首都直下地震・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

1. はじめに

本研究の目的は、信頼性の高い強震動予測手法の開 発と、首都直下地震や活断層、海溝型巨大地震など首 都圏で想定される強震動の予測を行い、その結果を活 用して超高層建築や断層直上の建物の耐震・減災対策 を提示することにある。具体的には、①強震動予測手 法のベンチマークテストと、②高層建築を対象とした 効果的な制振補強案の検討、および、③活断層直上の 建物の減災対策に関する研究を実施した。本報告では、 最終報告として平成22年度から5年間で得られた成 果をとりまとめた。ここで得られた結果は、テーマ2 と5に提供され、非構造部材の耐震性能や超高層建築 等の災害対応力の向上に寄与している。

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、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 よる強震動予測手法に関するベンチマークテストを 実施した。このテストでは、多くの強震動研究者・実 務者に参加を呼びかけ、与えられた震源・地盤の条件 下で各自の様々な手法・計算コードの結果の相互比較 を行い、その適用範囲等を検討している。2009~2011 年度(ステップ1~6)には、手法の妥当性の検証 (verification) を目的として、比較的単純な震源・ 地盤モデルを用いて実施し、同じ手法同士では実用的 には同等な結果を得ることを確認した(例えば¹⁾)。 さらに、2012~2014 年度(ステップ7と8)には、結 果の妥当性の検証(validation)を目的として、首都 圏の直下地震と南海トラフ近傍の実地震と想定地震 を対象としたベンチマークテスト(ステップ7と8) を実施した。ここでは首都直下の実地震を対象にした ステップ7の結果を紹介する^{2),3)}。

表1と表2に、理論・数値解析手法と統計的手法に よるステップ7の概要を示す。首都直下の実地震とし て、2005 年 7 月 23 日の千葉県北西部地震(M.j6.0)を 対象とし、計算地点は図1に示す26点とする。

久田嘉章*	山下哲郎*	笠井和彦**
石川理人***	荒川洋輔****	

表1 ステップ7:理論・数値的手法モデル

	ステップ7(理論・数値解析手法)			
モデル名	T71	T72		
対象地震	2005 年千葉県北西部地震(Mj6.0))		
震源	点震源(纐纈・三宅, 2005) 作			
減衰	あり			
振動数	0~1 Hz(計算は 1.5Hz まで)			
地盤	3 次元深部地盤モデルから、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、 鴻池組による観測記録)	任意		

表2 ステップ7:統計的手法モデル

	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	0~20 Hz(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	K ±	
震源	T71 と同様	仕恵	
放射特性	S波一様分布(放射係数は 0.63)		
波動	SH 波		
減衰	振動数依存 Q 値(但し、表層は一	定 Q)	
地盤	経験式によるω2モデル		
出力点	T71 と同じ		
出力成分	水平2成分(2組の乱数使用) 任意		



図1 震央位置と計算地点

* :工学院大学・建築学部 ***:東京工業大学・建築物理研究センター

** : 工学院大学·大学院生 ****:株式会社安藤・間(元・工学院大学・大学院生) 地盤モデルの設定は以下の通りである。理論・数値 解析的手法の T71 では、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(数値 解析手法)、または観測点直下の平行成層(理論手法) から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て 入射波に乗じる。この時、K-Net 観測点などで工学的 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。T72 モデルでは、各自で改良した震源・ 地盤モデルによる結果を提出する。一方、統計的グリ ーン関数法の SS71 では、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次元増幅率を乗 じる。SS72 では、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する。

ステップ7の参加者は、理論・数値的手法では、理 論手法が3チーム(工学院大・久田、東京理科大・永 野氏、建築研究所・中川氏、熊谷組・前川氏、7社会)、 数値解析手法は4チーム(清水建設・早川氏、工学院 大・石川、伊藤忠テクノソリューションズ・河路氏、 応用地質・眞鍋氏)である。一方、統計的手法では5 チーム(工学院大・久田、応用地質・眞鍋氏、大林組・ 野畑氏、大成建設・山本氏、港湾航空技研・長坂氏、 7社会)が参加した。ここで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社の共同研究会である。 理論・数値的手法による例として、図2に震源に 比較的近い観測点(CHBH12)の計算結果を示す。 波形比較に用いた波形は 0-0.7Hz のローパスフィル ター処理を行っている。手法間の結果の比較では、 初動の実体波部分は非常に良く一致しているが、数 値解析手法では、理論的手法より長い後続波形を示 している。一方、観測波との比較では、EW 成分は よく一致しているが、NS 成分の再現性が悪い。最下 段の前川氏は震源メカニズムを多重化した改良震源 モデルを用いて理論手法で再計算し、NS、EW 成分 ともに良好な結果を示している³。

統計的手法による例として、図3にHPPとKNGH10 の加速度波形の計算例を示す。図中、久田は佐藤の包 絡関数、眞鍋氏はBooreの経時関数を用いている。双 方とも地盤増幅率は地震基盤から1次元増幅率を乗 じているが、長坂氏は観測記録より求めたサイト増幅 と位相特性を使用している。前者に比べると振幅も継 続時間も改善され、観測波形に近い結果を示している。

以上より首都直下地震のように実体波が卓越する 場合、理論・数値解析手法では適切な震源・地盤モデ ルを用いれば精度良く計算可能であることが確認で きた。数値解析手法は散乱表面波など継続時間の長い 後続波の再現に適している。一方、統計的手法では、 適切な短周期のサイト増幅率の評価が重要であり、経 験的サイト増幅率が最も精度良く観測記録を再現で きることを確認した。



3. 超高層建築の効果的な制振補強対策の検討

工学院大学新宿校舎(29 階建て鉄骨造)を対象に、 2011 年東日本大震災による揺れと被害の調査と、振 動特性の同定解析を踏まえた3次元立体フレーム構 造モデルを構築し、南海トラフ地震等による長周期地 震動だけでなく、首都直下地震など短周期地震動が卓 越する地震動にも効率的な制振補強の検討を行った。

図4に新宿校舎の軸組図を示す。本校舎は、長辺方 向の東西にブレース付ラーメン架構のコアがあり、16 階と21階に両端コアを結ぶ25.6mの大スパン梁を有 するスーパーフレーム構造である。新宿校舎に隣接し てほぼ同規模のSTEC 情報ビルが建ち、基礎は2棟共 通で、地下1-2階がRC造、地下3-6階が鉄筋コンク リート造の直接基礎である。構造計算書による1次固 有周期は3.3秒(南北)と3.1秒(東西)である。

図5に2011年東北地方太平洋沖地震による新宿校 舎で観測した最大振幅と計測震度の高さ方向分布を 示す。最大加速度の分布では、地下100mで約50gal、 1階で約100gal、8階で約200gal、22階で150gal、 29階で約300galである。計測震度は地下と1階で 4、21階で5弱、16階と29階で5強であり、主とし て2次モードの影響で中間階と屋上階で大きな値と なっている。一方、変位は1階で約10cm、29階で約 40cmであり、主として1次モードにより上層階ほど 大きな揺れとなっている。層間変形角は最大でも 1/360程度であり、構造的には無被害であった⁴⁾。

写真1には新宿校舎の主要な被害を示す。主な室内 被害はライン天井の天井板の落下(28、27、21、14 階)、 固定していない本棚の転倒とその重みによるパーテ ィションの変形(24 階)、非常用エレベータのメイン ロープが着床板裏への絡まり、無理に運用したことに よる着床板等の変形破損などであった⁴⁾。



図4 新宿校舎の軸組図(左:東西、右:南北)



写真1 工学院大学新宿校舎における主な被害(左上 から右下へ:天井板落下、本棚の転倒、パーティシ ョンの変形、非常用エレベータのメインロープの着 床板裏への絡まりと変形破損)



図 5 2011 年東北地方太平洋沖地震による新宿校舎で観測した最大振幅と計測震度の高さ方向分布 (左から最大加速度・速度・変位、および計測震度)

図6に示すように、新宿校舎には強震計を用いた即 時被災推定システムを導入しており、地震の際、中層 階以上で震度5強の揺れを生じたが、躯体の被害が無 いことを速やかに確認し、約700名の帰宅困難者を受 け入れるなどの対応が可能であった⁴⁾。

次に、東北地方太平洋沖地震を含む複数の観測記録 を用いた伝達関数の適合法により、新宿校舎の固有周 期、減衰定数、刺激関数の同定し、3次元立体骨組み モデルを構築した⁵⁾。表3に同定した3次モードまで の固有周期と減衰定数を示す。構造計算では一般に減 衰2%程度の剛性比例型減衰を用いるが、同定した結 果、1次モードで1.5%程度、3次で3%程度であり、 剛性比例型の値よりかなり小さいことを確認した。次 に同定した振動特性値を再現する3次元立体フレー ム構造モデルを構築し、想定南海トラフ巨大地震や首 都直下地震にも有効な制振補強案を検討した。ここで、 構造モデル構築に際し、次の条件とした。

床:剛床と仮定

柱脚:固定支持と仮定

<u>パネルゾーン</u>:弾性範囲内でせん断変形を考慮 <u>減衰定数</u>:東北地方太平洋沖地震観測の同定結果 (1次モード 1.5%、3次モード 3.0%のレイリー減衰) <u>柱</u>:塑性化しないものと仮定た断面二次モーメント、 及び正負で異なる全塑性モーメントを算出。また、 バイリニアの履歴特性を使用

<u>ブレース</u>:座屈を考慮した柴田若林の履歴特性 <u>梁</u>:合成梁として評価し、床スラブの剛性を考慮



2011/03/11 14:46:00 簡易震度と層間変形

色	簡易重度	層圖変形角	夏明
	6強 以上	1/50以上	被害が出ている可能性があります
	555~655	1/200~1/50	軽微な被害が出ている可能性があります
	0~4	1/200以下	大きな被害は出ていないと思われます

図 6 東日本大震災時の新宿校舎の即時被害推定シス テムによる被害推定結果画面³⁾

表3 同定した減衰定数と固有周期 4)

方向	モード次数	固有周期	振動数	減衰定数
	1次	3.079	0.325	0.015
NS	2次	0.942	1.062	0.018
	3次	0.475	2.105	0.030
EW	1次	2.965	0.337	0.015
	2次	0.993	1.007	0.017
	3.77	0.518	1 0 3 1	0.028

構築した構造モデルより制震ダンパーの最適配置 を検討した(標準的なダンパーとして、KYB 株式会 社の制震用オイルダンパーを使用)。ダンパーを効果 的に配置するには、地震時に変形が大きい箇所である と同時に、せん断力の負担も大きいことが望ましい。 このため、笠井の手法のを用いて最適配置を検討した。 この方法は、まず設置可能な場所にダンパーを配置し、 ブレースの剛性が無視できるほど小さいモデル (Nモ デル)と、ブレースの変形が無視できるほど剛性が大 きいモデル(Rモデル)の2種モデルを構築する。次 に Ai 分布による荷重増分解析を行い、各層で N モデ ルでのブレース変形量の水平成分を層間変形で割っ た値(α_{Ni})と、Rモデルでのブレース軸力の水平成 分を層せん断力で割った値(a Ri) と積が、同時に大 きくなるダンパーの配置を最適解として探索する。以 上より、図7に示す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。使用する入力 地震波は、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)とした。

図8は、長周期地震動が卓越する地震として東海・ 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。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。

一方、図9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。ダンパ ーを付与しない場合、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。1/100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 デルが必要であることが確認できた。

2013 年度の制振ダンパー配置のモデル⁷⁾と比べ て、より少ないダンパー数で同等以上の制振を確認 した。例えば NS 方向では、前回は 60 基、今回は 44 基でエルセントロ波での 1/100 以内を満たした。同 じ配置モデルで東海・東南海地震の最大層間変形角 は、前回は約 1/238、今回は約 1/270 と改善した。 総合研究所・都市減災研究センター(UDM)最終研究報告書(平成26年度) テーマ1 小課題番号1.1



 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)



16 11 6 最大層間変形角(曲げを含む) 1 0.002 0.006 0.008 0.012 0.014 0 0.004 0.01 Dなし -D32 -D48 -D68 -D84 -D100

5. 活断層直上の建物の減災対策

首都圏や大阪圏には立川断層や上町断層など危険 度が高い活断層が存在する。大規模な活断層で地震が 生じた場合、その近傍では指向性パルスなど破壊力の ある強震動が発生するだけでなく、地表断層に起因す る地盤の大きな変形(フリングステップ)や傾斜が生 じ、建物に大きな被害が生じることが懸念されている。 これまで地表断層近傍の強震動特性と建物の被害に





は不明な点が多く、殆ど対策がとられていないのが現 状である。そこで、本研究では、図10に示すように、 最大で2m近い地表地震断層が出現した2011年福島 県浜通り地震(M7.0)を対象に、断層の近傍で建物の 建物被害調査を実施し、効果的な対策法を検討した⁸⁾。

この地震は2011年4月11日に深さ6kmで発生し、 同年3月11日東北地方太平洋沖地震が誘発した引っ 張り場による正断層型による地震である。いわき市な どでの最大震度は6弱であった。井戸沢断層の西側セ グメントや湯ノ岳断層東部に被害が多く報告されて おり、死者3人、負傷者10人の人的被害を生じた。 死者の原因は、田人町石住において崖崩れに伴う家屋 倒壊によるものであった。

今回実施した建物被害調査は、2011年5月29、30 日の2日間で、計7名の参加で実施した。図10に示 すように、断層崖が顕著に現れた井戸沢断層と湯ノ岳 断層を中心に、地表断層を挟む計194棟の建物の悉皆 調査を行った。調査の方法は、日本建築学会災害委員 会が作成した調査シートを基準とした。主な調査項目 は、建築年、現状、建物用途、建物階数、構造種別、 基礎形式、基礎被害、地盤変状、屋根形式、屋根被害、 被害度(破壊パターン)、断層による地盤変状被害な

図9 エルセントロ地震波形による最大層間変形角

どである。被害度破壊は、岡田・高井による被害チャ ート図によって、D0(無被害),D1(軽微被害),D2(一 部損壊),D3(半壊),D4(全壊),D5(一部崩壊),D6 (完全崩壊)の7パターンで判別した。

表4に地表地震断層と調査建物との位置関係と被 害度を示す。調査した建物は4棟を除き、地表断層か ら 500m 以内に位置している。特に地表断層直上の 10 棟の被害建物うち、8 棟は大きな断層変位により D4 以上の被害であり、全壊率は8割である。他の2棟の 被害は D2 と D1 であった。一方、地表断層からずれ ると、全壊率は約2%と小さく、逆断層で報告されて いるような、上盤側で被害が集中する傾向は見られな かった。これは山岳地帯であり、一般に硬質地盤の地 域であることに加え、正断層特有の現象(上盤が沈み 込むため、逆断層のような上盤上端部の崩壊が見られ ない現象)である。また多くが古い建物であるにもか かわらず、地震動による2%程度の全壊率(震度で5 強から6弱程度に相当)であり、大規模な地表断層が 出現したにもかかわらず、地表断層近傍では強い地震 動が発生しなかったと思われる。

写真2に地表断層直上の建物の典型的な被害例を 示す。左図は唯一の倒壊事例である寺院山門である。 基礎は東石に固定されておらず、部材接合部も金物な どで補強されておらず、上盤の沈下で転倒・倒壊した。 一方、寺院本堂の真下に落差約60 cmの断層が現れ、 大きな傾斜被害を生じたが、木造特有の変形追随性能 により倒壊を免れている。これらの調査から、地表地 震断層の近傍の強震動は特に強い訳ではなく、断層直 上でも地盤変状に備えれば倒壊を逃れる対策が十分 に可能であることを示している。

表 4	地表断層	と建物	の位置関	係と	被害度	の関係	8)

被害度	直上	上盤	下盤	不明	合計
D0	0	28	68	2	98
D1	1	24	42	4	71
D2	1	1	5	0	7
D3	0	1	2	2	5
D4	7	1	2	2	12
D5	1	0	0	0	1
合計	10	55	119	10	194
全壊率	80%	2%	2%	20%	7%



写真2 断層直上の寺院の山門(左)と本堂(右)

6. おわりに

最終年度として、①強震動予測手法のベンチマーク テストと、②超高層建築を対象とした効果的な制振補 強案の検討、および、③地表地震断層近傍の建物調査 結果を報告した。ベンチマークテストから信頼性が担 保された強震動予測手法を確認でき、その結果は超高 層建築の地震応答解析と制振補強案の検討に活用さ れた。この応答解析結果は小課題 1.2 以下に提供さ れ、非構造部材の耐震性能や超高層建築等の災害対応 力の向上に寄与している。また段差 1m 程度の地表地 震断層が出現した地震による建物被害調査から断層 の直上でも地盤変状に備えれば倒壊を逃れる対策が 十分に可能であることを確認した。

謝辞

本研究の一部は、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・地盤震動小委員会との連携のもとに行われました。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、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。本研 究を行うにあたり、大阪大学の故・吉村智昭氏、武汉大学の 蒲准教授には有益なご指導・ご助言を頂きました。

参考文献

- 久田嘉章ほか(分担)、資料編I:強震動予測手法に関 するベンチマークテスト、最新の地盤震動研究を活かし た強震波形の作成法、日本建築学会、2015(刊行予定)
- 2) 石川理人ほか、首都直下地震を対象とした強動予測手法 に関するベンチマークテスト(その1:千葉県北西部地 震を対象とした観測記録との比較)、第14回日本地震工 学シンポジウム、2014.12
- 3)前川利雄ほか、首都直下地震を対象とした強動予測手法 に関するベンチマークテスト(その2:2005年千葉県 北西部地震の震源過程)、第14回日本地震工学シンポジ ウム、2014.12
- 4) 久保智弘、東日本大震災における首都圏超高層建築における被害調査と震度アンケート調査、日本地震工学会論 文集、Vol.12, No.5、pp.1-20、2012.11
- 5)山下哲郎、新宿区超高層街区に建つ鉄骨造超高層建築の 東北地方太平洋沖地震前後の振動特性、日本地震工学会 論文集、Vol.12, No.4、pp. 3-16、2012.9
- 6) 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, 2013.3
- 7)新田龍宏ほか、超高層建築における振動特性の評価と地 震応答解析(その2)弾塑性地震応答解析、日本建築学 会大会学術講演梗概集(東海)2012.9
- 久田嘉章ほか、2011 年福島県浜通り地震の地表地震断層の近傍における建物被害調査、日本地震工学会論文集、 Vol.12, No.4、pp.104-126、2012.9