名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻 博士課程前期課程2年 福和研究室 江原 夏季

# 1. 序論

工学教育においては、机上の学習だけでは興味を持ちづらい、実現象と結びつかず知識が身につかないといった課題がある。その解決策として、建築構造力学の分野では、 身の周りにある材料を学習の補助教材として用いた模型 教材<sup>1),2)</sup>が開発されており、模型教材の利用後に行ったア ンケートの結果からその効果が報告されている

耐震工学の分野においても,構造物や地盤の振動・波動 現象は時間や振動数の概念が伴う複雑な現象であり,やは り同様の課題を抱えている.地震多発国である日本で建築 分野を学ぶ学生にとって,構造系専攻でなくとも振動・波 動現象の本質を理解することは必要であり,建築に関わる 技術者・実務者もまた然りである.

このような背景があり、振動論教育の補助教材として 「手回しぶるる」<sup>3)</sup>を開発した.これは、手動の振動台と 複数の鉄製建物模型がセットとなっている可搬型の教材 であり、好評のため国内外で100台以上が流通した.他に も、振動実験教材が多数開発され<sup>4),5),6</sup>、よりわかりやす く振動現象を教えるための試行錯誤がなされてきた.既往 の振動実験教材も十分に学習効果が見込めるものである が、振動現象の見やすさの観点からさらなる改善の必要性 があった.そのため、本論文では誰もが手に入れられる材 料で構成され、波動の伝播も含めて立体的なせん断振動を 表現可能であり、かつ既往の模型よりも多様な建物・地盤 の振動性状を表せる模型を新たに開発した.

本論文では実験と解析の両面からこの新しい模型の基本的な復元力特性や動特性について検討する.

#### 2. せん断振動模型概要

図1に、開発したせん断振動模型のしくみを示す. 模型 は四隅に短い円柱状の永久磁石を接着した板をボールベ アリングを介して積み上げることで構成される. 図1(a)は 板の両面に磁石を配置した Type A の3 層模型, 図1(b)は 片面に磁石を配置した Type B の2 層模型であり, 図1(c) は復元力が生じるしくみを示している. 図1(c)に示す通り, ベアリングが鉛直力を支持し,層間変位 δ が生じると磁石 間に働く磁気力の水平分力 f が生じる. 層間に存在する磁



と Type B のように磁石の貼り付け方を変える,またはベ アリングの直径を変える),又は接着する磁石の数を変え ることで層間の剛性を調整することができる.さらに,板 の積み上げる数を増やすことで模型の高さを容易に変え ることが可能である.また,復元力がばねなどの機械的な 部品ではなく磁力によって生じるため,繰り返し実験を行 っても劣化による剛性の低下が生じない利点がある.

## 3. 単層模型の静的復元力特性特性

層間変位に対する復元力の特性は、ベアリングの材質や 直径,磁石の配置方法(Type A と Type B)によって変化 する.本章では、有限要素法を用いた磁場解析と静的せん 断載荷実験により、模型の各パラメータを変えたときの単 層模型の静的復元力特性への影響を明らかにする

# 3.1 有限要素磁場解析と静的せん断載荷実験

図2に、磁場解析に用いる有限要素モデルを示す.(a)は Type A,(b)はType Bのベアリングを介した上下の1組の 磁石(以下,「1組の磁石」と称する)を示している.解析 にはムラタソフトウェア株式会社の有限要素法による磁 場解析プログラム「Femtet ®」<sup>70</sup>を用いた.磁場解析にあ たって磁石とベアリングのみが空間に固定されている状 態をモデル化した.実験等で実際に用いる直径18mm,厚 み4.5mmの異方性フェライト磁石を対象にし、モデルの メッシュのサイズは約2mmとした.磁石の強さを表す残 留磁束密度は400mTとした.層間変位δをパラメータと して上側の磁石に生じる磁気力の水平成分fの総和Fを算



# 出し,復元力特性を評価した.

図 3(a)に、単層模型のせん断載荷実験の概要を示す.模 型の下側の板を机上に固定し、上側の板を小型振動台のの 側面を用いて横方向に変位速度1mm/sで準静的に単調載 荷した. その際, 振動台と板の間に設置した小型ロードセ ルにより載荷せん断力を,振動台の側面に設置した接触型 変位計により模型の層間変位を,それぞれサンプリング周 波数 200 Hz で計測した. 図 3(b)に, 試験体の一例の写真 を示す. 試験に用いた板は 100×100 mm, 厚み6 mm の木 板とし隣り合う磁石の中心間距離はL=70mmとした.

# 3.2 隣り合う磁石の距離が復元力特性に与える影響

本模型は板の四隅に磁石を設置しているため, 隣り合う 磁石どうしが互いの磁界の形を変形させ,復元力特性に影 響を与える可能性がある.準備として,隣り合う磁石の中 心間距離 L が復元力特性に及ぼす影響について解析によ り検討を行う.

図4に,隣り合う磁石の中心間距離Lをパラメータと した復元力特性の解析結果を示す.中心間距離 L=20 mm, 50 mm, 70 mm, ∞の4 組の磁石をモデル化した. ただし, L→∞の場合については、1組の磁石のみをモデル化す ることで隣の磁石組との相互作用がない状態を表現し、こ れによる復元力を4倍した値を用いた.図5より,磁石の 中心間距離 Lの増大とともに  $L \rightarrow \infty$ の結果に漸近して いることがわかる.特に, L=70 mm の結果は $L \rightarrow \infty$  の 結果とほぼ一致している.以降の検討では、すべて隣り合 う磁石の中心間距離を L=70 mm として、磁場解析を行う 際には、一組の磁石による復元力の計算値を4倍して考え ることとする.

# 3.3 ベアリングの直径と材質、磁石の配置方法の影響

図5に, Type A の試験体について, ベアリングの直径による静的復元力 特性の変化を示す. ベアリングの直 径が大きいほど初期剛性が小さいこ とがわかる.これは、ベアリングの 直径とともに上下の磁石間距離が増 大し, 生じる磁気力が小さくなるた めである.また,復元力特性は非線

層間変位 15mm 程度までほぼ線形の復元力特性が再現可 能なことがわかる.図6に,TypeBの試験体について,ベ アリングの直径による静的復元力特性の変化を示す.同じ 直径のベアリングを用いた Type A の結果に比べ, Type B の方が初期剛性が小さいことがわかる.木板の厚み分だけ ベアリングを介した磁石間の距離が増加することや,上側 の板に設置された磁石の数が減ることにより(Type A で は板を挟んで2枚の磁石が存在するのに対し、Type B で は1枚のみである),生じる磁気力の総和が小さくなるた めである.

図7と図8に、TypeAの試験体について、ベアリング 材料による静的復元力特性の変化を示す.図7は直径 D= 10 mmの鉄球と木球の比較,図8はD=6 mmの鉄球とプ ラスチック球の比較である.木球やプラスチック球よりも 鉄球を用いた方が靭性のある復元力特性を示している.こ れは、木球やプラスチック球を用いた場合には上下の磁石 どうしに引力が生じるのみであるのに対し, 強磁性体であ る鉄球を用いた場合には,鉄球が磁化することによって鉄 球と磁石との間にも引力を生じるためである.

以上の結果より、ベアリングの材質や直径、磁石の配置 方法(Type A と Type B)による層間の復元力特性の違い が明らかになった.建物や地盤の模型を構築した際にも剛 性を調整することができるため,教育用振動模型として活 用しやすい.なお、ベアリングとしては、大きな靭性能が あり再現可能な変形が大きくなること,崩壊した際に磁石 に吸着して模型部品がばらばらになりにくく扱いやすい こと、容易に入手できることから、鉄球が優れていると考 えている.



また、図 5~8 より実験結果と解析結果がよく一致して いることが確認された.

# 4. 単層模型の動特性

# 4.1 模型の振幅依存性

本模型は振動論の教材としての使用を念頭に置いてい るため、固有周期と減衰定数に代表される動特性の把握が 重要である.本章では、単層模型の動特性について、自由 振動実験により検討する.

図 3(b)に示す寸法の TypeA の単層模型について検証す る. 上側の板におもりを固定し、ベアリングより上の質量 を 3.06 kg とした. 図 9(a)に, 自由振動実験に用いた模型 と装置を示す. 下側の板は机上に固定し, 上側の板にくく りつけた紐により層間変位を1 cm 程度あたえ、紐を切る ことにより自由振動を生じさせた.その際,上側の板に設 置した加速度計により計測を行った.

図 9 (b)に、計測によって得られた加速度波形を 2 階積 分し、0.5 Hz 以上の高域通過フィルターを施した変位波形 を示す. また, 図9(c)に3 波区間の平均変位振幅に対す る平均減衰定数を,図9(d)に平均変位振幅に対する固有 周期から算出した平均剛性率を示す.また同一模型に対す る静的載荷実験の結果より求めた層間変位に対する割線 剛性率を図9(d)に重ねて示している.

図9(c)より,変位振幅約0.2 cm 以上では減衰定数は概ね一定であり, 実際の建物・地盤とよく似た性質を 示すのに対して,変位振幅約 0.2 cm 以下では振幅が減少するにつれて減 衰定数が増大していることがわかる. 小振幅になるとベアリングの転がり 抵抗等が相対的に大きくなるものと 考えられる.減衰力の発生機構とし ては,模型の空気抵抗と鉄球に生じ る誘導起電力が考えられる.

### 4.2 模型の質量と材質の違いによる影響

ベアリングの転がり抵抗が減衰力とし て働くため、ベアリングが接する面の柔 らかさで減衰力が調整でき、 ベアリング より上の質量によって減衰力は変化する と考えられる。したがって, 振動台実験 よりその影響の検討をする。

ホワイトノイズ加振実験と調和加振実 験を単層模型の応答変位が線形範囲内に 収まるように,応答変位の期待値が



(a) 実験・計測体制

1~15mm になるように実施した.

図 10(a)に振動台実験に用いた模型と装置を示す。単層 模型の頂部と振動台上に加速度計を設置して加振を行い, ホワイトノイズ加振ではベアリングの上下の伝達関数を, 調和加振ではベアリング上下の履歴ループを算出した. 伝 達関数は一自由度系の理論伝達関数に最適化することで 減衰定数を推定し,履歴ループからは1周期間に消費され たエネルギーとひずみエネルギーとの比より等価減衰定 数を算出する.

図 10(b)に、ベアリングより上の質量に対する減衰定数 の変化を示す.図3(b)に示す寸法のTypeAの単層模型に 対して, ベアリングより上の質量を 1.13 kg, 2.11 kg, 3.06 kg, 4.01 kg に変化させたときについて検証した.加振実験 により2%程度の差があるが、質量の増大とともに減衰定 数が増大していることがわかる. また, 図 10(c)にベアリ ングが接する材料による減衰定数の変化を示す.図3(b)に 示す寸法の Type A と Type B の単層模型について検証し た.これらはベアリングの接する材料がそれぞれ磁石・木・



ベアリングより上の質量は全て 3.06 kg とした. 木板を用 いた Type A, アクリル板を用いた Type B, 木板を用いた Type B の試験体の順に減衰定数が増大しており. ベアリ ングに接する材料が柔らかいほど減衰定数が大きいこと がわかる.

実際に本模型を利用するときは 5~10mm 程度の振幅で 利用することが想定され,転がり抵抗の影響は相対的に小 さくなるが、小振幅範囲の振動台実験の結果より、 ベアリ ングに接する材料を変えることで模型の減衰定数を調整 できることがわかった.また、本模型は複数の板とベアリ ングを積み上げることで高層建物の表現が可能であるが, 層数とともにベアリングに作用する鉛直方向の力が大き くなるため、高減衰の模型になる可能性が考えられる.

# 5. 多層模型の利用

本模型はばね等の機械的な要素により復元力が生じる 模型と比較して剛性が小さく、1 cm 程度の層間変位まで 線形性を保つ模型を実現させることが可能である.そのた め,多層模型を構築したとき、目視でせん断波の伝播を確 認することが可能である.これは、本模型の大きな特徴の 一つである.本章では、多層模型を加振したときのせん断 波の伝播についてスナップ写真で確認すると共に加速度 計測により伝播特性を検討する.

図 11(a)に,加振実験に用いた多層模型を示す.180×180 mm, 厚み7mmの木板を用いた磁石の中心間距離

L = 150mmの Type Aの 19 層模型である. 直径 10 mmの 鉄球をベアリングとして用いた. 模型全体の高さは 534 mm, この模型に対して基礎を手動でスライドさせること によるステップ加振を行った.図 11(a)に示す通り、模型 内の4か所に設置した加速度計により計測し、同時に全 体の動画撮影を行った.

図 11(b)に加速度波形を、図(c)にスナップ写真を示 す. なお、計測された加速度波形に対して 0.1 Hz~ 10 Hz の帯域フィルターを施した.

図 11(b)の最大加速度(図中の三角印)の発生時刻を 元に層間変位が模型内を伝播する速度を算出すると( 高振動数の成分が励起されているため正側ピークが読 み取りにくいため負側のピークを用いた.), 83.3 cm/s となる.この値をもとに、求めた単層の剛性率が 246.4 N/m である. 推算された層剛性は, 図 9(d) に示 される剛性率の変動範囲内にほぼ収まっている. 当該

実験に用いた試験体は、本章での試験体とは寸法が異なる ものの,同じ厚さの木板と同じ直径の鉄球を用いたもので あり, 層剛性は同じである. このことから, 多層構造の模 型を伝播するせん断波の速度が,層ごとの動特性と良い対 応を示した.

#### 6. まとめ

本論文では、永久磁石とボールベアリング、および板に より構成される新しい振動論教育用のせん断振動模型を 開発し,この模型の基本的な復元力特性と振動特性につい て,実験と解析により検討を行った.本模型は安価で単純 な構成であるうえ、剛性・高さ・減衰定数の調整が容易に 可能である.加えて,複数回利用しても劣化による剛性低 下等が起こらない. さらに, 剛性が非常に小さいため机上 で実験可能なサイズで建物と同程度の固有周期と大きい 層間変位の再現が可能である.そのため,波動伝播が目視 可能な縮小模型を作成すること可能である.これより既往 の振動模型よりも多様な実験が可能な模型を実現できた. 参考文献

- 52 m 石川孝重:動機付け教育における視見・14-35-14-55 建築教育研究論文報告集,pp.31-36,2009 山岸邦彰:建築系初年次前期教育における体感学習の試み,工学教育 研究講演会講演論文集,pp.412-413,2016 福和伸夫,:建物耐震化促進のための振動実験教材の開発,地域安全学 ムンサ催 No.7, pp.23-34,2005 1)
- 2)
- 3)
- 4)
- 会論文集,No.7, pp.23-34, 2005 田川浩:模型教材による建築骨組挙動の理解促進,工学教育研究講演 会講演論文集, pp.118-119, 2014 辻原治,中谷雄一,山村猛:揺れに対する感覚的理解を支援する卓上 振動実験装置の開発,土木学会論文集 AJ, pp.1052-1060, 2014 社共納、工共生、地理学校社会論文集 AJ, pp.1052-1060, 2014 5)





図11 模型内のせん断波伝播を確認するためのステップ加振実験