# 地震時の構造損傷と室内被害のモニタリングに関する実証的研究

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、東北から関東にかけての広い地域で甚大な被害を被った。被災後に行われる応急危険度判定も長期間にわたることとなり、かつてない広域災害であったため課題も浮き彫りになった。この対応策の一つとして構造ヘルスモニタリング技術による被災度判定が注目されている。また、首都圏では構造に関わる被害は少なかったが、大勢の滞留者・帰宅困難者により混乱し、首都機能の維持に支障をきたした。このため、都心の高層建物や大規模集客施設などの重要建物では、高い耐震性だけでなく、被災直後の建物内の状況を速やかに把握することが求められている。

一方で、持続可能な社会の実現に向けて、建物の長寿 命化も推し進められている。そのために行われる建物診 断においても、長期に渡る構造ヘルスモニタリングの記 録は有効な資料となると考えられる。

そこで、本論では建築構造や室内に関する多様なモニ タリング技術の検討・開発を行い、その有用性と課題を 明らかにすることを目的とする。概要を以下に示す。

第2章では、建物規模や構造種別などが様々に異なる 複数の中低層建物を対象に、応答増幅や入力損失効果等 の地震時の応答特性を把握し、固有振動数や減衰定数な どの振動パラメータの長期に渡る変化や振幅による変化 を捉える。

第3章では、特徴的な形状を有する超高層建物につい て常時微動計測、自由振動実験を行うとともに、継続的 に行われている強震観測で得られた地震記録についても 併せて分析を行い、その振動性状の把握を行う。また、 設計値や竣工時に行われた計測結果との比較を行う。

第4章では、地震時の室内状況を効果的に捉える360 度カメラと強震計の連動によるモニタリングシステムを 構築し、Eディフェンス実大震動台実験において床応答 と家具の挙動の関係を検討する。また、ゲームなどに用 いられる物体挙動のシミュレーションソフトを活用し、 実験結果との整合に基づいた摩擦係数などのパラメータ

設定を通じて、室内状況の予 測とリアリティの高い表示の 可能性を検討する。

2.長期の強震観測に基づく
 中低層建物の応答分析
 2.1対象建物及び観測体制の
 概要

本章で分析を行う建物は、 名古屋大学東山キャンパス、 鶴舞キャンパス構内に立地す る11棟の中低層建物である。 表1に建物概要、図1に建物 の概形と強震計配置を示す。 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 飛田研究室 松下 卓矢

# 2.2 経年変化

図2に各建物の基礎固定系(Top/(1F+Hθ))、スウェ イ固定系(Top/1F)、地盤・建物連成系(Top/GL)の固 有振動数の経年変化の様子を示す。なお、図中の緑線は 竣工年を示している。

一般に、経年変化による固有振動数の低下が指摘され ており、本論で対象としている建物でも同様の傾向が確 認できる。竣工年が比較的新しい建物①、④、⑧、 ①に着目して竣工直後からの固有振動数の変化を比較す ると、PC 造(建物①、④)は竣工後からほとんど変化 していないのに対して、S 造(建物①)では竣工直後に 一時的に減少し、その後は安定している。また、SRC 造、 S 造の混構造である建物⑧、RC 造(建物⑨)では竣工 後から現在にかけて継続的に固有振動数は減少している。 固有振動数の変化には材料の剛性の変化や引越しに伴う 積載荷重の増加などが原因として挙げられる。PC 造で は躯体そのものの重量が大きいため、積載荷重の影響を あまり受けないのに加え、予め成形された部材を現場で 圧着するのみなので材料の剛性の変化もあまり大きくな



b) 断面図 図1 建物の概形と強震計配置 <sup>建物の概要</sup>

					-	£ 100 00	11/m 54						
)	建物No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	構造種別		PC造	SRC造	RC造	PC造	SRC造	RC造	SRC造(免震	社:SRC,梁:S	RC造	RC造(免震	) S造
	[]比米佐	地上	7階	10階	4階	7階	6階	3階	7階	7階	5階	4階	10階
	PE 5X	地下	1階	1階	-	-	-	-	2階	-	1階	-	1階
	軒高		29.7m	39.3m	17.9m	32.5m	22.3m	12.5m	33.2m	31.3m	22.0m	20.0m	41.1m
	建築面積		$852m^2$	$1501 \mathrm{m}^2$	$1155 \mathrm{m}^2$	$1525m^2$	$604m^2$	$374m^2$	$5911 \text{m}^2$	$529m^2$	$1416m^2$	$5100 \mathrm{m}^2$	$987m^2$
)		桁行	ラーメン	耐震壁 ラーメン	耐震壁 ラーメン	ラーメン	耐震壁 ラーメン	耐震壁 ラーメン	耐震壁 ラーメン	ラーメン	ラーメン	ラーメン	ラーメン
	骨組形式	梁間	耐震壁 ラーメン	耐震壁 ラーメン	耐震壁 ラーメン	ラーメン	耐震壁 ラーメン	耐震壁 ラーメン	耐震壁 ラーメン	耐震壁 ラーメン	耐震壁 ラーメン	ラーメン	ラーメン
	基礎・杭種別		PHC杭	PHC杭	RC杭	直接基礎	PC杭	直接基礎	場所打ち杭	PHC杭	PHC杭	直接基礎	昜所打ち枋
	杭長		36m	48m	6m		12m		40.85m	23m	24m		41.7m
-	根入れ		GL-4.1m	GL-2.5m	GL-0m	GL-2.6m	GL-2.2m	GL-1.4m	GL-16.8m	GL-3.8m	GL-3.5m	GL-3.7m	GL-7.3m
	<ul> <li>地盤・建物連成</li> <li>玄 田右垢動</li> </ul>	桁行	2.52 Hz	1.87 Hz	4.77 Hz	1.70 Hz	4.44 Hz	5.05 Hz	1.31 Hz	2.82Hz	3.77Hz	2.01 Hz	0.94Hz
C	粉	梁間	2.37 Hz	1.79 Hz	4.42Hz	1.66 Hz	3.75 Hz	$5.90 \mathrm{Hz}$	1.28 Hz	2.70Hz	3.52 Hz	2.27Hz	0.94 Hz
7	平均Vs		280 m/s	220 m/s	244m/s	228m/s	302 m/s	302 m/s	228m/s	250 m/s	$250 \mathrm{m/s}$	228m/s	$250 \mathrm{m/s}$
•	地震記録数		344	61	74	44	89	55	84	164	164	64	164
	竣工年		2003	1995	1963	2003	1982	1979	2003	2005	2005	2007	2000
	観測期間		$2004.5 {\sim}$	$1996.10 \sim$	$1996.10{\sim}2009.8$	$2008.4 {\sim}$	$1999.3 \sim$	$2000.3 \sim$	$2005.6 \sim$	$2004.7 \sim$	$2004.7{\sim}$	$2009.2 \sim$	2004.7 ~

いため、固有振動数の変化は小さいものと考えられる。 S 造では躯体の重量が比較的小さいため、積載荷重の影響を強く受けて竣工直後に大きく変化するが、材料の変 化は小さいため積載荷重の変化がなくなると固有振動数 の変化は小さくなると考えられる。SRC 造、RC 造では 材料の剛性の変化が大きいことが、固有振動数の変化の 大きな原因であると考えられる。SRC 造(建物②、⑤、 ⑧)、RC 造(建物③、⑥、⑨)の同じ構造種別の建物に 着目すると、竣工年が古い建物③、⑤、⑥では竣工年が 新しい建物②、⑧、⑨と比較して固有振動数の変化幅が 小さいことが確認できる。

# 2.3 振幅依存性

図 3 に各建物の基礎固定系(Top/(1F+H*θ*))、スウェ イ固定系(Top/1F)、地盤・建物連成系(Top/GL)の固



有振動数の振幅依存性を示す。

固有振動数については、PC 造の建物①、④及びS 造 の建物①に比べてSRC造の建物②、⑤の方が低下の割合 が大きいなど、構造種別ごとに特徴が見られた。本論で 扱った建物での最大層間変形角は約1/1000 rad. であり、 損傷を伴うような地震は経験していない。しかしながら、 RC 建物などでは損傷を伴わない範囲でも固有振動数が 約2割程度変動することは有り得るということが確認で きる。実大振動台を用いた損傷を伴う振動実験ではRC 造、PC造4階建ての試験体が最大層間変形角1/20 rad. 程度の加振終了後に固有振動数がともに約5割低下して おり、損傷時のRC造、PC造建物の固有振動数の変化 幅はかなり大きい<sup>1)</sup>。PC造の建物では小振幅時の固有振 動数の変化は小さいため、固有振動数の振幅依存性を基

> にした構造ヘルスモニタリングは 有効であると考えられる。一方で、 RC 造では小振幅時でも固有振動 数の変化が大きいため、損傷の特 定は困難である可能性が高い。S 造では 10%弱しか低下しておら ず、実大振動台実験においても梁 の損傷を伴う加振を受けた際に、 微小振幅のホワイトノイズ加振と 比較して固有振動数の低下は約 12%に留まっているため<sup>20</sup>、強震 観測による固有振動数の低下に着 目した構造ヘルスモニタリングで は、損傷を検知することは難しい ことが示唆される。

# 3. 振動実験及び強震観測に基づ く高層建物の応答分析

#### 3.1 対象建物及び観測の概要

図4に対象建物の平面図、立面 図と観測点配置を示す。ねじれた 外形を持つが、楕円形のコアは直 立している。このコアについて長 軸・短軸方向と呼ぶ。主に常時微 動計測と強制加振実験を行った。 強制加振実験は人力加振と AMD 加振を行っており、加振振動数は 常時微動計測の結果に基づいた。 表2に加振項目を示す。また、対 象建物では継続的に強震観測を行 っており、得られた地震記録につ いても分析を行う。

## 3.2 常時微動記録の分析

常時微動計測で得られた塔屋 1 階と地下3階の速度フーリエスペ クトルを図5に示す。長軸方向、 短軸方向ともに低振動数域に多く のピークが確認できる。スペクト ルのピーク幅が狭く、減衰が非常

に小さいことも分かる。また、上下方向のスペクトルの ピークが水平方向のピークと同じ振動数帯域に現れてい ることから、曲げ変形が卓越していることが確認できる。 地下3階の記録では、深部地盤の固有振動数に当たる 0.3Hz付近にピークが確認できるとともに、水平2方向 の固有振動数付近にロッキングのピークが励起されてい ることが確認できる。

表3に1次固有周期と減衰定数の設計値と、竣工時 (2008 年 3 月)の微動計測の推定値、本論での推定値 を示す。観測で得た固有周期は設計値とよく対応してい ること、竣工時と比較して僅かに長周期化していること が分かる。長軸方向は 2.3%、短軸方向は 1.7% 増加して おり、重量変化でもある程度は説明可能ではあるが、長 軸と短軸で変化量が異なること、東北地方太平洋沖地震 をはじめとする地震をある程度経験していることなどか ら、積載荷重の増加だけでなく部材の剛性の低下も影響 していると考えられる。

### 3.3 強制加振実験の分析

図6に強制加振時の自由振動波形と固有振動数及び対 数減衰率により計算した減衰定数の変化の1例を示す。

固有振動数に着目すると、加振終了直後に大きく減少 しており、自由振動中に徐々に回復している様子が確認 できる。これは、振幅依存性の影響であり、加振は微動 時の固有振動数で行っているが、実際は振幅が大きくな ると固有振動数が低下していることが分かる。これは減 衰定数についても同様で、加振終了直後に大きな値を示 し、その後自由振動中に徐々に減少している。しかし、 その変動幅は固有振動数と比較して僅かであり、振幅依 存性よりも風などの外乱に影響を受けていることも考え られる。

## 3.4 地震記録の分析

2012年12月17日に三陸沖で発生した地震の加速 度波形と建物屋上のフーリエスペクトルを図7に示す。 1 階の波形に対して最上階では応答が大きく増幅し、 継続時間が非常に長く

169

20.

# なっている。

微動計測、強制加振 実験、地震記録から推 定した固有振動数、減 衰定数と塔屋1階の最 大速度の関係を図8に 示す。地震記録から推







定値のばら

つきが大き

認できる。

存性による

変化は小さ

困難である

と考えられ

る。



# 4. 振動台実験に基づく地震時室内被災状況のモニタリング技術とシミュレーションの開発

## 4.1 振動台実験及びモニタリング体制の概要

試験体モデルの概要とセンサ配置を図9に示す。試験 体はコンクリートスラブと積層ゴムを用いて、鋼構造・ 高さ120m・地上30階相当の高層建物の揺れを再現した ものと、縮約層の上下階を鉄板で緊結し、5階建て程度 の中低層建物としたものの2種類が用いられ、3種類の 実験室が設けられている。地震時の室内状況を速やかに 把握するために室内全体を撮影できる360度カメラを実 験室2の中央に設置した。360度カメラの外観と、収録 した映像の円形のスナップショット及びそれを垂直面に 展開した例を写真1に示す。

# 4.2 モニタリング技術のシミュレーションへの利用

本研究では、表現力や操作性が高いゲーム開発などで 用いられるソフトウェア「Unity」を使用した。Unity は 家具の設置や移動、視点操作、入力波の設定が容易であ る。これにより、利用者が必要に応じて家具のレイアウ トや入力波を柔軟に変更することができ、様々なパター ンでのシミュレーションが可能になるため、具体的な分 析と実践的な防災対策への活用に繋がると考えられる。 視点の回転や前後の操作はマウスで感覚的に簡単に行う ことができるうえ、視点の操作は加振中でも行うことが できる。

本論では、実験時の室内被災の映像とシミュレーショ ンの映像を比較し、現実に近い挙動を示すよう質量や摩 擦係数などのパラメータの設定について詳しく検討を行 った。家具の材質と床材の組み合わせで予め摩擦係数を 計測しておき、現実に近い挙動を示すパラメータ値の記 録を蓄積することで、短時間でより精度のよいシミュレ ーションを行うことが可能であると考えられる。

## 4.3 シミュレーションの結果

実験時の映像とシミュレーション映像を対比して図 10 に示す。丸印で示す背の高いキャビネットが転倒し、 書籍が散乱している様子が確認できる。椅子の回転を伴 う移動や天井の落下等の再現までは至らなかったが、地 震時に危険な箇所を確認でき、家具固定の重要性を説明 可能なシミュレーションとなっている。

#### 5. まとめ

本論では、構造ヘルスモニタリングに関する知見を得 るため、中低層建物を対象とした長期に渡る強震観測に よる振動特性の変化や、超高層建物の振動実験による振



図9 試験体モデルの概要とセンサ配置

動挙動の分析を行った。E ディフェンス実験の損傷時の 固有振動数の変化とも比較を行い、RC 造や S 造、超高 層建物では地震時の固有振動数の変化を捉えることが困 難であろうこと、一方で PC 造ではこれが容易であろう ことを指摘した。

また、被災後の適切な初期対応のための室内状況のモ ニタリング体制を構築し、シミュレーションへの応用を 検討した。

#### 参考文献

長江拓也ほか:4階建て鉄筋コンクリート造建物を対象とした大型振動台実験、日本建築学会構造系論文集、台 76 巻、台 669 号、pp.1961-1970、2011.11

2) 飛田潤ほか: 普及型強震計による高層建物の応答特性と損傷

のモニタリング:日 本建築学会構造工 学論文集、Vol.56B、 pp.229-236、2010.3





写真1 360 度カメラの外観(上左)、 スナップショット(上右)、展開写真(下)



図10 実験時の映像(左)とシミュレーション(右)