

# 美術工芸品のための包囲展開式耐震展示台の 開発と性能評価

高瀬正司<sup>1</sup>・大町達夫<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 東京電力(株) 地中送変電建設所(〒107 港区赤坂 8-5-32, 前東京工業大学大学院生)

<sup>2</sup>正会員 工博 東京工業大学教授 大学院総合理工学研究科(〒226 横浜市緑区長津田町 4259)

美術工芸品の美観を損ねず、強烈な地震動に対しても安定した耐震性能を発揮する展示台を開発した。本展示台は、感震器が起動レベルの地震動を感知すると、平常時に収納していた包囲構造を展開し、作品を柔軟に拘束して転倒や滑動を防止する機能をもっている。本論文は、試作した展示台の設計理念や細部構造、および振動実験や数値シミュレーションで検討した耐震性能について記述している。

**Key Words** : art objects, display stand, deployable structure

## 1. はじめに

一般に、陶磁器やガラス工芸品などの美術工芸品(以下、作品と呼ぶ)は、地震に対して極めて脆弱である。そのため、一部の美術館や博物館では、地震時の転倒や滑動を防止することを目的に、展示作品に対し耐震的な工夫が施されている<sup>1)</sup>。実際に行われている簡単な方法として、床面にフェルトを敷いて滑動を防止したり、作品内部におもりを入れ重心を下げるなどの方法がある。これらは作品の鑑賞を妨げることはないが、この程度の対策では強い地震動に対しては満足な耐震性能は確保できないと推察される。また、テグスやボルトなどの固定具を用いて作品を台に強く拘束する方法は、固定具が鑑賞を妨げない場合には有効であるが、花瓶や壺などの作品に対しては固定具による美観の低下、あるいは作品の損傷や汚損が心配される。

上記の欠点を克服する装置として、展示作品を対象とする免震装置も開発され、既に実用されている。著者らも簡便な免震展示台を試作し性能を評価してみた<sup>1)</sup>。その結果、この方法では展示上の美観を損ねない点や、展示替えが容易である点は大きな利点であるが、展示台の許容変位量を相当大きくしないと極めて強烈な地震動に対する耐震性能は保証できないことなどが判明した。

以上のように現状では、美術館や博物館で行われている耐震対策として、展示作品の鑑賞上の美観を損ねず、しかも強烈な地震動に対して十分な耐震性能が期待できる工夫や装置は乏しい。近年の地震、たとえば1989年ロムブリエタ地震<sup>2)</sup>や1995年兵庫県南部地震<sup>3)</sup>におい

て、貴重な作品に多くの被害が生じたことがそれを裏付けている。貴重な文化遺産である作品を地震から保護するために、高性能耐震装置を早急に開発し実用化を図る必要性は極めて高い。

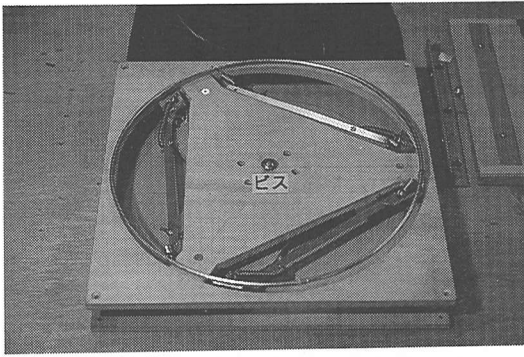
このような考えから著者らは、展開式耐震展示台と仮称する高性能耐震展示台を独自に設計・試作し、振動実験及び数値解析により性能を確認した。本論文では、その設計理念や細部構造および耐震性能などについて記述する。

## 2. 展開式耐震展示台の試作

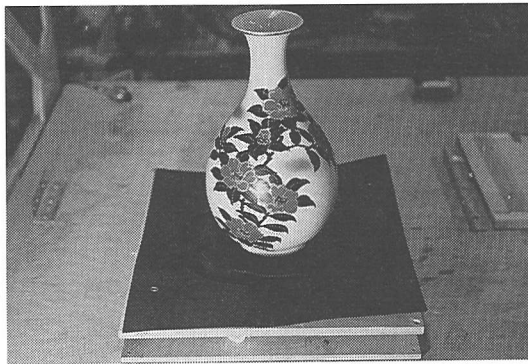
### (1) 設計理念

宇宙構造物としての大型のソーラーレイやアンテナなどには、展開型構造が多く採用されている。これらの構造物は、折り畳んだり巻き込んだりして小さな収納状態で輸送され、供用時に大きく展開して構築される。このため展開型構造は、収納の効率、展開の確実性および構造全体の精度や重量などにより、その性能が評価される<sup>4)</sup>。本研究で開発した展示台は、この展開型構造の概念を耐震装置に応用したものであり、展開式展示台と仮称する根拠もここにある。

耐震展示台に要求されるコンセプトは、平常時は美観を損ねない展示が可能であること、また耐震装置として強烈な地震動に対しても作品の保護効果が高いこと、さらに地震後に簡単に復帰できること、多種多様な作品形状に対応できることなどである。これらのコンセプトを実現するため本研究では、まず展開式展示台を試作して



写真—1 試作展示台の外観（収納状態）



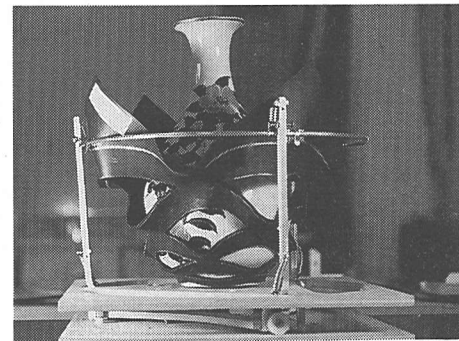
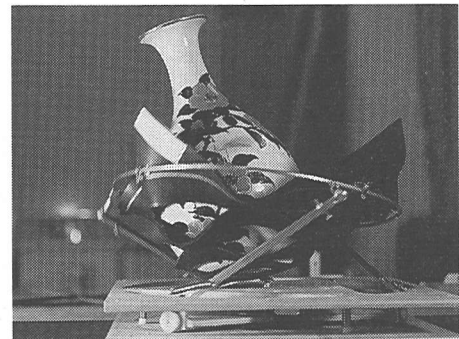
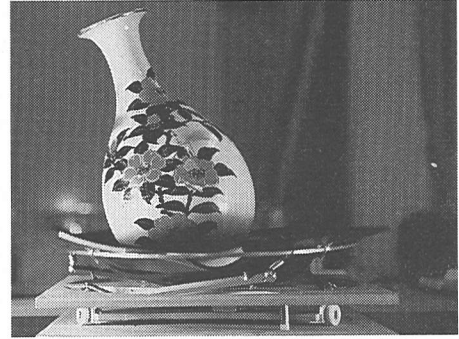
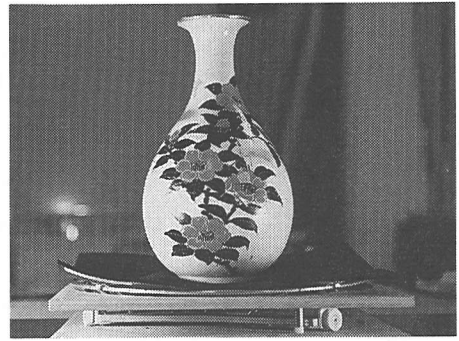
写真—2 試作展示台の外観（供用状態）

性能を評価し、その改良によって実用性の向上を図ることとした。試作および改良した展示台はいずれも、起動装置が地震動を感知すると、収納されていた包囲構造が自動的に展開して作品を拘束し、地震による転倒及び滑動を防止するものである。

## （2）試作展示台の機構と性能

試作した展開式展示台の平常時の外観を写真—1に示す。この展示台の形状は、一辺が30 cmの正方形で、厚さは約4 cmであり、上面にスポンジシートを敷いて使用する（写真—2）。このスポンジシートは平常は板状であるが、同心円状に切り込みが入れてある。地震時に展示作品が傾斜し底面が浮き上がると、底面に圧迫されていたビスのロックが解除され展開機構が起動する。それに伴い、展示台の内部に収納されていた3本の支柱と1つのリングがスポンジシートを持ち上げ、作品をスポンジシートの網で包囲して保護するという機構である。

この試作展示台の耐震性能を調べるため、これに花瓶を載せ、水平振動台を用いて加振したり、それを実地震動で加振する数値シミュレーションを行った。加振時に花瓶が傾斜すると展開機構が起動し、花瓶を下から押さえ込むようにスポンジシートの包囲網が急速に形成され



写真—3 試作展示台の包囲展開過程

る状況を写真—3に示す。

## （3）試作展示台の問題点

展開後、スポンジシートによって包囲された作品は、

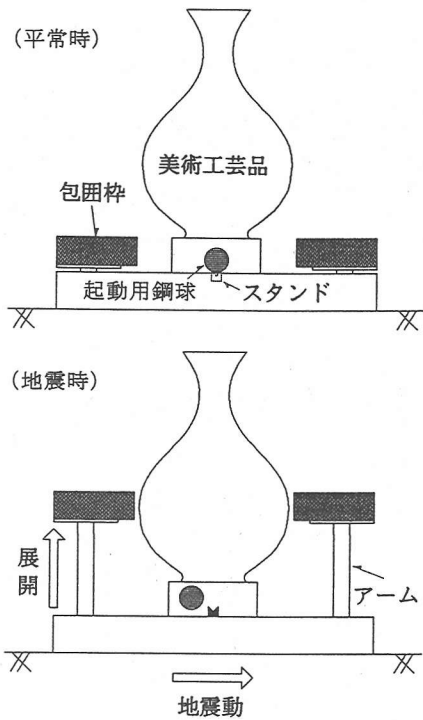


図-1 改良展示台の機構概要

包囲網とともにロッキングを起こす。そのため入力地震動が強大になりロッキング振動の振幅が増大すると、作品が展開した支柱やリングに接触する恐れがあることが、振動実験によって判明した。また、細長い形状の作品で包囲網に十分捕捉されない場合には、包囲網による保護効果が低減することが数値シミュレーションによって判明した。さらに、展開した支柱などの再収納が若干面倒な点も本展示台の改善すべき問題点と言える。

### 3. 改良展示台の構造

#### (1) 改良展示台の概要

改良設計に際し、高さ20~30cm、質量1kg程度の花瓶や壺などの作品を対象とすることとした。

改良展示台の機構の概略を図-1に示す。これによる主な改良点は次の3点である。

1) 展開する包囲構造として前述の包囲網に代えて柔軟な素材の包囲枠を採用し、展開・収納が容易な機構とした。

2) 展開機構の起動に、地震動による鋼球の転動を利用した感震装置、すなわち簡易地震計を採用した。

3) 多種多様な形状の作品に対し、安定した耐震性能を発揮する細部構造とした。

本展示台は作品設置台と包囲枠、および感震装置から

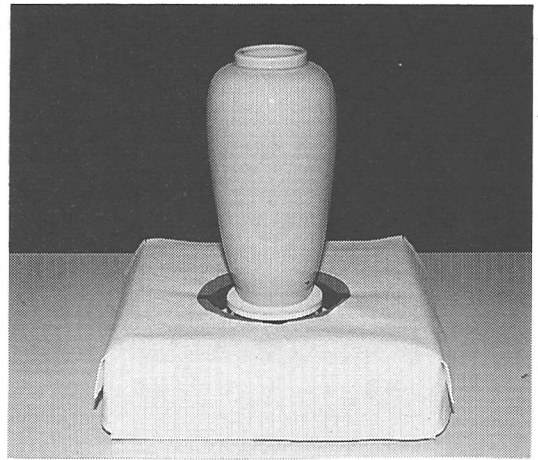


写真-4 改良展示台の外観(平常時)

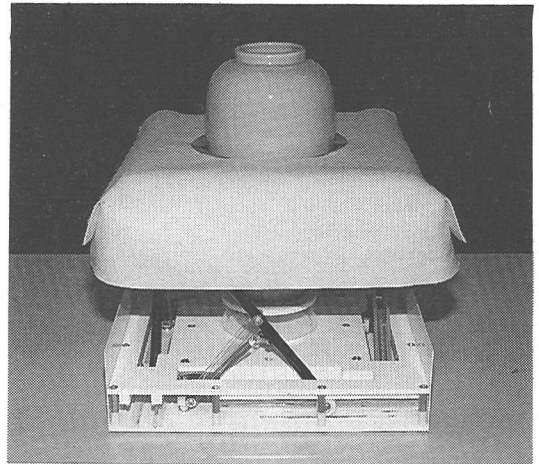
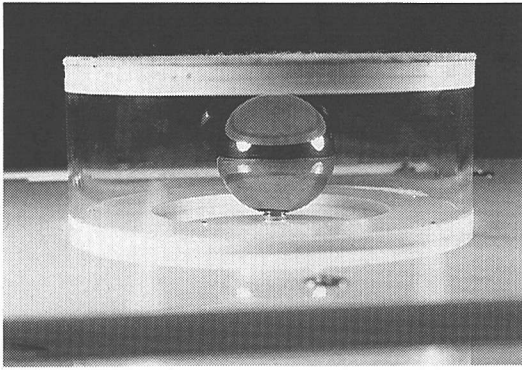


写真-5 改良展示台の外観(地震時)

構成されている。包囲枠は厚さ約3cmの緩衝用スポンジゴムで作成され、その上面にはフェルトのシートが張ってある。地震時に感震装置の起動用鋼球が受け皿から逸脱すると展開機構のロックが解除されて起動し、包囲枠が急速に上昇して作品の側面を拘束する仕組みとなっている。この機構により、平常時の展示状態では作品の美観を損ねず鑑賞の支障とならない(写真-4)。地震時の展開状態では包囲枠が作品の周囲を拘束して転倒や滑動を防止する(写真-5)。また後述のように、展開機構の再収納も比較的容易である。

作品設置台は感震装置のケースを兼ねている。平常時は、その内部のすり鉢状受け皿の上に起動用鋼球が載せられている(写真-6)。起動する入力地震動のレベルは鋼球と受け皿の諸元によって定まるので、広範囲に調整可能である。本改良展示台の主要諸元を表-1に示す。



写真—6 改良展示台の感震装置

表—1 改良展示台の主要諸元

外径寸法	30cm×30cm×8cm
質量	約2.5kg
外板	5mm厚アクリル樹脂製
アーム	径10mmABS樹脂製

## (2) 包囲枠の展開機構

本展示台では、機械的に各部のロックを解除し展開を行う機構を採用している。

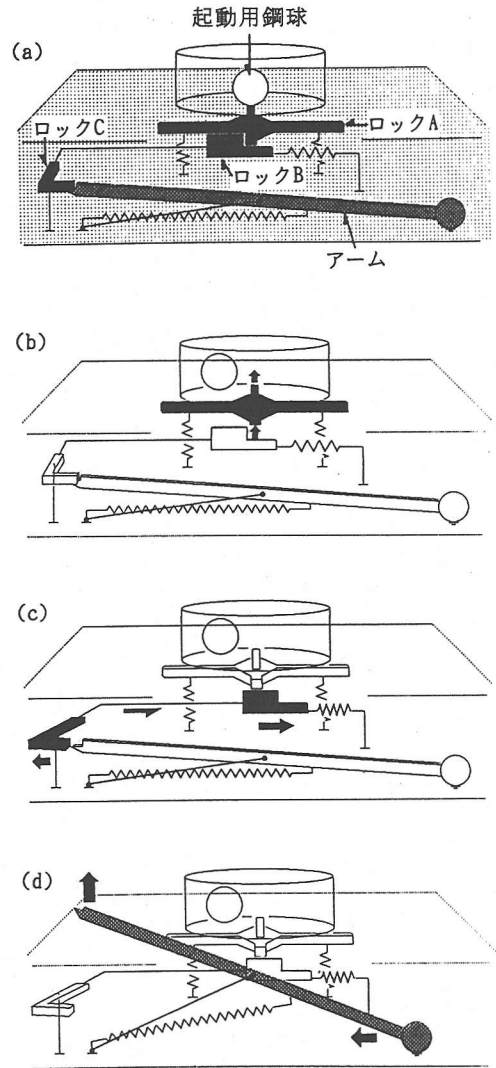
展開時における内部機構の一連の動作を図—2に示す。平常時には受け皿上の鋼球重量でロックAが下方に押さえられている(図—2(a))。入力地震動が起動レベルに達すると鋼球が受け皿から逸脱し、ロックAが上方に持ち上がり、ロックBを解除する(同(b))。解除されたロックBは右方に移動し、これに連動してロックCが回転してアームのロックを解除する(同(c))。すると、アームはばねの復原力により自動的に上昇する(同(d))。

このようにして、地震時に展示台の4辺に沿うアームが立ち上がると同時に、包囲枠が作品の周囲に形成される。アーム下端の支点は滑車となっており、展開時には滑車がガイド上を水平に直線移動し、アーム上端は鉛直に上昇する。この滑車の移動をストッパーで規制することにより、展開後の包囲枠を所要の高さに調整できる。また、緩衝スポンジの移動により包囲枠内径の調整もできる。図—3に、これらの調整方法と範囲を示す。

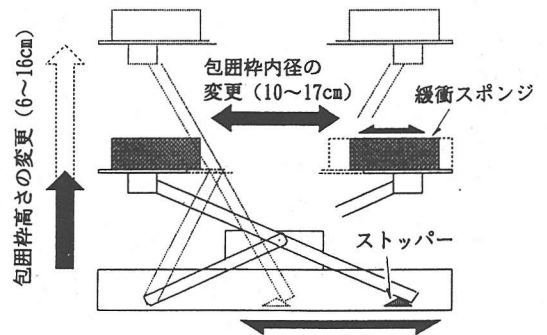
## (3) 包囲枠の設定位置

展開後は、できるだけ包囲枠と作品との間隙を小さくした方が作品の揺れを小さく抑えるのに有効と考えられる。しかし、完全に密着させると、展開時に包囲枠と作品が強く接触し、包囲枠の展開が妨げられたり、作品を転倒させる恐れもある。

そこで、花瓶や壺などの作品の代わりに図—4に示す



図—2 改良展示台の包囲展開機構



図—3 改良展示台の包囲枠の調整方法

代用モデルを用い、包囲枠と作品との適切な間隙幅や包囲枠による作品の拘束位置について検討した。この代用

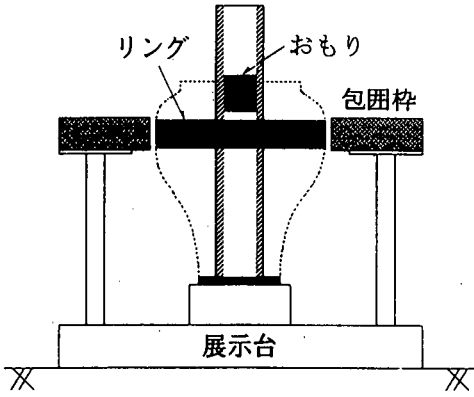


図-4 改良展示台と代用モデルの概要

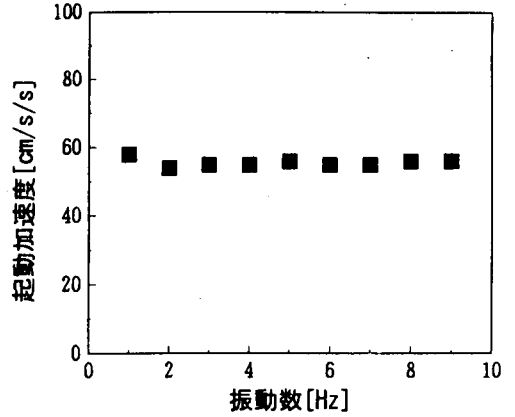


図-5 展開機構起動時の加速度レベル

モデルはおもりの位置を変更することにより重心位置が移動できる。リングは上下の移動が可能であり、直径は10 cm、15 cmの2通りを選択できる。また、底面の円板を交換することにより、底面直径を5 cm、7 cm、10 cmの3通りに変更できる。質量は約1.0~1.2 kgである。

この代用モデルを本展示台上に載せ、振動台により水平1方向の正弦波を与え、展開の状況や代用モデルの挙動を観察した。なお、展開後の包囲枠が、この代用モデルのリングを囲うように包囲枠高さを調整した。

1~10 Hzの振動数で、徐々に入力加速度を大きくして実験した結果、包囲枠との間隙が2 mm以上あれば、包囲枠とリングが衝突しないで展開が可能であることが判明した。

次に、包囲枠と代用モデルの間隙幅を約2 mmとして、包囲枠を展開させた状態での代用モデルの振動挙動を観察した。代用モデルのリングと底面の組み合わせや、リングと重心の位置を様々に変化させて実験した結果、包囲枠と代用モデルの重心高さの差が2 cm以内であれば、2~10 Hzの振動数で1 gを越える入力に対しても転倒しないことが確認できた。

#### 4. 振動台実験による性能評価

##### (1) 展開機構の起動レベル

本展示台のように包囲枠を展開して作品を保護するためには、作品の地震応答が増大する以前に、すなわち入力地震動の強度が低いレベルで展開機構を起動する必要がある。一方、この起動レベルが低すぎると、包囲枠の再収納時の微小振動や展示室内の雑振動などで頻繁に起動することになり、実用上の不都合が生じる。したがって、起動レベルを適切に設定する必要性は高い。

本展示台の起動レベルは、起動用鋼球が受け皿から逸脱するのに必要な最小限の入力地震動の強度であるの

で、上述のように起動用鋼球と受け皿の諸元により起動レベルが調整できる。

気象庁震度階では、すわりの悪い花瓶などが倒れ器内の水があふれるのは、震度4(中震)と説明されている<sup>5)</sup>。また、気象庁で実際に発表された震度3と4の境界に対応する平均的な最大加速度の値は、河角の係数<sup>6)</sup>に比べて50%以上大きく、45 cm/s<sup>2</sup>程度であるとの研究結果<sup>7)</sup>がある。これらを参考にして、本展示台の起動レベルを50 cm/s<sup>2</sup>程度に設定した。

直径25 mmの鋼球(質量約120 g)と直径1.5 mmの鋼製受け皿を組み合わせた本展示台の起動装置の試験結果を図-5に示す。この試験では、本展示台を水平振動台にのせて正弦加振し、展開機構が起動する時の入力加速度振幅を計測した。図中、各振動数における加速度値は5回の計測の平均値である。図-5は、試験した10 Hz以下の入力振動数範囲では、50~60 cm/s<sup>2</sup>の加速度振幅で安定して起動し、当初の設定値よりやや高めであるが起動装置として十分機能することを示している。

##### (2) 展開の所要時間

展開機構は起動後、できるだけ短時間内に包囲枠が設定位置まで上昇し、作品を拘束することが望ましい。この上昇に要する時間を、上記と同様の振動実験により測定した。

本実験での包囲枠の上昇高さは、調整可能な範囲で最も高い16 cmに設定した。加速度計を振動台と展示台の包囲枠にそれぞれ取り付け、振動台による入力水平加速度と包囲枠の鉛直加速度を測定した結果を図-6に示す。図中、包囲枠の鉛直加速度は上向きを正としている。

本展示台では、展開機構が起動すると包囲枠は上向きの加速度を受けて上昇し、展開完了時には負の加速度を受けて停止する。図-6に示された包囲枠の鉛直加速度記録において、この上昇に要する時間は約0.2秒である

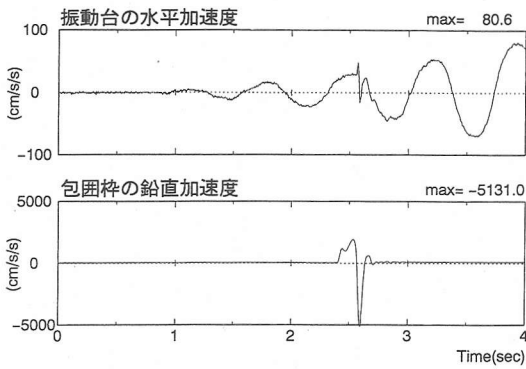


図-6 展開機構起動前後の加速度時刻歴

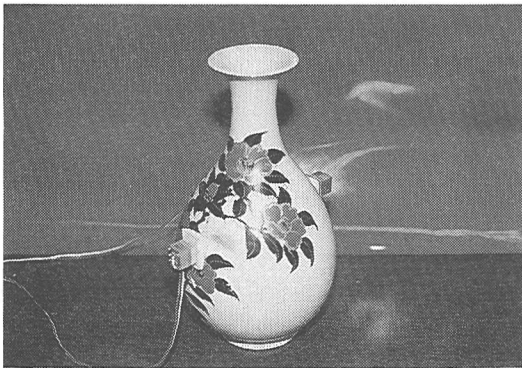


写真-7 性能評価試験に使用した花瓶

と読み取れる。

展開の所要時間がこの程度であれば、実地震時に作品が大きく傾く前に包囲枠が展開できると考えられる。

### (3) 総合評価

本展示台の総合的な耐震性能を、写真-7に示す花瓶を用いて試験してみた。展開後の包囲枠と花瓶との間隙幅が2~3mmで、できるだけ重心の近くを拘束するよう包囲枠の高さを調整した。その結果、この花瓶では最も太い部分を拘束することとなり、包囲枠の高さは花瓶重心の約2cm下となった。

観測で得られた加速度波形の一例を図-7に示す。各波形において、上から入力加速度、花瓶底部の応答加速度、花瓶先端の応答加速度、花瓶の傾斜角である。図中、展開完了時点を示しているが、花瓶の傾斜がほとんど生じないうちに展開を完了していることが分かる。展開直後には包囲枠の上昇停止による衝撃のため、花瓶の挙動にやや乱れが生じているが、傾斜角としては非常に小さい。展開後は包囲枠が花瓶を拘束するため、包囲枠との接触により花瓶の応答加速度は大きくなるが、非常に強い水平動に対しても花瓶の傾斜を抑え、転倒や滑

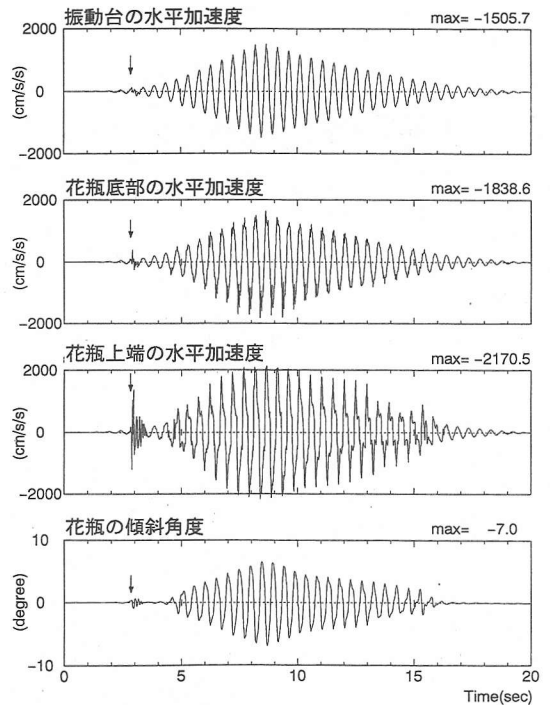


図-7 包囲展開後の加速度時刻歴

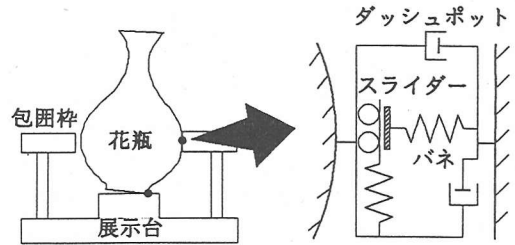


図-8 個別要素法による数値解析モデルの概要

動を防止している。実験後の花瓶には全く損傷は見られなかった。

作品の形状によって保護効果は多少変化すると考えられるが、本展示台はすぐれた耐震性能を発揮することが確認できた。

## 5. 数値シミュレーションによる性能評価

### (1) 解析モデル

前述の振動実験は、振動台の機能上の制約から水平1方向正弦加振に限られており、衝撃的な加振を行うこともできない。そこで本展示台の実地震動に対する耐震性能を評価するため、個別要素法の概念を用いて数値シミュレーションを行った。本シミュレーションでは、複雑で強烈な上下動と水平動を受ける作品が、本展示台の

表-2 数値解析に使用した要素定数

(a) 花瓶と設置台との接触点

法線方向のバネ定数	$k_n=3.8 \times 10^7$ [gf/cm]
接線方向のバネ定数	$k_s=9.5 \times 10^6$ [gf/cm]
法線方向の減衰定数	$h_n=c_n/2\sqrt{mk_n}=4.5 \times 10^{-1}$
接線方向の減衰定数	$h_s=c_s/2\sqrt{mk_s}=3.0 \times 10^{-1}$
スライダの摩擦係数	$\mu=0.31$

※mは花瓶の質量

(b) 花瓶と包囲枠との接触点

法線方向のバネ定数	$k_n=5.0 \times 10^4$ [gf/cm]
接線方向のバネ定数	$k_s=2.5 \times 10^4$ [gf/cm]
法線方向の減衰定数	$h_n=c_n/2\sqrt{mk_n}=1.0 \times 10^{-1}$
接線方向の減衰定数	$h_s=c_s/2\sqrt{mk_s}=5.0 \times 10^{-1}$
スライダの摩擦係数	$\mu=0.55$

※mは花瓶の質量

展開後どのような挙動を示すかに焦点を絞って検討した。

用いた解析モデルを図-8に示す。解析モデルの形状は、本展示台に花瓶を載せ加振した振動実験を参考に、決定したものである。図示のように包囲枠と展示台の位置は固定し、花瓶を一つの個別要素で表現した。花瓶の包囲枠との接触部は簡単のため円弧で近似し、花瓶底面と展示台の接触点、および花瓶と包囲枠との接触点には、それぞれ表-2(a) および (b) に示す要素定数をもつバネ、ダッシュポットおよびスライダを配置した。これらの要素定数は、摩擦係数や法線方向のバネ定数など実測可能なものは実測によって、それが困難なものは自由ロッキング振動実験の実験波形と調和するように定めた<sup>8)</sup>ものである。

包囲枠と花瓶との間隙幅を2mmに設定し、前述の振動実験のシミュレーションを行い、実験波形と比較してモデルの妥当性を検討した。花瓶重心における応答加速度を、実験波形と解析波形を比較した結果を図-9に示す。各加速度波形は上から、入力加速度、花瓶重心の水平方向の応答加速度、花瓶重心の鉛直方向の応答加速度である。実験波形とシミュレーション波形を比較すると、全体的に良く一致している。

そこで、この解析モデルを用いて展開状態の展示台に載せられた花瓶の地震応答シミュレーションを行うこととした。

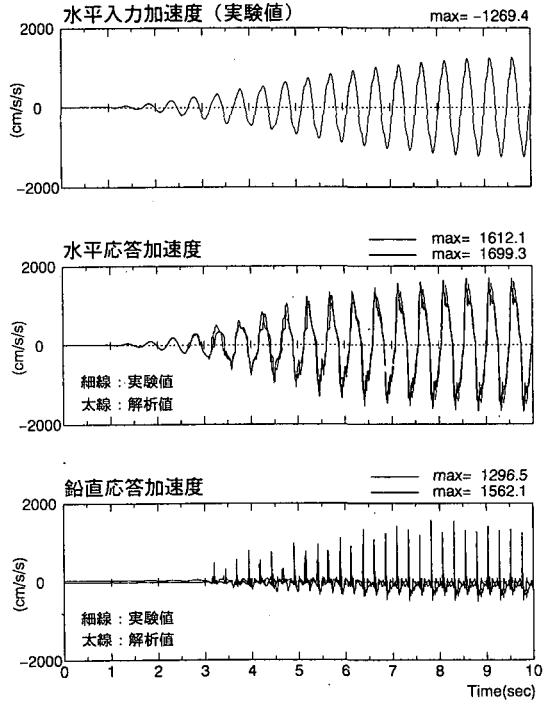


図-9 実験と数値解析の加速度波形の比較

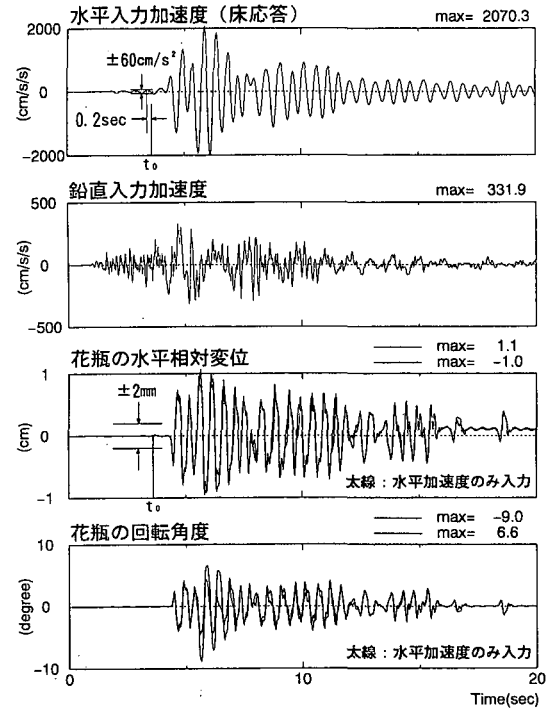


図-10 数値解析による地震応答時刻歴

(2) 作品の地震応答挙動

実地震動として、1995年兵庫県南部地震(神戸海洋気象台)、1940年および1979年インペリアルバレー地震(エルセントロ)での観測記録を用いた。本展示台が

中低層建物内で使用されると想定して、解析モデルへの入力地震動としてその床応答を使用した。そのうち水平

成分については、観測記録の加速度応答スペクトルがピークをもつ固有周期の範囲と中低層建物の固有周期を勘案して、固有周期0.5秒で減衰5%の1質点系の応答波形とし、上下成分は原波形とした。1995年兵庫県南部地震の地震動で、水平・上下両成分を入力した場合と、水平成分のみを入力した場合について、花瓶の傾斜角を比較した結果を図-10に示す。各波形は、上から入力加速度（水平成分）、入力加速度（上下成分）、花瓶重心の展示台に対する水平相対変位、花瓶の重心回りの回転角である。各入力条件とも、花瓶に生じる相対変位は最大で1cm程度、傾斜角は10°以内と小さい。また、上下成分が加わる場合には、水平動だけの場合より傾斜角が大きくなる時点があるものの、全体的に花瓶の応答に与える影響は小さいと言える。

また、展開機構が60 cm/s<sup>2</sup>の水平動入力で起動し、展開の所要時間が0.2秒とすると、図中に示したように入力加速度（水平成分）から展開時刻 $t_0$ が想定できる。その時点での展開時の展示台に対する花瓶の水平変位は2mm以内であることから、包囲枠と花瓶は強く衝突することなく正常に展開するものと判断できる。

実際には包囲枠全体の傾きや花瓶・壺の作品形状によって、作品の挙動は上述のものとは若干異なると考えられる。また、今回は作品の破壊強度に対する検討を行わず、包囲枠との衝撃による作品の損傷については対象としなかったが、極めて脆弱な作品に対してはこの検討も必要である。

## 6. ま と め

本論文では、包囲展開式耐震展示台の概念およびその耐震性能について述べた。

本展示台は、免震装置のように作品に入力する地震動を低減するのではなく、地震時に作品を拘束して転倒や滑動を柔軟に抑制する方法を採用している。作品によ

ては展開した包囲枠との接触により破損する恐れが皆無とは言えないが、本研究で検討した限りでは多種多様な花瓶や壺、ガラス工芸品などに対応可能である。

振動実験および数値シミュレーションの結果からみると、本展示台は強烈な入力地震動に対しても十分な耐震性能をもっている。また、平常時に作品鑑賞を妨害しない利点ももっている。さらに展開機構の再収納は容易で、しかも安価なことから、実用性も高いと考えられる。

なお、本展示台の主たる機能は美術工芸品に対する耐震保護機能であるが、センサーによって包囲枠を展開し作品を拘束する機能は盗難防止用の安全装置としても利用できるとの参考意見も付記しておく。

謝辞：本研究の振動実験に際し、東京工業大学 年組巧博士の協力を得た。また本研究の一部は、文部省科学研究費補助金（課題番号07808050）により実施された。

## 参考文献

- 1) 大町達夫, 高瀬正司, 年組 巧: 展示美術工芸品の現行耐震対策と試作免震展示台の性能評価, 土木学会論文集 No. 507/I-30, pp.191-199, 1995.1.
- 2) 小川雄二郎: 文化財の被害と対策, 日本建築学会 1989年ロマブリーク地震災害調査報告, pp.421-433, 1991.
- 3) Tsuyoshi Kaizuka: Damage Sustained by Art Museums Comprehensive Study of the Great Hanshin Earth-quake UNCRD Research Report Series No.12, pp.126-131, 1995.
- 4) 名取通弘: 宇宙構造工学の概要, 研究展望 土木学会論文集 No.410/I-12, 1-16, 1989.10.
- 5) 宇津徳治ほか: 地震の事典, 朝倉書店, pp.301-307, 1987.
- 6) 河角 広: 震度と震度階, 地震, No.15, pp.6-12, 1943.
- 7) 翠川三郎, 福岡知久: 気象庁震度階と地震動強さの物理量との関係, 地震 No.41, pp.223-233, 1988.
- 8) 大町達夫, 荒井靖博: 個別要素法で用いる要素定数の決定について, 構造工学論文集, Vol.32A, pp.715-723, 1986. (1995.12.4受付)

# A DEPLOYABLE DISPLAY STAND DEVELOPED FOR PROTECTING ART OBJECTS FROM EARTHQUAKE DAMAGE

Masashi TAKASE and Tatsuo OHMACHI

To protect art objects and artifacts from earthquake damage, a new display stand has been developed, and its efficiency has been demonstrated by vibration experiments and numerical simulations. The stand is equipped with a sensor and a deployable guard-frame which is usually folded under the display stand. When the sensor detects shaking stronger than 60 cm/s<sup>2</sup> in acceleration, the frame is triggered to be instantly deployed around the object concerned and prevents it from overturning.