

論文 東北地方太平洋沖地震本震で得られた RC, SRC 造建物 34 棟の加速度記録を用いた建物応答と継続時間に関する検討

森西 亨太^{*1}・塩原 等^{*2}

要旨：建築研究所の強震観測網が 2014 年から建物上部を含んだ加速度データの公開を始めたことを受け、東北地方太平洋沖地震本震で得られた鉄筋コンクリート造および鉄筋コンクリート系低中層建物 34 棟の上階と下階の加速度データを用いて基礎的な検討を行った。検討の結果、対象となる建物のほぼ全てにおいて、損傷を与えるような上階と下階の相対変形が見られなかった。しかし中層建物を中心に、建物上階で 10cm/sec を超える速度応答が下階に比べてさらに 1 分以上長い例が多いことを示し、地震時の床応答の継続時間に対する考慮の必要性があると考えた。

キーワード：東北地方太平洋沖地震、地震観測記録、長周期成分、建物応答、継続時間

1. はじめに

1995 年の兵庫県南部地震を契機にわが国では地震計の設置が進み、強震観測が全国の多くの観測点で行われるようになった。2011 年の東北地方太平洋沖地震本震（ $M_w = 9.0$ 、以下 3.11 本震）は、強震観測網の発達後に観測された地震の中で規模が最も大きく、非常に多くの地震観測記録が得られた。3.11 本震で得られた記録に関する報告は多数なされているが¹⁾、その多くは K-NET(防災科研強震観測網)に代表される地表点で得られた記録に関するものである。一方、建物に設置された地震計から得られた記録に関しては、建物利用者のプライバシーの問題等の関係で情報の入手が難しく、報告が少ないのが現状である。しかし 2014 年から、独立行政法人建築研究所の強震観測網（以下建研観測網）において、建物上部の記録を含めた数値データを個別申請の形で所外の研究者が入手することが可能となった^{2),3)}。

また、3.11 本震において長時間揺れが続いたことで不安感が増大したことが、建物利用者へのアンケートから報告されている例⁴⁾がある。そこで本稿では、建研観測網が観測記録を得ている建物のうち、3.11 本震で加速度データが得られた鉄筋コンクリート造(以下 RC)および RC 系建物 34 棟を対象とし、3.11 本震を受けた建物の応答とその継続時間について基礎的な検討を行う。

2. 観測記録概要

2.1 地震概要

3.11 本震の概要を表—1 に示す。

2.2 観測建物概要

本稿で用いる加速度記録が得られた建物の概要を表—2 に示す。建物所在地、震央距離 d 、計測震度 M 、構

造形式・階数、強震計種類に併せて、本稿で用いる加速度データを得た強震計の設置階、および平面 2 方向の最大加速度 PGA を示す。本稿では、各建物において最も上の階と下の階に設置された地震計の加速度データを使用し、同一階に複数の強震計がある場合は PGA が最も大きいものとする。

震央との距離は近いもので 200km 程度、遠いもので 700km 程度である。構造形式は RC 棟、鉄骨鉄筋コンクリート造（以下 SRC）棟、プレキャストコンクリート造（以下 PC）棟の 3 種類が含まれるが、1 次固有周期、減衰定数と軒高の相関性に違いは見られない⁵⁾。表—2 では、5 層以下の低層（計 10 棟）と 6-11 層の中層（計 24 棟）に分けて示した。また、軒高 $H(m)$ が分かっている建物については一次固有周期 $T_1(秒)$ を式(1)⁵⁾で推定し、示した。なお文献 3)同様、建物の階数にペントハウスは含めていない。

$$T_1 = 0.015 \times H \quad (1)$$

表—1 地震動記録概要

地震発生日時	3 月 11 日 14 時 46 分
震央	三陸沖
震央北緯	38.10
震央東経	142.86
震源深さ(km)	24
マグニチュード M_w	9.0

3. 強震計の長周期分解能に関する検討

3.1 強震計の周波数範囲

加速度データを用いて建物応答における長周期成分の影響を検討する場合、加速度を計測している地震計の

*1 東京大学 工学系研究科建築学専攻博士課程 修（工）（学生会員）

*2 東京大学 工学系研究科建築学専攻教授 工博（正会員）

表—2 建物概要一覧（軒高が不明な建物の固有周期は空欄とした）

	番号	地名	震央距離 d(km)	計測震度 M	構造形式・階数	強震計 種類	地震計 設置階	PGA(上階) (cm/sec ²)		PGA(下階) (cm/sec ²)		固有周期 T_f (秒)
								1	2	1	2	
低層	1	千葉県市川市	375	5.2	RC/5F	A	5F, 1F	239.8	300.2	164.2	163.3	0.36
	2	東京都渋谷区	389	4.9	RC/4F+B1F	A	4F, 1F	369.6	216.7	237	179.3	0.38
	3	東京都足立区	377	4.8	RC/5F+B1F	A	4F, 1F	265.9	146.3	118	102.6	0.32
	4	東京都江戸川区	377	4.8	SRC/5F+B1F	A	5F, 1F	256.3	298.8	111.9	112.4	0.31
	5	東京都中野区	390	4.8	RC/5F	A	6F, 1F	172	375.4	125.7	158.2	0.34
	6	東京都台東区	382	4.8	RC/3F+B1F	B	4F, B1F	100.1	76.5	99.7	79.2	0.17
	7	東京都小平市	401	4.6	RC/3F	A	3F, 1F	128.7	328.6	109.6	135.9	0.25
	8	山形県鶴岡市	275	3.9	RC/4F+B1F	B	4F, 1F	36.7	38.6	34.2	35.9	0.33
	9	長野県木曽郡	524	2.6	RC/5F+B1F	A	6F, B1F	31.9	30.5	9.5	10.2	0.44
	10	石川県金沢市	574	2	RC/4F+B2F	E	5F, B2F	5.7	4.2	4.6	4.1	-----
中層	11	宮城県仙台市	177	5.6	SRC/9F	E	9F, 1F	908.3	728.4	332.6	329.8	-----
	12	茨城県つくば市	330	5.3	SRC/8F+B1F	C	8F, B1F	696.2	600.2	204	187.9	0.53
	13	福島県いわき市	209	5.3	SRC/8F+B1F	E	9F, B1F	578.5	448.9	174.6	176.1	-----
	14	千葉県八千代市	361	5.3	RC/6F+B1F	A	7F, B1F	359.3	485.9	134.9	140.3	0.3
	15	青森県八戸市	292	5.2	SRC/10F+B1F	B	10F, B1F	119.6	122.7	100.3	104.4	0.64
	16	茨城県つくば市	334	5.2	PC/7F	D	6F, B1F	125.7	90.9	326.9	232.6	-----
	17	埼玉県戸田市	380	5	SRC/8F+B1F	A	8F, B1F	531.1	424.7	172.9	139.8	0.52
	18	東京都品川区	390	5	SRC/7F	A	7F, 1F	315.8	223.2	173.6	169	-----
	19	千葉県千葉市	369	4.9	SRC/8F+B1F	A	8F, B1F	374.9	283.5	151.9	122.2	0.47
	20	埼玉県三郷市	367	4.9	SRC/7F+B1F	A	7F, 1F	219.2	189.6	72.3	103.9	0.45
	21	岩手県宮古市	188	4.8	RC/7F	B	7F, 1F	246.1	197.4	138.1	122.4	0.37
	22	千葉県船橋市	368	4.7	RC/8F	A	8F, 1F	359.1	338.9	144.2	146.6	-----
	23	東京都文京区	383	4.7	SRC/9F	A	7F, 1F	200.6	359.6	73.4	150.7	0.48
	24	東京都北区	380	4.6	SRC/7F+B2F	A	6F, B1F	179.8	249.6	85.3	139.2	0.48
	25	青森県八戸市	292	4.6	RC/6F+B1F	E	6F, B1F	347.7	335.2	96.5	110	0.37
	26	東京都千代田区	386	4.5	SRC/11F+B2F	B	8F, B2F	94.3	81.6	104.3	91.2	0.85
	27	秋田県秋田市	298	4.3	RC/6F+B1F	E	8F, 1F	175	192.2	50.3	46.9	0.39
	28	静岡県静岡市	520	4.2	SRC/6F	B	6F, 1F	80.7	56.2	27.7	40.6	0.35
	29	新潟県新潟市	335	4	RC/6F+B1F	E	6F, B 1F	38.8	55.5	27.2	40	-----
	30	山梨県甲府市	468	4	RC/8F+B1F	A	8F, B1F	40.6	51.3	46.5	39.3	0.56
	31	愛知県名古屋市	623	3.1	SRC/11F+B2F	B	12F, B2F	25	45.8	8.5	14.5	0.65
	32	長野県長野市	444	2.7	SRC/10F+B1F	A	11F, B1F	34.6	26.9	7.9	7.3	0.69
	33	北海道釧路市	558	2.6	SRC/9F+B1F	B	9F, B1F	15.9	19	8.4	11.6	0.66
	34	三重県松阪市	688	2.3	SRC/6F	E	7F, 1F	16.2	7.6	6.3	5.5	0.44

長周期分解能の正確性について考慮する必要がある。表—3に各強震計の周波数範囲²⁾および使用している棟数を示す。強震計の種類を示す記号は表—2と対応している。長周期（低周波数）領域に関しては、種類 A-D は DC となっており、種類 E は 0.02Hz と限界値が記されて

いる。

3.2 建物と上階と下階の相対変形に含まれる周期成分

各建物の上階と下階の相対加速度をフーリエスペクトルで図示する。種類 A の強震計で得られた記録のうち、番号 1, 2, 14, 17 の建物における相対加速度フーリエスペ

クトルを図—1 に、種類 B-E の強震計で得られた記録のうち、番号 6, 10, 12, 16 による相対加速度フーリエスペクトルを図—2 にそれぞれ示す。フーリエスペクトルを求める際は、幅 0.05Hz の Parzen 窓⁹⁾で平滑化を行っている。なお、図-1、図-2 に使用する加速度データは全て方向 1 のみとする。

図-1、2 とともに、0.3-1.0 秒近辺で大きなピークが見られ、これは各建物の 3.11 本震時の一次固有周期を表している。しかし、図-1 は図-2 と比較して、建物の一次固有周期よりも明らかに長い部分、具体的には周期 5 秒以上で 10-100 倍の大きな値となっており、種類 A の強震計を使用する他の建物の記録からも同様の傾向を確認した。このことから、加速度データに含まれる、5 秒を超えるとても長い周期の成分を評価する際、現在使用されている強震計では難しい場合があることが示された。

表—3 各強震計の周波数範囲

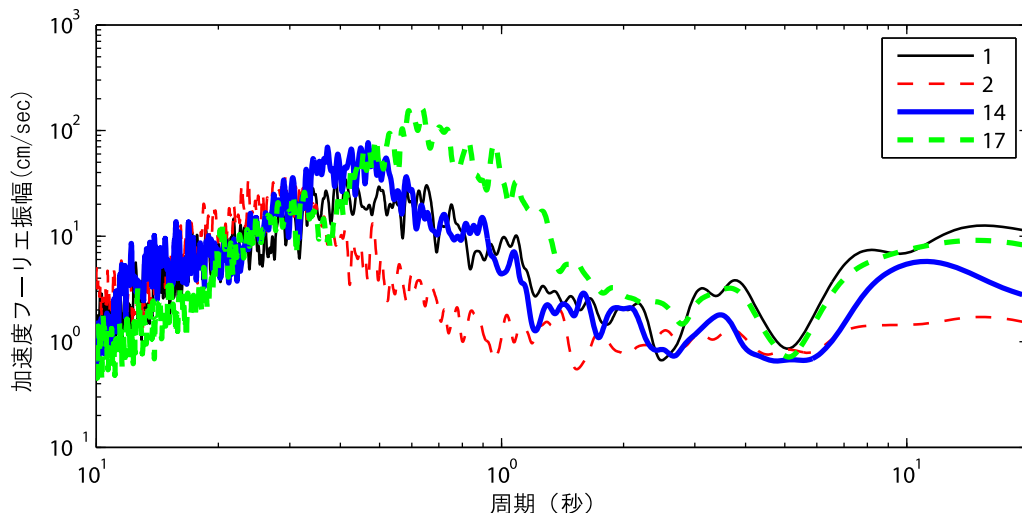
強震計	周波数範囲
A	DC～40Hz
B	DC～30Hz
C	DC～30Hz
D	DC～100Hz
E	0.02～30Hz

4. 各建物の応答に関する検討

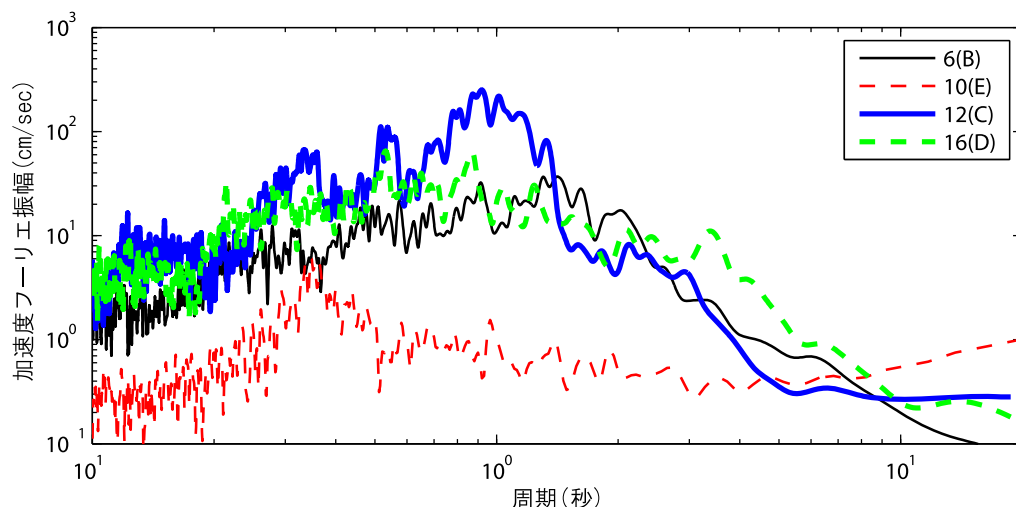
3. より、周期が 5 秒を超える成分の信頼性が低い強震計があることが分かった。そこで、本章にて各強震計の速度および変位の導出の際は、ローカットフィルタで周期が 5 秒より長い成分を除去することとした。なお、速度と変位の計算は周波数領域で加速度を積分して求めた。

4.1 上階と下階の相対変位

表—4 に各建物の平面 2 方向の相対変位の最大値と階数差を示し、その結果をプロットしたものが図—3 であ



図—1 種類 A の強震計で測定している 4 棟の加速度データから得られた上階と下階の相対加速度フーリエスペクトル

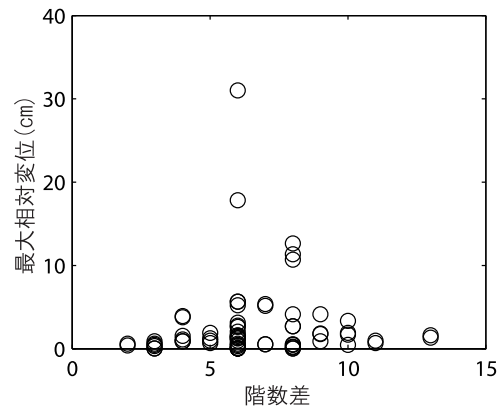


図—2 種類 B-E の強震計で測定している 4 棟の加速度データから得られた上階と下階の相対加速度フーリエスペクトル

る。表—4 より，建物 11,12,13 における相対変位の大きさが目立つ。特に，最大変形角（最大相対変位を階数差相当の高さで除したもの）が 1/100 を超えた建物 11 は耐震壁が大破するなどの被害が生じたと報告されてる⁷⁾。計測震度 M は他の建物と大きく変わらないが，いずれも震央に比較的近い建物であることから，短周期成分が他の観測点に比べて減衰せずに伝わってきたためと考えられる。

表—4 各建物の平面 2 方向の
相対変位の最大値と階数差

番号	方向 1(cm)	方向 2(cm)	階数差
1	1.11	1.52	4
2	0.50	0.58	3
3	0.92	0.31	3
4	0.90	0.91	4
5	0.72	0.95	5
6	3.77	3.91	4
7	0.41	0.62	2
8	0.05	0.06	3
9	0.10	0.07	6
10	0.03	0.02	6
11	31.01	17.85	6
12	12.62	11.31	8
13	10.66	4.15	8
14	1.72	3.32	10
15	2.71	2.68	8
16	5.10	5.37	7
17	5.21	5.67	6
18	1.88	0.46	10
19	4.15	1.84	9
20	1.73	0.92	9
21	1.28	1.51	6
22	2.60	2.08	6
23	1.44	3.11	6
24	0.67	0.96	11
25	1.36	1.64	13
26	5.70	2.78	6
27	1.28	1.90	5
28	0.54	0.25	8
29	0.18	0.43	8
30	1.29	1.63	6
31	0.45	0.94	6
32	0.65	0.34	6
33	0.55	0.55	7
34	0.07	0.02	8



図—3 各建物の平面 2 方向の相対変位の最大値と
階数差の関係

一方，大部分の建物の上階と下階の相対変形は 10cm 以下である。変形角に直すと 1/300 以下であり，建物の構造に損傷が生じるような変形ではなかった⁵⁾と言える。

4.2 床の速度応答の継続時間

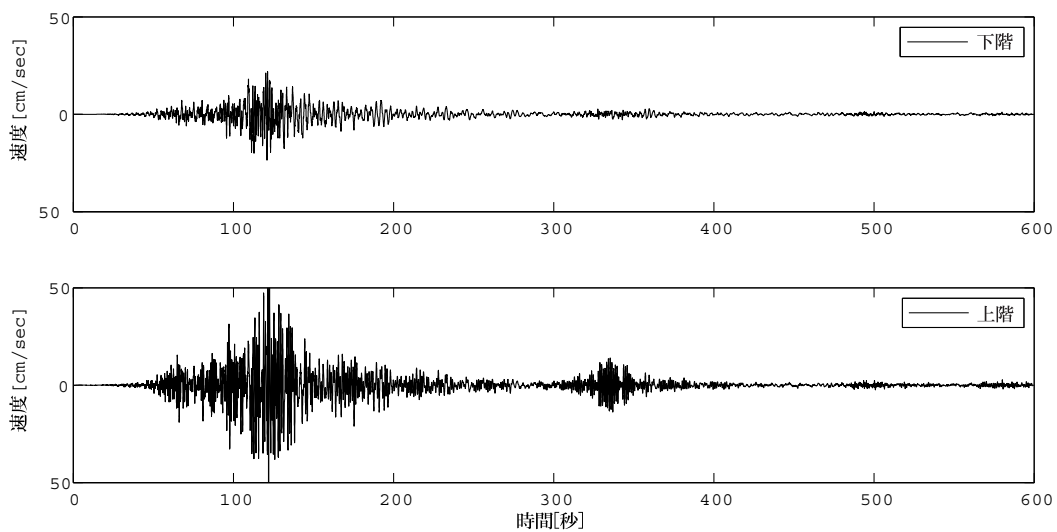
4.1 にて，本稿で対象としている観測建物の中で損傷を与えるような地震動の入力があつた例はほぼゼロであつたことを示した。しかし，3.11 本震では建物の構造に損傷がなくとも，揺れ自体が長時間続いた例は建物・地表面に関わらず多数報告されている¹⁾。本項では，各建物の上部と下部の速度応答の継続時間について基礎的な検討を行う。まず，上部と下部の速度応答の一例として，建物 12 の方向 1 の上部と下部の速度波形を図—4 に示す。上部の最大速度応答が下部に比べて大きいうえに，長時間続く振動も大きいことが分かる。

各建物の上階と下階の平面 2 方向の絶対速度の波形において，1cm/sec を超えていた（振動自体が続いた）時間長さを図—5 に，10cm/sec を超えていた（人間が充分感知できる程度の揺れが続いた）時間長さを図—6 にそれぞれ示す。本稿では，速度の絶対値が 1cm/sec あるいは 10cm/sec を最初に超えた時刻から最後に超えた時刻までの長さを時間長さとしている。

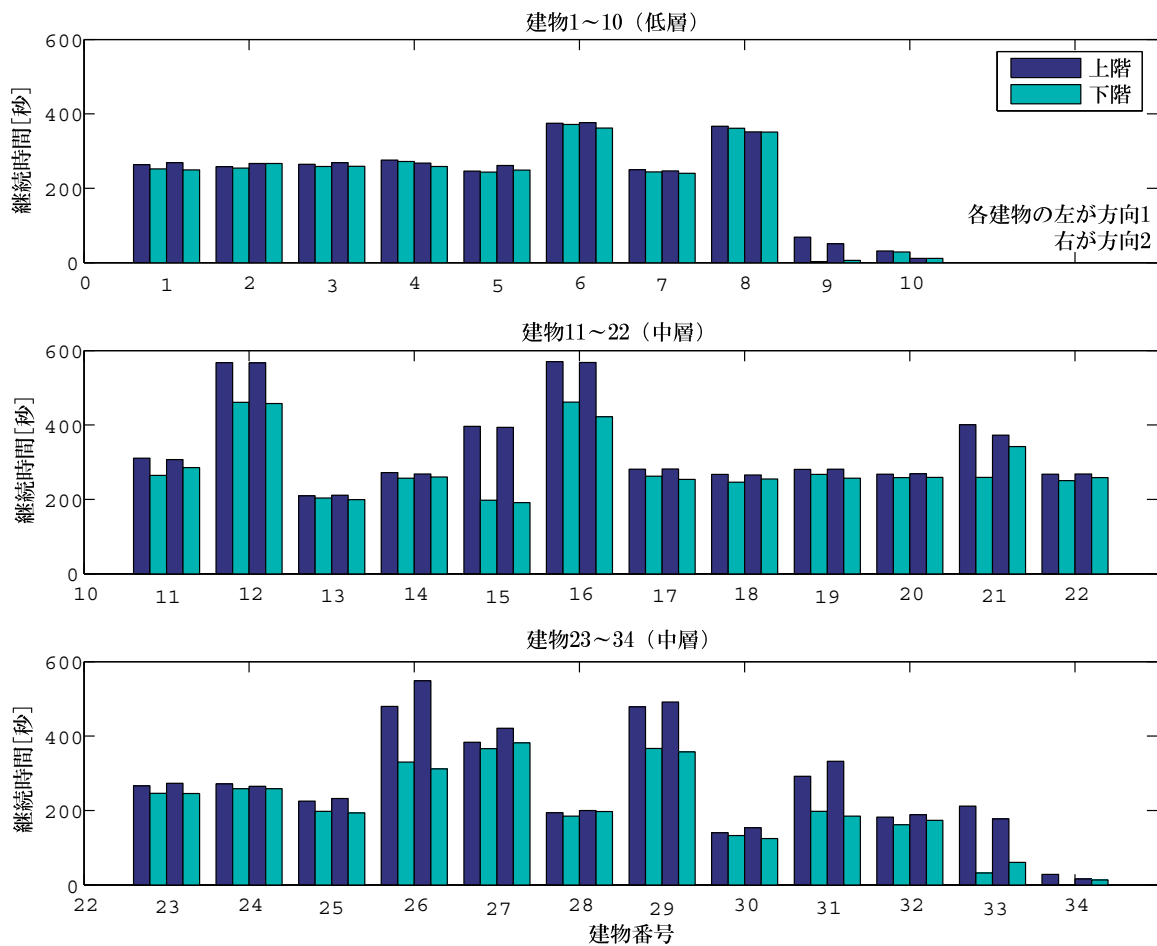
図—5 より，ほとんどの建物において 3 分以上の継続時間となっている。また，同一建物の上階と下階において継続時間に明瞭な差が見られる建物が少ない。これは，3.11 本震において上階・下階ともに，揺れが収まるのに非常に長い時間を要したことを示している。

図—6 より，速度が 10cm/sec を超える速度応答はグラフ 2 段目以降の中層建物で多く見られる。そして中層建物の多くは，上階の継続時間が下階に比べ 1 分以上長くなっており，階数の大きな建物の上階で速度応答の増幅があつたと言える。

床の速度応答は，強震時の人間の行動難度や不安感を表す指標⁸⁾などに用いられる。10cm/sec という値は，人



図—4 建物 11（方向 1）の上階と下階の速度の時刻歴

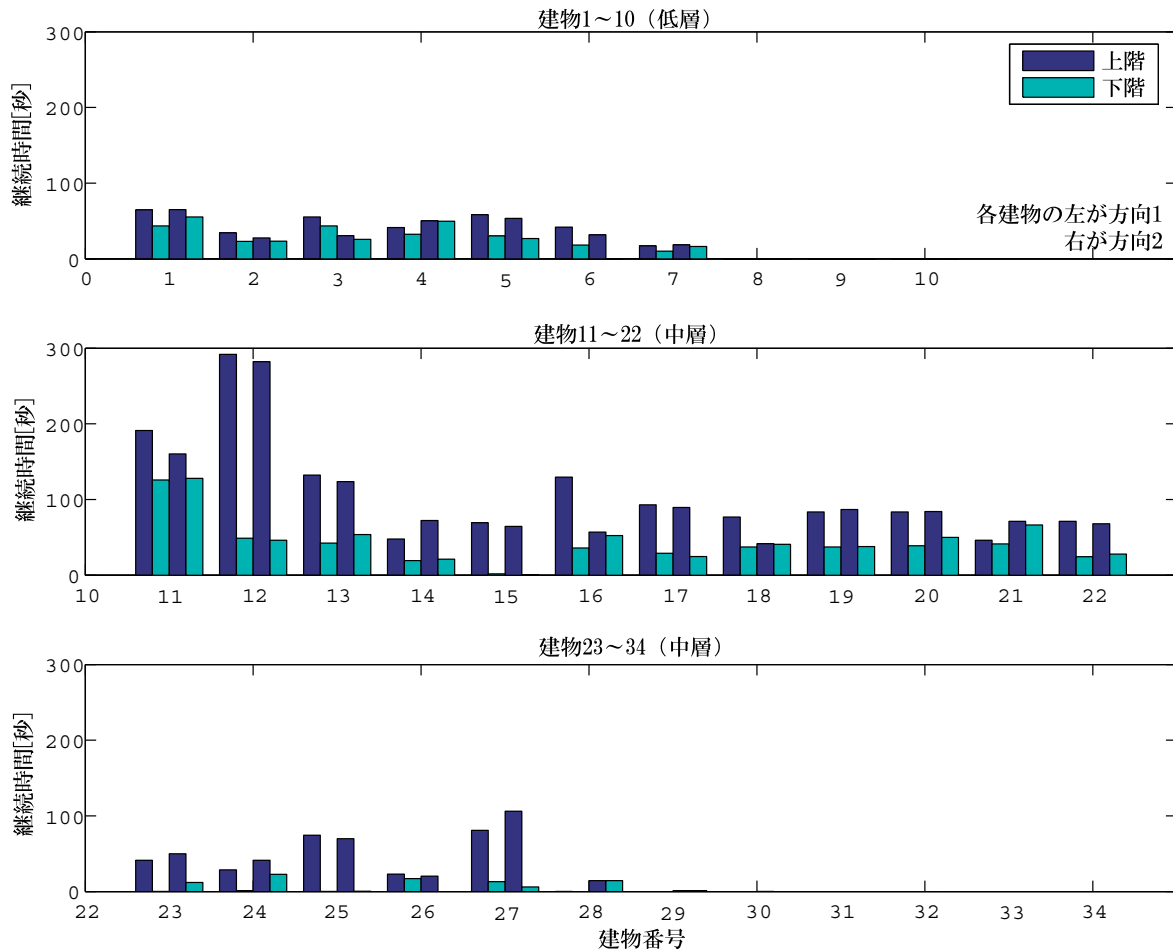


図—5 各建物の上階と下階の 1cm/sec を超えていた時間

間が行動不能になるような大きなものではないが。長時間検討対象にはなかったが、高層・超高層建物では揺れがより長時間続くと考えられるため、継続時間による影響については今後も注意して見ていく必要がある。

5. まとめ

3.11 本震において RC 系低中層建物 34 棟の上階と下階で得られた加速度データを用いて検討を行い、以下の知見を得た。



図—6 各建物の上階と下階の 10cm/sec を超えていた時間

- 1) 上階と下階の相対変位を求めた結果、構造に損傷があったと考えられる変形を示した建物は、検討対象の中では震央に近い宮城県の1棟だけであった。
- 2) 上階と下階の絶対速度波形から応答の継続時間を求めた結果、揺れ自体が収まるのに要した時間は上階・下階で大きく変わらなかった。一方、ある程度大きな振幅の揺れの継続時間は、中層建物において上階が下階より1分以上長くなる傾向が見られた。

今後は、2)で公開されている鉄骨造（以下S造）建物の記録の計算結果も用いてのRC造とS造の建物の応答性状の比較検討、強震時の床応答の継続時間の定量的評価と振動の継続時間長さによる建物利用者の心理的影響について分析していく予定である。

謝辞

本稿で用いた加速度データは独立行政法人建築研究所の強震観測網で得られたものです。またデータの使用に際して、建築研究所の鹿嶋俊英様に多くのご助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 東日本大震災合同調査報告書編集委員会：東日本大震災合同調査報告（共通編 1），日本地震工学会，2014.3
- 2) 建築研究所の強震観測： <http://smo.kenken.go.jp/ja>
- 3) 鹿嶋俊英，小山信，大川出：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震における建物の強震観測記録，建築研究資料 No.135，独立行政法人建築研究所，2012
- 4) 長周期地震動に関する情報のあり方検討会：長周期地震動に関する情報のあり方報告書，気象庁地震火山部，2012
- 5) 日本建築学会：建築物の減衰，2000
- 6) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994.5
- 7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針（案）・同解説，2004
- 8) 高橋徹ら：長周期地震動を考慮した人間の避難行動限界曲線の提案，日本建築学会大会梗概集，B2，pp. 497-498，2007.8