

サンプル地震波による高層建物の地震リスク評価

Seismic Risk Evaluation Using Sample Seismic Waves for High Rise Building

長澤徳明
Nagasawa Noriaki

The usage of the theory of probability earthquake risk evaluation of the BCP support etc. is wide. This report specifies the scenario earthquake, so-called the target earthquake, The sample seismic wave by this is generated. A series of method of evaluating the risk is shown, After the time history response. The risk is evaluated for the Kogakuin University that is the high rise building as the concrete example. And, it has aimed to pay attention to the injured person in the office room as the indoor damage, and to forecast the indoor persons injured.

Keywords : Seismic Risk Evaluation, Scenario Seismic Wave, Time History Response, High Rise Building, Injured Person

地震リスク評価、シナリオ地震、応答解析、高層建物、負傷者

1. はじめに

証券化資産を対象とした地震 PML 評価¹⁾、建物機能の維持/早期復旧を目標としたいわゆる BCP 支援²⁾など、確率論的地震リスク評価の用途は広い。そこでは対策に関わる主体者の能動的判断を促すため、地震被害を実感し易いシナリオ地震をベースとしたリスク評価が主流になっている。この場合、建物に作用する地震動や建物応答の評価誤差がリスク評価結果の精度に大きく影響することから地震波の生成ならびに建物の時刻歴解析を前提とした評価が必要になる。また建物の耐震化や高層化により、建物、特にその上層階では地震時に大きな床応答が生じやすいため、家具類の抵当による人的・物的被害が顕著になりつつある。³⁾そこで地震時の室内被害に注目した研究が多くなってきたが、そのほとんどは住宅を対象にしたものである。⁴⁾⁵⁾オフィスビルを対象にした研究は少ないが、1978年宮城県沖地震ではオフィスビル上層階での家具類の転倒による被害が報告されている。⁶⁾

首都圏をはじめとする大都市域では、オフィスビルやそこで働く従業員が集中しており、例えば、東京中心部では 10km²の地域に約 150 万人の昼間人口が集中している。このような地域強い地震動が発生した場合には、建物そのものが構造的に大きな被害を受けない場合でも、家具類の転倒により建物内で甚大な人的・物的被害が生じる場合が予想される。このため早急な防災対策が必要と考えられる。

本報は、シナリオ地震いわゆるターゲット地震を特定し、これによるサンプル地震波を生成し、建物の時刻歴解析を行った上でリスクを評価する一連の方法を示す。具体例として超高層建物である工学院大学高層棟新宿校舎を対象にリスク評価を行う。そして室内被害としてオフィス室内での負傷者に着目し⁶⁾、室内負傷者数の予測を行うことを目的としている。

2. シナリオ地震波と応答解析モデル

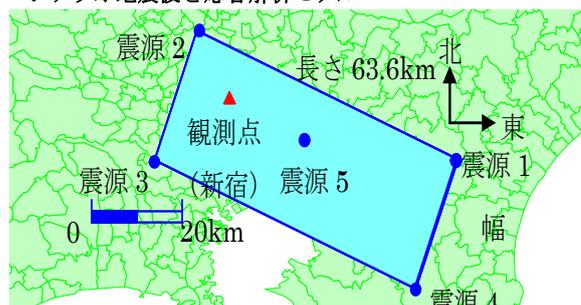


図1 ターゲット地震の平面投影

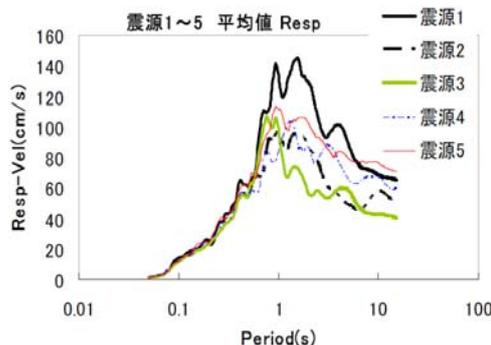


図2 全地震動速度応答スペクトル比較

ターゲット地震は中央防災会議で想定されている東京湾北部地震 (M7.2) とした。断面面の投影を図1に示す。シナリオ地震波は1994年ノースリッジ地震の各パラメータを東京湾北部地震にあわせたモデルと、内閣府が東京湾北部地震について提示しているモデルの2つのモデルを想定し、震源位置をプレートの4隅と中央の5通り、応力降下量のモデルを2通り、ランダム性5通りの計 2×5×2×5=100波とした。詳細は文献⁷⁾を参照。

対象建物は地下6階、地上29階、塔屋2階、最高高143m、地上

部はS造のブレース付きラーメン構造であり、EW方向にはスーパーフレーム(16F、21F)の架構を有する特徴を持つ、超高層建築物である工学院大学高層棟新宿校舎(以下大学棟と呼ぶ)を用いた。

上記の100波の模擬地震波に対する予備応答解析結果を用いて、荷重分布をAi分布とした静的荷重増分解析を行い各層のQ-δ曲線を作成した。このQ-δ曲線をもとに、基礎固定30質点の等価せん断パネモデルを作成の上、時刻歴応答解析を行った。減衰等のモデル化については文献⁸⁾を参照した。

3. 地震応答解析

任意の層の被害の発生確率は、その階の限界層間変位(例えば軽微1/150など)を作用地震動による層間変位(応答)が越える確率として定義する(図3参照)。限界層間変位を確率変数C、応答層間変位を確定量rと置く。前者は確率変数、後者はさんぶるシナリオ地震動による応答なので確定値とする。被害が発生する確率は以下となる。

$$r/C = Z \geq 1.0 \quad (1)$$

ここで、Cを対数正規分布と仮定すると、損傷確率は最終的に以下のように表すことができる。

$$F_X(r) = \int_0^r f_Z(\ln x | \ln c_m, \zeta_C) dx \quad (2)$$

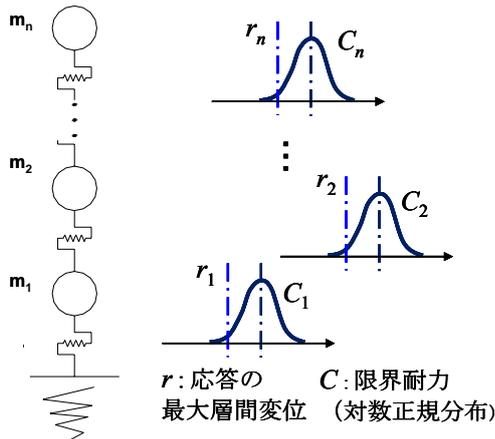


図3 各層の損傷確率の評価イメージ図

ここに、 c_m は限界層間変位の中央値、 ζ_C は同じく対数標準偏差である。

各地震による各階最大層間変位を(2)式に適用し、サンプル地震波毎に、各階の損傷確率を求める。その際、各階の被害モードとして、軽微、中破、大破を定義する。それぞれの限界層間変位の中央値としてそれぞれ軽微1/150、中破1/75、大破1/50、とし、対数標準偏差は一律 $\zeta_C = 0.2$ とする。これはFragility Curveのばらつきを取りまとめた研究⁵⁾より、概ね設定した。また、被害モードの損失率は軽微5%、中破10%、大破30%とする。各階の損失率は建物層数を30階とし、軽微0.167%、中破0.333%、大破1%とする。これらをまとめると、表1のようになる。

100波地震の応答結果はEW方向とNS方向の双方評価し、2方向成分の損傷確率を確率的に組み合わせる。2方向の各階最大層間変位の相関係数を計算した結果、相関係数は約0.5であった。これより2方向の応答はほぼ独立を仮定できると考えた。各階の2方向の損傷確率を、 $jP_{EW,i}$ と $jP_{NS,i}$ 置く。これは被害モード*i*、階数*j*の

損傷確率である。損傷モードは*i*=1は軽微、2は中破、3は大破である。2方向を組み合わせた*j*階の損傷確率は独立の仮定の下、以下ようになる。

$$jP_i = 1 - (1 - jP_{EW,i})(1 - jP_{NS,i}) \quad (3)$$

建物全体の損失率は各層の限界相関変位は互いに独立と考え、その期待値Rは以下のように求められる。

$$R = \sum_{j=1}^{30} \{ (jP_2 - jP_1) \cdot c_1 + (jP_3 - jP_2) \cdot c_2 + jP_3 \cdot c_3 \} \quad (4)$$

ここに、 c_1 は各階軽微被害の損失率(0.167%)、 c_2 は各階中破被害の損失率(0.333%)、 c_3 は各階大破被害の損失率(1.0%)である。

表1 Fragility情報と損傷率

被害モード	耐力中央値 層間変形角	対数 標準偏差	建物全体の 損失率	各層の 損失率
軽微	1/150	0.2	5%	0.167%
小破	1/75	0.2	10%	0.333%
大破	1/50	0.2	30%	1.000%

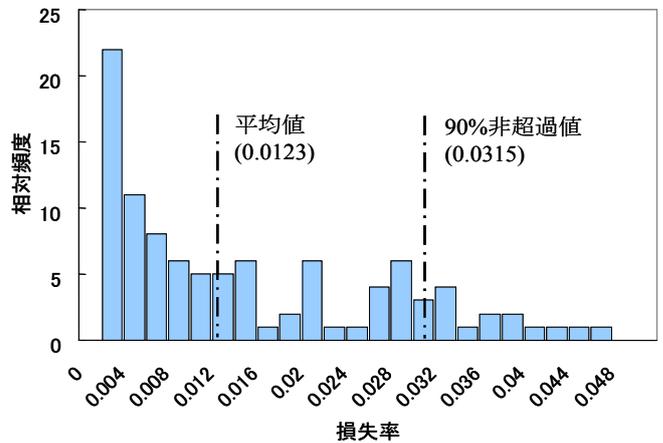


図4 損傷率期待値のヒストグラム

4. 被害損失予測モデル

シナリオ地震波による最大層間変形角はEW方向で0.008(1/125)、NS方向で0.0143(1/70)であり、NS方向において若干塑性域に達しているものと推察される。また、各層の最大層間変形角の平均値ならびに標準偏差を表2にまとめて示す。EW方向の17Fはメガストラクチャー架構になっていることから層間変位は小さく現れ、NS方向に比べ全体として変位は小さい。一方で変動係数はEW方向0.32~0.43、NS方向で0.26~0.34であり、平均値が小さい分、EW方向の方が大きくなっている。損失率期待値のヒストグラムを図4に示す。平均値は0.0132、90%非超過値は0.0315であった。図より、損失率のばらつきは大きいように思えるが、ばらつきの源泉はターゲット地震による地震動推定のばらつきと限界層間変位のばらつき($\zeta_C = 0.2$)となる。ここで損失率期待値が90%非超過値にあたるシナリオ地震波をサンプル地震波とする。

表2 各層の最大層間変形角の平均値と標準偏差

	平均値		標準偏差	
EW	0.0008 (17F)	~ 0.0043 (26F)	0.00036 (17F)	~ 0.0016 (26F)
NS	0.0024 (17F)	~ 0.0078 (26F)	0.00062 (17F)	~ 0.00265 (26F)

5. 室内負傷者発生の予測手法のフロー

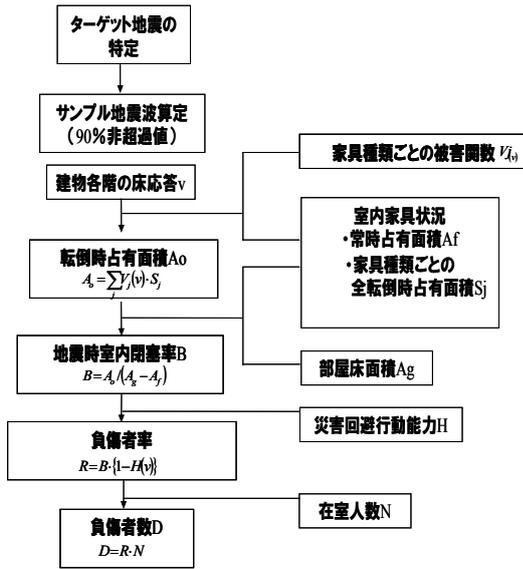


図5 負傷者算定フローチャート

地震時の室内被害を扱った既往の研究によると、負傷をはじめとする室内被害の発生には家具類の転倒などの室内の散乱状況が大きく関係することが報告されている。本件急では、オフィスビル内での負傷は家具の転倒に生じるものと考え、岡田の方法を簡略化した方法を用いることとした。すなわち、通常時に行動加納な床面積に対する転倒した家具類が占める床面積の割合である室内閉塞率を考えた。岡田の方法では、転倒した家具類の占める面積だけでなく、それに伴って内容物が散乱した面積も考慮されている。しかし、本研究で対象とするオフィスビルの場合には内容物のほとんどは書類でガラス類は少なく、内容物の散乱による大きな負傷は考え難いことから、内容物については考慮しないこととした。

室内閉塞率は図5に示すフローチャートに従って求められる。その際に必要となる条件は、室内の家具類の設置状況、家具の転倒のしやすさ（被害関数）および床応答の大きさである。ここでは、床応答の大きさとして、最大速度振幅を採用する。これは、一般的な中高層オフィスビルの進藤周期の範囲では最大速度振幅が転倒の条件を与えることが指摘されているためである。建物各階の床応答速度 v は、想定地震に対して設置された応答スペクトルを用いて、モード重合法により計算する。

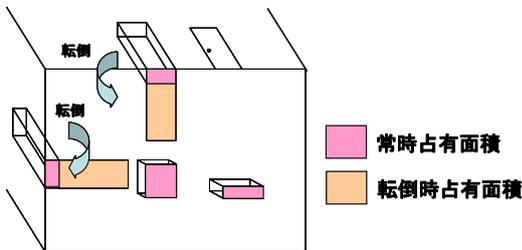


図6 常時および転倒時占有面積

家具量をあらわす量として図6に示すように、家具類が通常時に占める面積を常時占有面積 A_g に対するこれららの占有面積の割合を占有率とする。また、床応答速度が v の時にタイプ j の家具が転倒する割合を被害関数 $V_j(v)$ とする。

以上の量を用いると、床応答速度 v の時に転倒する家具が占める面積 A_o は(5)式で表される。

$$A_o = \sum_j V_j(v) \cdot S_j \quad (5)$$

この A_o の通常時の行動可能面積 ($A_g - A_f$) に対する割合が室内閉塞率 B となる。

$$B = A_o / (A_g - A_f) \quad (6)$$

負傷発生率 R は、室内閉塞率 B に人間の災害回避行動能力 $H(v)$ を加味して評価する。

$$R = B \cdot \{1 - H(v)\} \quad (7)$$

ここで、 $H(v)$ は、岡田・鏡味による震度の関数を震度と最大速度の関係により、最大速度 v の関数に変換したものをを用いる。(図7参照)

負傷者数 D は負傷率 R と在室人数 N の席で与えられる。なお、人間の所在確率については、一般住宅では時間や部屋の用途により偏りがみられるが、事務室の場合にはより均一に人間が所在していると考えられるため、本研究では考慮しないこととした。

ここで、家具の被害関数を家具の転倒しやすさに応じて設定する必要がある。本件急では、1993年釧路沖地震の際の釧路市役所などでの家具の転倒調査に基づく翠川・佐藤の関係を用いることとした。

この研究では、オフィス内でよくみられる高さ180cm程度の家具を対象にその転倒状況を考察し、2段以上の多段積みものや背後状況が背中合わせとなっている単体家具を転倒しやすい家具と分類している。その調査データをさらに詳しくみると、①多段積み家具でも最下段は倒れにくい、②背中合わせものはある程度の高さ以上のものが倒れやすい、という傾向がみられる。

そこで表3に示すように家具を転倒しにくいものと(タイプA)、転倒しやすいもの(タイプB)の2種類に分類した。それぞれの被害関数を図8に示す。

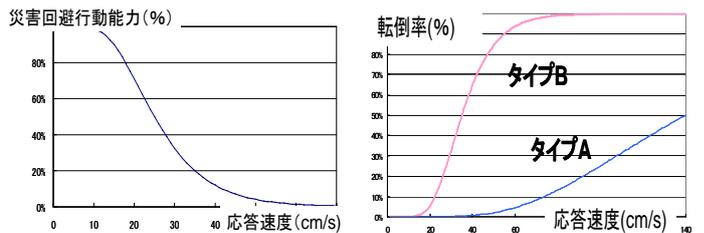


図7 災害回避行動能力 図8 タイプA,Bの家具の被害関数

表3 家具の分類

転倒しにくいもの(タイプA)	・単体家具(壁、独立、高さ150cm未満の背中合わせ) ・多段積み家具の最下段
転倒しやすいもの(タイプB)	・高さ150cm以上の背中合わせの単体家具 ・多段積み家具の最下段以外

なお、転倒の対象となる家具は、転倒時に人的被害を及ぼす可能性のあるものとして、高さ(多段積みものは床面から上端までの合計高さ)が90cm以上のものとし、作りかけ家具を含み固定された家具は転倒しないものとした。また既往の研究によると、単体家具について転倒のしやすさは家具の高さや奥行きにより異なること

が指摘されている。しかし語術の調査の結果、オフィス家具はある程度規格化されており、翠川・佐藤の調査と同じく高さが180cm程度のもので大半であったことから、寸法による違いは考慮しなかった。

6. 各階の負傷率と負傷者

表4 各階負傷者数

	応答速度 (cm/s)	応答加速度 (cm/s ²)	全転倒時占 有面積(m ²)	常時占有 面積(m ²)	負傷率	在室人数	負傷者数	重傷者
28	127.81	815.47	12.24	15.26	0.02	37	1	0.01
27	117.21	663.98	259.97	65.48	0.36	2	1	0.01
26	108.25	806.64	242.52	71.68	0.34	46	16	0.14
25	102.64	883.68	242.27	18.02	0.32	62	20	0.27
24	107.30	856.88	148.68	52.65	0.20	30	6	0.09
23	110.61	1315.40	273.20	68.16	0.38	21	8	0.11
22	125.56	1427.43	357.53	82.19	0.51	33	17	0.24
21	131.31	1244.16	79.65	17.82	0.10	10	1	0.01
20	130.11	1122.02	75.96	25.11	0.10	1	0	0.00
19	119.19	834.64	174.02	100.16	0.25	14	4	0.03
18	111.03	672.13	33.35	25.92	0.04	14	1	0.01
17	107.09	561.71	258.71	77.01	0.37	19	7	0.06
16	105.63	523.88	6.13	12.29	0.01	45	0	0.00
15	107.02	472.02	357.53	82.19	0.51	48	24	0.22
14	112.87	595.65	31.61	18.62	0.04	53	2	0.02
13	123.42	874.83	90.00	35.92	0.12	32	4	0.03
12	132.50	1083.30	90.00	35.92	0.12	46	6	0.08
11	138.28	1125.13	0.00	0.00	0.00	82	0	0.00
10	138.21	1019.24	0.58	2.75	0.00	7	0	0.00
9	132.88	1267.18	38.14	15.72	0.05	52	3	0.04
8	138.46	1408.72	2.66	4.35	0.00	8	0	0.00
7	130.86	1300.56	0.00	2.00	0.00	126	0	0.00
6	117.96	1012.35	0.00	3.84	0.00	21	0	0.00
5	102.05	932.73	0.00	4.32	0.00	54	0	0.00
4	82.11	919.38	0.00	0.00	0.00	4	0	0.00
3	56.10	812.36	22.81	63.93	0.01	135	2	0.01
2	27.96	804.63	26.07	57.58	0.00	41	0	0.00
1	0.00	849.96	6.31	3.17	0.00	24	0	0.00
合計						1067	121	1.37

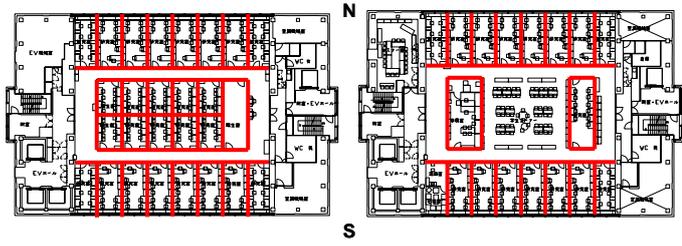


図8 工学院大学新宿舍舎平面図 (左: 22階 右: 25階)
(赤線: フレキシウォールの配置)

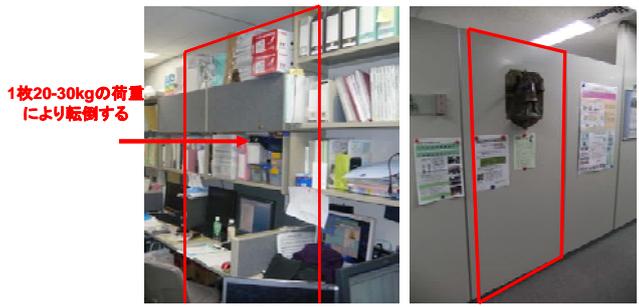


図9 各階に設置されたフレキシウォール

各階の負傷率と負傷者を表4に示す。なお重傷者数は中央防災会議で想定されている重傷者の割合を掛け合わせて算出した。⁹⁾

結果から上階の研究室階は負傷率が高いことが分かった。22階と15階の負傷者率は約50%と非常に高い値となっている。これは各階の研究室のフレキシウォール(図9参照)に原因があると考えられる。フレキシウォール、一面に横方向に対する耐過荷重が約20-30kg

しかないためである。

今回の調査で各階、各研究室に1枚のフレキシウォールにかかっている荷重は棚の重量も含め片面で約15kgと分かった。そこで各階の横方向の加速度を掛け合わせると30kgを超え、また上部のほうに棚を設置していることからほとんどのフレキシウォールが倒れることとなる。そしてフレキシウォールは横にも繋がっていることから複数枚連動して倒れる可能性があることが考えられる。

22階、25階の平面図(図8参照)を見ていただくと、ほとんどのフレキシウォールを使用していることから負傷率が大きくなった要因と考えられます。その他にも研究室が多い階には、負傷率が他の階よりも被害が大きかったことが分かった。

7. まとめ

建物に作用する地震動や建物応答の評価誤差に対するリスク評価の考慮から始まり、シナリオ地震波の設定、被害発生確率、損傷確立の計算からリスク評価を行った。そして各階の負傷者数を算出した。(今回の在室人数は平成22年1月18日の13時-15時の調査データを用いた。)

今後の展開として各曜日、各時間帯による全階数の人数の変動を調査し、また火災やその他の被害による負傷を考慮して評価を行うことで、大学棟の災害リスクファイナンスとして被害発生後の負傷者の対応を組み合わせ、より深いリスク評価が提案できることになると考えられる。

【謝辞】

本報は、文部科学省の学術フロンティア事業『工学院大学地震防災・環境研究センター』による研究助成により行われました。

【参考文献】

- 1) (社)建築・設備維持保全推進協会,その他:不動産投資・取引におけるエンジニアレポート作成に関するガイドライン,pp.71-82,2001.
- 2) 中村孝明,遠藤透:BCPへの貢献を目的とした建物の機能確保に関する研究,建築学会総合論文誌第7号,pp.87-92,2009.1
- 3) 鈴木有:室内・屋外空間における地盤被害の計量と事前評価の試み、都市住空間の震災予測と耐震化システムに関する研究,pp.158-160,1990
- 4) 岡田成幸:地震時の室内変容に伴う人的被害危険度評価に関する研究その1住居空間危険度マイクロゾーニングの提案,日本建築学会構造系論文集,NO454,pp.39-49,1993
- 5) 志賀敏男,渋谷純一,湯田善郎:高層集合住宅における居住空間の耐震化に関する研究.その4主要家具の転倒率と負傷者の発生率,東北地域災害科学研究報告第25巻,pp.71-74,1989
- 6) 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,日本建築学会構造論文集第476号,49-56,1995年10月
- 7) 田中良一,その他:首都圏に建つ超高層キャンパスと地域連携による地震防災に関する研究(その2)首都直下地震の強震動予測,建築学会大会,構造Ⅱ,pp.815-816,2008.9
- 8) 吉川弘道,その他:地震リスク解析におけるフラジリティ曲線と地震損失関数,コンクリート工学会誌,Vol.45, No.10, pp.26-34,2007.10
- 9) 消防庁:地震発生時における人命危険要因の解明と対策,首都直下地震に係る被害想定手法について,p37,1999