

エネルギーに着目した構造物の 応答計測技術に関する研究

藤田 聡¹, 古屋 治², 新津 靖³, 御子柴 正⁴, 藤村 俊⁵

- ¹工学博士 東京電機大学教授 工学部機械工学科 (〒101-8456 東京都千代田区神田錦町 2-2)
- ²博士 (工学) 東京都立工業高等専門学校講師 機械工学科 (〒140-0011 東京都品川区東大井 1-10-40)
- ³工学博士 東京電機大学教授 工学部機械工学科 (〒101-8456 東京都千代田区神田錦町 2-2)
- ⁴科学技術庁防災科学技術研究所防災総合研究部耐震工学研究室 (〒305-0006 つくば市天王台 3-1)
- ⁵東京電機大学大学院工学研究科機械システム工学専攻 (〒101-8456 東京都千代田区神田錦町 2-2)

The test specimen in three-dimensional fracturing test shifts from the elastic motion to strong nonlinear motion in the process of its destruction. Finally, it seems to reach the destruction under the complicated behavior. In the shake table test using seismic input, it is well known that to clarify the total input energy in the test is important for evaluation of structural decay mode. However, the measurement method, which measures the energy directly at good accuracy, has not yet been established. In this study, the strain, the response displacement as a factor of the destruction is evaluated from the viewpoint of energy, which is transferred between test specimen and shake table system, in order to clarify complicated fracture process in three-dimensional fracturing tests. Moreover, the purpose of this study is to upgrade the seismic design method by using such energy measurement method. This paper describes the results of evaluating of energy balance in shake table system from the shake table test using 5-storey building model in Natl. Res. Inst. for Earth Sci. and Disaster Prevention.

Key Words: Large shake table, Fracturing process, Energy measurement, Energy balance equation

1. はじめに

三次元破壊実験時の試験対象は、破壊に至る過程で弾性系から強非線形系へと移行し、複雑な挙動のもとに破壊に至ると考えられる。地震入力加振実験において、このような構造物の崩壊モードを評価する場合、地震による総エネルギー入力を明確にすることが重要であることが知られている^{1)~3)}。しかしながら、これを直接精度良く計測する手法はいまだ確立されていない。

本研究では、三次元破壊実験時での試験対象の複雑な破壊過程に関して、振動台システムと試験対象との間で授受されるエネルギーに着目し、このエネルギー量から試験対象の破壊開始時期の推定や、破壊の要因となるひずみや応答変位等を評価することで試験体の破壊過程を解明し、耐震設計手法の高度化を計ることを目的としている。本報では、今年度、防災科学技術研究所にて実施した5層せん断型建物モデルを用いた振動計測実験に関して、振動実験システム全体でのエネルギーの流れ等を評価した結果について示す。

2. エネルギー計測の概念

破壊・崩壊過程の解明の一つの手法として、振動台および加振対象物を含む全実験システムでのエネルギー授受関係から崩壊現象を解明することが考えられる。

図1は、この概念を図にしたものである。図に示すように、振動実験時での実験システム内のエネルギーバランスは、振動台を加振させるアクチュエータによる入力エネルギーと振動台上の加振

対象の振動・破壊といった応答で表される出力エネルギーに大別できるものと考えられる。実際の計測では入力エネルギーはアクチュエーター差圧等による振動台情報から、出力エネルギーはテーブル加速度、速度や試験体の加速度、速度、変位等による加振対象の応答計測情報から得られることになる。例えば、加振対象が建物等の場合の振動実験における応答エネルギーは、質量部の運動エネルギー、ばね要素による弾性エネルギー、減衰要素による消費エネルギーに分解される。しかしながら、破壊実験においては、構造物の塑性により生じる消費エネルギー、残留ひずみ、応力等の不確定な要素が生じる。そこで、エネルギー授受関係より、例えば加振対象の複雑な部位での曲げ、ひずみ、破断をエネルギーという観点から評価することが、加振対象全体の破壊・崩壊過程を解明する一つの要因になると思われる。

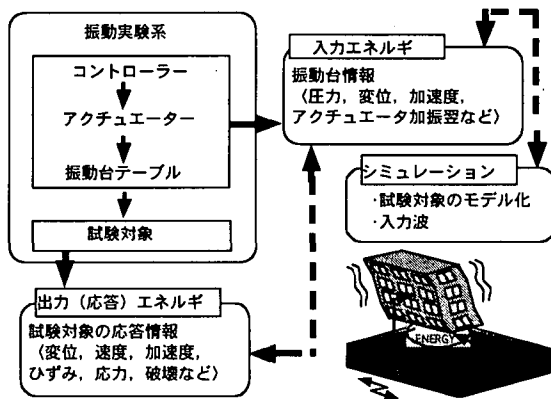


図1 エネルギー計測の概念

3. エネルギー釣合式

3. 1 振動実験施設での座標系

図2は振動台基礎部を含む全加振実験システムをモデル化したものである。図が示すように、加振実験システムを、油圧アクチュエータ部、加振テーブル部、加振対象部、基礎部に分割した場合、本系の運動方程式を考えると次のようになる。

$$\begin{cases} m_f \ddot{X}_f + c_f(\dot{X}_f - \dot{z}_h) + k_f(X_f - z_h) + Fr = 0 \\ m_s \ddot{X}_t + c_s(\dot{X}_s - \dot{X}_t) + k_s(X_s - X_t) - Fr = 0 \\ m_s \ddot{X}_s + c_s(\dot{X}_s - \dot{X}_t) + k_s(X_s - X_t) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

ここで、

z_h : 地動変位

x_f : 振動実験施設基礎の地面からの相対変位

x_s : 試験体の地面からの相対変位

x_t : 振動台テーブルの地面からの相対変位

c_f : 振動実験施設基礎と地面の間の減衰係数

k_f : 振動実験施設基礎と地面の間のばね定数

m_f : 振動実験施設基礎の質量

m_t : 振動台テーブル質量

F_r : アクチュエーター加振力

m_s : 試験体質量

c_s : 試験体減衰定数

k_s : 試験体ばね定数

また、

$$X_s = z_h + x_f + x_s$$

$$X_t = z_h + x_f + x_t$$

$$X_f = z_h + x_f$$

である。

本運動方程式において、いま、実験中に地震等、基礎部を支持する地盤の振動が生じない条件での加振実験時のみを対象に考える。この場合、地動変位を無視することができ、(1)式は、次のようになる。

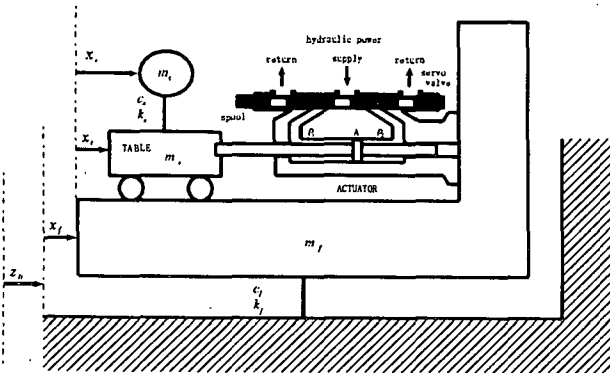


図2 モデル化した振動実験システム

$$\begin{cases} m_f \ddot{x}_f + c_f \dot{x}_f + k_f x_f + Fr = 0 \\ m_t (\ddot{x}_t + \ddot{x}_f) - c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_t) - k_s (x_s - x_t) - Fr = 0 \\ m_s (\ddot{x}_s + \ddot{x}_f) + c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_t) + k_s (x_s - x_t) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

さらに、地面（地球）と振動台基礎部との間に浮き基礎等の振動緩衝が存在し、振動実験施設基礎と地面の間の減衰係数 c_f 、および、ばね定数 k_f を無視できるものと仮定⁴⁾すると、(2)式は次式のようなになる。

$$\ddot{x}_f = -\frac{m_t}{m_f + m_t + m_s} \ddot{x}_t - \frac{m_s}{m_f + m_t + m_s} \ddot{x}_s$$

上式において、振動台基礎部が、モデル化した他の部位の質量に比べ十分大きい質量を有するものと仮定した場合、振動台基礎部の加速度 \ddot{x}_f は無視できることになる。これは、実験施設での運動方程式に関しては、振動台基礎が地面に対して、かつアクチュエータ反力に対して不動であると仮定するならば、振動台基礎部からの相対変位は、絶対座標系の絶対変位としてとらえることができることを意味する。結果として、振動実験システムの運動方程式は、振動台基礎部のないモデルとして扱うことが可能となり、振動台実験施設床からの運動方程式を考えると次式のように表すことができる。

$$\begin{cases} m_s \ddot{x}_s + c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_t) + k_s (x_s - x_t) = 0 \\ m_t \ddot{x}_t - c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_t) - k_s (x_s - x_t) - Fr = 0 \end{cases} \quad (3)$$

3. 2 エネルギー釣合式

本研究で提案する振動実験時でのエネルギー授受関係を表現可能なエネルギー釣合式を以下に示す。ここでは、前項で示した振動実験システムの運動方程式について考える。

運動方程式(3)に、試験体および振動台テーブルの微小時間での変位 $dx_s(\dot{x}_s dt)$ 、および、 $dx_t(\dot{x}_t dt)$ をそれぞれ乗じると、任意の時刻でのエネルギー量の釣合を表す式になる⁵⁾。さらに、加振継続時間 t_0 でそれぞれの項を積分すれば、振動実験終了時のエネルギー釣合式が得られる。

$$\begin{cases} \int_0^{t_0} m_s \ddot{x}_s \dot{x}_s dt + \int_0^{t_0} c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_t) \dot{x}_s dt \\ + \int_0^{t_0} k_s (x_s - x_t) \dot{x}_s dt = 0 \\ \int_0^{t_0} m_t \ddot{x}_t \dot{x}_t dt - \int_0^{t_0} c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_t) \dot{x}_t dt \\ - \int_0^{t_0} k_s (x_s - x_t) \dot{x}_t dt - \int_0^{t_0} Fr \dot{x}_t dt = 0 \end{cases} \quad (4)$$

上式を次式のように式変形する。

$$\begin{cases}
 \int_0^{t_0} m_s \ddot{x}_s \dot{x}_s dt + \int_0^{t_0} c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_t) (\dot{x}_s - \dot{x}_t) dt \\
 + \int_0^{t_0} c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_t) \dot{x}_t dt + \int_0^{t_0} k_s (x_s - x_t) (\dot{x}_s - \dot{x}_t) dt \\
 + \int_0^{t_0} k_s (x_s - x_t) \dot{x}_t dt = 0 \\
 \\
 \int_0^{t_0} m_t \ddot{x}_t \dot{x}_t dt - \int_0^{t_0} c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_t) \dot{x}_t dt \\
 - \int_0^{t_0} k_s (x_s - x_t) \dot{x}_t dt - \int_0^{t_0} Fr \cdot \dot{x}_t dt = 0
 \end{cases} \quad (5)$$

(5)式をエネルギー授受関係に着目し、両式をたし合わせ整理すると次式のようになる。

$$\begin{aligned}
 & \int_0^{t_0} m_t \ddot{x}_t \dot{x}_t dt + \int_0^{t_0} m_s \ddot{x}_s \dot{x}_s dt \\
 & + \int_0^{t_0} c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_t)^2 dt + \int_0^{t_0} k_s (x_s - x_t) (\dot{x}_s - \dot{x}_t) dt \\
 & = \int_0^{t_0} Fr \cdot \dot{x}_t dt
 \end{aligned} \quad (6)$$

上式が、本研究で提案する振動実験時でのエネルギー授受関係を表現可能なエネルギー釣合式である。本式が示すように、(5)式のような式変形を行うことにより、振動実験時でのアクチュエータ加振力により表される入力エネルギーが、振動実験中の試験対象にどのように分配されるかを計測することが可能になると考えられる。なお、(6)式は、弾性範囲内での運動方程式となっているが、式の復元力項に弾塑性復元力特性等を導入することにより、試験対象の支柱等が塑性変形を生じるような状況でのエネルギー授受関係についても評価可能になると思われる。

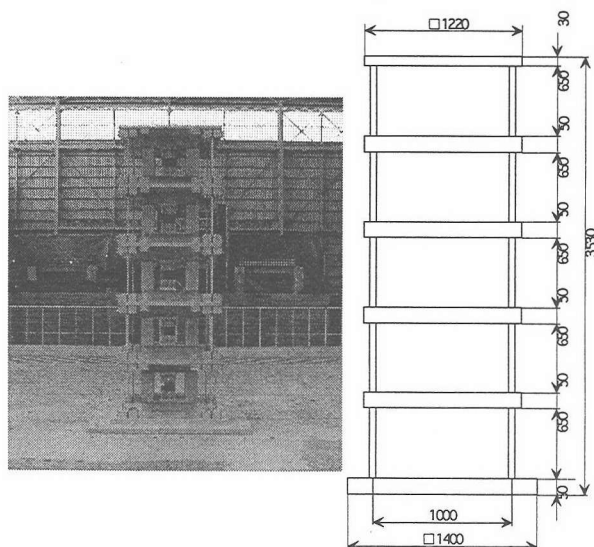


図3 計測対象の建物モデル

4. 振動計測実験

4.1 実験に用いた試験体

図3は実験に用いた5層せん断型建物モデルである。最下層(床)から4層までの各層を1055[kg]、5層を782[kg]、振動台への固定用治具1417[kg]とし総重量7446[kg]、総高さ3580[mm]の鉄骨造である。柱脚部材としてばね鋼材を用い各層間を4本の柱で支えるモデルとした。建物モデルの各固有振動数は、1次2.85[Hz]、2次8.25[Hz]、3次12.8[Hz]、4次16.15[Hz]、5次18.3[Hz]である。また、この建物モデルは1層から5層まで全て等しい剛性、減衰を有するものとして設計、製作されている。

4.2 計測および実験方法

実験は、科学技術庁防災科学技術研究所耐震工学実験施設内の1次元振動台を用いて実施した。本研究では、エネルギー釣合式をもとに振動実験システムでのエネルギー授受関係を評価するために、振動実験時の応答計測等が重要となる。図4は、実験計測系統図を示したものである。加速度計は、サーボ型加速度計と動ひずみ型加速度計をそれぞれ1層から5層、および振動台テーブルと建物モデルの取り付け治具部の7箇所、計14箇所設置した。また、変位計を1層から5層の層間にそれぞれ設置した。さらに、振動台に設置されている4台のアクチュエータ差圧の平均値及び振動台テーブルの変位を合わせ全22chを計測した。計測されたデータは、アンプで増幅しワークステーションで物理値に変換される。なお、振動台テーブルは、建物モデルの取付治具を含め161417[kg]である。

入力波は、正弦波および代表的な実地震波として、El Centro NS, Kobe NS, Hachinohe EW, Taft NS, Akita NSの5波形を使用した。なお、入力に際しては、各地震波を線形倍した人工地震

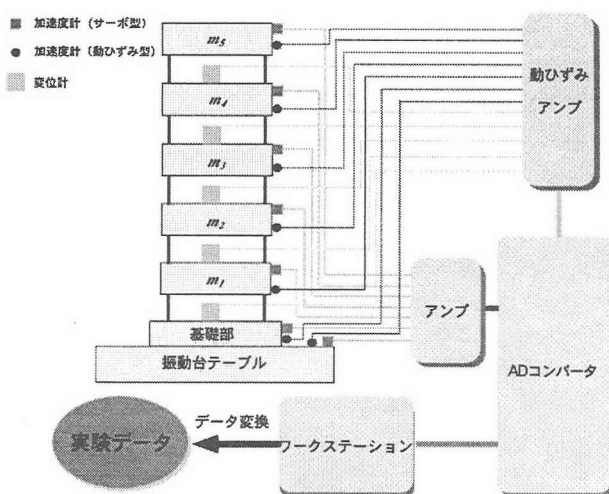


図4 実験計測系統図

波として入力した。

4. 3 エネルギー釣合式

実験に用いた 5 層せん断型建物モデルの運動方程式は、次のようになる。

$$\begin{cases}
 m_5 \ddot{x}_5 + c_5(\dot{x}_5 - \dot{x}_4) + k_5(x_5 - x_4) = 0 \\
 m_4 \ddot{x}_4 + c_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) + k_4(x_4 - x_3) - c_5(\dot{x}_5 - \dot{x}_4) \\
 - k_5(x_5 - x_4) = 0 \\
 m_3 \ddot{x}_3 + c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + k_3(x_3 - x_2) - c_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) \\
 - k_4(x_4 - x_3) = 0 \\
 m_2 \ddot{x}_2 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1) - c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) \\
 - k_3(x_3 - x_2) = 0 \\
 m_1 \ddot{x}_1 + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_t) + k_1(x_1 - x_t) - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \\
 - k_2(x_2 - x_1) = 0 \\
 m_t \ddot{x}_t - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_t) - k_1(x_1 - x_t) = Fr
 \end{cases} \quad (7)$$

上式に先と同様に微小時間での各変位を乗じて、加振継続時間 t_0 で積分し、エネルギーの授受関係に着目して式変形を行うと次式のようになる。

$$\begin{aligned}
 & \int_0^{t_0} m_t \ddot{x}_t \dot{x}_t dt + \int_0^{t_0} m_1 \ddot{x}_1 \dot{x}_1 dt + \int_0^{t_0} m_2 \ddot{x}_2 \dot{x}_2 dt + \int_0^{t_0} m_3 \ddot{x}_3 \dot{x}_3 dt \\
 & + \int_0^{t_0} m_4 \ddot{x}_4 \dot{x}_4 dt + \int_0^{t_0} m_5 \ddot{x}_5 \dot{x}_5 dt + \int_0^{t_0} c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_t)^2 dt \\
 & + \int_0^{t_0} c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)^2 dt + \int_0^{t_0} c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2)^2 dt \\
 & + \int_0^{t_0} c_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_3)^2 dt + \int_0^{t_0} c_5(\dot{x}_5 - \dot{x}_4)^2 dt \\
 & + \int_0^{t_0} k_1(x_1 - x_t)(\dot{x}_1 - \dot{x}_t) dt + \int_0^{t_0} k_2(x_2 - x_1)(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) dt \\
 & + \int_0^{t_0} k_3(x_3 - x_2)(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) dt + \int_0^{t_0} k_4(x_4 - x_3)(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) dt \\
 & + \int_0^{t_0} k_5(x_5 - x_4)(\dot{x}_5 - \dot{x}_4) dt = \int_0^{t_0} Fr \cdot \dot{x}_t dt
 \end{aligned} \quad (8)$$

以下では、本式に実験時に計測した各層応答加速度、層間変位等の計測データを適用し、実験時のエネルギー授受関係を評価する。

4. 4 実験結果

図 5 は、加振周波数 1Hz, 加振振幅 30mm の正弦波加振時における、(8)式の各項で求まるそれぞれのエネルギー時刻歴波形を実験結果、シミュレーション結果で比較したものである。左 3 列が実験結果、右 3 列がシミュレーション結果である。また、それぞれ、1 段目に入力エネルギー、振動

台テーブルエネルギー、2～4 段目は、紙面の関係で 1, 3, 5 層での運動エネルギー、減衰エネルギー、弾性エネルギーのみを示した。結果が示すように、今回の実験では、入力されたエネルギーのほとんどが振動台の運動エネルギーとして配分され、残りのエネルギーを建物モデルで使用していることがわかる。また、各層によっても、エネルギーの配分状況は異なり、弾性エネルギーに関しては、上層階に向かって小さくなる傾向になるが、運動エネルギーに関しては、3, 1, 5 層の順にその大きさを変えている。実験に使用した建物モデルの減衰が小さいため、結果では確認できないが、減衰に関しては下層側に向かって大きくなる傾向となっている。次に、図 6 は、TAFT NS 50gal 入力時の実験結果について示したものである。結果が示すように、入力エネルギーに対して振動台テーブルの運動エネルギーが支配的となる傾向は同様であるが、正弦波加振時とは異なり、各層でのエネルギー使用配分は、運動エネルギーが上層階に向かって大きくなる。このように、本研究で提案するエネルギー釣合式を用いることにより、加振実験システムでの時々刻々のエネルギーの流れを把握できることになる。よって、試験体支柱等に破壊が生じるような場合、弾性範囲内での振動実験時と入力エネルギー量は同一であるが、応答に関するエネルギーバランスは異なる配分状況となることが予想でき、振動中の破壊箇所やその時期の推定が可能になると思われる。また、破壊時およびその後の破壊箇所での使用エネルギーがどこから供給されているか等のエネルギーの流れについても評価できるものと思われる。なお、シミュレーション結果と実験結果の比較においては、良好な一致が得られており、基本的に予備解析段階で実施する振動実験時のエネルギーの大きな流れをあらかじめ検討することも可能であることが示された。

図 7 は、(8)式により求まる時々刻々のエネルギー総和量を示したものである。左 2 列が正弦波入力時の結果、右 2 列が地震波入力時の結果である。また、それぞれ、左列が実験結果、右列がシミュレーション結果、上から入力エネルギー、入力エネルギーの振動台テーブルおよび各層へのエネルギー配分、5 層、3 層、1 層でのエネルギー配分を表したものである。結果が示すように、両結果とも、振動台テーブル質量に対して実験で用いた建物モデルの質量が約 1/30 と非常に小さいため、前述のエネルギー時刻歴波形でも述べたように、入力エネルギーの大部分は振動台の運動エネルギーに使用されている。残りのエネルギーは、2 段目に示す入力エネルギーの各層へのエネルギー配分が示すように、正弦波加振時では、各層ほぼ同程度のエネルギー配分、地震波では若干異なるエネルギー配分となっている。さらに、3 段目以降に示す結果によって、各階層で配分されたエネルギーの詳細な配分状況がわかることになる。このた

め、先にも述べたような実験時に試験体のある部位で破壊するような場合、その部位に振動実験中どの程度のエネルギー量が投入され、破壊に至ったのかなどを評価できるものと思われる。シミュレーションとの比較に関しては、実験と異なる結果を示す場合が生じているが、これは、解析モデルの同定精度、実験計測系統での位相差などに依存するところが多いものと考えられ、現在、再度検討を加えている。しかしながら、エネルギー釣合式をもとに実験時のエネルギー授受関係を評価することで、振動実験システム内でのエネルギーの流れや配分状況を検討することが十分可能になることを確認した。

5. おわりに

本報では、振動実験時での実験システム内で生じるエネルギーの授受関係を評価可能なエネルギー釣合式を提案し、5層せん断型建物モデルを用いた振動計測実験より、エネルギー釣合式を用いた振動実験システム全体でのエネルギーの配分状況等を検討した。結果として、本研究で提案するエネルギー釣合式を用いることにより、基本的に振動実験時の実験システム内のエネルギー授受関係を評価できることを確認した。今後は、試験対象の弾性範囲内での加振実験だけでなく脚注部材が塑性変形するような実験を検討し、エネルギー釣合式を用いた破壊箇所や破壊開始時期の推定、

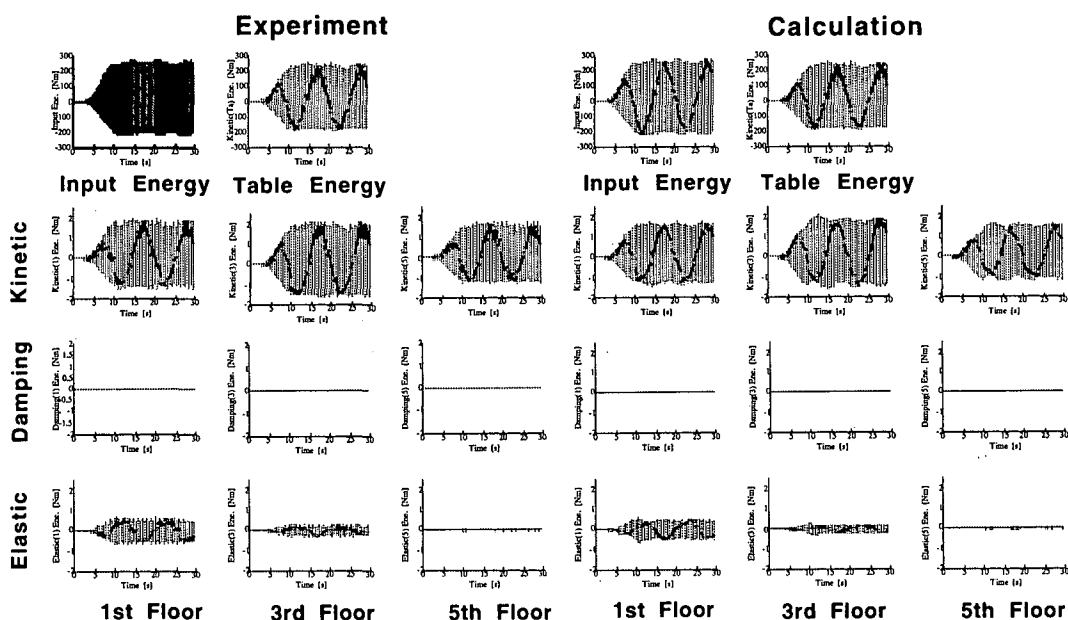


図5 エネルギー時刻歴波形の比較 (正弦波 1Hz 30mm)

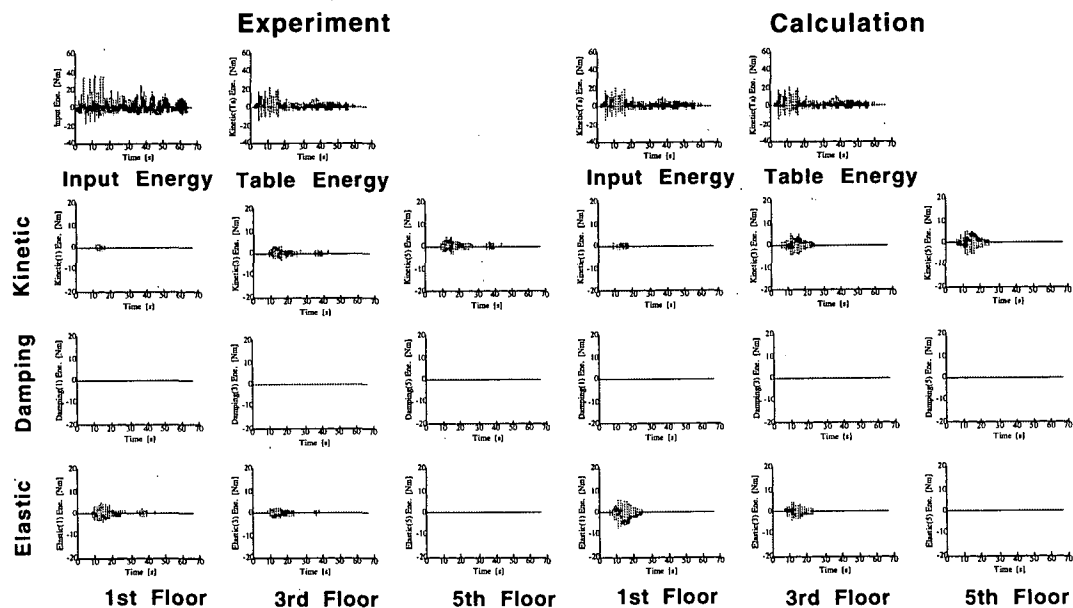


図6 エネルギー時刻歴波形の比較 (TAFT NS 50gal)

破壊箇所への投入エネルギー，破壊の要因となるひずみや応答変位等を評価可能な手法を検討する。

参考文献

- 1) 高圧ガス保安協会：鋼製平底円筒形貯槽の耐震実験報告（第1回），NO.7，VOL.21，pp.363-373，1984.
- 2) 高圧ガス保安協会：鋼製平底円筒形貯槽の耐震実験報告（第2回），NO.8，VOL.21，pp.440-

452，1984.

- 3) 高圧ガス保安協会：鋼製平底円筒形貯槽の耐震実験報告（第3回），NO.9，VOL.21，pp.512-529，1984.
- 4) 箕輪親宏：振動台の仕事について，日本機械学会東北支部地方講演会講演論文集，VOL.1997 NO.いわき，pp.75-76，1997.
- 5) 秋山宏：建築物の耐震極限設計，東京大学出版，1987.

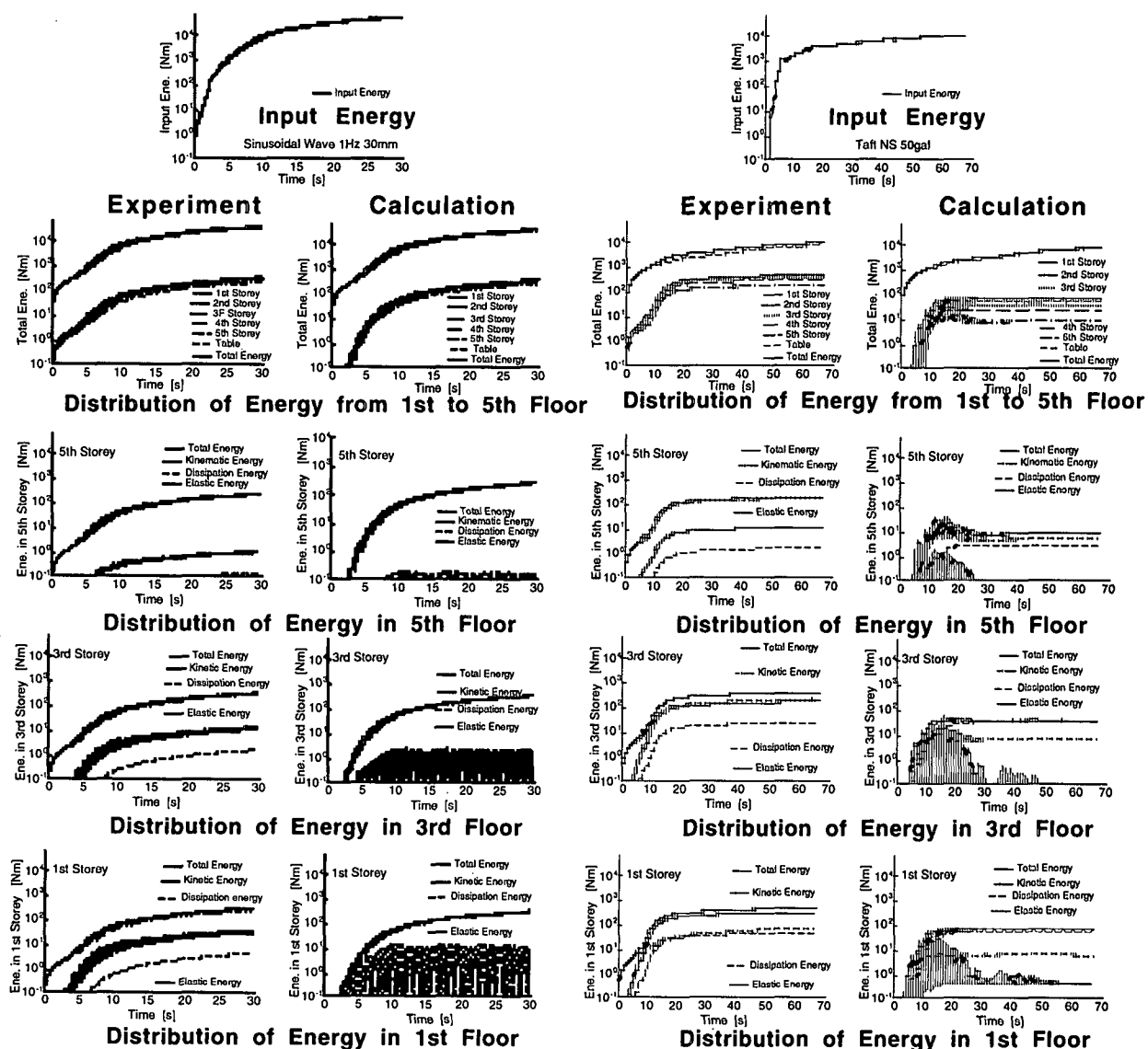


図7 総エネルギー配分の比較