

2011 年東北地方太平洋沖地震（群）の生産工学部津田沼 キャンパスにおける強震動と建物の震動性状

日大生産工（学部） ○高橋 和丈 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 本年 3 月 11 日 14 時 46 分頃に東北地方東方沖で $M_w=9.0$ の巨大地震が発生し、気象庁は 2011 年(平成 23 年)東北地方太平洋沖地震と命名した。有史以来、世界的にも有数の大規模地震であった。今回の地震は、東北・関東各地において大きな被害をもたらしたが、特に津波によって多くの人命が失われ(2 万人弱、行方不明者を含む)、原子力発電所の事故原因としても有力視されている。本キャンパスの強震観測¹⁾においても多くの記録が得られた。実在建物における大地震時の記録が極めて少ない現状では、希少かつ貴重な記録と言えよう。

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記録を紹介するとともに、過去数年と東北地方太平洋沖地震の本震・余震を含む 2011 年 3 月 11 日以降に得られた観測記録から、巨大地震発生の前後で構造物震動特性の変化や違いを理解すべく、非線形応答特性に焦点を当てて考察する。

2. 観測概要 K-NET95 型強震計の第 2 次利用として、既に多くの例があるが、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 に自由地盤の観測を目的に強震計(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(図 1)。観測に使用している地震計は、5 号館は 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 箇所及び自由地盤においては K-NET95 型強震計を使用している。なお、5 号館及び自由地盤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。

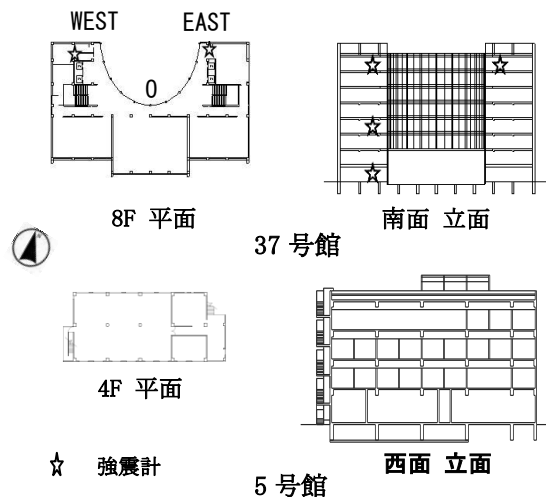


図 1 強震計設置箇所

3. 強震記録の概要 強震観測は 2007 年 6 月から開始し、現在に至っているが、2011 年 3 月 10 日まで計 110 個、そして 2011 年 3 月 11 日から 7 月までの計 220 個の地震記録が収集されている。3 月 11 日以降の記録はほとんどが広義の余震によるものである。本研究では、原則として全観測地点で観測された地震記録を解析対象とした。2009 年以前の記録の解析は基本的に金子・他¹⁾に基づくものとし、2011 年の記録の解析には気象庁の地震月報に記載され、かつ、本キャンパスで観測された地震記録を用いた。一例として、5 号館の本震記録(NS 成分)を図 2 に示す。

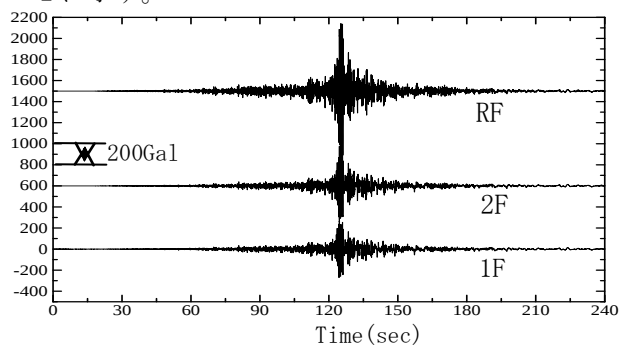


図 2 5 号館の本震記録 (NS 成分)

Vibration Characteristics Inferred from the Strong-Motion Records Retrieved in the Tsudanuma Campus of the CIT Nihon University from the 2011 Off the Pacific coast of Tohoku Earthquakes

Kazutake TAKAHASHI, Noritaka MOROHASHI, Kazuyoshi KUDO and Tomoyuki SAKURADA

表 1 本震時の各観測点の最大値表（速度・変位を求める時の LPF, f_c は 0.1Hz を使用）

		加速度 (gal)			速度 (cm/s)			変位 (cm)			計測震度
		NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD	
Free		-322.03	-362.83	178.46	19.37	-22.11	8.96	-12.22	-13.46	5.94	5.41
5G	1F	310.86	-233.49	145.35	-19.23	20.44	8.21	-11.19	-12.69	5.62	5.25
	2F	376.46	-308.34	-155.40	21.51	21.21	8.27	-11.20	-12.70	5.66	5.45
	RF	-643.41	635.30	-144.91	34.61	-34.16	7.98	-11.22	-12.69	5.57	5.96
37G	1F	155.09	-150.90	56.14	-20.34	-17.60	8.17	-11.34	-13.15	6.06	4.82
	4F	-442.59	338.03	-71.79	39.60	-33.03	8.14	-12.75	13.83	5.92	5.80
	8Fw	-454.86	411.36	-120.09	-73.58	-57.94	8.16	-16.86	16.79	6.01	6.26
	8Fe	-509.80	-515.31	128.66	84.81	-59.11	8.86	-17.70	16.56	6.05	6.37

また、本震時の最大値を表 1 に示す。図から明らかなように、 $M_w=9.0$ の故であろうが、継続時間が極めて長い（200 秒程度）ことと、極めて短い時間帯に大振幅となっている。この大振幅時に非線形挙動となった可能性が高く、その点に重点を置いた解析を行った。

4. 本震時の非線形挙動

4.1 5 号館（RC 造）の震動性状 本震時の最大振幅を含む記録を計 12 区間に分割し、各々 10 秒間のウィンドウを取りフーリエ解析し、基礎（1 階）と RF（4 階屋上）のランニングスペクトル比（システム関数）を区間毎に求めた。それを時系列で列記したものを図 3 に示す。それから読み取ることのできる卓越振動数（固有振動数）の時間的推移を求め、図 4 に示す。

NS 成分の時間的変化が顕著であるが、当初のレベルの低い時点では固有振動数を 5.8Hz と読めるが、最大振幅が現れる 50 秒前後では、固

有振動数は 4.4Hz にまで低下している。その後、若干の回復は見られるものの、スペクトル比のピークは低周波（約 5Hz 程度）に移行したままになっている。建物を質点系とみなした場合に、剛性に変化、つまり非線形挙動を示したことが分かった。一方、短辺方向の EW 成分では長辺方向の NS 成分に比べてスペクトル比の変化は少ない。

4.2 37 号館（S 造）の震動性状 37 号館も同様に、本震時の強震記録から最大振幅を含む前後を計 9 区間において 20 秒毎のウィンドウとして基礎（1 階）と 4 階および 8 階のスペクトル比を区間毎に求めた。図 5 に基礎と 4 階のランニングスペクトル比を示す。8 階も同様に得られている。スペクトル比（伝達関数）は 5 号館と同様に時間的変化が見られるが、1 次より 2 次のピークの変化が顕著である。1 次モードのピーク振動数は元に戻るようには見えない。

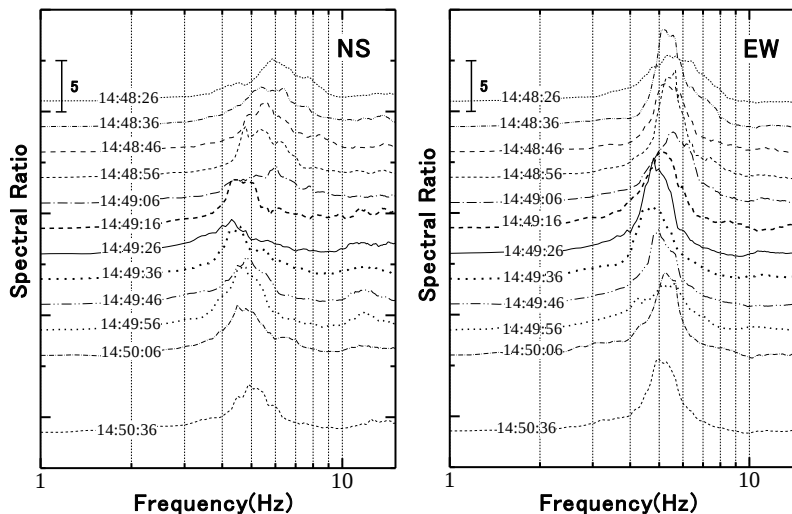


図 3 5 号館本震時のランニングスペクトル比（RF/1F）

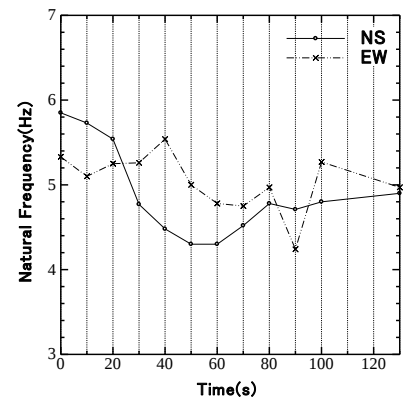


図 4 5 号館本震時の固有振動数の経時変化

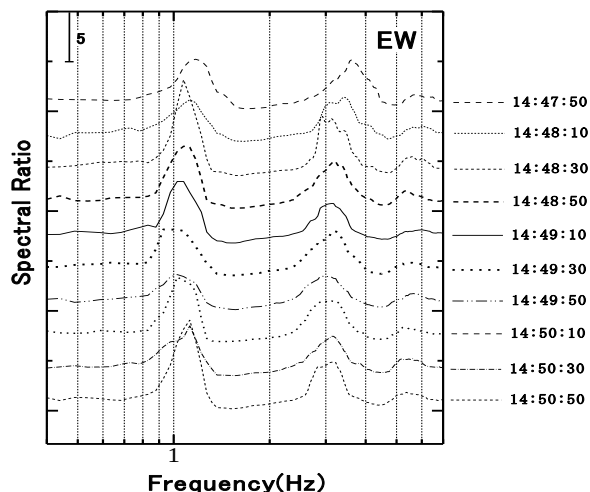


図5 37号館本震時のランニングスペクトル比 (4F/1F)

5. やや長期の震動性状の時間的変化 本震時非線形の挙動があったことは、5号館・37号館共に見られた現象である。大震動を受ける前の振動特性と後の余震などの記録を比較し、やや長期的な振動性状の変化を検討した。5号館のRF/1Fで見た固有振動数の経時変化を図6に示す。この計算ではウィンドウを40秒としてフーリエスペクトルを地震ごとに求めている。2009年の記録は5結果を単純平均化したもので、2011年3月以降のものとともに示す。なお、スペクトルは全てHanningウィンドウでスムージングしてある。図6の5号館のRF/1Fにおけるスペクトル比の経時変化は図3で見た傾向と類

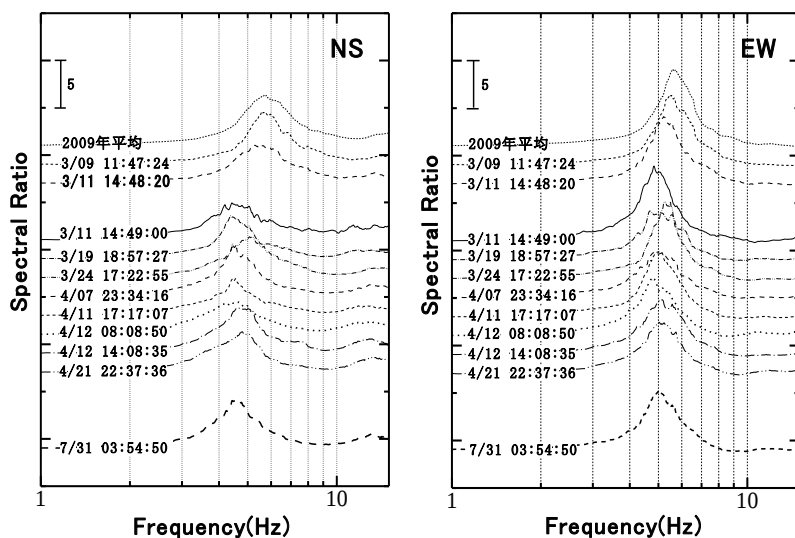


図6 5号館スペクトル比の経時変化 (RF/1F)

似しており、本震後4ヶ月以上も経った7月31日の地震でも卓越振動数は2009年までの平均値より低振動数に変化したままである。変化するピークの位置は微妙に変化しているが、2011年3月11以降のデータのみを用いて、振動レベルと固有振動数の関係を求め、図7に示す。2009年12月までの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かった。本震以降の地震において計測震度3までの分布においても若干の非線形性が見られるが有意とはいえないかもしれない。また、本震から4ヶ月以上経っている7月31日時点においても固有振動数の回復が見られず、また本震以降では計測震度と固有周期が図7のように線形の関係が得られることから、建物には何がしかのクラックが生じ、建物の剛性を低下させたと考える。

37号館の場合も5号館と同様に最大振幅部分を中心に40秒間のウィンドウでフーリエスペクトル求め、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、基礎と8階のランニングスペクトル比を図8に示す。2009年の記録は5結果を単純平均化したものであり、2011年3月以降の地震と比較している。また、2011年3月11日の本震以降に4階19個、8階17個の解析から求めた振動レベルと固有振動

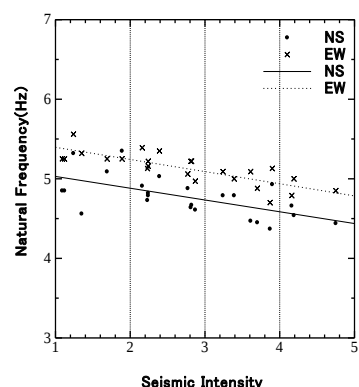


図7 5号館の振動レベルと固有振動数との関係

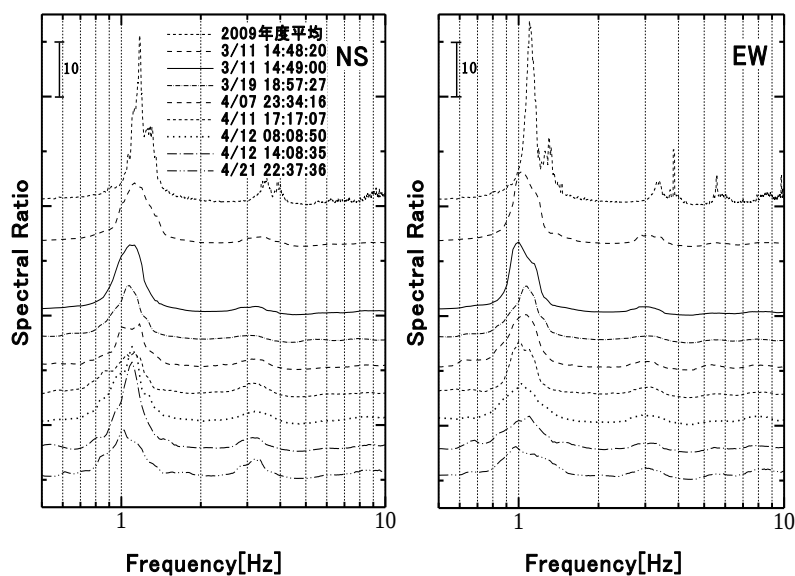


図 8 37 号館スペクトル比の経時変化 (8F/1F)

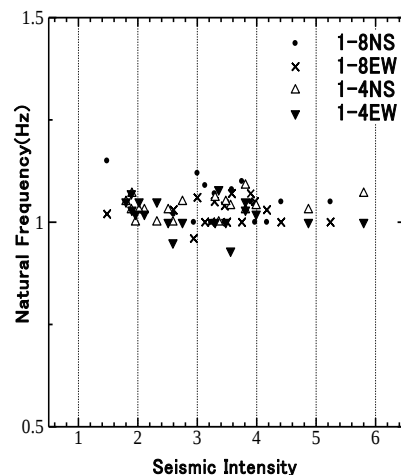


図 9 37 号館の振動レベルと固有振動数との関係

数の関係を図 9 に示す。2009 年と比較すると本震以降のスペクトル比はどの地震においても EW・NS 方向ともに長周期側に移行しているが、5 号館ほど顕著ではない。また、計測震度（振幅レベル）との関連も 1 次モードでは少ない。

表 2 固有振動数解析値一覧

	NS		EW	
	2009 年平均	2011/3/11	2009 年平均	2011/3/11
1 次	0.0158	0.0729	0.305	0.0538
2 次	0.003	0.337	0.151	0.187

表 3 ハーフパワー法による減衰定数値一覧

	NS		EW	
	2009 年平均	2011/3/11	2009 年平均	2011/3/11
1 次	1.17Hz	1.12Hz	1.10Hz	1.05Hz
2 次	3.54Hz	3.13Hz	3.32Hz	3.13Hz

なお、建物の振動に関する非線形性の検討には減衰定数の評価が重要である。因みに、37 号館での固有振動数の変化と減衰定数の変化を表 2 と表 3 に示す。固有振動数の変化はこれまでに述べたとおりであるが、ハーフパワー法で求めた減衰定数は本震時には大きくなっており、既往の研究と調和的である。量的評価については今後検討したい。

6. まとめ 日本大学生産工学部津田沼キャンパスにおける強震観測記録から、特性が異なる

2 種類の建物、RC 造（4 階建）と S 造（8 階建）の震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。

2011 年 3 月 11 日の本震時には固有振動数の変化から 5 号館は 60%（NS）～80%（EW）まで剛性が低下したと判断できる。37 号館は 1 次モードでは 80%（NS）～95%（EW）、2 次モードでは NS・EW とともに 85% 程度の剛性が低下したと判断できる。5 号館に比べ 37 号館の剛性の低下は低いことがわかった。

謝 辞

本研究は、本学部生である大阪早紀氏・久米真琴氏の協力と、本学研究科の金子皓樹氏の支援があった。強震観測は東京大学地震研究所との共同研究である。関係者に御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 金子皓樹, 須賀一裕, 橋本真理子, 櫻田智之, 川村政史, 工藤一嘉: 強震観測及び微動観測に基づく建物振動性状の把握と評価法の検討 —5 号館と 37 号館の振動特性—, 平成 21 年度 (2009 年度)、卒業研究論文, pp. 103-121
- 2) 金子皓樹, 工藤一嘉, 櫻田智之, 師橋憲貴: 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, 第 43 回 (平成 22 年度) 日本大学生産工学部学術講演会建築部会講演概要, pp. 113-116