

2011年東北地方太平洋沖地震による超高層建物の揺れ・被害と負傷者推定について

D1-08088 小泉 秀斗

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では甚大な津波被害のみならず長周期地震動により広範囲にわたって建物被害が発生し、中でも非構造部材の被害は多数報告されている。また超高層建物では長周期地震動によって、地上での地震が収まった後も大きく長時間揺れていたことが確認された。超高層建物では建物の応答が複雑に変化し、震度や被害率も階別に異なってくる。今後想定される東海東南海連動型地震や首都直下型地震では今回以上の建物被害が出る可能性が懸念され、特に首都圏では超高層建物が数多く存在し、甚大な被害が出ると考えられる。

2. 研究の流れ

これまで観測記録がない場所に関して、アンケートによる震度を算出する手法が行われてきた。そこで本研究では工学院大学の学生、教職員を対象に東北地方太平洋沖地震に関するアンケート調査を行い、調査結果からアンケート震度を算出し各階での震度分布と揺れを分析する。また既往の負傷者推定の手法に非構造部材の被害を考慮させるため、家具の被害関数と天井落下の発生率の修正し想定地震による負傷者推定を行う。その推定結果を実際の被害と比較し、その妥当性を検討する。

3. アンケート調査概要

- ・調査実施日：2011年7月22日 午後13時から16時
- ・対象：工学院大学新宿キャンパス、学生、教職員(147名)

表1. アンケート設問項目

設問	アンケートの設問項目
設問2	地震時の電灯やカレンダーなど、吊してあるものの揺れや動き
設問3	コップ等の水、又はガラスビンの中のモノ(飲料水など)の動き
設問5	落下物の有無
設問6	キャビネット・戸棚・本棚など、重い家具の動き
設問7	フローア全体としての揺れ
設問8	フローアの被害
設問9	地震の揺れている時間の感じ方
設問11	地震に気がついたとき驚き
設問12	こわさの程度
設問13	地震のときフロアにいた方のみ、どのような行動したか
設問14	地震のときフロアにいた方のみ、立っていられたか
設問15	地震のときに動いていた方のみ、行動は困難だったか

・設問項目の修正箇所

室内の家具に関する表現をオフィス向けに変更
→コケシ、食器棚⇒文房具、書類、書棚
建物構造に関する情報について、入手可能として削除

「家」という表現を適宜フローアと変更
オフィスビル特有の項目を追加
→キャスター付きの家具の挙動に関する項目を追加
アンケート調査から工学院大学における東北地方太平洋沖地震での被害をまとめ、震度を算出して階別の震度分布を調べる。本研究では太田・後藤・大橋ら考案のアンケートシートをオフィス用に修正したものを使用し、震度は太田らのアンケート震度の算定式¹⁾を用いた。
アンケートの有効回答数は精神面に関する設問で多く、身の回りに起きた現象など物理的なことに関する設問では回答数がやや少なかった。また条件を絞り込んだものや制限がある回答率が低くなっている。今回の調査では有効回答数が少数な階があるため、低・中・高層で階数を重ねて考察した。なお、低層は1~9階、中層は10~19階、高層は20~28階として区分している。

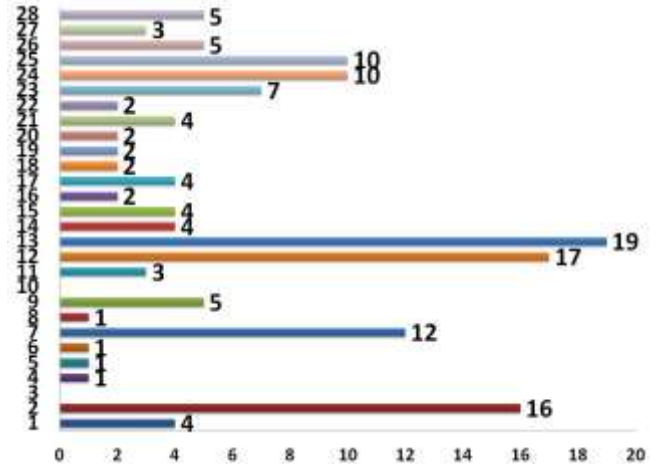


図1. 階別集計枚数



図2. 所属

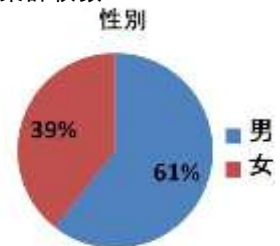


図3. 性別

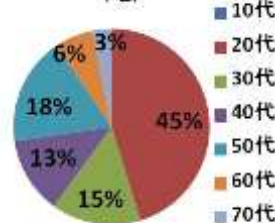


図4. 年齢

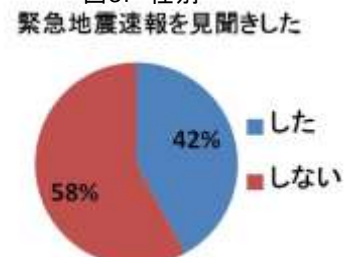


図5. 緊急地震速報

4. アンケート震度の算出

$$I_Q = \frac{\alpha}{N_e} \cdot \sum_i^{N_e} m_i \cdot \beta_i(m) \quad I_1 = 1.684 \times e^{0.220 \times I_1^2}$$

$$I_{JMA} = 2.958 \times (I_Q - 1.456) 0.547^3$$

上記にアンケート震度の算定式を示す。ここでのαは条件係数、m_iは設問において回答者が反応したカテゴリ番号、N_eは震度にかかわる質問アイテム中の有効回答数を表わす。β(m)はm_iに対応する震度係数である。条件係数は本来構造種別と階数によってその数値は定められるが、太田ら考案の手法は低層用であり高層建物についての条件係数を具体的に考慮されてないため、本研究では基準のα=1に統一とする。

表2. 震度係数

設問番号 Category	1	2	3	4	5	6	7
2		0.339	1.798	3.173	4.538		
3		1.395	2.192	2.988	3.783	4.577	
5		2.329	3.269	4.205	5.139		
6	2.266	3.177	4.085	4.99	5.895	6.8	
7	1	2	3	4	5	6	
8		4.42	6.093	7.758	9.421	11.081	12.741
9	-0.076	1.039	2.154	3.269	4.384	5.498	
11	1.561	2.446	3.329	4.212	5.093		
12	1.795	2.589	3.38	4.17	4.959		
13	1.868	2.995	4.122	5.249	6.376		
14		1.996	2.566	3.135	3.705		
15	2.284	3.376	4.462	5.547	6.63	7.713	

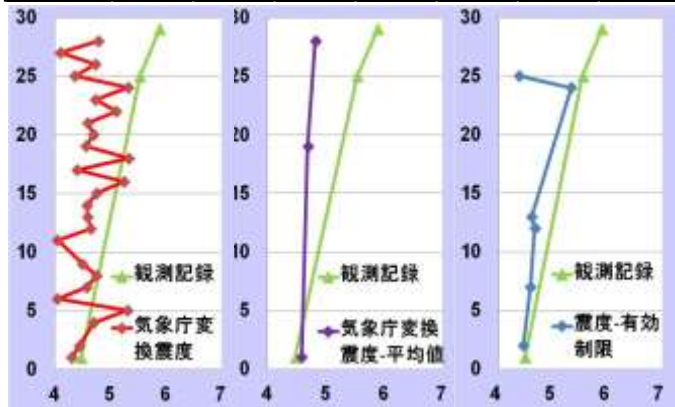


図6. 気象庁変換震度 図7. 層別平均値 図8. 有効制限

表3. アンケート震度の平均・標準偏差・変動係数

	平均値	標準偏差	変動係数
アンケート-気象庁変換震度	4.71	2.00	0.43
観測記録(計測震度)	5.31	1.04	0.20

表4. 比率・相関係数

	観測との比率	相関係数
設問2	0.77	0.03
設問3	0.76	0.71
設問5	0.68	0.19
設問6	0.76	0.04
設問7	0.82	0.37
設問8	1.35	0.29
設問9	0.74	0.51
設問11	0.66	0.49
設問12	0.66	0.46
設問13	0.60	0.08
設問14	0.48	0.13
設問15	0.97	0.76

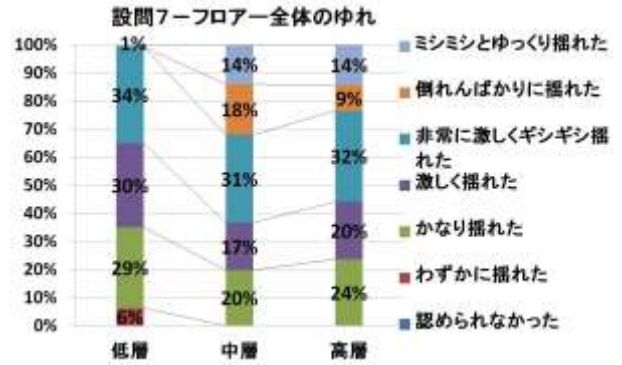


図9. 設問7-良好

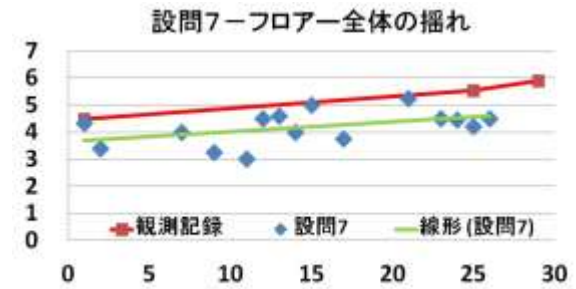


図10. 設問7-観測比較と震度散布

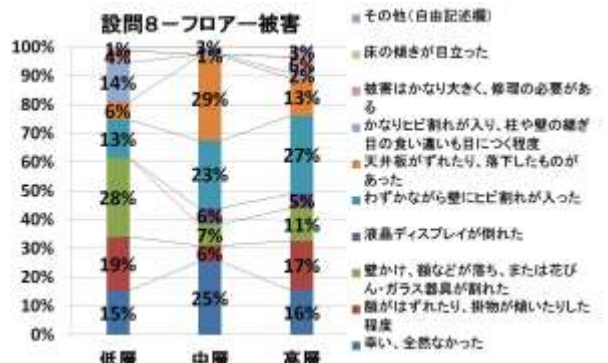


図11. 設問8-悪例

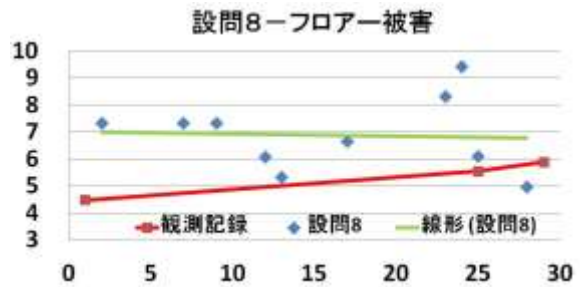


図12. 設問8-観測比較と震度散布

算出したアンケート震度と観測記録を比較した結果、大きな差異がある階は低層で5,6階、中層で16~18階、高層で24,25階となり各層にバラつきの大きい階があった。特に25階では震度が大幅に低く算出されており、その原因として設問3,6,11~15の影響が大きかった。設問3の身の回りの液体の動きでは有効回答数の少なく、設問6家具の挙動については工学院大学ではほとんどの家具が固定されているため効果を発揮しなかった。また設問11~15の精神面に関する設問に関して、25階は建築学専門のフロアになっているので、防災関連の知識を備えている人も多くいたため恐怖感や不安度が低くなったものと考えられる。

5. 負傷者推定

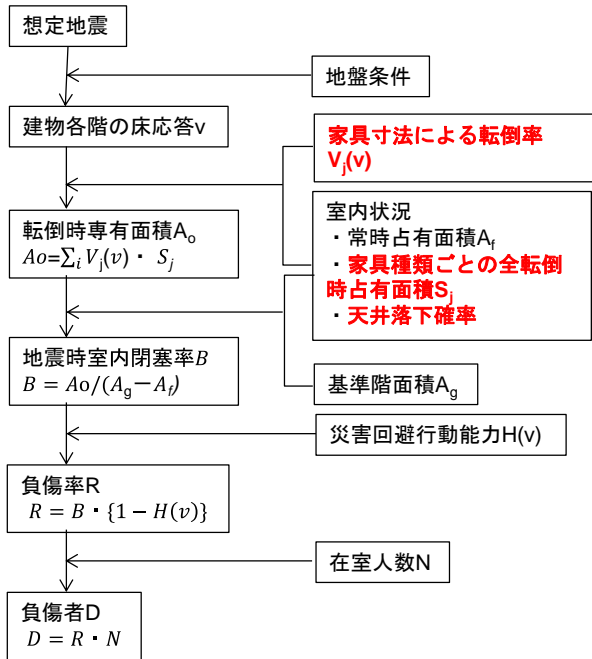


図 13. 負傷者算定フローチャート修正

表 5. 建物概要

建物名称	大学棟(工学院大学高層棟)
建築場所	東京都新宿区
竣工年	1989年
基準階面積	1170m ²
階数	地上29階、地下6階、塔屋1階
構造種別	地上:鉄骨造(ブレース付ラーメン架構)
	地下1~2階:鉄骨鉄筋コンクリート造
	地下3~6階:鉄筋コンクリート造

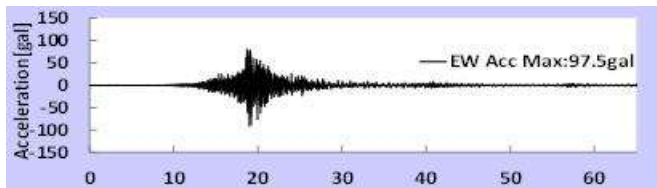


図 14. 東北地方太平洋沖地震 EW 方向加速度

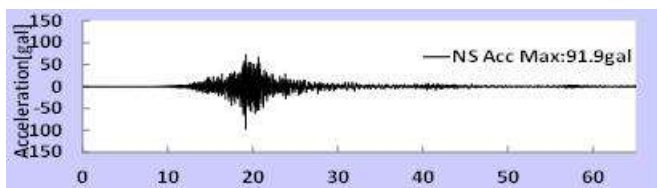


図 15. 東北地方太平洋沖地震 NS 方向加速度

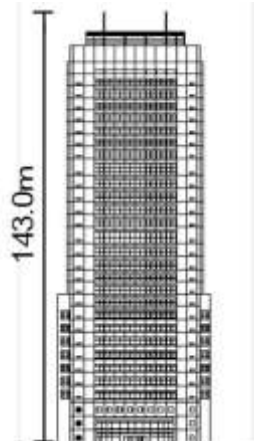


図 16. 大学棟北立面図

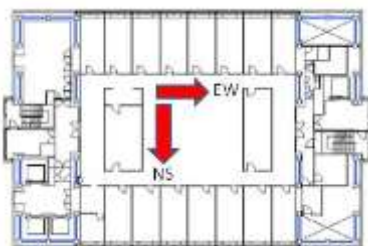


図 17. 基準階レイアウト

本研究では翠川・佐伯の負傷者算定フローチャート⁴⁾の対象を長周期地震動や超高層建物の場合においても適用できるようにするため、家具の転倒率と天井の落下被害率の修正を行い、工学院大学の高層棟を対象として想定地震による負傷者推定を行った。家具転倒率の算出の際に必要な室内の家具類の固定率は、既往の研究⁵⁾における条件と同じものとする。天井落下確率はシステム天井の応答加速度による損傷度別クライテリア⁶⁾をもとに、平均値と標準偏差を用いてフラジリティ曲線による被害発生率を求めた。以下に算定式と図18に算出したフラジリティ曲線を示す。

$$F(X) = \Phi(\ln(X) - \lambda/\zeta)^7$$

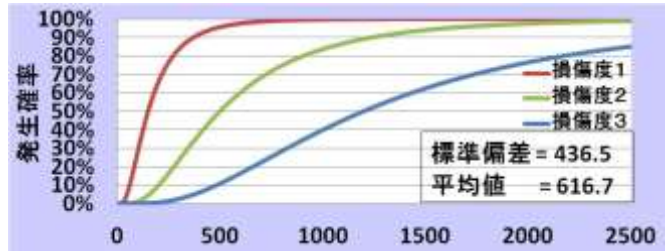


図 18. 天井落下の損傷度別被害率曲線

家具の転倒発生率は家具の寸法をもとに算出し、金子による家具転倒率の簡易推定法⁸⁾を用いる。この推定法では、家具の高さ・幅の寸法や入力加速度・速度から床応答の等価振動数、家具の境界振動数を求め、重力加速度を用いて家具の転倒率曲線を算定する。

$$R(A_f) = \alpha \cdot \Phi((\ln(A_f) - \lambda/\zeta)$$

$$e^f = A_{R=50} = \begin{cases} B/H \cdot g(1+B/H)_b & F_f \leq F \\ 10B/\sqrt{H}(1+B/H)^{2.5} \cdot 2\pi F_f & F_f \leq F \end{cases}$$

$$F_f = A_f / (2\pi V_f) \quad F_b = 15.6 / \sqrt{H}(1+B/H)^{-1.5}$$

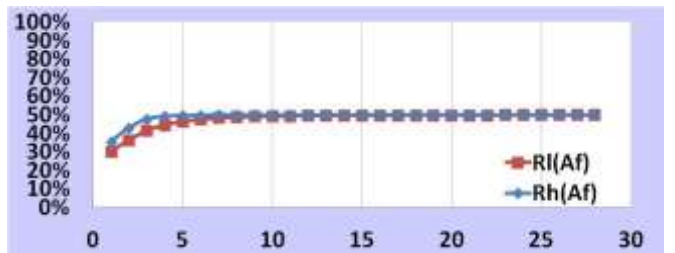


図 19. 家具転倒率曲線

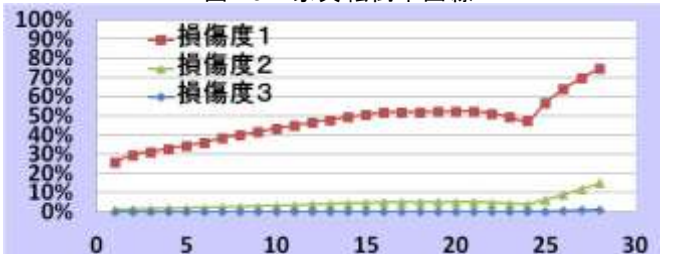


図 20. 天井被害率曲線

家具転倒率の算出の際に用いる家具のバラつきは、東北地方太平洋沖地震と想定東海東南海連動型地震においては釧路沖地震と宮城沖地震での被害調査データを、想定首都直下型地震においては兵庫県南部地震における被害調査データを用いた。

以上から算出した天井の落下被害率と家具の転倒率を考慮し負傷者推定を行なった。その際、入力する加速度・速度・変位はSNAPによる立体モデルの解析結果を使用し、フロア面積は工学院大学の基準階面積とした。

表 6. 負傷者推定結果

Floor	SI	H(v)	人数	棚転倒		負傷者数	重傷者
				負傷者数	重傷者数		
28	6弱	0.0072	70	1	0	1	0
27	5強	0.0088	25	0	0	0	0
26	5強	0.0106	65	1	0	1	0
25	5強	0.0129	65	1	0	1	0
24	5強	0.0190	35	0	0	0	0
23	5強	0.0223	75	1	0	1	0
22	5強	0.0302	35	0	0	0	0
21	5強	0.0286	35	0	0	0	0
20	5強	0.0289	40	0	0	0	0
19	5強	0.0309	60	1	0	1	0
18	5強	0.0345	65	1	0	1	0
17	5強	0.0397	65	1	0	1	0
16	5強	0.0472	70	1	0	1	0
15	5強	0.0576	80	1	0	1	0
14	5強	0.0705	70	1	0	1	0
13	5強	0.0865	40	0	0	0	0
12	5強	0.1064	40	0	0	0	0
11	5強	0.1316	40	0	0	0	0
10	5強	0.1635	80	1	0	1	0
9	5強	0.2043	50	0	0	0	0
8	5弱	0.2567	140	1	0	1	0
7	5弱	0.3236	140	1	0	1	0
6	5弱	0.4081	140	1	0	1	0
5	5弱	0.5112	140	1	0	1	0
4	5弱	0.6291	80	0	0	0	0
3	5弱	0.7497	40	0	0	0	0
2	5弱	0.8519	35	0	0	0	0
1	4	0.9292	30	0	0	0	0

表 6 に東北地方太平洋沖地震での詳細負傷者推定の結果を示す。東北地方太平洋沖地震では低～高層階全体的に負傷者 1 名ずつ程度、重傷者は発生しなかった。負傷者は家具転倒によってのみ出ており、他での負傷者は出なかった。この結果を実際の被害と比較すると、やや高めに推定されていることが分かった。その原因として本研究では地震時の人間の災害回避行動能力を既往の手法から修正していないため、長周期地震動ではその災害回避行動能力に差が出るものと考えられる。また以下に想定地震での推定結果を示す。想定地震では家具の転倒被害以外にも棚上の荷物の落下やコピー機などによる負傷者や重傷者が発生し、東北地方太平洋沖地震より人的被害が大きくなる可能性が見られた。

表 7. 首都直下型地震表 表 8. 東海東南海連動型地震

Floor	負傷者数	重傷者	Floor	負傷者数	重傷者
高層	15	9	高層	6	3
中層	19	10	中層	7	0
低層	9	2	低層	3	0

表 9. 想定地震負傷者推定合計

合計	負傷者数	重傷者
東北地方太平洋沖地震	19	0
首都直下型地震	43	21
東海東南海連動型地震	16	3

6. 結果

アンケート震度は観測記録と比べ全体的にやや低めに算出された。その要因として元のアンケート票の条件係数が住宅などの低層用であるため、アンケート震度を算出する際に用いる条件係数が低めの設定であるためと考えられる。設問においても、精神面に関する設問で地震時の加速度による影響が大きく作用する直感的な感じ方を問う設問が多かったため、長周期地震動に対応できた設問は設問 9 の揺れの体感時間のみであったと思われる。アンケート震度のバラつきについて、本研究では実験的に回答数 10 以上のもののみ有効回答として扱い震度算出したところ観測記録に大幅に近づき、アンケート震度のバラつきを修正し有効性を高めるためには回答数にある一定の有効回答制限を加える必要があることが分かった。また家具転倒率と天井落下率の被害曲線を修正し想定地震での負傷者推定を行ったところ、天井落下による負傷者は発生しなかったが棚転倒による負傷者が発生した。東北地方太平洋沖地震に関して実際の被害と比較するとやや高めに推定され、その要因として在館者の災害回避能力を考慮していないため、実際の負傷者数より多く負傷者が出たと考えられる。本研究では長周期地震動にも対応させるため家具転倒率と天井落下率曲線の修正を簡易的に行ったが、天井落下に関しては発生率が高い場合においても負傷者が発生しないことが分かった。しかし天井落下が発生した際の人的被害が皆無とは考えにくいため、天井落下の人的被害に関しては人間の災害回避行動能力や人間の頭部に当たった場合におけるの詳細な被害予測をした上での負傷者推定が必要である。

7. 今後の課題

- ・アンケート震度の長周期地震動に対応する設問の震度係数と超高層建物における条件係数の考案・修正
- ・天井のブレースの配置やフロア全体の加速度・変位の分布など詳細な条件を考慮した上での天井被害発生率を算出
- ・首都圏におけるオフィスでの家具のバラつき調査
- ・アンケート調査結果をもとに地震時の人間の災害回避行動能力の算定

参考文献

- 1) 太田裕、後藤典俊、大橋ひとみ：アンケートによる地震時の震度の推定、北海道大学工学部研究報告、第 92 号（昭和 54 年）、1979 年 1 月
- 2) 太田裕、小山真紀、中川康一：アンケート震度算定法の改訂－高震度領域－、自然災害科学、16・4、307-323、1998 年
- 3) 小山真紀、太田裕：アンケート震度の気象庁震度への略算変換式、自然災害科学、17・3、245-247、1998 年
- 4) 翠川三郎、佐伯琢磨：オフィスビル群における地震時の室内負傷者発生予測、日本建築学会構造系論文集、pp.49-56、1995 年 10 月
- 5) 辻口貴大：西新宿地域の超高層ビル群における地震時の室内負傷者数の予測に関する研究、2010 年
- 6) 金子美香、東野雅彦：家具・非構造部材・設備系の被害、日本建築学会、長周期地震動対策に関する公開研究会、pp.175-236 2011 年 2 月 25 日
- 7) 田村和夫、中村豊、金子美香、神原浩：高層建物内の地震時安全評価技術の開発（その 1）全体概要と建物の簡易応答評価手法、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、pp.623-624、2005 年 9 月
- 8) 金子美香：地震時における家具転倒率の簡易推定法の提案、日本建築学会学術講演梗概集、（東海）2003 年 9 月