論文 地震により損傷を受けた鉄筋コンクリート造超高層建築物の 振動同定

斉藤 大樹^{*1}·田中 修平^{*2}·森田 高市^{*3}

要旨:2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では,震源から離れた東京や大阪などの大都市にお いて超高層建築物が大きく揺れ,非構造部材のひび割れ等の軽微な損傷が報告されている。地震による建築 物の損傷程度を明らかにすることは,地震直後の避難の判断や建築物の修復計画の策定に必要である。本研 究では,東日本大震災で損傷を受けた鉄筋コンクリート造超高層建築物の強震記録を用いて,動的パラメー タの同定を行い,振動特性の変化から損傷を同定する方法の妥当性と多質点系モデルの解析精度および適切 な粘性減衰モデルの設定方法について検討した。

キーワード:東日本大震災,鉄筋コンクリート,超高層,振動特性,損傷同定,減衰モデル

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震(以 後 3.11 と称する)では,震源から離れた東京や大阪など の大都市において超高層建築物が大きく揺れ,エレベー タの停止や天井パネルの落下,スプリンクラーの損傷, コンクリート非構造部材のひび割れ等の軽微な損傷が報 告されている。

地震による建築物の損傷をいち早く同定することは, 地震直後の避難要否の判断に役立つとともに,損傷箇所 の修復や建物機能の復旧にも必要である。これまで,振 動計測記録から建築物の固有周期や減衰定数等の動的パ ラメータを同定し,それらを建築物の損傷判定に役立て る研究が行われている。濱本,森田,勅使河原¹⁾は,固 有振動数の変化から多層建築物の層損傷を検出する方法 を示し,5 層鋼製フレームの振動台実験結果に適用して いる。また,中村ら²⁾は,建築物の地震観測記録を用い てせん断型質点系構造物の層剛性と減衰を同定する方法 を提案し、免震構造の建築物に適用している。しかし、 実際に損傷を受けた超高層建築物の強震観測記録を用い て損傷を同定した研究はほとんどない。そこで,本研究 では,東日本大震災で被災した鉄筋コンクリート造超高 層建築物の強震観測記録を用いて動的パラメータの同定 を行い、その結果から建築物の損傷程度を明らかにする。

また,超高層建築物の構造設計では,一般に時刻歴応 答解析に質点系モデルが用いられるが,運動方程式にお ける減衰マトリクスの設定については,様々な方法があ り,どの方法が適切かは明らかではない。特に,大地震 による強震観測記録との比較により検証した研究はほと んどない。本研究では,多質点系モデルの解析精度およ び適切な粘性減衰モデルの設定方法についても検討する。 2. 強震観測記録に基づく動的パラメータ同定

2.1 解析対象建築物の概要

対象建築物は,東京都内に建設された地上37階,地下 1階,塔屋3階,軒高119mの鉄筋コンクリート造高層建 築物である。対象建築物には独立行政法人建築研究所に よって1階,18階,37階に強震計が設置されており2007 年5月から2011年5月までの間に,3.11を含む128個の 地震による強震観測記録が得られている。対象建築物の 強震計設置位置および平面図を図-1に示す。





2.2 動的パラメータの同定

1階と37階の強震観測記録から得られる伝達関数を平 滑化パーゼンウインドウ 0.03Hz により求め,ハーフパワ ー法を用いて各モードの動的パラメータ,固有振動数 f(Hz),固有周期 T(s),減衰定数 h(%)を同定した。図-2 および図-3 に,固有周期と減衰定数の同定結果を示す。 図の横軸は地震番号で,77番が3.11である。1次固有周 期は3.11 前後で約20%増加しており,既往の報告^{3),4)} と対応している。このことは,3.11によって建物部材が 損傷し,剛性が低下したことを意味しており,実際に地

- *1 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系 教授 工博(正会員)
- *2 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系 4年
- *3 独立行政法人建築研究所 国際地震工学センター 上席研究員 工博

震直後の調査で玄関周りや梁などに軽微なひび割れ等の 被害が観察されている⁵⁾。また,固有周期と比較して減 衰定数の数値には大きなばらつきが見られ,3.11以後に ばらつき程度が拡大している。また,表-1には,東北地 方太平洋沖地震以前および以後の各モードの固有振動数, 減衰定数の平均値を示す。動的パラメータは NS 方向と EW 方向で大きな差異は見られず,対象建築物では方向 依存性が少ないものと考えられる。



図-3 1次減衰定数の変化

モード数		NS7	方向	EW方向		
		3.11以前	3.11以後	3.11以前	3.11以後	
1	f(Hz)	0.524	0.437	0.528	0.431	
	T(s)	1.908	2.293	1.894	2.323	
	h (%)	3.040	4.520	2.967	4.503	
2	f(Hz)	1.625	1.368	1.642	1.354	
	T(s)	0.615	0.732	0.609	0.740	
	h (%)	1.468	2.136	1.480	2.262	
3	f(Hz)	2.896	2.453	2.931	2.417	
	T(s)	0.345	0.014	0.341	0.414	
	h (%)	1.030	1.283	1.265	1.132	

表-1 各次動的パラメータ

2.3 動的パラメータと加速度・変位の関係性

東西方向の観測記録について,同定された1次固有周 期・減衰定数と最上階の最大加速度の関係を表したもの を図-4 に示す。最上階の最大加速度と1次固有周期の間 には正の相関性があり,相関係数Rは3.11以前のデータ でR=0.746,3.11以後のデータでR=0.819であった。一 方,1次の減衰定数との相関性は小さく,3.11以前のデ ータでR=0.433 3.11以後のデータでR=0.348であった。

次に,同じ東西方向の観測記録について,1次固有周 期・減衰定数と最上階の最大変位との関係を表したもの を図-5に示す。最大変位と1次固有周期の間には強い正 の相関性があり,3.11以前のデータでR=0.722,3.11以 後のデータでR=0.878となり,加速度よりも相関性が大 きい。この理由として,最大変位は1次モードの影響が 大きく,従って1次の固有周期との相関が高くなったと 考えられる。一方,1次の減衰定数との相関性はやはり 小さく,3.11以前のデータでR=0.358,3.11以後のデー タでR=0.562であった。



3. 地震応答解析による対象建築物の地震時挙動の再現

3.1 解析モデルと解析手法

対象建築物を基礎固定の多質点せん断系モデルに置換 する。各せん断バネは、トリリニア型の復元力特性を持 つ修正武田モデルとし、折れ点の耐力や剛性および各質 点の質量は、構造設計において用いられた値をそのまま 使用した(図-6参照)。表-2に固有値解析により求めら れた固有周期を示す。1次固有周期は1.973秒で,3.11 以前の強震記録から同定された1次固有周期(南北方向 で1.908秒)にほぼ対応している。

地震応答解析に用いた数値積分法は、Newmark β 法に おいて β を 1/4 と設定した平均加速度法を用いた。減衰 マトリクスについては、初期剛性比例型減衰,瞬間剛性 比例型減衰,レーリー型減衰,モード別減衰,瞬間剛性 レーリー型減衰の5種類を使用した(図-6参照)。



表-2 固有值解析結果

図-6 解析モデル

3.2 地震応答解析に使用する強震観測データ

地震応答解析結果と強震観測結果を比較することで, どの減衰モデルを用いた解析結果が観測結果とよく適合 しているのかを検討した。解析に使用した強震観測デー タの概要を表-3に示す。ケース1は,震源が遠く,比較 的長周期成分を多く含む岩手県内陸地震である。ケース 2は,震源が近く,比較的短周期成分を多く含む東京湾 内発生の地震である。ケース3は対象建築物に損傷を発 生させた3.11の地震である。いずれも観測記録の東西方 向の成分を使用し,1階の観測加速度波形を基礎の入力 地動加速度とした。図-7に1階の観測記録の加速度応答 スペクトル(減衰定数5%)を示す。

表-3 地震波データ

			雪酒野難	是十加;	車 庉 (oal)
ケースNo.	発生日時	震源地	(km)	ew	ns
Case1	2008.6.14	岩手県内陸	386	3.70	4.30
Case2	2008.9.21	東京湾	25	5.10	8.80
Case3	2011.3.11	三陸沖	385	97.50	86.60
500.0 算速段破(cm/s ₇) 第 2.0 0.5	c	ase1	<u>case2</u>		<u></u>

図-7 各ケース1階加速度応答スペクトル(東西方向)

1.0

周期(s)

10.0

3.3 減衰モデルによる地震応答解析結果の比較

0.1

図-8から図-10に、それぞれのケースの地震について、 地震応答解析により得られた最大絶対加速度、層間変形 角の高さ方向の分布を示す。また、最大絶対加速度の図 には、強震観測より得られた1階、18階、37階の最大加 速度の値を×印で示す。なお、ケース1と2では建物の 応答はほぼ弾性範囲にあることから、瞬間剛性比例型お よび瞬間剛性レーリー型の結果は除いている。ケース1、 ケース2の解析結果においてはレーリー型減衰とモード 別減衰はほぼ同一の結果となり図-8および図-9のグラ フ上では重なって表示されている。ケース1およびケー ス2の層間変形角はケース3と比べ1/10~1/20程度の非 常に小さい変形である。

ケース1の地震では,初期剛性比例型減衰において18 階の強震観測記録との誤差が最も小さい。レーリー型減 衰およびモード別減衰では,ほぼ全層において初期剛性 比例型減衰よりも大きめの応答となり,37 階の強震観測 記録との誤差が小さい。これは,長周期成分を多く含む 地震波に対する応答では,低次モードが卓越することか ら,初期剛性比例型減衰の再現性が比較的よかったもの と考えられる。

一方,ケース2の地震では,18階,37階ともレーリ ー型減衰において強震観測記録との誤差が最も小さく, 初期剛性比例型減衰では過少に評価する結果となった。 これは,短周期地震波に対する応答では,高次モードを 励起させる成分が多いため,高次モードの減衰を設定で きるレーリー型減衰の精度が高くなったものと思われる。

ケース3の地震では,瞬間剛性比例型の結果は初期剛 性比例型の結果よりも大きな応答となり,最大応答加速 度は18 階で1.25 倍,層せん断力で1.60 倍,層間変形角 では2.25 倍程度の差が見られた。これは,建物の応答が 弾塑性領域に入り,剛性が低下したためである。特に, 瞬間剛性比例型の結果は,他の減衰モデルの結果よりも 層間変形角が大きく評価され,中間層で1/250 程度の値 になっている。





図-11 から図-13 には、ケース1から3のそれぞれの地 震に対して、最も再現性のよい減衰モデルを用いた場合 の37 階の絶対変位応答波形を強震観測記録と比較した ものである。ケース1、ケース2はレーリー型減衰、ケ ース3は瞬間剛性比例型である。解析値は比較的精度よ く観測記録を再現できている。

また,ケース3においては東西方向,南北方向の2方 向の観測記録を用いて地震応答解析を行った。図-14は, ケース3の地震(3.11)による地震応答解析によって得 られた1階,18階,37階の層せん断力-層間変形関係で ある。1階,18階では,復元力特性の第1折れ点を超え る変形が生じており,非構造部材のひび割れ等の損傷が 発生しているものと考えられる。また,南北方向よりも 東西方向の応答層間変形が大きくなっている。



図-14 地震波ケース3層間変形・層せん断力

4. 東北地方太平洋沖地震による建物の損傷度評価

4.1 損傷度の定義

対象建築物には,1階,18階および37階に強震計が 設置されていることから,18階と1階のスペクトル比か ら求まる卓越周期と37階と18階のスペクトル比から求 まる卓越周期をハーフパワー法により求め,3.11前後の 卓越周期の変化から損傷程度を把握することを試みる。

まず,地震応答解析により得られる層せん断力 - 層間 変形関係から,損傷度 *DMR*_{max} を初期剛性 k₁と最大応答 時の割線剛性 k_x との比率を用いて

$$DMR_{\rm max} = 1 - k_s / k_1 \tag{2}$$

と定義する。次に,卓越周期の変化と剛性の変化を対応 付けるため,観測記録に基づく損傷度 DMR_{obs}を 3.11 前 の卓越周期 T₁ と 3.11 後の卓越周期 T_s との比率を用いて

$$DMR_{obs} = 1 - (T_1 / T_s)^2$$
(1)

と定義する。

損傷度と損傷状態の関係は, 各層の復元力特性の初期 剛性 k₁ と降伏時剛性 k₁ から求まる損傷度

$$DMR_{v} = 1 - k_{v} / k_{1} \tag{3}$$

との大小関係より,表-4のように定義する。ここに,損 傷レベルをからの4段階とする。

表-4 損傷レベル

損傷レベル	損傷状態	損傷度		
	損傷なし	DMR < 0.05		
	ひび割れ	$0.05 < DMR < DMR_y$		
	中破	$DMR_y < DMR < 0.8$		
	大破	0.8 < DMR		

4.2 東北地方太平洋沖地震発生時の損傷度評価

ケース 3 の地震 (3.11) による地震応答解析から求め た各層の損傷率と損傷レベルを,方向別に表-5 と表-6 に示す。ここに,地震応答解析より得られた損傷度を上 層(19 階から 37 階)と下層(1 階から 18 階)で平均化 したものを *DMR_{ave}*とし,さらに,解析結果より得られ た 18 階と 37 階の絶対加速度応答波形のスペクトルから 卓越周期を求め,その 3.11 前後の変化率から求めた損傷 度を_T *DMR_{ana}*とする。

表-5 地震波ケース3(3.11)による南北方向の損傷度

階層		DMR _y	DMR	損傷レベル	DMR _{ave}	TDMR _{ana}	DMR _{obs}
上層	37F	0.506	0.000				
	35F	0.604	0.000		0.167	0.239	0.181
	30F	0.676	0.000				
	25F	0.687	0.392				
	20F	0.711	0.444				
下層	18F	0.703	0.437		0.378	0.376	0.365
	15F	0.713	0.452				
	10F	0.658	0.357				
	5F	0.671	0.346				
	1F	0.595	0.300				

表-6 地震波ケース3(3.11)による東西方向の損傷度

階層		DMR _y	DMR	損傷レベル	DMR _{ave}	TDMR _{ana}	DMR _{obs}
上層	37F	0.506	0.000		0.350	0.408	0.301
	35F	0.604	0.000				
	30F	0.676	0.508				
	25F	0.687	0.605				
	20F	0.711	0.637				
下層	18F	0.703	0.629		0.586	0.550	0.389
	15F	0.713	0.638				
	10F	0.658	0.570				
	5F	0.671	0.584				
	1F	0.595	0.510				

表-5と表-6の損傷レベルから、中層から下層において ひび割れ(損傷レベル)が生じていると考えられる。 また,強震観測から得られる卓越周期の変化率による損 傷度 DMR_{obs}は,地震応答解析から算出した損傷度 DMR_{ave} および_T DMR_{ana}と比較的よい対応を示してお り,下層の損傷度が大きいことや南北方向よりも東西方 向の損傷度が大きいことが共通している。このことから, 強震計を複数設置することで,その間の部位の損傷状態 を卓越周期の変化からある程度把握できることが,実際 に損傷を受けた超高層建築物の記録から確かめることが できた。

地震後に管理組合が行った被害調査によると,4 階から 30 階の中間階で住戸の玄関周りの仕上げコンクリートのひび割れや剥落等の軽微な被害が多く発生していることが報告されている⁵⁾。被害調査と表-5 および表-6 に示す損傷レベルを比較すると上層部では,実際の被害調査とほぼ一致する結果が得られた。また,下層部においても 1F 以外では,被害調査と適合する結果が得られた。

5. まとめ

東北地方太平洋沖地震(3.11)では,強震観測が実施 されている東京都内の37階建て鉄筋コンクリート造超 高層建築物に,非構造部材のひび割れ等の軽微な被害発 生した。実際に地震で損傷を受けた超高層建築物の強震 観測記録を分析した研究はほとんどないことから,本研 究では強震観測記録から損傷がどの程度把握できるのか を検討した。

まず,3.11 を含む 128 個の地震による強震観測記録か ら動的パラメータ(固有周期,減衰定数)の同定を行った。 その結果,固有周期,減衰定数ともに3.11後に増加して おり,特に1次固有周期は約20%の増加が見られた。ま た,1次固有周期と1次減衰定数は,建築物の最大応答 加速度や最大応答変位と正の相関が確認できた。相関性 は固有周期の方が大きく,減衰定数は大きなばらつきが 見られた。 次に,対象建築物を基礎固定の多質点せん断系モデル に置換し,周波数特性の異なる地震に対する解析を行い, 最適な減衰モデルについて検討した。その結果,長周期 成分を多く含む遠方の地震では,(瞬間)剛性比例型減衰 を用いた解析結果が強震観測結果と比較的よく合うこと, 短周期成分を多く含む近方の地震では(瞬間)レーリー 型減衰がよく合うこと,さらに損傷を伴う3.11の地震で は瞬間剛性比例型減衰がよく合うことが明らかとなった。

最後に,層剛性の低下および卓越周期の伸びにより損 傷度・損傷レベルを定義し,3.11の地震による解析結果 と強震観測結果から各層の損傷度をそれぞれ求め,両者 を比較した。その結果,強震観測結果から求まる損傷率 によって建築物の損傷状態や損傷部位がある程度把握で きることが確かめられた。

参考文献

- 濱本卓司,森田高市,勅使河原正臣:複数モードの 固有振動数変化を用いた多層建築物の層損傷検出, 日本建築学会構造系論文集,No.560,pp. 93-100,2002
- 2) 中村充,竹脇出,安井譲,上谷宏二:限定された地 震観測記録を用いた建築物の剛性と減衰の同時同 定,日本建築学会構造系論文集,第528号,pp.75-82, 2000.2
- 3) 森田高市,鹿嶋俊英,小山信,大川出,斉藤大樹, 長谷川隆:2011年東北地方太平洋沖地震とその前後 の強震記録による超高層建築物の振動特性:2011年 度日本建築学会関東支部研究報告集, pp.313-316, 2012.3
- 4) 飯場正紀,大川出,斉藤大樹,森田高市,長谷川隆:
 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震において観測された強震記録に基づく建築物の地震時挙動の分析,独立行政法人建築研究所,建築研究資料, No.138号,2012.9
- 5) 斉藤大樹:東日本大震災における超高層・免震建築 物の挙動,日本地震工学会誌,第15号,pp.65-68, 2011.10