

エネルギーの授受に着目した鋼構造立体骨組の 多次元入力振動台実験

薩川恵一¹, 山田 哲², 由衛正彦³, 松本由香⁴, 小川信行⁵, 秋山 宏⁶

- 1 博士(工学) 東京工業大学研究員 建築物理研究センター (〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4159)
- 2 博士(工学) 東京工業大学助教授 建築物理研究センター (〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4159)
- 3 大学院生 東京工業大学 環境理工学創造専攻 (〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4159)
- 4 博士(工学) 横浜国立大学助手 建築学コース (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)
- 5 工博 防災科学技術研究所 (〒305-0006 つくば市天王台 3-1)
- 6 工博 日本大学教授 総合科学技術研究所 (〒101-8308 千代田区神田駿河台 1-8-14)

The evaluation method of experimental result of 1-D shaking table test is advanced to 2-D shaking table test. In this method, the transference of energy from shaking table to the specimen is focused. Energy applied to the shaking table is calculated by the output information of shaking table. In this study, a series of excitation of shaking table without specimen is carried out as a primary test. This primary excitation intends to clarify the coefficient of friction and the damping factor of actuator. Following the primary excitation, shaking table test of 3-D steel frame model is carried out. From the experimental result of shaking table test, evaluation method of experimental result is verified.

Key words: Shaking Table, 3-D Frame, Elasto-plasticity, Input Energy

1. 序

鋼構造建築の耐震性能に関する研究の中でも、総合的な評価につながる骨組レベルにおける研究は、実験装置の限界からほとんどが解析的手法によりなされている。また解析的手法は、複合応力下において繰り返し外力を受ける鋼構造部材の履歴挙動について、その中でも特に塑性域における挙動の範疇で未解明な点も多いことから、多くは平面骨組を研究対象に行っている。そして平面骨組レベルでの研究では、これまで行われてきた部材や部分骨組を対象とした実験的研究の成果を反映し、現実的な構造物の挙動の評価が行われつつある。しかし実際の構造物は3次元の立体形状を有し、地震力も3次元で作用するゆえ、平面骨組を対象に行った研究成果をそのまま構造物に準用することは難しいと思われる。そこで鋼構造建築の総合的な耐震性能の評価を行う上で、立体骨組の3次元挙動を追跡することは、非常に重要な課題と言える。

現在建設中の3次元振動台では、中層規模の実大構造物の3次元振動台実験が可能となることから、建築構造物の耐震性能評価と、激震下における動的崩壊過程の解明を行う上で非常に有効な装置となることが期待できるが、この装置を有効に活用するためには、立体骨組の3次元振動台実験に関する基礎

資料や実験技術を蓄積しておく必要がある。また3次元振動台でおこなわれるであろう鋼構造立体骨組の多次元入力振動台実験においては、多層多スパンの立体骨組に対して地震動を3方向で入力することになるが、骨組は並進運動以外のねじりや回転など様々な自由度に対して運動し、それらを集計して骨組にどれだけの力が振動台から入力されたのかを捉えることは煩雑であり、簡便な方法が必要であると思われる。簡便な評価方法として、振動台出力情報から振動台から試験体に入力されるエネルギーを算出するという研究があるが、この研究は立体骨組を対象とはしていない。

そこで本研究では来るべき3次元振動台での実大実験に備えるべく、縮小モデルを用いた立体骨組の多次元入力振動台実験を行い、多次元入力を受ける立体骨組の基本的な挙動の把握を行う。具体的には、実験結果を明確に捉えるため、試験体を変形挙動の詳細な追跡が可能な一層立体模型とし、加振条件を水平方向と上下方向の2方向同時入力としている。そして振動台と試験体である模型骨組の間のエネルギーの授受に着目し、振動台実験結果の評価手法について検討を行うことにする。その手法としては、加振方向の力の釣り合いの定式化を行った後に、模型骨組に入力されるエネルギーを振動台出力情報のみから得るような手法について検討する。

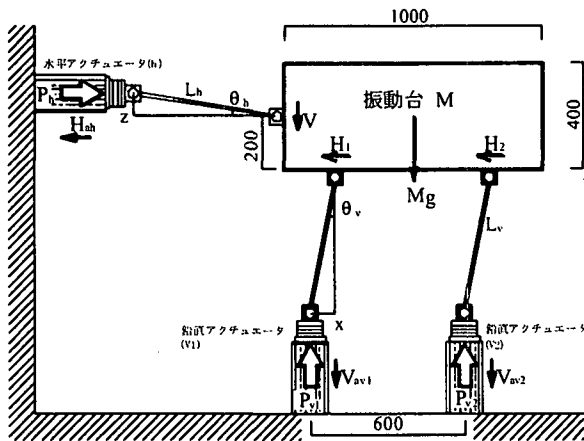


図-1 振動台立面及び振動台全系の力の平衡

- L_h : 振動台水平支持棒の上下球座間距離 (60cm)
- L_v : 振動台鉛直支持棒の上下球座間距離 (60cm)
- M : 振動台重量 (660kg)
- x_o : 振動台水平平均変位
- z_o : 振動台鉛直平均変位
- P_h : 水平アクチュエータ差圧情報から得られる荷重
- P_{v1} : 鉛直アクチュエータ差圧情報から得られる荷重
- P_{v2} : 鉛直アクチュエータ差圧情報から得られる荷重
- V : 水平支持棒のピン接合部における軸受けとリングによる摩擦力
- H_1 : 鉛直支持棒のピン接合部における軸受けとリングによる摩擦力
- H_2 : 鉛直支持棒のピン接合部における軸受けとリングによる摩擦力
- H_{sh} : 水平アクチュエータ(h)のピストンとシリンダーとの摩擦力
- V_{av1} : 鉛直アクチュエータ(v1)のピストンとシリンダーとの摩擦力
- V_{av2} : 鉛直アクチュエータ(v2)のピストンとシリンダーとの摩擦力
- C_{sh} : 水平アクチュエータ(h)の減衰定数
- C_{av1} : 鉛直アクチュエータ(v1)の減衰定数
- C_{av2} : 鉛直アクチュエータ(v2)の減衰定数

2. 実験方法

(1) 実験装置

本研究では、独立行政法人防災科学研究所内にある小型振動台を用いて実験を行っている。小型振動台の略図及び振動台全系の力の平衡を図-1に示す。当該振動台は水平方向に一本と鉛直方向に二本のアクチュエータを設けており、二次元平面内で水平、鉛直、回転の3自由度の加振が可能となっている。アクチュエータ性能仕様は、水平アクチュエータの最大加振力が2t、鉛直アクチュエータの最大加振力が4t、各アクチュエータの最大振幅は±50mmである。振動台のテーブル寸法は1000x1000x400mm、総重量は660kgである。

(2) 測定計画並びに計測項目

実験装置の各点に、バネ式変位計、レーザー変位計、加速度計を取り付け、時々刻々変化する振動台の各部分の位置等を計測する。またアクチュエータに取り付けられているセンサーからも差圧情報を得られるようにしている。なおすべての実験データはサンプリング間隔を1000分の1秒で計測しており、ノイズを落とすために5ステップごとの平均値をとり、200分の1秒刻みのデータとして整理している。

振動台の情報として次のものを記録した。

- x_o : 水平方向加速度
- z_o : 鉛直方向平均加速度
- x_o : 水平方向平均変位
- z_o : 鉛直方向平均変位
- $_{sh}P_h$: 水平アクチュエータ差圧情報
- $_{v1}P_{v1}, _{v2}P_{v2}$: 鉛直アクチュエータ差圧情報

アクチュエータから発生する力は、アクチュエータの差圧情報にアクチュエータの受圧面積を乗じたものであるので、次のような式で示される。

$$\begin{aligned} P_h &= A_{sh} P_{sh} \\ P_{v1} &= A_{v1} P_{v1} \\ P_{v2} &= A_{v2} P_{v2} \end{aligned} \quad (1)$$

A_{sh} : 水平アクチュエータ受圧面積

A_{v1} : 鉛直アクチュエータ受圧面積

(3) 振動台の力の平衡

振動台の力の平衡を図1に示す。アクチュエータ内部に生じるピストンとシリンダーの摩擦力 H_{sh}, V_{av1}, V_{av2} , それぞれの支持棒と振動台とのピン接合部の軸受に生じる摩擦力 H_1, H_2, V , アクチュエータの減衰定数 C_{sh}, C_{av1}, C_{av2} を未知数とし、先に述べた $x, z, P_h, P_{v1}, P_{v2}$ より振動台からの情報から振動台全系の力の釣り合いにより未知数を決定する。以上にあげた力を考慮し、水平方向及び鉛直方向について整理すると以下の式を得る。

水平方向の力の釣り合い

$$\begin{aligned} P_h - M \ddot{x}_o - \mu_{sh} Mg - H_{sh} - C_{sh} \dot{x}_o &= 0 \\ \mu_{sh} Mg &= H_1 + H_2 \end{aligned} \quad (2)$$

鉛直方向の力の釣り合い

$$\begin{aligned} P_v - M \ddot{z}_o - Mg - V - \mu_{av} Mg - C_{av} \dot{z}_o &= 0 \\ P_v &= P_{v1} + P_{v2} \\ \mu_{av} Mg &= V_{av1} + V_{av2} \\ C_{av} \dot{z}_o &= C_{av1} \dot{z}_o + C_{av2} \dot{z}_o \end{aligned} \quad (3)$$

表-1 加振条件

加振条件	入力波	加振方向	振動数(Hz)
No.1	三角波	水平	0.1
No.3	sin波	水平	0.5
No.5		水平	1.0
No.7		水平	2.0

なお(2), (3)の式中の減衰力項の速度であるが, 厳密には各アクチュエータ情報により速度を測定し減衰力を算出しなければならないのだが, 計測機器のポイント数の制限から, 本研究ではそれぞれの方向の振動台の変位から求まる速度で代用している。

(4)加振条件

入力波の種類は, 三角波とsin波の2種類である。主に三角波は, 摩擦力を算出するのに用い, sin波はアクチュエータの減衰力を算出するのに用いる。sin波は振動数を0.5, 1.0, 2.0Hzに設定して加振を行っている。そして, この2種類の入力波について水平加振, 上下加振の2種類に設定している。加振条件を表-1に示す。なおすべての加振条件において目標振幅30mmとしている。

3. 加振結果

加振条件No. 1, No. 3, No. 5, No. 7の加振結果から水平アクチュエータを駆動する際に生じる摩擦力及び水平アクチュエータに生じる減衰力を求める。まず入力波を三角波に設定して加振を行い, 水平方向に生じる摩擦力について検証する。

図-2, 図-3に加振条件No. 1の加振結果を示す。図-2は水平速度時刻歴, 図-3は水平アクチュエータ差圧情報から得られる荷重(これ以降, 水平アクチュエータ荷重情報と略す)の時刻歴を示している。図-2に示すように三角波は速度一定となることから加速度は発生せず, 式(2)中の慣性力の項は無視できる。よって図-3に示す水平アクチュエータ差圧情報から得られる荷重は, すべて摩擦によるものである。図-3より式(2)中の摩擦力項を求めるのは困難である。

そこで水平アクチュエータ荷重情報を縦軸に, 水平変位を横軸に用いてNo. 1の加振結果を示したものを図-4に示す。水平アクチュエータを駆動する際に生じる摩擦力は図中に示す矢印の区間の値であり, その値は約45kgである。よって式(2)中の摩擦力項は以下の式(4)で表せる。

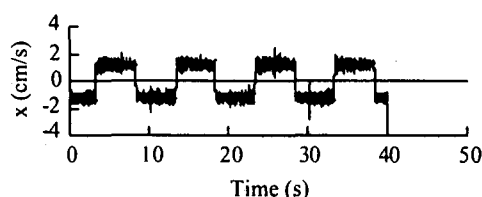


図-2 水平速度時刻歴(加振条件No.1)

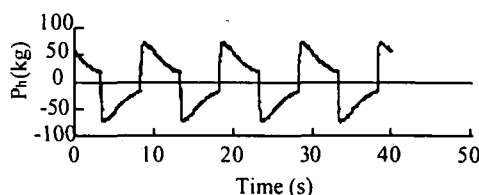


図-3 水平アクチュエータ荷重情報時刻歴(加振条件No.1)

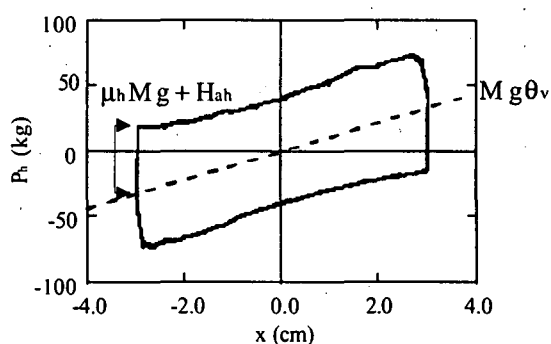


図-4 水平アクチュエータ荷重情報と水平変位との関係(加振条件No.1)

$$\mu_h M g + H_{ah} = 45 \quad (\text{kg}) \quad (4)$$

さらに, 図-4に示すように水平アクチュエータ荷重情報は水平変位が変化しても一定とならず, 図-1に示した力以外の別の力が発生している。

これは図-5に示すように振動台が水平方向に移動した際に生じる重力の影響によるものである。この影響を検証し式(2)を修正する。図-5を参照することにより, 力の釣り合いは以下の式(5), (6)で表せる。

円の接線方向の力の釣り合い

$$F_h \cos \theta_h \cos(\theta_v - \theta_h) = M g \sin \theta_v \quad (5)$$

円の中心方向の力の釣り合い

$$F_v = (M g \cos \theta_v + F_h \cos \theta_h \sin(\theta_v - \theta_h)) \cos \theta_v \quad (6)$$

ここで, $\cos \theta_h \approx 1$, $\sin \theta_h \approx 0$, $\cos \theta_v \approx 1$, $\sin \theta_v \approx \theta_v$ として, 式(5)を整理すると, 式(7)となる。

$$F_h = M g \theta_v \quad (7)$$

また鉛直支持棒と振動台とのピン接合部の軸受に生じる摩擦力の摩擦係数(μ)を求めるために, 振動

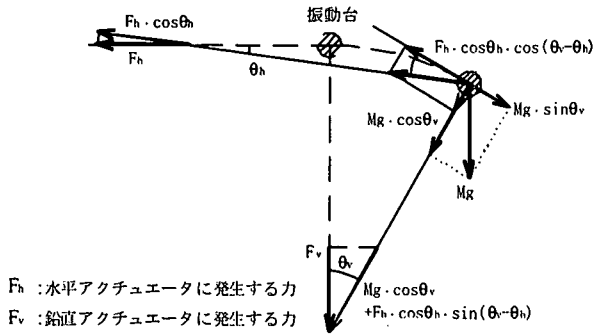


図-5 水平加速度時刻歴

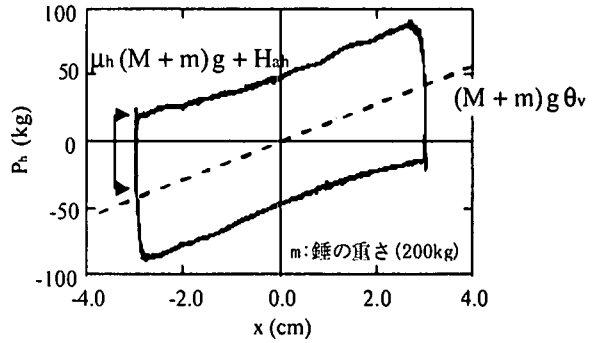
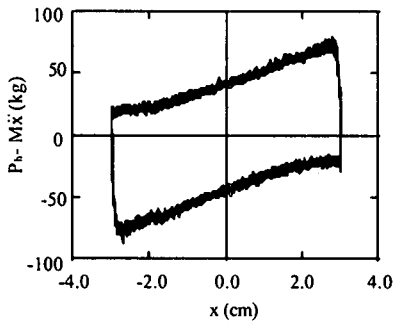
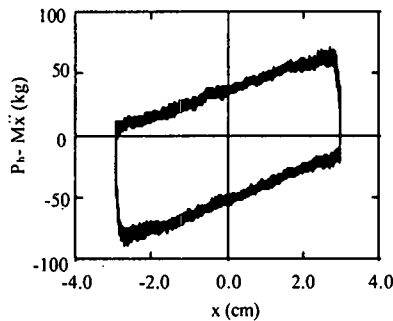


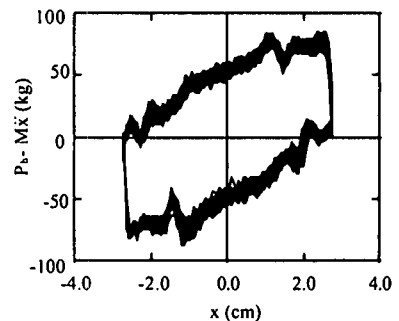
図-6 水平アクチュエータ荷重情報と水平変位との関係(加振条件No.1)



(a) 加振条件No.3



(b) 加振条件No.5



(c) 加振条件No.7

図-7 水平アクチュエータ荷重情報から慣性力をひいた値と水平変位との関係

台に200kgの錘を載せて加振条件No. 1で加振を行った。その結果を図-6に示す。この図を参照して、式(1)中の摩擦力項は、以下の式(8)で表せる。

$$\mu_h(M+m)g + H_{ah} = 55 \text{ (kg)} \quad (8)$$

以上の加振結果より式(4)、式(8)から $\mu_h=0.05$ 、 $H_{ah}=12$ となる。

次に水平アクチュエータに生じる減衰力を求めるために、振動台を加振条件No. 3, No. 5, No. 7で加振した。その結果を図-7に示す。図-7に示すように加振条件No. 1とほぼ同様の傾向が見られることから、本研究で設定した振動数の範囲において、水平アクチュエータに生じる減衰力は無視できることがわかる。なお図-7(c)においてアクチュエータ荷重情報に乱れが生じているが、これは高圧の油がサーボ弁により急激に開閉させられることにより、油の中で衝撃波的なものが発生し振動しているのではないかと考えられ、速度に依存したものではないと考える。

今まで述べてきた経緯により、振動台の水平方向の力の釣り合いは、振動台が水平方向に移動した際に生じる重力の影響を考慮し以下の式(9)で表せる。

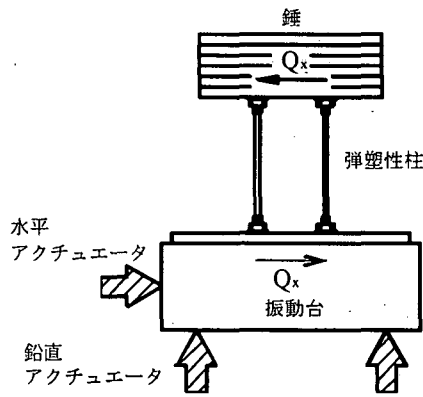
$$P_h - M \ddot{x} - \mu_h M g - H_{ah} - M g \theta_v = 0 \quad (9)$$

4. 鋼構造立体骨組の振動台実験概要

(1) 試験体装置

試験体装置は、図-8(a)に示すように錘と弾塑性柱から構成されており、最も基本的な振動系である質点系を再現している。この実験装置のパラメータは、試験体の自由度とねじれ剛性及び錘の重量となっている。振動台板及び錘に縦列、横列ともに3列の格子状にねじ穴を設けて弾塑性柱の柱配置を適宜変えられるようになっており、試験体の自由度、ねじれ剛性を変化させることが可能となっている。また錘一枚の重量を70kg相当として錘を積み重ねられ、錘の重量を変化させることが可能な設計となっている。なお錘が振動台外に飛び出さぬよう安全上の配慮から、振動台上に支持フレームを設けている。

本研究で行った振動台実験の弾塑性柱の柱配置を図-8(b)に示す。黒印が柱を配置した位置である。柱4本を振動台の四隅に配置し、試験体が水平アクチュエータの加振方向のみに振動するよう意図し



(a) 立面図

(b) 弾塑性柱の柱配置

図-8 鋼構造立体骨組の試験体装置

ている。

本実験で用いた弾塑性棒と弾塑性柱と錘及び振動台板との取り付けを図-9に示す。本実験で用いた弾塑性柱は試験体部の長さは300mmで、断面形状は直径12mmの丸棒である。弾塑性棒の機械的性質を図-10に示す。ほぼ完全弾塑性型の性質を示している。なお弾塑性棒一本当たりの水平剛性は、93kg/cmとなっている。弾塑性柱と錘及び振動台板との取り付けは、接合によって発生する軸力の影響を排除しなければならない。そこで振動台との取り付けは、直接振動台に弾塑性柱をねじ込み、さらに加振時に取り付け部が緩まないように皿ばねを介して、ナットで締め付けている。一方、錘と弾塑性柱の接合は、錘一枚を挟んで皿バネを介してナットで締め付けている。

(2) 錘の重量と加振条件

慣性力の発生源となる錘の重量は、弾塑性柱の破壊現象を捉えるためにはより大きいほうが望ましい。また弾塑性柱を塑性させるのに十分なエネルギーを入力するために振動台の加速度はできるだけ大きくしなければならない。そこで図4に示した柱配置で、入力波はエルセントロNS波を用いて事前に解析を行い、振動台性能を最大限に引き出せるよう錘の重量と入力波の原波の時間短縮を決定する。その結果から入力波をエルセントロ波の原波の1/4、錘の重量を約400kgと決めて実験を行う。加振条件を以下に示す。

(a) 正弦波スイープ加振

振幅2mm正弦波を入力し、1Hzにつき20秒間隔で振動数を1Hzから10Hzまで変化させて行っている。試験体を含む実験装置全体を自由振動させ、試験体の固有周期、減衰を測定すると同時に各計測器具の動作確認を行う。

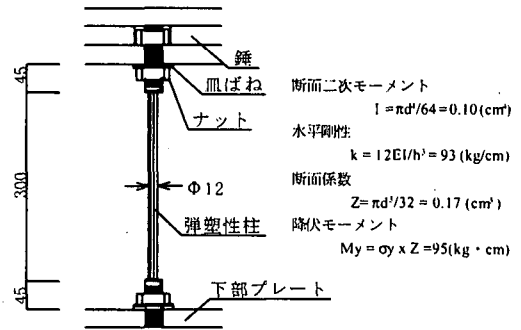
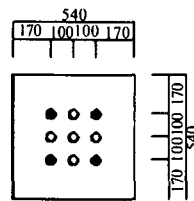


図-9 弾塑性柱接合部詳細

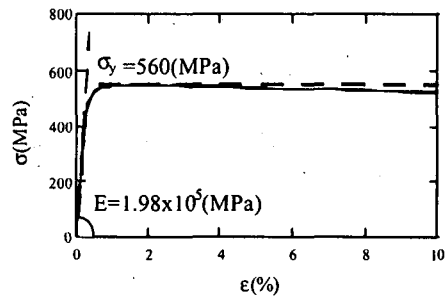


図-10 弾塑性棒接合部詳細

(b) 弾性加振及び弾塑性加振

入力波をエルセントロNS波に設定し、振動台の目標変位により入力波のレベルを制御している。

そして図-8(b)に示した柱配置では、入力波が適正なものかどうか、また目標変位が意図しているものかを確認するために試加振として±1mm、その後弾性加振として±5mm、±10mm、さらに弾塑性加振として±20mm、±30mm、±35mm、±40mmと徐々に入力波の目標最大変位のレベルを上げていく。なお±30mmの加振では2回行っている。なお一つの試験体装置について水平入力のみと水平上下同時入力を交互に加振を行っている。

(3) アクチュエータ荷重情報より求められる錘から振動台へ伝達される水平力

図-8に示すように錘から振動台へ伝達される慣性力を Q_x とすると、水平方向の力の釣り合いは、実験装置と振動台全系の力の釣り合いにより式(9)に順じて次式(10)で示される。

$$\begin{aligned}
 M_T \ddot{x}_o - M_w \ddot{x}_o - \mu_h (M_T + M_w) g \\
 - H_{ah} - (M_T + M_w) g \theta_v + Q_x = 0
 \end{aligned} \quad (10)$$

M_T : 振動台+支持フレームの重量

M_w : 錘の重量

これを Q について解くと次式を得る。なお式(10)から求まる錘から振動台へ伝達される慣性力 Q はアクチュエータ荷重情報より得られた量であることを明示するために前添字 t を付す。

$${}^tQ_x = -P_h + (M_T + M_w) \ddot{x}_o + \mu_h (M_T + M_w) g + H_{ah} + (M_T + M_w) g \theta_v \quad (11)$$

式(11)から得られた慣性力 Q の時刻歴波形を図-11(a)に示す。また錘につけた加速度計の計測値より求まる水平力 Q_x は、以下の式(12)で表される。

$$Q_x = -M_w \ddot{x} \quad (12)$$

式(12)から得られた慣性力 Q の時刻歴波形を図-11(b)に示す。

図-11(a)と図-11(b)を対比するとほぼ良い対応を示しており、概して加振時に発生する錘の慣性力をアクチュエータ荷重情報により捉えることができると思われる。

(4) エネルギー入力の時刻歴

水平方向加振による試験体へのエネルギー入力は以下の式で示される。

$${}^tE_Q = -\int_0^t Q_x \dot{x} dt \quad (13)$$

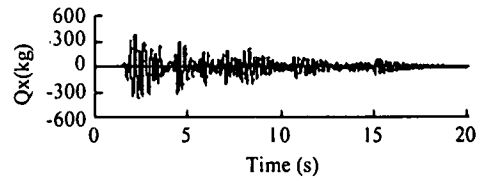
また加振時終了までに投入された全エネルギー入力は以下の式で示される。

$$E = -\int_0^t M_w \ddot{x}_o \dot{x} dt \quad (14)$$

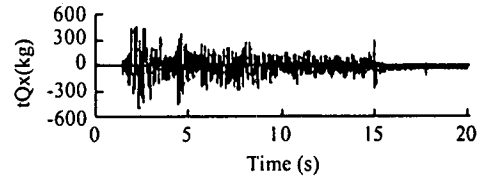
式(13)、(14)より得られるエネルギー時刻歴波形を図-13に示す。点線は式(14)に示す総エネルギーを表し、破線は式(13)に示す錘につけた加速度計の計測値より求まる慣性力により算出した試験体へのエネルギー入力を表し、実線はアクチュエータ荷重情報により求まる慣性力により算出した試験体へのエネルギー入力を表している。アクチュエータ荷重情報から得られるエネルギー入力が、錘の加速度から得られるエネルギー入力よりも低い。これはアクチュエータ荷重情報の位相が若干ずれが生じている影響によるものと考えられる。

5. 結

本研究では、模型骨組に入力されるエネルギーを振動台出力情報のみから得るような手法について検



(a) 加速度計情報



(b) アクチュエータ荷重情報

図-12 エネルギー入力

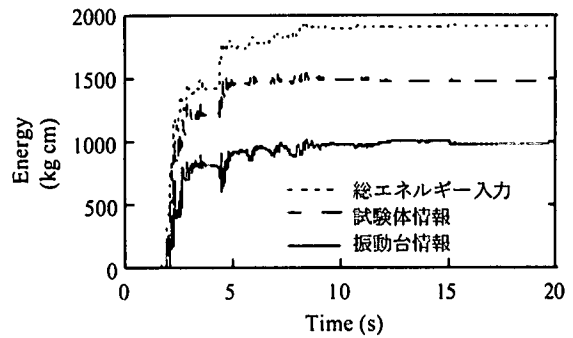


図-13 エネルギー入力

討を行った。まず振動台のみの加振を行い、その加振結果をもとに、振動台の力の釣り合いからアクチュエータ差圧情報から得られる荷重の概略を捉えた。その中で加振方向に考慮すべき摩擦係数及びアクチュエータに発生する減衰力定数を決定し、加振方向の力の釣り合いを定式化を行った。次に基本的な振動系である一質点系を再現した実験を行い、振動台出力から得られる情報と試験体から得られる情報とを対比し、試験体から得られる情報を援用せずとも、振動台出力から得られる情報だけで試験体へのエネルギー入力が捉えられることを示した。

参考文献

- 1) 振動実験委員会: 鋼製平底円筒形貯槽の耐震報告, 高压ガス保安協会, Vol21, No. 7~9, pp. 1-31, 1984