

水平・上下2方向振動台による一層鉄骨フレームの破壊実験

箕輪 親宏*

国立防災科学技術センター

One Story Steel Frame Collapse Tests by Using the Two Dimensional Shaking Table (Horizontal and Up-Down)

By

Chikahiro Minowa

National Research Center for Disaster Prevention, Japan

Abstract

The experimental studies on one story steel frame responses to earthquake motions were carried out by using the two dimensional small size shaking table. The drive directions of the tests were one horizontal and up-down. The two dimensional excitation responses of the steel frames were compared with the responses of one dimensional horizontal excitations.

Moreover, the experimental results were compared with computer simulations. Judging from the results of the shaking table tests and computer simulations, the effects of up-down excitations are estimated small.

1. はじめに

大多数の耐震設計および耐震性研究は水平一方向についてのみ行われている。しかし実際の地震動は3軸と各軸についての回転を含んだ6自由度を有している。このため、水平一方向だけの取扱で十分な耐震性を有すると判断できるのか疑問が残る。構造物に関しては、弾性域だけの扱いであるなら、重ね合わせが成立し、多方向地震動に対し、さしたる取扱上の問題はない。しかし塑性域などの非線形領域を対象とした場合、方向についての重ね合わせに保証がないため、構造物の多方向地震応答に対する研究の必要性が叫ばれている。

多方向振動台の開発とあいまって、構造物の多方向地震応答の研究も数多く行われるよう

* 第2 研究部

になった。しかし構造物の多方向応答に関しては静力学的に扱った事例も少なく、今後の数多くの研究の積み重ねが必要と考えられる。

国立防災科学技術センターでも小型3次元振動台を用いて配管模型・摩擦負荷フレーム模型・水槽模型等の実験を行ってきた(小川, 箕輪, 1981)。水槽模型の実験では非線型性を有するスロッシングについても或る程度、重ね合わせが成立するのを確認している。

上下動が構造物に与える影響は水平動が与えるものより小さいと考えられる。その理由は上下動として常に重力加速度1Gが構造物に加わっており、そのため構造物は、荷重の変動があっても揺れないように、上下方向には剛に作られる。しかし、水平方向に対して通常は荷重を受けないため、上下方向に比べ一般に柔らかく作られる。

しかし、水平動により大きく変形し、安定性がかなり失われた所に上下動が加わった場合、上下動の効果は無視できないのではないかと推測がある。今回の実験では小型1層鉄骨門形フレーム模型供試体を水平・上下2方向振動台で加振し、大変形時に於ける上下動の影響を調べ、この推測の是非を検討し、併せてコンピューターシミュレーションと実験との比較検討を行った。

2. 実 験

図1に示す小型水平・上下2方向振動台(小川, 1976)に小型1層鉄骨門形フレーム模型供試体を設置し、各種試験を行った。供試体である小型1層鉄骨門形フレーム模型については図2にその構成を示す。供試体の重量は、20kgの鉄板11枚と4.7kgの鉄板4枚および5.4

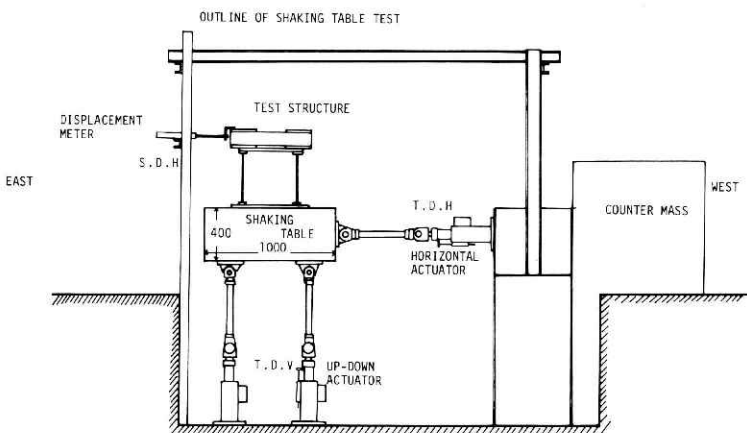


図1 実験装置

Fig. 1 The two dimensional small size shaking table.

kgの梁1本で、合計245kgである。柱は6mm×30mmの断面で、高さ40cm、両端には固定のため厚さ15mm、大きさ70mm×70mmの鋼製ブロックが溶接されている。柱に用いた鋼材の引張試験結果は5片の試験片の平均で降伏応力69.30kg/mm²、最大引張応力74.88kg/mm²であった。写真1には振動台実験で変形した供試体の状況を示す。

供試体の水平復元力特性を求めるため、図3に示す方法で水平引張試験を行った。この水平引張試験では自重(供試体の重量)の水平復元力特性に対する効果を見るため2種の供試体重量245kgと35kg(鉄板1枚)について行った。この試験により得た水平復元力と水平変形の間係を図4に示す。なお、この記録にはアナログのXYレコーダーを使用した。

振動台実験はランダム波(地震波)を用いて行った。この振動台への入力に用いたランダム波は、地震応答解析で最も多く用いられており、標準地震波とも見做されるようになったエルセントロ1940年であり、水平入力波には一般に頻繁に使われているN-S成分を使用し

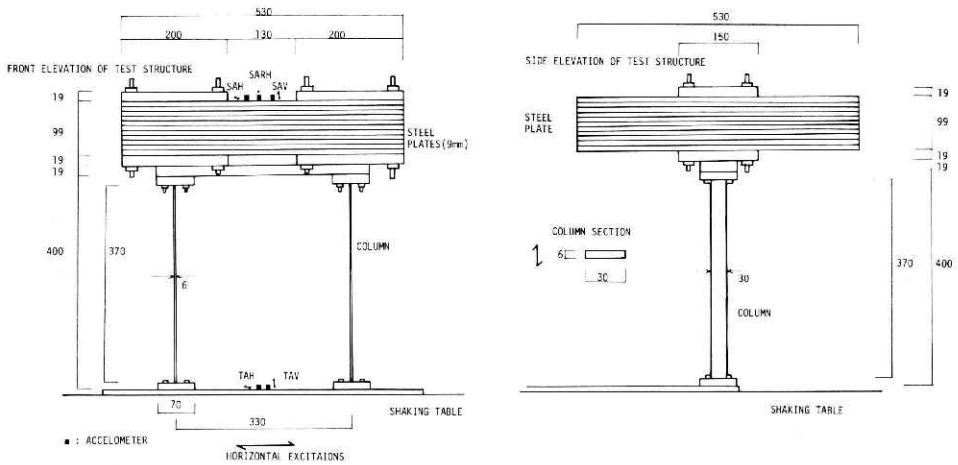


図2 実験供試体1層鉄骨門形フレーム

Fig. 2 The test frame of one story steel structure.

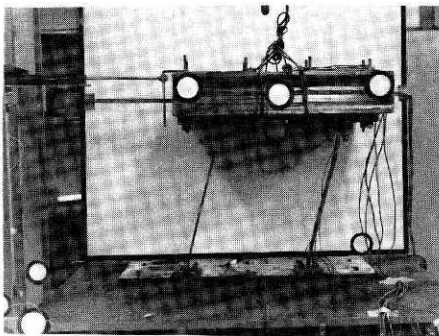


写真1 実験状況と供試体の変形

Photo 1 The dynamic deformation of the test frame.

THE OUTLINE OF STATIC TENSION TEST

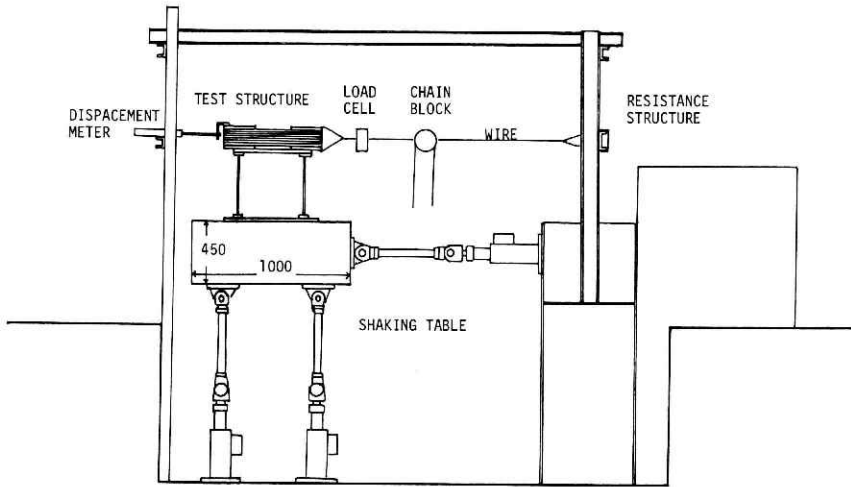


図3 水平引張試験状況

Fig. 3 The static tension tests of horizontal directions.

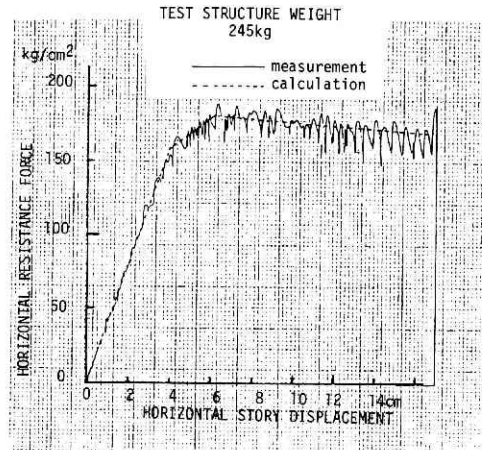
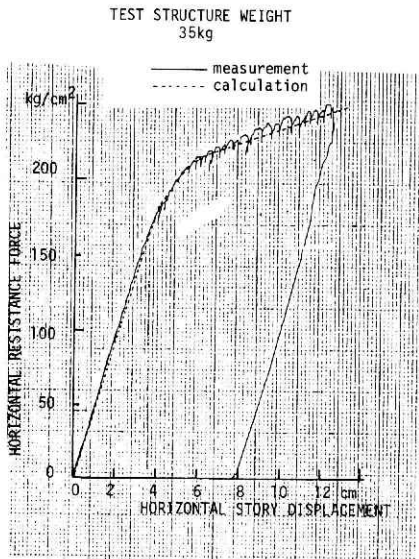


図4 水平引張試験に於ける水平引張力と水平層間変位の関係

Fig. 4 The roops of horizontal tension loads and story displacements.

た。実験は水平1方向加振と水平・上下2方向加振の2種を行った。測定は供試体加速度（水平加振方向S. A. H, 水平加振直角方向S. A. R. H, 上下方向S. A. V）の3成分, 振動台加速度（水平加振方向T. A. H, 上下方向T. A. V）の2成分, 供試体変位については水平加振方向1成分, 振動台変位については水平と上下の加振機のピストン位置2成分について行い, デジタルデータレコーダーに200 Hzのサンプリングで記録した。この他にモニターの目的で柱頭と柱脚の歪も測定した。また一方, ビデオ画像記録も行った。

水平1方向加振の記録波形を図5に, 水平・上下2方向加振の記録波形を図6に示す。またこれらの加振の水平層間変位と水平供試体加速度の関係をループにして描いたものを図7, 8に示す。

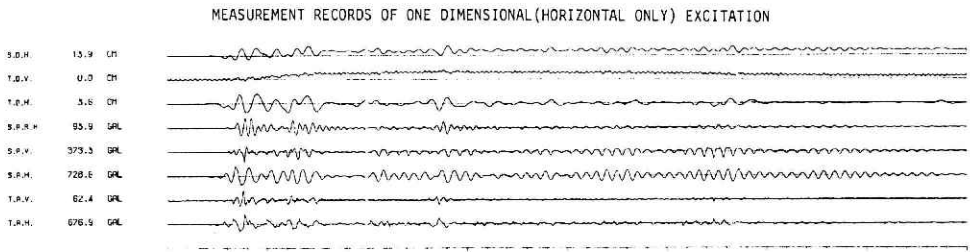


図5 水平1方向加振実験測定波形

Fig. 5 The shaking table test records of horizontal excitations.

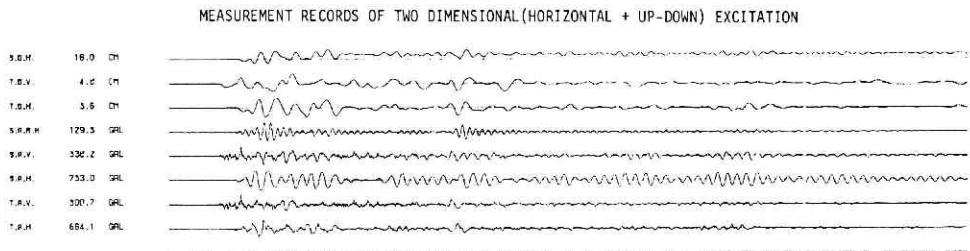


図6 水平・上下2方向加振実験測定波形

Fig. 6 The shaking table test records of horizontal and up-down excitations.

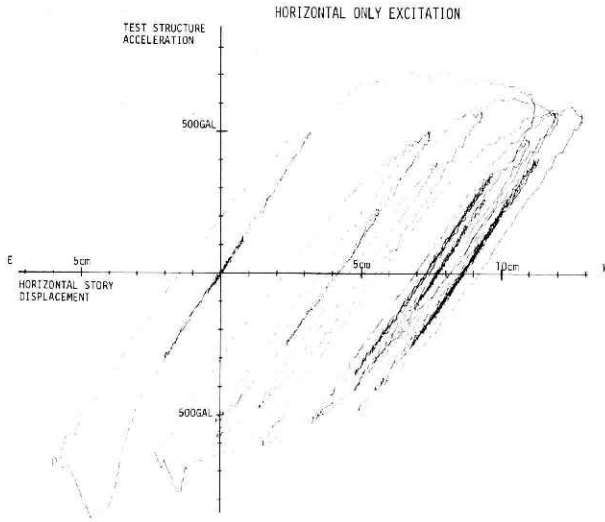


図7 水平1方向加振実験水平加速度と水平層間変位の関係

Fig. 7 The roop of test frame accelerations and story displacements in the horizontal excitations.

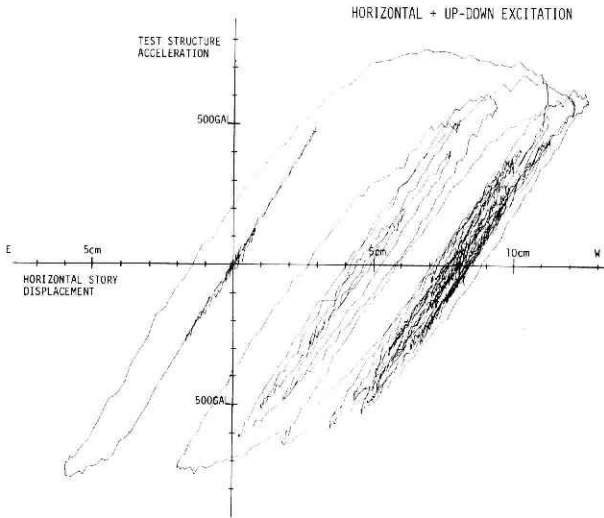


図8 水平・上下2方向加振実験水平加速度と水平層間変位の関係

Fig. 8 The roop of test frame accelerations and story displacements in the horizontal and up-down excitations.

3. 解析式

本実験のように変形が柱部材角にして $\frac{1}{4}$ 以上になる系に対しては変形を考慮した式を用いなければならない。本供試体は梁の曲げ剛性が柱に比べ格段に大きく無限大と見なせるので、図9に示すようにモデル化し、2次元平面内で座標を同図のように定める。解析式は次の力のつり合い式を用いて行う(山田, マトリックス法材料力学 1970)。

$$\left. \begin{aligned} F_v \cos \theta + F_u \sin \theta &= Q \\ F_v \sin \theta + F_u \cos \theta &= N \end{aligned} \right\} (1)$$

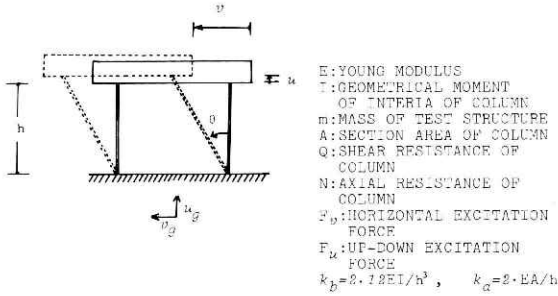


図9 解析モデル

Fig. 9 The model of analyses.

ここで,

$$\cos \theta = \frac{h + u}{\sqrt{(h + u)^2 + v^2}}, \quad \sin \theta = \frac{v}{\sqrt{(h + u)^2 + v^2}}$$

$$Q = 2 \times \frac{12 EI}{h^3} (v \cos \theta - u \sin \theta)$$

$$N = 2 \times \frac{EA}{h} (\sqrt{(h + u)^2 + v^2} - h)$$

$$F_v = -\frac{h}{m} (\ddot{v} + \ddot{v}_g), \quad F_u = -m (\ddot{u} + \ddot{u}_g)$$

(1)式から次の幾何学的非線型方程式が得られる.

$$\left. \begin{aligned} m (\ddot{v} + \ddot{v}_g) - m (\ddot{u} + \ddot{u}_g + g) \frac{v}{h + u} + k_b v &= 0 \\ m (\ddot{v} + \ddot{v}_g) \frac{v}{h + u} + m (\ddot{u} + \ddot{u}_g + g) \\ + k_a (\sqrt{(h + u)^2 + v^2} - h) \frac{\sqrt{(h + u)^2 + v^2}}{h + u} &= 0 \end{aligned} \right\} (2)$$

ここで, g は重力加速度である.

水平復元力特性は, 近似的にであるが, (2)の第1式の $k_b v$ に対応する. 水平復元力特性は一般には水平変位 v の関数 $f(v)$ で表される.

4. 水平復元力特性

水平引張試験結果 (図4) から水平復元力特性の骨曲線は供試体重量35kg, 245kgの両ケースとも tri-linear と推定される. 両重量の場合とも第一弾性限変位 X_1 は4cm, 第二弾性限変位 X_2 は6cmとみなせる. (2)式を水平引張試験に適用すると, 水平引張力を P として, 次式を得る.

$$\left. \begin{aligned}
 P &= f(v) - mg \frac{v}{h+u} - mg + P \frac{v}{h+u} \\
 &= k_a (\sqrt{(h+u)^2 + v^2} - h) \frac{\sqrt{(h+u)^2 + v^2}}{h+u}
 \end{aligned} \right\} (3)$$

図4の点線は $f(v)$ をtri-linearとしたときの、(3)式を満たす $P-v$ の関係である。この点線を求めるのに用いた定数は、第一弾性限変位 X_1 と第二弾性限変位 X_2 は前に述べた4cmと6cm、第一勾配BK1は46.25kg/cm、第二勾配BK2は17.5kg/cm、第一勾配BK3は6.0kg/cm、柱高は37cm、軸方向弾性係数は189000kg/cmとした。これらの値を用いれば、tri-linear水平復元力特性の骨曲線で水平引張試験結果をほぼ表現できるのが判る。

一方、 $h=37$ cmとして、第一勾配BK1を曲げ剪断の計算式 $12EI/h^3$ を用いて求めると53.7kg/cmとなり、BK1=46.25kg/cmを得るためには柱高を等価的に38.9cmと考えなければならない。また第一弾性限変位4cmの降伏変位を得るには、全塑性モーメントで考え、降伏応力に鋼材の引張試験の値を用いて等価的な柱高を出すと38cmとなる。計算に用いた柱高は幾何学的なものであり、弾性定数等を求めるための柱高ではない。

しかし、この供試体の水平復元力特性の全体を図3の水平引張試験から推定するのは困難である。本報告では振動台実験の供試体水平層間変位と供試体水平加速度のループである図7、8を基に推定し、本供試体の水平復元力特性全体を図10のように仮定し、コンピュータシミュレーションに用いた。この図で直線CD、EF、B'C'はOAに平行であり、勾配はBK1である。

以上に述べた水平復元力特性は供試体重量 W の効果を除いた特性である。ここで供試体重量が水平復元力特性に与える影響について見ると、(3)の第1式から判るように供試体重量の増加により水平バネ定数が見掛け上、 $W/(h+u)$ だけ柔らかくなる。

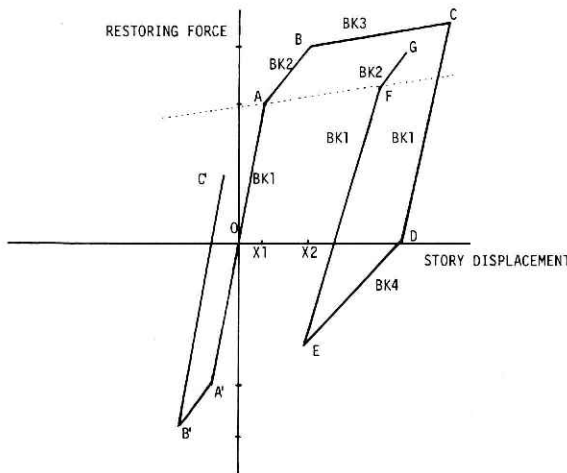


図10 Tri-linear水平復元力特性モデル

Fig. 10 The assuming characteristics of restoring forces of test frames in horizontal directions.

また、供試体重量35kg, 245kgの二種の水平引張試験結果である図4の立ち上がり勾配を比較しても供試体重量245kgの試験結果の方が、水平バネ定数が小さいのが判る。

5. コンピューターシミュレーション

振動台実験の供試体応答結果を、振動台加速度を入力と考え、コンピューターでシミュレーションを試みた。モデルは1質点で水平・上下2方向シミュレーションである。計算式(2)式を用い、時刻歴応答を求めるのには4次のRUNGE-KUTTA法を採用し、刻み時間を1/1000秒にして計算を実施した。柱の水平復元力特性は図10に示す tri-linear形とし、柱の軸方向復元力特性に関しては、単に弾性とした。各定数の設定値は図4の点線を計算したときと同じ値である。なお、質量は $0.25 \text{ kg} \cdot \text{sec}^2 / \text{cm}$ 、減衰定数は水平方向について1%、上下方向について0.5%とした。図10のEDの勾配BK4についてはパラメーターとして扱った。実験時系列応答と計算時系列応答の差を二乗し、時刻についての総和平均を取り、その平方根を取ったもの D_s を、水平・上下2方向加振と水平1方向加振の水平変位波形と水平加速度波形について求めた。これを図11に示す。BK4が27kg/cmから35kg/cmの範囲で水平1方向および水平・上下2方向加振の両ケースとも、この D_s が小さくなっている。計算ではこの範囲よりBK4の値が小さいと残留変位が実験記録よりも大きくなり、BK4の値が大きくなると残留変位が実験記録よりも小さくなる。水平1方向および水平・上下2方向加振の両ケースの水平変位波形についての D_s の和を取るとBK4 = 33kg/cmの場合が最も小さい、ま

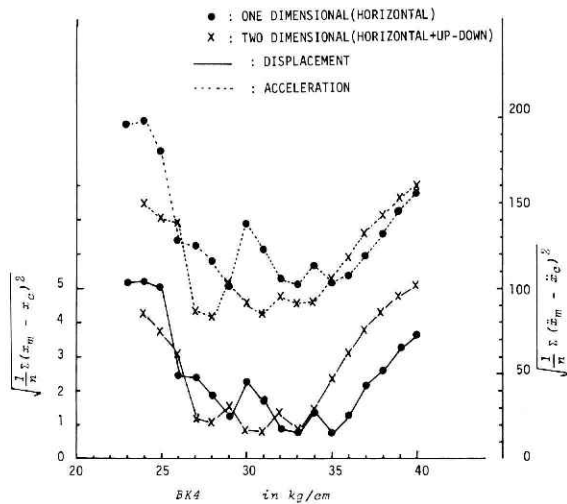


図11 BK4をパラメーターとしたときの計算波形と測定波形の差

Fig. 11 The differences between the test records and computer simulations with the spring variations BK4.

たは水平加速度波形についても両加振ケースの D_s の和はこの場合に最小になる。即ち、このBK4の値のときにコンピューターシミュレーション波形は実験波形に、設定条件の基で、最も良く似る。このときのコンピューターシミュレーションで求めた波形と、同様に求めた水平層間変位と水平供試体加速度のループを、水平1方向加振については図12に、水平・上下2方向加振については図13に示す。これらの図で実線がコンピューターシミュレーション、点線が実験記録波形である。なお、コンピューターシミュレーションの方が大きく現われている。

供試体上下応答波形は水平変形が生じることにより、幾何的に誘起される面が大きく、両加振ケースともコンピューターシミュレーションと実験記録波形はよく一致している。

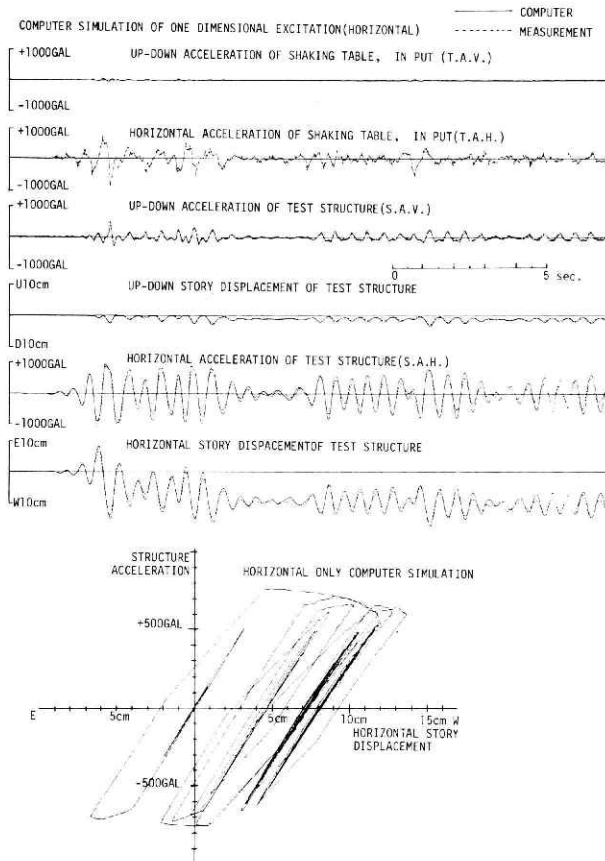


図12 水平1方向加振のコンピューターシミュレーション

Fig. 12 Computer simulation time histories of horizontal excitations.

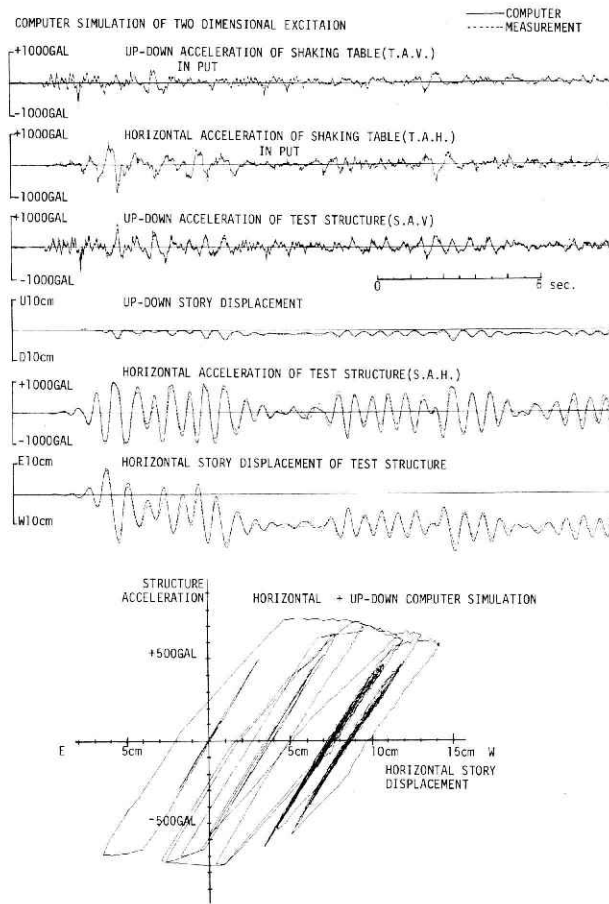


図13 水平・上下2方向加振のコンピューターシミュレーション

Fig. 13 Computer simulation time histories of horizontal and up-down excitations.

6. 水平1方向加振と水平・上下2方向加振の相違

両加振ケースの実験データである図5と図6の供試体水平変位 (S. D. H) は大変良く似ている。ここでは、実験に於ける水平1方向加振と水平・上下2方向加振の供試体応答の相違を調べた。

両加振ケースとも水平加振にはエルセントロ1940年N-S成分を用いており同一レベルで振動台に入力している。振動台水平変位を基に両加振ケースの位相を合わせて描いた各変位波形を図14に示す。この図でVIDEOとあるのは第4研究部の協力により、ビデオ画像からコンピューターにより読み取られた変位波形である。ビデオ計測は従来の変位計計測とほぼ

一致しており工学的に見て使用可能と考えられる。

この図の上下層間変位もやはり両加振ケースともほぼ一致しており、供試体の上下層間変位は水平動により誘起されたものであることが裏付される。

ここで両加振ケースの供試体水平変位波形を詳しく比べて見るとビデオ計測、変位計計測ともわずかながら相違がみられる。そこで、この波形について両加振ケースの差を各時刻について取った波形を見ると、最大1.7cmほどあるが、残留変位についてはその差はほとんどない。全体として見ると、水平1方向加振のほうが供試体応答は大きくなっており、この最大1.7cmの差は供試体水平変位波形の最大変位の約1割である。

この差が大きいと見るか、小さいと見るかは今後の検討事項と考えられる。しかし、最大応答変位そのものには0.1mm程度の差しか見られず、両加振の差はほとんど無いとして良い。

コンピューターシミュレーションに於ける両加振の差は実験よりも僅かに大きい、全体としては無視できるものと見られる。

以上のように本供試体に関しては両加振に於ける水平層間変位及び上下層間変位の相違は微小であり、上下加振の影響はほとんどないと考えられる。

7. おわりに

今後このような実験を多層の模型に広げて行い、上下動の効果を実験的に調べる必要があ

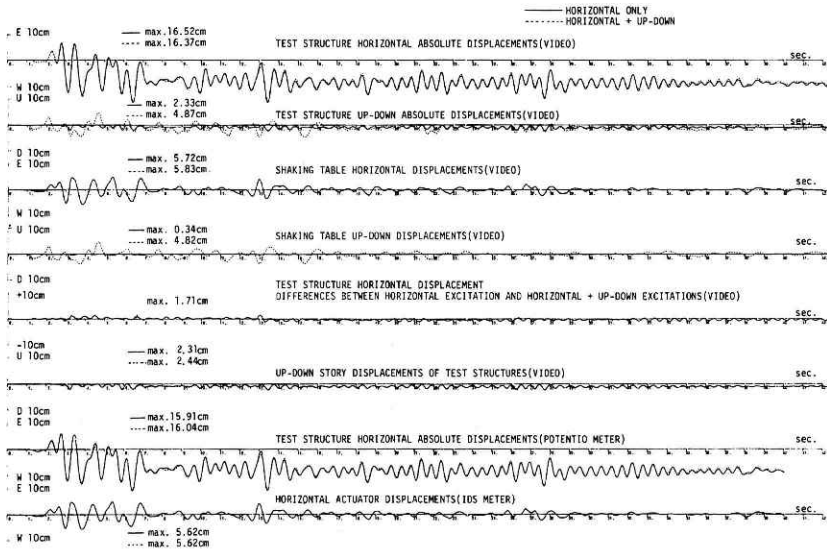


図14 実験に於ける水平1方向加振と水平・上下2方向加振の比較

Fig. 14 The time history comparison of two cases of shaking table tests.

ると考える。また、コンピュータシミュレーションについて system identificationの方法を取り入れて行うべきと考える。

今回は水平1方向加振と水平・上下2方向加振であったが、一般には二次元加振で効果が現れるのは水平2方向加振であると考えられており、水平2方向振動台あるいは3次元6自由度振動台、及び多方向強制加力システム（多方向反力壁）等の実験施設が求められる。

謝 辞

本実験を行うにあたり第2研究部小川主任研究官から助言と協力を得た。また本供試体は同主任研究官により提供されたものである。ここに深く感謝する。

第4研究部勝山室長および矢崎研究員からビデオ計測のデータを頂いた。ここに深く感謝する。

参考文献

- 1) 小川信行・箕輪親宏(1981):三次元精密振動台による小型模型実験－三次元振動台による実験その1－。防災科学技術研究資料, 第67号, 139pp.
- 2) 小川信行(1976):二次元振動装置製作に関する報告(第1報)－二次元接手試験装置の試作－。防災科学技術研究資料, 第26号, 16pp.
- 3) 山田嘉昭(1970):マトリックス法材料力学。培風館, 67-100.

(1984年11月7日 原稿受理)