

粒状体を用いた積層ゴム支承の免震性能に関する研究

Seismic isolation effects of laminated rubber bearing paced with granular material

林千尋[†], 奥村哲夫^{††}, 成田国朝^{††}, 大根義男^{††}

Chihiro HAYASHI, Tetsuo OKUMURA, Kunitomo NARITA and Yoshio OHNE

ABSTRACT : A great attention has been paid to seismically isolated structures since the Hyogo-Ken Nanbu Earthquake in 1995. A laminated rubber bearing, which consists of a laminated rubber cylindrical outer shell and granular material packed in it, was newly developed in this study. Its fundamental mechanical characteristics on vibration and the validity for practical use were examined through element tests, shaking table tests and vibration analysis of one degree of freedom system. The results of element tests have showed that the laminated rubber bearing packed with granular materials can have much energy absorption due to the effect of contact friction and that of dilatancy between solid particles. Also presented in the vibration analysis is the fact that the calculated values of response acceleration of a house model have a close correlation to those given in the shaking table tests.

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震によって多くの土木・建築構造物が崩壊し、地震の恐ろしさが社会的に再認識された。耐震構造の限界と構造物の機能の重要性が指摘されるなか、構造物の機能を含めた総合的な耐震安全性が重要になると考えられる。そこで着目されるのは構造物の免震化であり、震災以降、各研究機関で免震構造に関する研究が一層盛んとなった。

そこで本研究では、各種土木・建築構造物に対し、従来の免震装置にくらべて振動エネルギーの吸収効果がより高い免震装置の開発を目指し、粒状体によるエネルギー吸収効果を取り入れた免震装置の開発を行い、装置を構造物に設置した際の設計手法を確立するための基礎資料を得る事を目的として行った。

具体的には、以下の項目に着目し研究を進めた。

- (1) 装置の動的変形特性の解明
- (2) 装置を構造物に設置した際の応答特性や周期特性の解明

- (3) 1自由度系振動解析による結果と実験結果との対応性の検討並びに装置を構造物に設置した際の振動挙動の解析的検討

2. 粒状体を用いた免震装置

粒状体を用いた免震装置は、図-1に示すように外径110mm、内径40mm、厚さ2mmの中空円形の中間鋼板と、外径90mm、内径60mm、厚さ2mmのゴムシートを交互に積層した固着型積層ゴムアイソレータで、この中空部分に粒状体を充填したものである。そして、この粒状体間の接触摩擦やダイレイタンス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。積層するゴムシートには、天然ゴムシート(アメゴム(60%)イタ、 $G=540\text{kPa}$)を使用し、積層数は26枚である。粒状体には、直径 $\phi=0.5, 3, 5, 10\text{mm}$ のセラミック球を使用した。なお、充填した粒状体部分の直径 ϕ_r (以下、粒子柱外径と呼ぶ)は、中間鋼板と粒状体の間のゴムシートの厚さを変化させることで調整できるようになっており、構造物基礎に対してはホルダーとのボルト締めにより固定する。

[†] 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)

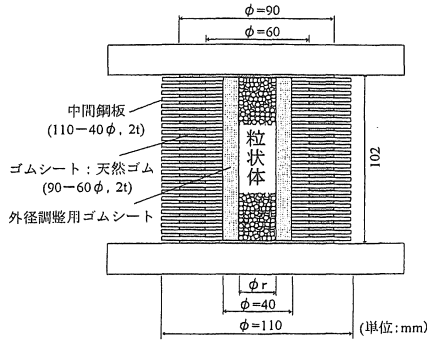


図-1 粒状体を用いた免震装置の概略

3. 免震装置の特性試験

3.1 実験概要

免震装置を構造物下部に設置した場合、地震時には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力学的特性を調べることを目的として、繰り返しせん断試験を行った。実験は、上部構造物の死荷重を想定して鉛直荷重 P_v を加えた状態で、水平方向に振動数 $f = 0.2\text{Hz}$ 、変位制御で繰り返しせん断荷重を与え、せん断応力 τ とせん断ひずみ γ の関係から、装置のせん断弾性係数 G および減衰定数 h と γ の関係を測定した。

3.2 結果と考察

図-2 は、粒状体充填の有無によるエネルギー吸収量の違いについて調べたものである。図は、鉛直応力 $\sigma_v = 2.45\text{MPa}$ 一定、粒状体を充填しない中空装置と粒子柱外径 $\phi_r = 40\text{mm}$ に直径 $\phi = 0.5\text{mm}$ のセラミック球を充填した中実装置の $\gamma \approx 0.3$ 時のせん断応力 τ とせん断ひずみ γ 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 τ と γ をそ

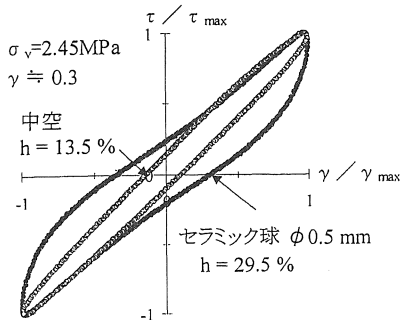


図-2 粒状体充填効果 (応力~ひずみ・正規化)

れぞれの最大値 τ_{max} , γ_{max} で除することにより行った。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約2倍程度大きくなっていることが分かり、粒状体を充填することにより多くのエネルギーを吸収する事が可能であると考えられる。

図-3 は、 G および h に及ぼすひずみ振幅の影響について調べたものであり、装置の $G, h \sim \gamma$ 関係を示している。図は、 $\sigma_v = 2.45\text{MPa}$ 一定、中空装置の結果と $\phi_r = 20\text{mm}$ に直径 $\phi = 0.5\text{mm}$ のセラミック球を充填した中実装置の結果である。図より、中実装置の G は γ の増加に伴い減少する傾向があり、逆に h は増加する傾向が見られる。また、中実装置の G および h は、中空装置にくらべ γ の変化による影響が著しく現れている。このような中実装置の $G, h \sim \gamma$ 関係が現れたのは、粒状体単体の材料特性が非線形に変化するためだと考えられる。

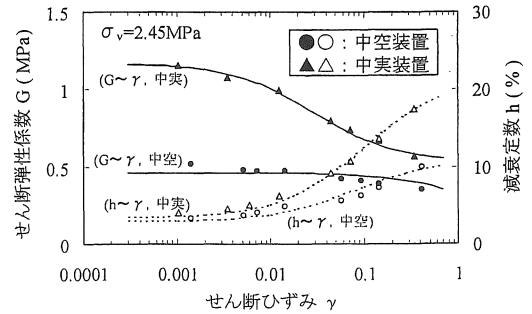


図-3 中空装置および中実装置の $G, h \sim \gamma$ 関係の一例

図-4 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 $\gamma = 1 \times 10^{-2}$, 1×10^{-1} , 3×10^{-1} に着目して調べたものである。図は、 $\sigma_v = 2.45\text{MPa}$ 一定、 $\phi_r = 40\text{mm}$ にセラミック球の直径を $\phi = 0.5, 3, 5, 10\text{mm}$ と4種類変えて行った結果である。図より、粒径が大きくなるにつれ G は小さくなっていることが分かる。これは、粒径が大きくなるにつれて間隙比が大きくなり、それに従い G が低下したためだと考えられる。また、 $\gamma = 1 \times 10^{-2}$ を除けば G と同様、粒径が大きくなるにつれて h は小さくなっていることが分かる。これは、粒径の大小によりダイレイタンスによる体積変化量が違うためだと考えられる。

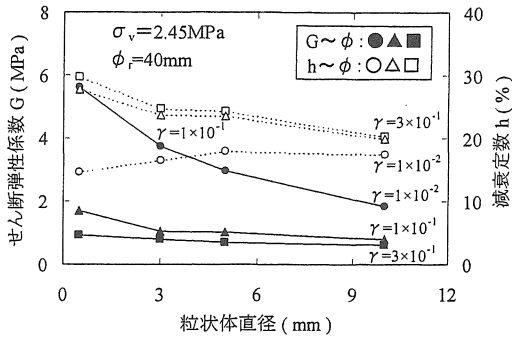


図-4 G、hに及ぼす粒状体直径の影響

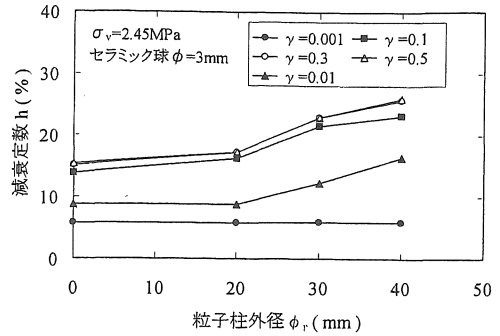


図-5(b) hに及ぼす粒子柱外径 phi_rの影響

図-5は、粒子柱外径 ϕ_r の違いがGおよびhに及ぼす影響を $\gamma = 1 \times 10^{-3}, 1 \times 10^{-2}, 1 \times 10^{-1}, 3 \times 10^{-1}, 5 \times 10^{-1}$ に着目して調べたものである。図は、 $\sigma_v = 2.45\text{MPa}$ 一定、直径 $\phi = 3\text{mm}$ のセラミック球を充填し、 $\phi_r = 0$ (中空装置), 20, 30, 40mm と4種類変えて行った結果である。(a)図にGと ϕ_r の関係、(b)図にhと ϕ_r の関係を示している。(a)図より、 γ が大きくなるにつれて ϕ_r の違いによるGへの影響が小さくなる傾向が現れた。また、 $\phi_r = 20 \sim 40\text{mm}$ では、各 γ に対するGの増加率がほぼ一定になっており、 $\gamma = 0.001$ ではGの値が約5倍程度変化していることが分かる。また、(b)図より、Gの傾向とは逆で、 γ が小さくなるにつれて ϕ_r の違いによるhへの影響が小さくなる傾向が現れた。また、 $\phi_r = 20 \sim 40\text{mm}$ では、Gと同様、hの増加率がほぼ一定になっており、 $\gamma = 0.5$ ではhの値が約2倍程度変化していることが分かる。このことより、 ϕ_r を変化させることにより、簡便にGおよびhを変化させることが可能であると考えられる。

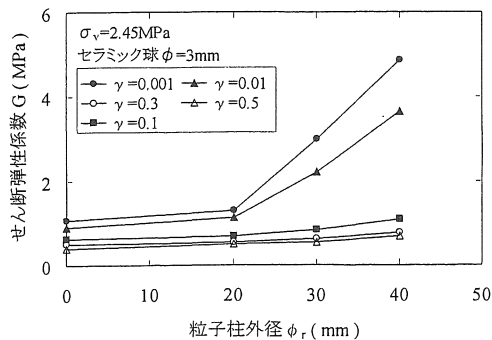


図-5(a) Gに及ぼす粒子柱外径 phi_rの影響

図-6は、 $\gamma = 1 \times 10^{-2}, 1 \times 10^{-1}, 3 \times 10^{-1}$ に対するGの拘束圧依存性について調べたものである。図は、 σ_v を1.47, 1.96, 2.45, 2.94MPaと4種類変化させ、 $\phi_r = 40\text{mm}$ と $\phi_r = 20\text{mm}$ に直径 $\phi = 3\text{mm}$ のセラミック球を充填した結果である。図より、 $\phi_r = 40\text{mm}$ (実線) については、 σ_v の増加に従いGは増加し粒子単体の結果と傾向的に一致している。一方、 $\phi_r = 20\text{mm}$ (破線) については、 $\phi_r = 40\text{mm}$ にくらべ拘束圧の影響が小さくなる傾向が現れた。これは、粒子柱外径調整用ゴムシートにより、粒状体への拘束圧が逃がされたためだと考えられる。

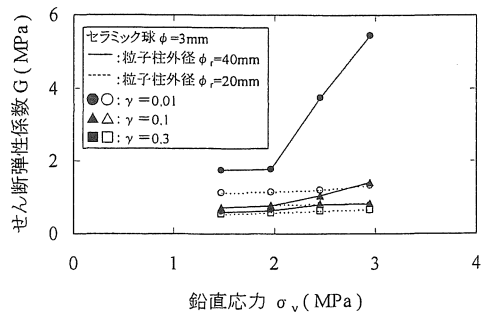


図-6 拘束圧依存性 (G ~ sigma_v 関係)

4. 大型振動台実験および解析的検討

4.1 実験概要

図-7に示すように、木造建物(4.55m x 2.73m x 2.94m)を6個の免震装置で支持する形式で振動台上にセットし、正弦波およびランダム波(水平1方向加振)で実験を行った。建物の絶対変位および建物と振動台との相対変位(装置のせん断変位)を測定するために天井と床部分に変位計を設置し、また、

入力加速度および応答加速度を測定するために振動台上 (α_B)、建物の床 (α_B) および天井の各箇所に加速度計を設置した。建物の重量は約 10ton ($\sigma_v \approx 2.57\text{MPa}$) で、載荷板を床の上に設置することにより調整した。実験は、中空装置と直径 $\phi = 0.5\text{mm}$ のセラミック球を $\phi_r = 20\text{mm}$ の条件で充填した中実装置の 2 ケースについて行った。

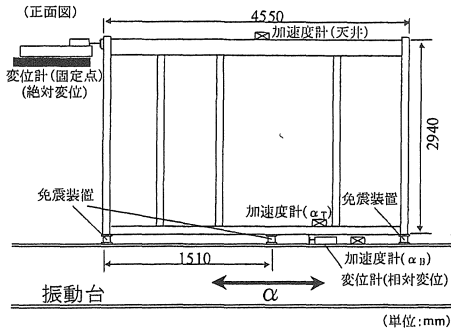


図-7 大型振動台実験の模式図

4.2 解析概要

土質材料や本研究の粒状体を用いた免震装置のように材料特性が非線形に変化する場合、この特性を取り入れた解析を行う必要がある。このため、繰り返しせん断試験から得られた装置の G 、 $h \sim \gamma$ 関係を式(1)に示す Hardin-Drnevich モデルでモデル化し、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応答解を求めた。

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

$$G_0 = G_k(\sigma_0)^m \quad \gamma_0 = \gamma_k(\sigma_0)^n \quad \dots \quad (1)$$

G_0 : 微小ひずみに対する G (拘束圧 σ_0 のべき乗に比例)

h_0 : 最大減衰定数

γ_r : 基準ひずみ ($G/G_0 = 1/2$ 時のひずみ、拘束圧 σ_0 のべき乗に比例)

4.3 結果と考察

図-9 は、固有周期実験 (図-8) で、初期変位を 20mm として行った減衰自由振動の変位~時間曲線から求めた固有周期 T_0 と式(2)から求めた固有周期 T_f の対応性を調べたものである。

$$T_f = \sqrt{\frac{nt_r \sigma_v}{Gg}} \quad \dots \quad (2)$$

- T_f : アイソレータ群のみの水平剛性に基づく周期 (sec)
- nt_r : 全ゴム厚 (m) σ_v : 鉛直応力 (Pa)
- g : 重力加速度 (m/sec^2)
- G : 中実; 繰り返しせん断試験から得られる $\gamma = 0.15$ の G
- 中空; $\gamma = 1$ の時の静的せん断弾性係数 (Pa)

式(2)に代入する値として、中空装置では G に $\gamma = 1$ の静的せん断弾性係数、 σ_v に鉛直荷重 P_v をゴム実質部分の断面積で除した値、中実装置では G に $\gamma = 0.15$ のせん断弾性係数 (実験より得られた T_0 より G を算出し、その値に対応する γ の平均値を使用)、 σ_v に P_v をゴムの外径を基に算出した断面積 (ゴム実質部分の断面積 + 粒状体充填部分の断面積) で除した値を使用した。図は、横軸に実験値 T_0 、縦軸に計算値 T_f をとって対応点をプロットしている。図より、中空装置および中実装置とも T_0 と T_f は良好に対応しており、アイソレータ群のみの水平剛性に基づく周期は式(2)から算出することが可能であると考えられる。

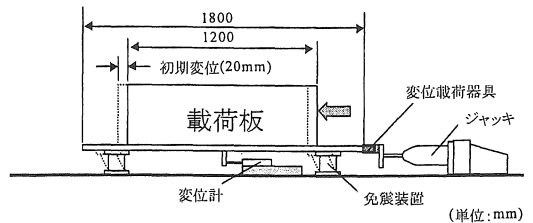


図-8 固有周期実験の模式図

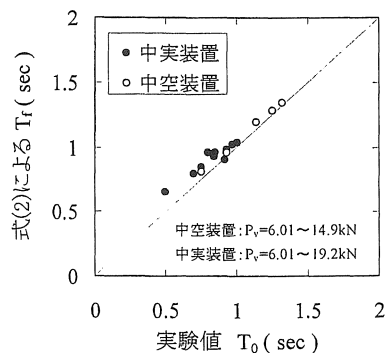


図-9 T_f と T_0 の対応性

図-10 は、粒状体充填の有無および ϕ_r の違いが固有周期 T_0 と鉛直荷重 P_v の関係に及ぼす影響について調べたものである。図は、固有周期実験 (図-8) の結果であり、中空装置を載荷板に固定し P_v を

5種類変化させて行った結果と $\phi_r=20\text{mm}$ と $\phi_r=40\text{mm}$ に直径 $\phi=0.5\text{mm}$ のセラミック球を充填した中実装置を載荷板に固定し P_v を5種類変化させて行った結果である。図より、中空装置では P_v の増加に従い T_0 が長くなっていることが分かる。これに対し、 $\phi_r=40\text{mm}$ の中実装置では P_v が9kN付近より軽い荷重については P_v の増加に従い T_0 が長くなっているが、 P_v が9kN付近より大きくなると T_0 が短くなる傾向が現れた。また、同じ実験条件で粒状体の粒径を変化させたときにも $P_v \sim T_0$ 関係に同じような傾向が現れた。これは、式(2)から読みとれるように T_0 に対する P_v の増加の影響より G の増加の影響が強く現れたためだと推測できる。次に、 $\phi_r=20\text{mm}$ では P_v の増加に伴い T_0 が長くなっていることが分かる。これは、粒子柱外径調整用ゴムシートにより粒状体への拘束圧が逃がされ拘束圧の変化による G への影響が小さくなったためだと考えられる(図-6)。また、 P_v が13kNより小さい範囲で $\phi_r=20\text{mm}$ の T_0 にくらべ $\phi_r=40\text{mm}$ の T_0 が長くなったのは、中間鋼板の間(積層するゴムシート部分)に粒状体が入り込んだためだと考えられる。

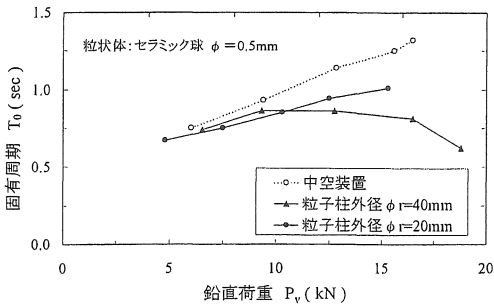


図-10 T_0 と P_v の関係

図-11は、入力振動数 f および入力加速度 α_B の違いが応答加速度 α_T および相対変位に及ぼす影響について調べたものである。図は、中実装置($\phi_r=20\text{mm}$, $\phi=0.5\text{mm}$)を建物に設置し、入力振動数一定で α_B を変化させ、入力振動数 f を7種変化させた結果である(入力波形:正弦波)。(a)図に、 α_T と α_B の関係を、(b)図に、振動台と構造物の相対変位と α_B の関係を示している。(a)図より、いずれの入力振動数 f においても α_T の値が α_B より低い値を示している。これは、入力振動数が建物の固有周期 $T_0(=1.04\text{sec})$ から離れているためだと考えられ

る。また、 α_B が $T_0(f_0=0.96\text{Hz})$ に近づくにつれて α_T が大きくなる傾向が見られた。(b)図より、 $\alpha_T \sim \alpha_B$ 関係と同様に $T_0(f_0=0.96\text{Hz})$ に近づくにつれて相対変位が大きくなる傾向が現れた。以上のことより、共振現象を起こさなければ α_B の大きさに関係なく高い免震効果が得られると推測される。

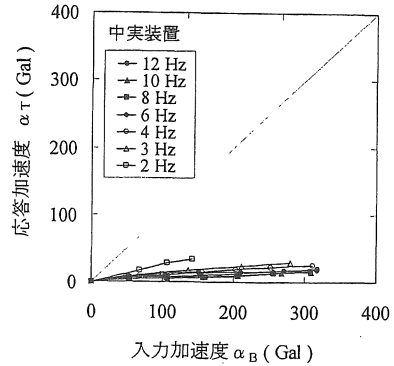


図-11(a) α_T と α_B の関係(正弦波)

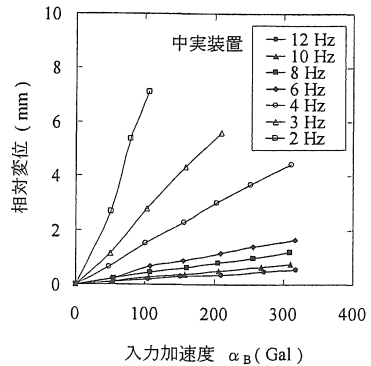


図-11(b) 相対変位と α_B の関係(正弦波)

図-12は、粒状体充填の有無が構造物の α_T および相対変位に及ぼす影響について調べたものである。図は、 $\alpha_B=25\text{Gal}$ 一定で実験を行った時の中空装置(O)と中実装置(●)の結果と計算から求めた中実装置(実線)、中空装置(破線)および従来型装置(中空装置の中空部分を空洞にしないもの、点線)の結果である(入力波形:正弦波)。(a)図に、 α_T を α_B で除した加速度比 $R_\alpha(=\alpha_T/\alpha_B)$ と入力した正弦波の入力周期 T の関係、(b)図に、相対変位と T の関係を示している。なお、中空装置および従来型装置の共振曲線は、線形弾性の振動応答解を用いて予測した。中実装置の計算に使用したパラメータは $G_0=1.38\text{MPa}$, $\gamma_r=2.98 \times 10^{-2}$, $h_0=0.39$,

中空装置は $G=540\text{kPa}$, $h=0.12$ 、従来型装置は $G=540\text{kPa}$, $h=0.06$ である (G : ゴムの静的せん断弾性係数、 h : 減衰自由振動の変位~時間曲線より算出)。図より、中実装置の実験値(●)と計算値(実線)を比較すると、両者の対応性は良く両結果の信頼性が確認できた。次に、中実装置(実線)と従来型装置(点線)の共振曲線のピークを比較すると、共振点の周期はほぼ同じ値を示しているのに対し、中実装置の R_a および相対変位の最大値は従来型装置にくらべて約35%まで低減されている。また、中実装置(実線)と中空装置(破線)の共振曲線のピークを比較すると、中実装置は従来型装置にくらべて R_a の最大値は約60%、相対変位の最大値は約40%まで低減されており、粒状体充填効果が現れていることが分かる。さらに、図中には、免震装置を設置した構造物に初期変位30mmを与えたときの減衰自由振動の時間~変位曲線から求めた固有周期 T_0 を示しているが、 T_0 付近で共振点が現れており、 T_0 より共振周期を推測することが可能であると考えられる。

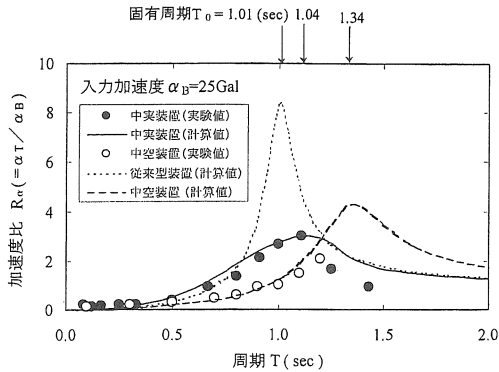


図-12(a) R_a と T の関係 (正弦波)

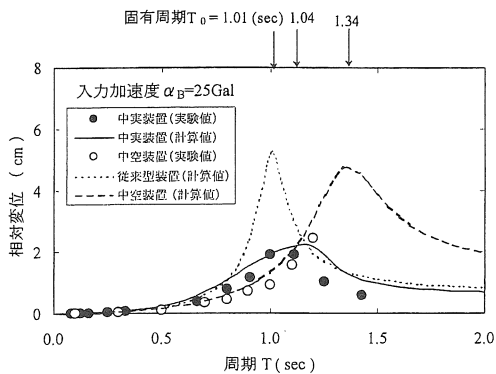


図-12(b) 相対変位と T の関係 (正弦波)

図-13は、建物に中実装置 ($\phi_r=20\text{mm}$, $\phi=0.5\text{mm}$) を設置し、ランダム波を入力したときの α_B と α_T の時刻歴波形を示している。なお、使用したランダム波は、一次卓越周期が0.32秒、卓越した周期帯は0.11~0.40秒の周期特性を持っている。図より、最大応答加速度 $\alpha_{T\text{max}}$ は最大入力加速度値 $\alpha_{B\text{max}}$ の約1/4程度に軽減され免震効果が発揮されたことが分かる。これは、 α_B の卓越周期に対して、構造物の T_0 が離れているためだと考えられる。

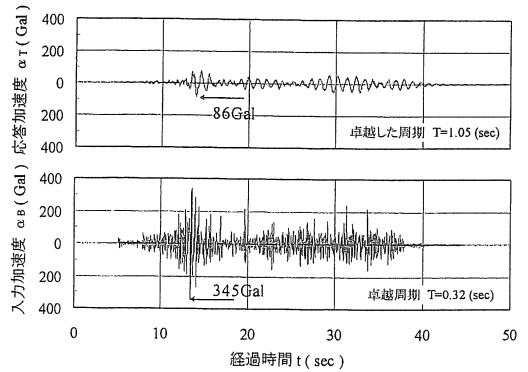


図-13 α_B と α_T の関係
(中実装置: $\phi_r=20\text{mm}$, $\phi=0.5\text{mm}$)

図-14は、図-13に示す振動波形の入力レベルを変化させた時の $\alpha_{B\text{max}}$ と $\alpha_{T\text{max}}$ の関係を示している。図より、中実装置 ($\phi_r=20\text{mm}$, $\phi=0.5\text{mm}$) および中空装置とも $\alpha_{B\text{max}}$ に対し $\alpha_{T\text{max}}$ が低い値を示しており免震効果が発揮されたことが分かる。中実装置の $\alpha_{T\text{max}}$ にくらべ中空装置の $\alpha_{T\text{max}}$ が低い値を示したのは、卓越周期に対して中空装置の T_0 のほうが離れているからだと考えられる。また、中空装置では、入力レベルの大きさに関係なく α_B に対する α_T の低減の割合がほぼ一定の値を示すのに対し、中実装置では、入力レベルが上がるにつれ α_T の低減が大きく現れる傾向があり、大きな地震力が加わったときにより効果を発揮できると思われる。このような傾向が現れたのは、中実装置の材料特性が非線形に変化するためだと考えられる。ランダム波実験の結果より、 T_0 が長い中空装置のほうが中実装置より $\alpha_{T\text{max}}$ の値が小さく、より免震効果が得られた。この事より、免震効果を得るには減衰効果を取り入れるだけでなく、構造物を長周期化する必要性があると考えられる。

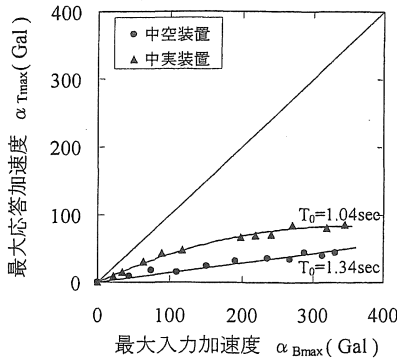


図-14 α_{Tmax} と α_{Bmax} の関係 (ランダム波)

図-15 は、 $R_a \sim T$ 関係に及ぼす α_B の影響について調べたものである。図は、 $\sigma_v = 2.45\text{MPa}$ 一定、 $\phi_r = 40\text{mm}$ に直径 $\phi = 3\text{mm}$ のセラミック球を充填した中実装置の G 、 $h \sim \gamma$ 関係をモデル化し、 $\alpha_B = 20, 40, 60\text{Gal}$ で正弦波を入力した計算結果を R_a と T の関係で示している。図より、 $\alpha_B = 20, 40, 60\text{Gal}$ の時に、それぞれ $0.75, 0.95, 1.04\text{sec}$ 付近で R_a が大きく増加しており共振を示している。その時の R_a の値は、それぞれ $2.48, 2.28, 2.2$ となっている。この R_a が最大となる共振周期は α_B の増加と共に長くなり、またその時の R_a は低下する傾向が分かる。これは、装置の材料特性が非線形に変化するためだと考えられる。

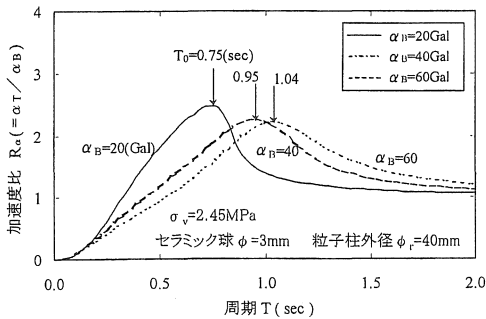


図-15 $R_a \sim T$ 関係に及ぼす α_B の影響

5. トリガ機構実験

5.1 トリガ機構の概要

粒状体を用いた免震装置を構造物に設置した場合、風など地震以外の外力が作用した時に構造物が揺れる可能性があり、ある一定以上の外力が作用するま

で装置が変形しないようにする為のトリガ機構を設ける必要がある。本研究で用いたトリガ機構は、図-16に示すように、地震力以外の外力に対しせん断部材の剛性によって揺れを防ぐものであり、上部ホルダーの外径調節用カラーに固定したせん断部材を挿入し下部ホルダーに差し込んだ構造で建物と基礎の間に設置するものである。せん断部材には直径 $\phi = 6, 8, 10\text{mm}$ のベークライト (せん断強さ: 69N/mm^2 、伸び: 2%) を使用した。本研究では、トリガ機構が働く範囲を構造物に被害のない震度4の地震 (80Gal) までと設定し、この地震力に対応する風荷重は、構造物の側面積と風圧の関係より風速 33.3m/sec である (名古屋での再現期間50年の風速 30.2m/sec)。なお、この地震力に対応するせん断部材の直径は $\phi = 6\text{mm}$ である。

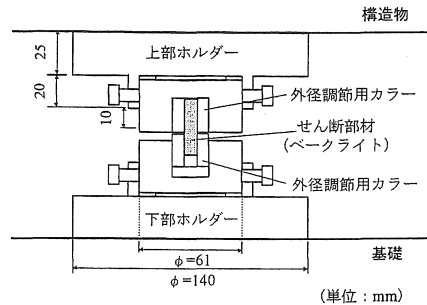


図-16 トリガ機構の概略

5.2 実験概要

木造建物を6個の免震装置で支持しトリガ機構を建物と基礎の間に4個を設置した状態で実験を行った (正弦波、入力振動数 $f = 4\text{Hz}$)。

5.3 結果と考察

図-17は、直径 $\phi = 6\text{mm}$ (せん断強さから算出した機能が働く範囲: 80Gal) のベークライトをせん断部材としたときの α_B と α_T の時刻歴波形を示している。図より、A点までは、建物と基礎が固定された状態であることがわかる。 α_T が 43Gal まで上昇したA点でせん断部材が完全に保持力を失い、A点以降では免震装置による免震効果が得られたことが分かる。

図-18は、せん断部材のせん断強さから算出したトリガ機能が働く範囲と実験で実際にトリガ機能が働いた範囲の対応性について調べたものであり、せん断部材の直径を $\phi = 6, 8, 10\text{mm}$ と3種類変えて行った結果である。図は、トリガ機構が働いた実験

値の α_T を横軸に、計算値の α_T を縦軸にとって対応点をプロットしている。図より、計算値にくらべ実験値はせん断部材の直径 $\phi = 6, 8, 10\text{mm}$ のそれぞれ 55%, 45%, 73% (平均: 約 60%) の値でせん断部材の保持力が失われていることが分かる。計算値にくらべ実験値が小さな値を示したのは、4 個設置したトリガ機構にそれぞれ均一なせん断力(地震力)が加わらなかったためだと考えられる。また、せん断部材の直径の違いにより計算値と実験値の関係の割合が異なるのは、設置状況の違いによるためだと考えられる。本研究で使用したトリガ機構は、せん断部材の材質、直径などを変えることによりトリガ機能が働く範囲を簡便に変えられるが、せん断部材の剛性から算出した計算値に対し 0.6 の補正値を乗じた値がトリガ機能の働く範囲になる結果が得られた。

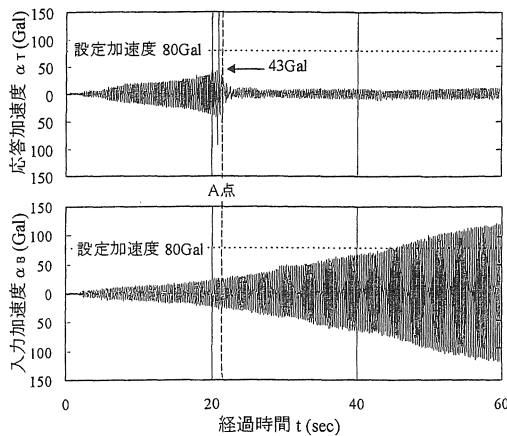


図-17 α_B と α_T の関係 (トリガ機構設置時)

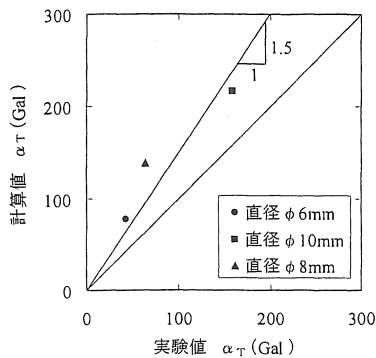


図-18 設計値と実験値の対応性 (トリガ機構)

6. まとめ

粒状体を用いた免震装置について、本研究で得られた結果を要約すると以下のようになる。

- (1) 粒状体を充填することにより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が得られ、粒状体を充填しないときに比べ約 2 倍のエネルギー吸収効果が得られた。また、粒状体の粒径、充填量などを変化させれば簡便に動的変形特性を変化させることが可能である。
- (2) 大型振動台実験の結果、粒状体を用いた免震装置は、加速度共振線のピークの値が従来型装置の約 35%、中空装置の約 60% の低減が得られ、建物の固有周期は約 1 秒程度が得られた。しかし、免震効果を得るには構造物をさらに長周期化する必要があると考えられる。
- (3) トリガ機構実験の結果、トリガ機能が働くことが確認され、せん断部材の剛性から算出した計算値に対し 0.6 の補正値を乗じた値がトリガ機能の働く範囲になる結果が得られた。
- (4) 解析結果より、免震実験の結果と計算結果の対応性は良く両結果の信頼性が確認できた。このことより、装置を設置した場合の構造物の振動挙動を推測することが可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 林・奥村・成田・大根：粒状体を用いた免震装置の振動特性に関する実験, 平成 10 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp.329~330, 1999.3
- 2) 林・奥村・成田・大根：粒状体を用いた免震装置の振動特性に関する実験 (その 2), 平成 11 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp.299~300, 2000.3
- 3) 水野雄介：新たに開発した免震装置の特性に関する実験的研究, 愛知工業大学修士論文, 1998.
- 4) 大橋裕二：地震と免震, 朝倉書店, 1996.
- 5) 小坪清真：土木振動学, 森北出版, 1973.
- 6) 日本免震構造協会：免震構造入門, オーム社, 1995.
- 7) 大崎順彦監修, 清水建設免震開発グループ：わかりやすい免震建築, 理工図書, 1987.

(受理 平成12年3月18日)