

インパルス応答を利用した鋼構造骨組の耐震性能検証プロセス

An Impulse Push-Over Loading Process to Verify Seismic Performance of Steel Frames

大井 謙一*・李 昇宰*

Kenichi OHI and Seung-Jae LEE

1. はじめに

構造物の耐震性能を評価・検証するための実験手法としては、予め指定された载荷モード・载荷履歴による準静的载荷実験のほか、模擬地震動波形入力によるオンライン地震応答実験（擬似動的応答実験）や振動台による動的応答実験などが挙げられる。しかしながら、模擬地震動波形を入力する擬似動的ないし動的実験では、入力する地震動波形の選定につねに恣意性が伴うことに注意する必要がある。構造物の弾塑性応答は入力波の継続時間特性（衝撃性）や非定常スペクトル特性によって大きく左右されるからである。例えば、図1は本所の千葉実験所において、継続して地震応答観測を実行している鉄骨造3階建筋かい付骨組モデルの2つの地震に対する応答履歴曲線を示したものであるが、極めて様相を異にしている。図1左は、千葉・茨城県境を震源とする内陸直下型の地震であり、構造物の応答は1方向に1回だけ塑性変形が起こっている。一方、図1右は、房総半島沖を震源とする海洋性の地震であり、小さな塑性変形が正負に繰り返して発生している^{1), 2)}。

このように、模擬地震動群を用いて、あるサイトの建物の耐震性能を評価・検証する場合には、遭遇する可能性のある地震動波形特性としては、大きな幅を考慮しておく必要があることがわかる。これに対して、本研究速報では、抽象化された理想的な入力を想定して、構造物に最も不利な損傷プロセスを検証するために、加速度インパルスによって、ある初期速度を構造物に与える応答検証実験について考察する。

2. インパルス応答実験の耐震設計上の意味

2.1 Newmark 式による応答予測との関連

ある地震動に対する弾塑性振動系の応答を、同一の地震動にたいする弾性系の応答と関連づける古典的な方法とし

*東京大学生産技術研究所 情報・システム部門

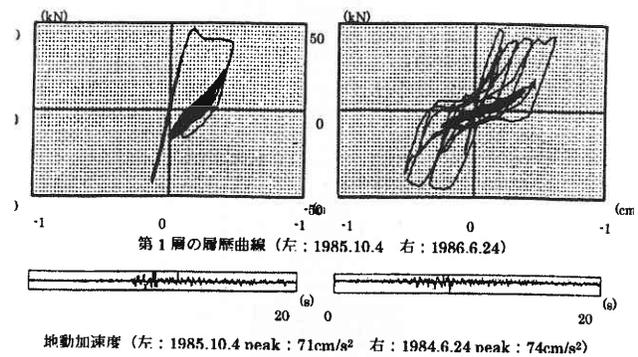
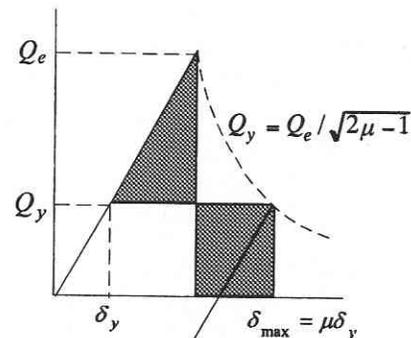
図1 2つの地震波に対する鉄骨造弱小モデルの応答^{1) 2)}

図2 Newmark らのエネルギー一定説

て、Newmark・Veleslos らの「エネルギー一定説」³⁾がある。図2に示すように、見かけの弾塑性ひずみエネルギーを弾性応答のエネルギーに等値するものであり、一般に地震動に対する弾塑性応答変位の上限を予測する方法として古くから用いられている。

また、この応答予測方法は、その弾性応答をもたらすようなインパルス弾塑性系に与えたときには、厳密に成立する関係である（無減衰の場合）。すなわち、地震波に対する弾性速度応答に相当する初期速度を与えるようなイン

パルス, 地震波の替わりに入力すれば, Newmark 式に対応する検討を行ったことになる。

2.2 多自由度系の応答予測における SRSS 法との対比

多自由度系の弾性応答 (荷重効果) の最大値をモード解析によって推定する方法として, SRSS 法 (自乗和平方根) がある。SRSS 法を幾何学的にモード荷重空間で表現すると図 3 のようになる。荷重効果 (応答) を評価するには常に検証対象の崩壊面に対応する荷重効果 (例えば, 局所層崩壊機構に対応する層せん断力) に変換する必要がある。モード荷重空間における崩壊面の法線軸に射影した応答量を考える。各モード荷重の最大値 (モード荷重軸の切片) を含む楕円を考えると, この楕円上の点を崩壊面の法線軸へ射影した点のうち, 最も崩壊面に近いものが SRSS 法による評価点になる。これは, 確率論的には, 図 4 に示すように, モード荷重空間における等確率密度面を上記の楕円に相似な形に設定して, 崩壊面上の設計点を求めていることと等価である⁴⁾。

さて, 一方インパルス応答実験によって, 応答を評価することは, 図 5 に示すようなインパルス応答の軌道の例を参照すると, SRSS 法における楕円を図 6 に示されるように, より矩形に近い形に変形していることと等価であり, SRSS 法に比べて高次の応答を強調して評価することができる。

2.3 1次モード比例载荷との比較

1次モード比例载荷により, 骨組の崩壊モードや変形性能を調べることがあるが, 図 7 に示すように, 1次モード比例载荷では, 高次振動に影響を受けやすい崩壊面が存在する場合に, それを見逃すことがあるのに対し, インパルス応答では高次の振動による荷重モードが自動的に混入するので, そのような崩壊面も検討することができる。

3. インパルス载荷プログラム

多自由度系の通常座標系における運動方程式は次式で表すことができる。ただし弾塑性復元力以外の減衰はない場合を記述する。

$$[M]\{\ddot{x}\} + \{F\} = -[M]\{1\}\ddot{y}_0 \dots\dots\dots (1)$$

ここに, $[M]$ は質量マトリクス, $\{F\}$ は弾塑性復元力, $\{x\}$ は地面に対する相対加速度ベクトル, \ddot{y}_0 は地動加速度である。式 (1) を古典的規準モードによるモード座標に変換すると,

$$m_i \ddot{q}_i + r_i = -m_i \ddot{y}_0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \dots\dots\dots (2)$$

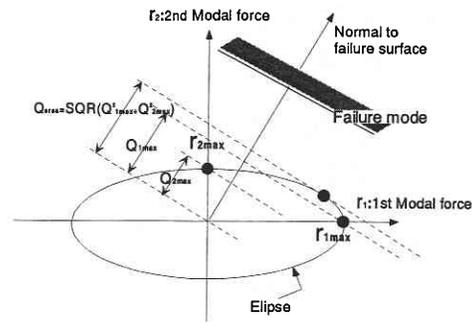


図 3 モード荷重空間における SRSS 法の幾何学的表現

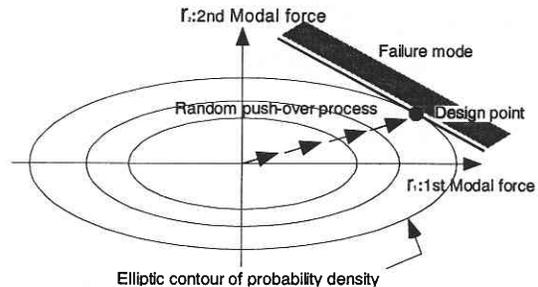


図 4 FORM による設計点決定 (Random push-over process)

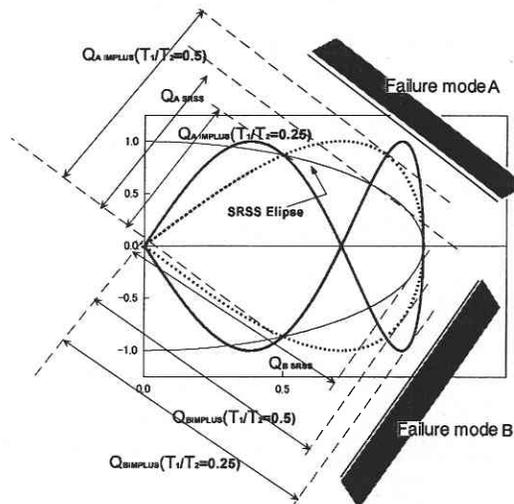


図 5 モード荷重空間における SRSS 法とインパルス応答の荷重効果

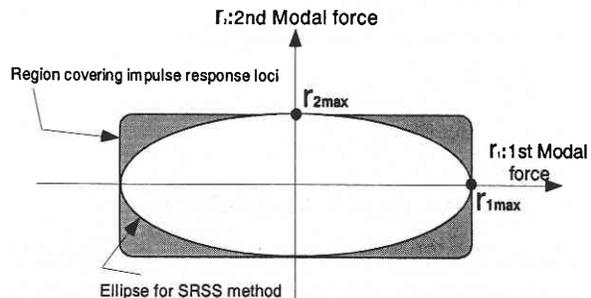


図 6 インパルス応答の包絡領域と SRSS の楕円

研 究 速 報

ただし, $\{x\} = [\Phi] \{q\}$
 $\{r\} = [\Phi]^T \{F\}$

となる. ここに, $[\Phi]$ は古典的基準モードによる刺激関数ベクトル, m_i は i 次有効質量, r_i は i 次モード復元力である.

中央差分法を適用すると,

$$q_i^{(k+1)} = 2q_i^{(k)} - q_i^{(k-1)} - (\Delta t)^2 \left(\frac{r_i^{(k)}}{m_i} + \ddot{y}_0^{(k)} \right) \dots \dots \dots (3)$$

ここで, 括弧付の上添字 (k) などは時刻 $t = k\Delta t$ における値を意味する. $\ddot{y}_0^{(0)} = -Y$, $\ddot{y}_0^{(k)} = 0.0$ ($k \neq 0$) として, $r_i^{(0)} = q_i^{(0)} = 0.0$, $q_i^{(-1)} = 0.0$ の初期条件を用いるものとする,

$$q_i^{(1)} = \Delta q_i^{(0 \rightarrow 1)} = +\Delta t^2 \cdot Y$$

$$\Delta q_i^{(1 \rightarrow 2)} = +\Delta t^2 \cdot \left(Y - \frac{r_i^{(1)}}{m_i} \right)$$

$$\vdots$$

$$\Delta q_i^{(k \rightarrow k+1)} = +\Delta t^2 \cdot \left(Y - \frac{r_i^{(1)} + r_i^{(2)} + \dots + r_i^{(k)}}{m_i} \right) \dots \dots \dots (4)$$

という増分解が得られ, 各次の初期速度として共通に,

$$\Delta q_i^{(0 \rightarrow 1)} / \Delta t = V_0 = \Delta t \cdot Y \dots \dots \dots (5)$$

を与えることになる.

以下, $k \geq 1$ では, 下記の漸化式

$$q_i^{(k+1)} = 2q_i^k - q_i^{k-1} - (\Delta t)^2 \frac{r_i^k}{m_i} \dots \dots \dots (6)$$

において, モード復元力 $\{r^k\} = [\Phi]^T \{F\}$ を測定して各次の q_i^{k+1} を求め, 通常座標 $\{x^{k+1}\} = [\Phi] \{q^{k+1}\}$ に変換して, 試験構造物に強制する. すなわち, 変位制御型の載荷実験プログラムとなる.

V_0 の設定法としては,

- ① 設計用弾性応答速度 S_v
 - ② 設計用エネルギー入力 E_I の速度換算値 $\sqrt{2E_I / M}$
 - ③ ①②の値に適切な低減係数を乗じたもの
- などを用いることが考えられる.

4. インパルス応答の適用例⁶⁾

図 8 にインパルス応答・地震応答実験の概念図を示している. 体育館を想定した 2 層の構造模型に 2 層の一部のみ載荷し, 残余の部分についてはコンピュータの中でシミ

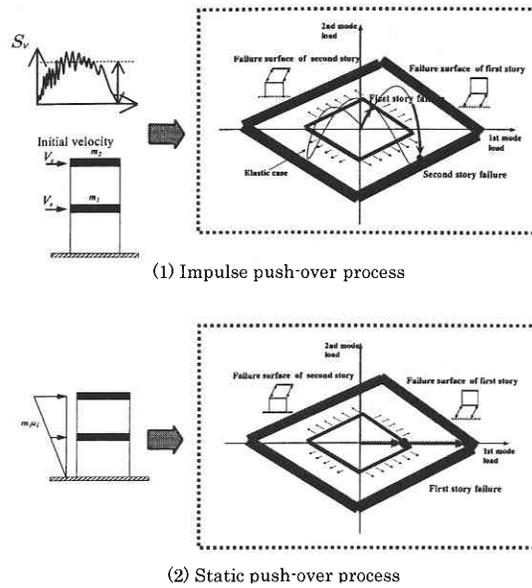


図 7 インパルス応答載荷と静的比例載荷との対比

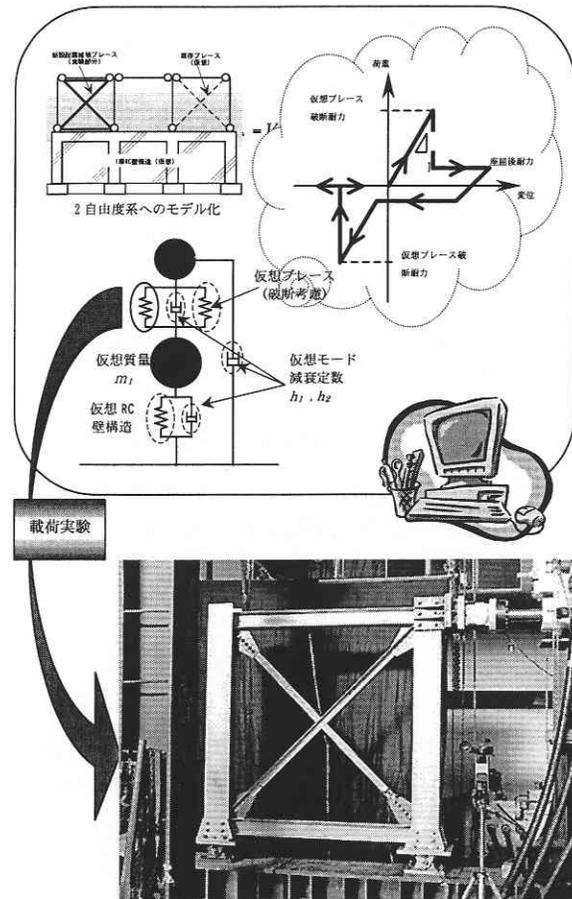


図 8 インパルス応答・地震応答実験モデル

ユレートする部分構造インパルス応答実験ならびに地震応答実験を行った。

図 10 と 11 に実験結果を示す。入力波としては、図 9 に示すエネルギー入力率の速度換算スペクトルの実地震波 (El Centro NS 400 cm/sec²) 及びそれとほぼ同レベルの運動エネルギーをもつ加速度インパルス (速度換算で 100 cm/sec と 50 cm/sec の 2 種類) を与えた。実地震波及び 50 cm/sec の初期速度をもつ加速度インパルス応答では試験体ブレースの破断は生じていないが、100 cm/sec の場合には試験体ブレースに破断が生じている。このように、インパルス応答実験では、最も不利な損傷プロセスを構造物に強いる荷重効果 (Demand), ならびに、試験構造物の観察による性能確認 (Check of Acceptance) とを同時に行うことができる。

地震動による全入力エネルギーの速度換算値を初期速度として構造物に与えるのは、地震荷重効果の評価としては通常過大評価となり、耐震性能評価上、安全側の評価となる。例えば、図 12 に模擬地震動波形による他の地震応答実験例を示しているが、耐力劣化が早期に起こる場合には、一方向に塑性変形が進行してインパルス応答実験に類似した損傷プロセスとなるが、安定した履歴によるエネルギー吸収が行われる場合は、正負の繰り返し塑性変形によってエネルギーが消費されるので、インパルス応答実験のような大きな応答変位は起こらないことが多い。

4. ま と め

インパルス応答実験を用いて、大地震時の構造物の耐震性能を検証するプロセスについて考察した。得られた知見を以下にまとめる。

- ① 加速度インパルス応答実験では、試験構造物に強制する変位量を試験構造物の呈する復元力に応じて変更してゆくという変位制御型の荷重プログラムになる。荷重プログラムが変位制御型であるので、耐力劣化などの発生する場合も安定して実験が遂行でき、また通常のオンライン応答実験のシステムがあれば、簡単に実行できる。
- ② 試験構造物が高次振動モードに鋭敏な崩壊モードを潜在的に有している場合、1次モード比例荷型の荷重実験では、その発生を見逃す場合があるが、インパルス応答荷重実験によれば検出することができる。
- ③ 試験構造物に与える初期速度を設計用の全エネルギー入力レベルに対応させれば、構造物にとって最も不利な損傷プロセスの検討をしたことになり、また海洋性地震のように、ある程度継続時間の長い地震

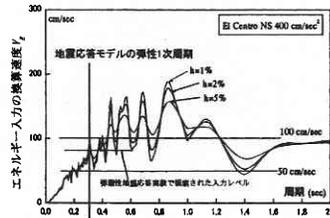


図 9 エネルギー入力

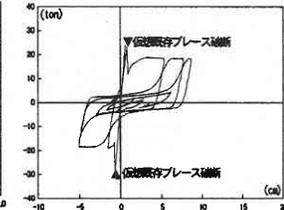
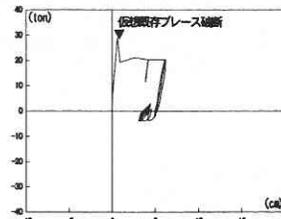
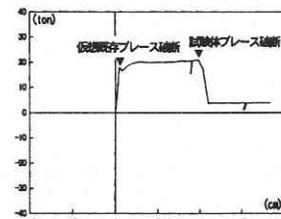


図 10 地震波入力



50cm/sec 入力



100cm/sec 入力

図 11 インパルス入力

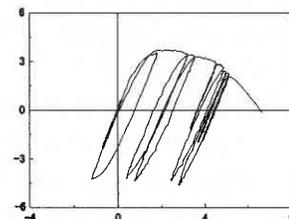
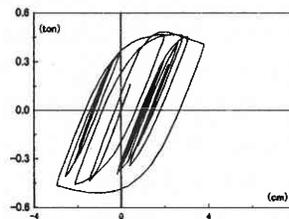


図 12 地震応答履歴曲線の例

荷重効果を想定する場合は、全エネルギー入力を適切に低減した初期速度を与えることも可能である。

(2000年10月16日受理)

参 考 文 献

- 1) 大井謙一, 高梨晃一他:「地震動のエネルギー入力率スペクトル」, 日本建築学会構造系論文集, 第420号, 1991年.
- 2) 地震荷重—内陸直下地震による強震動と建築物の応答, 日本建築学会, 2000年.
- 3) Newmark, N.M. and A.S.Veletsos, "Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple Systems to Earthquake Motions", II WCEE, Tokyo, 1960.
- 4) 大井謙一, 方沛宇他:「弾塑性地震応答解析における振動モード・崩壊モード低減数決定のためのFORM」, JCOSAR 2000論文集, 機会学会, 日本学術会議, 2000年.
- 5) 山田 稔, 河村 廣:「極限耐震設計と設計用地震動」, 日本建築学会構造系論文集, 第279号, 昭和54年.
- 6) 大井謙一, 李 昇宰他:「メカニカルファスナによる補強ブレースの地震・衝撃応答実験」, 構造工学論文集 Vol. 46 B, 日本建築学会, 2000年.