南海トラフ巨大地震発生時における建築物の応答評価に基づく高機能都市の被災シナリオ作成に関する研究 名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻博士課程前期課程2年 環境・安全マネジメント講座福和研究室 彦坂智基

1. はじめに

日本では過去の被害地震から学び、耐震工学技術を発展 させてきた歴史がある。社会経済活動が比較的小規模で単 純な状況下では、それがある程度活かされてきた。例えば、 かつては経験的に、比較的良好な地盤地域に建物を立地さ せ、生活をしてきたことなどである。しかし、過去の巨大 地震発生時の社会と現代社会では、その状況が大きく変わ って来ている。

現代社会は「高機能社会」といわれており、その特徴と して、社会を構成する個々の高度化した機能が相互に関連 し、組み合わさり、相互の機能が不可欠なものとして発揮 される機能を、多分に含むことが指摘されている。高機能 社会における防災は、単に「地震被害経験を活かす」とい うスタンスでは到底追いつかない状況にあると言え、想像 力を働かせて、大地震後の社会状況はどうなるのかという ことを具体的に考えていかなければならない。

本研究では、名古屋経済地域における企業の経済活動を 例に取り、具体的な被災状況シナリオの作成を行う。その ために、各地域において一般的であると考えられる建物モ デルを作成し、想定地震における被害予測を行う。企業の 経済活動に大きく関わる建物として、まずは、企業本社や 事業所など、多くのオフィスが存在する事務所ビル、生産 拠点となる工場施設、商品の販売場となる商業施設を検討 対象として、一般的な建物モデルを作成する。各建物モデ ルを取り扱う地域として、名古屋中心部のビジネス経済地 区、名古屋市南西部に広がる沖積低地、臨海埋立地、さら に、東海地域の物づくり拠点である三河地域、名古屋市中 心部に程近い郊外の地域を、検討対象地域とする。

また、企業の経済活動においては、1 つの企業内の関連 だけでなく、系列の子会社や商品の仕入先のなどの関連施 設の被災状況が、流通のシステム全体に与える影響が大き いと推測される。そこで、まずは各地域の建物モデルの耐 震性能を確認することで、具体的な被災状況シナリオ作成 のための足がかりとする。

2. 検討対象地域と建物モデル

2.1 地盤条件

本検討で対象とする地域として、名古屋市中心部のビジ ネス経済地区、名古屋市南西部の沖積低地、臨海埋立地、 東海地域の物づくり拠点である三河地域、名古屋市中心部 に程近い郊外の地域を考える。

名古屋市中心部のビジネス経済地区として、(a)名駅、(b) 伏見、(c)栄、を対象地域とする。これら3地区は、熱田台 地にまたがる東西約3kmの範囲に連なっており、事務所ビ ルの立地を想定している。名古屋市南西部の沖積低地とし て、(d)中川区、臨海埋立地として、(e)港区、を対象地域と する。これら2地区は、名古屋市中心部の熱田台地から南 西方向に深く堆積する沖積低地として、工場施設や低層の 事務所ビルの立地を想定している。東海地域の物づくり拠 点である三河地域の工場地区として、(f)碧南、(g)刈谷、(h) 豊田、を対象地域とする。これら 3 地区は、企業の工場施 設を中心に、併設された本社の事務所ビルや商業施設など、 多くの関連施設が多く存在する地域として想定している。 名古屋市中心部に程近い郊外の地域として、(i)鶴舞、(i)大幸、 を対象地域とする。これら2地区は、大型ショッピングセ ンターなどの商業施設のほか、名古屋市中心部の経済地域 に比較的近いため、事務所ビルの立地も想定し、検討を行 う。これらの対象地域一覧を図 2.1 に示す。本研究における 対象地域として、これら計10地点を考える。

図2に、PS検層に基づく対象地域の工学的基盤面までの 地盤データを示す。地盤データには深度、土質、S波速度、 密度、N値を記している。N値は、層毎の平均値を示して いるものもある。土質は、砂、粘土、砂礫の3種類として おり、シルトは粘土として表記している。 2.2 建物モデルの作成

名古屋経済地域では、東京や大阪に比べて超高層建物は 少ない。名駅から伏見、栄に至るビジネス街では、高さ 30 ~60mの一般中高層の事務所ビルが大半を占めている。



そこで、地下1階、地上14階、高さ60m級のS造建物(以下60mモデル)と、地下1階、地上8階、高さ30m級のS 造建物(以下30mモデル)を、中高層の事務所ビルとして 検討する。また、低層の事務所ビルとして、地下階無し、 地上3階のS造建物(以下低層モデル)を検討する。図3 に、事務所ビルのモデル図を示す。

三河地域に数多く存在する工業施設として、平屋の大規 模組立工場(以下、平屋工場モデル)の検討を行う。図4に 平屋工場モデルの図を示す。平屋工場モデルも純S造建物 であり、架構はラーメンであるが、屋根形状はトラスを想 定している。

図5に、商業施設モデル図を示す。店舗4層、駐車場2 層(屋上含む)の大型商業施設を想定しており、平面規模 は長辺短辺同一の72m×72mである。柱間隔は12mと事務 所ビルモデルと比べてやや大きく、内部の作業空間を優先 した造りを想定している。

3. 解析条件

3.1 入力地震動

入力地震動は、告示波とサイト波(東海地震・東南海地 震連動型)とする。告示波は、建設省告示に基づき、極め て稀に発生する地震動の加速度応答スペクトルにフィッテ ィングするよう作成し、位相特性は、ランダム位相と、1968 年十勝沖地震の際に観測された、八戸港湾の地震波 EW 方 向成分(以下八戸位相)と、1995年兵庫県南部地震の際に 観測された、神戸海洋気象台の地震波 EW 方向成分(以下 JMA 神戸位相)の3種類を与える。

東海・東南海地震による強震動は、経験的グリーン関数 法により合成する。波形合成に用いる要素地震は、東南海 地震の震源域には2000年10月31日に三重県南部で発生し た地震(Evt.1)と、2004年9月5日に発生した紀伊半島沖の 地震(Evt.5)、東海地震の震源域には2001年2月23日に浜 名湖で発生した地震(Evt.2)と、2001年4月3日に静岡県中 部で発生した地震(Evt.3)とする。図6に震源モデルを示す。

震源モデルは、M6.9の地震を要素地震として適用可能と するため、要素断層の大きさを長さ、幅ともに中央防災会 議における震源モデルの要素断層の約2倍になるように再 設定したモデル²⁾を用いる。

: アスペリティ

背景領域

破壞開始点

100

50

Kilometers

Evt.5

╈

図6 東海・東南海地震の震源モデル

1.0

また、告示波、サイト波共に、工学的基盤面から地表面 までの表層地盤の増幅特性を考慮し、拘束圧を考慮した地 盤の非線形性パラメータを表1に示すHDモデルで与える。



表2 建物モデル解析諸元

(a)60m モデル

	重量	***	長辺方向(X方向)					短辺方向(Y方向)				
階数		陷向		剛性(kN/m)	強度	E(kN)		剛性(kN/m)	強度	(kN)
	(kN)	(cm)	<i>K</i> ₁	K2	K ₃	Q_1	Q_2	K ₁	K2	K ₃	Q_1	Q_2
14	6790	400	4.23×10^{5}	1.76×10^{4}	0.0	6163	6199	2.71 × 105	1.74×10^{5}	6.40×10^{3}	4785	5896
13	5211	400	4.31×10^{5}	9.55×10^{4}	3.69×10^{3}	7013	7379	2.91 × 105	2.02×10^{5}	9.79×10^{3}	5181	7110
12	5200	400	4.62×10^{5}	2.20×10^{5}	7.61×10^{3}	7865	9232	3.26 × 10 ⁵	1.93×10^{5}	1.10×10^{4}	6560	8795
11	5210	400	4.93×10 ⁵	1.64×10^{5}	7.60×10^{3}	9326	10755	3.50 × 10 ⁵	2.32×10^{5}	2.00×10^{4}	7278	9837
10	5236	400	5.19×10 ⁵	2.06×10^{5}	1.62×10^{4}	9997	11724	3.68 × 105	2.43×10^{5}	2.04×10^{4}	7844	10822
9	5236	400	5.31 × 10 ⁵	2.66×10^{5}	1.93×10^{4}	10291	12449	3.84×10^{5}	2.40×10^{5}	2.11×10^{4}	8488	11670
8	5254	400	5.53×10^{5}	3.16×10^{5}	1.96×10^{4}	10386	13106	4.10×10^{5}	2.35×10^{5}	2.20×10^4	9254	12420
7	5273	400	5.65×10^{5}	3.04×10^{5}	2.08×10^4	11130	13682	4.27×10^{5}	2.22×10^{5}	2.38×10^4	9897	13110
6	5279	400	5.77×10^{5}	2.81×10^{5}	2.43×10^4	11780	14153	4.44×10^{5}	2.13×10^{5}	2.55×10^4	10475	13729
5	5280	400	5.87×10^{5}	2.98×10^{5}	2.75×10^{4}	11850	14566	4.65×10^{5}	2.21×10^{5}	3.23×10^{4}	10971	14229
4	5287	400	6.00×10^{5}	2.75×10^5	2.85×10^{4}	12301	15064	4.88×10^{5}	2.38×10^{5}	3.14×10^{4}	11387	14861
3	5295	400	6.06×10^{5}	2.71×10^{5}	3.51×10^{4}	12667	15496	5.13 × 10 ⁵	2.75×10^{5}	3.93×10^{4}	11727	15445
2	5476	500	5.38×10 ⁵	2.42×10^{5}	3.05×10^{4}	12959	16338	4.83 × 10 ⁵	2.77×10^{5}	3.30×10^{4}	11997	16748
1	6203	580	8.04×10^{5}	1.56×10^{5}	1.43×10^{4}	14797	19188	7.39 × 10 ⁵	1.68×10^{5}	2.80×10^4	15249	19234

$(0)_{0}_{0}_{0}_{0}_{0}_{0}_{0}_{0}_{0}_{0}$

	重量	oth 🚖		長辺	し方向(X方向)	短辺方向(Y方向)						
階数		隋尚		剛性(kN/m)	強度	≹(kN)		剛性(kN/m)	強度	(kN)
	(kN)	(cm)	K1	K2	K3	Q_1	Q_2	<i>K</i> ₁	K2	K3	Q_1	Q_2
8	6586	380	2.86×10^{5}	5.19×10^{4}	0.0	5491	5800	2.41 × 105	2.06×10^{5}	9.77×10^{3}	4507	5606
7	5072	380	3.14×10^{5}	6.14×10^4	0.0	7252	8380	2.68×10^{5}	2.04×10^{5}	1.02×10^{4}	6180	8324
6	5084	380	3.26×10 ⁵	1.97 × 10 ⁵	1.63×10^{4}	7840	9858	2.86×10^{5}	2.07×10^{5}	1.17×10^{4}	7824	10310
5	5125	380	3.84×10^{5}	2.44×10^5	2.21×10^{4}	8595	11142	3.42 × 10 ⁵	2.18×10^{5}	1.06×10^{4}	9214	12005
4	5141	380	4.10×10^{5}	2.37×10^{5}	3.27×10^{4}	9673	12166	3.68 × 105	2.14×10^{5}	3.27×10^{4}	10118	13022
3	5148	380	4.71×10^{5}	2.54×10^{5}	3.74×10^4	10544	13262	4.19 × 10 ⁵	2.61×10^5	3.98×10^4	9858	13895
2	5184	380	5.03×10^{5}	3.22×10^5	3.54×10^4	11221	14538	4.43×10^{5}	2.85×10^5	4.99×10^4	10491	14709
1	5548	430	6.97×10^{5}	3.93×10^5	4.59×10^3	12601	16269	6.24 × 10 ⁵	2.99×10^5	5.70×10^{3}	12271	16393
					(-		ヨーニ	- 1				

	(C)収増セアル													
	重量	階高		長辺	方向(X方向)	短辺方向(Y方向)								
階数				剛性(kN/m)	強	度(kN)		剛性(kN/m)	強度	(kN)		
	(kN)	(cm)	K1	K ₂	K ₃	Q_1	Q_2	K ₁	K2	K ₃	Q_1	Q_2		
3	5443	380	1.93 × 10 ⁵	1.49×10 ⁵	7.23×10^{2}	3379	5511	1.85×10^{5}	1.23×10^{5}	1.35×10^{3}	3634	5982		
2	4982	380	1.76×10 ⁵	1.13×10^{5}	4.18×10^{3}	3515	5556	1.62×10^{5}	1.19×10^{5}	3.10×10^{3}	3556	6083		
1	5383	430	1.76×10^{5}	5.74×10^4	6.73×10^{3}	5215	7083	1.68×10^{5}	1.04×10^{5}	4.48×10^3	4501	7614		
1	5383	430	1.76×10 ⁹	5./4 X 10*	6.73×10 ^o	5215	/083	1.68 × 10 ⁹	1.04 × 10 ⁹	4.48 × 10 ⁹	4501	/61		

(d)平屋工場モデル

	**	***		長辺	し方向(X方向)			短辺方向(Y方向)					
数	里里	陷向		剛性(kN/m)	強	度(kN)		剛性(kN/m)	強度	(kN)	
	(kN)	(cm)	K1	K2	K3	Q_1	Q_2	K ₁	K2	K3	Q_1	Q_2	
L	8025	420	7.54×10^{4}	5.96×10^{4}	4.72×10^{4}	3373	3906	8.09×10^{4}	4.94×10^{4}	3.80×10^{4}	3373	3906	
(e)商業施設モデル									建物日	Eデルの	の固	有周	期
雷景 陛室 副性(kN/m)					益	唐(kN)]						

REE WAY	土里	PEIP		Mil IT (w. c. m	,	1920	E(min)						
陷奴	(kN)	(cm)	<i>K</i> ,	K2	K ₂	0,	0,	1次固有周期(秒)					
5	24954	380	7.32 × 10 ⁵	3.44 × 10 ⁵	8.48 × 10 ²	19185	22968		長辺方向	短辺方向			
4	31617	550	5.74 × 10 ⁵	3.84×10^{5}	1.17×10^4	31469	38867	60mモデル	1.8	2.0			
3	27076	600	5.52 × 105	4.04×10^{5}	1.25×10^{4}	30452	40640	30mモデル	1.2	1.3			
2	27313	600	6 50 x 10 ⁵	4.56 x 10 ⁵	1.17×10^4	35065	46868	5011 0 7 71	1.2	1.5			
1	27628	660	7.00 × 10 ⁵	1.88 × 10 ⁵	1.10×10 ⁴	41388	51144	低層モデル	0.79	0.82			
						,,,,,		平屋工場モデル	0.65	0.63			

商業施設モデル

1.5

3.2 地震応答解析モデル

建物の応答解析モデルは、各層の重量を質点に集約した 多質点系の等価せん断型のモデルで表現する。建物の復元 力特性はNormal-Tri-Linearで与える。骨格曲線は静的増分 解析より得られた結果を基に、Tri-Linearの形で近似すし、 初期剛性 K_1 、2次剛性 K_2 、3次剛性 K_3 、初期強度 Q_1 、2次 強度 Q_2 を求める。表2に各建物モデルの諸元を、表3に固 有値解析による1次固有周期を示す。なお、地盤ばねのス ウェイ・ロッキング効果を考慮しても、応答結果に与える 影響は小さかったため、解析は基礎固定系で行う。

4. 非線形時刻歴応答解析による応答評価

4.1 地震応答解析結果

名駅、伏見、栄における 60m モデルと 30m モデルの解 析結果を図 8 と図 9 に示す。中川区、港区、碧南、刈谷、 豊田における、低層モデルと工場施設モデルの解析結果を 図 10 と表 3 に示す。鶴舞、大幸における商業施設モデルの 解析結果を図 11 に示す。事務所モデルは層間変形角、塑性 率、累積塑性変形倍率を、平屋工場モデルと商業施設モデ ルは最大加速度、層間変形角、塑性率の図を示す。 60m モデルは、名駅や伏見において、サイト波の方向性 によって応答値が増大するケースがみられ、地震後の継続 使用は困難であると思われる結果となった。30m モデルは、 60m モデルに比べ固有周期が下がったため、告示波に対し て応答値が増大している。低層モデルは、豊田におけるサ イト波を除き、ほとんどの地域で倒壊の危険性があるレベ ルまで応答している。

工場施設モデルに関しては、固有周期が 0.6 秒程度と、 サイト波の長周期成分に対して影響は小さいが、告示波に おいては大きな応答値を示しているものが多い。しかし、 碧南、刈谷におけるサイト波は、告示波よりも応答値が大 きくなっている。

商業施設モデルに関しては、1層目や3層目において応 答値が大きく突出しており、告示波ではランダム位相が大 きな応答値を示している。特定の層のみに変形が集中する 場合は、建物が層崩壊を起こす可能性が考えられる。 4.2 高機能都市における被災シナリオ

サイト波の応答解析結果より、震源位置からの距離が近 い碧南と刈谷においては、入力地震動のレベルが非常に大 きく、多くの建物が倒壊する可能性がある。また、全体的 に塑性率に比べ層間変形角が大きい建物モデルが多く、被 災後の建物が被災前の機能を完全に維持することは困難で あると考えられる。

想定される被災シナリオとして、豊田に本社を置き、碧 南から刈谷にかけて、関連企業グループが幅広く存在して いるケースを想定する。先述の通り、サイト波においては 碧南、刈谷において多くの建物が倒壊する危険性があり、 この地域に集中している各種工場施設は、大きな損害を受 けることが予想される。また、名駅付近の60mモデルの被 害も大きく、栄側ほど応答値が低減しており、地域毎に被 災状況が大きく異なっていることがわかる。企業としての 経済活動を維持するためには、地震後に被害を受けた建物 に関して、損傷程度を把握し、場合によっては代行機関の 確保など、状況に応じた判断を的確に行うことが必要であ る。

5. まとめ

本研究では、企業の経済活動に関わる基本的な建物とし て、事務所ビル、工場施設、商業施設の、3つ異なる機能を 持つ建物モデルを作成した。これらの建物モデルの被害予 測を行うため、告示波とサイト波を用いた地震応答解析を 行い、名駅、伏見、栄、中川区、港区、碧南、刈谷、豊田、 鶴舞、大幸の各サイトにおいて、最大加速度、層間変形角、 塑性率、累積塑性変形倍率の観点から分析を行った。

サイト波のレベルが非常に大きい碧南、刈谷では、多く の建物が倒壊する危険性がある。高機能都市における被災 シナリオとして、三河地域に多くの工場施設が集中してい るため、関連する系列企業に与える2次的な被害が大きいこ とが想定される。企業としての経済活動を維持するために は、事前の耐震補強やBCPの策定が重要となる。 今後の展望として、より実現象を再現できる建物モデル の構築や、最新の知見を活かした入力地震動の作成など、 検討対象となるモデルに関して、個々の精度を向上させて いくことが望まれる。

<参考文献>

- 日本建築学会構造委員会:高機能社会に求められる建築構造と 構造委員会が果たすべき役割、2009年度日本建築学会大会(東 北)構造部門研究協議会資料、2009.8
- 2) 高橋広人、鶴ヶ野翔平、福和伸夫、護雅史、千葉大輔、片山貴裕、吉田献一、土肥博、中野時衛:長周期地震動を受ける長周期構造物の床応答特性に関する研究 その2 経験的グリーン 関数法を用いた地震動予測、日本建築学会大会学術講演梗概集、 B-2、pp945-946、2010.9
- 金子美香:地震時における家具の転倒率推定方法、日本建築学 会構造系論文集第551号、pp.61-68、2002.1



表3 平屋工場モデルの解析結果

二.	5 1/2							
中川区	ランダム 位相	八戸 位相	JMA神戸 位相	サイト波 EW方向	サイト波 NS方向			
最大加速度	889	922	784	659	889			
最大層間変形角	1/33	1/32	1/38	1/48	1/33			
最大層塑性率	3.3	3.5	2.9	2.3	3.3			
港区	ランダム 位相	八戸 位相	JMA神戸 位相	サイト波 EW方向	サイト波 NS方向			
最大加速度	927	1014	901	646	728			
最大層間変形角	1/31	1/28	1/32	1/49	1/42			
最大層塑性率	3.5	3.9	3.4	2.2	2.6			
碧南	ランダム 位相	八戸 位相	JMA神戸 位相	サイト波 EW方向	サイト波 NS方向			
最大加速度	967	1177	792	1231	1172			
最大層間変形角	1/30	1/24	1/38	1/22	1/24			
最大層塑性率	3.7	4.6	2.9	4.9	4.6			
刈谷	ランダム 位相	八戸 位相	JMA神戸 位相	サイト波 EW方向	サイト波 NS方向			
最大加速度	857	1005	737	1258	992			
最大層間変形角	1/34	1/28	1/41	1/22	1/29			
最大層塑性率	3.2	3.8	2.6	5.0	3.8			
豊田	ランダム 位相	八戸 位相	JMA神戸 位相	サイト波 EW方向	サイト波 NS方向			
最大加速度	846	1077	786	492	408			
最大層間変形角	1/35	1/26	1/38	1/72	1/92			
最大層塑性率	3.1	4.2	2.9	1.5	1.2			

