

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	2046 E-ディフェンス実験に基づくエネルギー法を用いた損傷配分評価(構造)
Title	
著者(和文)	大下 優作, 佐藤 大樹, 北村春幸, 長江拓也
Authors	daiki sato, Haruyuki Kitamura
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Vol. 81, No. 0,
Citation(English)	, Vol. 81, No. 0,
発行日 / Pub. date	2011, 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: http://ci.nii.ac.jp/naid/110008730286

E-ディフェンス実験に基づくエネルギー法を用いた損傷配分評価

構造—振動

正会員 ○ 大下優作^{*1} // 佐藤大樹^{*1} // 北村春幸^{*1}
// 長江拓也^{*2}

高層建物 長周期地震動 震動台実験
エネルギー法

1. はじめに

大都市に建設されている超高層建物が海溝型の巨大地震によって発生する長周期地震動を受けた場合、建物に入力されるエネルギーは、これまでの設計で標準的に用いられていた検用地震動の値を大きく上回る可能性が指摘されている。東京、名古屋、大阪などの大都市を中心に数多く存在する超高層建物は、社会の中核機能を担っているものが多く、長周期地震動がこれらの建物に与える影響は甚大である。

これまで、地震動に対する鋼構造建物の累積損傷を評価する方法としてエネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計法（以降エネルギー法と呼ぶ）がある¹⁾。エネルギー法とは、地震動による建物への

入力をエネルギーにより評価し、構造骨組の降伏層せん断力の最適分布に対する偏りに応じて各層に塑性履歴エネルギーを配分するものである。エネルギー法による損傷評価について解析的な検討が行われているもの^{2),3)}、実大規模の建物での検討は殆ど行われていない。

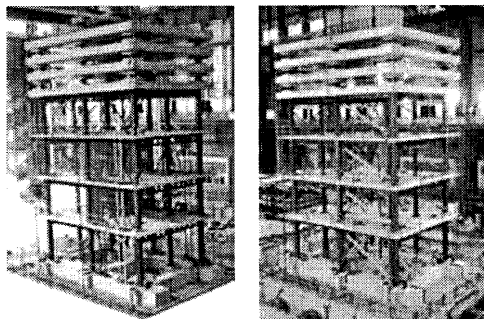
そこで本報では、実骨組を使った2007年度、2009年度の2つの実験から、建物の各層が吸収したエネルギーの高さ方向分布に着目し、エネルギー法に基づく評価を行う。

2. E-ディフェンス震動台実験概要

2.1 震動大実験概要

2007年度E-ディフェンスにおいて、初期の超高層建物を模擬した実大規模の試験体で実験^{4),5)}が行われた（図1(a)）。実験中には、試験体が長時間繰り返し変形することにより柱梁接合部が破断し、超高層建物の長周期地震動への耐震性能向上の必要性が確認された。

このような背景のもと、2009年度に同試験体を用いて、ダンパーによる制振補強効果を検証する実験が行われた（図1(b)）。



(a) 2007年度 (b) 2009年度

図1 試験体写真

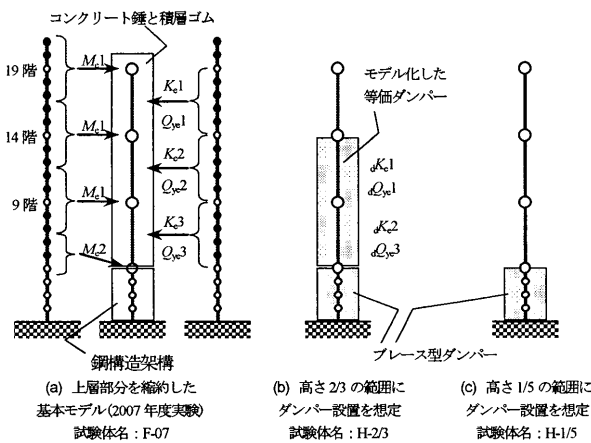


図3 実験条件と試験体名

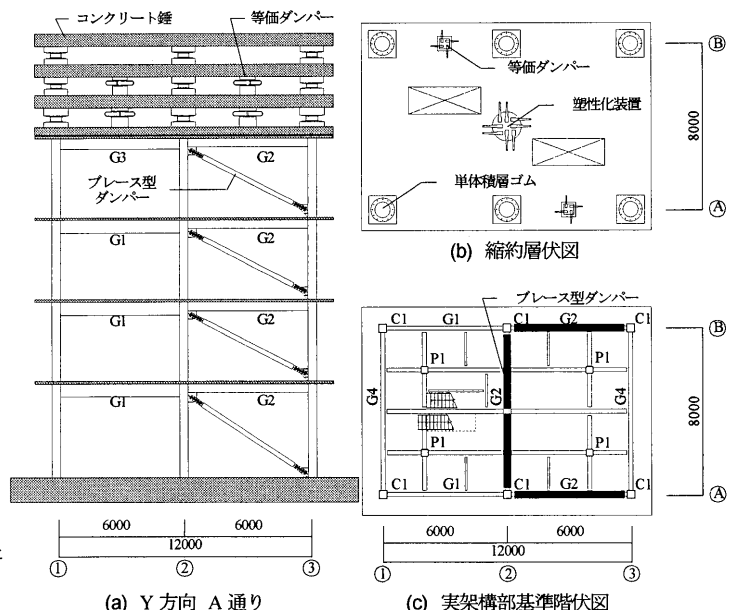


図2 試験体図

2.2 試験体及び入力概要

試験体は、初期 (1965-1980 年) の平均的な規模の高層建物として地上 21 階 (高さ $H=81\text{m}$, 1 次固有周期 $T=2.4\text{s}$) を想定する。しかし、E-ディフェンス震動台の制約上、全体を再現することは不可能なため、加振可能な規模まで縮約されている⁴⁾。

図 2 に試験体図を、各加振における試験体を図 3 に示す。各加振における試験体の名称をそれぞれ、2007 年度の試験体を F-07、2009 年度の試験体において、鋼製ダンパーを実梁部分と縮約層の 5、6 層に設置した試験体を H-2/3、鋼製ダンパーを実梁部分のみに設置した試験体を H-1/5 と定義する。

本報で用いた入力波は、標準波の El centro レベル 2 地震動 (最大速度を 50kine に基準化) (EL2)、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)、SAN08、SAN06 である。ここで、SAN08、SAN06 とは、SAN の時間軸を圧縮した波⁶⁾である。図 4 に、地震動の加速度波形を示す。

3. 実験値に基づくエネルギー評価

3.1 エネルギー算出方法¹⁾

以下に実験より各層の吸収エネルギーを算出する手法を述べる。

時刻 t のときの入力エネルギー $E(t)$ は、下式で求められる¹⁾。

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

ここで、 N : 層数、 $x_i(t)$: 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 $Q_i(t)$ 、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、それぞれ次式にて表される。

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

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

$$W(t) = \sum_{i=1}^N W_i(t) \quad (3)$$

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 $\dot{x}_i(t)$ は、各層で計測された絶対加速度 $\ddot{X}_i(t)$ に 0.1Hz ~ 10Hz 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。また、入力エネルギー $E(t)$ の速度換算値 V_E は、加振終了時刻 t_0 の $E(t_0)$ を用いて次式より求められる³⁾。

$$V_E = \sqrt{2E(t_0) / \sum_{i=1}^N m_i} \quad (4)$$

図 5、6 に、各地震動の (a) 速度応答スペクトル ($h=5\%$)、(b) エネルギー

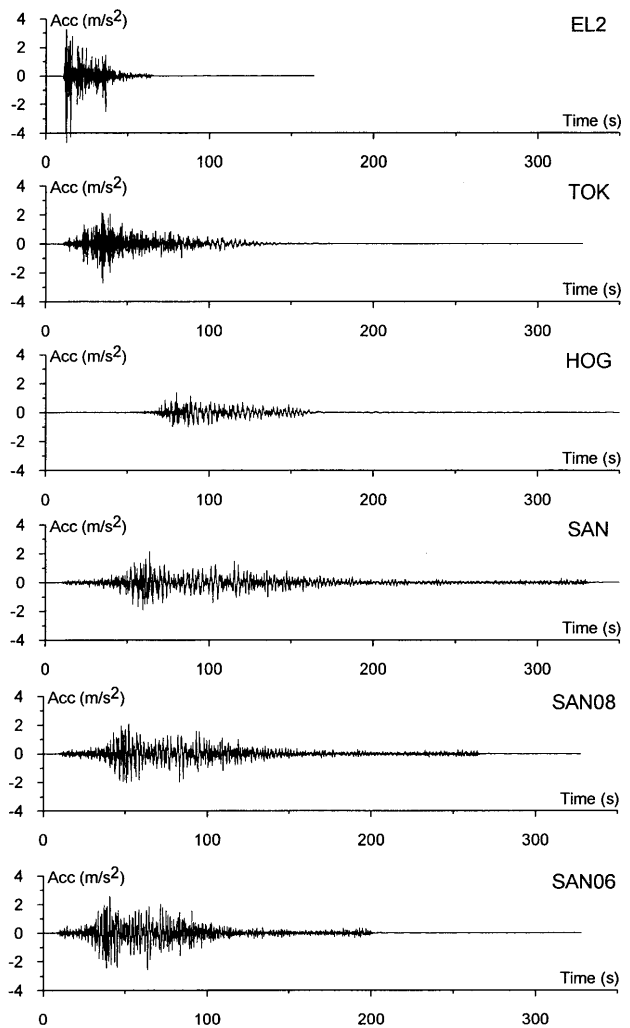


図 4 地震動の時刻歴波形

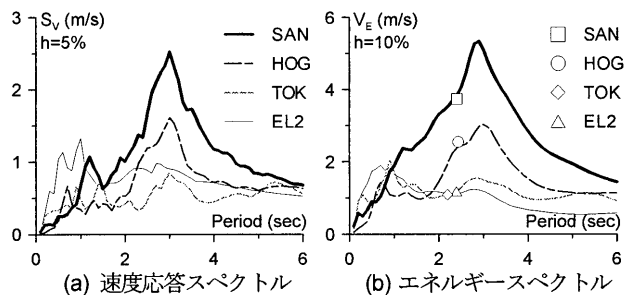


図 5 入力地震動のスペクトル

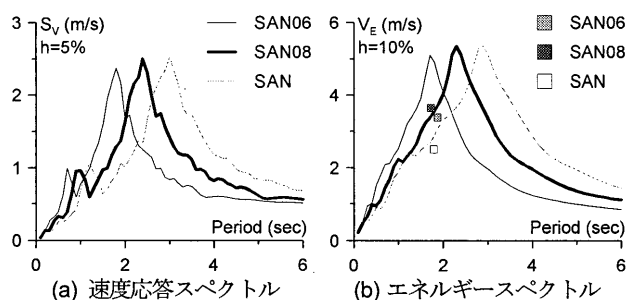


図 6 三の丸波縮小によるスペクトルの変動

表1 各試験体の入力地震動の違いによるエネルギー量の比較

	F-07				H-2/3						H-1/5				
	FL	EL2	TOK	HOG	SAN	EL2	TOK	HOG	SAN	SAN08	SAN06	EL2	TOK	HOG	SAN
W_i (kNm)	7	199	158	263	500	121	114	98	259	437	500	149	88	120	362
	6	126	130	628	1180	211	142	101	873	1506	1498	159	113	215	921
	5	173	151	1336	2633	215	112	116	1078	2325	1932	167	147	339	1680
	4	33	36	126	403	8	14	7	56	220	168	21	18	46	204
	3	40	36	164	576	14	24	8	104	326	239	37	27	77	293
	2	36	27	173	591	16	23	7	124	360	250	47	27	86	322
1	31	26	141	463	19	28	15	155	359	232	46	33	95	329	
E (kNm)		611	513	2825	6064	636	434	365	2721	5767	4967	650	438	987	4340
V_E (m/s)		1.19	1.09	2.55	3.74	1.21	1.00	0.92	2.50	3.65	3.38	1.22	1.00	1.51	3.16
T (s)		2.39	2.20	2.44	2.41	1.61	1.60	1.69	1.79	1.73	1.87	2.02	2.02	2.14	2.05

スペクトル($h = 10\%$)を示す。スペクトルは、各地震動入力時に試験体基礎上で計測された加速度記録を用いて描いている。なお、 V_E は各加振から得られた1FL, RFLの加速度の伝達関数から求めた1次固有周期でプロットしている⁹⁾。図5(b)より、エネルギースペクトルと V_E が一致することが確かめられる。これは、「1つの地震により構造物にもたらされる総エネルギー入力、主として、構造物の総質量および1次固有周期に依存し、構造物の強度、質量分布、剛性分布によらない安定した量である。」¹⁾という秋山の理論と一致する。図6(b)のSAN06において、 V_E がエネルギースペクトルを下回る結果となったのは、ダンパーの設置により試験体の長周期化したためスペクトルのピークを超え、入力エネルギーが減少したこと、さらに等価減衰の増大によりスペクトルが平滑化されたためだと思われる⁷⁾。

3.2 エネルギー算出結果

前章で述べた地震動入力時に得られた実験結果から、各試験体(F-07, H-2/3, H-1/5)における1次固有周期 T 、各層の吸収エネルギー量 W_i 、試験体全体に入力されたエネルギー量 E 、エネルギースペクトルの速度換算値 V_E を表1に示す。表1より各試験体における各層の吸収エネルギー量 W_i を図7に示す。図より、F-07のSANは、EL2に対して約10倍のエネルギーが入力された。特に5層では、約15ものエネルギーを吸収している。

3.3 試験体の損傷分布

ここでは、地震動の入力により、試験体が各層でどの程度損傷が集中するのかを確認する。損傷配分 $1/\gamma_i$ は次式のように表せる¹⁾。

$$\frac{1}{\gamma_i} = \frac{W_i(t)}{W(t)} \quad (5)$$

(5)式で算出した損傷配分 $1/\gamma_i$ を試験体別に図8に示す。図7, 8より、各試験体において入力されるエネルギー量は異なるが、損傷配分の高さ方向分布は地震動に依らず類似したことが確認できる。これは、建物に入力されるエネルギーは試験体の耐力に基づき各層に分配されるためである³⁾。H-2/3では6層までダンパーを設置したことにより、6層で負担するエネルギー量が多く分配される傾向が確認できる。

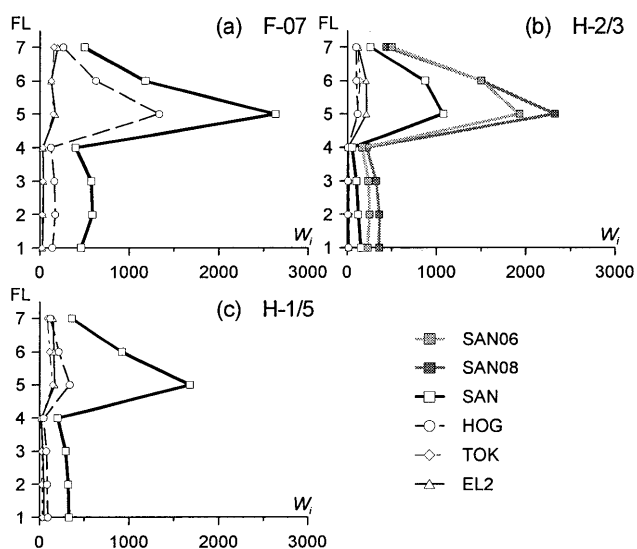


図7 吸収エネルギーの比較

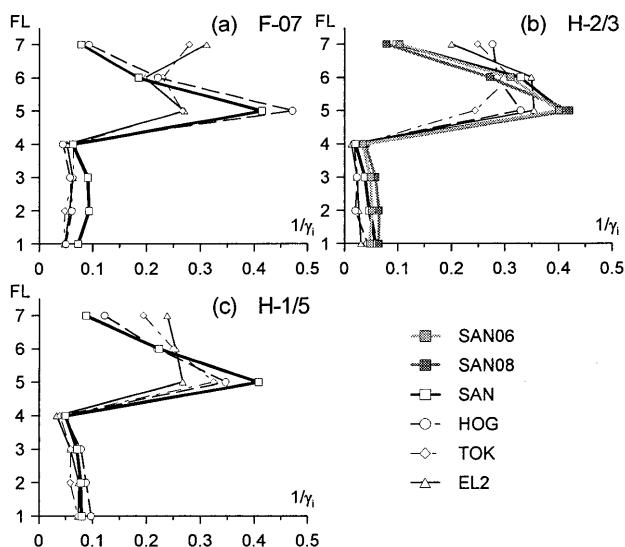


図8 損傷配分 $1/\gamma_i$ の比較

4. エネルギー法に基づく損傷分布の予測

4.1 試験体の高さ方向における耐力分布

前章で試験体の損傷が5層で集中する結果となったが、それをエネルギー法に基づき評価していく。

文献 1)より、完全弾塑性型の復元力特性をもつせん断多層骨組みにおいて、降伏せん断力係数分布 α_{yi}/α_{y1} が、最適降伏せん断力係数分布 $\bar{\alpha}_i$ からはずれる場合について次式が成り立つ。

$$\frac{1}{\gamma_i} = \frac{s_i p_i^{-n}}{\sum_{j=1}^N s_j p_j^{-n}} = \frac{W_i(t)}{W(t)} \quad (6)$$

$$\text{ここで、 } s_i = \left(\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{M} \right)^2 \cdot \bar{\alpha}_i^2 \cdot \left(\frac{k_1}{k_i} \right) \quad (7)$$

$$p_j = (\alpha_{yj}/\alpha_{y1})/\bar{\alpha}_j \quad (8)$$

n : 損傷集中指数, γ_i : 損傷分散係数

p_j とは, $p_i < 1$ となる相対的に耐力の弱い方に外れた層には損傷が集中し, $p_i > 1$ となる相対的に強い方に外れた層には損傷を受けないように評価できる式である。

$$\alpha_{yi} = \frac{Q_{yi}}{\sum_{j=1}^7 m_j \cdot g} \quad (9)$$

Q_{yi} : 降伏層せん断力, m_j : i 層の質量, g : 重力加速度である。

また, $\bar{\alpha}_i$ は次式で求められる。

$x > 0.2$ の場合

$$\bar{\alpha}_i = 1 + 1.5927x_i - 11.8519x_i^2 + 42.5833x_i^3 - 59.4827x_i^4 + 30.1586x_i^5 \quad (10)$$

$x < 0.2$ の場合

$$\bar{\alpha}_i = 1 + 0.5x_i \quad (11)$$

ここに、質量分布が均一な場合: $x_i = \frac{i-1}{N}$ (12)

$$\text{質量分布が不均一な場合: } x_i = 1 - \frac{\sum_{j=i}^7 m_j}{M} \quad (13)$$

M は全質量である。E-ディフェンス試験体の質量分布が不均一なため、(13)式を用いる。

今回、各層の降伏層せん断力 Q_{yi} を求める際、(2b)式で算出した層せん断力 Q_i - 層間変位 δ_i 関係の履歴曲線に、鋼材などの材料の性状を表現するために用いられるスケルトンカーブ⁸⁾を準用した。図9に、履歴曲線から求まるスケルトンカーブを重ねて示す。各層同様にしてスケルトンカーブから降伏層せん断力 Q_{yi} を定めた。

以上より求めた、F-07におけるSAN 入力時の p_i の比較を図10に示す。ここで、図より、F-07の5層で大きく $p_i < 1$ に外れ、耐力が低いことが確認できる。 p_i は5層で最も低く0.31となる。このことから、図6のように5層で損傷が集中したことがわかる。また、H-2/3は、縮約層に設置したダンパーの負担するエネルギーが多いため、実架構部分では殆ど損

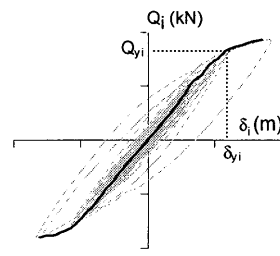


図9 スケルトンカーブの考え方

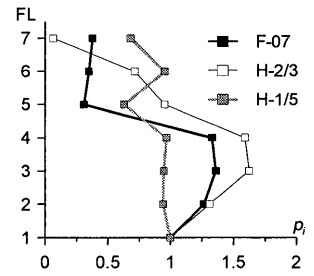


図10 p_i の比較

傷を受けない。H-1/5は、実架構部分のダンパーが負担するエネルギーの割合が増したため、実架構部分において、 p_i はほぼ1となる。

5. まとめ

2007年度、2009年度の2つの実験から、建物の各層が吸収したエネルギーの高さ方向分布に着目し、エネルギー法に基づく評価を行った。

- ・ 各試験体で、入力エネルギー量、吸収エネルギー量の比較を行い、入力されたエネルギー量が異なる場合においても、損傷分布が変わらないことを確認した。
- ・ エネルギー法により、試験体の耐力に基づき、耐力が弱い層に損傷が集中する理由を示した。

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」の一環として、(独)防災科学技術研究所が受託した「②都市施設の耐震性能評価・機能確保に関する研究」の成果の一部です。また、大林組 佐野剛志氏には多くの貴重なご助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 北村春幸, 財津和暁, 馬谷原伴忠: 主架構の塑性化を考慮した制振構造物のエネルギーの釣合に基づく応答評価法, 日本建築学会構造系論文集, 第599号, pp.71-78, 2006.1
- 3) 北村春幸, 馬谷原伴忠, 川崎恵: 時空履歴応答解析結果をもとにエネルギーの釣合に基づく耐震設計法を適用した建築物の耐震性評価の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第632号, pp.1755-1763, 2008.10
- 4) 長江拓也, 鎌倉毅, 島田侑, 福山國夫, 梶原浩一, 井上貴仁, 中島正愛, 斉藤大樹, 北村春幸, 福和伸夫, 日高桃子: 超高層建物の耐震性能を検証する大規模実験システムの構築—E-ディフェンス震動台実験—, 日本建築学会構造系論文集, 第640号, pp.1163-1171, 2009.6
- 5) 佐藤大樹, 島田侑, 大内隼人, 長江拓也, 北村春幸, 福山國夫, 梶原浩一, 井上貴仁, 中島正愛: 長周期地震動を受ける鋼構造超高層建物のエネルギー吸収と分担率一部分切り出し架構に対するE-ディフェンス震動台実験—, 日本建築学会構造系論文集, 第653号, pp.1217-1226, 2010.7
- 6) 野崎隆行, 大内隼人, 島田侑, 佐藤大樹, 長江拓也, 北村春幸, 中島正愛: 長周期地震動を受ける制振構造超高層建物のE-ディフェンス実験その1 E-ディフェンス実験概要—, 日本建築学会関東支部研究発表会, 2010.3
- 7) 北村春幸, 野村綾, 川崎恵, 壇一男, 佐藤俊明: 長寿命鋼構造建築物が遭遇する複数の地震動を想定した累積損傷評価法の提案—名古屋三の丸地区で想定される地震動を対象として—, 日本建築学会構造系論文集, 第642号, pp.1443-1452, 2009.8
- 8) 加藤 秋山, 山内: 鋼材の応力—ひずみ履歴曲線に関する実験測, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.937~938, 1973.10

*1 東京理科大学理工学部建築学科

*2 独立行政法人 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター