

超高層キャンパスにおける地震防災対策事例

○村上正浩¹⁾・久田嘉章¹⁾・久保智弘²⁾

1) 正会員 工学院大学工学部建築学科, 東京都新宿区西新宿1-24-2

2) 正会員 ABS コンサルティング, 東京都港区虎ノ門 5-12-1

1. はじめに

近年, 首都圏では直下地震や東海地震, 東海・東南海連動型地震の切迫性が指摘されており, 超高層建築では震源近傍の強震動に加え, 関東平野に生じる長周期地震動に対する地震防災対策の必要性が指摘されている. 工学院大学 (学生数約6500人, 専任教職員数約280人; H18.5現在) には八王子と新宿にキャンパスがあり, 都心部に立地する超高層建築の新宿キャンパス (S造28階) では大規模地震が発生した場合, 建築構造・設備・人的などへの直接被害に加え, 帰宅困難者発生や授業停止等による間接被害など様々な問題が発生する可能性がある.

本研究では新宿キャンパスを対象として, シナリオ地震による強震動と建築構造・設備・人的・事業に対する地震リスク評価を行い, さらに事前対策として構造・設備の耐震・制震補強対策の実施, 危機管理・事業継続マネジメントの遂行, 直前・直後対策として緊急地震速報とリアルタイム地震観測システムの活用, 事後対策として緊急時対応組織の構築, 防災訓練とマニュアル整備, 学生・教職員の安否確認, 帰宅困難者対策, ボランティアとして地域貢献, 復旧・復興対策, に関する総合的な地震防災研究を行っている (期間: 2006~2008年). さらに工学院大学・理事会の協力により, 実現可能な成果から逐次, 実行に移している.

2. 研究概要

本研究は次に示す7つの小課題で構成される.

(1) 新宿を対象としたシナリオ地震による強震動評価 (主担当: 久田嘉章, 吉村智昭)

海溝型巨大地震および首都圏直下地震を対象とした新宿における入力地震動評価を行う.

(2) 新宿キャンパスの地震応答解析と制震補強対策 (主担当: 鱈沢 曜, 久田嘉章)

構造計算書に加え, 微動・人力加振・強震観測データから新宿キャンパスの振動モデルを構築し, 地震応答解析による応答・被害評価を行うと同時に, 制震補強対策を検討する.

(3) 設備施設の地震応答解析と制震補強対策 (主担当: 大橋一正, 田中 孝)

地震応答解析結果 (フロアレスポンス, 層間変形など) をもとに新宿キャンパスの設備施設 (エレベータ・電気・水道・下水・ガス等) の耐震性能調査と補強対策を検討する.

(4) 地震リスク評価と事業継続マネジメント (主担当: 中村孝明, 遠藤 透, 遠藤和義)

地震応答解析結果による構造・設備・人などの直接被害, および授業など業務停止による間接被害を評価し, 各種対策による費用対効果, 地震リスクマネジメントおよびBCP案を作成する (本報告では省略).

(5) 緊急地震速報・リアルタイム地震防災技術の活用 (主担当: 久保智弘, 堀内茂木・山本俊六)

緊急地震速報 (防災科学技術研究所・提供) によるエレベータ閉じ込め防止対策や, 館内アナウンス放送 (頭部保護, パニック防止など), 新宿キャンパスの地震観測システムによる即時被害推定などによる減災対策を検討する.

(6) 緊急時対応体制の構築・マニュアル整備 (主担当: 村上正浩, 長能正武, 久保智弘, 末松孝司)

避難シミュレーションを活用した教職員による緊急時対応組織の構築, 学生・教職員の安否確認・帰宅困難者支援システムの構築, 各種対応マニュアル整備を行い, 図上演習・防災訓練による検証を行なう.

(7) 街区・地域住民・自治体との連携・復旧復興対策 (主担当: 村上正浩, 野澤 康)

学生・教職員ボランティア活動などによる西新宿街区, および新宿区・中野区を対象とした自治体・地域住民との協働体制 (情報収集・初期消火・救援救護活動など) を検討する.

3. 新宿を対象としたシナリオ地震による強震動評価

3.1 海溝型巨大地震による強震動評価

海溝型巨大地震 (東海地震, 東南海地震, 南関東地震) を対象とした新宿での強震動計算を行った. 周期4秒以上は波数積分法¹⁾と有限要素法を組み合わせた3次元DRM²⁾ (Domain Reduction Method; 図1) によって関東平野の深部地下構造³⁾ (図2) を考慮した地震動シミュレーションを行い, 一方, 周期4秒以下は新宿で観測された強震記録を用いた経験的グリーン関数を用いた. 図3に東海地震による新宿での工学的基板上面での計算例を示す (震源モデルは内閣府モデル⁴⁾ を参照, 経験的グリーン関数の要素地震は2001年4月3日静岡県中部地震を使用). 堆積層表面波による長い継続時間の波形となっている. 今後はフィリピン海プレートの付加体の考慮など, より現実的な構造モデルを構築し, 計算を行う予定である.

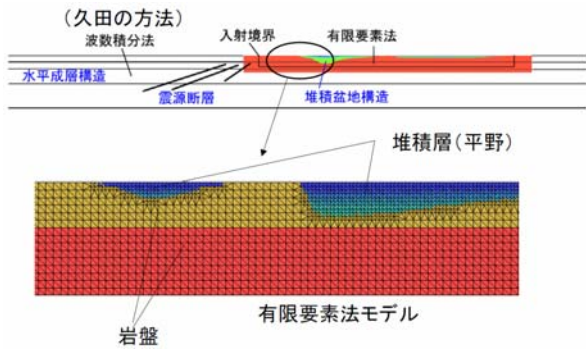


図1 領域縮小法 (Domain Reduction Method) ²⁾

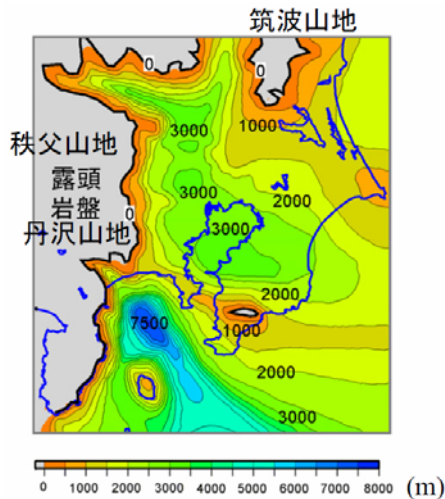


図2 3次元関東平野モデルにおける地震基盤の等深度分布図 (山中・山田³⁾を参照)

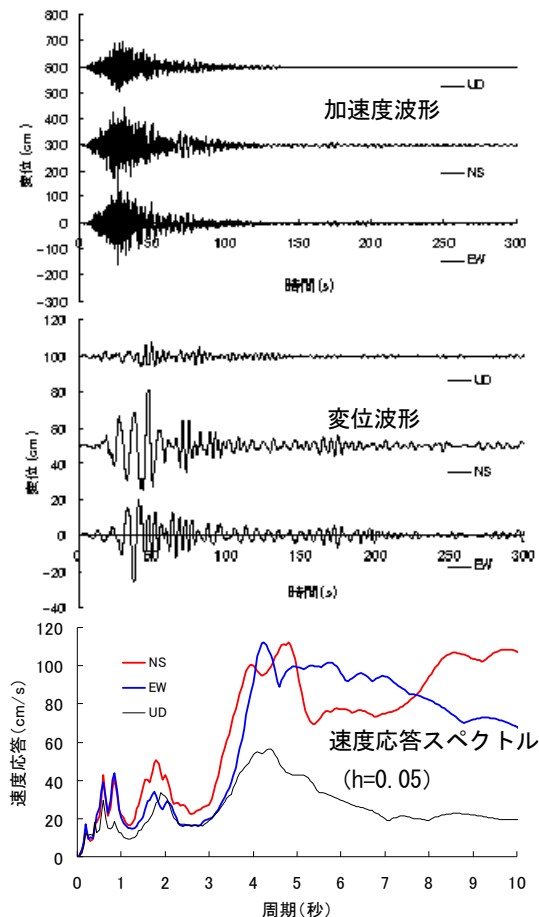


図3 東海地震による新宿での強震動計算

3.2 首都圏直下地震による強震動評価

首都圏直下地震を対象とし、新宿における強震動予測計算を行った。計算手法は、長周期側に波数積分法による理論的手法¹⁾を、短周期側に経験的手法(統計的グリーン関数法に平行成層地盤のグリーン関数法を使用し、かつ長周期へ拡張した手法⁶⁾)をそれぞれ用い、フィルターをかけ重ね合わせて計算を行うハイブリット手法である(接続振動数は0.8~1.4 Hz)。

震源モデルは文献⁷⁾を参考に、図4に示す東京湾北部地震とした。震源パラメータは、類似な震源モデルとして1994年ノースリッジ地震のパラメータ⁷⁾をスケールリング則により調整したモデル(Waldモデルと呼ぶ)と、内閣府が東京湾北部地震で用いた(内閣府モデル⁷⁾と呼ぶ)の2種のモデルを用いた。図5にすべり分布を、図6には応力降下量の分布を示す。Waldモデルでは複雑なすべり分布を与え、応力降下量は断層面の平均値をとって一様に約3[MPa]としたのに対し、内閣府モデルではアスペリティにすべりと応力降下量を集中させた(16.7[MPa])モデルとなっている。一方、地盤モデルはSatoによるモデル⁸⁾を用いた。

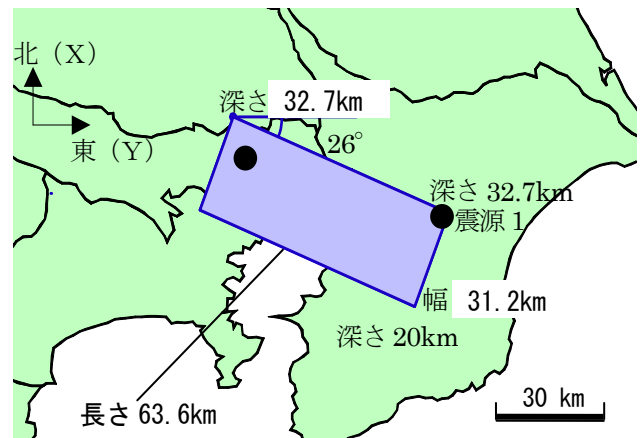


図4 断層面の平面投影図と観測点の位置

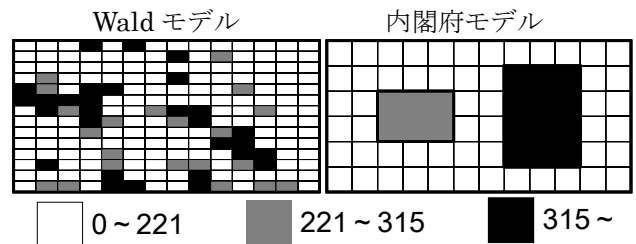


図5 各モデルの小断層分割とすべり分布(cm)

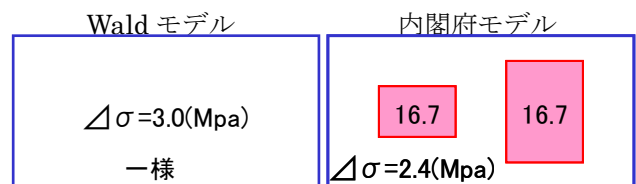


図6 各モデルの応力降下量(Mpa)

図7~9に新宿の工学的基盤上($V_s=400$)における計算結果である加速度・速度波形および応答スペクトル

(N26E成分)をそれぞれ示す。Waldモデルに比べ、内閣府モデルで短周期成分が大きいが、これは図6に示すように内閣府モデルのアスペリティ内の応力降下量が非常に大きいためである。

また図10に示されるように、今回対象としているような傾斜角の浅い逆断層による地震動では指向性パルスは観測されにくいことが分かった。すなわち逆断層の場合、図10左に示すノースリッジ地震のように大きな傾斜角がある場合は、断層面の延長上の地表で明瞭な指向性パルスが観測されるが、図10右のように傾斜角が浅い場合、指向性パルスは地表には届かないと考えられる。

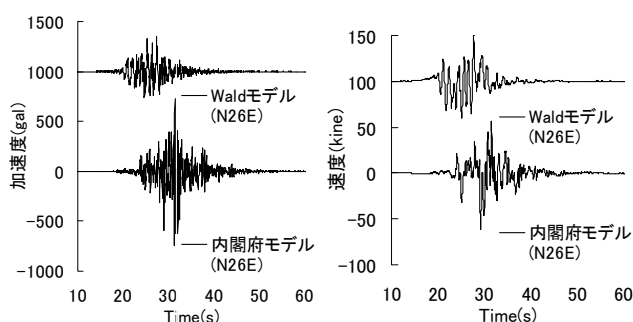


図7 加速度波形計算結果 図8 速度波形計算結果

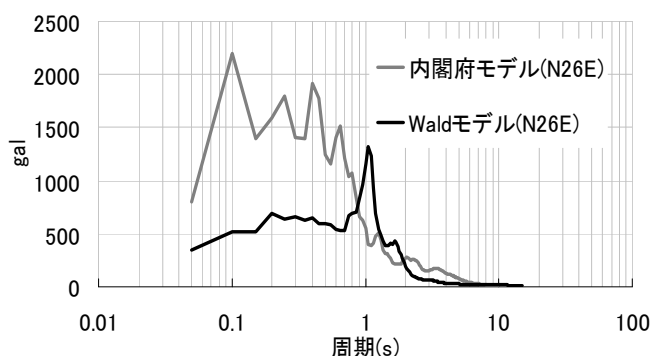


図9 2つのモデルによる加速度応答スペクトル

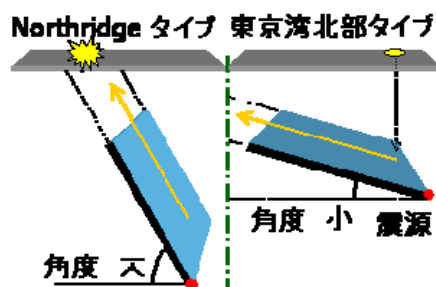


図10 逆断層の指向性パルスの発生（左：1994年ノースリッジ地震タイプ、右：首都圏直下地震タイプ）

4. 新宿キャンパスの地震応答解析と制震補強対策

4.1 新宿キャンパスのモデル化と地震応答解析

大学棟(新宿キャンパス)ならびに隣接するオフィス棟(STECビル)(図11・12、表1)の振動特性を調べるため、2006年度に常時微動・人力加振観測を行った。観測ではポータブル地震計(SMAR-6A3P)を用い、サ

ンプリング周波数100Hz、測定時間3分間で建物の主軸方向(NS, EW)及び上下方向の加速度成分を計測した。図13左に示すように地震計4基(各3成分計測可能)による同時観測を実施した。人力加振は14階で行い、測定パターンに合わせてNS方向とEW方向に加振した。

常時微動観測より、水平成分の1次固有周期は、NS方向約2.75秒、EW方向約2.60秒であった。人力加振観測では1次周期に合わせて加振を行い、振幅を増幅させた。観測記録より25階の代表観測点で最大水平変位を記録した同時刻における全観測点の変位記録を基に振動モードを確認した。図13右にEW方向の振動モードを示すが、建物の曲げ変形が顕著に読み取れる他、スウェイ、ロッキングによる変位は比較的小さいことを確認した。

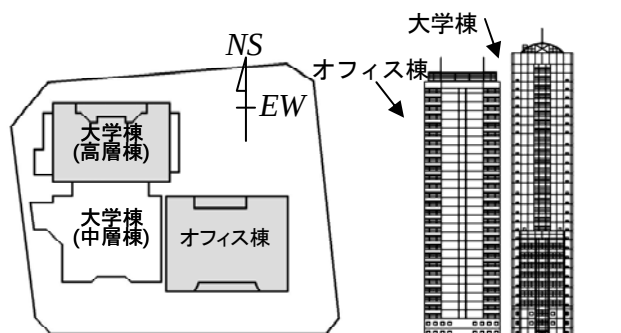


図11 配置図

図12 立面図

表1 対象建物概要

建物名称	大学棟(工学院大学高層棟)	オフィス棟(STECビル)
建築場所	東京都新宿区西新宿	
竣工年	1989年	
基準階面積	1170㎡	1499㎡
階数	地上29階・地下6階・塔屋1階	地上28階・地下6階・塔屋1階
軒高/最高高さ	123.45m/143.00m	111.29m/130.00m
アスペクト比	NS:5.59 EW:3.72	NS:3.96 EW:3.13
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	

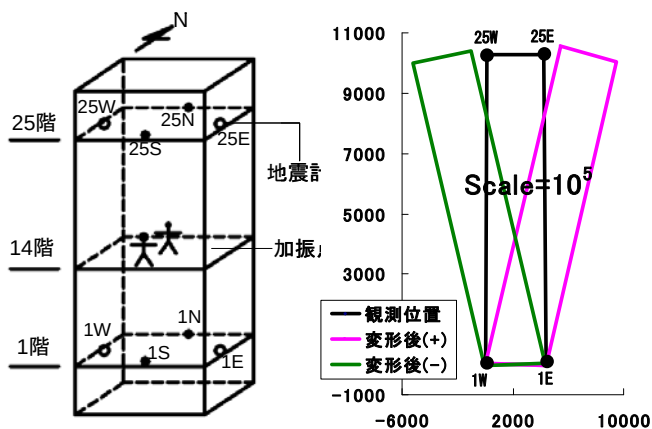


図13 常時微動・人力加振(左)と振動モード観測概要(EW方向)(右)

上記の結果と構造計算書をもとに、振動解析モデルを作成し、強震観測記録を用いた応答計算を行った。

構造計算書の振動解析モデルは、大学棟30質点、オフィス棟29質点の等価せん断モデルであるが、曲げ変形が顕著に確認出来る為、これを説明できる等価曲げせん断モデルを簡易に作成した(表2)。表2中のせん断比率は、せん断変形による水平変位の割合を示している。2棟にある強震観測システムによって得られた2004年10月23日新潟県中越地震の1階での記録を入力波として、解析モデル及び設計時のモデルによる時刻歴応答解析を行った。その結果、等価せん断モデルに比べ等価曲げせん断モデルによる卓越周期は観測記録に近い結果が得られることを確認した。一方、オフィス棟については、観測システムで観測された地震記録との比較によりせん断剛性の比率を推定した。

作成した解析モデルに3章で計算した首都圏直下地震(内閣府モデル)と東海地震の計算波形を入力し、応答計算を行った(図14、図15)。首都圏直下地震では最大変位で80~90cm、層間変形角も約1/100の衝撃的な応答を示し、その後、自由振動に近い揺れとなっている。一方、東海地震では最大変位で30~50cm、層間変形角は1/300~1/150程度の大きな振幅が3分以上の長い継続時間で揺れている。

表2 解析モデル概要

大学棟	せん断	1次固有周期	NS3.3秒、EW3.14秒
	曲げせん断	せん断比率	NS:50% EW:78%
		1次固有周期	NS3.02秒、EW2.96秒
オフィス	せん断	1次固有周期	NS・EW共に3.01秒
	曲げせん断	せん断比率	NS:65% EW:83%
		1次固有周期	NS2.80秒、EW 2.95秒
共通	減衰		2%(剛性比例型減衰)
	復元力・履歴特性		トリリニア・標準トリリニア

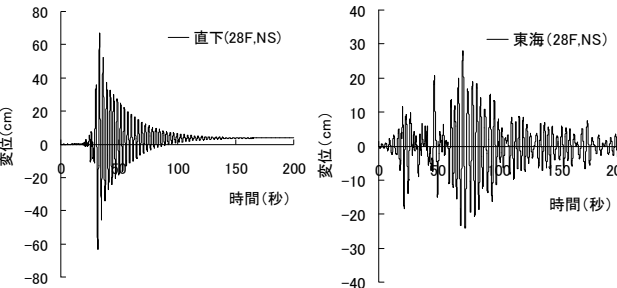


図14 大学棟の最上階の応答変位波形 (NS成分)

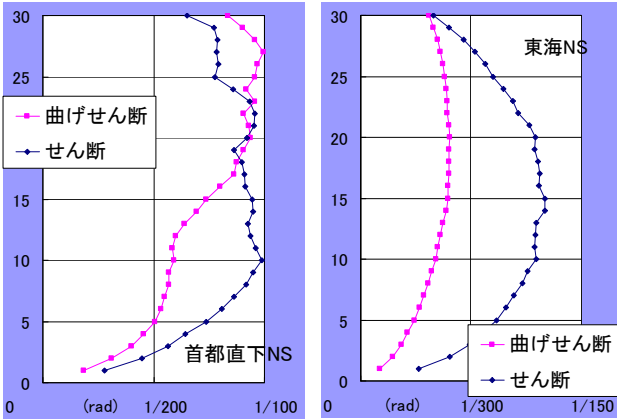


図15 各階の最大層間変形角の高さ方向分布

4.2 工学院大学新宿校舎の制震補強対策

制震補強対策として、減衰力と速度の関係がバイリニア型となる粘性系の制震部材(オイルダンパー)を用いて、大学棟の階毎に制震ダンパーを配置した場合と、大学棟とオフィス棟の特定階同士を制震ダンパーで水平に連結した場合を仮定し、前節で作成した等価曲げせん断モデルによる時刻歴応答解析を行った。なお、想定地震動として、3章の東海地震と首都直下地震(内閣府モデル)を用いた。制震部材の各種依存性及び取付部材の剛性は考慮していない。

(1) 大学棟の階毎に制震ダンパーを配置した場合

最大速度を50kineに基準化した1940Elcentro波(NS方向)による応答解析結果を基に、最大層間変形角がNS方向は1/200を超えている層にダンパーを配置し、EW方向は1/150を超えている層に配置した(表3、表4)。なお、EW方向の16階及び21階はスーパーフレームにより剛性が高く変形量が少ないため、中層階にはダンパーを配置せず、上層階と下層階に配置した。

ダンパーを配置した結果(図16)、最大層間変形角で比較をして建物の減衰定数を4%から6%にした場合と同様の効果があることが確認できた。また、首都直下地震(内閣府モデル)を入力した結果、NS方向は補強前の状態において上層階の応答が1/100という構造的に被害が出る恐れがある値であったが、ダンパーを配置することで全層の応答を1/120以下まで低減することが確認された。EW方向は一部で1/150を超える応答を示していたが、補強後は全層において1/200以下に低減することが確認できた。一方、東海地震を入力した結果、補強前においてもNS方向1/300以下、EW方向1/500以下と小さな応答を示していたが、補強後は更に応答を低減することが確認され、NS方向1/400以下、EW方向1/600以下という結果となった。最大塑性率もダンパーを配置することにより、どの入力波においても明確な応答の低減が確認された。

表3 各階ダンパー配置本数と最大減衰力

NS方向			EW方向		
階数	本数	最大減衰力	階数	本数	最大減衰力
30	4	1000kN	30	4	250kN
29	4	1500kN	29	4	500kN
18-28	4	2000kN	28	4	750kN
17-16	4	1500kN	27	4	1000kN
15	4	1000kN	23-26	4	1500kN
12-14	4	500kN	22	4	750kN
1-11	0		16-21	0	
			7-15	4	1500kN
			5-6	4	1000kN
			1-4	0	
合計	24	7000kN	合計	32	7250kN

表4 ダンパー性能(最大減衰力が2000kNの例)

最大減衰力Fmax	2000kN
最大速度Vmax	150mm/s
リリース荷重Fr	1600kN
1次粘性係数C1	50.0kN・s/mm
2次粘性係数C2	3.39kN・s/mm
装置剛性K	430kN/mm

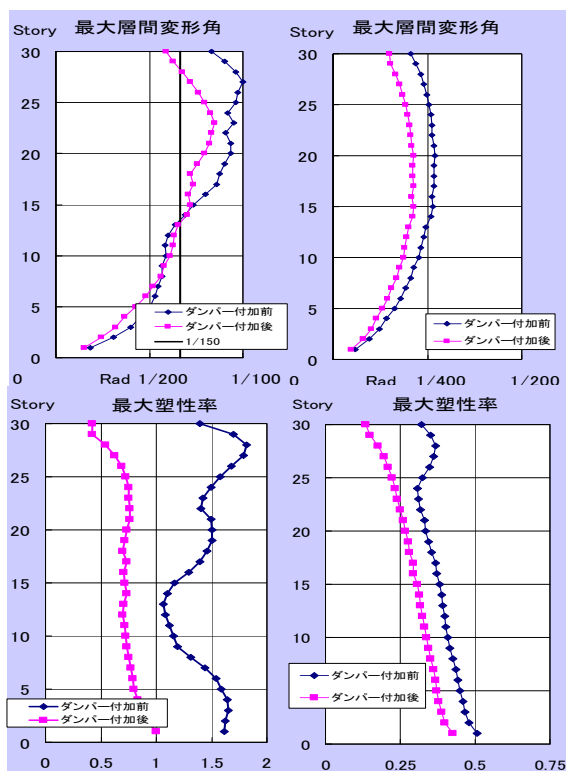


図16 ダンパー配置有無の応答解析結果の比較例 (NS方向) (左:首都直下地震, 右:東海地震)

(2) 大学棟とオフィス棟を水平に連結した場合

1次及び2次モード時の変形が卓越する, 大学棟27・15階, オフィス棟29・16階の計2箇所に連結ダンパーを配置した. なお, 2棟は斜めに並んで建っているため, 連結ダンパーを約45° 方向に設置し (図17), これを主軸方向に換算した値をダンパーの性能とした (表5). また各建物のねじれは生じないものとした. 入力地震波は, 首都圏直下地震 (NS方向), 東海地震 (NS方向), さらに長周期地震の設計用地震波として1968Hachinohe波 (NS方向) の最大速度を50kineに基準化した波形を用いた.

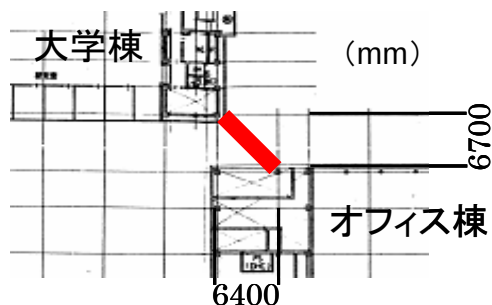


図17 大学棟とオフィス棟の連結ダンパーの配置

表5 連結ダンパー性能 (換算後)

最大減衰力 F_{max}	500KN
最大速度 V_{max}	150mm/s
リリース荷重 F_r	400KN
1次粘性係数 C_1	12.5KN・s/mm
2次粘性係数 C_2	0.85KN・s/mm
装置剛性 K	110KN/mm

結果として, 図18に示すように, 首都直下地震 (NS方向) のような継続時間が短く衝撃波のようなピークがある波形においては建物の塑性率が大きく連結の効果は小さい. 一方, 東海地震 (NS方向) では, 固有周期の近い関係にある2棟においても明確な応答の低減が見られ, 大学棟全層において1/450以下の応答とすることが確認され, 単独の制震補強と同等な応答低減効果があることがわかった. また塑性率は1を超えておらず, 建物の塑性化が起きずに連結ダンパーが有効に作用していることが確認できた.

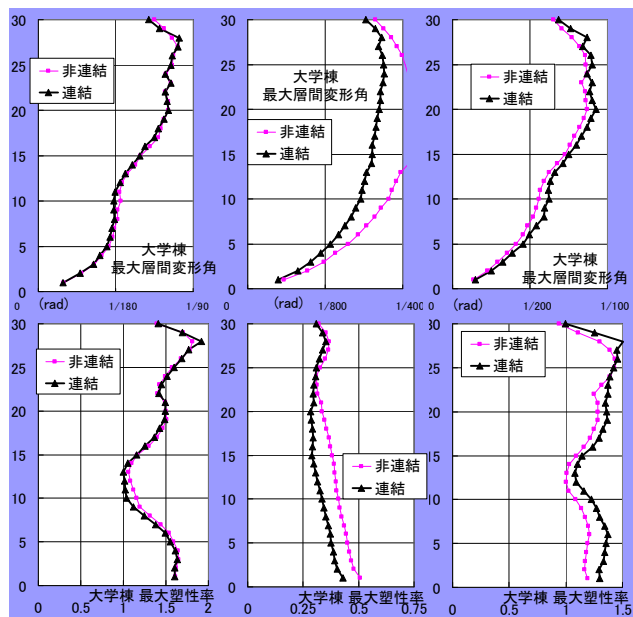


図18 連結有無の応答解析結果の例 (大学棟) (左列: 首都直下地震 (NS方向), 中列: 東海地震 (NS方向), 右列: 1968Hachinohe 50kine (NS方向))

5. 設備施設の地震応答解析と制震補強対策

5.1 建築設備の被害特性

建築設備の耐震性能と補強対策を検討するため, 兵庫県南部地震と新潟県中越地震に関する文献^{(9)~(13)}を参考に建築設備の被害特性を整理した. 調査対象は, 震災直後の帰宅困難を想定し, 生命, 生活環境の維持に最低限必要だと考えられる給排水衛生設備 (飲料水, トイレ洗浄水), 空調設備 (空気環境の維持), 電気設備 (ポンプや空調機器の動力源) とした.

給排水衛生設備の被害は, スロッシングによる高置水槽, 受水槽の天板・側板の破損や配管取付け部の破損, 地盤不同沈下による各種 (給水, 排水, 消火) 引込み部における配管の折損であった.

空調設備は, 機器取付け部の破損とそれに伴う移動・転倒が原因で冷温水管が破損し, 漏水につながった場合や加速度に追従できずダクトチャンバが変形・破損し, 脱落する被害が多数発生した.

電気設備は, 機器のずれ・落下や制御盤, 配電盤の転倒が多く, 停電や漏電も併発した. また, 機器類の機能喪失だけでなく, 警報の誤発報等システムの故障

や複合的要因による小火もあった。

5.2 新宿キャンパスの設備概要 (図 19, 表 6)

高層棟は、上層階が研究室、中層階が事務施設関係、低層階には教室が配置されている。中層棟は、教室や図書館、厨房・食堂より地上階が構成されている。B6Fには地域冷暖房施設(DHC)が設置され空調は冷水、蒸気を用い行われている。また、21・16FのEW方向にはブレース補強が施され、21Fに中間電気室、14Fには事務・教育系の情報を管理するコンピュータ機械室がある。

給水は水圧調整するために高置水槽、中間水槽を配置し3系統に分け給水している。ガスは、低圧ガスが厨房へ、中圧ガスがDHCへ供給されている。電源は、スポットネットワーク方式による3回線で特高変電室(B3F)に引込み14F以下に供給している。15F以上は中間電気室より供給されている。なお、自家発電装置はB3Fにある。

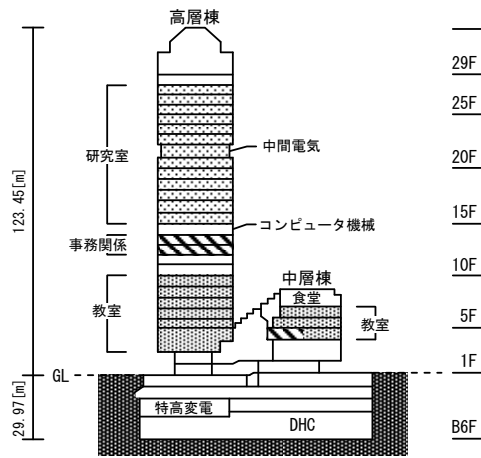


図19 新宿キャンパスの構成

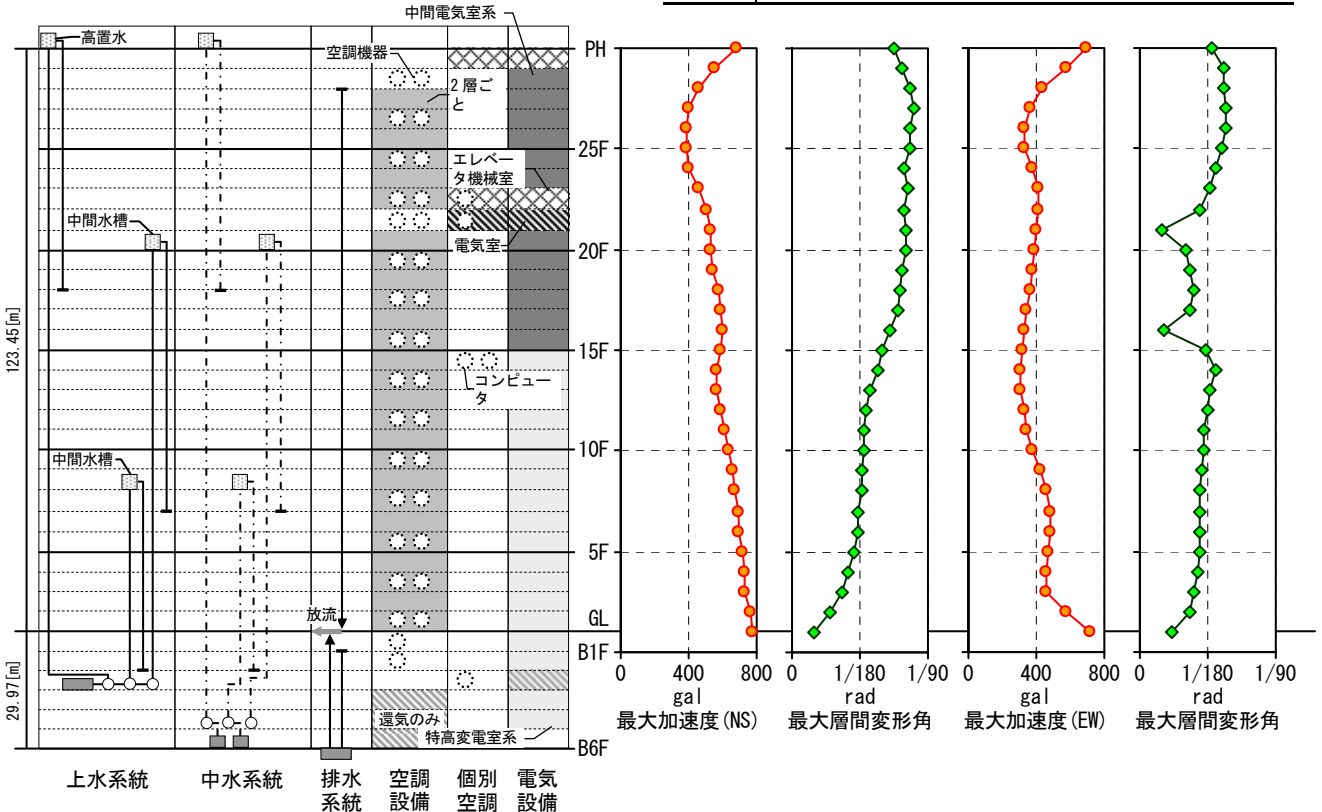


図 20 建築設備機器・系統(左)と応答解析結果(右)の比較

表6 設備の概要(給水, ガス, 電源)

	概要
給水	上水は 100A で引込み B3F にて貯水, 中水は 65A で引込み B6F にて貯水した後, 上水, 中水共に揚水し重力給水方式を用い給水
ガス	都市ガスを低圧 80A で引込み厨房へ供給 都市ガスを中圧 200A で引込み DHC へ供給
電源	スポットネットワーク方式: 22[kV]3 回線引込み 自家発電装置: 定格出力 1,500[kVA]

5.3 新宿キャンパスの建築設備の被害予測

5.1で整理した過去の地震被害およびキャンパスの建築設備の実態調査結果を参考とし、4章の首都圏直下地震(内閣府モデル)による応答解析結果と建築設備機器・系統の比較を通して、生命・生活環境の維持

表7 設備被害の予測結果

	給排水衛生設備
加速度	・塔屋, 8F(NS 方向)で 700[gal]前後の最大加速度が予測され、高置・中間水槽の天板・側板破損や移動、配管取付け部の破損の危険性がある
層間変形	・NS 方向で 1/100 前後の最大層間変形が予測された 28F～19F の給水, 揚水, 排水管の接合部で破損する危険性がある
	空調設備
加速度	・25F 以下の階では加速度(NS 方向)が増大傾向にあり、空調機の移動・転倒や冷水, 蒸気配管が破損する危険性がある ・個別空調されている中間電気室, コンピュータ機械室でも冷水管の破損で漏水し、機能喪失に陥る危険性がある ・天井の破損・落下による吹出, 吸込口のずれ・落下
層間変形	・28F～15F は 1/100 程度の最大層間変形が予測され、冷水, 蒸気配管の床貫通部で配管接合部が破損する危険性がある
	電気設備
加速度	・高層棟用(29F)のエレベータ機械室で最大加速度が 550[gal]前後と予測され、制御盤の移動・転倒の危険性がある ・照明器具の落下
層間変形	・ケーブルラックの破損

に最低限必要だと考えられる給排水衛生設備・空調設備・電気設備の被害を予測した(図20, 表7)。

加速度に起因する機器は移動・転倒による機能喪失と配管取付け部の破損, 層間変形に起因する立て配管は, 床貫通部で接合部が破損する恐れがある。また, これら被害は漏水を併発し, 二次災害が波及する危険性があるため個別の被害がシステム全体の機能喪失につながる事が考えられる。

5.4 建築設備の地震防災対策の検討

SWOT分析¹⁴⁾を用いて, 新宿キャンパスの建築設備の地震防災対策を検討した(表8)。その結果, 建築設備の問題点や本研究が取り組むべき課題, 震災対応の一部が明らかになった。

新宿キャンパスでは, 地震リスク及び耐震性能の評価に基づく費用対効果を考慮した建築設備における投資計画の立案や主要インフラ設備の供給優先順位, 方法を考慮した建物の利用方針の確立により, 事前対策におけるコスト, 運営停止による利益損失の低減が期待できる。また, 震災対応体制の整備, 地震防災マニュアルの充実が滞在者の混乱の回避, 生命維持につながり, ボランティア活動等の地域貢献も可能となると考える。今後は建物の利用方針や震災対応を考慮し, 調査, 分析方法を検討した上で, 地震リスク及び耐震性能の評価を行っていく。

表8 SWOT 分析結果

	機会(Opportunity)	脅威(Threat)
強み (Strength)	・受水槽に対する耐震補強と地震防災対策(緊急遮断弁, 蛇口の設置)の計画・実施による生活水源の確保 ・情報(安否確認, 被災情報)収集・提供システムの構築	・震災直後K建物内の被害を調査し, 供給の是非を判断する専門家の選出とシステムの構築 ・主要インフラ設備による供給優先順位, 方法を考慮した建物の利用方針の確立
弱み (Weakness)	・地震リスク及び耐震性能の評価に基づく費用対効果を考慮した建築設備における投資計画の立案 ・エレベータ(縦方向の動線)の機能喪失を想定した避難計画の立案と地震防災対策の実施	・高置・中間水槽の耐震補強と空調機器の据付(頂部支持)強化 ・配管, ダクトの支持・固定の強化 ・コンピュータ機器の据付強化とブレース補強を考慮した配置計画の検討

6. 緊急地震速報・リアルタイム地震防災技術の利活用

防災科学技術研究所から受信している緊急地震速報¹⁵⁾と, リアルタイム地震観測システム(大学棟とSTECビルに今年度整備予定)を活用した地震防災対策に関して, エレベータでの閉じ込め防止対策を中心に調査検討を行った。なお, キャンパスには地震感知器による制御機能を持つエレベータが11台ある。

6.1 エレベータでの閉じ込め防止対策の検討

高層建築においてエレベータは重要な動線となるが, 2005年千葉県北西部地震等にみられるように, 地震時にはエレベータでの閉じ込め被害が多数発生することが想定される。新宿キャンパスには, 高層用・中層用・低層用・非常用エレベータの4種類のエレベ

ータがあり, このうち, 低層用・非常用にはP波センサーとS波センサーが設置されており, 高層用・中層用には, 波動エネルギーセンサーとS波センサーが設置されている(表9)。各エレベータにおける地震感知器での設定値から, エレベータの停止フローは図22のようになっている。

緊急地震速報を活用したエレベータでの閉じ込め対策として, 現在受信している緊急地震速報の信号を現在設定されているエレベータの停止フローで「特低」(P波センサーのみで検知し, 最寄階に一定時間停止し自動復旧するフロー)が感知した条件の時に送り, 地震波が到達する前にエレベータを停止させ, 一定時間運休させる予定である。このことにより, 主要動が到達する前に停止することで, エレベータによる閉じ込めを軽減できると考えられる。また現在P波センサーの設置されていないエレベータに対し, リアルタイム地震観測システムで得られたP波の情報を利用し, 緊急地震速報と同様にエレベータを停止する予定である。また, 長周期地震動に対しても影響が予想された場合, 同様の方法で, 長周期地震動が到達する前にエレベータを停止し, 閉じ込めやエレベータのケーブル類への被害を軽減する予定である。さらにパニック防止やエレベータの停止状況を知らせるため, 緊急地震速報により大学に在中している人やエレベータの利用者に対するアナウンスの内容も検討している。

表9 新宿キャンパスのエレベータの概要

エレベータ	特低 P波センサー	低 S波センサー	高 S波センサー	その他
高層用	なし	ベントハウスで80gal	ベントハウスで120gal	波動エネルギー
中層用	なし	ベントハウスで80gal	ベントハウスで120gal	センサー(kine・cm)
低層用	ビットで5gal	8階で150gal	なし	
非常用	ビットで5gal	ベントハウスで40gal	ベントハウスで80gal	

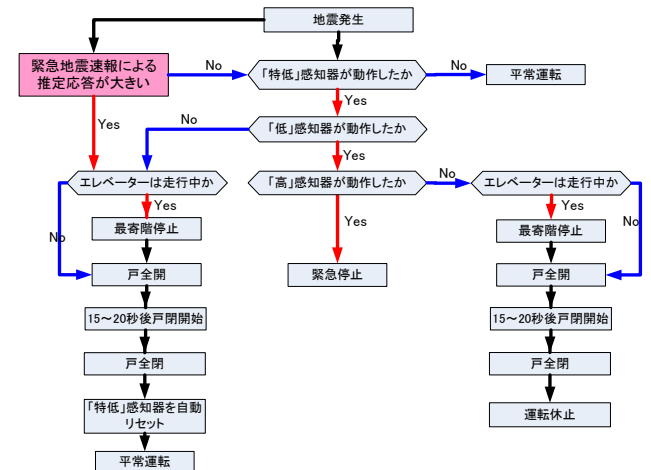


図21 エレベータの停止フロー

6.2 長周期地震動を対象とした緊急地震速報の利用

防災科学技術研究所提供の緊急地震速報は, 主に短周期地震動を対象に利活用法が検討されているものであるが, 超高層建築物では短周期地震動のみならず, 長周期地震動についても影響を受ける恐れがある。

そこで, 堆積層表面波による長周期地震動の到達予

想時間とその大きさを検討するため、工学院大学とK-Net¹⁶⁾(TKY007新宿)で観測された地震観測記録、観測防災科学技術研究所の緊急地震速報から得られたP波、S波の到達時間について比較検討を行い、さらに長周期地震動の到達時間を確認した(図22、表1)．代表例として中越地震(地震発生時刻17:56:00)での観測記録を図23に示し、図中の黒線がK-Net、赤線が工学院大学の記録を示す．また図中の時間は地震発生からの経過時間を示す．図24は工学院大学の29階(最上階)における変位記録を示す．これらの図において、緊急地震速報では、到達予測時間がP波で29.47秒、S波で51.36秒となっており、実際の観測記録と近い結果になっていることがわかる．表面波に関しては、地震発生後93秒後に到達し、125秒後に最上階で最大応答となっていることから、長周期地震動への対策を行う上で十分な時間的な猶予があるものと考えられる．今後、閉じこめ対策に加え、緊急時対応への活用も検討していく．また、理論的グリーン関数などを用いて長周期地震動の到達予測時間とその大きさに関するデータベースを構築しておき、地震後に速やかに予測できる仕組みを構築していく．

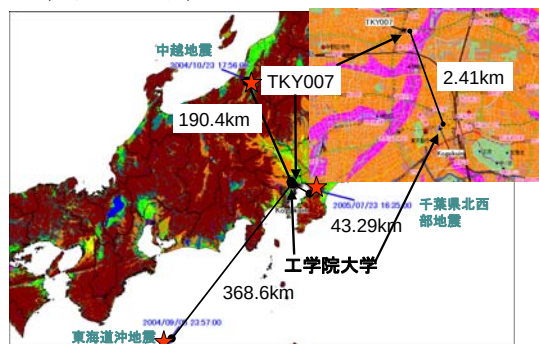
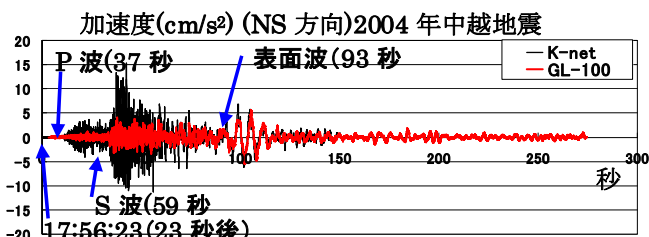


図22 対象地震の震源位置と観測点

表10 検討対象とした地震の緒元

Date	Longitude	Latitude	Depth (km)	Mw
2004年9月5日	137.1	33.2	11	7.5
2004年10月23日	138.8	37.3	5	6.6
2005年7月23日	140.2	35.5	68	5.9



到達予測時間: P波=29.47s S波=51.36s

図23 P波とS波の到達時間(中越地震での観測記録)

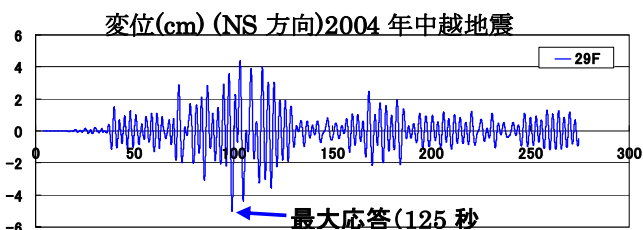


図24 新宿キャンパス29階における変位記録

7. 緊急時対応体制の構築・マニュアル整備

大規模地震が発生した場合、新宿キャンパスでは構造・設備等の被害に加え、エレベータ内の閉じ込めへの対応、高層階の負傷者の救出・救護・搬送、学生・教職員の帰宅困難対策、新宿駅周辺の滞留者への対応・受け入れ等の様々な問題の発生が予想される．そこで、新宿キャンパスを対象に緊急時対応の現状課題と対策、緊急時対応体制の構築に向けた検討を行った．

7.1 緊急時対応の現状課題とその対策の検討

大規模地震時には直後から様々な緊急時対応が求められるが、特に新宿キャンパスには多くの課題が存在する．例えば、2006年度学部生・大学院生履修者名簿(教務課・大学院課提供)および職員の勤務状況等を基に前後期講義時間帯別・フロア別に在館者数を大まかに算出してみると、最大で約2200人の学生・教職員(前期木曜日6限; 18時~19時30分)が中層階を中心に高層階にも広く分布していることがわかる(図25)．大規模地震がこの時間帯に発生し、非常放送設備の破損等により適切な避難誘導ができなかった場合、高層階から低層階にかけての各フロアではパニックによる一斉避難が始まり、非常階段には1階へと避難する学生等が殺到する．中層階から低層階にかけては転倒事故による死者・負傷者の発生といった二次災害が多発し、さらにそれが校舎内の縦の移動に障害をもたらす、情報収集活動や、高層階で多数発生するであろう、負傷者や閉じこめ者の応急救助救護活動などに多大な影響を与えることは容易に想像できる．しかし、こうした状況を想定した誘導情報の発信や誘導方法、全館避難への対応などは十分に検討されていない．

一方、非常放送設備が利用でき、現行マニュアル通りに2200人もの避難者を1階の避難階へ誘導したとすると、避難階が約1200㎡しかないために避難者で混乱状態となり、それに加えて安否確認や情報収集などの明確なルールがない中では迅速な応急対応活動は難しい．

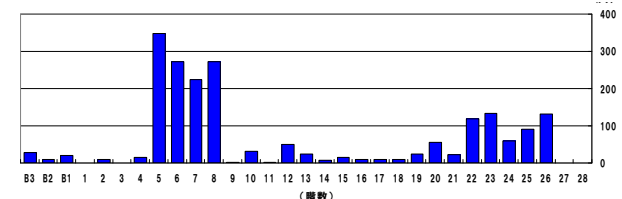
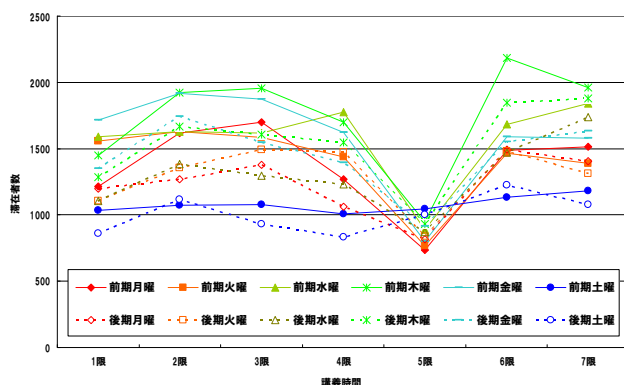


図25 講義時間帯別(上)と前期木6限目7限別(下)の在館者数

さらに、都心に位置した立地条件から在館者の殆どが帰宅困難となることも想定される。学部生・大学院生の居住地住所データ（教務課・大学院課提供）を基に、アドレスマッチングが可能であった5085人（新宿：2651人、八王子：2434人）について居住地の分布状況をみた。その結果、新宿キャンパスでは帰宅困難とされる20km以上に居住している学生が約6割いることがわかった（八王子では約5割）。また、学生の居住地分布と東京湾北部地震を想定した震度分布^{注1)}の関係をみると（図26）、新宿キャンパスから20km以内に居住する学生全てが震度5強以上のエリアに含まれ、さらに10km以内に居住する学生は震度6弱のエリアに集中していることから、一般に帰宅可能とされる学生についても自宅が大きく被災している可能性が高い^{注2)}。こうした状況を考えると、直後からある程度の期間を想定し、帰宅困難または被災した約2200人の学生・教職員に対する収容スペースや食料・水・トイレなどの備蓄の確保、空調設備が機能しない中での暑さ・寒さ対策が必要となるが、現状では十分とはいえない。同様に直後からの主な緊急時対応について現状の課題を整理し、それらの対策案も検討した（表11）。

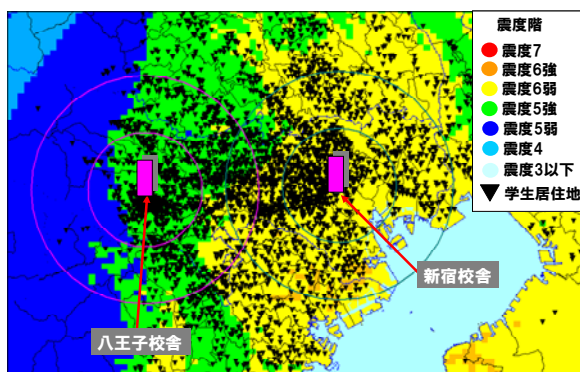


図 26 学生居住地の分布と震度分布の関係

表 11 緊急時対応の現状課題と対策案（一部抜粋）

○教職員の召集・対策本部の設置	
課題	- 本部の設置場所の妥当性（STEC 地下1階の防災センター） - 災害時の意思決定に関する経験や知識がないメンバーの召集方法や召集ルールが決まっていない - 指揮系統、役割分担、代行・交代のルールが明確でない など
対策案	- 本部として機能しやすい場所を選定し、本部設置に必要な道具を持ち出しやすいところに準備しておく - 学内の意思決定者を緊急対応組織の意思決定者に出し、トップダウンの組織を構築する - 各役割に代行及び交代のルールを設ける - 防災に関するスペシャリストを組織のアドバイザーとして配置する - 緊急対応組織の担当者は定期的に集まり、意志決定などの訓練や災害・危機管理に関する知識の共有を行う（→八王子キャンパス・STEC 街区との連携が必要） - メンバーの召集方法、召集ルール、運営ルールの決定 - 対応組織の担当者の家族に対する配慮を十分検討する など
○避難、避難誘導	
課題	- 自己判断で安全な方向へ避難。奇数階・偶数階に分けて避難 - 一斉避難した場合、非常階段が狭く、パニックの恐れ - 避難階（1階は約1200㎡）に避難者全員が入れ切れない - 研究室等の閉じ込め者や逃げ遅れた人などの把握が困難 - 負傷者の発生、運搬 など
対策案	- 学内および各フロアの被害状況や各フロアの人数などの迅速な把握、それを踏まえた適切な避難誘導方法の構築 →効率的な被害情報等収集方法、ICタグの活用、避難シミュレーション活用による事前対策 など

○教職員・学生の安否確認	
課題	- 通信網の輻輳や混乱で電話が使用できない - 確認に関するルールがないし、連絡網も持ち歩いていない - 在館者名等や在館者数の把握ができない - 父母や家族等へ安否を伝達する手段がない など
対策案	- 災害時のコンタクトポイントを離れた場所に用意しておき、伝言掲示板等により安否情報を共有できるようにする - 誰に連絡するかなどをポケットマニュアルにし、持ち歩き、通信方法も複数明記しておく（電話、email など） - ICタグ付き学生証を活用、来校者には訪問カードなどを所持してもらい、常時在館者数を把握できる体制を整えておく - 安否確認名簿を紙で用意し、緊急時持ち出せるようにする - 教職員の家族も含めた安否確認を行う - 父母や家族へ安否情報を提供する仕組みが必要 - 工学院大学学園ポータルシステム、K.mailer（W.mailerの携帯電話版）への安否確認機能の追加 など
○帰宅困難者対策、教職員・学生の帰宅支援	
課題	- 備蓄品などの蓄えが足りなく、待機スペースも限られている - 女性に配慮した備蓄品が圧倒的に不足 - 学生や教職員の帰宅可能・不可能の見極めの判断を誰がどのように行うか決まっていない - 帰宅困難者に対する対策が不十分（居住地の被災状況が把握方法、宿泊方法、組織化と治安維持、食料・毛布等配布等） - 周辺の一般市民の受入れに対するルールがない（公開空地、アトリウム、STECとの連携） など
対策案	- 帰宅困難者対策、帰宅支援物資の準備、周辺からの受け入れ体制などを事前に整備しておく - 事前に帰宅困難者数とその属性（一人暮らし、男女など）を把握しておき、適切に帰宅と待機を指示する - 特に女性の帰宅は慎重に行う - 公共情報を平等に配信し、また被害推定を行い、被害の様相を把握しておく - 授業などで個人用の帰宅マップを作成し、ポケットマニュアルに取り入れる など

7.2 緊急時対応体制の構築

阪神・淡路大震災の被害状況と対応の組織体制や個人および組織、地域社会の活動・行動を整理するとともに、職員を対象に初動期における大学機関・組織・家族への対応などの問題点の洗い出しを目的としたブレインストーミング（2007年4月17日16時～18時、参加者20名）を実施し（写真1）、本学の緊急時対応体制の構築に向けた課題と基本方針を検討した。そのうえで、本学の平時の業務体制をベースとして、緊急地震速報・リアルタイム地震観測システムを活用した地震発生直後の主要動到着前の対応から、緊急初動対応（発災から1時間程度）、災害対策本部の設置および緊急対応（発災後1時間程度～数時間程度）、応急対応（発災後数時間程度～数日程度）、復旧・復興（発災後数日程度以降）に至る体制案を構築した（図27）。

さらに、構築した体制案を検証するため、首都直下地震（東京湾北部地震、M7.3）が前期木曜日6限目（在館者最大約2200人）に発生したという想定のもと、図上演習訓練を行った（2007年7月27日13時～16時30分）（写真2）。時間の都合上、訓練は緊急対応期のみを想定したものとした。訓練には理事長・学長・常務理事など28名が参加し、災害対策本部設置から、在館者への対応、緊急医療活動・搬送、救護活動、不明者搜索活動、救出活動、周辺からの流入者対応等に関わる様々な情報の収集・トリアージ・分析および意思決定を行いつつ、体制案の問題点の洗い出しと、災害対策本部（理事長、学長、常務理事、職員）が行うべき状況判断と役割行動の確認、緊急対応上の課題の把握な

どを行った。現在、図上訓練で得た課題解決を図りつつ、「学生と教職員の安全の確保」「大学の被害の最小限化と速やかな大学機能の復旧・復興」「教育研究機関としての社会・地域貢献（専門的知識、ボランティア、情報発信など）」の緊急時対応の基本方針に基づき、理事長・学長・常務理事をはじめとした全学の学生・教職員の参加・協働による発災対応型の実践的な防災訓練の企画・実施に向け準備を進めている（実施日時：2007年12月6日15時30分～18時）。

今年度は、図上演習訓練・防災訓練の結果に基づき各種対応マニュアル（学生、教職員、災害対策本部）の整備を進めるとともに、ICTを活用した学生・教職員の安否確認・帰宅困難者支援システム・被害情報等収集共有システムの改良を進めていく。



写真1 ブレインストーミングの様子



写真2 図上訓練の様子(左)とホワイトボードでの情報共有(右)

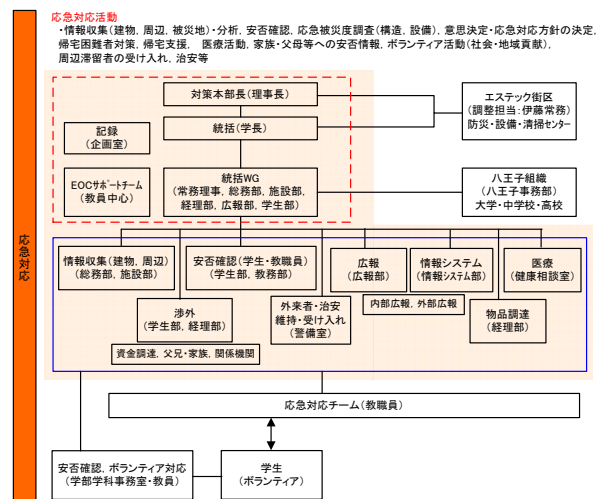


図27 緊急時対応体制の例(応急対応期)

8. 街区・地域住民・自治体との連携・復旧復興対策

緊急時対応の基本方針の1つとした「教育研究機関としての社会・地域貢献（専門的知識、ボランティア、情報発信など）」の体制整備のため、現在、新宿区長室危機管理課、東京都総務局総合防災部、東京都都市整備局、首都大学東京などと連携しながら、以下の取り組みを進めているところである。

①新宿区若松地区地域防災訓練の協力・実施(写真3)

実施日時：2007年9月2日7時30分～11時

実施機関：工学院大学、新宿区長室危機管理課・若松町特別出張所、東戸山小学校避難所運営管理協議会（訓練参加者1039名）、富久小学校・小石川工業高校合同避難所運営管理協議会（訓練参加者193名）



写真3 防災訓練の様子(左：地域点検、右：情報集約)

②新宿駅周辺滞留者(約16万人)対策訓練協議会への参加、滞留者誘導訓練の協力

実施日時：2008年1月25日(時間は未定)

実施機関：東京都総務局総合防災部、新宿区長室危機管理課、工学院大学(事業所等専門部会長：久田)

③都市復興模擬訓練への参加・協力

実施日時：2007年6月22日・7月12日・8月10日・9月5日・10月5日・12月21日

実施機関：東京都都市整備局、首都大学東京(中林)、工学院大学

謝辞

本報告は、首都圏にある超高層キャンパスの地震防災に関する研究(その1～8)(日本建築学会大会学術講演会、2007年8月、福岡大学)を参考にとりまとめたものであり、文部科学省の学術フロント事業「工学院大学地震防災・環境研究センター」・教育研究装置「長周期地震動を対象とした超高層建築のリアルタイム地震観測システム」、国土交通省の建設技術研究開発助成「首都圏震災時における帰宅困難者・ボランティアと地域住民・自治体との協働による減災研究」による研究助成により行われました。また防災科学技術研究所の地震ハザードステーションJ-SHISの地震動予測地図データ、また観測・震源データとしてK-NET・F-NET¹⁶⁾を使用いたしました。

補注

- 1) 司・翠川式により地震動を予測した。なお、地盤データは地震調査推進本部のものを使用した。また首都圏直下地震(第12回の報告書)の結果を参考に東京湾北部地震のパラメータを与えた。
- 2) 気象庁の震度階級の説明表を参考とした。

参考文献

- 1) 久田嘉章：成層地盤における正規モード解及びグリーン関数の効率的な計算法、日本建築学会構造系論文集、第501号、pp.49-56、1997
- 2) Bielak, J., K. Loukakis, Y. Hisada, and C. Yoshimura: Bull. of the Seism. Soc. of America, Vol. 93, No. 2, pp. 817-824, 2003
- 3) 山中浩明・山田伸之：微動アレイ観測による関東平野の3次元S波速度構造モデルの構築、物理探査、55、53-65、2002
- 4) 中央防災会議：東海地震に関する専門調査会、第7回、2001
- 5) 中央防災会議：首都直下地震対策専門調査会、第12回、溝上委員説明資料2-2
- 6) 久田嘉章、第12回日本地震工学会シンポジウム、2006年
- 7) Wald, D. 他: Bull. Seism. Soc. Am., V. 86, pp. 49-70, 1996
- 8) Sato, T., R. et al.: Bull. Seism. Soc. Am., 89, 3, pp. 579-607, 1999
- 9) 日本機械学会：阪神・淡路大震災での機械設備の被害調査写真集
- 10) 鹿島建設(株)：平成7年兵庫県南部地震被害調査報告書(第二報)
- 11) 空気調和・衛生工学会：空気調和・衛生工学、第70巻第10号、1996
- 12) 日本建築学会：2004年10月23日新潟県中越地震災害調査報告書
- 13) 給排水設備研究会：給排水設備研究/2005、第22巻、第3号
- 14) グローバルタスクフォース(株)：通勤大学MBA7「ストラテジー」
- 15) 山本俊六他：DVB衛星通信を利用した即時地震情報の配信・受信システム、地震 第2輯、第58巻、71-76頁、2005
- 16) K-Net <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>
F-Net <http://www.fnet.bosai.go.jp/freesia/index-j.html>