(東西の端に2箇所)・4F・1F及び5号館より北北東約60mに自由地盤(Free-Field)を観測する目的の地震計(全て3成分)を設置し、2007年6月から現在まで観測を継続している。観測に使用している地震計は、5号館3箇所においてSMAC-MDU型強震計(9成分一体型:ミットヨ製)を使用し、37号館4箇所及びFree-FieldにおいてはK-NET95型強震計を使用している。なお、5号館及びFree-Fieldに設置している地震計

は、GPSを用いた時刻校正を行っているが、37号館では時刻の自動校正はされていない。

2.2 常時微動観測 5号館及び37号館の振動性状を把握するに当たり、強震観測を補完するため、常時微動観測を5号館及び37号館において実施した。地震計は動コイル速度型地震計(振動技研製:固有周期1秒)を、ロガーはLS8000SH(白山工業製)を用い、サンプリング間隔は100Hzで測定した。観測箇所は、図1に示す通りである。5号館において、地盤と建物の相互作用であるロッキングの有無を確認するため、4Fにおいて東西方向(EW)中心軸に対して、東西両側に上下動微動計を設置して観測を行った。37号館においては、揺れ振動について検討するため、8Fにおいて水平動微動計を用いて4箇所同時に微動観測を実施した。

3. 強震記録の概要 強震観測は2007年6月から開始され、2009年12月までに計103個の地震記録が収集されている。その観測された記録の中で、設置されている全地震計で観測された地震記録を解析対象とし、かつ、S/N比が低い記録を除いた。解析には5号館及び37号館ともに記録が得られた、計16地震の観測記録を用いた。

### 4. RC造5号館の振動性状

4.1 固有モードの解析 強震記録のS波の部分をフーリエ解析し、はじめは基礎固定に相当する基礎(1階)と各階のスペクトル比(システム関数)を地震毎に求め、さらに16結果

---

Strong-motion Observation in the Campus of the College of Industrial Technology, Nihon University, and Vibration Characteristics of Buildings during an Earthquake.

Hiroki KANEKO, Noritaka MOROHASHI, Kazuyoshi KUDO and Tomoyuki SAKURADA

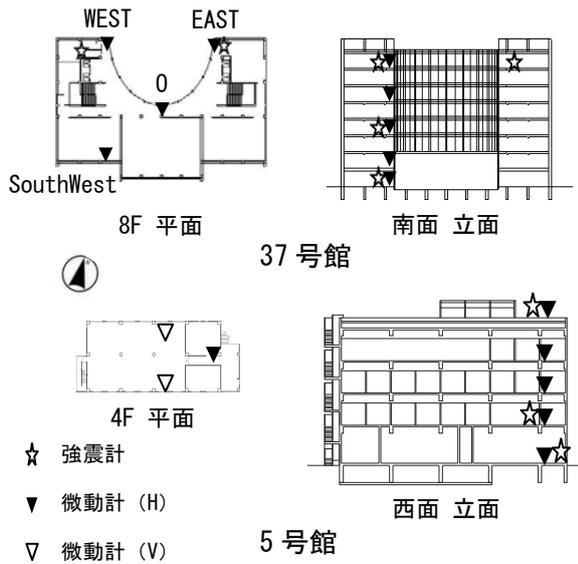


図1 強震計及び微動計設置箇所

を単純平均したものを、図2に示す。本研究に用いた強震観測記録の計測震度は最高でも2.9程度であり、非線形領域には達していないものとし、スペクトル解析の重ね合わせが可能と判断した。なお、スペクトルは全てHanning ウィンドウでスムージングを掛けている。一次モードと思われる5.6Hz付近に見られる卓越は、NS・EW方向RF/1F・2F/1Fどちらもほとんど変わらない。二次モード以降については、NSとEWでスペクトルの形状が異なるが、高周波で卓越しており、応答倍率も低いことから、5号館は一質点系でほぼ議論できると考える。また、地震記録によるスペクトル比にハーフパワー法を適用し、減衰はNS成分が8%、EW成分が7%と求まった。

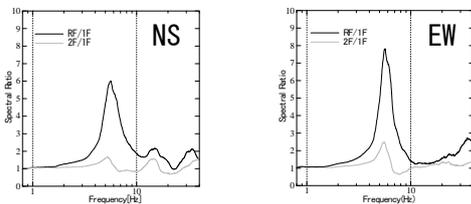


図2 強震観測記録に基づくシステム関数

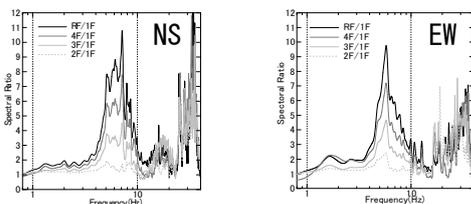


図3 微動観測記録に基づくシステム関数

図3は、微動観測に基づく、同様のシステム関数を示す。各階で得られた水平方向の観測波形(速度波形)に対して、40.96秒のデータを11サンプル抽出し、各々に対してフーリエ解析を行い、システム関数を導出した後に単純平均した。一次モード卓越振動数は、RF/1FからNS方向6.3[Hz]、EW方向5.8[Hz]、2F/1FにおいてはNS方向5.2[Hz]、EW方向5.8[Hz]であった。強震観測記録に比べ、僅かではあるが固有振動数が高く、応答倍率がやや大きく求められたこと、減衰を求めてみるとやや大きくなり(10%以上)、強震観測記録に比べてかなり大きく見積もられることである。原因を追究するには至っていないが、微動の場合は建物内の振動源による影響や、基礎への入力波動のタイプの違いなどが要因として考えられる。微動による評価については、少なくとも減衰については注意が必要であろう。

**4.2 地盤と建物の相互作用の検討** 地盤探査の結果、Free-Fieldから5号館にかけての地盤がほぼ同一と仮定出来ることから、5号館を含む系を一つの線形システムとみなして解析する。強震記録による各種スペクトル比を図4に示す。図4より、NS・EW双方において、基礎固定と考えた時のシステム関数であるRF/1Fと地盤と建物の相互作用が含まれているRF/Gを比べると(GはFree-Field)、地盤と建物の相互作用による見かけの固有振動数の伸びが見られ、1F/Gでは固有振動数付近で大きな落ち込みが見られるなど、5号館は典型的な地盤建物の相互作用の影響がみられる。

ロッキングについて検討するため、上下動微動計を1Fおよび4F床上にそれぞれ2箇所観測した。4F UDのフーリエスペクトルを図5に示す。卓越周波数は0.7[Hz]付近のみであり、これは微動そのものの卓越である。6[Hz]付近に若干の卓越と、20[Hz]付近に特徴的な卓越が見られる。そこで、UDの速度波

形を 6[Hz]を中心としたバンドパスフィルターを掛け、積分して建物の東西両端点における変位波形の比較から(図6)、ロッキング有無について検討した。位相差はほとんど見られないことから、6[Hz]の卓越はロッキングとは言えない。20[Hz]の卓越かもしれないが、今回のサンプリングが100[Hz]のため、波形を追うことは難しく、この先の議論を避けざるを得ない。

**4.3 質点系モデルによる考察**<sup>3),4)</sup> 強震観測及び微動観測から得られた知見を考慮し、図7の様に、5号館を地盤と建物の相互作用を考慮した二質点のせん断質点系モデルに置換して解析し、観測値と比較検討する。施工図より各階の層重量を算出して、2・3・4・RFを一つの等価質量 $m_B$ にし、基礎の質量 $m_F$ の二質点のせん断質点系モデルに置換した。必要となる固有モードは、図3のシステム関数より読み取り、一般固有値問題の式からスウェイ剛性 $k_S$ ・建物の等価剛性 $k_B$ を得た。求めた各パラメータを用いstodola法とモーダルアナリシスを組み合わせてシステム関数を得た。建物の減衰定数 $c_B$ とスウェイの減衰定数 $c_S$ は、応答倍率に合わせて変化させたため、個別の減衰定数に対する議論はできない。強震記録より得られたシステム関数と解析値を比較したものを図8に示す。図8より、4[Hz]付近にある一次モードは観測値に対してほぼ一致したと言えるが、二次モードは卓越振動数がずれている。これを一致させるには、層重量の精査を正確に行うなど、各パラメータを再考する必要があると考えられる。また、導出した $k_S$ を解析値と照らし合わせるため、浅層表面波探査の結果を考慮して、簡易的にParmeleeの式よりスウェイ剛性を導出すると、一般固有値問題の式より導出した $k_S$ に対して、76%の値となった。5号館は杭基礎ではあるが、簡易的に判断するため、直接基礎

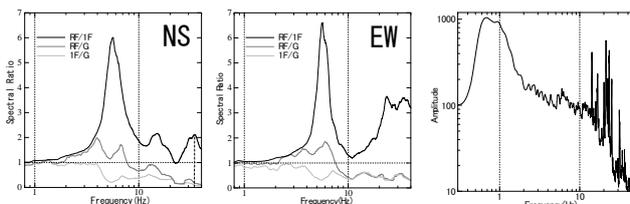


図4 強震観測記録に基づく地盤と建物のシステム関数

図5 4F UDのフーリエスペクトル

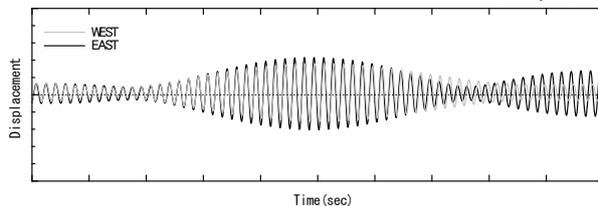


図6 4F 東西両端点におけるUDの変位波形

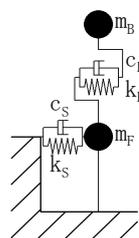


図7 解析モデル

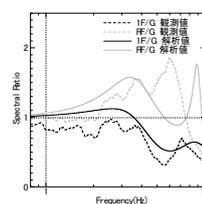


図8 観測と解析モデル計算との比較 (EW)

を対象とした Parmelee の式を用いた事を考慮すれば、妥当な結果が得られたと考える。

## 5. S造37号館の振動性状

**5.1 強震・微動観測記録の解析** 強震観測及び微動観測に基づく解析結果として、8階/1階の伝達関数を図9に示し、モード形状を図10に示す。また、図9より得られる固有振動数を表1に、ハーフパワー法による減衰定数推定値を表2に示す。

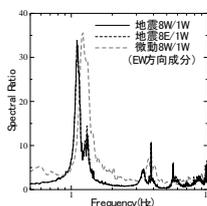


図9 システム関数 (EW)

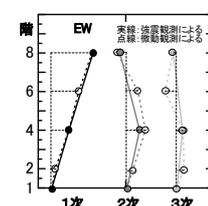


図10 モード形状 (EW)

表1 固有振動数解析値一覧

	EW			NS		
	強震	微動	理論値	強震	微動	理論値
1次	1.10Hz	1.22Hz	1.11Hz	1.17Hz	1.17Hz	1.17Hz
2次	3.32Hz	3.61Hz	3.08Hz	3.54Hz	3.42Hz	3.27Hz
3次	5.57Hz	6.25Hz	5.11Hz	6.21Hz	6.10Hz	5.40Hz

表2 ハーフパワー法による減衰定数推定値一覧

	EW		NS	
	地震	微動	地震	微動
1次	0.0305	0.0451	0.0158	0.0184
2次	0.0151	0.0068	0.0030	0.0161
3次	0.0017	0.0088	0.0014	0.0090

図 10 のモード形状は強震観測点よりも微動観測点を多く設置したため適切なモード形を再現できた。そして、減衰定数の推定値は各水平振動成分 (EW・NS) で地震観測記録によるものよりやや大きく見積もる傾向が見られたが、微動では振れ周期と固有周期が極めて接近し、固有周期より振れ周期の倍率が大きく出ていることが原因と考えられ、振れなど建物の固有振動以外のピークが見られない建物であれば、適切な評価が可能と考えられる。

**5.2 振れ振動の検討** 振れ振動が存在すると仮定すると、8F 各観測点で表 3 のような水平成分の位相方向が生じるが、常時微動観測によって得た伝達関数のスペクトルピーク (1.32Hz) で図 11 のようなフィルター波形を求めた結果を読み取り、水平 1 成分ごとの位相方向をまとめると表 4 のようになる。図 11 では中央 (0 点) では振幅が極めて小さく、0 点を中心に回転しているようなイメージを把握できる。また、振れ時の振幅が大きくなると予想される西・東・南西の 3 点で表 4 の位相方向が表 3 に示した振れの仮定条件と一致したため、1.32Hz に表れるピークを振れ振動によるものと理解した。

表 3 振れ振動仮定時の 8F 4 観測点での位相方向

左右振れ	West	East	0	SouthWest
EW成分	東(西)	東(西)	不動点	西(東)
NS成分	北(南)	南(北)	不動点	北(南)

表 4 図 11 より読み取れる 4 観測点での位相方向

左右振れ	West	East	0	SouthWest
EW成分	東(西)	東(西)	西(東)	西(東)
NS成分	北(南)	南(北)	北(南)	北(南)

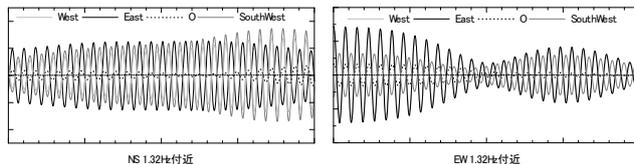


図 11 振れ振動時の水平変位波形

**6. まとめ** 日本大学生産工学部キャンパスにおける強震観測記録と微動観測から、特性が異なる 2 種類の建物、RC 造 (4 階建) と S 造 (8 階建) の振動特性について検討し、本

研究内で以下の知見が得られた。

- 1) RC 造の 5 号館では地盤と建物の相互作用が顕著であり、スウェイが主で、ロッキングによる影響は少ないことが判明した。
- 2) 5 号館を地盤と建物の相互作用(スウェイ)を考慮した二質点せん断質点系モデルにした所、一次モードについてはほぼ一致させる事ができたが、二次モードに関しては、各パラメータの精査が必要と考えられる。
- 3) S 造の 37 号館においては、減衰定数がかなり小さい、つまり応答倍率が大きいことが判明した。
- 4) 37 号館のシステム関数で 1.32Hz における卓越は振れ振動と理解された。
- 5) 5 号館と 37 号館では、階数が異なるため単純に比較はできないが、解析の結果より固有周期が 4[Hz]程度異なるなど、躯体の構造種別により固有周期は大きく異なることが分かる。また、揺れの継続時間も固有周波数により大きく異なり、37 号館においては、1F において揺れがほぼ収束していても、8F においては比較的大きな振幅の揺れが継続している。しばらくは観測を継続し、振動特性の理解を深めたいと考えている。

### 謝 辞

本研究は、本学部卒業生である須賀一裕氏・森井達之氏の業績によるものが大であり、この場を借りて御礼申し上げる。強震観測網は独立行政法人防災科学技術研究所が K-NET95 の第 2 次利用に貢献され、東京大学地震研究所技術職員坂上実氏が多大な便宜をはかって下さった賜である。また、この観測は東京大学地震研究所との共同観測として位置づけられており、データの一部は共有化されている。強震計の設置および配線工事など、日本大学生産工学部当局のご高配による所が大である。記して御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 防災科学技術研究所: <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/gk/knet95.shtml>
- 2) 例えば、羽田・山田・堀家: K-NET95 強震計を利用した既存建物地震観測、日本建築学会大会学術講演梗概集、21083、pp. 165-166、2008.
- 3) 田治見宏: 建築振動学、コロナ社、p 213、1965.
- 4) 柴田明德: 最新耐震構造解析、森北出版、p342、1981.