

(b-10)

エネルギーの流れに着目した 構造物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, 池田 祐輔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助教授 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 情報環境学部情報環境デザイン学科 (〒101-8456 千葉県印西市武西学園台 2-1200)

⁴独立行政法人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工学専攻 (〒101-8456 東京都千代田区神田錦町 2-2)

The behavior of a test structure in three-dimensional fracturing test will become a very complicated motion. This study pays attention to the energy, which flows between test specimen and shake table, in order to solve a structural fracturing process from a viewpoint of energy flow. This report describes the results of energy measurement tests using a fracturing model and the energy balance equation. One is the test result using a nonlinear structural characteristic model which was applied a rubber bearing as a nonlinear characteristic element. The other is a fracturing model. The deformation of the model shifts to plastic region from elastic area, and the change of structural characteristic is regarded as a fracture.

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

1. はじめに

我が国は世界有数の地震国であり、これまで発生した震災の中でも平成7年1月17日の兵庫県南部地震において高速道路や建築中階層の崩壊などの大規模な被害が出たことは我々の脳裏に鮮明に焼き付いている。このような惨劇が二度と起こらないよう、今後予期される直下型大地震に対して各種構造物の耐震設計の高度化が要求されている。特に、これら構造物の破壊へ至る経緯の解明・実証には、実大規模のモデルを用いた試験の重要性がクローズアップされている。このような背景から、防災科学技術研究所では、構造物の破壊過程を解明・実証可能な実大三次元震動台の建設を進めている。

三次元破壊実験時の試験対象は、弾性系から強非線形系へ移行し、複雑な挙動のもと破壊へ至ると考えられる。このような構造物の崩壊現象を評価する場合、地震による総エネルギー入力^{2)~4)}を明確にする必要があると知られている。しかしながら、これを直接かつ精度よく計測する手法はまだ確立されていない。

本報では、三次元破壊実験時での試験対象の破壊過程を解明し得る一つの手法として、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や試験対象の各エネルギーの割合から破壊時期の推定方法を提案するとともに応答結果から評価が困難である加振実験終了後の試験対象の損傷度を検討した結果について報告する。

2. エネルギー計測手法の概念

構造物の破壊・崩壊過程を解明する一つの手法として、振動台及び加振対象物を含んだ振動実験全システムのエネルギー授受関係より破壊・崩壊過程を解明することが考えられる。

図1は、この概念を図で表したものである。図に示すように振動実験システム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からなる入力エネルギー、

加振対象からなる出力(応答)エネルギーに大別できる。実際の計測では入力エネルギーは振動台の加速度、変位及びアクチュエータの圧力等の振動台システム情報から、応答エネルギーはテーブルの加速度、変位や加振対象の加速度、速度、変位等の応答情報から得られることになる。応答エネルギーは例えば加振対象を建物とした場合、質量部からなる運動エネルギー、バネ要素からなる弾性エネルギー、減衰要素からなる減衰エネルギーに分解できる。しかしながら、破壊実験においては、構造物の塑性によって残留ひずみ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、加振対象の複雑な部位での曲げ、ひずみ、破断と言った現象をエネルギーと言う観点から評価することが破壊・崩壊過程を解明する一つの要因と考えられる。

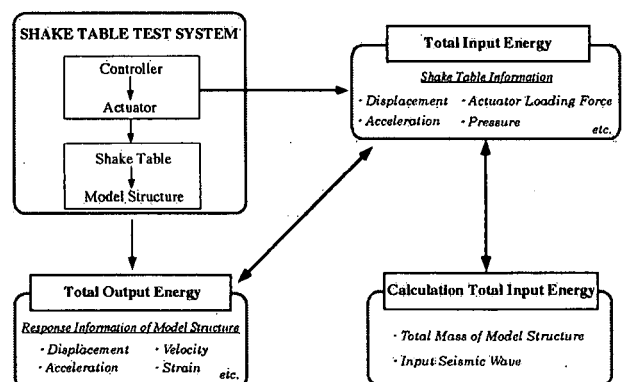


Fig.1 Concept of Energy Measurement

3. エネルギー釣り合い式

3.1 振動実験システムにおける座標系

実際の振動実験をモデル化したものを図2に示す。図に示す振動実験システムを油圧アクチュエータ、振動台、試験対象と分割した場合運動方程式は式(1)となる。なお、ここでは基礎部の外乱による振動、およびアクチュエータ反力による振動を無視している。

$$\begin{cases} m_s \ddot{x}_s + c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_i) + k_s (x_s - x_i) = 0 \\ m_i \ddot{x}_i - c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_i) - k_s (x_s - x_i) - Fr = 0 \end{cases} \quad (1)$$

ここで、図2の各スペックは

- m_i : 振動台質量
- m_s : 試験体質量
- c_s : 試験体の減衰係数
- k_s : 試験体のバネ係数
- x_i : 質点の振動台施設からの相対変位
- x_s : テーブルの振動台施設からの相対変位
- Fr : アクチュエータ加振力

3. 2 エネルギー釣り合い式

本研究ではエネルギー釣り合い式によって振動実験時でのエネルギー授受関係を表現することを提案する。ここでは、前項で示した運動方程式について考える。

式(1)は、系の振動応答を支配する基本関係式であり、これを積分することにより系のエネルギーの応答が求まる。式(1)に変位増分を乗じて、加振継続時間で積分すると、エネルギー釣り合い式である式(2)が求まる⁵⁾。

$$\begin{aligned} & \int_0^t m_s \dot{x}_s \dot{x}_s dt + \int_0^t m_i \dot{x}_i \dot{x}_i dt \\ & + \int_0^t c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_i) (\dot{x}_s - \dot{x}_i) dt + \int_0^t k_s (x_s - x_i) (x_s - x_i) dt \\ & = \int_0^t Fr \dot{x}_i dt \end{aligned} \quad (2)$$

式(4)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が表現可能なエネルギー釣り合い式である。式(4)が示すように、式(3)のような式変形を行うことにより、振動実験時での入力エネルギーが、試験対象にどのように分配されているかを計測可能になると考えられる。なお式(1)は弾性範囲内の運動方程式であるが、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関しても表現可能になると思われる。

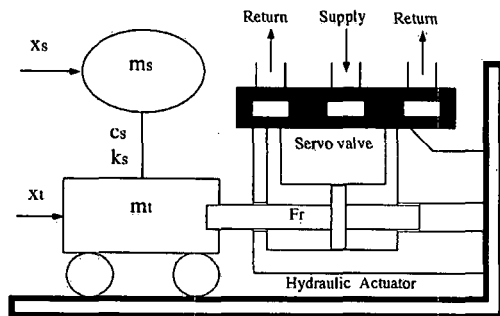


Fig.2 Shake Table Test System

4. 構造物の破壊を想定したエネルギー授受関係

4. 1 解析モデル

解析モデルは図2と同様の1層せん断型建物とした。質量は12kg、固有振動数は6.6Hz、振動台テーブルの質量は120kgである。本章では解析モデルを弾性モデルと

破壊を想定した弾塑性モデルにおいて解析を行い、比較検討から破壊開始時期ならびに応答変位の推定する手法を検討する。

4. 2 弾性モデルのエネルギー釣り合い式

解析で用いた1層せん断型建物モデルの運動方程式は式(1)、エネルギー釣り合い式は(2)と同様となる。左辺第1項より振動台運動エネルギー試験対象の運動エネルギー、試験体弾性エネルギー、減衰エネルギー、そして右辺の入力エネルギーとなっている。

破壊を想定し脚柱の復元力特性を前節の弾性モデルから図3に示す弾塑性モデルに置き換える。弾性項に関しては積層ゴムなどの応答解析に良く用いられる式(3)のレイトモデル⁶⁾を用いた。ここで、 F_D は脚柱の復元力、 K_{D0} は初期剛性、 F_{D0} は降伏力、 X_Y は降伏変位、 K_{DY} は降伏後の剛性、 α は降伏後のこう配を決定するパラメータ、 n はヒステリシスループの形状の丸み(弾性から塑性への移り方)を決定するパラメータ(正の奇数)である⁶⁾。

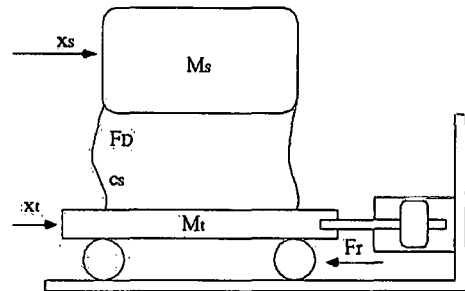


Fig.3 Elasto-Plastic Structure Model

$$\dot{F}_D(t) = K_{D0} \dot{x}_s \left[1 - \text{sgn}(\dot{x}_s) \left\{ \frac{F_D(t)}{F_{D0}} - S(t) \right\}^n \right]$$

$$S(t) = \alpha \left\{ \frac{x_s}{X_Y} - \frac{F_D(t)}{F_{D0}} \right\} \quad (3)$$

$$K_{D0} = F_{D0} / X_Y$$

$$K_{DY} = K_{D0} \frac{\alpha}{(\alpha + 1)}$$

本モデルを適用した運動方程式を式(4)、エネルギー釣り合い式を式(5)示す。

$$\begin{cases} m_s \ddot{x}_s + c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_i) + F_D = 0 \\ m_i \ddot{x}_i - c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_i) - F_D - Fr = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \int_0^t m_s \dot{x}_s \dot{x}_s dt + \int_0^t m_i \dot{x}_i \dot{x}_i dt \\ & + \int_0^t c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_i) (\dot{x}_s - \dot{x}_i) dt + \int_0^t F_D (\dot{x}_s - \dot{x}_i) dt \\ & = \int_0^t Fr \dot{x}_i dt \end{aligned} \quad (5)$$

4. 3 解析結果

図 4 に弾性モデル, 図 5 に弾塑性モデルでのエネルギー時刻歴応答を示す. なお入力波は弾性範囲内では Hachinohe EW2.0[m/s²], 弾塑性を想定した場合には同波 3.0[m/s²]を入力した. グラフは最左部下段に入力エネルギー, 最左部上段に総応答エネルギーを示し, 右側下段に振動台の運動エネルギー, 上段に試験対象へ投入された運動・減衰・弾性エネルギーを示す. どちらの結果も入力エネルギーが振動台の運動エネルギー, 試験対象の運動・減衰・弾性エネルギーに分配されていることが確認できる. 次に, 入力と総応答エネルギーを時々刻々と積分する際に, 実験で用いる各種計測器による微小計

測誤差が総エネルギー量に関するエネルギーバランスを評価することを困難にさせると予想される, そこで本研究では構造物が振動したときのエネルギーを絶対値で積分し, 構造物に投入されたエネルギーの使用状況の評価することとした. 図 6 にそれぞれにおける総エネルギー波形を示す. 本図が示すように運動・減衰・弾性エネルギーの使用状況が確認することができる. このように, 本研究で提案するエネルギー釣合い式を用いることにより, 振動実験システムでのエネルギーの流れをあらかじめシミュレーション解析から把握することが可能であることを確認した.

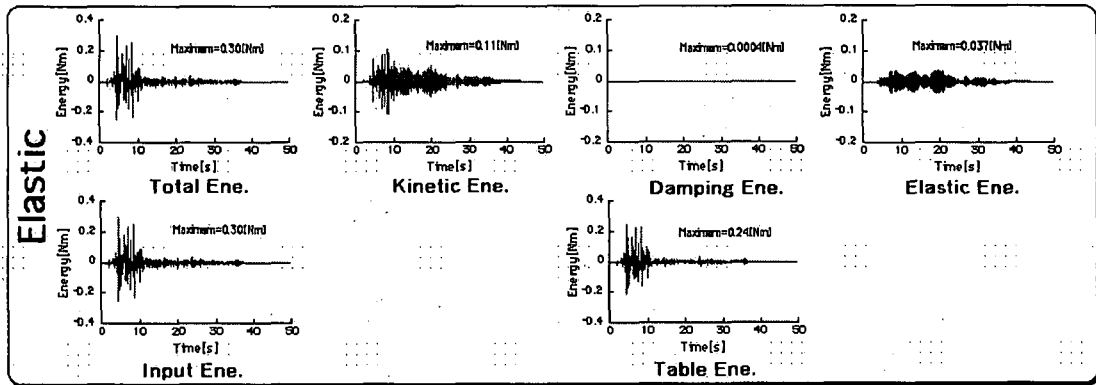


Fig.4 Time History on Energy flow (Hachinohe EW2.0m/s²,Elastic Model)

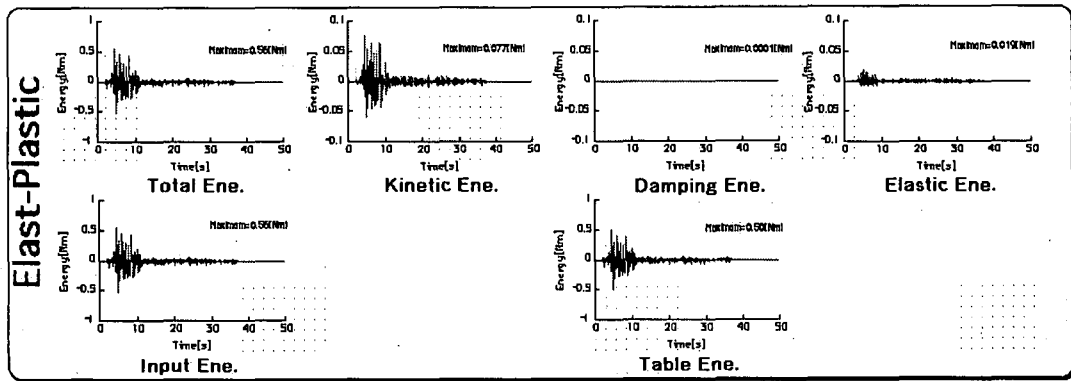


Fig.5 Time History on Energy flow (Hachinohe EW3.0m/s², Elast-Plastic Model)

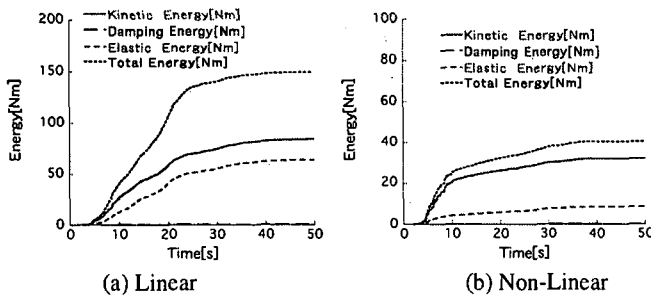


Fig.6 Time History on Total Energy

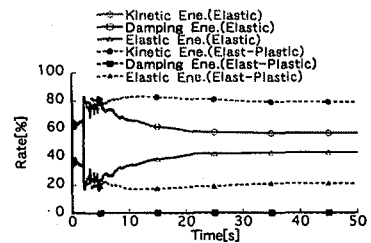


Fig.7 Time History of Energy Rate

4. 4 比較検討

図 6 より総エネルギー波形から振動実験時においてエネ

ルギーが構造物での使用状況を把握することができた. そこで本節では構造物に投入されたエネルギー量のエネ

ルギーバランスに着目し、破壊開始時期の推定等に関して検討した。図7は、破壊開始時期の推定に関して検討したものである。結果として、本研究では、総出力エネルギーにより、各応答エネルギーを無次元化し、エネルギー比として波形を処理することで、その波形の変化から推定時期を評価した。結果が示すように、5秒付近で弾性と弾塑性の波形に大きな変化が生じていることが示されている。このように、エネルギー比という観点で波形を処理することでより明確に破壊現象をとらえることが可能になると考えられる。

5. 非線形性を有する試験体を用いた振動計測実験

5.1 実験モデル

図8に積層ゴムを脚注として用いた試験体を示す。この試験体は積層ゴム4点で支持しており非線形性を容易に模擬できるものである。また積層ゴムには振幅依存性を持つものである。運動方程式を式(6)、およびエネルギー釣り合い式を式(7)に示す。減衰項は弾塑性項に含め、前章同様に式(3)を用い脚柱の復元力を求めた。

$$\begin{cases} m_s \ddot{x}_s + F_D = 0 \\ m_t \ddot{x}_t - F_D - Fr = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \int_0^{t_0} m_s \ddot{x}_s \dot{x}_s dt + \int_0^{t_0} m_t \ddot{x}_t \dot{x}_t dt + \int_0^{t_0} F_D (\dot{x}_s - \dot{x}_t) dt \\ & = \int_0^{t_0} Fr \dot{x}_t dt \end{aligned} \quad (7)$$

5.2 実験結果

図9に加振周波数 2.2[Hz], 加速度振幅 10.0[m/s²]入力時におけるエネルギー時刻歴応答波形を示す。上段が実験、下段が解析結果である。またグラフは最左部下段に

入力エネルギー、最左上段に総応答エネルギーを示し、右側下段に振動台の運動エネルギー、上段に試験対象へ投入された運動・弾塑性のエネルギーを示す。実験及び解析結果の比較より、入力及び応答エネルギー、図10に示すエネルギー使用状況においても良好な一致が見られ、弾性範囲内の実験同様に試験対象が非線形性をもつ場合でも本手法が適用可能であることを確認した。また、入力エネルギーが振動台の運動、1層の運動、弾塑性の各エネルギーに分配されていることがわかる。振動台の運動エネルギーは上部構造物に対して、振動台の質量が大きいため入力エネルギーの約7割を占めている。1層の各エネルギーに着目すると、層間変形量が非常に小さいことから運動エネルギーは、弾塑性エネルギーの約10倍となっている。この結果からエネルギー量より破壊時期の推定や最大及び残留変形量が推定可能であると考えられる。さらにエネルギーバランスに着目した非線形モデルを等価な線形モデルに扱うことも可能であると考えられる。

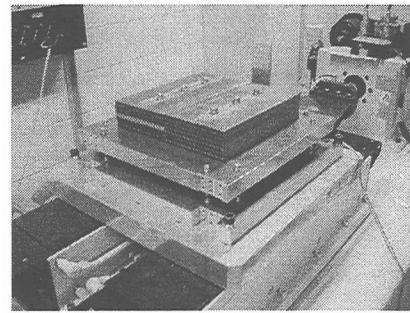


Fig.8 Test Model used for lubber bearing

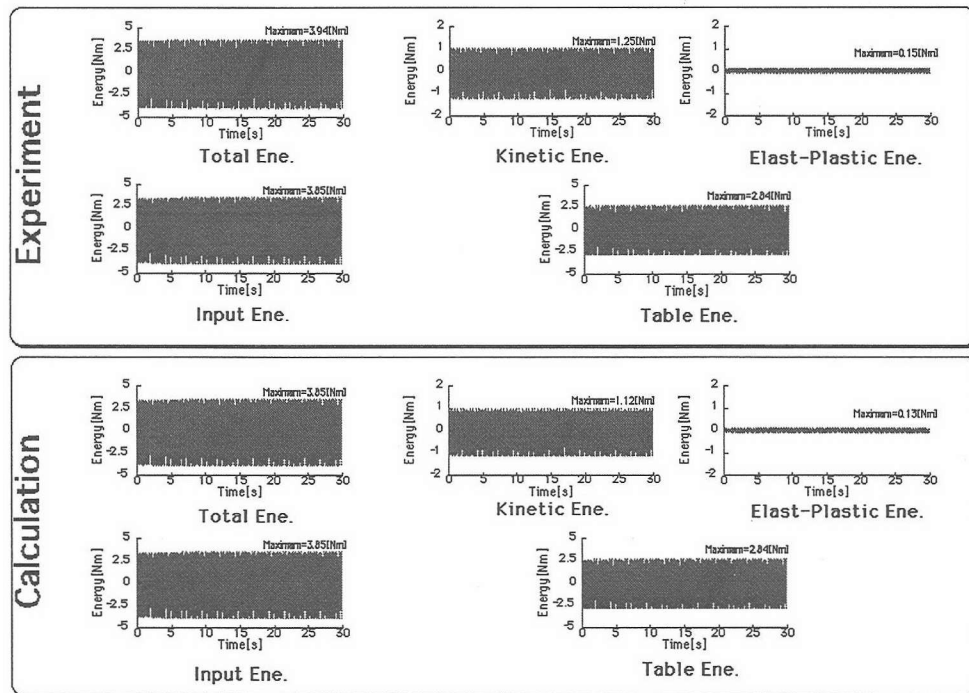
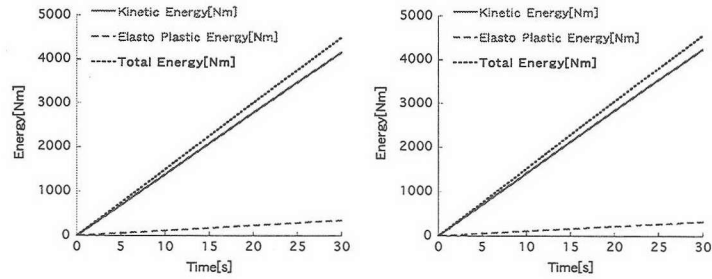


Fig.10 Time History of Energy (Sine 2.2Hz 10.0m/s²)



(a) Experiment (b) Calculation
 Fig.10 Time History of Total Energy (Sine 2.2Hz 10.0m/s²)

6 倒壊実験による破壊開始時期推定法の検討

6. 1 実験モデル

第3章のせん断モデルによる解析結果より破壊開始時期推定法の提案，検討をした．本節では実構造物の倒壊を考慮し，2層倒立振り子モデルを用いて実験，解析を行い上記手法の更なる有効性を検討した．図11に実験供試体を示す．各層は床面中心に弾塑性ダンパとして良く用いられるみがき鋼棒で支持されている．降伏点を超えると徐々にモデルが倒壊し，質点が荷重受け台で支えられる構造になっている．モデルの質量は，1層が32kg，2層を21kgとなり各固有振動数は1次0.7Hz，2次1.5Hzである．またモデルのエネルギー釣合ひ式は式(8)に示す．脚注の復元力特性 F_D については式(7)と同様であるが $\dot{x}_i = l_i \cos \theta_i \dot{\theta}_i$ としている．

ここで，図12の各スペックは

- θ_i : 各層回転角度
- m_i : 各層質量
- c_i : 各層減衰係数
- F_{Di} : 各層復元力
- l_i : 脚注全長
- \ddot{z}_h : 入力加速度
- g : 重力加速度

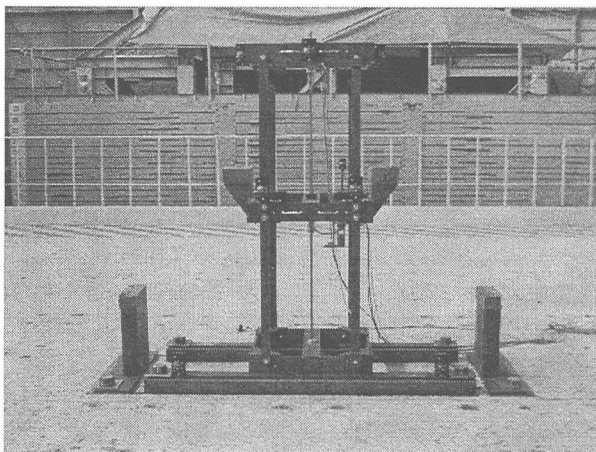


Fig.11 Structure Model

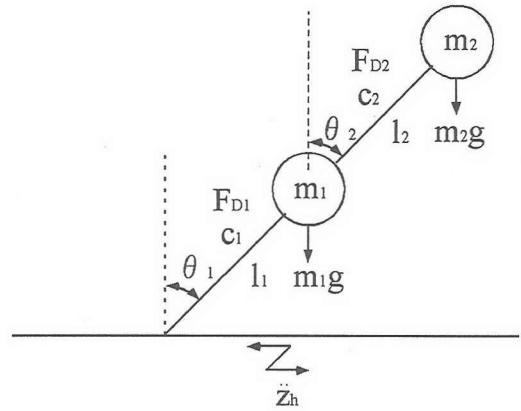


Fig.12 Analysis Model

$$\begin{aligned}
 & \int_0^t (m_1 + m_2) l_1 \ddot{\theta}_1 \dot{\theta}_1 dt + \int_0^t m_2 l_2 \ddot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \dot{\theta}_1 dt \\
 & + \int_0^t m_2 l_2 \dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \dot{\theta}_1 dt \\
 & - \int_0^t (m_1 + m_2) g \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 dt + \int_0^t F_{D1} \dot{\theta}_1 dt + \int_0^t c_1 l_1 \dot{\theta}_1^2 dt \\
 & = - \int_0^t m_1 \ddot{z}_h \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 dt \quad (8) \\
 & \int_0^t m_2 l_2 \ddot{\theta}_2 \dot{\theta}_2 dt + \int_0^t m_2 l_1 \ddot{\theta}_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) \dot{\theta}_2 dt \\
 & - \int_0^t m_2 l_1 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \dot{\theta}_2 dt \\
 & - \int_0^t m_2 g \sin \theta_2 \dot{\theta}_2 dt + \int_0^t F_{D2} \dot{\theta}_2 dt + \int_0^t c_2 l_2 \dot{\theta}_2^2 dt \\
 & = - \int_0^t m_2 \ddot{z}_h \cos \theta_2 \dot{\theta}_2 dt
 \end{aligned}$$

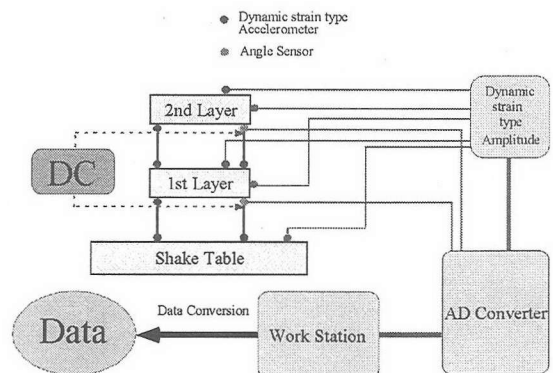


Fig.12 Experiment Measure System

6. 2 計測及び実験方法

実験は、防災科学技術研究所耐震工学実験施設内の1次元振動台を用いた。図12に実験における計測系統図を示す。計測データは、各層、振動台及び基礎部に動ひずみ型加速度計を計5ch、各層間に回転角度計を計2ch、振動台からの情報としてアクチュエータの平均圧力、振動台変位および加速度の計3chの合計10chである。計測データはワークステーションで電圧値を物理値に変換され記録される。入力波は、正弦波及び代表的な地震波として、El centro NS, Taft NS, Hachinohe EW, Kobe NSの4波形を線形倍した人工地震波を使用した。

次項では、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および破壊開始時期推定法について評価する。

6. 3 実験及び解析結果

図14に Kobe NS 2.11m/s^2 入力時における各エネルギー比の時刻歴を示す。(a)が実験結果、(b)左側が解析結果である。計測開始から3秒付近までエネルギー投入量が微小なため誤差が生じるものの、エネルギー比として良好な一致が見られる。また図15に示す Kobe NS 7.09m/s^2 ではモデルが大きく傾き倒壊した場合であるが、実験及び解析結果を比較しても、ポテンシャルエネルギー比に誤差が生じているものの、他のエネルギー比において良好な一致が見られた。破壊開始時期推定に関して、弾性範囲内と崩壊した場合との比較をすると、第1節で述べた推定法の妥当性が検証できたとと言える。さらに、試験対象が崩壊すると運動エネルギーが急激に低下し、弾塑性エネルギーとポテンシャルエネルギーが増加するといった定性的傾向をみることで、応答変位や応答加速度等からでは評価が困難である加振実験時後の試験対象の損傷度を検討する指針になると思われる。

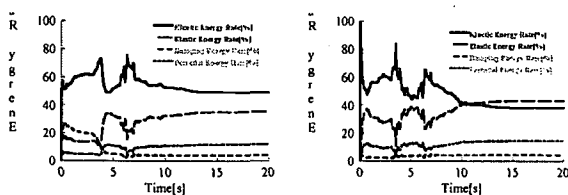


Fig. 14 1st later Energy Rate (Input Kobe NS 2.11m/s^2)

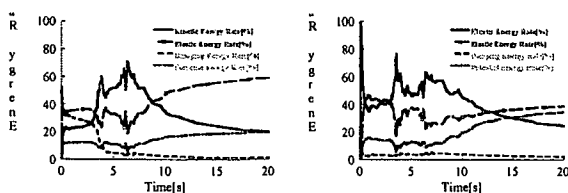


Fig. 15 1st later Energy Rate (Input Kobe NS 7.09m/s^2)

6 おわりに

本報では、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可能なエネルギー釣合式を提案し、実際の振動実験よりシステム全体のエネルギーの配分状況

を検討した。また、破壊時期の推定に関して、実験及び解析結果から推定法について検討した。結果としてエネルギー釣合式を用いることにより、精度良く振動実験時の実験システム内のエネルギー授受関係を把握することが可能となり、エネルギー釣合式が有効であることを確認した。また、解析モデルとして弾性モデルと破壊を想定した弾塑性モデルを用いて解析を行い、総出力エネルギーで各応答エネルギーを無次元化したエネルギー比を用いることで破壊開始時期の推定法を考案した。検証実験および解析結果として、試験体の構造上のカタから詳細なモデル化が困難であったためエネルギー比として一致は見られなかったが、弾性モデルと比較することで破壊開始時期の推定が可能であることを確認できる。さらに崩壊した際の各エネルギーの比に定性的傾向が現れ、加振実験時後の試験対象の損傷度を検討可能になるものと思われる。

実構造物を試験対象とした場合、大変形や破壊を生じた際に既存の不動点を必要とする計測器では計測することが不可能となるが、サイズモ式速度計を用い入力エネルギーを振動台加振力から求め、本研究で提案するエネルギー計測手法から応答変位量を推定可能になると考えられる。

今後は実験システム内における試験対象の応答エネルギーと振動台運動エネルギーの比率が狭まるような実大規模の倒壊モデルを用いた実験・解析を行い、応答変位や残留変形等の推定などに関する本手法の適用性に関して検証する予定である。

謝辞

本研究は科学技術振興調整費による総合研究「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関する研究」の一環として「大規模破壊実験のための振動台加振手法および計測処理技術の高度化研究」のテーマで実施されたものである。また、本研究を実施するにあたり御協力を頂いた(株)ブリヂストン 鈴木重信氏、正木信男氏、パイプロシステム 倉林浩氏に深く感謝の意を表す。

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, 技報道出版, 1999.
- (2)高圧ガス保安協会:鋼製平庭円筒形貯槽の耐震実験報告 (第1回), NO.7, VOL.21, pp363-373, 1984.
- (3)高圧ガス保安協会:鋼製平庭円筒形貯槽の耐震実験報告 (第2回), NO.8, VOL.21, pp440-452, 1984.
- (4)高圧ガス保安協会:鋼製平庭円筒形貯槽の耐震実験報告 (第3回), NO.9, VOL.21, pp512-529, 1984.
- (5)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, pp75-76, 1997.
- (6)Bhatti, M.A. and Pister, K.S., Int.J.Eathqu.Engng. Struct.Dyn., 9-6(1981), 557.
- (7)藤田聡, 他5名, エネルギーの流れに着目した構造物の応答計測技術に関する研究, D&D Conference 2001,(2001)