

## 耐震工学に果たす大型構造実験の役割

### —その可能性と限界—

中島 正愛

#### 要 旨

構造物の安全性を評価しまたそれを向上させる研究開発において、現実の情報を提供するという使命をもつ構造実験が果たす役割は限りなく大きい。構造実験のなかでも、特に実大規模の構造物を対象とする大型構造実験は、施設の整備や維持管理さらには試験体製作等に多額の費用を要する。果たして大型構造実験は投資にみあう効果があるのか・・・これを、実大規模対縮小模型、部材・要素対構造物全体、準静的載荷対動的載荷、実験対数値シミュレーションという対比を通じて分析し、縮小模型でなく実大で、準静的ではなく動的に、部材や要素ではなく構造物全体を実験することの有用性を、構造物崩壊を精度よく予測することの重要性と数値シミュレーションの限界という視点から訴える。

キーワード：耐震工学，大型実験，振動台

#### 1. はじめに

性能設計 (performance-based design) という用語が構造工学界を席卷して久しいが、その射程や方法に対する思いは、人それぞれ違うようだ。しかしながら、性能設計が基準、規準として今後どのように記述されてゆくかはともかくとして、耐震構造設計における根幹は、想定した地震動に対して所定の性能を確実に満足できるように構造物を造ることに尽きる。そしてそれは、ある地震に遭遇したとき、構造物がどの程度揺れそして損傷するかに対する精度の高い予測 (要求性能の予測) と、揺れと損傷の制御をめざす設計要求を確実に満足する構造物の構築 (保有性能の確保) によって支えられる。古今、要求性能 ( $D$ : Demand) と保有性能 ( $C$ : Capacity) に対して、下記の関係を満たすことが構造設計の基本要件となってきた。

$$D \leq C \quad (1)$$

一方で、設計で想定するよりも大きな地震動 (過大地震動) が現出しうことは周知の事実であって (つまり設計で  $D$  として指定した値よりも大きな値が起

こりうる)、建築構造物においては、このような場合、果たして当該構造物が人命を護りきれるかどうか、耐震設計上の中核課題となる。ところが、上式(1)の不等号だけであると、構造物が倒壊するまでの真の保有性能を提示する必要はなく、したがって過大地震動下における人命保護能力を測ることができないままに終わり、つまるところ、性能設計の精神が失われてしまう。ここにおいて、真の性能設計を実現するためには、上式(1)から決別し、より定量的な次式(2)を与え、その係数である  $\alpha$  (1.0よりも大きな数) の明示を要求しなければならない。

$$\alpha D = C \quad (2)$$

上記の記述は、(1)式を満足するだけなら、保有性能の下限だけを知ればよいのに対して、(2)式を担保するためには、その上限も併せて知る必要があることを示唆している。とすれば今求められるのは、われわれが設計する構造物が、種々のレベルの地震動を受けたときに、どのように揺れ、それに応じて損傷がどう進展してゆくかを、完全に崩壊する瞬間 (人命保護能力を喪失する瞬間) に至るまで精度よく予測することとなる。

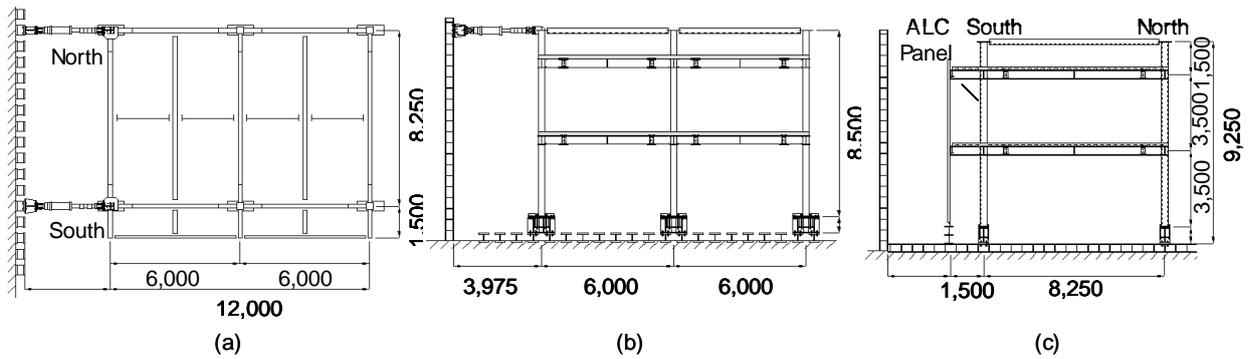


Fig. 1 Tested full-scale steel moment frame: (a) Plan; (b) Elevation (South); (c) Elevation (North) (unit: mm)

## 2. 完全破壊・崩壊挙動に対する実情報と構造実験

耐震解析や設計の枠組みのなかで、構造物が地震を受けるときの揺れと損傷と破壊を予測するための科学と技術は、長年にわたる先人達の努力によって磨かれてきた。ところで、いかなる予測科学・技術においても、その真偽と精度と限界を知るためには、観測や実験による「実情報」が不可欠となる。実情報との整合によって初めて予測の正しさがわかり、予測の不備が露見することからその洗練をめざす新しい科学が芽生える。

一方で、実情報を得ることは決して容易いことではない。実情報を得るための究極の手段とも言える観測について見れば、構造物を崩壊させる巨大地震はめったに起こらず、仮に起こっても崩壊するまでの様子をつぶさに計測できる機器が構造物に備えつけられていることなどほとんどあり得ない。そこで、構造物を実験室に持ち込み、それにセンサー類を取りつけて、強制的に押したり引いたりすることから破壊に至るまでの挙動をつぶさに再現する、いわゆる室内構造実験が、実情報を獲得するために多用される。さてここで問題・・・実験室に持ち込んだ構造物実験とそこで得られる破壊や崩壊に関わる実験データは、はたして現実を反映しているのか（しえるのか）。この問いに対する議論の歴史も長いが、その際、頻繁に引き合いに出されるのが、下記の4点である。

- ① 完全破壊・崩壊に至る実験情報は、縮小模型に対する実験で再現できるか。
- ② 完全破壊・崩壊に至る実験情報は、構造物全体ではなく部材実験の結果を組み合わせることによって獲得できるか。
- ③ 完全破壊・崩壊に至る実験情報は、動的ではない準静的な実験で再現できるか。
- ④ 完全破壊・崩壊は、数値シミュレーションで追跡できるか。

これら項目について、筆者らのグループが手がけてきた実験群を参照しながら、自らの所見を下記に認めたい。

## 3. 実大3層鋼構造骨組に対する実験（文献1～4）

### 3.1 試験体と試験方法

筆者が所属する研究機関は2003年に第三キャンパスを設立、そのなかにインテックセンターと称する実験施設を開設した。この実験施設には、大型反力壁と反力床を有する構造実験施設が併設される運びとなったので、この施設を用いて実大3層鋼構造骨組に対する準静的荷重実験を実施する機会を得た。実験に用いた実大試験体は、長辺方向2スパン、短辺方向1スパンから構成される鋼構造ラーメンで、現行の耐震設計プラクティスに準じて設計した (Fig. 1)。柱には冷間成形角形鋼管を、柱にはH形鋼を用い、ブラケット形式と称する溶接を使った接合法と、露出柱脚形式を適用した、典型的な中低層鋼構造ラーメンである。鋼構造ラーメンの設計で通常想定される梁崩壊機構（構造物全体として平行四辺形のような機構）を想定し、柱の強度をそれに接続する梁の強度の約2倍に設定した。Fig. 1に示すように、3層柱の反曲点位置を柱の高さ中央付近と仮定し、その位置にジャッキを水平に取り付け、地震力を模擬する水平力を強制変位として加えた。

加力は長辺方向への1軸荷重とし、2つの構面 (Fig. 1の北構面と南構面) の3層柱の反曲点位置に、1台ずつジャッキを配したうえで、2台のジャッキには常に

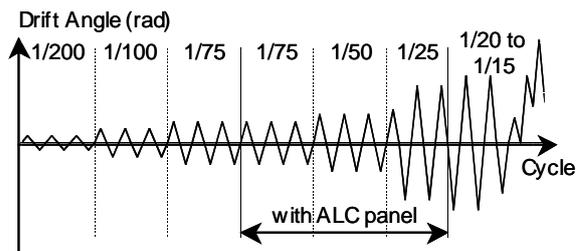


Fig. 2 Loading history adopted for full-scale test

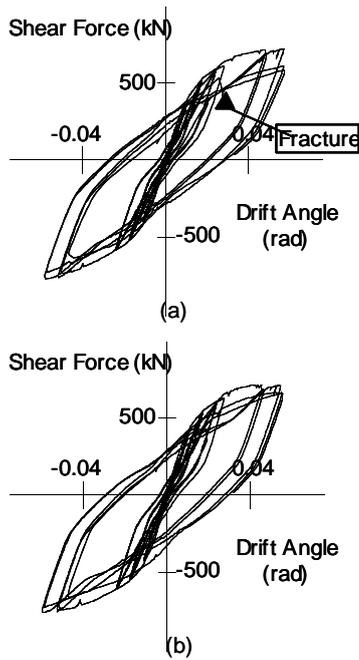


Fig. 3 Shear force versus overall drift angle relationship (up to 1/20 rad): (a) North plane; (b) South plane

同じ変位を与えた。漸増変位振幅繰返しを载荷の基本とし、Fig. 2に示すように、全体変形角（加力位置での水平変位のその位置までの高さ8.5mに対する比）の振幅として、1/200, 1/100, 1/75, 1/50, 1/25, 1/20を選択した。ここで1/200は、いわゆる建築物一次耐震設計に対して一般的に設けられる許容最大変形角、1/75~1/50は、同二次耐震設計で考える地震力に対して概ね覚悟する最大変形角、それ以上は過大地震下において被る変形角に相当する。なお1/20振幅の繰返し载荷後は、試験体の崩壊挙動を観察するために、载荷ジャッキを盛り替えながら、全体変形角にして1/15（最大層間変形角にして1/8）まで载荷した。

### 3.2 繰返し载荷下の鋼梁の破断

Fig. 3は、1/200~1/20振幅における各構面（北構面と南構面）の挙動で、縦軸は各構面に取り付けたジャッキ荷重、横軸はジャッキ変位の平均値を基礎梁上端から载荷点までの高さ（8.5m）で除した値である。試験体は1/25振幅に至るまで安定した履歴を描いているが、1/20に至る载荷中に、北構面外柱に取りつく梁端の一つが破断した。破断した梁のモーメントと回転角の関係をFig. 4に示す。この破断は、梁下フランジの端から徐々に進行していた微傷な亀裂が、ある時点で突然広がって生じたもので、溶接を用いた接合部が大きな塑性回転を受けたときに生じる現象である。

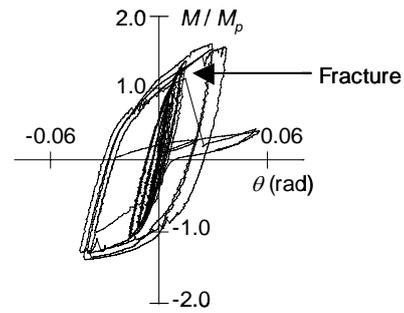


Fig. 4 Bending moment versus end rotation relationship at fractured beam end

この実験とは別に、同じ鋼梁けれども、寸法を1/10に縮小した模型鋼梁を用いた実験も実施した（Liu et al., 2003）。1/10という縮小率を採用すると、小さすぎて溶接接合の詳細をほぼ再現できないので、端部の接合部分を溶接から噛合（噛みあわせ）接合に変えて試験体を造った。縮小模型から得られた曲げモーメントと回転角の関係をFig. 5に示す。実寸をもつ梁に対するFig. 4に比べて、相当大きな変形に至るまで破断していないが、これは、破断の主原因である溶接を縮小模型では正しく再現しなかった（できなかった）からである。突然抵抗力が失われる破断という現象が、溶接という細部に依存し、一方で細部は縮小模型では再現できないことは、破断のような、大きな変形時に生じる現象を正しく把握するためには、細部が再現できる、つまり実大規模での実験が不可欠であることを示唆している。ついでには後述。

### 3.3 梁部材の挙動と骨組の挙動

Fig. 4に示すように、破断した梁端自身は抵抗力のほぼすべてを失ったが、構造物全体（北構面）としてのFig. 3を見ると、破断時に約15%の抵抗力劣化がみられるものの、さらに载荷を続けてゆくと抵抗力は次第に回復し、その後の繰返し载荷においてもなお安定した挙動を示している。これは構造物がもつ静定性のおかげで、破断によって失われた抵抗力が他の部分で肩代わりされ、その結果、構造物全体と

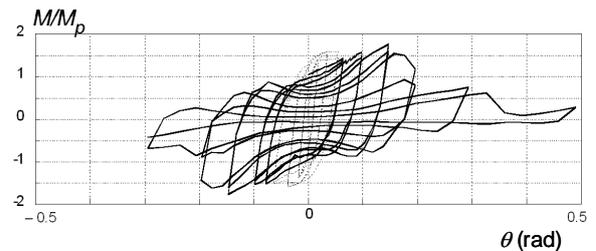


Fig. 5 Bending moment versus end rotation relationship of a 1/10 reduced-scale beam

しては倒れることはない(松宮ら, 2005)。このように、部材一本の挙動と多くの部材が組み合わさった構造物の挙動は同一ではなく、とりわけ部材の破壊と構造物の崩壊との関係は複雑な様相を示す。

### 3.4 崩壊の再現

Fig. 6は、実験の最終段階で、変形角1/15の(1層層間変形角にして1/8)まで、試験体を押し続けた場合の挙動であり、1/17から抵抗力が著しく低下している(松宮ら, 2004a)。これは、主として1層柱脚の損傷、具体的にはアンカーボルトの破断とベースプレートの下に打設したモルタルの圧壊による。柱脚の回転が増えるにつれ、抵抗曲げモーメントが減り、それに伴って柱の反曲点が下がり、その分1層柱頭への曲げモーメントが増加した。その結果、1層柱頭部に局部座屈が生じ、それまで梁崩壊機構を保ちながら変形していたものが、1層崩壊機構(1層だけが平行四辺形のようなになる機構)に転じた。塑性変形するパターンが、ある部材(この場合1層柱脚)の抵抗力が極端に減ることによって途中で変わり、それが構造物全体の抵抗力喪失を助長するという、この例のような複雑な挙動は、構造物全体に対する実験から初めて得られるものである。またここで挙げた所見は、本実験がそうであるように、実情報が獲得されてこそ初めて信頼性をもつ。

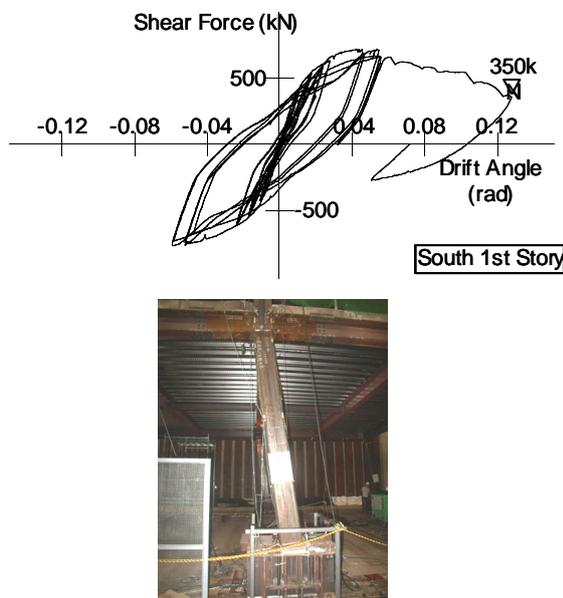


Fig. 6 Unstable behavior to failure of full-scale steel moment frame



Fig. 7 Test setup for full-scale steel beam

### 4. 鋼部材の履歴挙動に及ぼす載荷速度の影響

周知のように地震時の応答は動的であるが、構造物の挙動や破壊特性を観察する実験のほとんどでは、準静的の荷重と呼ばれるゆっくりと力を加える方法が採られる。これは、多くの場合、動的荷重を実現するための装置(油圧サーボアクチュエータ)が、準静的荷重に使われる装置(一般に油圧ジャッキ)に比べて格段に高価なことによる。筆者が所属する研究機関は、幸いにして最大速度として約1.0m/s(100カイン)までを現出できるアクチュエータを保有しているので、同一の実大柱梁部分架構(T字型の梁柱部分骨組)に対して、動的(大地震時に中層鋼構造骨組に作用する程度の速度)に荷重した場合と、準静的(動的の1/1000程度の速度)に荷重した場合とを直接比べる機会をもつことができた(Nakashima et al., 1998)。

Fig. 7は、この実験に用いた荷重装置を、Fig. 8は、そこから得られた荷重(柱端曲げモーメント)と変形(梁の部材回転角)の関係を示す。いずれの場合も、柱梁接合部の溶接近傍でフランジが破断した。歪速度が大きいほど(つまり動的の速度が大きいほど)鋼材料の脆化が進行するという周知の事実から、実験前には、動的荷重による方が早くそしてより脆性的に破壊するのではないかと憶測していた。ところがその結果は、Fig. 8に示す通りで、どちらかと言えば動的の方が塑性変形能力に優れ、しかも破断面を見ると、動的荷重による破断は延性破断面を、一方準静的荷重による破断は脆性破断面を呈していた(Fig. 9)。その主たる理由は、繰返し荷重時の塑性変形によって消費されるエネルギーが熱エネルギーへと変換され、それが塑性化部分の鋼材温度の上昇を誘発し(常温から100度以上にまで上昇)、高温下の鋼材がより延性的な性質を保有するに至ったからである。この例からも明らかのように、載荷速度の違いは、部材の履歴特性、特に破壊に関する特性に影響を及ぼす。

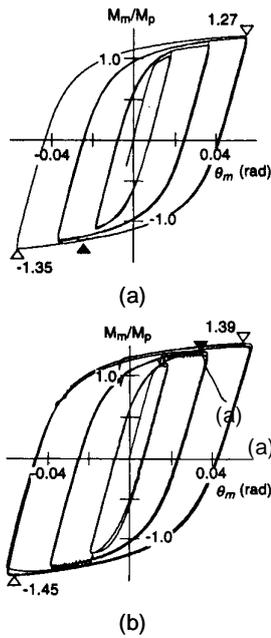


Fig. 8 Effect of rate of loading on hysteretic behavior of steel beams: (a) Quasi-static loading; (b) Dynamic Loading

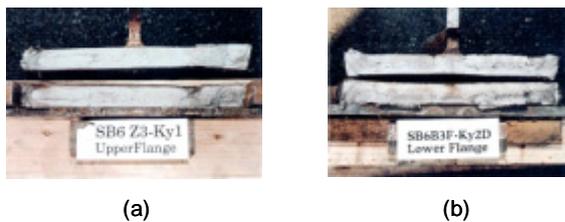


Fig. 9 Fracture surfaces obtained from steel beam tests: (a) Quasi-static loading; (b) Dynamic Loading

## 5. 非構造部材の挙動と構造体との相関

建築物を造るために必要な建築費は、躯体工事費と内外装工事費等からなる「建築工事費」と、電気、空調、衛生等の「設備工事費」に大別される。建築物の用途に応じて異なるが、中低層鋼構造ラーメンの躯体工事費と内外装工事費と設備工事費の内訳は、おおむね40%、30%、30%である。内外装材が全コストに占める割合は少なくなく、ここにおいて、内外装材の損傷をどう防ぐかが、建築物の機能性や修復性や安全性の向上をめざす検討において要点の一つとなる。そして、それを量として表すためには、内外装材が損傷に対してもつ保有性能を明らかにしておかねばならない。

Fig. 1の実大構造実験では、1/75振幅から1/25振幅において、典型的な外装材であるALC版を取りつけた場合の実験と、それを取り外した場合の（構造体だけの）実験を実施した（松宮ら、2004b）。その結果の一部はFig. 10に示す通りで、構造体の変形によ

ってもALC版に力が加わらない取り付け方法（兵庫県南部地震後の建設で標準的に用いる方法）によれば、ALC版に要求する標準的な性能（1/100の層間変形角に無傷で追従できるという条件）をはるかに越す変形角（1/25）においても、ALC版はほぼ無傷にとどまり、またALC版は構造体の抵抗力には全く影響しなかった。建築物を構成する内外装材（非構造部材）の性能や損傷は、材料だけを取り出して実験してもその本質のすべてはつかめず、この実験例のように、現実の構造物に取りつけることによって初めてつまびらかになる。

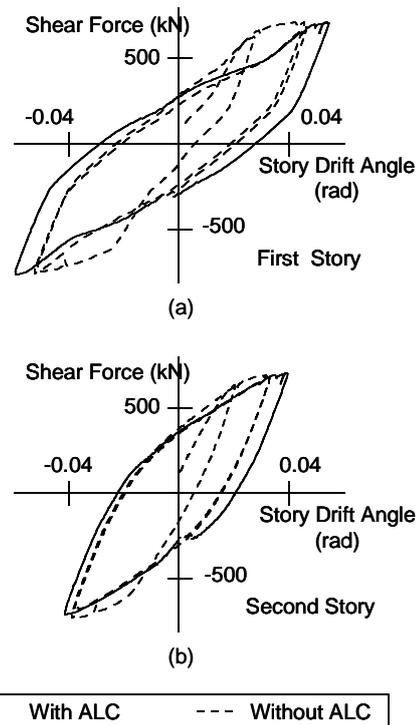


Fig. 10 Behavior of ALC panels of full-scale three-story steel moment frame: (a) First story; (b) Second story

## 6. 数値解析がもつ予測精度

構造物の地震応答やそれに伴う損傷の進展を予測するうえで、有限要素法に代表される数値解析は大きな威力を発揮している。この現状を踏まえれば、構造物の破壊や崩壊という現象も数値解析で十分に予測できるのではないかと期待はいやがおうにも高まる。筆者は、有限要素法解析が構造物や構造部材の破壊や崩壊に対してもつ精度を吟味してみたいと考え、建築構造物の自重を支え、したがってその破壊が構造物全体の崩壊を左右すると考えられる

柱に着目し、角形鋼管柱が鉛直荷重を支えきれなくなるまでの挙動を再現する実験を実施した (Nakashima et al., 2005)。

実験では一定の鉛直力と繰り返し水平力を加え、水平抵抗力がいくら低下しても、柱が鉛直荷重を支える限り実験を続行した。Fig. 11は、この実験から得られた荷重 (柱端曲げモーメント) と変形 (柱の部材回転角) の関係で、0.3radの回転角までを与えた。Fig. 12は実験前と実験後の柱の状態、実験後には象の脚座屈が幾重にも広がっている様子が見える。

この現象を、汎用有限要素法解析コード (MSC.MARC., 2001) を用いて追跡することにした。Fig. 13は0.06rad程度までの履歴に対する追跡結果で、厚肉シェル要素を用いた解析は、局部座屈の発生と進行、それに伴う耐力劣化をほどよく再現している。

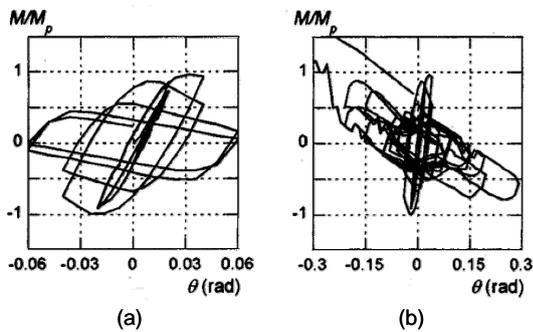


Fig. 11 End moment versus end rotation relationship of steel tube columns: (a) Up to 0.06 rad; (b) Up to 0.3 rad

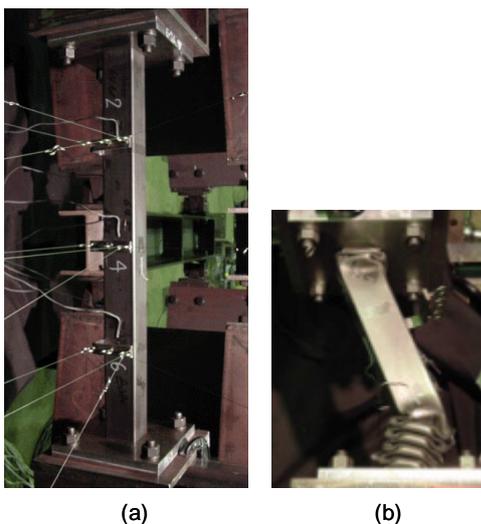


Fig. 12 Tests on steel tube columns: (a) before test; (b) after test

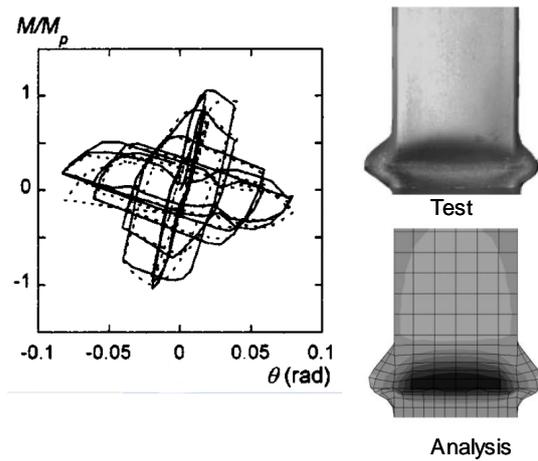


Fig. 13 FEM analysis using thick-shell elements (dotted line = test; solid lines = analysis)

しかしこの解析も0.08radを超す変形に対しては、解の収束が得られず強制終了の憂き目にあった。そこで、厚肉シェル要素の代わりに3次元ソリッド要素を用い、また用いたコードが得意とする接触要素を駆使して、より大きな変形に対してどこまで追跡できるかを検討した。Fig. 14はその結果で、象の脚座屈が多重に発生し、また座屈した部分同士が接触しあうという実験結果を再現できている。しかしながら、荷重と変形の関係は似ても似つかぬ様相を呈し、加えて0.15rad振幅の計算途中で解が収束せず強制終了を余儀なくされた。この例のように、有限要素法は、幾何学的・材料非線形にも適切に対応し、よい精度で実験結果を追跡できるが、強非線形性、不安定、極端なトポロジー変化等を含む超大変形時の繰り返し挙動を、信頼性をもって再現できるだけの力量はない。特筆すべきは、このような知見は、超大変形から破壊に至る詳細な実験情報 (実情報) があってこそ導かれるものであって、数値解析の限界と弱点を同定し、そこから数値解析の一層の進歩を促すためにも、この種の実情報は不可欠である。

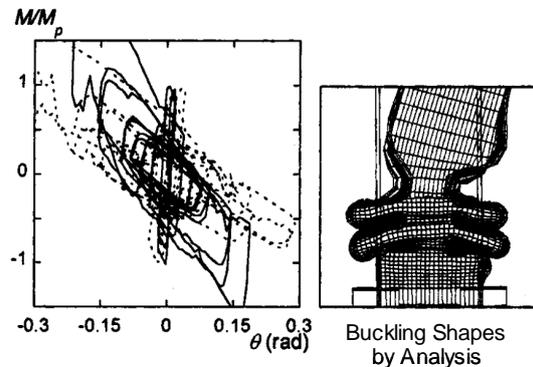


Fig. 14 FEM analysis using 3D solid elements and contact elements (dotted line = test; solid lines = analysis)

## 7. E-ディフェンスが保有する震動台施設

上記に示した一連の結果は、地震時における構造物の応答と、完全崩壊や破壊に関わる実情報を得るための構造実験においては、(縮小模型ではなく)実大規模で、(部材ではなく)構造物全体として、(準静的な载荷ではなく)地震時における速度をもって実験に臨むことに、大きな意義があることを示唆している。

1995年の阪神・淡路大震災における未曾有の被害に端を発して、兵庫県三木市に建設が進められてきた大型3次元震動台施設(通称:E-ディフェンス)(Fig. 15)は、大震災10年後の2005年4月から本格稼働を始めた(独立行政法人防災科学技術研究所URL)。完成した震動台は、15m×20mの台寸法をもち、最大1200トンまでの重量をもつ試験体に対して、3次元の揺れを、最大速度2m/s、最大変位±1mの力で揺ることができる(Table1)。本施設の開設以来、実大鋼構造5層骨組を用いた震動台性能実験、実大木造2階建て補強・無補強住宅実験、実大木造2階建て京都町屋住宅実験、実大鉄筋コンクリート6層建築物実験(Nakashima, 2006)等、実大規模の試験体を用い、これらを崩壊もしくはそれに近い状態にまで揺らすことに成功した。E-ディフェンスは、確かに、「実大規模」で、「構造物全体」として、そして「地震時の速度」をもって、構造物を揺すりその損傷と崩壊を再現する能力をもっている。

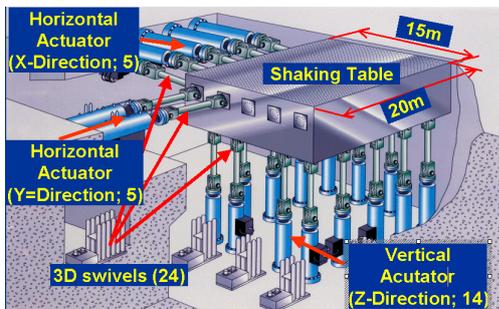


Fig. 15 Shaking table facilities at E-Defense, NIED

Table 1 Major specifications of E-Defense

3D Full-scale earthquake testing facility		
Payload	12 MN (1,200 tonf)	
Size	20 × 15 m	
Driving Type	Accumulator charge Electro-Hydraulic servo control	
Shaking direction	X & Y Horizontal	Z Vertical
Max. acceleration*	> 9 m/s/s	> 1.5 m/s/s
Max. Velocity	2 m/s	0.7 m/s
Max. displacement	1 m	0.5 m
Max. allowable	Overturning	Yawing
Moment	Moment 150 MN × m	Moment 40 MN × m

\* Max. acceleration is at max. loading.

しかしながらE-ディフェンスとて15m×20mの寸法しかもたず、実大規模でとは言っても、その寸法には限りがある。また、一つずつの実験費用はかさみ、また実験準備に多くの時間を割かねばならないので、実験を大量にこなすことも容易ではない。このように、一方で他に例をみない巨大な能力と、他方でなお限界をもつE-ディフェンスは、どのようにすれば最大限に活かせるのか・・・冒頭にも掲げたように、E-ディフェンスが提供する実情報に寄り添うべき予測科学・技術の一層の進歩なくして、ことは成就しえない。実情報を与える大型構造実験と、実情報にインセンティブを得て進歩する予測科学・技術が、補完的に切磋琢磨を重ねることによって、予測精度は向上し、もって地震防災の飛躍的進歩が約束される。

またこれを促進するためには、E-ディフェンスが地震工学や地震防災に携わる研究者、技術者、行政担当者、ひいては国民の共有資産であることを深く認識し、「地震工学・地震防災コミュニティ」の総力を結集した研究体制と、E-ディフェンスが産み出す成果をいち早く社会に還元する仕組みを構築しなければならない。

さらに、E-ディフェンスという巨大施設は、世界でただ一つしか存在せず、世界各国からの注目と期待は驚くほど高い事実を付記したい。(その発露の一環として、2005年度からは、米国NEESとE-ディフェンスとの日米共同研究が始まっている。)地震工学や地震防災の研究と実践において世界の先頭を切る(と自負する)わが国が、そのプレゼンスを確保し一層向上させ、さらに世界の地震防災に目に見える形で貢献するために、E-ディフェンスは絶好の道具となりうる。

## 参考文献

- 松宮智央・吹田啓一郎・中島正愛・劉大偉・井上真木・竹原創平 (2004b) : ALC版外壁が構造性能に及ぼす影響 – 実大3層鋼構造骨組を用いた耐震性能実証実験 – , 日本建築学会構造系論文集, 第581号, pp. 135-141.
- 松宮智央, 中島正愛, 吹田啓一郎, 劉大偉, 周鋒, 福本直晃 (2004a) : 実大鋼構造ラーメンの繰り返し載荷挙動に対して弾塑性数値解析がもつ予測精度 – 実大3層鋼構造骨組を用いた耐震性能実証実験 – , 日本建築学会構造系論文集, 第585号, pp.215-221.
- 松宮智央, 中島正愛, 吹田啓一郎, 佐藤有希 (2005) : 梁の損傷特性と床スラブとの合成効果 – 実大3層鋼構造骨組を用いた耐震性能実証実験 – , 日本建築学会構造系論文集, 第593号, pp.177-184.
- 独立行政法人防災科学技術研究所  
URL: <http://www.bosai.go.jp/hyogo/index.html>
- Liu, D., Nakashima, M., and Kanao, I. (2003): Behavior to complete failure of steel beams subjected to cyclic loading, *Journal of Engineering Structures*, Vol.25, pp.525-535.
- MSC. MARC on-line manual (2001), MSC Co., Tokyo, Japan.
- Nakashima, M. (2006): Test on collapse behavior of structural systems, *Journal of Science and Technology*, Japanese Ministry of Education, Sports, Culture, Science and Technology, Vol.96, pp. 14-19.
- Nakashima, M., et al. (1998): Tests of welded beam-column subassemblies I: global behavior, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.124, No.11, pp.1236-1244.
- Nakashima, M. and Liu, D. (2005): instability and complete failure of steel columns subjected to cyclic loading, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.131, No.6, pp.559-567.
- Nakashima, M., Matsumiya, T., Suita, K., and Liu, D. (2006): Test on full-scale three-story steel moment frames and assessment of numerical analysis to trace inelastic cyclic behavior,” *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.35, pp. 2-20

## Roles of Large-Scale Structural Testing in Development of Structural Engineering – Perspectives and Limitations –

Masayoshi NAKASHIMA

### Synopsis

In research and development on evaluation and enhancement of structural safety, structural testing plays an important role in that it provides us with actual data on structural performance. Large scale testing is costly in development, maintenance, and operation – whether or not it is worthwhile to pursue such testing? It is analyzed by comparisons of “real scale” versus “reduced scale”, “elements and components” versus “overall structures”, “quasi-static loading” versus “dynamic loading”, “test” versus “numerical simulation”. Stressed is the effectiveness of testing in the real scale, loaded dynamically, and for overall structures, in light of the importance of acquiring actual data on structural collapse and the limitation of numerical simulations.

**Keywords:** Earthquake Engineering, Large-Scale Testing, Shaking Table