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。

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

(0 -)

(4a)

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、zo:地 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。

$$\int_{0}^{t} \{\dot{x}\}^{\mathrm{T}} [M] \{\ddot{x}\} dt + \int_{0}^{t} \{\dot{x}\}^{\mathrm{T}} [C] \{\dot{x}\} dt + \int_{0}^{t} \{\dot{x}\}^{\mathrm{T}} \{F(x)\} dt = -\int_{0}^{t} \{\dot{x}\}^{\mathrm{T}} [M] \{I\} \ddot{z}_{0} dt$$
(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)。

$$W_{ek}(t) + W_{h}(t) + W_{es}(t) + W_{p}(t) = E(t)$$
(3a)
$$E(t) = -\sum_{i=1}^{N} \int_{0}^{t} \dot{x}_{i} m_{i} \ddot{z}_{0} dt$$
(3b)

ここに、時刻 t における、Wek(t):運動エネルギー、Wh(t):減衰により吸収されるエネルギ ー、Wes(t):弾性歪エネルギー、Wp(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、mi: 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 xi 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。
$$W_h(t)+W_{es}(t)+W_p(t)=E(t)-W_{ek}(t)=W'(t)$$

$$W'(t) = -\sum_{i=1}^{N} \int_{0}^{t} \dot{x}_{i} m_{i} \ddot{X}_{i} dt$$
(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。

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

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

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

また、*i*層の吸収エネルギーW₄(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。

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

ここで、変位: $\mathbf{0} \rightarrow \delta_i(t)$ のとき、時刻: $\mathbf{0} \rightarrow t$ であり、 $d\delta_i = \frac{d\delta_i}{t} dt = \dot{\delta}_i dt$ 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。

$$W(t) = \sum_{i=1}^{N} \int_{0}^{\delta_{i}(t)} \left(\sum_{j=i}^{N} m_{j} \ddot{X}_{j} \right) d\delta_{i} = \sum_{i=1}^{N} \int_{0}^{t} \dot{x}_{i} m_{i} \ddot{X}_{i} dt$$
(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(to)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(to)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(to)を比較するこ とにより、エネルギーの釣合い式を検証する。

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 ーの釣合について検討する。

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 x, は、各層で計測された絶対加速度 X, 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 żo から算出した速度 źo 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 Qiと層間変形δi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Wi(t)を求める (式(6b))。

衣Ⅰ 武駛怦里旦

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





縮約層 (a)

(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





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



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(to) (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(to)と各層の吸収エネルギー $W_i(to)$ 、試験体の吸収エネルギーW(to)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。

- 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) Y7	方向							単位:	(kN · m)

	$W_1(t_0)$	$W_2(t_0)$	$W_{3}(t_{0})$	$W_4(t_0)$	$W_{5}(t_{0})$	$W_{6}(t_{0})$	$W_{7}(t_{0})$	$W(t_0)$	$E(t_0)$
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)

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。

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

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。 各地震動の吸収エネルギーW₁(to)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W₁(to)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 Wi(to)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。

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。

6 層(3 月 9 日)

図13 試験体の状態変化

b) 測定概要

)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。

図 14 試験建物の平面図および断面図

15 X 128 K # BURNA 16 X 1 17 X 1 18 X 1 19 X 1 19 X 1 19 X 1 19 X 1 10 X 1 10 X 1 10 X 1 10 X 1 11 X 1 12 X 1 13 X 1 14 1 1 15 X 1 16 1 1 17 X 1 18 1 1 19 X 1 10 1 1 10 1 1 11 1 1 12 1 1 13 X 1 14	月	日	曜日	微振動の長期モニタリング	試験体の状態
1 2 1 1 2 1 2 1 1 2 1 1 2 1 1 2 1 1 2 1 1 2 1 1 2 1 1 2 1 1 2 1 1 2 1 1 2 1 1 3 1 1 3 1 1 3 1 1 3 1 1 4 1 5 1 1 1 <td></td> <td>15</td> <td>灭</td> <td></td> <td>試験体建設開始</td>		15	灭		試験体建設開始
1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 3 1 2 3 1 2 3 1 2 3 1 2 3 1 2 3 1 2 3 1 2 3 1 1 3 1 1 3 1 1 3 1 1 3 1 1 10 1 1 11 1 1 12 1 1 13 1 1 14 1 1 15 1 1 14 1 1 15 1 1 16 1		<u>16</u> 17	水木		
3 1 3 1		18	金		
1 21 21 21 22 23 23 x 24 24 x 24 25 24 24 26 1 24 27 12 1 28 12 1 29 12 1 21 12 1 22 12 1 23 13 1 24 12 1 25 13 1 21 14 14 22 12 14 31 14 14 31 14 14 31 14 14 32 14 14 33 14 14 34 14 14 35 13 14 36 13 14 37 14 14 38 13 14 37 13 14 38 14 14 39 13 14 30 13 14 31 14 14 31 14 31 14		19	<u>±</u>		
1 22 x		20	月		
1 22 A 20 A A 21 A A 22 A A 31 A A 32 A A 31 A A 32 A A 33 A A 34 A A 35 A A 36 A A 37 A A 38 A A 39 A A 31 A A 31 A A 31 A A 32 A A 34 A A 35 A A 36 A A 37 A A 38 A A 39 A A 30 A A 31 A A 31 A A 31 A A 31 A A 32 A A 33 A A 34 A 35 A		22	火		
2: 3: 3:<	1	23	水木		
28 1 27 1 28 1 28 1 29 1 20 1 20 1 21 1 22 1 24 1 30 1 4 1 5 1 6 1 12 1 13 1 14 1 12 1 13 1 14 1 15 2 16 1 17 1 18 1 19 1 20 1 21 1 22 1 23 1 24 1 25 1 26 1 27 1 24 1 25 1 26 1 27 1 28 1 29 1 20 1 21 1 22 1 23 1 3 1 3		25	金		
22.月 12.月 23.人 12.月 31.人 7 31.人 7 32.月 7 31.人 7 32.月 7 32.月 7 31.人 7 32.月 7 32.月 7 32.月 7 33.月 7 34.月 7 35.人 7 36.月 7 37.1 <td></td> <td>26 27</td> <td>土日</td> <td></td> <td></td>		26 27	土日		
20 x 130 min 31 x 1 1 x 1 2 x 1 3 x 1 3 x 1 3 x 1 3 x 1 3 x 1 3 x 1 3 x 1 3 x 1 4 x 1 1 x 1 1 x 1 1 x 1 1 x 1 1 x 1 1 x 1 1 x 1 1 x 1 1 x 1 1 x 1 1 x 1 1 x 1 1 x 1 1 x 1 2 x 1 2 x 1 2 x 1 2 x 1 2 x 1 2 x 1 2 x 1 2 x 1 2 x 1 2 x 1 2 x 1 2 x 1 3 x 1 1 x 1 1 x 1 1 x 1		28	月		
31 %		29	火	計測開始	
1 ± 2 3 ± 2 3 ± 2 6 × 1 7 × 1 8 ± 1 9 ± 1 10 ± 1 11 月 1 12 ± 1 14 ± 1 15 ± 1 16 ± 1 17 ± 1 18 ± 1 19 ± 1 10 ± 1 11 ± 1 16 ± 1 17 ± 1 18 ± 1 19 ± 1 10 ± 1 11 ± 1 12 ± 1 21 ± 1 22 ± 1 23 ± 1 24 ± 1 25 ± 1 26 ± 1 27 ± 1 28 ± 1 19 ± 1 11 ± 1 12 ± 1 13 # 1 14 ± 1 15 ± 1 16 ± 1 17 ± 1 18 ± 1 19 ± 1<		30	木		
3 1 3 1 4 1 5 1 6 1 7 1 9 1 11 1 12 1 13 1 14 1 15 1 16 1 17 1 18 1 19 1 19 1 19 1 11 1 11 1 12 1 14 1 15 1 16 1 17 1 18 1 19 1 20 1 21 1 22 1 23 1 24 1 25 1 26 1 21 1 22 1 23 1 24 1 25 1 26 1 27 1 28 1 11 1 29 1 14		1	金		
1 1 1 6 x 1 7 x 1 9 1 1 11 1 1 12 x 1 13 x 1 14 x 1 15 1 1 16 1 1 17 1 1 18 1 1 19 x 1 22 2 1 23 1 1 24 1 1 25 1 1 24 1 1 25 1 1 24 1 1 25 1 1 26 1 1 27 1 1 28 1 1 29 1 1 3 1 1 4 1 1 7 1 1 3 1 1 14 1 1 15 1 1 16 1 1 17 1 1 16 1		2	吉		┼─┤建┝─────
5 // 6 // 8 // 8 // 9 // 10 // 11 // 12 // 11 // 12 // 13 // 14 // 12 // 14 // 14 // 14 // 16 // 16 // 17 // 18 // 19 // 20 // 20 // 20 // 20 // 20 // 22 // 23 // 24 // 23 // 24 // 28 // 29 // 29 // 29 // 29 // 29 // 20 ///		4	月		
9.4 9.4 9.4 9.4 9.4 9.4 9.4 9.4 9.4 9.4 9.4 9.4 9.4 9.4 9.4 9.4 9.4 9.4 9.4 9.4 11.1 1.1 12.4 1.1 13.4 1.1 14.4 1.1 15.4 1.1 11.4 1.1 12.4 1.1 13.4 1.1 14.4 1.1 15.4 1.1 12.4 1.1 12.4 1.1 12.4 1.1 12.4 1.1 12.4 1.1 12.4 1.1 12.4 1.1 12.4 1.1 12.4 1.1 12.4 1.1 12.4 1.1 12.4 1.1 13.4 1.1 14.2 1.1 13.4 1.1 14.2 1.1 13.4 1.1 14.2 1.1 13.4 1.1 14.2 1.1 13.4 1.1 <t< td=""><td></td><td>5</td><td>火</td><td></td><td></td></t<>		5	火		
3 金		7	木		┼┤┯┟─────
9 1 10 1 11 1 12 1 13 1 14 1 15 1 16 1 17 1 18 1 19 1 10 1 11 1 12 1 20 1 21 1 22 2 23 1 24 1 25 1 26 1 27 1 28 1 29 1 21 1 21 1 22 1 23 1 24 1 25 1 20 1 21 1 22 1 23 1 3 1 3 1 4 1 5 1 3 1 14 1 15 1 16 1 17 1 18 1 19		8	金		
2 11月 11月 13 次 11 13 次 11 13 次 11 13 次 11 14 11 11 15 11 11 16 11 11 17 11 11 18 11 11 19 11 11 19 11 11 11 11 11 12 11 11 23 11 11 23 11 11 24 11 11 25 11 11 26 11 11 27 11 11 28 11 11 29 11 11 20 11 11 21 11 11 21 11 11 21 11 11		9	日		
12 × 14 14 14 15 16 17 16 17 18 17 18 17 18 17 18 17 18 17 18 17 18 17 18 17 18 17 18 17 18 17 18 17 18 17 18 17 18 17 18 17 18 17 18 17 </td <td></td> <td>11</td> <td>月</td> <td></td> <td></td>		11	月		
2 14 x		12	火水		
2 15 金		14	木		
10 1 11 月 12 1 21 1 22 1 23 1 24 1 25 月 26 人 27 水 28 1 29 金 21 1 28 1 29 金 21 1 28 1 29 21 21 1 22 1 28 1 29 21 20 11 21 1 22 1 23 1 3 1 3 1 4 1 5 1 5 1 10 1 7 1 11 1 12 1 13 1 14 1 13 1 14 1 15 1 18 1 19 1 110 1 12 1 13 <td>2</td> <td>15</td> <td>金</td> <td></td> <td></td>	2	15	金		
18 月 19 人 20 米 21 米 22 金 23 ± 24 E 25 月 26 人 27 水 28 ★ 29 金 21 ★ 22 金 24 E 25 月 26 人 27 水 28 ★ 29 金 1 ± 21 ± 22 金 3 月 4 火 10 月 11 火 12 ホ 13 エ 14 金 15 ± 16 E 17 月 18 火 19 次 11 エ 12 エ 13 エ 14 1 15 1 18 1 19 次 10 1 11 1 12		17	古		
19 次 21 木 23 ± 23 ± 23 ± 23 ± 23 ± 23 ± 24 ± 26 火 27 × 28 × 29 ▲ 3 月 3 月 3 月 3 月 3 月 3 日 1 ± 3 日 10 月 11 × 12 × 13 × 14 ± 15 ± 16 ± 17 1 18 × 19 × 11 × 12 × 13 × 14 ±		18	月		
21 木 22 金 23 ± 23 ± 24 □ 23 ± 26 以 27 水 27 水 28 木 28 木 29 金 1 ± 1 2 □ 1 2 □ 1 2 □ 1 2 □ 1 2 □ 1 2 □ 1 2 □ 1 3 □ 1 4 ∪ 1 5 𝔅 1 6 木 1 10 □ 1 11 ↓ 1 12 𝔅 1 11 ↓ 1 12 𝔅 1 13 𝑘 1 14 金 1 15 ± 1 16 □ 1 17 □ 1 18 𝔅 1 18 𝔅 1 20 𝑘 1 21 ♠ 1 22 ± 1 23 □ 1 24 □ 1 17 𝑘 1 18 𝔅 1 21 ♠ 1 22 ± 1 23 □ 1 24 □ 1 25 𝔅 1		<u>19</u> 20	火水		
22 金 22 金 24 日 26 月 26 月 27 水 27 水 29 金 29 金 計測中断, 地震計移動 1 土 1 2 日 1 2 日 1 2 日 1 3 月 1 4 人 計測中断 5 水 1 6 木 試験体移設準備 7 金 試験体移設 8 土 計測再開 6 木 ご該体体設 9 日 7 F · 3 F 2 5 7 設置 10 月 7 F · 3 F 2 5 7 設置 11 人 1 12 水 1 13 木 1 14 金 1 15 土 1 16 日 1 17 月 加振実験 20 木 加振実験 21 金 1 22 土 1 23 日 1 24 月 1 22 土 1 23 日 1 24 月 1 27 木 1 28 上 28 ± 29 土 1 30 日 1		21	木		
23 日 25 月 26 人 27 水 28 木 29 金 3 月 3 月 4 火 5 水 5 水 6 木 6 木 7 金 8 土 11 火 12 エ 13 月 14 ム 15 ⊥ 13 Λ 11 火 12 Λ 13 Λ 14 Δ 15 ⊥ 16 Π 17 月 18 Λ 19 Λ 20 Λ 21 Δ 22 ⊥ 23 Π 24 Λ 25 火 26 Λ 27 Λ 28 Δ 29 1 30 Π 31 Π		22	金		
25月 27水 28木 28米 28木 28米 29金 計測中断·再開,地震計移動 1 土 1 3月 4 4火 計測中断 6木 試験体移設準備 7金 試験体移設 6木 試験体移設 7金 試験体移設 9日 7F·8Fスラブ設置 11火 7F·8Fスラブ設置 13木 1 14金 1 15 土 1 16日 加振実験 17月 加振実験 18火 加振実験 21金 加振実験 21金 加振実験 21金 10 21金 10 17月 10 18次 10 17月 10 17月 10 17月 10 17月 10 18次 10 21金 10 21金 <t< td=""><td></td><td>24</td><td>日</td><td></td><td></td></t<>		24	日		
20 次 23 金 29 金 計測中断·再開, 地震計移動 1 ±		25	月		
28 木 29 金 計測中断·再開, 地震計移動 1 土 2 日 3 月 4 火 5 水 6 木 7 金 10 月 11 火 12 水 13 木 14 ム 15 土 16 日 17 月 18 火 19 ۲ 22 1 23 1 24 1 25 1 26 1 27 エ 28 27 29 1 31 月		20	水		
29 金 訂測中町・均面・「均面・」 地蔵計移動 2 日		28	大		
2 日 3 月 4 火 5 水 6 木 7 金 8 ± 9 日 0 月 11 火 12 水 13 Λ 14 Δ 15 ± 16 Π 17 月 18 火 19 Λ 11 Δ 12 Δ 14 Δ 15 ± 16 Π 17 Π 18 Λ 19 Λ 11 Π 12 Δ 13 Δ 14 Δ 15 ± 19 Λ 11 Π 11 Π 12 Δ 13 Π 14 Δ 19 Λ 11 Π 12 Δ 13 Π 14 Δ 15 Ξ 18 Λ 19 <		29	並	<u>一 計測中断 円 川 地震計移動</u>	
3 7 1 6 x 1 6 x 1 6 x 1 7 1 1 8 ± 1 9 1 7 10 7 1 11 1 7 12 x 1 13 x 1 14 1 1 15 1 1 16 1 1 18 X 1 19 x 1 20 1 1 21 2 1 23 1 1 24 1 1 25 ½ 1 26 27 1 28 23 1 31 1 1		2	B		
3 11.89 + 201 6 計測再開 6 11.89 + 201 7 11.89 + 201 9 11.89 + 201 9 11.89 + 201 10 11.89 + 201 11 11.89 + 201 12 11.89 + 201 13 11.19 + 201 14 11.19 + 201 15 11.19 + 201 16 11.19 + 201 17 11.19 + 201 18 11.19 + 201 19 11.19 + 201 11 11.19 + 201 12 11.19 + 201 13 11.19 + 201 14 11.19 + 201 15 11.19 + 201 16 11.19 + 201 17 11.19 + 201 18 11.19 + 201 19 11.19 + 201 11.19 11.19 + 201 11.19 11.19 + 201 11.19 11.19 + 201 11.19 11.19 + 201 11.19 11.19 + 201 11.19 11.19 + 201 11.19 11.19 + 201 11.19 11.19 + 201 11.19 11.19 + 201 11.19 11.19 + 201 11.19 11.19 + 201		3	月火		
6 木 試験体移設準備 7 金 試験体移設 9 0 0 10 月 7F·8Fスラブ設置 10 月 7F·8Fスラブ設置 11 火 1 12 水 1 13 木 1 14 ム 1 15 1 1 16 1 1 17 月 1 18 火 1 19 水 1 20 木 1 21 金 1 22 1 1 23 1 1 24 月 7F·6Fスラブ撤去 25 火 計測終了 26 水 27 木 28 29 29 1 30 1 31 月		5	水		
1 1 </td <td></td> <td>6</td> <td>太</td> <td></td> <td>試験体移設準備 I試験体移設</td>		6	太		試験体移設準備 I試験体移設
3 日 7F・8Fスラブ設置 10 月 11 11 火 12 13 木 11 14 金 11 15 1 11 16 11 17 月 18 火 19 水 20 木 21 金 22 1 23 1 24 月 7F・6F2,27撤去 25 火 23 1 24 1 25 火 26 × 27 × 28 29 30 1 31 月		8	<u>亚</u> 土	計測再開	<u>AUXW 体後の</u> 6Fスラブ設置
10月 11火 11火 12水 13木 14金 14金 15± 15± 16日 17月 11 18火 11 19水 11 112× 11 12× 11 13× 11 14金 11 15± 11 16日 11 17月 11 18火 11 19× 11 11 11 12× 11 11 11 11 11 12× 11 13× 11 19× 11 19× 11 19× 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 12× 11 13× 11 14 11 15× 11 15× 11 15× 11 15× 11 15× 11 15× 11 15× 11 15× 11 15× <t< td=""><td></td><td>9</td><td>H</td><td></td><td>7F·8Fスラブ設置</td></t<>		9	H		7F·8Fスラブ設置
3 12 水 小 13 木 14 金 15 ± 15 16 日 17 月 17 月 加振実験 18 火 加振実験 19 水 加振実験 20 木 11 21 金 11 22 ± 11 23 日 11 24 月 7F·6F2.57撤去 25 火 計測終了 26 水 11 27 木 11 28 金 11 30 日 11 31 月 11		11	火		
3 13 个 14 金 15 ± 15 ± 16 日 17 月 18 火 加振実験 19 水 加振実験 20 木 11 金 21 金 11 金 22 ± 11 金 23 日 8FZ57撤去 24 月 7F·6FZ57撤去 25 火 計測終了 26 水 11 月 29 ± 11 月 30 日 11 月		12	水		
3 15 土 16 日 加振実験 17 月 加振実験 19 水 加振実験 20 木 0 21 金 加振実験 22 土 0 23 日 8Fスラブ撤去 24 月 7F・6Fスラブ撤去 25 火 計測終了 26 水 1 29 土 1 30 日 1 31 月 1	1	13 14	<u>不</u> 金		
3 16 日 17 月 加振実験 18 火 加振実験 19 水 加振実験 20 木 10 21 金 11 22 土 11 23 日 8 24 月 7 25 火 計測終了 26 水 11 29 土 11 30 日 11 31 月 11		15	Ť		
11 12 18 火 19 水 20 木 21 金 21 金 21 金 23 日 24 月 25 火 26 水 27 木 28 金 30 日 31 月	3	16			加振空験
19 水 加振実験 20 木 21 金 22 土 23 日 23 日 23 日 24 月 25 火 26 水 27 木 28 金 30 日 31 月		18	ノ火		
21 金 加振実験 22 ± 23 日 23 日 8Fスラブ撤去 24 月 7F・6Fスラブ撤去 25 火 計測終了 26 水 6 27 木 6 28 金 9 30 日 9 31 月 9		19	水		加振実験
22 土 8Fスラブ撤去 23 日 8Fスラブ撤去 24 月 7F・6Fスラブ撤去 25 火 計測終了 26 水 6 27 木 6 29 土 1 30 日 1 31 月 1		21	金		
24月 8F 2 5 7 撤去 25火 計測終了 26水 1 27木 1 28金 1 29土 1 30日 1		22	±		
25 火 計測終了 26 水 27 木 28 金 6 29 ± 100 日 30 日 100 日		23	日	↓ ↓	<u>8+スラフ徹去</u> 7F・6Fスラブ撤去
26 水 27 木 解体 28 金 100 -		25	火	計測終了	
1 1 </td <td> </td> <td>26</td> <td>水木</td> <td></td> <td></td>		26	水木		
29 土 30 日 31 月		28	金		用牛14
31月	1	29			
		30	月		

表3 試験建物の建設工程および実験工程

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り、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。

試験建物の各部位に設置

計測基地にまとめて設置

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 1Volt=1cm/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±254cm/s/s(=gal)に相当し、 100 倍としたときは測定範囲±25.4cm/s/s、1000 倍としたときには測定範囲±2.54 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. 1 1 V/m · s ⁻² ± 1 0 %				
測定範囲	$\pm~2~0$ 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 H z				
直線性	0.1%				
温度による感度変動	約0.4%/℃				
出力抵抗	約2.5kQ	約20kQ			
テストコイル抵抗	約500	Ω			
温度範囲	$-2 0 \sim +5$	5 0 °C			
耐水性	防滴構造				
(曲田雲源(増幅盟左)	006P乾電池(標準付属) 若しくは				
使用电源 (增幅舔有)	±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2kg	;			

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	3 2 c h
分解能	24ビットまたは16ビット
	最低 25Hz
サンプルレート	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	6 4 倍オーバーサンプリングΔΣ方式
アンチエリアシングフィル	産産 国本教 の 4 5 2 5 5 5
Я	遮断周波数 0.4535FS
(フェーズリニア型)	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	オフセットエラー ±300µV Typ.
(24ビット使用時)	(キャリブレーション実施時)
	オフセット温度特性 4ppm/℃
	ゲインエラー ±0.03% TyP.
	歪率 >106dB Typ THD+N
入力電圧	±2. 56VOLT FS

表 6 DC アンプの仕様

チャンネル数	1 6
入力形式	直結型シングル入力
入力抵抗	約1 M 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	$D C \sim 1 K H z$ + 1 d B \sim - 3 d B
	10Hz、20Hz、50Hz、100Hz、W/B
	(-24dB/oct ベッセル型)
最大許容入力電圧	\pm 5 0 V
安定度	±10mV/℃ 以内
雑音	100mVp-p 以内
出力	\pm 5 V 、 \pm 5 mA
使用環境	気温0~40℃、湿度20~85%RH
電源	A C 1 0 0 V \pm 1 0 %

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。

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 ヘルスモ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一その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

発表成果(発表題目、口	発表者氏名	発表場所	発表時期	国内・外
頭・ポスター発表の別)		(学会等名)		の別
振動台実験におけるエ	島田侑、佐藤	広島大学	2008年9月	国内
ネルギーの釣合の検証	大樹、北村春	2008年度日本建築		
ー高層建物の耐震性評	幸、長江拓	学会大会(中国)		
価に関するE-ディフェ	也、福山國			
ンス実験-その9	夫、梶原浩			
口頭発表	一、井上貴			
	仁、中島正愛			
常時微動計測に基づく	森本真史、金	広島大学	2008年9月	国内
高層建物試験体の固有	澤健司、佐藤	2008年度日本建築		
振動数の評価	大樹、北村春	学会大会(中国)		
ー高層建物の耐震性評	幸、長江拓			
価に関するE-ディフェ	也、福山國			
ンス実験-その11	夫、梶原浩			
口頭発表	一、井上貴			
	仁、中島正愛			

学会等における口頭・ポスター発表

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、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定
 - 1)特許出願

なし

2) ソフトウエア開発

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。