

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	2080 E-ディフェンス実験における高層建物試験体の累積損傷評価：その1 実験結果に基づくエネルギー吸収量の算定(構造)
Title	
著者(和文)	島田 侑, 大内 隼人, 佐藤 大樹, 長江拓也, 北村春幸, 福山 國夫, 梶原浩一, 井上 貴仁, 中島正愛
Authors	daiki sato, Haruyuki Kitamura, Koichi Kajiwara, Masayoshi NAKASHIMA
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集 I, , No. 79,
Citation(English)	, , No. 79,
発行日 / Pub. date	2009, 2
rights	日本建築学会
rights	本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
relation	isVersionOf: <a href="http://ci.nii.ac.jp/naid/110007453933">http://ci.nii.ac.jp/naid/110007453933</a>

## E-ディフェンス実験における高層建物試験体の累積損傷評価

### その1 実験結果に基づくエネルギー吸収量の算定

正会員 ○ 島田侑<sup>\*1</sup>      準会員      大内隼人<sup>\*1</sup>      正会員      佐藤大樹<sup>\*1</sup>  
 同      長江拓也<sup>\*2</sup>      同      北村春幸<sup>\*1</sup>      同      福山國夫<sup>\*2</sup>  
 同      梶原浩一<sup>\*2</sup>      同      井上貴仁<sup>\*2</sup>      同      中島正愛<sup>\*2</sup>

#### 構造—振動

高層建物      長周期地震動      震動台実験

エネルギー      損傷評価

#### 1. はじめに

東海・東南海・南海地震は、今後30年以内に70%程度という高い発生確率でM7程度の地震が南関東において発生すると予測されており、切迫性が高く発生した際の被害も甚大である。しかし超高層建物は、今まで巨大地震の被災経験がなく、実大規模での実験も行われていない。そこで、2008年3月に実大三次元震動破壊実験施設(E-ディフェンス)において、初期(1965年~1980年)高層建物を再現した7層縮約試験体を用いた実大規模実験が行われた<sup>1)</sup>。実験では、名古屋三の丸地区で想定されている長周期地震動三の丸波入力時に梁端が破断した。

そこで、本報その1では、実験から得られたデータをもとに、梁端破断に至るまでのエネルギーの累積値に着目して応答を評価する。全加振を対象として各加振ごとのエネルギーについて検証を行い、層ごとの応答は地震動を用いて行った100%加振、部材での応答は三の丸波入力時までについて検証する。その2では、解析モデルとの比較を行い、実験で計測できていない梁端エネルギーの算出を行い部材レベルでの詳細なエネルギーの釣合いを検証する。

#### 2. 実験概要

##### 2.1 試験体概要

試験体軸組図を図1に、使用部材断面を表1に示す。試験体は、初期の高層建物の統計資料をもとに、標準的な21層モデル(高さH=81m, 1次固有周期T=2.4s)を想定し作成され、また、試験体がE-ディフェンス震動台において加振可能な規模に縮約されている<sup>1)</sup>。試験体は下層4層を実大規模架構とし、5~7層はコンクリート錘で5層分の重量を持たせたものを3層積層し、積層ゴムとダンパーを用いてそれぞれ5層分の復元力特性を再現させている(縮約層と呼ぶ)。これにより、試験体を高層建物並みに長周期化している。短辺方向は柱・梁が現場溶接されたハニカム梁を使用し、長辺方向は工場溶接で施工されている。計測機器は、図2に示す位置に加速度センサ・変位センサを設置している(その他の計測機器については、文献1)参照)。

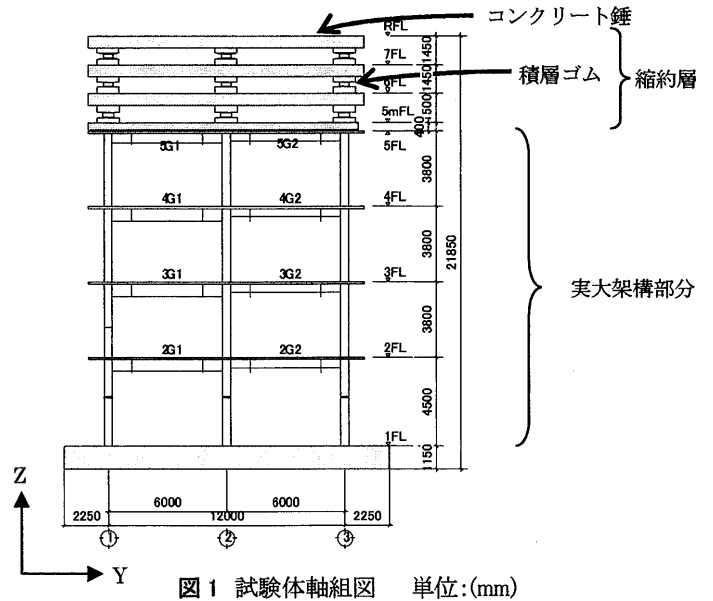


図1 試験体軸組図 単位:(mm)

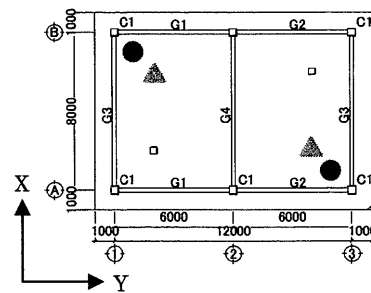


図2 計測センサ設置位置 単位:

表1 部材断面

柱	C1	□-400x400x25
梁	G1	5FL H500x200x9x16 4-2FL H-600x200x8x19
	G2	H-400x200x8x13
	G3	5FL H-650x199x9x14 4-2FL H-800x199x10x15
	G4	H-400x200x8x13

● 加速度センサ  
 ▲ 変位センサ

##### 2.2 加振概要

試験体への加振は全37回(表2)行っており、ホワイトノイズ・パルス波・スイープ波を用いて試験体特性を把握し、地震動は、標準波のElcentroレベル2地震動(最大速度を50kineに基準化)(ElLv2)、長周期地震動である東京気象庁波(TOK)、東京東扇島波(HOG)、名古屋三の丸波(SAN)を用いて2方向同時入力を行った。入力方向は、TOK, ElLv2, HOGは短辺(X方向)に方向EW成分、長辺(Y方向)方向にNS成分、SANは短辺方向にNS成分、長辺方向にEW成分を入力している。三の丸波2方向入力で短辺方向の梁が破断した後は、長辺方向のみの加振を2回行い長辺方向の梁端を破断させた。

### 3. 実験結果におけるエネルギーの算出方法

#### 3.1 入力エネルギーと各層の吸収エネルギーの算出

時刻  $t$  のときの入力エネルギー  $E(t)$  は、下式で求まる。

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

ここで、 $N$ : 層数,  $x_i$ :  $i$  層の相対変位,  $m_i$ :  $i$  層の質量,  $z_0$ : 地動変位である。また、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  $\delta_i$  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。

$$Q_i = \sum_{j=i}^N m_j \ddot{X}_j, \quad W_i(t) = \int_0^{\delta_i(t)} Q_i d\delta_i \quad (2a, b)$$

ここで、 $\ddot{X}_i$ :  $i$  層の絶対加速度である。全層の吸収エネルギー  $W(t)$  は、下式で求まる。

$$W(t) = \sum_{i=1}^N W_i(t) = \sum_{i=1}^N \int_0^t \dot{x}_i m_i \ddot{X}_i dt \quad (3)$$

ここで求まる  $W(t)$  には、減衰により吸収されるエネルギーも含まれている。なお、 $\dot{x}_i$  は、各層で計測された絶対加速度  $\ddot{X}_i$  に 0.1Hz~7Hz の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、震動台加速度  $\ddot{z}_0$  から算出した速度  $\dot{z}_0$  を引くことで得ている。

さらに、エネルギーの釣合い式

$$W_{ek}(t) + W_h(t) + W_{es}(t) + W_p(t) = E(t) \quad (4)$$

より、地震終了時刻  $t=t_0$  においては  $W_{ed}(t_0) = 0$  であり、 $E(t_0) = W(t_0)$  となることから、 $E(t_0)$  と  $W(t_0)$  を比較することにより計測記録の精度を把握することができる。

#### 3.2 梁端の吸収エネルギーの算出

図3のように貼付されたひずみゲージと変位計から、梁端モーメントおよび回転角を算出する。各ひずみゲージの計測値  $\varepsilon_k$ 、ヤング係数  $E$  を用いて、応力度  $\sigma_k$  を以下の式で求める。

$$\sigma_k = \varepsilon_k \cdot E \quad (5)$$

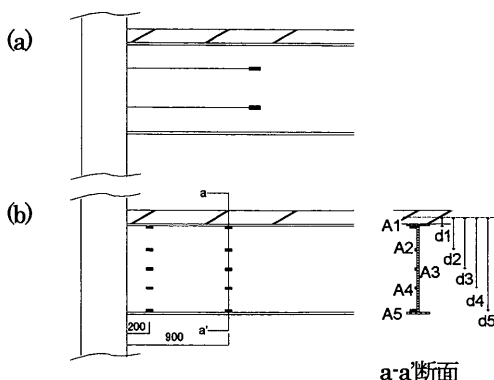


図3 (a) 変位計, (b) ひずみゲージ取付位置

求めた応力度がそれぞれの負担面積  $A_k$  ( $k=1\sim 5$ ) に様に分布すると仮定し、 $\sigma_k$  に  $A_k$  を乗じることにより負担加重  $P_k$  を求める。次にスラブ中心からの距離  $d_k$  を乗じることでゲージ貼付位置のモーメントを算出する。このようにして得られた断面の曲げモーメントから梁のせん断力を求め、梁端接合部 (フェイス位置) でのモーメントを算出する<sup>2)</sup>。この梁端モーメントと回転角関係の履歴面積を梁端の塑性吸収エネルギーとする。現場溶接 (ハニカム梁)・工場溶接の梁それぞれ2箇所のみ、弾性範囲と梁端部に歪みゲージを貼付しており、2つの記録から求まるモーメントの比較を行った。その結果、すべての現場溶接の梁については弾性範囲に貼付されている歪みゲージから求まる値に補正係数 1.29 を乗じている。

算出に用いた加速度・変位記録は、地震応答時の 1F, RF の加速度の伝達関数から固有振動数を求め、5 次以上 (約 7Hz) の高次振動数の影響が小さいと考え、計測記録には 0.1Hz~7Hz のフィルターをかけている。また、図2に示す計測機器2箇所の加速度・変位記録の平均値でエネルギーを算出し、入力加速度としては試験体コンクリート基礎上の加速度を用いる。地震動4波 100%加振時の試験体基礎上で計測された加速度記録を用いて描いた、速度応答スペクトル・エネルギースペクトルを図4に示す。

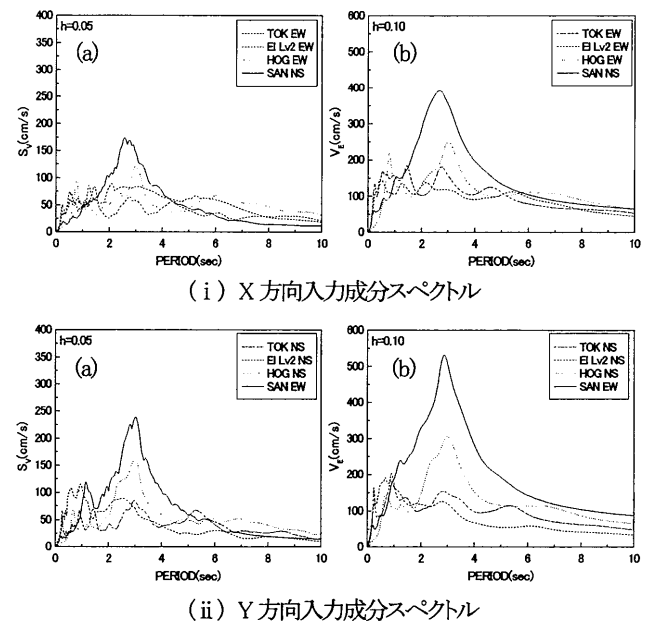


図4 入力地震波の(a) 速度応答スペクトル, (b) エネルギースペクトル

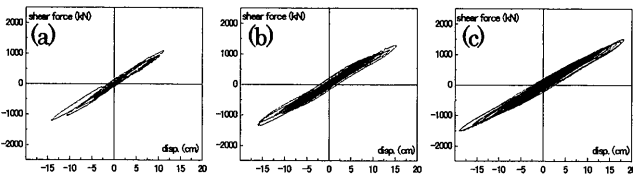
### 4. 実験結果

#### 4.1 入力エネルギーと吸収エネルギーの釣合い

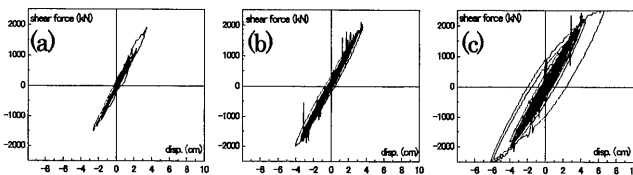
EILv2, HOG, SAN 入力時の2層と6層の履歴曲線 (長辺方向) を図5に示す。 $W(t_0)$  を求める際にはこの履歴面積を算出している。各加振ごとの  $E(t_0)$ ,  $W(t_0)$  のエネルギー量を表2に、各加振ごとの  $E(t_0)$ ,  $W(t_0)$  を合計していったものの変化のグラフを図6に示す。表より、

表2 各加振時入力エネルギー・吸収エネルギー

event	入力波	入力方向	X dire.					Y dire.				
			Max Acc. (gal)	W(t <sub>0</sub> ) (kJ/m)	ΣW(t <sub>0</sub> ) (kJ/m)	E(t <sub>0</sub> ) (kJ/m)	ΣE(t <sub>0</sub> ) (kJ/m)	Max Acc. (gal)	W(t <sub>0</sub> ) (kJ/m)	ΣW(t <sub>0</sub> ) (kJ/m)	E(t <sub>0</sub> ) (kJ/m)	ΣE(t <sub>0</sub> ) (kJ/m)
1	W-1	2方向	79	101	101	79	79	88	104	104	74	74
2	W-2	2方向	178	413	514	327	406	182	407	510	309	383
3	W-3	2方向	287	966	1480	775	1181	283	969	1480	748	1131
4	LP-X1	X方向	26	9	1489	9	1190	0	0	1480	0	1131
5	LP-X2	X方向	61	37	1525	35	1225	0	0	1480	0	1131
6	LP-X3	X方向	91	83	1609	81	1306	0	0	1480	0	1131
7	LP-Y1	Y方向	0	0	1609	0	1306	68	46	1526	37	1168
8	LP-Y2	Y方向	0	0	1609	0	1306	105	95	1621	85	1253
9	HOG 30%	2方向	53	108	1716	97	1403	58	128	1749	110	1363
10	HOG 50%	2方向	91	295	2011	291	1694	90	412	2161	383	1746
11	SAN 20%	2方向	30	232	2243	181	1874	42	216	2377	177	1923
12	SAN 35%	2方向	59	741	2984	560	2434	81	669	3047	560	2483
13	EL Lv2 30%	2方向	83	115	3099	105	2539	146	69	3115	58	2540
14	EL Lv2 50%	2方向	144	271	3370	265	2804	230	183	3298	165	2705
15	W-1	2方向	78	94	3463	77	2881	83	103	3401	73	2778
16	W-2	2方向	180	416	3879	339	3220	183	435	3836	334	3112
17	S-twosway Y1	Y方向	0	0	3879	0	3220	16	71	3907	61	3173
18	S-twosway Y2	Y方向	0	0	3879	0	3220	27	298	4205	264	3437
19	S-twosway X1	X方向	15	64	3943	61	3281	0	0	4205	0	3437
20	S-twosway X2	X方向	28	266	4209	256	3538	0	0	4205	0	3437
21	TOK 60%	2方向	268	157	4366	139	3677	150	207	4412	183	3620
22	TOK 100%	2方向	477	473	4839	402	4078	279	563	4975	502	4122
23	EL Lv2 100%	2方向	286	612	3431	654	4732	452	641	5615	611	4733
24	W-1	2方向	80	95	3546	76	4808	84	104	3719	72	4805
25	W-2	2方向	182	420	3967	340	3148	182	433	6152	338	5142
26	HOG 100%	2方向	193	1130	7097	1240	6388	156	2832	8984	2798	7940
27	W-1	2方向	77	106	7203	82	6471	84	107	9091	79	8019
28	W-2	2方向	175	423	7626	343	6814	182	433	9524	349	8368
29	SAN 100%	2方向	198	6698	14324	6416	13230	245	6318	15842	6006	14374
30	W-1	2方向	79	104	14427	88	13318	86	106	15948	86	14460
31	W-2	2方向	173	429	14856	362	13680	184	417	16365	356	14816
32	SAN 100%	Y方向	0	0	14856	0	13680	236	6042	22407	5879	20696
33	W-1	2方向	75	99	14955	85	13765	84	104	22511	86	20782
34	W-2	2方向	177	404	15359	342	14107	186	409	22921	346	21128
35	SAN 100%	Y方向	0	0	15359	0	14107	241	6085	29006	5920	27048
36	W-1	2方向	77	102	15462	86	14193	84	102	29107	81	27129
37	W-2	2方向	175	409	15871	344	14537	185	394	29501	320	27449



(i) 6層履歴曲線



(ii) 2層履歴曲線

図5 層せん断力-層間変形関係 (長辺方向)

(a) EL Lv2, (b) HOG, (c) SAN

全加振終了時のΣW(t<sub>0</sub>)とΣE(t<sub>0</sub>)の比は、X方向で1.09倍、Y方向で1.06倍と概ねよい対応を示している。入力が小さな加振でのW(t<sub>0</sub>)とE(t<sub>0</sub>)の誤差は若干大きいですが、地震動を用いて行った加振では、誤差が小さい。これは、入力が小さいと相対的に誤差の割合が大きくなったためと考えられる。また、入力エネルギーの速度換算値V<sub>E</sub>を次式で求める。

$$V_E = \sqrt{2E(t_0) / \sum m_i} \quad (6)$$

地震動4波100%加振時(表2 灰色部分)について長辺方向のE(t<sub>0</sub>)からV<sub>E</sub>を求めると、それぞれTOK 106.2(cm/s), EL Lv2 116.6(cm/s), HOG 249.6(cm/s), SAN 365.7(cm/s)となり、V<sub>E</sub>スペクトル(図4(b)-(ii))の試験体1次固有周期T=2.13のときの値とよい対応を示していることがわかる。これらの結果より入力エネルギーと

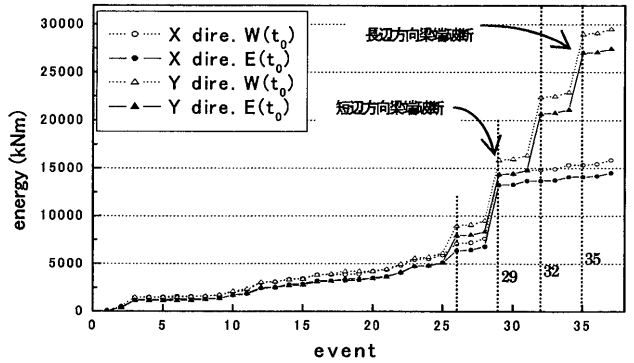


図6 エネルギーの変化

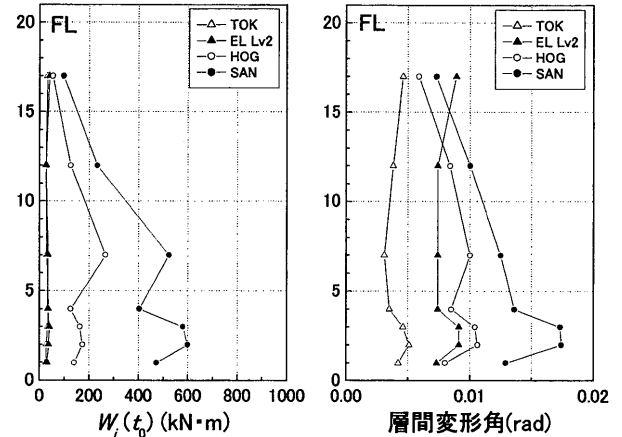


図7 W<sub>p</sub>(t<sub>0</sub>)・最大層間変形角の高さ方向の分布

吸収エネルギーが釣合っており、精度良く変位・加速度が計測されていることが確認できる。

#### 4.2 吸収エネルギーと最大層間変形角の高さ方向の分布

地震動を用いて2方向入力を行った加振のうち100%加振について吸収エネルギーW(t<sub>0</sub>)と最大層間変形角の高さ方向の分布を図7に示す。縮約層のW(t<sub>0</sub>)、最大層間変形角は5層分の平均値を示し、想定した21層モデルと等価な層にプロットしている。長周期地震動であるHOG、SAN入力時では、下層から中層にかけてW<sub>p</sub>が大きくなる傾向がわかる。変形でも下層から中層にかけて大きな応答を示している。4層で2つの応答値が小さくなっているのは、4階上梁にとりつくスラブとコンクリート錘の影響により2、3層に比べ剛性が上昇したためと考えられる。図示はしていないが、この剛性上昇は履歴曲線からも確認している。

#### 4.3 層ごとのエネルギーの累積値に着目した応答評価

(2b)式より求まる層のエネルギーに着目して、層の塑性率μ、累積塑性変形倍率ηを算出する。

塑性率μ、累積塑性変形倍率ηの算出では、JASC性能メニュー表の性能判断基準値表<sup>3)</sup>の建物挙動の損傷限界である、層間変形1/200(0.005rad)を降伏変形δ<sub>y</sub>とし、この時の層せん断力をQ<sub>y</sub>として用いる。Q<sub>y</sub>を算出する際の各層の剛性は、弾性範囲内の加振(TOK 60%, EL Lv2 30%, HOG 30%, SAN 20%)の履歴曲線に近似曲線を描き、その傾きから求めた。縮約層は、履歴曲線から求まる剛

性を5層分の平均の剛性を直列バネでつなげたものと考え、5倍することで5層分の中心の層の剛性とした。ただし、縮約層の積層ゴムの変形の程度により層の剛性が大きく変化しているのが履歴曲線から確認できたので、積層ゴムのせん断歪が100%を超える加振 (EI Lv2, HOG, SAN の100%加振) については別に、剛性を求めることとした。各層の履歴吸収エネルギー $W_i(t_0)$ を、これらの $\delta_{yi} \cdot Q_i$ の値で除すことにより $\eta_i$ を求める。地震動を用いて2方向入力を行った100%加振について長辺方向の $\mu_i$ 、 $\eta_i$ の高さ方向の分布を図8に示す。図より、 $W_i(t_0)$ と層間変形角の分布と同様に $\mu_i$ 、 $\eta_i$ も長周期地震動では中層から低層にかけて応答値が大きくなる傾向が確認できる。また、EI Lv2とHOGの応答を比較すると、 $\mu$ は同程度の応答を示しているのに対して2層の $\eta$ では4.7倍の値を示しており、長周期地震動の繰り返しの揺れにより大きな累積損傷を受けていることが確認できる。

4.4 部材ごとのエネルギーの累積値に着目した応答評価

SAN2 方向入力時までに着目して、梁端モーメント一回転角関係の履歴面積から求まる塑性履歴エネルギー $W_{pi}$ から、部材の累積塑性変形倍率 $\eta$ を算出する。 $\eta$ は次式により求まる。

$$\eta_i = \frac{W_{pi}}{M_{pi} \cdot \theta_{yi}} \quad (7)$$

ここで、 $M_p$ : 部材端部の全塑性モーメント、 $\theta_y$ : 部材端部の全塑性モーメントに対する弾性限回転角である。 $M_p$ は、部材断面から決定される塑性断面係数 $Z_p$ と応力度 $\sigma$ の公称値を1.1倍して求めた値をさらに、実大架構の静的実験<sup>2)</sup>の結果を参考に合成梁の降伏強度として1.2倍した値を用いることとした。梁端の剛性を梁端モーメント一回転角の履歴曲線から求め、これらの値より $M_p$ の時の $\theta_y$ を求め、部材の累積塑性変形倍率 $\eta$ を算出する。図9に評価した梁の位置を、図10に $\eta$ の応答値を示す。実験では、SAN2 方向入力時に3AB 位置の梁が破断した。破断した梁については、その時刻までのエネルギーを算出している。

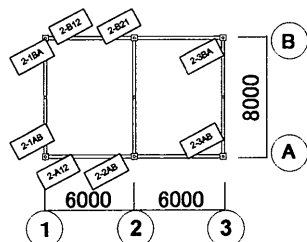


図9 評価した梁端部の名称

図より、現場溶接と工場溶接を比較すると、 $\eta$ は工場溶接の梁の方が値は大きい破断には至っていない。現場溶接の梁で破断に至った梁は $\eta = 17\sim 24$ の時に破断していることがわかる。

5. まとめ

E-ディフェンスで行われた高層建物の震動台実験についてエネルギーの累積値に着目した応答評価を行った。

- 1) 震動台実験におけるエネルギーの釣合いの成立が確認できた。
- 2) 最大応答値が同程度でも、継続時間の長い長周期地震動では

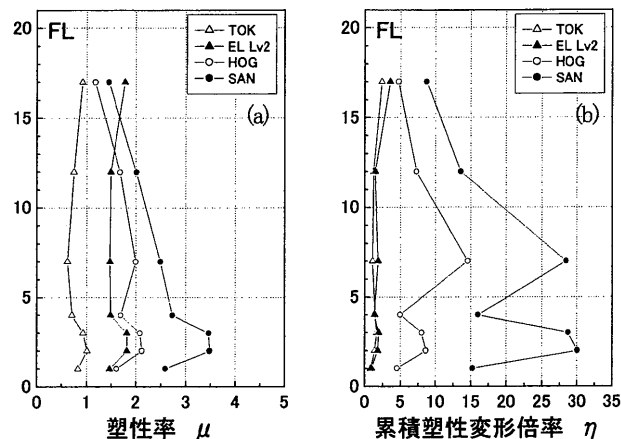


図8 (a) 塑性率 $\mu$ , (b) 累積塑性変形倍率 $\eta$ の高さ方向の分布

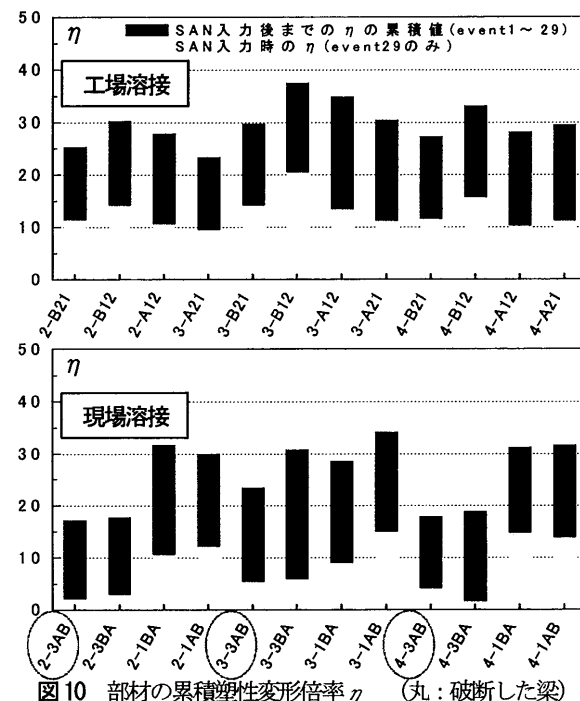


図10 部材の累積塑性変形倍率 $\eta$  (丸: 破断した梁)

繰り返しの揺れにより、4.5倍のエネルギーが入力される (EI Lv2 とHOG 長辺方向比較時)。

- 3) 現場溶接の梁については $\eta$ が20前後で破断に至った。

謝辞

本研究は、文部科学省が推進する「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト/長周期地震動による被害軽減対策の研究開発」の一環として、防災科学技術研究所からの委託を受けた東京理科大学が実施したものである。

参考文献

- 1) 長江拓也, 他: 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1—11, 日本建築学会大会学術講演要覧集, C-1, pp.823-832, pp.873-884 2008.9
- 2) 松宮 智央・吹田 啓一郎・中島 正愛・劉 大偉・周 鋒・溝淵 裕也: 大変形繰り返し載荷下における鋼梁の履歴特性に及ぼすRC床スラブの影響—RC床スラブ付き鋼構造部分構造実大実験—, 日本建築学会構造系論文集, 大 598 号, pp.141-147, 2005.12.
- 3) (社) 日本建築構造技術者協会編: 建築の構造設計, 第4編目標性能と性能メニュー, オーム社, 2002.7

\*1 東京理科大学

\*2 (独) 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター