

## 新たに開発した免震装置の特性に関する実験的研究

### Experimental study on vibration characteristics of a newly developed isolating system

水野雄介\*・大根義男\*\*・成田国朝\*\*・奥村哲夫\*\*

Yusuke MIZUNO, Yoshio OHNE, Kunitomo NARITA and Tetsuo OKUMURA

**Abstract** : Many structures constructed in the field of civil engineering have been designed principally from a viewpoint of durability against earthquake forces. The idea of seismic isolation, however, has been paid much attention in a sense of economy since the latest big hazard of the Hyogo-ken Nanbu Earthquake in 1995. A new seismic isolation system, consisting of a elastic rubber cylindrical outer shell and spherical ceramic particles packed in it, was developed in this study, and its fundamental characteristics on vibration and validity for practical use were examined by element tests on specimen and shaking table tests on model structures.

#### 1. はじめに

地震時の構造物破壊を防止する方法は、その力学的概念によって、耐震・制震・免震などに分類されるが、土木工学の分野では、例えば安全率の見直し(割増し)議論や応急措置における橋脚の断面補強など、主として耐震の観点から安全性を向上しようとする傾向が見られる。しかし、耐震性の向上と経済性の追求という相矛盾する目標のバランスを調整する議論は自ずから限界があり、今後は免震や制震の概念を取り入れた設計思想が重要な役割を果たすものと思われる。

本研究では、各種土木・建築構造物の基礎や上部構造物に免震性を付与し、地震力の構造物への伝達を減衰するためのいわゆる免震装置の開発及び免震装置を装着した際の設計思想を確立するための基礎資料を得ることを目的として行った。

#### 2. 免震構造

免震構造は、構造物もしくは構造物内に設置される機器類を、地震動や他の外乱から切り離す機構を設ける構造と考えることができる。この切り離し(アイソレーション)の手法は、減衰を付与しつつ免震装置のたわみ性を増大させる(剛性を小さくすることにより実現される。多くの場合、免震装置は構造物の基部に設けられるため、ベースアイソレーション(基礎免震)と称せられる。

切り離し材のことを一般にアイソレータと呼んでいるが、アイソレータとは上部構造の重量を支持すると同時に、横方向には上部構造を柔らかく支持する装置で、主として積層ゴムが用いられている。

下部構造と切り離された上部構造は比較的自由に可動(振動)することになるのでこれを制御するためにダンパーが用いられる。ダンパーとは、履歴減衰や粘性減衰などの原理によってエネルギーを吸収し減衰性能を高める装置のことである。また、現在ではアイソレータとダンパーが一体となったゴム系の免震支承も使用されている。

\* 愛知工業大学大学院建設システム工学専攻

\*\* 愛知工業大学 土木工学科 (豊田市)

橋梁における免震構造は、基本的には橋桁部と橋台および橋脚部とを一部切り離し、橋桁部の地震慣性力が下部構造に伝達するのを軽減しようとするものである。(図1)

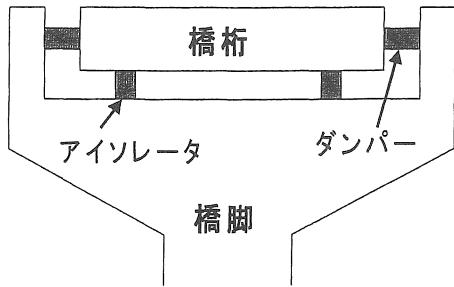


図1 橋梁における免震構造

3. 新たに開発した免震装置

新たに開発した免震装置は、ゴム筒内部に粒状体を充填し、粒状体間の接触摩擦やダイレイタンスーによるエネルギー吸収効果を取り入れようとするものである。装置の概略を図2～5に示す。

図2は、中空ゴム円筒に粒状体を充填したもの(以下O型免震装置と呼ぶ)。図3は、従来の積層ゴムを中空にし、この中空部分に粒状体を充填したもの(以下I型Aアイソダンパーと呼ぶ)、図4は中空ゴム円筒内部に、鉄製のリングをボールベアリングを介して積層し、リング中空部に粒状体を充填したもの(以下I型Bアイソダンパーと呼ぶ)、図5は一方のみ穴の開いている中空ゴム円筒に粒状体を充填したものである(以下II型ダンパーと呼ぶ)。なお、図中の、有効高さ $h'$ は免震装置のゴムがせん断変形する高さ、有効長さ $L'$ は圧縮変形する部分の長さのことである。

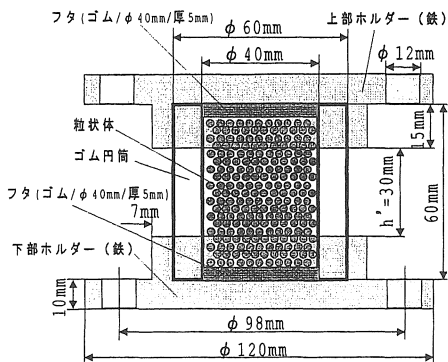


図2 O型免震装置

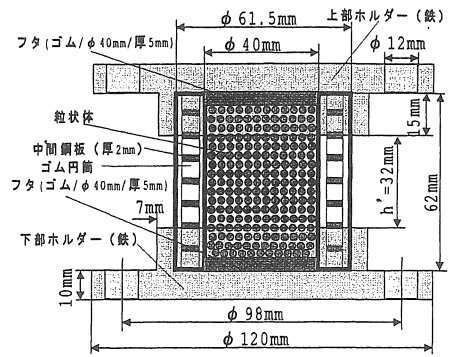


図3 I型Aアイソダンパー

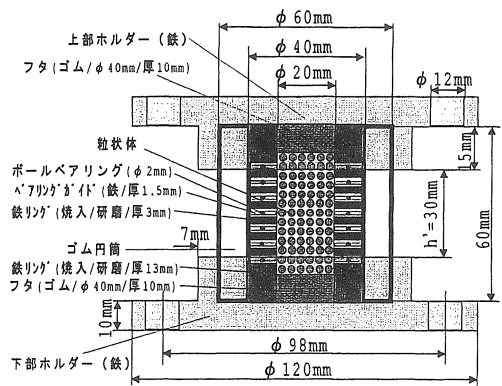


図4 I型Bアイソダンパー

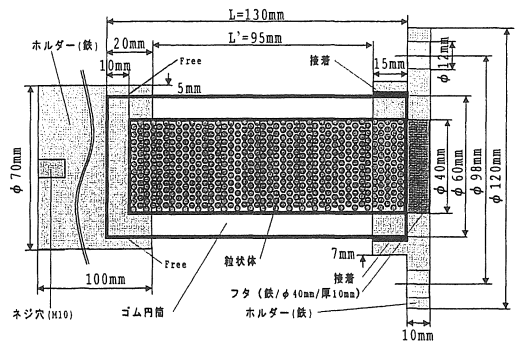


図5 II型ダンパー

使用したゴム円筒は、JIS-K6386防振ゴムC05, C10, C20であり(O型免震装置のみ3種類、I型Aアイソダンパー、I型Bアイソダンパー、II型ダンパーはC10のみ)、粒状体には、直径 $\phi$ 3, 6, 8mmのセラミックボールと $\phi$ 3mmの玉軸受用鋼球(以下鋼球と呼ぶ)を使用した。

4. 特性試験

4.1 繰返しせん断試験

免震装置を構造物下部に設置した場合、所定の鉛直応力下でのせん断変形となる。このせん断変形による免震装置の特性を調べることを目的として、図6に示すような繰返しせん断試験を変位制御で行い、せん断弾性係数Gおよび減衰定数hとせん断ひずみ $\gamma$ の関係を調べた。図7はGおよびhの算出方法である。実験は、粒状体を充填しないケース(中空)も行ったが、新たに開発した免震装置はホルダーにはめて使用することから、充填の有無に関わらず断面積はすべてゴムの外径を基に算出した。なお、実験で免震装置を2つ重ねたのは摩擦による影響を無くすためである。

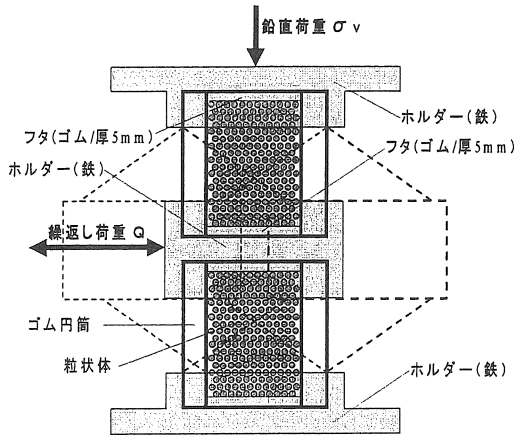


図6 繰返しせん断試験の模式図

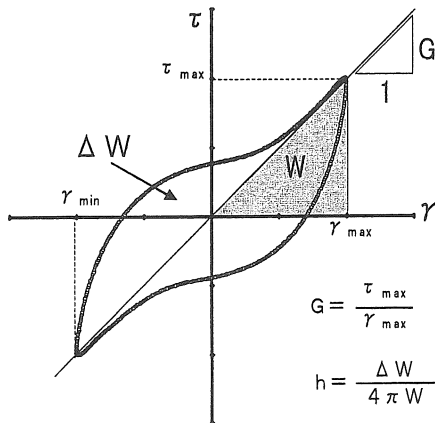


図7 G, hの算出法

図8は充填材の充填効果、すなわち粒状体を充填していない場合(中空)、セラミックボール(φ3mm)

および鋼球(φ3mm)を充填した場合のエネルギー吸収量の違いについて調べたものであり、I型Aアイソダンパー(h'=29mm)を用い、振動数f=0.2Hz、鉛直応力 $\sigma_v=1.97\text{MN/m}^2$ ( $1\text{kgf/cm}^2=98.1\text{kN}$ )、せん断ひずみ $\gamma=7\times 10^{-1}$ とした場合の結果である。(a)図は、繰返し荷重載荷中のせん断荷重とせん断変位の関係を示したものである。(b)図は、(a)図におけるせん断荷重とせん断変位をそれぞれ正規化したものである。正規化は、履歴ループ中のせん断応力 $\tau$ (せん断ひずみ $\gamma$ )を $\tau(\gamma)$ の最大値 $\tau_{max}(\gamma_{max})$ で除すことにより行った。(a)図より、粒状体を充填することにより、せん断変位に対するせん断抵抗が大きくなっていることが分かる。(b)図より粒状体を充填した方が、充填しない場合よりもエネルギー吸収量は多くなっていることが分かり、粒状体を充填することで、より多くのエネルギー吸収することが可能であると考えられる。

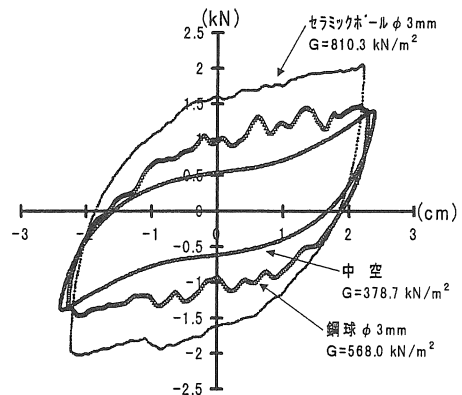


図8(a) 粒状体充填効果(荷重～変位)

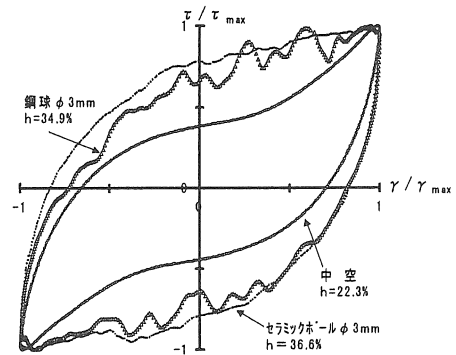


図8(b) 粒状体充填効果(応力～ひずみ・正規化)

図9はGおよびhの振動数依存性について調べたものである。(a)図はI型Aアイソダンパー(h'=29mm)、(b)図はI型Bアイソダンパー(h'=30mm)にそ

れぞれ直径  $\phi 3\text{mm}$  のセラミックボールを充填し、I型Aアイソダンパーでは鉛直応力  $\sigma_v = 1.96\text{MN/m}^2$ 、I型Bアイソダンパーでは  $\sigma_v = 0.98\text{MN/m}^2$  とし、振動数  $f = 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0\text{Hz}$  の5種変化させて行った結果である。(a)図より、I型Aアイソダンパーの  $G, h \sim \gamma$  関係は振動数が異なっても大差なく、振動数に依存しないことが分かる。また  $G$  および  $h$  の  $\gamma$  に対する変化は粒子単体の場合と同じ傾向を示している。一方、I型Bアイソダンパー(b図)では、 $G \sim \gamma$  の関係はI型Aアイソダンパーと同じ傾向を示しているが、 $h \sim \gamma$  の関係は振動数が高くなるにつれて  $h$  が小さくなる傾向が見られる。これはI型Aアイソダンパーの  $h$  に振動数依存性が見られなかったことから、I型Bアイソダンパーでは内蔵されているボールベアリングの影響が現れたためと考えられる。

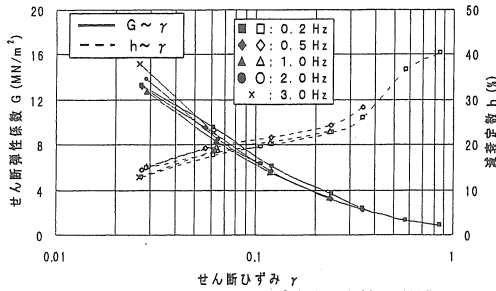


図9(a)  $G, h$  に及ぼす振動数の影響 (I型Aアイソダンパー)

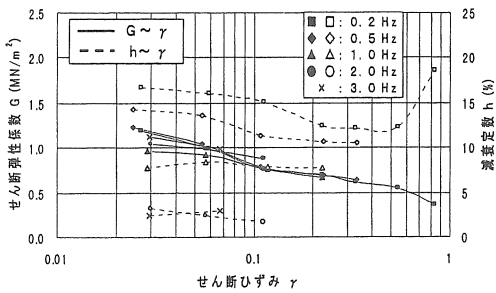


図9(b)  $G, h$  に及ぼす振動数の影響 (I型Bアイソダンパー)

図10はせん断ひずみ  $\gamma = 5 \times 10^{-2}, 2 \times 10^{-1}, 5 \times 10^{-1}$  に対する  $G$  および  $h$  の拘束圧依存性について調べたものである。(a)図はI型Aアイソダンパー ( $h' = 29\text{mm}$ )、(b)図はI型Bアイソダンパー ( $h' = 30\text{mm}$ ) にそれぞれ直径  $\phi 3\text{mm}$  のセラミックボールを充填し、振動数  $f = 0.2\text{Hz}$ 、 $\sigma_v = 0.49, 0.98, 1.96\text{MN/m}^2$  (I型Aアイソダンパー)、 $\sigma_v = 0.49, 0.74, 0.98\text{MN/m}^2$  (I型Bアイソダンパー) の条件で行った結果である。(a)図

の結果を見ると  $\sigma_v$  の増加に伴い  $G$  は増加し粒子単体の結果と傾向的に一致している。また  $h$  は  $\sigma_v$  の増大に対し増加の傾向にあり粒子単体の結果と異なっている。これについては本免震装置の特性あるいは鉛直応力  $\sigma_v$  のゴムと充填材への応力伝播の影響などが考えられ、今後詳細な検討が必要だと思われる。I型Bアイソダンパーは(b図)、 $\sigma_v$  の変化に対し  $G, h$  ともにほぼ横ばい傾向を示した。これはI型Bアイソダンパーでは内蔵されているボールベアリングが  $\sigma_v$  を支持していることから、一定以上の  $\sigma_v$  を免震装置に载荷した場合、粒状体に伝播される応力に変化が生じないためだと考えられる。

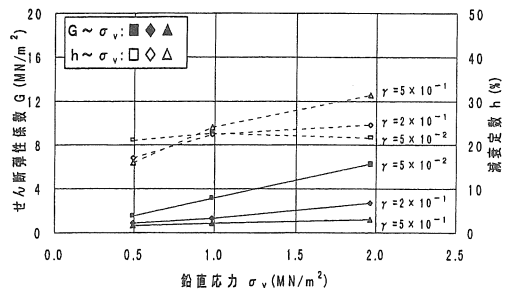


図10(a)  $G, h$  に及ぼす拘束圧の影響 (I型Aアイソダンパー)

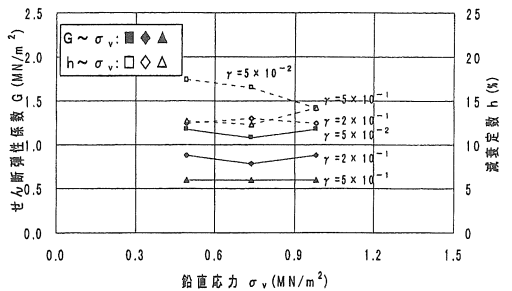


図10(b)  $G, h$  に及ぼす拘束圧の影響 (I型Bアイソダンパー)

図11は粒状体の直径の違いが  $G$  および  $h$  に及ぼす影響について調べたものであり、I型Aアイソダンパー ( $h' = 29\text{mm}$ ) を使い、鉛直応力  $\sigma_v = 1.96\text{MN/m}^2$ 、振動数  $f = 0.2\text{Hz}$ 、セラミックボールの直径  $\phi 3, 6, 8\text{mm}$  と3種変えて行った結果である。図より粒径が大きくなると  $G$  は小さくなっていることが分かる。 $h$  は  $\gamma = 5 \times 10^{-1}$  を除けば、 $\phi 6\text{mm}$  の時に大きな値を示している。しかし値にばらつきが見られ、粒径の違いが  $h$  に及ぼす影響については、もっと小さい粒径の実験が今後必要であるように思われる。

図12は有効高さ  $h'$  が  $G$  および  $h$  に及ぼす影響をせん断ひずみ  $\gamma = 5 \times 10^{-2}, 2 \times 10^{-1}, 5 \times 10^{-1}$  に着目し

て調べたものであり、直径 $\phi$ 3mmのセラミックボールを充填したI型Aアイソダンパーで有効高さ $h'=29, 48\text{mm}$ の2種変化させ、鉛直応力 $\sigma_v=0.98\text{ MN/m}^2$ 、振動数 $f=0.2\text{ Hz}$ として行った結果である。有効高さ $h'$ が高い方が $G$ は小さく $h$ は大きくなった。なお、有効高さ $h'$ を高くしすぎると免震装置の転倒や座屈が考えられ、 $h'$ の限界を見極めることが今後必要である。

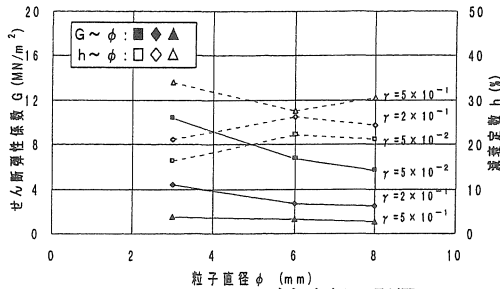


図11 G, hに及ぼす直径の影響 (I型Aアイソダンパー)

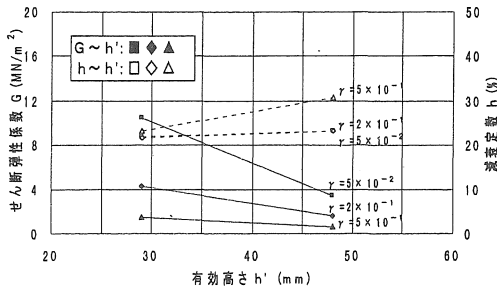


図12 G, hに及ぼす有効高さの影響 (I型Aアイソダンパー)

図13は、I型AアイソダンパーとI型Bアイソダンパーの $G, h \sim \gamma$ の関係を比較したものである。試験条件は鉛直応力 $\sigma_v=0.98\text{ MN/m}^2$ 、振動数 $f=0.2\text{ Hz}$ である。図より $G$ の値はI型Bアイソダンパーの方が小さいことがわかる。これは粒状体の充填量の違いや装置の構造の違いにあると思われる。また、

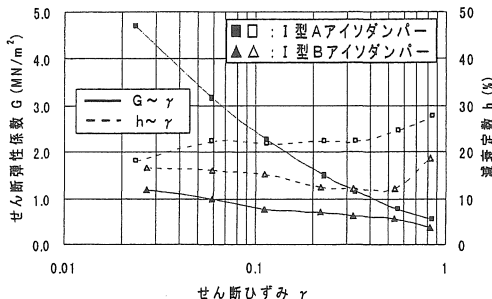


図13 I型AアイソダンパーとI型Bアイソダンパーの比較

$h$ の値はI型Aアイソダンパーの方が大きくなっている。これはI型BアイソダンパーよりもI型Aアイソダンパーの方が充填した粒状体により大きな応力が伝播されたことや粒状体の充填量の違いにあると思われる。

4.2 繰返し圧縮試験

免震装置のダンパーとしての特性を調べるため、図14に示すような繰返し圧縮試験を行った。実験は応力制御で振動数 $f=0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0\text{ Hz}$ の5種、初期圧縮応力 $\sigma_i$ を静的圧縮試験から得られた応力 $\sigma \sim \epsilon$ 関係で、免震装置に硬化現象の現れ始める圧縮ひずみ $\epsilon$  (平均値約30%)に対応する圧縮応力 $\sigma_{\epsilon=30}$ の1/3, 2/3および3/3の3種類に変化させ、応力振幅を $\pm \sigma_{\epsilon=30}/3$ 一定として行った。

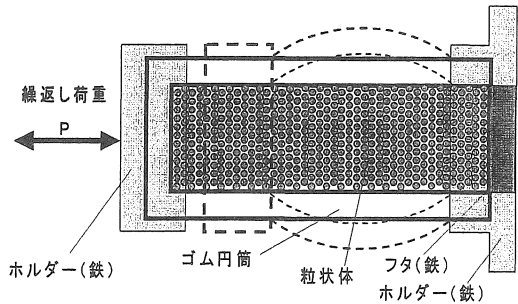


図14 繰返し圧縮試験の模式図

表1はゴム種の違いが動弾性係数 $E_d$ と減衰定数 $h$ に及ぼす影響について調べた結果である( $\sigma_i=2 \cdot \sigma_{\epsilon=30}/3$ )。実験はO型免震装置のゴム種C05, C10, C20の3種で、有効長さ $L'=30\text{ mm}$ のゴム円筒にセラミックボール( $\phi$ 3mm)を充填し、振動数 $f=0.5\text{ Hz}$ で行った。表より $E_d$ はC05, C10, C20の順に大きくなった。また、 $h$ については、C05, C20はほぼ同じ値、C10が他の2つと比べ小さかった。これは粒状体のゴムへの食い込み等が考えらる。

表1 ゴム種の違いが $E_d, h$ に及ぼす影響 (O型免震装置,  $L'=30\text{ mm}$ ,  $f=0.5\text{ Hz}$ ,  $\sigma_i=2 \cdot \sigma_{\epsilon=30}/3$ , セラミックボール $\phi$ 3mm)

ゴム種	動弾性係数 $E_d$ (MN/m <sup>2</sup> )	減衰定数 $h$ (%)
C05	3.98	15.10
C10	11.55	12.81
C20	33.35	15.37

表2は充填材の違いが $E_d$ 及び $h$ に及ぼす影響について調べた結果である( $\sigma_i=2 \cdot \sigma_{\epsilon=30}/3$ )。実験はO型免震装置(C10,  $L'=30\text{ mm}$ )を用い、振動数 $f=0.5\text{ Hz}$

で行った。表より、粒状体を充填した方がしない場合よりもhの値は大きくなっていることから、粒状体を充填することでより高い減衰が得られると考えられる。また、セラミックボールよりも鋼球のhが大きいのは、Edの値からも分かるように両者の摩擦係数の違いがあると思われる。

表2 充填材の違いがEd, hに及ぼす影響  
(O型免震装置, C10, L'=30mm, f=0.5Hz,  $\sigma_1=2 \cdot \sigma_{\epsilon=30/3}$ )

充填材	動弾性係数 Ed (MN/m <sup>2</sup> )	減衰定数 h (%)
—— (中空)	7.97	11.92
セラミックボールφ3mm	82.91	14.14
鋼球φ3mm	11.33	17.81

図15は有効長さL'の違いがEdおよびhへ及ぼす影響を調べたものである( $\sigma_1=2 \cdot \sigma_{\epsilon=30/3}$ )。実験はO型免震装置の有効長さL'=10, 20, 30, 50, 70mmの5種で、直径φ3mmのセラミックボールを充填し、振動数f=0.5Hzで行った。有効長さL'が長くなるにつれEdは小さくなった。またhはEdと逆の傾向を示した。しかし実際に使用する場合には、構造上の許

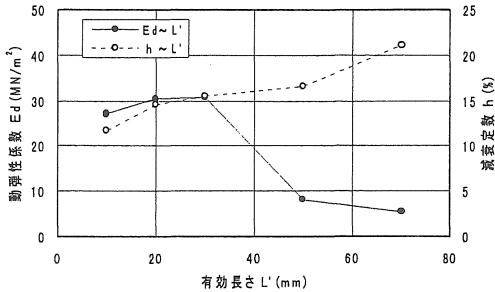


図15 有効長さの違いがEd, hに及ぼす影響 (O型免震装置)

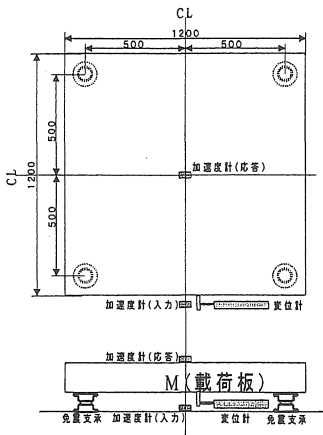


図17 case.1

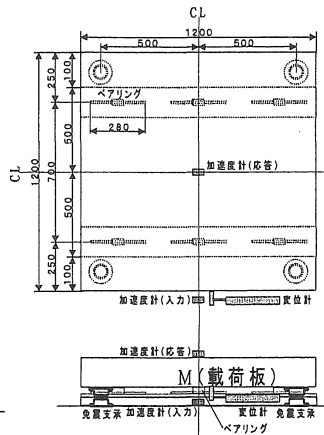


図18 case.2

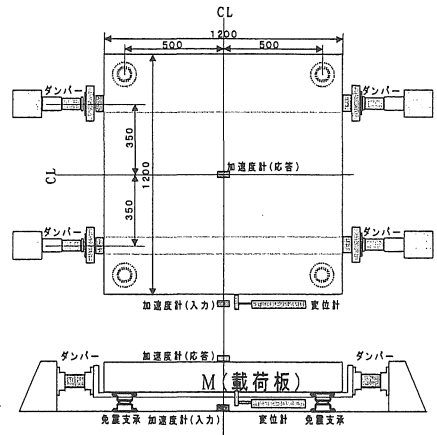


図19 case.3

容変形量などの問題があり構造物に適したダンパーを選択する必要があると思われる。

図16はEdとhの振動数依存性について調べたものである。実験は直径φ3mmのセラミックボールを充填したII型ダンパー(L'=95mm)を用い、振動数f=0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0Hzの5種変化させた。図よりEd~f, h~fの関係は似かよっており、Edおよびhの振動数依存性はないと考えられる。

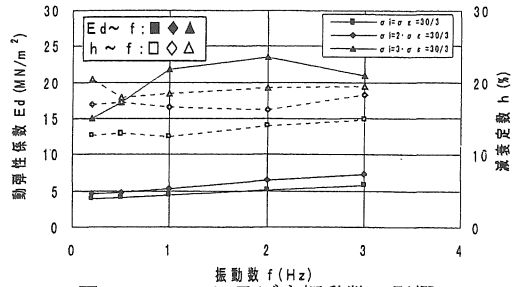


図16 Ed, hに及ぼす振動数の影響 (II型ダンパー)

5. 振動模型実験

実験は、図17~19に示す3つのモデルに対して行った(正弦波、水平1方向加振)。図17は載荷板を4本の免震支承のみで支持したタイプ(case.1)、図18は載荷板をベアリングと4本の免震支承で支持したタイプ(case.2)、図19はcase.1にダンパーを装着したタイプ(case.3)である。case.1とcase.2はアイソレータ、case.3はダンパーの実験である。載荷板には鉄板を使用した。各ケースとも免震支承の中心間隔は1000mm、ダンパーの中心間隔は700mmである。

図20はcase.1の結果であり、計測した載荷板の加速度 $\alpha_T$ を振動台の加速度 $\alpha_B$ で除した加速度比 $R_\alpha$  ( $=\alpha_T/\alpha_B$ )および、振動台と載荷板との相対変位と台周期 $T$ の関係で示している。実験はI型Aアイソダンパーで $h'=29\text{mm}$ を用い、粒状体を充填しない場合(中空)と直径 $\phi 3\text{mm}$ セラミックボールを充填した場合で行った(鉛直応力 $\sigma_v=2.03\text{MN/m}^2$ , 入力加速度 $\alpha_B=200\text{gal}$ )。図より、中空が $R_\alpha < 1$ となっているのが分かる。粒状体を充填したケースでは、免震装置の水平剛性が高すぎたため免震化に必要な相対変位がでていないことが考えられる。

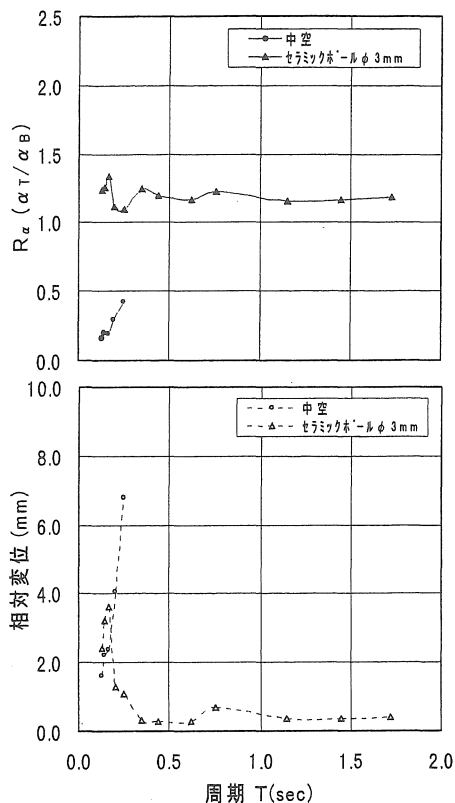


図20 case.1の結果 (I型Aアイソダンパー,  $h'=32\text{mm}$ ,  $\sigma_v=2.03\text{MN/m}^2$ ,  $\alpha_B=200\text{gal}$ )

図21はcase.1における入力加速度 $\alpha_B$ の違いによる加速度比 $R_\alpha$ と台周期 $T$ の関係を調べたもので、セラミックボール( $\phi 3\text{mm}$ )を充填したI型Aアイソダンパー( $h'=32\text{mm}$ )を用いた。図より $\alpha_B \leq 200\text{gal}$ では $R_\alpha > 1$ となっているのに対し、 $\alpha_B \geq 400\text{gal}$ では $R_\alpha < 1$ となっている。また、入力加速度 $\alpha_B$ の増大に伴って加速度比 $R_\alpha$ が小さくなる傾向が見られる。

図22はI型AアイソダンパーとI型Bアイソダンパーの結果を比較したものである。図は、鉛直応力

$\sigma_v=2.06\text{MN/m}^2$ 、入力加速度 $\alpha_B=100\text{gal}$ の結果であり、どちらが免震支承として優れているかは言い難いが、水平方向への変形能力のみに着目した場合、I型Bアイソダンパーの方が免震支承として優れていると思われる。しかし、I型Bアイソダンパーでは支持可能な鉛直応力 $\sigma_v$ に限界があることから使用可能な範囲も限られると思われる。

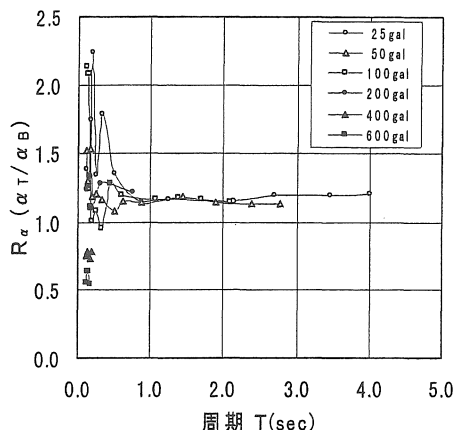


図21 case.1の結果 (I型Aアイソダンパー,  $h'=32\text{mm}$ , セラミックボール $\phi 3\text{mm}$ )

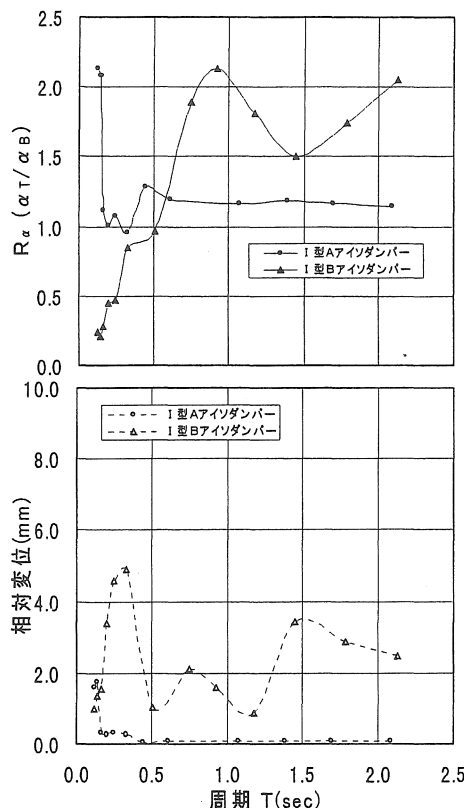


図22 case.1の結果 ( $h'=30\text{mm}$ ,  $\sigma_v=2.07\text{MN/m}^2$ ,  $\alpha_B=200\text{gal}$ , セラミックボール $\phi 3\text{mm}$ )

図23はcase. 2における圧縮ひずみ  $\epsilon$  の違いが加速度比  $R_a$  と相対変位に及ぼす影響について調べたものである。実験はO型免震装置を用い、載荷板質量  $M=2454\text{kg}$  一定でベアリングの高さを調整することで免震装置の圧縮ひずみ  $\epsilon$  を変化させた。なお圧縮量から推定した免震装置が支持できる鉛直荷重は、 $3.04, 6.67, 10.59\text{kN}$  ( $\sigma_v=0.27, 0.59, 0.86\text{ MN/m}^2$ ) である。図より、圧縮ひずみ  $\epsilon$  が小さい方が加速度比  $R_a$  のピークの周期が長く加速度比  $R_a$  も小さい。また逆に相対変位は大きくなっていることが分かる。

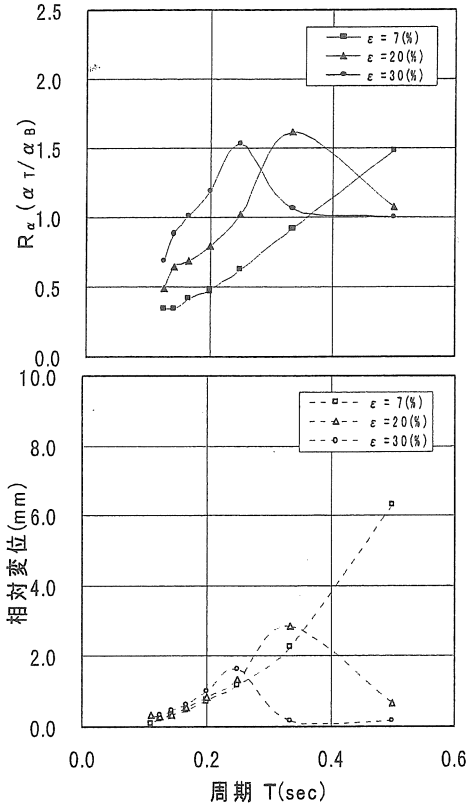


図23 case. 2の結果 (O型免震装置,  $h'=30\text{mm}$ ,  $\alpha_B=50\text{gal}$ ,  $M=2454\text{kg}$ , セラミックボール  $\phi 3\text{mm}$ )

図24はcase. 3の結果でありII型ダンパーの装着効果を調べたもので、支承にはI型Aアイソダンパー ( $h'=29\text{mm}$ ) を、ダンパーにはII型ダンパー ( $L'=145\text{mm}$ ) を用い、載荷板質量  $M=2511\text{kg}$ 、入力加速度  $\alpha_B=200\text{gal}$  である。図よりダンパーを装着することで相対変位が抑制され、載荷板と振動台が一体となって揺れる結果となっている。なおI型Bアイソダンパーを支承としたケースも同じような結果となった。

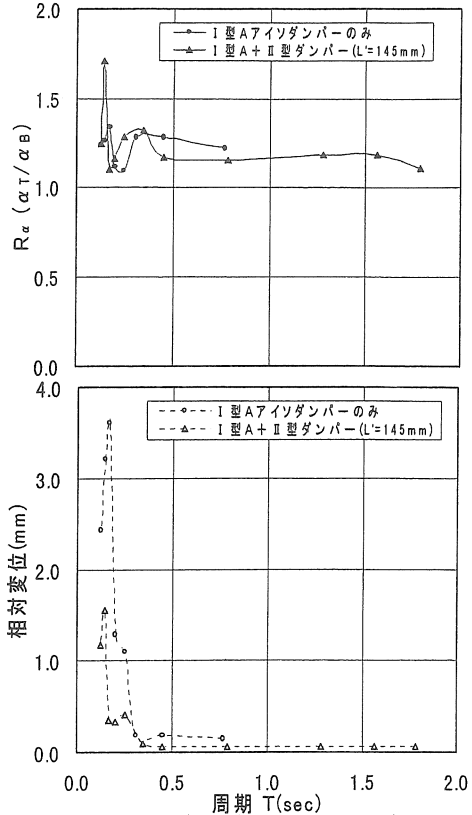


図24 case. 3の結果 (I型Aアイソダンパー  $h'=29\text{mm} + \text{II型ダンパー } L'=145\text{mm}$ ,  $\alpha_B=200\text{gal}$ ,  $M=2454\text{kg}$ , セラミックボール  $\phi 3\text{mm}$ )

6. 振動模型実験に対する解析的検討

土質材料や本研究で対象とする粒状体をを用いた免震装置のように材料特性(剛性・減衰)が、振動時のせん断ひずみ量  $\gamma$  によって非線形に変化する場合、それらの特性を考慮した解析が必要となる。土質材料の非線形特性の表現には、Hardin-Drnevichモデルがよく用いられ、次式で表される。

$$G/G_0 = \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_r} \quad h/h_0 = \frac{\gamma/\gamma_r}{1 + \gamma/\gamma_r}$$

$$G_0 = G_k(\sigma_0)^n \quad \gamma_r = \gamma_k(\sigma_0)^n \quad \dots\dots\dots (1)$$

- $G_0$ : せん断ひずみ量  $\gamma$  が非常に小さいときのせん断弾性係数  $G$  (拘束圧  $\sigma_0$  のべき乗に比例)
- $h_0$ : せん断ひずみ量  $\gamma$  が非常に大きいときの減衰定数  $h$
- $\gamma_r$ : せん断弾性係数  $G$  が  $G_0$  の1/2になるひずみ量 (規準ひずみ) (拘束圧  $\sigma_0$  のべき乗に比例)



繰返しせん断試験から得られたせん断弾性係数Gおよび減衰定数hとせん断ひずみ $\gamma$ との関係から、線形弾性の振動応答解を用いて、材料非線形性を考慮した振動模型実験(1自由度系)の応答解を求めた。

1自由度系の振動において支点(地動)変位が

$$U_g = \omega U_o \sin \omega_g t$$

で与えられるとき、支点からの相対変位をUとしたときの運動方程式は

$$\ddot{U} + 2h \omega U + \omega^2 U = \omega_g^2 U_o \sin \omega_g t$$

となる。

このときの強制振動の解は振動数比を

$$\xi = \omega_g / \omega$$

とすると

$$U = \frac{U_o \xi^2 \sin(\omega_g t + \phi)}{\{(1 - \xi^2)^2 + (2h\xi)^2\}^{0.5}}$$

$$= U_o L_2 \sin(\omega_g t + \phi)$$

となる。従って $L_2$ は次式となる。

$$L_2 = \frac{\xi^2}{\{(1 - \xi^2)^2 + (2h\xi)^2\}^{0.5}} \dots\dots (2)$$

- U : (台と載荷板)相対変位
- U<sub>o</sub> : 地動変位(台変位)
- L<sub>2</sub> : 変位の応答倍率
- h : 減衰定数                       $\xi$  : 振動数比
- $\omega$  : 固有円振動数

図25は振動台入力加速度 $\alpha_B=400gal$ 一定とし、加振振動数f(Hz)を変えた一連の実験における応答曲線を示したものである。縦軸は振動質量Mの変位振幅Uを免震装置の有効高さh'で除し、せん断ひずみ $\gamma=U/h'$ で表した値であり、実験値Uは変位計計測値を、計算値Uは上記の方法で求めた変位値を用いて整理している。図で明らかなように、実験値と計算値は極めて良く対応することが知れる。なお、免震装置の特性試験において、hについては $\gamma$ との明瞭な関係が得られなかったため、今回の計算では式(1)を用いず、 $\gamma$ 値によらず $h=h_o=20\%$ 一定とした。

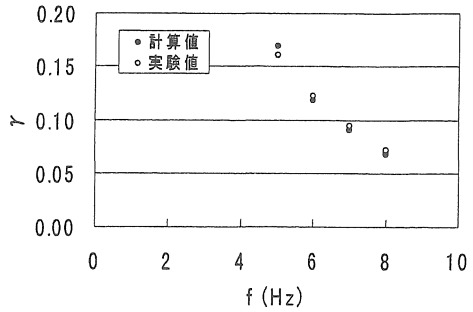


図25 応答曲線(case. 2,  $\alpha_B=400gal$ )

図26は実験値と計算値の整合性を調べたものである。各実験の個々の加振状態に対する実験および計算のせん断ひずみ $\gamma$ をそれぞれ横軸と縦軸にとって対応点をプロットしている。プロット点が45°線上の近傍にばらついていれば両者の対応性が良いことを意味する。図から、加振加速度が小さい一部の結果を除いて実験値と計算値は非常に良く対応しており、4.1項で得られた免震装置の特性が、振動模型実験でも良く反映されているといえる。

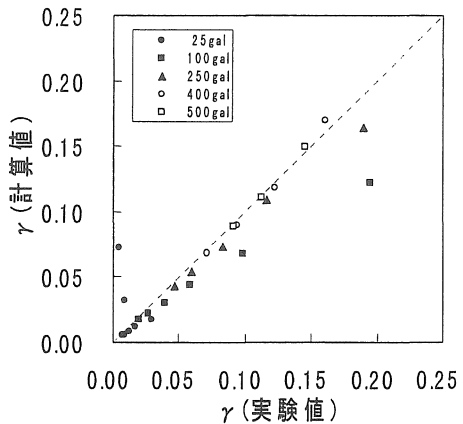


図26 実験値と計算値の対応(case. 2)

### 7. 結論

1. ゴム円筒に粒状体を充填した免震装置には、粒状体間の接触摩擦やダイレイタンシーによるエネルギー吸収効果がある。またI型Bアイソダンパーを除き、せん断弾性係数Gおよび減衰定数hとせん断ひずみ $\gamma$ の関係は、粒状体単体のときと同じ傾向にあり、粒状材料と同じように考えることができる。
2. 構造物の免震化にあたり免震支承には十分な水平変形能力が必要であることを確認した。しかし、

新たに開発した免震装置はその上下をホルダーにはめて使用することから、せん断変位量が大きくなるとホルダーからはずれてしまうため、今後ホルダーを深くすることや直径と有効高さの比( $D/h'$ )の検討が必要である。

3. 解析を行った1自由度系において、実験値と計算値に整合性が確かめられたことは、一般の多自由度構造系においても、本研究の手法が適用できる可能性を秘めているといえる。

#### <参考文献>

- 1) 水野雄介・大根義男・成田国朝・奥村哲夫：新たに開発した免震装置の特性に関する研究，土木学会中部支部平成9年度研究発表会，1998. 3
- 2) 日本建築学会：免震構造設計指針，1993.
- 3) 土木学会：新体系土木工学18，技報堂出版，東京，1981.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，1996.
- 5) 日本免震構造協会：免震構造入門，オーム社，東京，1995.
- 6) 日本免震構造協会：積層ゴム入門，オーム社，東京，1995.
- 7) 小坪清真：土木振動学，森北出版，東京，1973
- 8) R. I. スキナー・W. H. ロビンソン・G. H. マックハリー著、川島一彦・北川良和訳：免震設計入門，鹿島出版会，東京，1996.
- 9) 武田寿一：構造物の免震・防振・制振，技報堂出版，東京，1988.
- 10) 山口柏樹：土質力学，技報堂出版，東京，1993.
- 11) 鹿島都市防災研究会：制震・免震技術，鹿島出版会，東京，1996.
- 12) 鹿島都市防災研究会：大地震と都市災害，鹿島出版会，東京，1996.
- 13) 大橋雄二：地震と免震，朝倉書店，東京，1996.
- 14) 久保慶三郎：地震と土木構造物，鹿島出版会，東京，1995.
- 15) 大崎順彦監修、清水建設免震開発グループ編：わかりやすい免震建築，理工図書，東京，1990.

(受理 平成10年3月20日)