

3.2.5 累積塑性変形に基づく構造損傷評価

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

首都圏で長周期地震動が発生した場合、多大な被害の発生が想定される高層建物を対象にし、その耐震性能評価および被害軽減を目的として、高層建物の損傷過程と安全余裕度の評価が可能な累積塑性変形に基づく構造損傷評価手法を開発・提案し、耐震設計、構造の耐震補強等の性能向上を目指す。

(b) 平成 19 年度業務目的

長周期地震動において高層建物に入力される地震エネルギーに対応する応答工学量として部材の塑性変形の累積値があげられるが、多岐にわたる構造仕様や座屈から破断までの破壊形式を横断的に評価する段階には至っていない。特に初期高層建物の構造仕様を対象にした検証は行われておらず、その適用性の検証を行う。

実験において得られたデータを理論に基づき整理し、試験体の消費エネルギーを多角的に検討する。さらに、モニタリング技術とエネルギー消費に起因する損傷度の横断をめざし、その端緒として損傷を累積していく試験体の微動観測からその振動特性を同定した。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名
東京理科大学	教授	北村 春幸
	客員准教授	金澤 健司
	助教	佐藤 大樹

(2) 平成 19 年度の成果

(a) 業務の要約

長周期地震動は継続時間が長く、入力エネルギーも通常の地震動に比べ大きいため、構造物の損傷を評価するうえで、構造物のエネルギー吸収能力を適切に評価することが重要となる¹⁾。そこで、試験体の損傷をエネルギーで評価するに当たり、振動台実験において入力エネルギーと試験体の吸収エネルギーを算出しエネルギーの釣合が成立していることを確認する。あわせて、高層建物試験体の長期振動モニタリングを行い、建設初期段階から加振による損傷を経て解体に至るまでの、連続的な常時微動観測データを得た。そして、これらの観測データから高層建物試験体の固有振動数を推定し、試験体の状態変化に伴う固有振動数の推移について分析した。

(b) 業務の成果

1) エネルギーの釣合いの検証

a) 実験結果に基づくエネルギーの釣合い式

多質点系の運動方程式は、次式のように表せる。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + \{F(x)\} = -[M]\{1\}\ddot{z}_0 \quad (1)$$

ここに、 $[M]$ 、 $[C]$:質量、減衰マトリクス、 $\{F(x)\}$ 、 $\{x\}$:復元力、相対変位ベクトル、 z_0 :地震動変位である。式(1)の両辺に前から、 $\{dx\}^T = \left\{ \frac{dx}{dt} \right\}^T dt = \{\dot{x}\} dt$ を乗じて地震動のある時刻 t まで積分するとエネルギーの釣合式が求まり次式のように表せる。

$$\int_0^t \{\dot{x}\}^T [M] \{\ddot{x}\} dt + \int_0^t \{\dot{x}\}^T [C] \{\dot{x}\} dt + \int_0^t \{\dot{x}\}^T \{F(x)\} dt = -\int_0^t \{\dot{x}\}^T [M] \{1\} \ddot{z}_0 dt \quad (2)$$

式(2)は時刻 t までのエネルギーの釣合式として次式のように表せる²⁾。

$$W_{ek}(t) + W_h(t) + W_{es}(t) + W_p(t) = E(t) \quad (3a)$$

$$E(t) = -\sum_{i=1}^N \int_0^t \dot{x}_i m_i \ddot{z}_0 dt \quad (3b)$$

ここに、時刻 t における、 $W_{ek}(t)$:運動エネルギー、 $W_h(t)$:減衰により吸収されるエネルギー、 $W_{es}(t)$:弾性歪エネルギー、 $W_p(t)$:累積塑性歪エネルギー、 $E(t)$:入力エネルギーである。また、 N :層数、 m_i :質量である。式(2b)から分かるように、 $E(t)$ を求める際に、相対速度 \dot{x}_i が必要となる。

式(3a)左辺第一項を、右辺に移項すると次式となる。

$$W_h(t) + W_{es}(t) + W_p(t) = E(t) - W_{ek}(t) = W'(t) \quad (4a)$$

$$W'(t) = -\sum_{i=1}^N \int_0^t \dot{x}_i m_i \ddot{X}_i dt \quad (4b)$$

ここに、 \ddot{X}_i : i 層の絶対加速度である。なお、地震動終了時刻 t_0 では $W_{ek}(t_0) = 0$ となるため、式(4a)より次式が成立することが分かる。

$$E(t_0) = W'(t_0) \quad (5)$$

一方、絶対加速度と質量から求めた層せん断力 Q_i 、および層間変形 δ_i との履歴の面積より得られる i 層の吸収エネルギー $W_i(t)$ は、それぞれ次式の如く表される。

$$Q_i = \sum_{j=i}^N m_j \ddot{X}_j, \quad W_i(t) = \int_0^{\delta_i(t)} Q_i d\delta_i \quad (6a, b)$$

また、 i 層の吸収エネルギー $W_i(t)$ を全層で合計した $W(t)$ は、式(6b)に式(6a)を代入することにより求めることが出来る。

$$W(t) = \sum_{i=1}^N W_i(t) = \sum_{i=1}^N \int_0^{\delta_i(t)} \left(\sum_{j=i}^N m_j \ddot{X}_j \right) d\delta_i \quad (7)$$

ここで、変位: $0 \rightarrow \delta_i(t)$ のとき、時刻: $0 \rightarrow t$ であり、 $d\delta_i = \frac{d\delta_i}{dt} dt = \dot{\delta}_i dt$ および、 $\dot{\delta}_i = \dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}$ の

関係より、 $W(t)$ は次式となる。

$$W(t) = \sum_{i=1}^N \int_0^{\delta_i(t)} \left(\sum_{j=i}^N m_j \ddot{X}_j \right) d\delta_i = \sum_{i=1}^N \int_0^t \dot{x}_i m_i \ddot{X}_i dt \quad (8)$$

式(4b)、(8)より、 $W(t) = W'(t)$ となることがわかる。また $t = t_0$ では、 $W(t_0) = E(t_0)$ も明

らかであり、地震終了時の吸収エネルギーは、入力エネルギーと釣合う。また $E(t_0)$ は、相対速度 \dot{x}_i を用いずに、質量 m_i 、絶対加速度 \ddot{X}_i 、層間変形 δ_i で求めることが出来る。

このように、絶対加速度、質量、絶対加速度から求めた相対速度から算出した試験体の入力エネルギー $E(t_0)$ と、実験結果から直接得られる層間変位、絶対加速度、質量から算出した各層の吸収エネルギーの和から得られる試験体の吸収エネルギー $W(t_0)$ を比較することにより、エネルギーの釣り合い式を検証する。

b) エネルギーの算出方法

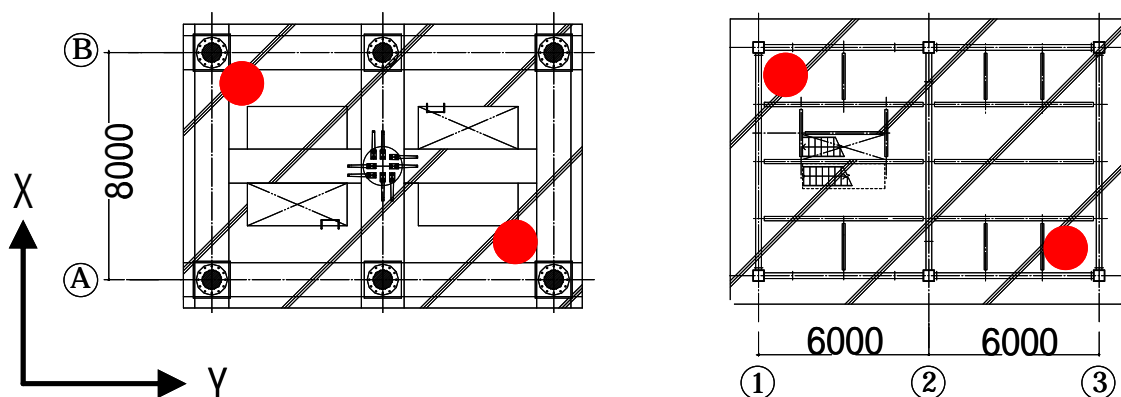
X, Y の 2 軸同時加振を行った Elcentro 波（設計波）100%、気象庁波 100%、東扇島波 100%、三の丸波 100%加振での短辺方向(X 方向(図 1))、長辺方向(Y 方向(図 1))のエネルギーの釣り合いについて検討する。

加速度センサ・変位センサは、各層の図 1, 2 に示す位置に配置している。層せん断力 Q_i (式(6a))を求める際、A-3 通りに近い位置の加速度センサ・変位センサで計測された絶対加速度および層間変位を用いた。なお、入力加速度として、試験体コンクリート基礎上の加速度を用いることとし、入力エネルギーやエネルギースペクトルを算出する際は、その値を用いている。

入力エネルギー $E(t)$ (式(3b))を算出する際の各層の相対速度 \dot{x}_i は、各層で計測された絶対加速度 \ddot{X}_i に、計測ノイズから生じるドリフト成分を除去するために 0.1Hz のハイパスフィルターをかけた後、周波数領域で積分して絶対速度を求め、振動台加速度 \dot{z}_0 から算出した速度 \dot{z}_0 を引くことで得ている。各層の重量は、表 1 の値を用いている。このようにして求めた層せん断力 Q_i と層間変形 δ_i から、履歴曲線を描き曲線の囲む面積を求めることで、各層の吸収エネルギー $W_i(t)$ を求める(式(6b))。

表 1 試験体重量

FL	W(t)
RF	180
7F	195
6F	195
5F	166
4F	54
3F	54
2F	57
1F	226



(a) 縮約層

(b) 実架構部分

図 1 加速度センサ配置図

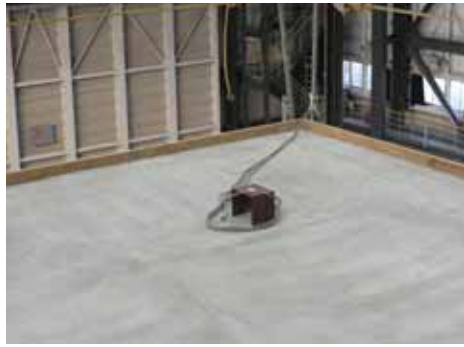
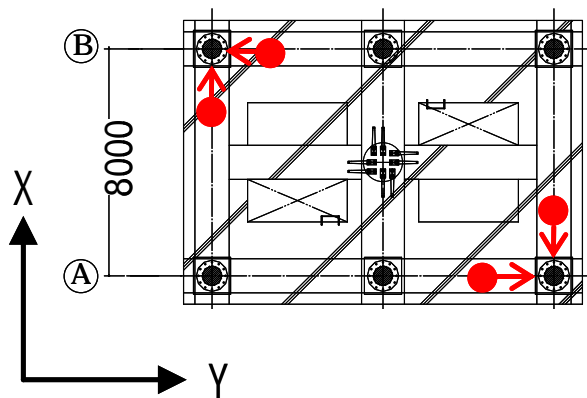


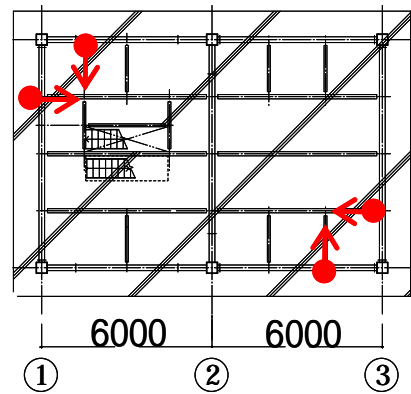
写真1 縮約層加速度センサ



写真2 縮約層加速度センサ



(a) 縮約層



(b) 実架構部分

図2 変位センサ配置図

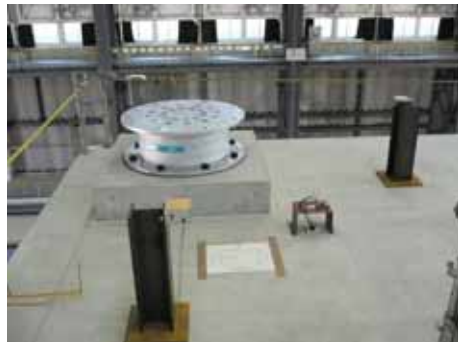


写真3 縮約層変位センサ



写真4 縮約層変位センサ

c) 実験結果

各地震動入力時の各層の層せん断力(式(6a))一層間変形の履歴曲線を図3~6に示す。

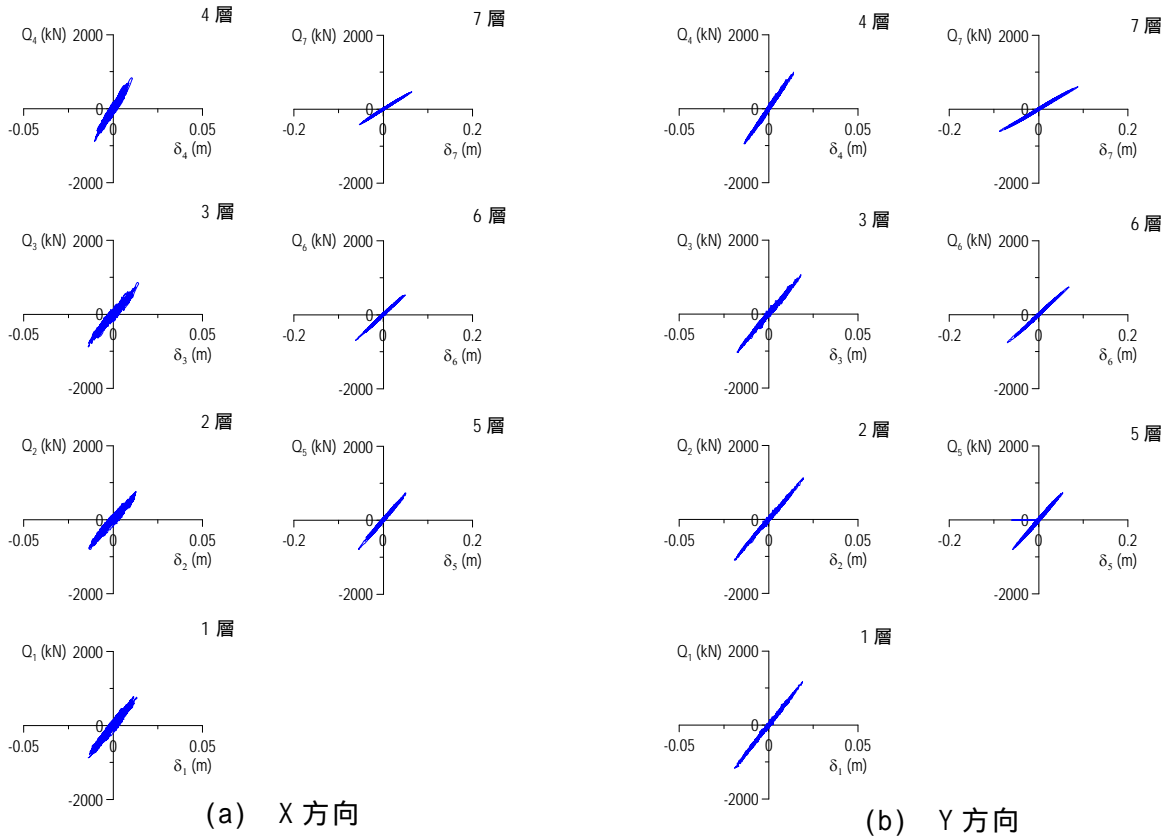


図3 気象庁入力時 層せん断力一層間変形関係

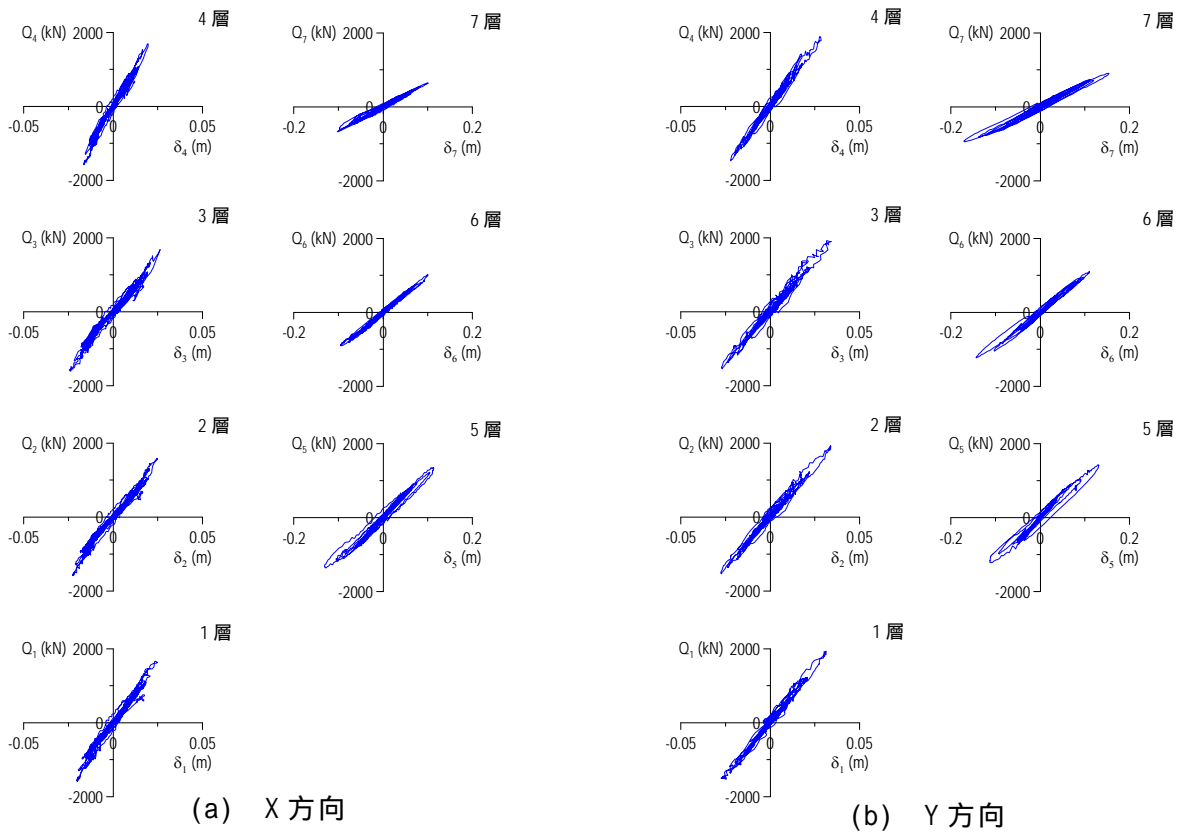


図4 Elcentro入力時 層せん断力一層間変形関係

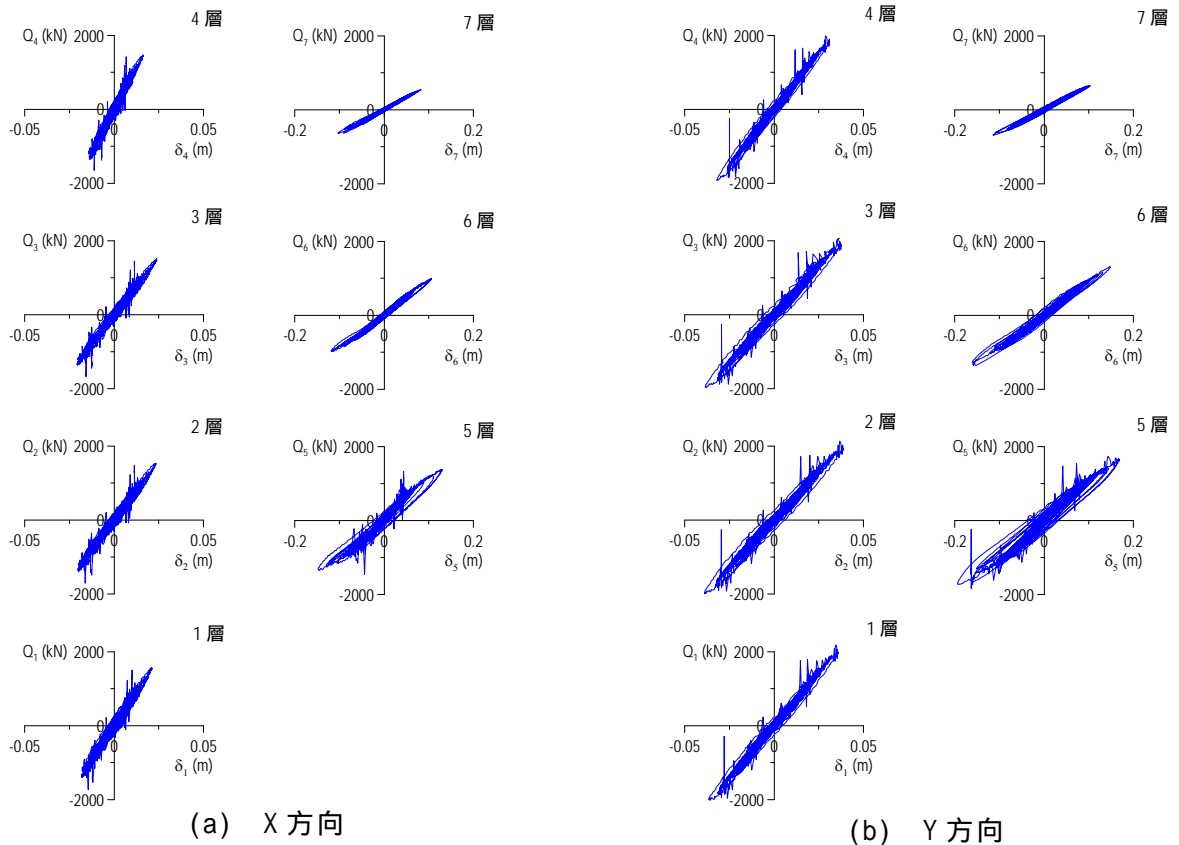


図5 東扇島入力時 層せん断力一層間変形関係

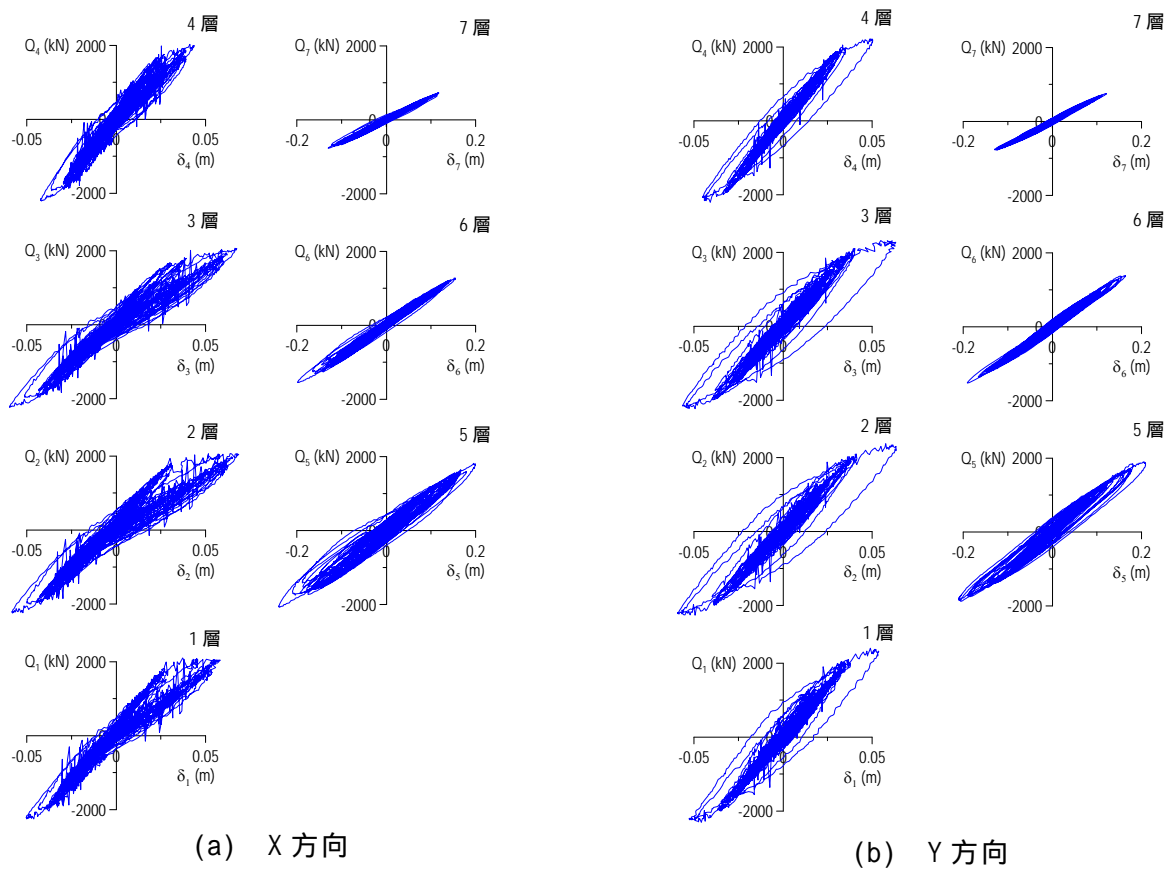


図6 三の丸入力時 層せん断力一層間変形関係

履歴曲線は、加速度計の高周波成分におけるノイズにより、変形が進まず荷重のみ増減している部分があるが、履歴面積には大きな影響を与えないので、これらから求めた各層の吸収エネルギー $W_i(t)$ (式(6b))と入力エネルギー $E(t)$ (式(3b))の時刻歴波形を図7~10に示す (— : 下から $W_1(t) \sim W_7(t)$, — : $E(t)$)。各層の吸収エネルギー $W_i(t)$ (青の曲線) は、それぞれの差分が下から、1層目、2層目、3層目、4層目、5層目、6層目、7層目の $W_1(t) \sim W_7(t)$ となる。したがって、一番上の曲線は、全ての層の $W_1(t) \sim W_7(t)$ の総和を示しており、これと入力エネルギー $E(t_0)$ (オレンジの曲線) を比較することになる。表2に各地震動の入力エネルギー $E(t_0)$ と各層の吸収エネルギー $W_i(t_0)$ 、試験体の吸収エネルギー $W(t_0)$ の一覧を示す。

図7~10のエネルギーの時刻歴波形を見ると、 $E(t_0)$ と $W(t_0)$ はほぼ一致していることが確認できる。また、表2より、各地震動の入力エネルギー $E(t_0)$ と、全層の吸収エネルギー $W(t_0)$ を比較すると、 $W(t_0)/E(t_0)$ はX方向では、気象庁1.17倍、Elcentro0.93倍、東扇島0.89倍、三の丸1.07倍、Y方向では、気象庁1.12倍、Elcentro1.03倍、東扇島1.03倍、三の丸1.03倍と概ね良い対応を示しており、 $E(t_0)$ と $W(t_0)$ は釣合うことが確認できる。

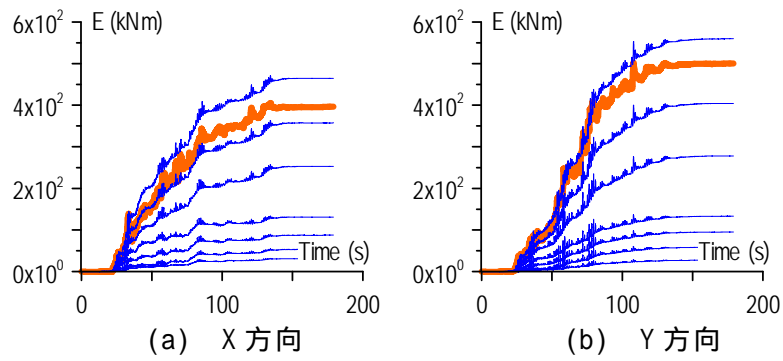


図7 気象庁入力時 エネルギー時刻歴波形

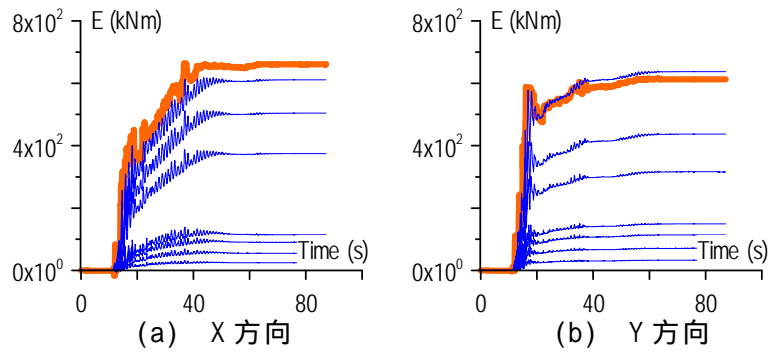


図8 Elcentro 入力時 エネルギー時刻歴波形

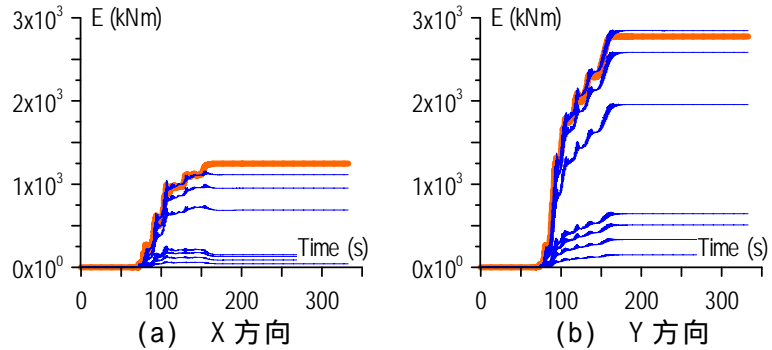


図9 東扇島入力時 エネルギー時刻歴波形

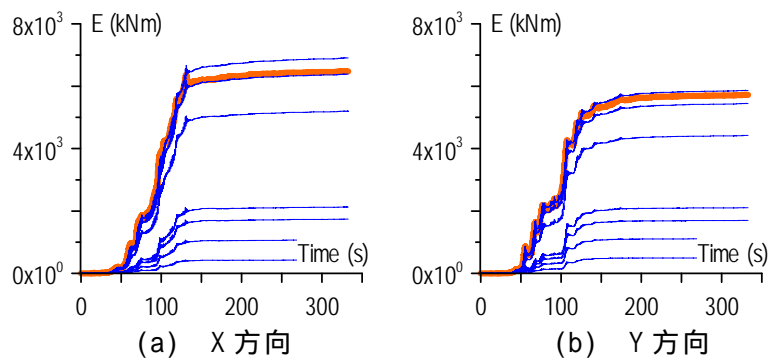


図10 三の丸入力時 エネルギー時刻歴波形

表 2 各層吸収エネルギーと試験体入力エネルギー

(a) X 方向

	$W_1(t_0)$	$W_2(t_0)$	$W_3(t_0)$	$W_4(t_0)$	$W_5(t_0)$	$W_6(t_0)$	$W_7(t_0)$	$W(t_0)$	$E(t_0)$
気象庁	31.3	21.9	34.3	43.4	121.7	104.9	107.1	464.5	396.4
Elcentro	25.0	30.4	35.1	24.4	259.9	129.7	107.0	611.5	660.3
東扇島	44.5	44.2	42.4	20.4	536.1	264.2	161.9	1113.7	1248.0
三の丸	431.7	645.7	662.8	389.4	3070.8	1185.8	519.1	6905.2	6477.7

(b) Y 方向

	$W_1(t_0)$	$W_2(t_0)$	$W_3(t_0)$	$W_4(t_0)$	$W_5(t_0)$	$W_6(t_0)$	$W_7(t_0)$	$W(t_0)$	$E(t_0)$
気象庁	27.4	31.1	36.6	38.1	144.6	126.2	155.5	559.5	500.3
Elcentro	32.8	38.0	43.2	35.3	166.8	120.6	200.4	637.1	612.9
東扇島	149.4	185.1	173.7	136.2	1312.0	625.9	263.2	2845.5	2773.1
三の丸	497.2	615.1	584.8	408.1	2315.4	1026.6	420.4	5867.7	5723.5

単位：(kN・m)

単位：(kN・m)

次に、エネルギーの速度換算値 V_E を求めエネルギースペクトルとの対応を見る。 V_E は、次式で表される。

$$V_E = \sqrt{2E(t_0) / \sum m_i} \quad (9)$$

Y 方向における各地震動の V_E とエネルギースペクトルの比較を図 11 に示す。各地震動の V_E は、A-3 位置で計測された地震応答時の 1F、RF の加速度の伝達関数から 1 次の固有周期を求めプロットしている。エネルギースペクトルと V_E も良い一致を示している。

これらの結果より、絶対加速度、層間変位および質量から吸収エネルギーを求める手法の妥当性が確認できた。

表 2 より地震動毎の試験体への入力エネルギー $E(t_0)$ を比較すると、X 方向において東扇島波、三の丸波では、それぞれ Elcentro 波の $E(t_0)$ の 1.9 倍、9.8 倍のエネルギーが入力され、Y 方向では、それぞれ 4.5 倍、9.3 倍のエネルギーが入力され、長周期地震動による入力エネルギー $E(t_0)$ が大きいことがわかる。

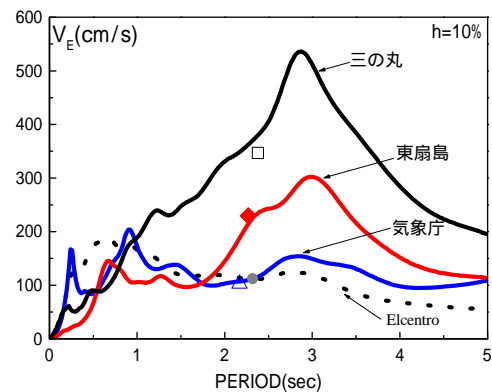


図 11 エネルギースペクトルと V_E の対応

各地震動の吸収エネルギー $W_i(t_0)$ の高さ方向の分布を図 12 に示す。1 層目から 4 層目の鋼構造架構においては各層の吸収エネルギーを当該層位置にプロットしている。5 層と等価になるようにモデル化した縮約層の吸収エネルギーは 5 層分の $W_i(t_0)$ であるので、その 1/5 倍の値を、想定した 21 層モデルと等価な層にプロットしている。つまり、縮約層の 7 層は 16.5F、6 層は 11.5F、5 層は 6.5F に対応する。図 12 より、試験体を 21 層に置換した場合の $W_i(t_0)$ の分布において、長周期地震動である東扇島波、三の丸波入力時には、中層から低層にかけて吸収エネルギーが大きくなる傾向が分かる。

最大応答変形と消費エネルギーの重み付け～評価手法の提案を行う。

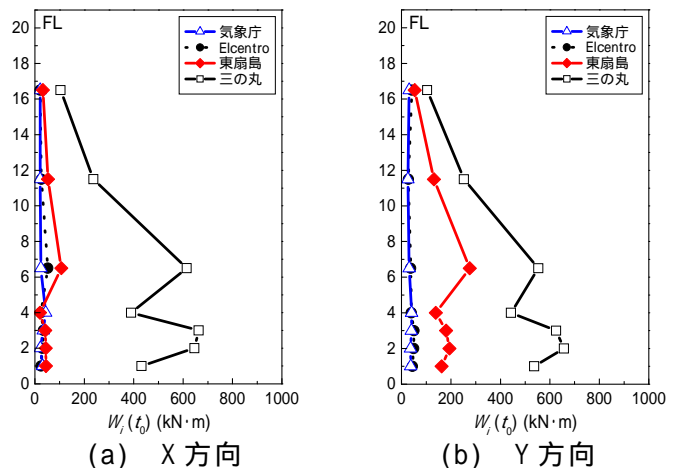


図 12 $W_i(t_0)$ の高さ方向の分布

2) 常時微動計測に基づく固有振動数の評価

a) 試験体の状態変化

モニタリング技術とエネルギー消費に起因する損傷度の横断をめざし、その端緒として損傷を累積していく試験体の微動観測を行った。試験体の状態変化を図 13 に示す。試験体は 2008 年 3 月 8 日に 4 層モデル（鉄骨建物）の状態では振動台に設置された。同日、6F スラブが設置され 5 層モデルの状態となった。そして、9 日の 7F スラブ、RF スラブ設置に伴い、6 層モデル、7 層モデルの状態へと変化した。

その後、17 日から 21 日の期間にかけて加振実験を行い、23 日から解体作業が行われた。具体的には、23 日に RF スラブ、7F スラブの撤去、24 日に 6F スラブの撤去が行われた。このように試験体の状態が変化する過程において、建設時と解体時の試験体の固有振動数の変化に着目する。

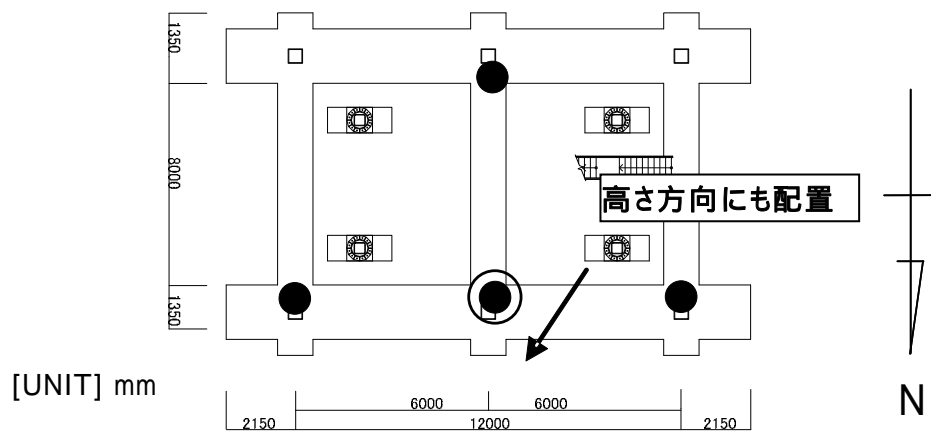


図 13 試験体の状態変化

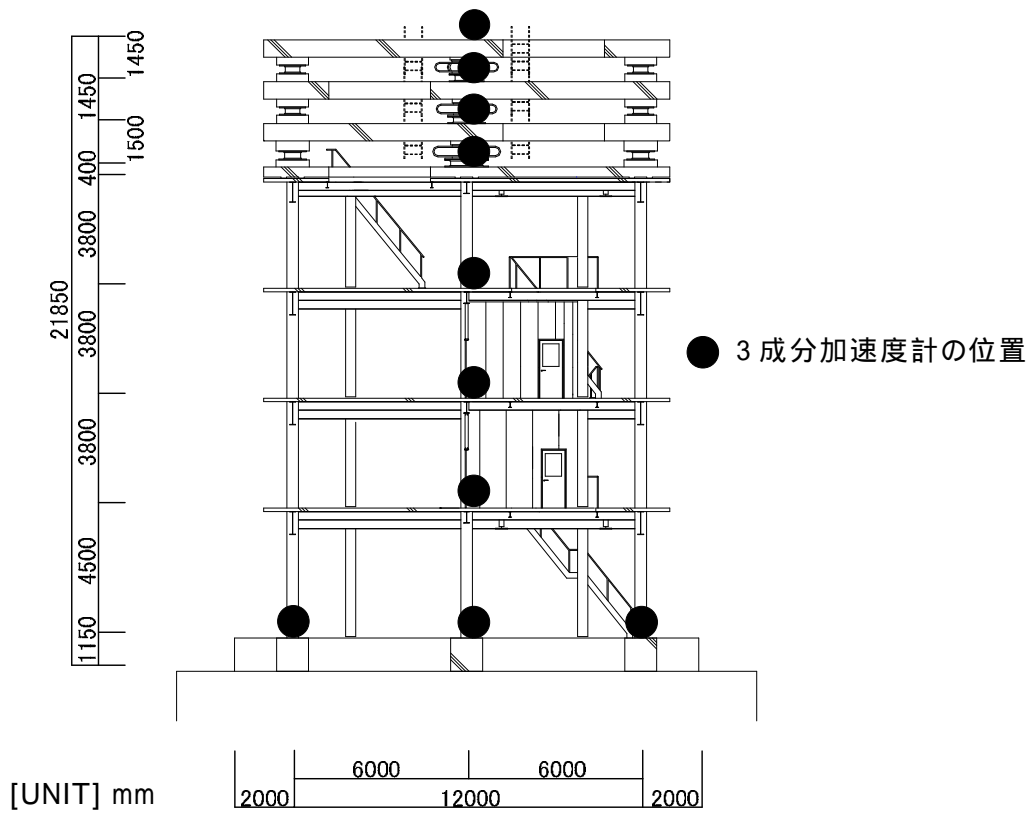
b) 測定概要

1) 計測工程

試験体の鉄骨建方終了時から解体に至るまで、微振動の長期モニタリングを実施した。この観測は、三成分加速時計を計 11 台用いて、2008 年 1 月 29 日から 3 月 25 日まで行った。収録装置のサンプリング周期は 0.005 秒で、1 時間ごとに観測記録を保存した。図 14 に微振動の長期モニタリングで用いた加速時計の配置を示す。



(a) 2階平面図



(b) 断面図

図 14 試験建物の平面図および断面図

表3 試験建物の建設工程および実験工程

月	日	曜日	微振動の長期モニタリング	試験体の状態
1	15	火		試験体建設開始
	16	水		
	17	木		
	18	金		
	19	土		
	20	日		
	21	月		
	22	火		
	23	水		
	24	木		
	25	金		
	26	土		
	27	日		
	28	月		
	29	火		計測開始
2	30	水		
	31	木		
	1	金		
	2	土		
	3	日		
	4	月		
	5	火		
	6	水		
	7	木		
	8	金		
	9	土		
	10	日		
	11	月		
	12	火		
	13	水		
3	14	木		
	15	金		
	16	土		
	17	日		
	18	月		
	19	火		
	20	水		
	21	木		
	22	金		
	23	土		
	24	日		
	25	月		
	26	火		
	27	水		
	28	木		計測中断・再開，地震計移動
3	29	金		
	1	土		
	2	日		
	3	月		
	4	火		計測中断
	5	水		
	6	木		
	7	金		試験体移設準備 試験体移設
	8	土		計測再開
	9	日		6Fスラブ設置 7F・8Fスラブ設置
	10	月		
	11	火		
	12	水		
	13	木		
	14	金		
15	土			
16	日			
17	月		加振実験	
18	火		加振実験	
19	水		加振実験	
20	木			
21	金		加振実験	
22	土			
23	日			
24	月		8Fスラブ撤去 7F・6Fスラブ撤去	
25	火			
26	水			
27	木			
28	金			
29	土			
30	日			
31	月		計測終了	解体

表 3 に試験建物の建設工程、長期振動モニタリングの実施工程を示す。1 月 29 日から 2 月 29 日までは、三成分加速度計を大梁下フランジに設置しており、2 月 29 日以降は床スラブ上に設置している。また、3 月 4 日から 3 月 8 日までの 4 日間は、試験体の振動台上への移設のため、長期振動モニタリングを一時中止した。

)測定方法

ア)測定機器の構成

8 台の三成分加速度計と、直流アンプ (DC アンプ)、アナログ/デジタル変換器 (A/D 変換器)、収録用パソコン、外付けハードディスク、無低減電源装置を用いて、長期振動モニタリングの計測システムを構築した。図 15 に計測システムの全体構成を示す。また、図 16 には計測機器の設置状況を撮影した写真を示す。

試験建物に設置された三成分加速度計からの全ての測定信号は、試験建物内および実験棟内に敷設した測定ケーブル (全長 50M~100M 程度) を通して計測基地に集めた。計測基地に集められた測定信号 (電圧信号) は DC アンプで 10~100 倍に増幅した後、A/D 変換器でデジタル化し、収録用パソコンを介して外付けハードディスクに記録した。これらの計測機器のうち、計測基地に設置した DC アンプ、A/D 変換器、収録用パソコンおよび外付けハードディスクについては交流電源を供給する必要があるため、長期間にわたる計測を安定して行うため、無停電電源装置を用いて電源供給を行った。

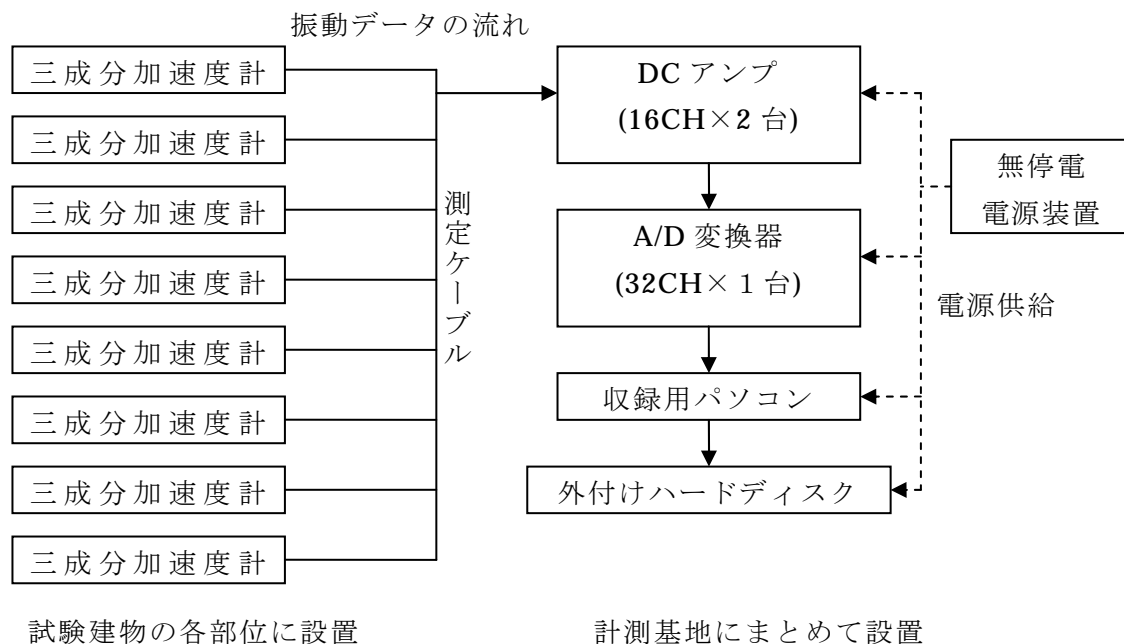


図 15 長期振動モニタリングの計測システムの全体構成



図 16 計測システムの設置状況（建設段階における計測基地）

イ)測定機器の仕様

主要な測定機器である三成分加速度計、A/D 変換器および DC アンプの製品仕様を表 4、表 5 および表 6 に示す。また、三成分加速度計の周波数特性図を示す。

三成分加速度計は、直交三成分の過減衰動コイル型の加速度センサを内蔵したものであり、感度はおおよそ $1\text{Volt}=1\text{cm/s/s}$ 、最大容量 2000cm/s/s である。常時微動から強震動までの広い測定範囲を有すること、動コイル型であるため外部からの電源供給を必要としないことなどの特長を有する。

A/D 変換器は、分解能 24BIT、入力チャンネル数 32、最大サンプリング周期 200kHz、計測レンジ 2.54Volt の性能を有するものであり、微振動を精度良く測定できること、バッチ処理による測定が可能であり、長時間連続の測定が可能であることなどの特長を有する。

DC アンプは通常の性能を有する電圧増幅器であり、16CH 用のもの 2 台を用いた。本研究では、増幅率（ゲイン）として 10 倍、100 倍もしくは 1000 倍の中から選択し、ローパスフィルタを 10Hz に固定した。

例えば、DC アンプの増幅率を 10 倍としたとき測定範囲は $\pm 254\text{cm/s/s}$ ($=\text{gal}$) に相当し、100 倍としたときは測定範囲 $\pm 25.4\text{cm/s/s}$ 、1000 倍としたときには測定範囲 $\pm 2.54\text{cm/s/s}$ に設定したことに相当する。本研究では常時微動のような微振動範囲での振動特性に着目し、測定範囲として強震動よりも小さい範囲を重視したため、振動台を加振した際には、測定データの一部が測定レンジを超過している。

表 4 三成分加速度計の仕様

型式	J E P - 6 A 3	
方式	過減衰型加速度計	
測定成分	X、Y、Z (直交3成分)	
センサ感度	0.11 V/m · s ⁻² ± 10%	
測定範囲	± 20 m/s ⁻²	
可動部最大変位	p-p 2mm	
振動数特性	下図参照	
固有振動数	3 ± 0.5 Hz	
直線性	0.1%	
温度による感度変動	約 0.4%/°C	
出力抵抗	約 2.5 kΩ	約 20 kΩ
テストコイル抵抗	約 500 Ω	
温度範囲	-20 ~ +50 °C	
耐水性	防滴構造	
使用電源 (増幅器有)	006P 乾電池 (標準付属) 若しくは	
	± 9V ~ ± 12V の直流電源装置 (付属品外)	
外形寸法	165 (W) × 165 (D) × 112 (H) mm	
質量	約 2 kg	

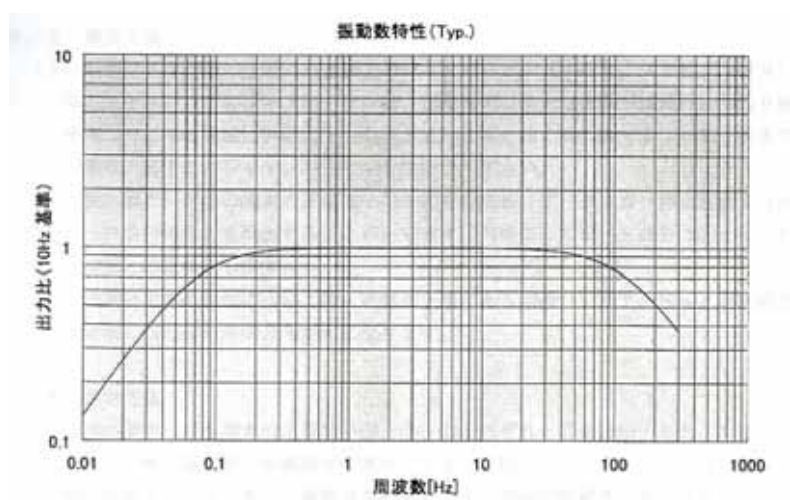


図 17 三成分加速度計の周波数特性図

表5 A/D変換器の仕様

入力チャンネル数	32ch
分解能	24ビットまたは16ビット
サンプルレート	最低 25Hz 最高 200kHz
サンプルタイミング	同時サンプル
入力形式	シングルエンド
変換方式	64倍オーバーサンプリング $\Delta\Sigma$ 方式
アンチエイリアシングフィルタ (フェーズリニア型)	遮断周波数 0.4535FS 阻止域 0.546FSから63FSまで 阻止域減衰量 120dB
低域通過特性	直流通過 (デフォルト) ハイパスフィルタ使用時 (48kHz サンプル時) カットオフ周波数 1.0Hz
変換性能 (24ビット使用時)	オフセットエラー $\pm 300\mu\text{V Typ.}$ (キャリブレーション実施時) オフセット温度特性 4ppm/°C ゲインエラー $\pm 0.03\% \text{ Typ.}$ 歪率 $> 106\text{dB Typ. THD+N}$
入力電圧	$\pm 2.56\text{VOLT FS}$

表6 DCアンプの仕様

チャンネル数	16
入力形式	直結型シングル入力
入力抵抗	約1M Ω
感度	$\times 0.2$ 、 $\times 1$ 、 $\times 10$ 、 $\times 100$ 、 $\times 1000$
感度精度	$\pm 1\%$
直線性	$\pm 0.1\%$
周波数特性	DC~1kHz +1dB、-3dB
ローパスフィルタ	10Hz、20Hz、50Hz、100Hz、W/B (-24dB/oct ベッセル型)
最大許容入力電圧	$\pm 50\text{V}$
安定度	$\pm 10\text{mV}/^\circ\text{C}$ 以内
雑音	100mVp-p 以内
出力	$\pm 5\text{V}$ 、 $\pm 5\text{mA}$
使用環境	気温0~40°C、湿度20~85%RH
電源	AC100V $\pm 10\%$

ウ)三成分加速度計の設置方法

11 台の三成分加速度計は、図 19 の試験建物の平面図および断面図に表記したように、建物の高さ方向の層間変形モードを把握することを目的として、建物北側中柱に着目した鉛直アレー配置として各階に 1 台ずつを設置し、さらにロッキング振動を把握することを目的として、1 階隅柱付近 3 点に設置した。

三成分加速度計の設置方法は、床スラブの打設前と打設後では異なっており、図 18-(a)に床スラブ打設前の、図 18-(b)に打設後の設置状況を示す。床スラブ打設前には、三成分加速度計を大梁の下に吊るすように据え付けた。具体的には、大梁の下フランジにアルミ製冶具（加速度計重量が 2.0kg に対して冶具重量 4.5kg 程度）をクランプ（万力）で強く固定し、置位置は梁や床などの構造部材の上下振動を避けるため、梁端の柱に極力近い位置とした。一方で、床スラブ打設後には、三成分加速度計を床スラブ上に両面テープで強く固定し、さらに、前記のアルミ製冶具をカバーとして加速度計の上部に被せるように設置した。



(a) 梁下への設置状況、床スラブ打設前



(b) 床上への設置状況、床スラブ打設後

図 18 三成分加速度計の設置方法

c) 測定結果

常時微動記録から各状態における5分間のデータを選出し、各々のフーリエスペクトルを算出した。

各モデルのスペクトル特性

図19~22に建設時および解体時の各モデルにおけるNS方向、EW方向のフーリエスペクトルを示す。図19より縮約層が増える毎に、1次固有振動数が減少していく傾向が確認できる。詳細には、4層から7層へと増加するにつれて、1.68Hz→1.08Hz→0.81Hz→0.59Hzと減少している。一方で、鉄骨建物の2次固有振動数に相当する6Hz付近の共振ピークは縮約層の数に関わらず一定に推移する。また、縮約層が増える毎に、4Hz以下の共振ピークの数が増えることが確認できる。4層の時には一つの共振ピークが確認されるが、縮約層3層が加わった7層モデルでは四つの共振ピークが現れている。つまり、縮約層が増えることによりモードが増加し、それに対応する共振ピークが確認できる。これらの現象は図20の解体時においては、縮約層の撤去毎に建設時と逆の現象となることも確認できる。また、図21と図22よりEW方向においてもNS方向と同様の現象が見られる。

このように、建設時および解体時において、試験体の状態が変化することで、スペクトルの形状の変化が確認できた。次節では、健全な建設時と加振実験による損傷がある解体時における固有振動数の比較を行う。

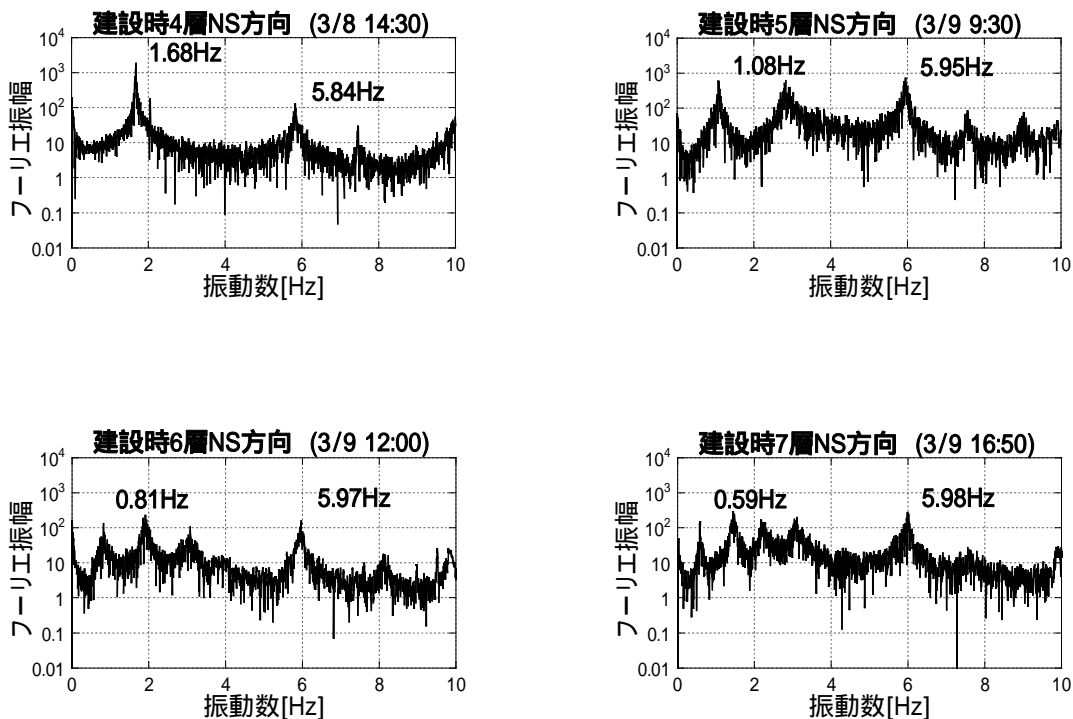


図19 建設時の各層におけるNS方向のフーリエスペクトル

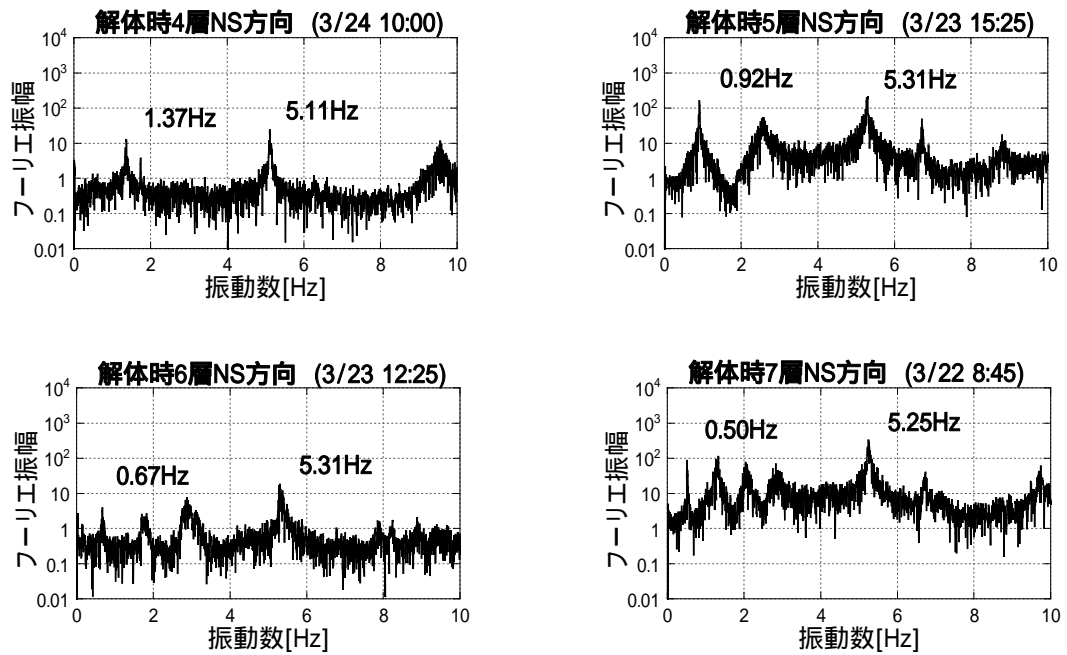


図 20 解体時の各層における NS 方向のフーリエスペクトル

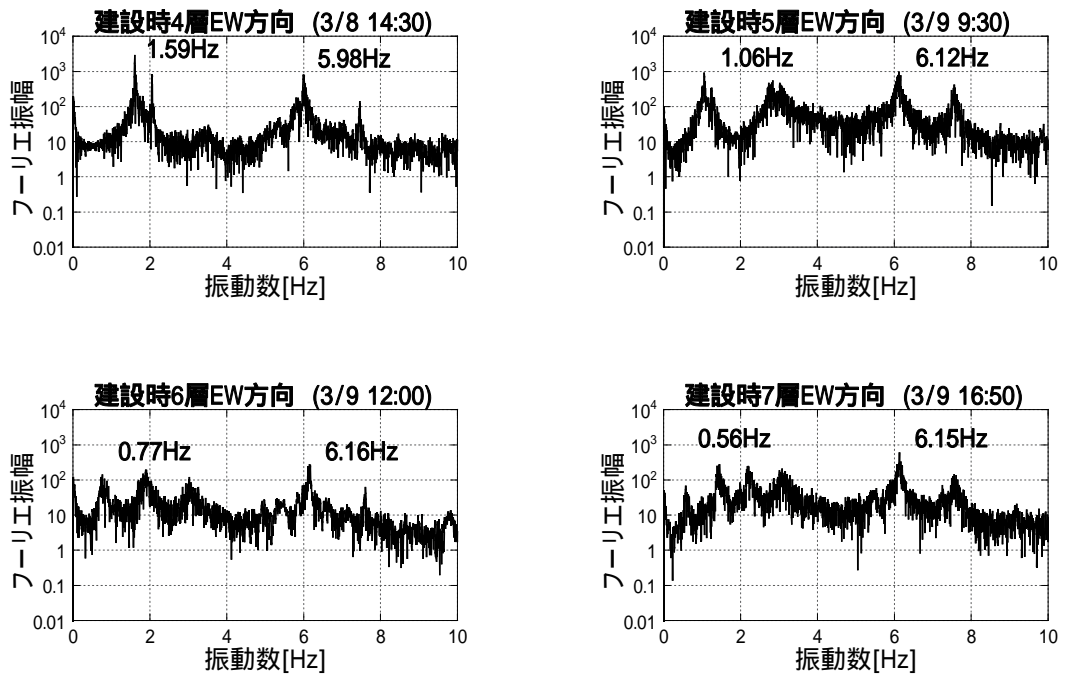


図 21 建設時の各層における EW 方向のフーリエスペクトル

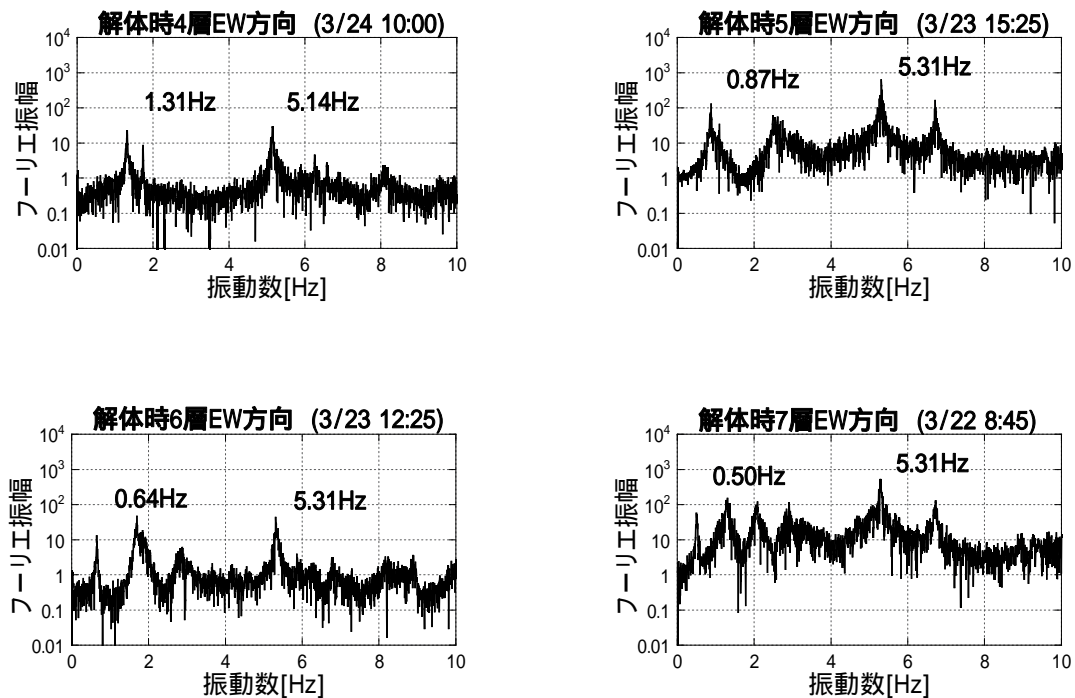


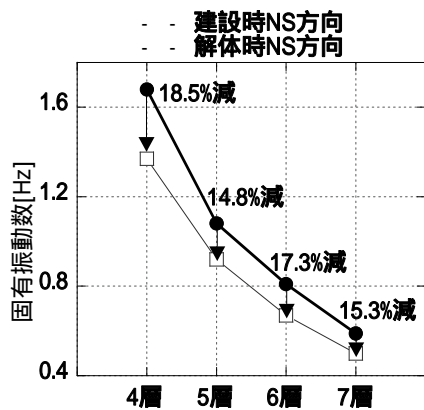
図 22 解体時の各層における EW 方向のフーリエスペクトル

）加振実験による固有振動数の変化

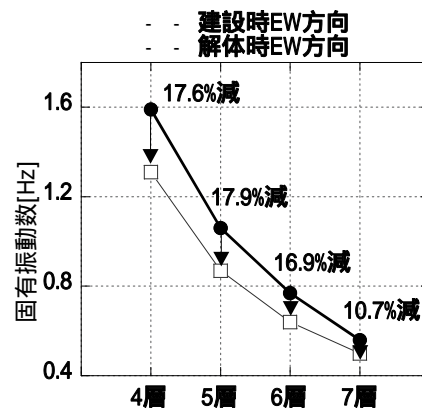
図 23 に各層における 1 次、2 次固有振動数の変化について建設時と解体時を比較して示す。図 23(a)より加振による固有振動数の減少が確認できる。詳細には、7 層モデルにおいて加振により、NS 方向の 1 次固有振動数が 0.59Hz から 0.50Hz へと、約 15.3%の減少が見られる。同様に、4～6 層モデルにおいても減少が見られる。特に 4 層モデルにおいては約 18.5%の減少が見られ、加振によりフレームが損傷を受けた影響が現れている。また、EW 方向においても図 23(b)より同様の現象が確認できる。

一方で、2 次においても、図 23(c)と (d)より損傷による固有振動数の減少が見られる。ここで、1 次と 2 次の固有振動数の変化について比較すると、2 次は建物の状態変化による固有振動数の変化や減少率の差が小さい。このことは、1 次は縮約層の影響を受け易いが、2 次は縮約層との相関性が少なく、フレームのみの振動特性が特に卓越していることを示している。

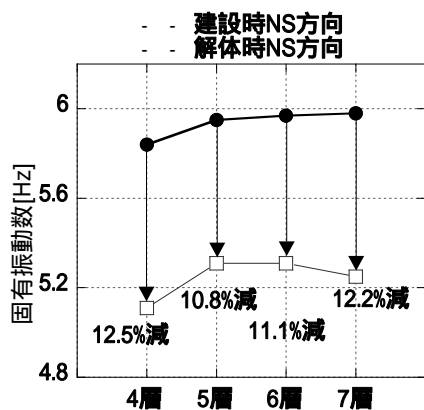
以上のように、フレームの 1 次、2 次において固有振動数の減少が確認できた。



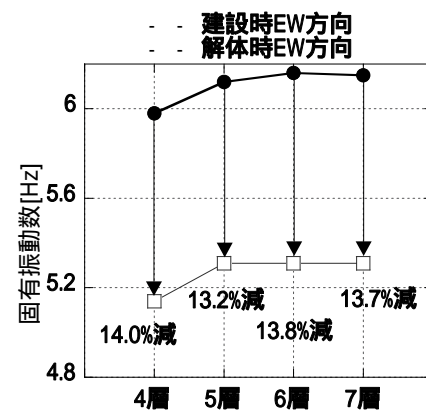
(a) NS方向の1次固有振動数の変化



(b) EW方向の1次固有振動数の変化



(c) NS方向の2次固有振動数の変化



(d) EW方向の2次固有振動数の変化

図 23 建設・解体時の各層における1次、2次固有振動数の変化

高層建物試験体の長期振動モニタリングにより、建設初期段階から加振による損傷を経て解体に至るまでの、いわゆる試験体の一生涯における連続的な常時微動観測データを得た。そして、これらの観測データから、固有振動数の経時的な変化を評価した。その結果、縮約層の増設により試験体が高層化していくにつれて試験体全体が長周期化する傾向や、加振により試験体が、最大変形のレベルに応じて、その固有振動数を減じることを確認した。加振による固有振動数の減少についてはフレームの最大変形に応じた損傷による影響が現れたものと考えられる。こうした内容をエネルギー消費にともなう累積塑性変形に起因する損傷と関連付けるデータまでが揃い、最大応答変形と消費エネルギーの重み付け等を視野に入れた評価手法の提案を行う素地を整えた。

(c) 結論ならびに今後の課題

今後は、超高層建物試験体の振動台破壊実験の計測データを整理・分析し、地震動による建物への入力エネルギーに対応する工学量として累積値である塑性履歴エネルギー吸収量や累積塑性変形倍率を用いた架構や部材の損傷評価を行う。実験に基づく架構や部材の破壊性状との対応から、累積塑性変形や最大変形架構を評価指標とする損傷評価法の適用性の検証を行う。さらに、次年度実施予定の制振構造を適用した超高層建物試験体の作成

に向けた試験体の累積損傷評価を行う。

以上の内容をモニタリング技術から同定することをめざし、固有振動数の変動とそれに伴う剛性の連続的評価を試みる。更に、有限要素法を用いて試験体をモデル化し、試験体の固有振動数の変遷についての数値シミュレーションを行うことにより、試験体の状態変化に伴う固有振動数の変動を理論的に把握することを試みる。以上の検討を通して、構造ヘルスマニタリングの発展に貢献できるよう、データをとりまとめる。

(d) 引用文献・参考文献

- 1) 日本建築学会：長周期地震動と建築物の耐震性、日本建築学会、2007.12.
- 2) 秋山宏：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計、技報堂出版、1999.11
- 3) 井上、長江ほか：高層建物の耐震性評価に関する実験—その1~3、日本建築学会大会学術講演梗概集、2008. 9（掲載予定）

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

発表成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表場所 （学会等名）	発表時期	国内・外の別
振動台実験におけるエネルギーの釣合の検証—高層建物の耐震性評価に関するE-ディフェンス実験—その9 口頭発表	島田侑、佐藤大樹、北村春幸、長江拓也、福山國夫、梶原浩一、井上貴仁、中島正愛	広島大学 2008年度日本建築学会大会（中国）	2008年9月	国内
常時微動計測に基づく高層建物試験体の固有振動数の評価—高層建物の耐震性評価に関するE-ディフェンス実験—その11 口頭発表	森本真史、金澤健司、佐藤大樹、北村春幸、長江拓也、福山國夫、梶原浩一、井上貴仁、中島正愛	広島大学 2008年度日本建築学会大会（中国）	2008年9月	国内

学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

マスコミ等における報道・掲載

なし

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 20 年度業務計画案

前年度実施した超高層建物試験体の振動台破壊実験の計測データを整理・分析し、地震動による建物への入力エネルギーに対応する工学量として、累積値である塑性履歴エネルギー吸収量や累積塑性変形倍率を用いた架構や部材の損傷評価を行う。実験に基づく架構や部材の破壊性状との対応から、累積塑性変形や最大変形架構を評価指標とする損傷評価法の適用性の検証を行う。さらに、次年度実施予定の制振構造を適用した超高層建物試験体の作成に向けた試験体の累積損傷評価を行う。また、超高層建物試験体の建設時から振動台破壊実験により倒壊に至るまでの微振動測定データを整理・分析し、同定した建物の固有周期と建物の状態の対応から建物の損傷評価法を検討する。