首都圏直下地震・活断層等による強震動予測と超高層建物等の減災対策

キーワード 首都圏直下地震、海溝型巨大地震、活断層 強震動予測、超高層建築、減災対策

久田嘉章*	山下哲郎**	吉村智昭***
田邉朗仁****	荒川洋輔****	大宮憲司****

1. はじめに

著者らは首都圏で考慮すべき地震を対象に強震動 評価を行い、各地震動特性に対応した効果的な超高 層建物等の都市型建物の減災対策に関する研究を行 っている¹⁾。平成25年度は、①強震動予測手法のベ ンチマークテスト(手法の verification と結果の validation)と、高層建築を対象とした②効果的な 制振補強案の検討、および、③長周期地震動の簡易 応答評価法に関する研究を実施した。

2. 強震動予測手法のベンチマークテスト

強震動予測手法の検証を目的として、同じ震源・ 地盤の条件下で様々な手法・計算コードの結果の相 互比較を行い、その適用範囲やバラツキなどを検討 する、「強震動予測手法に関するベンチマークテス ト」(以下、ベンチマークテスト)を2009~2011 年 度に強震動予測における代表的な3手法(理論・数 値・統計的手法)により実施した(ステップ1~6)。 その結果、比較的単純なモデルを用いる限り、実用 的には同等な結果を得ることを確認した(例えば¹⁾)。

今年度は、新らたにステップ7として首都圏の直 下地震を対象としたベンチマークテストを開始した。 地盤は観測点直下で平行成層を仮定し、長周期は理 論的手法、短周期は統計的手法を用いる。表1はス テップ7で対象とする 2005 年千葉県北西部地震 (M6.0)の震源パラメータ、表2は理論的手法、表 3は統計的グリーン関数法による設定条件である。 計算地点は強震記録が得られている図1に示す26 点とする。

地盤モデルと波形計算は以下のように設定する。 まず理論的手法では、T71 として工学的基盤より深 い地盤は地震調査研究推進本部の3次元深部地盤モ デル²⁾を用い、観測点直下を平行成層で仮定し、3 次元波動を計算する。表層地盤は強震観測点で得ら れている地盤構造モデルから増幅率を計算し、工学 的基盤での波形に乗じる。この時、K-Net 観測点な

* : 工学院大学・建築学部・まちづくり学科,
***: : 大阪大学・大学院・工学研究科

表1 2005 年千葉県北西部地震の震源パラメータ

震源緯度(°)	35.349
震源経度(°)	140.083
震源深さ(km)	70
走行角(°)	25.5
傾斜角(°)	63.1
すべり角 (°)	67.8
地震モーメント (Nm)	$5.8 imes 10^{17}$
震源時間関数	継続時間1秒の三角関数

表2 ステップ7理論的手法モデル一覧

	ステップ7(理論的手法)					
モデル名	T71	T72				
対象地震	2005 年千葉県北西部地震(M	lj6.0)				
震源 (文献)	点震源 (纐纈・三宅, 2005)	任意				
減衰	あり					
有効 振動数	0~1Hz(0.5 秒以上)。但し計算は1	.5Hzまで。				
地盤	関東平野の3次元深部地盤モデ ルを用い、観測点直下の平行成 層地盤を使用。	任意				
出力点	26 地点(K-NET・KiK-net・UR 都市機構・建築研究所・戸田建 設株式会社、株式会社鴻池組に よる観測記録)。	任意				

表3 ステップ7統計的手法モデル一覧

	ステップ 7 (統計的手法)					
モデル名	SS71	SS72				
対象地震	 T71 同様					
振動数	0~20Hz(0.05 秒以下)。 但し計算は 25 Hz まで。					
入射角	観測点直下の地震基盤まで直線入 射、堆積層へは鉛直入射	任意				
震源	T71 同様	1				
放射特性	S波の一様分布(放射係数は 0.63)					
波動	SH 波	1				
減衰	振動数依存のQ値(但し、表層は-	一定 Q)				
地盤	T71 同様					
出力点	T71 同様					
出力成分	水平2成分(2組の乱数使用)	任意				

で工学的基盤に達していない場合も、単純に最下層 を工学的基盤と仮定する。T71の震源・地盤モデル では観測波形とは一致しない場合が考えるため、

```
*** : 工学院大学・建築学部・建築学科****: 工学院大学・大学院生
```

総合研究所・都市減災研究センター(UDM)研究報告書(平成25 年度) テーマ1 小課題番号 1.1-1

T72 モデルとして改良したモデルによる結果の提出 を期待している。

一方、統計的グリーン関数法では、SS71として震源から計算地点直下の地震基盤上面までは一様地盤 として直達 S 波 (SH 波のみ)を求め、深部地盤・ 表層地盤の1次元増幅率を入射波に乗じる。T72 と 同様に SS72 として、観測記録との一致度を向上さ せるために、震源や地盤モデルなどを自由に設定可 能な課題も設定した。

ベンチマークテストへの参加はメーリングリスト や HP 等で広く募り、理論的手法では4チーム(工 学院大、東京理科大・永野氏、建築研究所・中川氏)、 統計的手法では5チーム(工学院大、7社会、応用 地質・眞鍋氏、大林組・野畑氏、大成建設・山本氏) が参加した(7社会とは安藤・間、熊谷組、佐藤工 業、戸田建設、西松建設、フジタ、前田建設の7社 による共同研究会)。

図2に理論的手法、図3に統計的手法による2地 点における観測波形と各参加チームによる結果の比 較を示す。理論的手法では参加チーム間で結果に若 干の差異が見られるが、これは用いた地盤モデルに 違いがあるためと考えられ、現在調査中である。観 測波形との比較では、震源のほぼ直上である CHB009 では計算波形との一致は良好であるが、40 km 程度離れ厚い軟弱層がある HMB は過小評価とな っている。一方、統計的手法では、波形の経時包絡 関数に boore³⁾と佐藤・他⁴⁾の 2 種類を用いており、 それぞれの特徴が現れている。観測波形と比較する と、前者では振幅レベルはほぼ整合するものの継続 時間が短く、後者では継続時間の長さは再現が良い が、振幅が過小評価となっている。やはり遠方の軟 弱地盤である HMB の一致度が良くない。今後、モ デルの改善が必要である。

3. 超高層建築の効果的な制振補強対策の検討

昨年度に引き続き、工学院大学新宿校舎を対象に したより効率的な制振補強の検討を行う。今年度は ダンパー特性に依存しない骨組の特性値⁵⁾⁶⁾を算出 し、この特性値より短・長周期の様々な揺れにおい て効果的なダンパーの最適配置及び、最適ダンパー 性能の決定を行う。また、以上のダンパー配置によ る立体モデルを用いて、首都圏における想定地震及 び、設計時に使用された標準波での応答解析により ダンパーによる低減効果の確認を行う。



図1 千葉県北西部地震と観測点の位置



図3 代表2地点の加速度波形比較図(NS,EW成分)

昨年度と同様な3次元立体骨組みモデル¹⁾を対象 に、ダンパーの最適配置を検討する。すなわちダン パーを設置可能な位置にブレースを設置した状態 N (Model ALL-v1)を作成し、2つのモデルを設定す る。まずモデル N (No Damper)ではブレース剛性を 骨組の剛性に寄与しないほど小さくしたモデル、状 態 R (Rigid Damper)ではブレース剛性をブレースが 変形しないほど大きくしたモデルである。

図4のモデルでは、ブレースの配置位置は既往の 研究¹⁾で検討された配置候補全てに配置し、入力外 力にはAi分布を使用し、増分解析により検討を行っ た。図6は状態N時のNブレース変形量の水平成分 を層間変形で割った値(αNi)、図7は状態R時のR ブレース軸力の水平成分を層せん断力で割った値 (αRi)を示す。図6より、EW 構面は全層で変形 比が1.0以上であり大きく変形するが、NS構面では 低層階を除き変形が小さい。さらに図7ではEW 構 面における全層せん断力に対するRブレースが負担 するせん断力が3~6割程度を占めているのに対し、 NS 構面での負担率は1~2割付近で推移している。 従って、NS 構面のダンパーはあまり効果的でない。

図5では、NS 構面のダンパー配置を EW 構面と 同様に中央スパン部分に変更し、EW 構面のダンパ ー配置も変更した。図8より NS 構面での α Ni では 全層において α Ni = 1.0 以上の値に改善し、図9よ り、NS 構面 R ブレースのせん断力負担率も大きく 改善している。

以上の解析から図5のダンパー配置を採択する。 図10にダンパー本数を低減させた5つのモデルを 用いて地震応答解析を行い、ダンパーの効果を検討 する。図11は使用する入力地震波であり、昨年同 様に、東海・東南海連動地震、首都直下地震、エル セントロ波(50 kineの振幅で基準化)である。





(a) NS 構面のダンパー配置モデル

(b) EW 構面のダンパー配置モデル

図10 左から D100、D84、D68、D48、D32 モデル D32 モデル(NS:16 基、EW:16 基)、D48 モデル(NS:24 基、EW:24 基)、D68 モデル(NS:36 基、EW:32 基)、 D84 モデル(NS:44 基、EW:40 基)、D100 モデル(NS:52 基、EW:48 基) 図12に東海・東南海地震の入力による各層での 最大加速度応答と曲げを含む層間変形角を示す。こ の場合、最もダンパー設置本数の少ない D32 モデル でも大きな応答低減効果があり、層間変形角はすべ ての階において 1/200 以内である。

図13は短周期が卓越する地震動の代表としてエ ルセントロ波を入力したときの結果である。この場 合、東海・東南海地震ほどの大きなダンパーの効果 はない。ダンパーが無い場合、減衰定数に振動観測 より求めたレイリー型減衰の小さな値を用いている ため、最大層間変形は1/100を超えている^{1)。1/100} 以下にするには、NS構面にダンパーを44 其設置す る D84 モデル、EW 方向では EW 構面にダンパーを 32 其設置する D68 モデルが必要である。昨年の解析 ¹⁾では、NS 構面に 60 其のダンパーが必要であった に比べ、より効果的な配置であることが確認できた。

4. 長周期地震動による超高層建築の簡易応答評価

超高層建築には地震計が設置されていない場合 が多く、震災直後、被災度判定システムなどで即時 に被害を判断することは困難である。一方、今年度、 気象庁は大都市圏で地震計による長周期地震度階級 の即時情報を公開した⁷⁾。本研究では、都内の超高 層建築の近くで長周期地震度階級による速度応答ス ペクトルが公開されることを前提に、建物の振動特 性の経験式と応答スペクトル法による簡易な地震応 答評価法を検討した。

図14に長周期地震動階級の概念を示す。これは 超高層建築等の室内被害の目安となり、地上の地震 計の観測データから絶対速度応答スペクトル(減衰 5%)を求め、周期1.6~7.8秒までの間の最大値を、 階級1(5~15 cm/s)から4(100 cm/s以上)まで に分類し、公表するものである。

検討の建物を表4と図15に示す。2011年東北地 方太平洋沖地震の観測記録を得られた工学院大学新 宿校舎とエステック情報ビル、A~Oまでの計17棟 の超高層建築を対象とする。このうち、D~Gの4 棟はRC造、他の13棟はS造である。表の1次~3 次までの固有周期は各建物の最上階の観測記録(加 速度時刻歴波形)よりフーリエ変換して求めた。D ~Fは2011年の地震の他に2005年千葉県北西部地 震の記録も検討した。一般公開される記録として、 各建物から一番近いK-NET、KiK-Netの観測記録か ら減衰5%の応答スペクトルを求めた。図15には 建物と用いた強震観測点の位置、および表層地盤の 増幅率⁸⁾を示す。表5には各点で用いた増幅率の値 を示す。これは最大速度振幅の増幅率であり周期に 依存しない値であるが、そのまま用いる。

図16に東北地方太平洋沖地震における工学院大 学新宿校舎の検討結果を示す。K-Net 新宿の記録と 大学棟1階の観測記録(波形と応答スペクトル)を 比べると、表層地盤によりK-Netの方が大きな振幅 であり、増幅率で除すると工学院大学の記録に近い 値になっている。





総合研究所・都市減災研究センター(UDM)研究報告書(平成25 年度)

テーマ1 小課題番号1.1-1

表5 表層地盤における最大速度の増幅率





図16 K-Net 新宿と工学院大学新宿校舎の加速度 波形と絶対速度応答スペクトル(311地震)

定数は、それぞれ文献 ⁹⁾⁻¹¹⁾を、RC 造では文献 ^{9),10),12),13)}の提案式を使用した。また減衰5%から異 なる減衰定数のスペクトル値は告示による補正

(1.5/1+10h;h は求める減衰定数)を行った。刺激 関数は文献¹⁴⁾による平均的な関数形を使用し、最後 に、震度の推定は文献¹⁵⁾より最大加速度・速度より 求めた。

観測記録と、応答スペクトル法により求めた最大 値及び震度の比較を図17(S造)、図18(RC造) に示す。観測記録は建物内で得られた現実の建物応 答値であり、計算値は図15に示す建物近くの観測 点から地盤補正を行った加速度波形から応答スペク トル法によって推定した値(最大加速度・速度・変 位・震度)である。図よりばらつきはあるものの、 相関係数が0.7~0.9程度の精度であり、この条件下 では十分な精度を示す実用的な手法であると判断で きた。

5. おわりに

今年度は、継続テーマである①強震動予測手法の ベンチマークテストと、高層建築を対象とした②効 果的な制振補強案の検討、および、③長周期地震動 の簡易応答評価法に関する研究を行った。ベンチマ。



図14 長周期地震動階級の階級区分例

	対象	建物夕	++h tat	K-net	長周期地	構造	地上	軒宫(m)	観測1	観測2	観測3	
	地震波	X±10/11	10196	KiK-net	震動階級	種別	階数	+1 (b) (11)	次	次	次	
		上兴法	केट बच्च स्टर	tr 🗢		0.4		140	3.01	1.00	0.52	
		人子傑	新伯区	新佰	2	Siz	29	143	3.11	0.94	0.49	
		オフィス棟	新宿区	新宿	2	S造	28	120	3.18	0.98	0.52	
								130	2.98	0.93	0.52	
	2.1.1		ギタマ	新宿	2	S造	31	1015	3.31	1.08	0.59	
	5.11	^	利旧区					121.5	3.31	0.93	0.57	
		в	新宿区	新房	2	の進	30	123.35	3.11	1.02	0.62	
		5		4110	-	ų		120.00	3.58	1.19	0.68	
		C	洪区	宙雪	2	5浩	40	155 79	4.43	1.38	0.75	
		Ŭ	78 64	不丑	-	0,2	40	100.70	4.43	1.44	0.73	
		D	港区	市雪	2	RC造	33	103.8	1.97	0.64	0.32	
		-	756		2	HOLE		100.0	1.92	0.59	0.29	
	3.11	E	港区	東雲	2	RC诰	24	72.55	1.34	0.45	0.25	
	千葉			21124	1	NOLE 24		1.22	0.44	0.22		
		F	草加市	加묘	3	RC造	30	96.6	1.70	0.53	0.21	
					2			2.01	0.61	0.23		
		G	名古屋	名古屋	1	RC造 S造	25 32	75.25 97.45	1.32	0.41	0.23	
									1.31	0.41	0.24	
		н	江東区	東雲					3.12	1.01	0.43	
	3.11					2 S造	_	155.82	3.03	0.84	0.50	
		I	I 千代田区 j	越中島	2		33		3.77	1.23	0.05	
									4.10	1.20	0.07	
		J	中央区	中央区 越中島 3	S造	33	154.8	4.10	1.30	0.00		
					2 S			1 90.6	1.05	0.61	0.75	
		К	千代田区	越中島		S造 21	21		2.00	0.01	0.25	
				10.1.4		2 S造 20		85	2.03	0.70	0.20	
		L	L 千代田区 越中島	越中島	2		20		1.89	0.66	0.37	
			And a fundamental	1.000					2.85	0.98	0.01	
	3.11	M さいたま市 大宮	大宮	2	S造	26	138.7	2.73	0.88	0.65		
				+++++++++++++++++++++++++++++++++++++++	2	S造	S造 37	118.8	6.55	2.07	0.76	
		N	中央区	越中島					6.97	2.34	1.41	
		0	+15+		0	0.4		050	2.21	0.80	0.43	
			0	人版印	IC1E	2	う垣	55	200	2.64	0.83	0.45





図15 J-SHIS 表層地盤の増幅率⁸⁾、と検討に用い た建物、K-NET、KiK-Netの位置

推定した応答スペクトルを用い、3次モードまで の応答スペクトル法による重ね合わせで超高層建物 の応答値を推定する。必要となる固有周期、減衰定 数、刺激関数を建物の地上階数や軒高をパラメータ として簡易式を使用する。S造では固有周期と減衰 総合研究所・都市減災研究センター(UDM)研究報告書(平成25 在度)



図17 S造の結果比較(上段:(左)加速度、(右) 速度 下段:(左)変位、(右)震度)

ークテストでは、実際に観測した中規模な首都直下 地震を対象に、長周期地震動(理論的手法)と短周 期地震動(統計的手法)を対象に手法の検証を目的 として実施している。効果的な制振補強では、ダン パーの最適配置理論を用い、昨年度より効率的なダ ンパー配置案を提示した。長周期地震動の簡易応答 評価法では近くの強震記録から地盤補正による建物 地点での地震動を求め、経験的な応答スペクトル法 により建物応答を評価した。非常に簡単な方法であ るが、観測された応答値と比べ 0.7~0.9 程度の高い 相関を得ることができた。

謝辞

本研究は、文部科学省・科学研費・基盤研究(B)「大都 市圏で想定される広帯域強震動と超高層建築の減災対策」 (平成 24-26 年度)の研究助成で行われ、日本建築学会・ 地盤震動小委員会および工学院大学・総合研究所・都市減 災研究センターとの連携のもとに行われています。東海・ 東南海連動地震の地震動は大成建設より提供頂きました。 防災科学技術研究所 K-net、KiK-net の強震観測記録を使 用し、建物の観測記録については気象庁の相澤幸治氏、都 市再生機構、技術研究所、鴻池組、戸田建設、よりご提供 いただきました。建物の刺激関数については東京理科大学 の北村春幸教授にご提供いただきました。本研究を行うに あたり、東京工業大学の笠井教授、及び、武汉大学の蒲准 教授、東京理科大学の永野正行教授には有益なご指導・ご 助言を頂きました。ここに記してお礼申し上げます。



図18 RC造の結果比較(上段:(左)加速度、(右) 速度 下段:(左)変位、(右)震度)

参考文献

- 1) 久田嘉章ほか、都市減災研究センター (UDM) 研究報
- 告書(平成24年度)、pp.1-6、2013年3月 地震調査研究推進本部、長周期地震動予測地図 2009 2) 年度試作版、
- 3) Boore, D. M., Stochastic simulation of high-frequency ground motion based on seismological models of the radiated spectra, BSSA, Vol.73, 1865-1894, 1983. 佐藤智美ほか、ボアホール観測記録を用いた表層地盤
- 同定手法による工学的基盤波の推定及びその統計的経 時特性、日本建築学会構造系論文集、461、19-28、1994
- K. Kasai, et al., Effective Retrofit Using Dampers for a Steel Tall Building Shaken by 2011 East Japan Earthquake -- China-Japan Cooperation Program (Part 2), 10th CUEE Conference, Proc. of 10th CUEE Conference, pp. 1295-1302, Mar. 2013.
- 笠井和彦他、オイルダンパーをもつ実大5層鉄骨建物 の3次元震動台実験、日本建築学会構造系論文集 78(693), 1999-2008, 2013-11
- 気象庁、長周期地震動に関する観測情報(試行) 7)
- 8) 地震ハザードステーション (J-SHIS): 表層地盤データ
- 9) 市村将太ほか、鋼構造超高層建築物の設計用パラメー タに関する研究その1 剛性分布・固有周期・ベースシ ャー係数、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)、 構造Ⅲ、pp305-306、1999年
- 10) 市村将太ほか、超高層鋼構造建物の弾性設計用パラメ -タに関する研究(その1)各パラメータの定式化、 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、構造Ⅲ、 pp867-868、2000年
- 11) 横田治彦ほか、振動試験および地震観測データに基づ
- 建築学会大会学術講演梗概集 (関東)、構造 I、 pp389-390、1997 年
- 13) 日本建築学会、建築物の減衰 2000 年 pp.131-137
- 14) 北村春幸、性能設計のための建築振動解析入門第2版, 彰国社,pp.113-115,2009年4月
- 15) 翠川三郎ほか、計測震度と旧気象庁震度および地震動 強さの指摘との関係、地震安全学会論文集 pp.51-56、 1999年