リアルタイムオンライン応答試験を用いた積層ゴムの地震応答特性に関する研究

長周期地震動による繰り返し依存性を対象とした検討

STUDY ON SEISMIC RESPONSE CHARACTERISTICS OF LAMINATED RUBBER BEARINGS
USING REAL-TIME ON-LINE TEST

Examination for the repeated deformation dependency by the long-period ground motion

阿久戸 信宏^{*1}, 秦 一平^{*2}, 溝口 晴紀^{*3}, 山上 哲哉^{*4}Nobuhiro AKUTO, Ippei HATA, Harunori MIZOGUCHI
and Tetsuya YAMAGAMI

This paper examines the method of analysis that considered repeated deformation dependence of the laminated rubber bearings by the method of real time on-line test. The laminated rubber bearings have hysteresis restoring force characteristics including various materials nonlinearities. Therefore, this study compared the suggested response analysis methods with the real-time on-line test targeting high-damping rubber bearing and lead rubber bearing. As a result, the differences between the response analysis methods and the real-time on-line test became clear. In addition, the horizontal performance that decrease due to the repeated deformation dependence are compared and reported.

Keywords : Real-time on-line test, Laminated rubber bearings, Long-period ground motion, Repeated deformation dependency, Seismic response characteristics

リアルタイムオンライン応答試験, 積層ゴム, 長周期地震動, 繰り返し依存性, 地震応答特性

1. はじめに

1.1 研究背景

現在, 発生が懸念されている南海トラフ沿いの巨大地震は, 長周期・長時間継続する地震動(以下, 「長周期地震動」)である。そのため, 免震建築物が長周期地震動の作用を受けて応答する場合, 共振現象や長時間の繰り返し変形により, 設置される免震部材のせん断方向の復元力特性(以下, 「水平性能」)に影響を与え, 建築物が被害を受ける可能性は非常に高い。そこで, 平成28年に国土交通省より, 「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について」¹⁾のパブリックコメントがまとめられた。これにより, 長周期地震動による免震部材の繰り返し依存性を考慮した応答評価手法が必要となった。

この応答評価手法は大きく2種類に分類され「詳細応答評価手法(以下, 「詳細法」)」と「簡略応答評価手法(以下, 「簡略法」)」が存在する。詳細法は時刻歴応答解析中の各ステップにおいて, 免震部材の水平性能を時々刻々と変動させることで繰り返し依存性を考慮する評価手法である。これには, 熱・力学的連成挙動を考慮した検討^{例えば2)}にまで至っている。一方で, 簡略法は時刻歴応答解析を2回行う。手順としては, まず, 繰り返し依存性未考慮の時刻歴応答解析結果から単位体積当たりの累積吸収エネルギー量を求め, 水平

性能の低下率を評価する。そして, 評価した低下率より水平性能を決定し再度時刻歴応答解析を行うことで免震部材の繰り返し依存性を考慮する評価手法である。これらの評価手法および免震部材の基本特性については, 実験および数値解析によって検討された資料³⁾がまとめられている。簡略法に用いている評価式は, 各免震部材を正弦波加振による繰り返し試験によって水平性能の低下率を定式化したものである。しかし, この評価手法は時々刻々と変化する水平性能による応答を明確に把握することはできない。また, 詳細法を用いた評価手法においても, その評価方法やモデル化の妥当性について検証するためには, 実応答との比較が必要であると考えられる。

さらに, いずれの評価手法においても, 復元力特性を数学的にモデル化した質点系モデルを用いることが一般的である。しかし, 本来の免震部材の応答はゴムの非線形特性や各種依存性が影響し合うため非常に複雑であり, 数値解析における復元力特性のモデル化および評価手法の妥当性は非常に重要なものである。そのため, 評価手法および解析モデルの妥当性を把握するためには実応答との比較・検討が必要である。また, 地震動による不規則な応答を受ける中で, 部材の応答および水平性能の変動がどのように影響するのかを把握することは重要であると考えられる。本論文では, 地震応答時の非線形特性を総称して地震応答特性と呼称する。

^{*1} 日本大学理工学部建築学科 助手・修士(工学)

Research Assist., Dept. of Architecture, College of Science and Technology, Nihon Univ., M.Eng.

^{*2} 日本大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)

Prof., Dept. of Architecture, College of Science and Technology, Nihon Univ., Dr.Eng.

^{*3} 三井住友建設 修士(工学)

Sumitomo Mitsui Construction, M.Eng.

^{*4} 石本建築事務所 修士(工学)

Ishimoto Architectural & Engineering Firm, Inc., M.Eng.

構造物の実応答を把握するためには実大規模で行う振動台実験が挙げられる。実応答を把握することにおいては有効な手段であるが、施設の規模やコストの面から制約を受けることも少なくない。

そこで、免震部材のような速度依存性および複雑な履歴特性を有する部材の応答を解明する手法としてリアルタイムオンライン応答試験という試験手法が存在する。国内では中島ら⁴⁾や楊ら⁵⁾による研究が挙げられ、サブストラクチャ要素を考慮するまで展開されている。この試験手法により、対象部材をモデル化することなく地震応答特性を考慮した時刻歴応答解析が可能となった。また、構造物内の特定の部材のみを試験対象として評価し、他の構造部分は数値解析上で考慮するため、実大規模で行う振動台実験のような労力やコストを削減することができる。リアルタイムオンライン応答試験を用いた研究は他にも報告されており、その有効性が示されている⁶⁾⁷⁾。しかし、試験手法が確立されており、実応答を簡便に再現・評価できる有効な手段であるにも関わらず、実験施設の設備や試験システムの有無によって、未だに研究数が少ないのも現状である。

このような現状を踏まえて本研究では、リアルタイムオンライン応答試験を用いた長周期地震動に対する免震部材の繰り返し依存性について検討し、単純な要素試験では得ることができない地震応答特性を把握する。また、応答評価手法と比較・検討することで、実応答との相違点を示すことは重要であると考えられる。

1.2 研究目的

本研究では、高減衰ゴム系積層ゴム（以下、「HDR」）と鉛プラグ挿入型積層ゴム（以下、「LRB」）の地震応答特性の明確化および長周期地震動の入力による各種積層ゴムの地震応答下における繰り返し依存性について把握することを目的とする。そして、繰り返し依存性を考慮した数値解析結果と実応答との水平性能の低下や時刻歴応答の相違点を明らかにする。なお、水平性能の低下とは HDR の場合、等価剛性・等価粘性減衰定数・降伏荷重特性値の低下を示し、LRB の場合、降伏荷重の低下を指す。

そこで、部材の複雑な非線形特性を時刻歴応答解析に反映可能なリアルタイムオンライン応答試験（以下、「本試験」）システムを用いる。本研究では本試験結果をモデルの実応答と位置付ける。本試験によって、実応答の忠実な再現に複雑なモデル化が要求される積層ゴムの応答を得ることで、実用的に用いられる応答評価手法と比較を行い水平性能や応答結果の相違点を示す。なお、本研究では参考文献 2) に代表されるような継続時間における温度変化は考慮せず、エネルギー量に対して水平性能を低下させる準詳細法を詳細法による精算解と位置付ける。

以上の研究目的を遂行するために、3 種類の積層ゴムを用いて試験を行う。まず、天然ゴム系積層ゴム（以下、「NRB」）を用いた本試験結果と、NRB の復元力特性をリニア型にモデル化した際の数値解析結果を比較し本試験システムの有効性を確認する。ここでは、NRB が比較的弾性応答を示すことから、数値解析結果と比較することで本試験結果の再現性と信頼性について示す。次に、HDR と LRB を用いた本試験結果より、各種部材の地震応答特性について考察する。ここでは、数値解析結果との相違点について示しその影響因子について考察する。最後に、HDR と LRB を用いて長周期地震動入力時の繰り返し依存性について示し、地震応答下における繰り返し依存性について把握し評価方法の妥当性について考察する。

2. リアルタイムオンライン応答試験システム

2.1 システム概要

本試験システムは、数学的に履歴則のモデル化が困難である複雑な部材の要素（本研究では復元力特性）を部材試験により取得し、数値解析を行う演算用コンピュータにオンラインでフィードバックする操作を地震波継続時間だけ繰り返し行い、部材試験と数値解析を混合して同時並行で進めるものである（Fig.1 参照）。

本試験システムは以下に後述する 5 つで構成されている。「①：動的載荷可能な油圧アクチュエータと試験体」、「②：目標載荷量・復元力をアナログ値・デジタル値に変換する D/A, A/D 変換器」、「③：油圧アクチュエータを制御し、復元力を計測する制御装置」、「④：試験全体の操作を行う操作用コンピュータ」、「⑤：時刻歴応答解析を行い、目標載荷量を算出する演算用コンピュータ」を用いる。

本試験の流れとしては、まず、演算用コンピュータ内で時刻歴応答解析を行い、第 1 ステップの応答変位（目標変位）を算出する。次に、算出した応答変位（目標変位）に到達するまで油圧アクチュエータを用いて試験体を加力する。そして、応答変位（目標変位）に到達した時の復元力および応答値（計測荷重・計測変位）を計測する。計測された復元力を演算用コンピュータにフィードバックし、その復元力と前ステップまでの応答値の関係から第 2 ステップの時刻歴応答解析を行う。再度算出された応答変位（目標変位）に到達するまで試験体を加力する。この一連のフローを地震波継続時間分繰り返し行い、時刻歴応答解析の積分刻み時間間隔 10[msec]でリアルタイムに制御をする。

2.2 数値積分法

本試験システムの演算用コンピュータ内で行う数値積分法は、衝撃加速度法（Newmark の β 法 $\beta = 0$ ）を用いる。その時、時刻歴応答解析に用いる応答変位は解の安定のため、計測変位ではなく、目標変位を用いることとする。なお、衝撃加速度法は 2 ステップ前までの応答変位を必要とするため、第 1 ステップは線形加速度法（Newmark の β 法 $\beta = 1/6$ ）を用いることとする。その時の 1 次剛性は各種部材の復元力特性をモデル化して算出された 1 次剛性の値を用いる。また、本試験システム内には、既往の論文に示されるような実験誤差補正方法⁸⁾のアルゴリズムは導入していない。

Fig.1 Flow diagram of real-time on-line test

3. 試験計画概要

試験のセットアップ図を Fig.2 に示す. Table1 に使用する積層ゴムの縮小試験体諸元を示す. 各種試験体はそれぞれ一基ずつ用いる. なお, NRB の天然ゴム材料はせん断弾性率 $0.392[\text{N}/\text{mm}^2]$, HDR はせん断弾性率 $0.620[\text{N}/\text{mm}^2]$ の縮小試験体を用いる. また, LRB はせん断弾性率 $0.385[\text{N}/\text{mm}^2]$ の天然ゴム材料を用い, 中心部に鉛プラグを挿入したシングルプラグとする.

油圧アクチュエータは動的载荷が可能な性能 (最大加力: $\pm 400[\text{kN}]$, 最大ストローク: $\pm 200[\text{mm}]$, 最大速度: $1.0[\text{m/s}]$) を有したものを 3 台使用する. この油圧アクチュエータの周波数範囲は D.C, $0.01[\text{Hz}] \sim 20[\text{Hz}]$ であり変位の精度保証範囲はフルスケール ($200[\text{mm}]$) に対して $\pm 0.5[\%]$ 以内 ($1.0[\text{mm}]$ 以内) となっている. 試験時には, 2 台の油圧アクチュエータと载荷梁を用いて荷重制御により試験体に面圧 ($15[\text{N}/\text{mm}^2]$) を負荷し, 1 台の油圧アクチュエータを用いて変位制御により水平加振を行う.

試験体の水平せん断力および面圧の計測は 3 軸ロードセル (水平 2 方向 $150[\text{kN}]$, 鉛直方向 $1[\text{MN}]$) を用いる. 水平変形については振動台の水平加振方向中央部に変位センサを用いて計測する. また, 加振試験前後でゴム表面温度を放射温度計にて計測する. 計測値はゴム表面の 3 点の平均値を算出している.

4. 水平性能評価方法および圧縮せん断試験結果

圧縮せん断試験条件は各種試験体ともに, 正弦波加振振動数 $0.25[\text{Hz}]$ (加振周期 $4.0[\text{s}]$) として, せん断ひずみ γ は $0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ とする. 得られた復元力特性より, 载荷開始から 3 サイクル目を抽出し, 水平性能を評価する.

NRB については, 試験より得られた荷重 Q と変形 δ の関係において, (1) 式を用いて水平剛性 K_h を算出する. HDR については, 試験より得られた復元力特性より (2) 式から (4) 式を用いて特性値 (等価剛性 K_{eq} , 等価粘性減衰定数 h_{eq} , 降伏荷重特性値 u) を算出する (Fig.3 参照). LRB の切片荷重 Q_d については, 試験より得られた復元力特性より $Q_{d,max}$, $Q_{d,min}$ を抽出し, (5) 式を用いて評価する. また, 2 次剛性 K_d については, 最大・最小せん断変形 δ_{max} , δ_{min} のそれぞれ $1/2$ の変形時の点を結ぶ直線のから $K_{d,u}$, $K_{d,d}$ を算出し (6) 式によって評価する. 等価粘性減衰定数 h_{eq} は (7) 式を用いて算出する (Fig.4 参照). なお, H はゴム総厚 $[\text{mm}]$ を示す. 履歴モデルは, NRB をリニア型モデル, HDR と LRB を修正バイリニア型モデルに設定した. 各パラメータは出荷検査時 (せん断ひずみ $\gamma = 1.0$, 基準面圧 $15[\text{N}/\text{mm}^2]$, 加振周期 $3.0[\text{s}]$) の水平性能に対して, 試験時の各試験体のゴム表面温度を用いて温度補正を行い, ひずみ依存式⁹⁾を適用させたものである. なお, このひずみ依存式の適応範囲の上限は HDR の場合 $\gamma = 2.7$ 以下, LRB の場合は $\gamma = 2.5$ 以下である. 本論文では, このひずみ依存式の適応範囲外となるせん断ひずみの範囲を高ひずみ領域と定義する.

Fig.5 から Fig.7 に各試験体の試験結果と抽出した水平性能特性値を示す. 各ゴム種の試験結果において, 製造ばらつき範囲外になる水平性能特性値がある. だが, せん断ひずみ $\gamma = 1.0$ の試験結果においてはひずみ依存式に従った水平性能特性値と精度よく対応していること, また, 試験結果全体を通して安定した結果が得られていることから問題ないと判断した.

Table1 Specimen specifications

Specimen	NRB	HDR	LRB
Total rubber thickness [mm]	44.8		
Effective loaded area [mm ²]	39800		38100
Rubber diameter [mm]	225		
Plug diameter [mm]	-		45
First shape factor	35.2		
Second shape factor	5.02

Fig.2 Test set up(plan)

$$K_h = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{\delta_{max} - \delta_{min}} \quad (1)$$

$$K_{eq} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{\delta_{max} - \delta_{min}} \quad (2)$$

$$h_{eq} = \frac{\Delta W}{2\pi K_{eq} \{0.5 \times (\delta_{max} - \delta_{min})\}^2} \quad (3)$$

$$u = \frac{Q_{d,max} - Q_{d,min}}{Q_{max} - Q_{min}} \quad (4)$$

$$Q_d = \frac{|Q_{d,max}| + |Q_{d,min}|}{2} \quad (5)$$

$$K_d = \frac{K_{d,u} + K_{d,d}}{2} \quad (6)$$

$$h_{eq} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{Q_d \left\{ \gamma \cdot H - \frac{Q_d}{(\beta - 1)K_d} \right\}}{K_{eq} \cdot (\gamma \cdot H)^2} \quad (\beta = 13) \quad (7)$$

Fig.3 Definition of horizontal performance of HDR

Fig.4 Definition of horizontal performance of LRB

Fig.5 Compression and shearing test of NRB

Fig.6 Compression and shearing test of HDR

Fig.7 Compression and shearing test of LRB

5. 免震部材の繰返し依存性を考慮した応答評価手法

5.1 概要

本章では、HDR と LRB の繰返し依存性を考慮した応答評価手法について述べる。また、HDR と LRB それぞれの評価式を示し、簡略法と詳細法への適応方法について示す。最後に、前章で示した履歴モデルを有する 1 質点系せん断型モデルを作成する。なお、本研究において NRB は繰返し依存性を考慮しないものとして扱う。

5.2 高減衰ゴム系積層ゴム¹⁰⁾

ゴム単位体積当たりの累積吸収エネルギー量 E/V_R から代表温度 T を算出し、水平性能を低下させる低下式を (8) 式から (14) 式に示す。ここで、 T_0 : 初期温度[℃]、 E : 累積吸収エネルギー[N・mm]、 V_R : 内部ゴムの体積[mm³]、 ρ_R : 内部ゴムの密度[kg/mm³]、 c_R : 内部ゴムの比熱[mJ/kg・K]、 V_S : 内部鋼板の体積[mm³]、 ρ_S : 内部鋼板の密度[kg/mm³]、 c_S : 内部鋼板の比熱[mJ/kg・K]を示す。HDR の熱力学特性を決定するパラメータを Table2 に示す。式中に示している C_k 、 C_h 、 C_u が水平性能の変化率を示し、 K'_{eq} 、 h'_{eq} 、 u' が水平性能低下後のパラメータを表す。なお、低下式の適応範囲は、ゴム単位体積当たりの累積吸収エネルギー量 E/V_R が 340[N/mm²]以内である。

5.3 鉛プラグ挿入型積層ゴム¹¹⁾

鉛プラグ単位体積当たりの累積吸収エネルギー量 E/V_p を用いて切片荷重を低下させる低下式を (15) 式から (18) 式に示す。ここで、 V_p : 鉛プラグの体積[mm³]、 D_p : 鉛プラグ径[mm]、 r : 鉛プラグ径から求められるエネルギー低減比率、 E'/V_p : 鉛プラグ単位体積当たりの代表累積吸収エネルギー[N/mm²]、 k : 切片荷重 Q_d の変化率を示す。なお、低下式の適応範囲は、鉛プラグ単位体積当たりの累積吸収エネルギー量 E/V_p が 600[N/mm²]以内である。また、「代表」は鉛プラグから内部のゴムや鋼板に伝わる熱量を除き、鉛プラグの温度上昇のみに寄与する累積吸収エネルギーを意味している。

Table2 Thermodynamic properties of HDR

Target	Density [kg/mm ³]	Specific heat capacity [mJ/kg・K]
Inner rubber	1.15×10^{-6}	1.45×10^6
Inner plate	7.85×10^{-6}	5.02×10^5

$$T = \begin{cases} T_0 + \frac{E}{V_R \rho_R c_R} & (E/V_R \leq 10 [\text{N/mm}^2]) \\ T_0 + \frac{10}{\rho_R c_R} + \frac{(E-10V_R)}{V_R \rho_R c_R + V_S \rho_S c_S} & (E/V_R > 10 [\text{N/mm}^2]) \end{cases} \quad (8)$$

$$K'_{eq} = C_k K_{eq} \quad (9)$$

$$C_k = \begin{cases} 1.288 - 0.0144T & (T \leq 20) \\ 1.668 - 0.548 \log(T - 3.45) & (T > 20) \end{cases} \quad (10)$$

$$h'_{eq} = C_h h_{eq} \quad (11)$$

$$C_h = -0.0065T + 1.130 \quad (12)$$

$$u' = C_u u \quad (13)$$

$$C_u = -0.0065T + 1.130 \quad (14)$$

$$\frac{E'}{V_p} = r \frac{E}{V_p} \quad (15)$$

$$r = \begin{cases} 0.001214D_p + 0.5698 & (D_p \leq 354) \\ 1 & (D_p > 354) \end{cases} \quad (16)$$

$$Q'_d = k Q_d \quad (17)$$

$$k = \frac{8.33}{7.967} \times \left\{ -0.06 + 1.25 \times \exp\left(-\frac{E'}{360V_p}\right) \right\} \quad (18)$$

5.4 応答解析手法

前節までに示したそれぞれの免震部材の評価式を用いて、簡略法と詳細法による応答解析手法についての手順を述べる。

まず、簡略法については前章までの評価式を用いて、時刻歴応答解析を2回行うことで繰り返し依存性を考慮した応答を評価することとする。次に、詳細法については(19)式に示すように時刻歴応答解析中の各ステップにおいて累積吸収エネルギーを算出し、前節で示した評価式に従い水平性能を逐次低下させる手法とした。LRBについてはプラグ径による影響は考慮されているものの応答解析中における温度変化は考慮していない。

$$E_n = E_{n-1} + 0.5 \cdot (Q_n + Q_{n-1}) \cdot (\delta_n - \delta_{n-1}) \quad (19)$$

5.5 数値解析モデル

本試験結果と比較を行う数値解析のモデル諸元の決定方法について述べる。単体試験結果より、1基あたりの製造ばらつきの範囲内であったため、本論文では基準値より決定する水平性能のパラメータに対して温度補正を行った値を用いることとする。

ここで、各種免震部材を1質点系せん断型モデルにモデル化をする。NRBは復元力特性をリニア型モデルとし、モデル固有周期が4.0[s]となる質量を決定する。粘性減衰定数が0.24になるように減衰係数を設定する。HDRとLRBは復元力特性を修正バイリニア型モデルとする。質量は、せん断ひずみ $\gamma = 1.0$ 時にモデル等価周期が3.5[s]となるように決定する。粘性減衰定数は0とする。NRBは履歴減衰が期待できないため、HDRの等価粘性減衰定数を用いてHDRを併用した際の質点系を想定することとした。これは、あくまでもNRBを用いた試験結果からシステムの有効性を示すことに重点を置くためである。決定したモデルパラメータを用い、簡略法もしくは詳細法によって時刻歴応答解析を行った結果を数値解析結果とする。また、決定した質量と減衰係数を用いてリアルタイムオンライン応答試験を行ったものを本試験結果とする。

6. リアルタイムオンライン応答試験

6.1 概要

Table3に示す本試験ケースでは3波の地震波を用いる。日本建築センター模擬波レベル2(BCJ-L2)については、比較的長い継続時間の中で大小の振幅が応答するため本試験システムの精度検証を確認するNRBを対象とした試験に用いる。HDRとLRBについては継続時間が短く繰り返し依存性の影響を受けない、かつ、短時間の間に最大応答に到達する観測波El Centro-NS 1940を用いて地震応答特性について考察する。長周期地震動をHDRとLRBに入力した時の繰り返し依存性の検討には本研究で検討するせん断ひずみ $\gamma = 2.0$ 時の固有周期4.0[s]で累積吸収エネルギーが最大となる中京地域(CH)におけるレベル1相当の設計用長周期地震動CH1¹⁾を用いる。

前章までに決定した数値解析モデルより、詳細法による数値解析手法を用いて各せん断ひずみとなるよう入力地震波倍率を決定して本試験を行う。なお、以降で示す数値解析結果は断りが無い限り詳細法である。また、本試験開始時のゴム表面温度により、初期温度補正を行った結果とする。

Table3 Real-time on-line test conditions

No.	Specimen	Shear strain	Seismic wave
Case1	NRB	1.0	BCJ-L2
Case2		2.0	
Case3	LRB	1.0	El Centro-NS 1940
Case4		2.0	
Case5	HDR	1.0	
Case6		2.0	CH1
Case7	LRB	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5	
Case8	HDR	2.0	

6.2 天然ゴム系積層ゴムを用いた試験結果

本節では、NRBが比較的弾性応答を示す部材特性を利用して、数値解析結果の再現性について検討することとする。そして、本試験の信頼性および有効性について確認する。

Fig.8からFig.9に各試験条件における本試験結果(凡例:Test)と数値解析結果(凡例:Analysis)の(a)復元力特性、(b)面圧変動、(c)時刻歴応答変位波形のフーリエ振幅スペクトルの比較、(d)せん断ひずみの比較、(e)本試験における目標変位(凡例:Target)と計測変位(凡例:Measured)の比較を示す。なお、図表上の凡例に表記しているTestとMeasuredは同一の試験データ(せん断ひずみもしくは計測変位)である。

本節における本試験結果の有効性および信頼性を定量的に把握するために相関係数 ρ とRMS比を用いる¹²⁾。(20)式と(21)式に算出方法を示す。式中に示す記号は、A, B:比較する時刻歴データ、N:データ数、 μ_A , μ_B :A, Bのそれぞれの平均値を示している。相関係数は1に近いほど正の相関があり、位相ずれを確認することに適している。RMSは時刻歴波形の絶対値の大きさを確認することができる。RMS比は数値解析解に対する本試験結果のRMSの比率を示しており、1.0に近いほど再現性が高い。

まず、再現性について把握するため目標変位に対して計測変位のRMS値の比を取る。また、数値解析結果との再現性を確認するため、数値解析結果に対して本試験結果のRMS値の比を取る。各データにおける相関係数 ρ とRMS比を図表上に併記している。相関係数 ρ とRMS比の数値からも本試験の有効性が確認できる。また、目標変位と計測変位の比較結果より制御誤差について検討する。Case2の時刻歴応答結果における最大制御誤差は時刻15.03[s]のせん断ひずみ $\gamma = 0.108$ (せん断変形4.854[mm])であり、最大応答変位における制御誤差はせん断ひずみ $\gamma = 0.076$ (せん断変形3.400[mm])であった。また、いずれの制御誤差もオーバーシュートした結果であった。オーバーシュートが顕著でその誤差が蓄積される場合においては、復元力を過大評価し応答を減衰させる。だが、本研究では前述したように制御誤差を補正する式⁹⁾を導入していない。そのため、数値解析結果と良い対応を示したことから、再現性においても良好な結果を示したことから、本試験における時刻歴応答解析に大きな影響がないことが分かる。以上より、NRBは地震応答特性においても安定しており、数値解析結果とも良い対応を示すことが確認できた。また、制御誤差による影響も少ないことから本試験システムの有効性と信頼性を確認することができた。

$$\rho = \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (A_i - \mu_A)(B_i - \mu_B)}{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (A_i - \mu_A)^2} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (B_i - \mu_B)^2}} \quad (20)$$

$$RMS[X] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^2} \quad (X = A, B) \quad (21)$$

(a) Hysteresis characteristics

(b) Compressive stress variation

(c) Fourier spectrum

(d) Shear strain time history

(e) Target disp. and measured disp. time history

Fig.8 Test results of Case1

(a) Hysteresis characteristics

(b) Compressive stress variation

(c) Fourier spectrum

(d) Shear strain time history

(e) Target disp. and measured disp. time history

Fig.9 Test results of Case2

6.3 鉛プラグ挿入型積層ゴムを用いた試験結果

本節では、LRBの地震応答特性について検討する。なお、Fig.10とFig.11に各試験条件における本試験結果と数値解析結果の(a)(b)復元力特性、(c)圧縮せん断試験結果から得られた復元力特性（载荷開始から3ループ目までの復元力特性）と本試験結果の比較、(d)面圧変動、(e)時刻歴応答変位波形のフーリエ振幅スペクトルの比較、(f)せん断ひずみの比較を示す。

まず、いずれのケースからも本試験結果は地震応答特性においてバイリニア型の復元力を示すことが確認できる。だが、比較的せん断ひずみの小さい振幅においては圧縮せん断試験で確認された切片荷重の基本性能に到達していないことが(a)から分かる。LRBの切片荷重の傾向は正弦波加振試験の場合いずれのひずみ領域においても一定値を示すが、地震応答特性ではそのような応答性状は確認されなかった。しかし、本試験結果の方がせん断ひずみの小さい振幅においても履歴を描き減衰効果が生じていることから修正バイリニア型モデルの数値解析結果とも近似した結果となったことが推察される。また、時刻歴応答変位波形のフーリエ振幅スペクトルより、モデル固有周期成分（3.0[s]から4.0[s]付近）のスペクトルが増大しているが、各試験条件の応答結果は同程度の周期特性を示している

ことが確認できる。LRBは入力される地震動の継続時間や鉛プラグ単位体積あたりの累積吸収エネルギー量によって水平性能の低下による応答の増大に起因するが、本節の試験条件下においては鉛プラグ単位体積あたりの累積吸収エネルギー量の少ない条件で行っている。そのため、発熱による水平性能の低下がわずかであったことも良い対応を得られた要因であると考えられる。

Case4においては、短時間の間に最大せん断ひずみが到達する影響によって応力の増大（バージン特性）が確認できるが、応答性状に大きく起因する要素とはなっていない。数値解析結果はバージン特性の再現について同程度もしくは若干下回ることが確認できる。また、4章で示した圧縮せん断試験におけるせん断ひずみ $\gamma = 2.0$ 相当においても、顕著なハードニングの影響は確認されなかった。LRBはHDRのようなゴム特性の支配的な応答を示す傾向ではないため、本試験条件内においては最大せん断ひずみの大小に関わらず数値解析結果とも良い対応を示すことを確認する事ができた。

以上の結果より、本試験条件でLRBの非線形特性を考慮した結果を得ることができたとともに、地震波継続時間や最大応答が繰り返し依存性の影響が小さい範囲での検討であったため、数値解析結果とも良い対応を示したことを確認した。

(a) Hysteresis characteristics (Test) (b) Hysteresis characteristics (Analysis)

(c) Comparison with basic characteristics (d) Compressive stress variation

(e) Fourier spectrum

(f) Shear strain time history

Fig.10 Test results of Case3

(a) Hysteresis characteristics (Test) (b) Hysteresis characteristics (Analysis)

(c) Comparison with basic characteristics (d) Compressive stress variation

(e) Fourier spectrum

(f) Shear strain time history

Fig.11 Test results of Case4

6.4 高減衰ゴム系積層ゴムを用いた試験結果

本節では、HDR の地震応答特性について検討する。(a)から(f)に示す図についても 6.3 節と同様とする。

Fig.12 に Case5 の本試験結果と数値解析結果の比較を示す。なお、数値解析結果は、積層ゴム 1 基あたりに定められる製造ばらつき（等価剛性 K_{eq} : +20[%]、降伏荷重特性値 u および等価減衰定数 h_{eq} : -20[%]）を考慮した結果である。これは、Fig.12 の(c)に示すように正弦波加振試験よりもやや等価剛性の大きい復元力特性が得られたためである。製造ばらつきの範囲内において、最大応答値は評価できるものの、NRB や LRB の復元力特性と比較して非線形特性が非常に強いことが分かる。また、(e)に示すフーリエ振幅スペクトルより本試験結果はモデル固有周期成分が励起しているのが分かる。これは、(f)に示す時刻歴応答せん断ひずみからも分かるように数値解析結果と比較して周期成分の長い応答が継続していることが確認でき、数値解析結果よりもせん断ひずみの大きい繰り返しの応答性状を示すことが分かる。これは実応答を再現するために試験

中に得られる HDR の復元力を時刻歴応答解析に反映させることで得られた本試験固有の結果であることが確認できる。

Fig.13 に Case6 の比較を示す。(e)に示すモデル固有周期成分の励起や(f)に示すせん断ひずみの応答傾向は Case5 と類似していることが確認できる。Case6 ではハードニング特性を示しており、数値解析結果（修正バイリニア型モデル）はその特性を考慮していない。そのため、圧縮せん断試験結果（Fig.6）からも分かるように、設計値との差異が大きくなり、降伏荷重特性値や等価粘性減衰定数の低下が応答の増大に起因しているのだと考えられる。また、本試験結果は固有周期成分の励起による累積吸収エネルギー量の増大が懸念され、数値解析結果よりも繰り返し依存性による水平性能の低下の影響を受けることが予測される。さらには、繰り返し依存性によるせん断ひずみの増加に伴いハードニングも生じることからより複雑な地震応答特性を示すことが予想される。

以上の本試験結果より、地震応答変位波形を入力するような部材単体の要素試験では得ることができない HDR の応答を把握できた。

(a) Hysteresis characteristics (Test) (b) Hysteresis characteristics (Analysis)

(c) Comparison with basic characteristics (d) Compressive stress variation

(e) Fourier spectrum

(f) Shear strain time history

Fig.12 Test results of Case5

(a) Hysteresis characteristics (Test) (b) Hysteresis characteristics (Analysis)

(c) Comparison with basic characteristics (d) Compressive stress variation

(e) Fourier spectrum

(f) Shear strain time history

Fig.13 Test results of Case6

6.5 繰り返し依存性についての検討試験

6.5.1 概要

本節では、長周期地震動による繰り返し依存性について検討を行う。Case7のLRBを用いた本試験では、各せん断ひずみとなる入力地震波倍率を設定し、本試験を1回ずつ行う。Case8のHDRを用いた本試験では、せん断ひずみ $\gamma = 2.0$ 相当となる入力地震動倍率を設定し、本試験を10回連続で行う。これらのせん断ひずみおよび試験回数は各応答評価手法の適応範囲の上限値に到達する程度までの検討を行うことを目的に設定している。本節の各試験体における検討方法が異なる理由は、長周期地震動の作用を受けて応答した際の単位体積当たりの累積吸収エネルギー量の大きさを考慮している。LRBは鉛プラグの体積に依存した評価式となっているため、長周期地震動のような長時間大変形が継続する条件では1回当たりの累積吸収エネルギー量が非常に大きい。一方でHDRは、ゴム単位体積当たりの累積吸収エネルギー量によって代表温度を決定するため、1回当たりの累積吸収エネルギー量はLRBと比較して小さ

い。そのため、LRBは1回ずつ最大せん断ひずみ別に試験を行いHDRは連続的に試験を行うこととした。なお、Case8のHDRを用いた試験においては、各試験の間では、面圧を負荷した状態で残留変形を取り除いて次の試験を行う。また、LRBは1回の本試験における温度上昇を考慮し、別条件の本試験を行う際には面圧を解放した状態でプラグ温度に留意し十分な時間をおいて次の試験を行った。

本章において、本試験結果と比較・検討を行う応答評価手法は簡略法および詳細法のそれぞれの結果を用いる。図中では簡略法をModel-I、詳細法をModel-IIとして示している。HDRは本試験を連続で10回行うため、1回目に示している解析結果は、繰り返し依存性未考慮の結果からゴム単位体積当たりの累積吸収エネルギー量から水平性能を低下させた復元力特性で時刻歴応答解析を行ったものである。2回目(n回目)以降については、1回目((n-1)回目)の繰り返し依存性を考慮した時刻歴応答解析より、ゴム単位体積当たりの累積吸収エネルギー量を用いて水平性能を低下させている。なお、数値解析結果は初期温度を本試験開始時のゴム表面温度によ

て補正を行う。また、本試験における残留ひずみを取り除く際の時間経過およびゴム表面温度は考慮していない。

6.5.2 鉛プラグ挿入型積層ゴム

本節では Case7 の試験結果について示す。Table4 に各本試験における雰囲気温度と本試験前後のゴム表面温度の計測結果を示し、Fig.14 に最大せん断ひずみ $\gamma_{max} = 1.0$ と $\gamma_{max} = 2.5$ の本試験結果および数値解析結果の復元力特性を示す。長周期地震動に対して、最大せん断ひずみ $\gamma_{max} = 1.0$ 程度となる試験条件においては良い対応を示すことが確認できる。しかし、最大せん断ひずみ $\gamma_{max} = 2.5$ 程度となる条件においては、最大せん断ひずみに大きな違いが生じていることが確認できる。ここで、Fig.15 に本試験の時刻歴波形から抽出した切片荷重の低下傾向および切片荷重の低下を示す評価式（凡例：Model-II），Fig.16 に Case8 全体における鉛プラグ単位体積当たりの累積吸収エネルギー量に対する最大せん断ひずみをまとめたものを示す。評価式は、最大せん断ひずみ $\gamma_{max} = 2.0$ の正弦波加振試験結果から定式化されている。そのため、本試験結果（実応答）における地震応答特性に着目すると、Fig.15 に示す最大せん断ひずみ $\gamma_{max} = 2.5$ 時の切片荷重 Q_d の低下傾向の違いによって最大応答値に影響が出た可能性が大きい。これには、定常応答による繰り返し変形と地震動のような不規則な変形がある場合において、温度上昇傾向の違いが生じるためであると考えられる。だが、本試験条件下において応答評価手法は安全側の結果を示し、提案される応答評価手法の健全性を示すことを確認した。

6.5.3 高減衰ゴム系積層ゴム

本節の検討においては、繰り返し依存性による水平性能の低下も大きく、高ひずみ領域におけるハードニングの影響も予想される。ここで、簡略法や詳細法に用いているひずみ依存式はせん断ひずみ $\gamma = 2.7$ 以下を適応範囲としている。本試験において、ひずみ依存式の適応範囲内となる結果では詳細法の修正バイリニア型モデル（Model-II）と比較して水平性能の低下を考察するとともに、水平性能の低下による応答の増大によってひずみ依存式の適応範囲外となる高ひずみ領域においてはハードニング特性を考慮したモデル（Model-III）と比較・検討も行うことで、両モデルの繰り返し依存性による地震応答特性および水平性能の推移について検討する。

ハードニング特性を考慮した履歴モデルは、吉田らによって提案されている論文内の「ハードニング導入のための拡張方法」¹³⁾を用いる。この提案手法は、Fig.17 に示すようにバイリニア型モデルを完全弾塑性バネと弾性バネに分離することでハードニング特性の影響を考慮するものである。この手法は、パラメータが少なく、比較的容易にハードニング特性を考慮することが可能である。分離した完全バイリニア型モデルを (20) 式のように示す。なお、1 次剛性 $\bar{k}_1$ は (21) 式とする。そして、それぞれの分離したバネに対してハードニング特性を導入する関数を示す。関数は (22) 式から (23) 式に示す通りである。ここで、 h ：ハードニングを開始するせん断ひずみを調節するパラメータ、 m ：履歴面積の増加を調節するパラメータ、 n ：剛性の硬化を調節するパラメータを表す。これらの関数を分離したバネの復元力特性に適応させ、(24) 式を用いる（Fig.18 参照）。また、Model-II の解析手法を踏襲するため、Masing 則を適応させひずみ依存性と繰り返し依存性を考慮する。本研究においては試行錯誤的に $h = 3.0$ 、 $m = 2.5$ 、 $n = 1.5$ と決定した。

Table4 Measurement temperature of Case7

Max shear strain	Atmospheric temperature [°C]	Rubber surface temperature (Pre/Post) [°C]
0.5	11.0	10/12
1.0	15.1	13/16
1.5	13.9	14/18
2.0	12.5	12/17
2.5	10.3	11/16

Fig.14 Test result of Case7

Fig.15 Tendency to drop of yielding load

Fig.16 Summary of maximum response results of Case7

$$\tau = f(\gamma) + k_2\gamma \quad (20)$$

$$\bar{k}_1 = k_1 - k_2 \quad (21)$$

$$g_1(\gamma) = 1 + \left| \frac{\gamma}{h} \right|^m \quad (22)$$

$$g_2(\gamma) = 1 + \left| \frac{\gamma}{h} \right|^n \quad (23)$$

$$\bar{\tau} = g_1(\gamma) \cdot f(\gamma) + g_2(\gamma) \cdot k_2(\gamma) \quad (24)$$

Fig.19 と Fig.20 に 4 章で示した HDR の圧縮せん断試験結果と Model-III の比較結果, 等価剛性の比較を示す. Model-III が良い対応を示し, ハードニング特性を考慮できていることが確認できる.

Fig.21 に最大せん断ひずみ γ_{max} および γ_{max} 前後の 1 サイクルから抽出した水平性能特性値のまとめの結果を示し, Fig.22 には本試験結果と数値解析結果の 1 回目 (a-1) から (a-4) と 10 回目 (b-1) から (b-4) の復元力特性を抽出し, 時刻歴応答変位波形のフーリエ振幅スペクトルを示す. なお, Model-I は Fig.21(a) のみに示す. Fig.21 より, (a) に示すように 3 回目までは本試験結果の γ_{max} が大きいことが分かる. これは, 6.4 節でも示したように $\gamma = 2.0$ における圧縮せん断試験結果とモデルの相違があることが原因であるが, 地震応答下において抽出される水平性能は圧縮せん断試験結果と比較して K_{eq} は大きく, h_{eq} および u が小さいことが確認された. また, フーリエ振幅スペクトルからも分かるように本試験結果はモデルの等価周期あたりで高いピークを示していることから長周期成分の応答が継続し本試験結果の E/V_R は各数値解析結果よりも大きいことが分かる. そのため, (b) より 2 回目の K_{eq} は繰り返し依存性によって大きな低下を示したことが推察され, 3 回目以降は γ_{max} の増大によって高ひずみ領域におけるハードニング特性による増大傾向を示したと考えられる. この変動傾向については両モデルとも類似した傾向は得られなかったことから, 地震応答下の高ひずみ領域におけるハードニング特性はより顕著であると思われる. また, (c), (d) に示す h_{eq} および u は抽出された値の違いはあるものの 5 回目までの繰り返し依存性による低下傾向は概ね類似した傾向を示した. しかし, 6 回目以降では本試験結果から抽出される h_{eq} および u は頭打ちになる傾向となり, 応答評価手法を用いた場合の水平性能の低下傾向の示す推移とは異なることが確認された.

以上より, 本試験結果を用いることによって得られる地震応答特性においては E/V_R の増大および各水平性能特性値の変動傾向は数値解析結果と異なることが確認された.

Fig.17 Separation of bilinear model

Fig.18 Outline of the hardening

Fig.19 Shear stress - shear strain relationships

Fig.20 Equivalent horizontal stiffness

(a) γ_{max}

(b) K_{eq}

(c) h_{eq}

(d) u

Fig.21 Summary of maximum response and horizontal parameters of Case8

(a-1) Test 1st time

(a-2) Model-II 1st time

(a-3) Model-III 1st time

(a-4) Fourier spectrum

(b-1) Test 10th time

(b-2) Model-II 10th time

(b-3) Model-III 10th time

(b-4) Fourier spectrum

Fig.22 Test results of Case8

7. まとめ

本研究では長周期地震動に対する積層ゴムの繰り返し依存性について検討を行った。3種類の縮小試験体を用い、数値解析モデルとの比較・検討結果から考察を示した。得られた知見を以下に示す。

- ・NRBを用いた本試験と数値解析モデルとの比較を行った結果より、数値解析との対応もよく、再現性が高いことを確認できた。よって、本試験システムの有効性を確認した。
- ・LRBの地震応答特性はバイリニア型の復元力を示すことから累積吸収エネルギー量の小さい範囲では数値解析結果ともよい対応を示すことを確認した。
- ・HDRの地震応答特性は、複雑な応答を示すとともにモデル固有周期成分の励起によって数値解析結果とは異なる応答性状を確認した。
- ・長周期地震動に対する繰り返し依存性の影響を検討した結果、LRBは切片荷重の低下傾向の違いによって応答結果に大きな違いが生じることを確認した。また、HDRについては繰り返し依存性によって各水平性能特性値の変動傾向は数値解析結果と異なることを確認した。だが、本論文における試験ケースにおいて、提案されている評価式を用いた簡略法は応答結果を実応答と同程度もしくは安全側に評価することが確認でき、応答評価手法の健全性を確認した。

謝辞

本研究を行うにあたり使用した鉛プラグ挿入型積層ゴムの縮小試験体は、株式会社ブリヂストンからお借りしたものです。多大なるご協力とご配慮に対して、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Ministry of Land, Transport and Tourism: Choukousoukenchikubutsutou niokeru Nankaitorahuzoi no Kyodijishin niyoru chousyukijishindou heno Taiouni tsuite (Gijyututekijyugen) (Measure against Long Period Ground Motion due to a Huge Earthquake along The Nankai Trough in High Rise Buildings (Technical Advice)) MILT Vol.1111, 2016.6 (in Japanese)
国土交通省：超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について（技術的助言）1111号, 2016.6
- 2) Kondo, A., Takenaka, Y., Takaoka, E., Hikita, M., Hyodo, Y. and Kitamura, H.: RESPONSE ANALYSIS METHOD CONSIDERING HEAT-MECHANICS INTERACTION BEHAVIOR OF LEAD RUBBER BEARINGS, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.83, No.753, pp.1595-1605, 2018.11
近藤明洋, 竹中康雄, 高岡栄治, 引田真規子, 兵頭陽, 北村春幸：鉛入り積層ゴムの熱・力学的連成挙動を考慮した応答解析法, 日本建築学会構造系論文集, 第83巻, 第753号, pp.1595-1605, 2018.11
- 3) Building Research Institute National Research and Development Agency, Japan: Research on Characteristics of Isolators and Dampers under Multi-cyclic Earthquake Motions and Effects on Response of Seismically Isolated Buildings, Building Research Data, No.170, 2016.4
国立研究開発法人建築研究所：免震部材の多数回繰り返し特性と免震建築物の地震応答性状への影響に関する研究, 170号, 2016.4
- 4) Nakashima, M., Masaoka, N., Real time on line test for MDOF systems, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 28(4), 393-420, 1999.
- 5) Yang, W., Nakano, Y. and Sanada, Y.: SUBSTRUCTURE ON-LINE TEST TECHNIQUE USING NON-LINEAR HYSTERESIS MODELLING WITH NEURAL NETWORK, Journal of Structural and

Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.582, pp.73-80, 2004.8

楊元植, 中埜良昭, 真田靖士：ニューラルネットワークによる非線形履歴の推定手法を応用したサブストラクチャ・オンライン実験手法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第582号, pp.73-80, 2004.8

- 6) Ito, A., Kawasaki, R. and Fujitani, H.: EFFECTIVENESS OF REAL TIME HYBRID TEST IN SEMI-ACTIVE CONTROLLED BASE ISOLATION SYSTEM, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.76, No.663, pp.891-897, 2011.5
伊藤彰浩, 川崎瑠衣, 藤谷秀雄：セミアクティブ制御免震構造のリアルタイム・ハイブリッド実験の有効性, 日本建築学会構造系論文集, 第76巻, 第663号, pp.891-897, 2011.5
- 7) Tomizawa, T., Fujitani, H., Ito, M., Aoyama, Y., Shibata, K. and Sato Y.: RESPONSE CONTROL BY USING ROTARY INERTIA MASS DAMPER FILLED WITH MAGNETORHEOLOGICAL FLUID -Study on real-time hybrid experiment-, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.79, No.704, pp.1435-1444, 2014.10
富澤徹弥, 藤谷秀雄, 伊藤麻衣, 青山優也, 柴田和彦, 佐藤友祐：磁気粘性流体を用いた回転慣性質量ダンパーによる応答制御・リアルタイムハイブリッド実験による検証・日本建築学会構造系論文集, 第79巻, 第704号, pp.1435-1444, 2014.10
- 8) Kusakabe, S., Morio, S. and Arimoto, K.: Liquefaction Phenomenon of Sand Layers by Using On-Line Computer Test Control Method, Journal of the Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering Soils and foundations, Vol.30, No.3, pp.174-184, 1990.9
日下部伸, 森尾敏, 有本勝二：オンライン地震応答実験による2層系砂地盤の液状化挙動, 土質工学会論文報告集, Vol.30, No.3, pp.174-184, 1990.9
- 9) Bridgestone: Product specification list of seismic isolation, Vol.2, 2018
ブリヂストン：建築免震用積層ゴム製品仕様一覧, Vol.2, 2018
- 10) Bridgestone: Variation of characteristic of seismic isolation for long-period earthquake (High damping rubber bearing), The building Center of Japan, legal conformity appraisals, BCJ evaluations - IB0010-01, 2017.3
ブリヂストン：長周期地震動に対する免震材料の性能変化（ブリヂストン高減衰ゴム系積層ゴム支承）, 日本建築センター, 評定書, BCJ評定-IB0010-01, 2017.3
- 11) Bridgestone: Variation of characteristic of seismic isolation for long-period earthquake (Lead rubber bearing), The building Center of Japan, legal conformity appraisals, BCJ evaluations - IB0012-01, 2017.5
ブリヂストン：長周期地震動に対する免震材料の性能変化（ブリヂストン鉛プラグ挿入型積層ゴム支承）, 日本建築センター, 評定書, BCJ評定-IB0012-01, 2017.5
- 12) Yoshida, S., Fujitani, H., Mukai Y. and Ito M.: REAL TIME HYBRID TESTS OF SEMI-ACTIVE CONTROL USING SHAKING TABLE - Proposal and verification of test method for mid-story isolated buildings -, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.81, No.729, pp.1821-1829, 2016.11
吉田昇平, 藤谷秀雄, 向井洋一, 伊藤麻衣：振動台を用いたセミアクティブ制御のリアルタイム・ハイブリッド実験 中間階免震構造を対象とした実験手法の提案と検証, 日本建築学会構造系論文集, 第81巻, 第729号, pp.1821-1829, 2016.11
- 13) Yoshida, J. and Sugiyama, T.: EXTENDED BILINEAR HYSTERETIC MODELS FOR LAMINATED RUBBER BEARINGS, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE)), Vol.70, No.2, pp.238-251, 2014
吉田純司, 杉山俊幸：耐震設計における動的解析のための免震用積層ゴム支承の拡張バイリニアモデル, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.70, No.2, pp.238-251, 2014

STUDY ON SEISMIC RESPONSE CHARACTERISTICS OF LAMINATED RUBBER BEARINGS USING REAL-TIME ON-LINE TEST

Examination for the repeated deformation dependency by the long-period ground motion

Nobuhiro AKUTO^{*1}, *Ippei HATA*^{*2}, *Harunori MIZOGUCHI*^{*3}
and Tetsuya YAMAGAMI^{*4}

^{*1} Research Assist., Dept. of Architecture, College of Science and Technology, Nihon Univ., M.Eng.

^{*2} Prof., Dept. of Architecture, College of Science and Technology, Nihon Univ., Dr.Eng.

^{*3} Sumitomo Mitsui Construction, M.Eng.

^{*4} Ishimoto Architectural & Engineering Firm, Inc., M.Eng.

There is concern about the occurrence of long-period ground motions in Japan. In particular, if the seismic isolation building is subjected to a long-period ground motion, the seismic isolation device is likely to affect the horizontal performance by the resonance and long repeated deformation. As evaluation methods, two analysis methods have been proposed. They are “detailed method” and “simplified method”. “Detailed method” is an evaluation method that considers the repetitive dependence by changing the horizontal performance of the seismic isolation device at each step of time history response analysis. “Simplified method” is calculated by time history response analysis in two steps. First, time history response analysis is calculated using the model parameters of the seismic isolation devices. Next, the cumulative absorbed energy amount per unit volume of the seismic isolation device is calculated, and the reduction rate of the model parameters is calculated. Finally, the repeated deformation dependence of the seismic isolation device is taken into consideration by performing time history response analysis calculation using that parameter.

It is very important in structural design to examine the validity of the above analysis method. In this study, we use a real-time on-line test that can reflect the complicated nonlinear characteristics of seismic isolation devices in time history response analysis. The proposed test method is a test method that replaces the shaking table tests.

This paper verifies the analysis method considering the repetitive dependency of the laminated rubber bearings by real-time on-line tests. The validity of the response analysis method is discussed by comparing the results of the proposed test method with time history response analysis results by “simplified method” and “detailed method”. In order to carry out the above purpose of this research, tests are conducted using three types of laminated rubber bearings.

The findings obtained in this paper are shown below.

- In order to verify the accuracy of the proposed test method, we conducted a test using natural rubber bearing (NRB). As a result, it was confirmed that time history response analysis had high reproducibility. Therefore, the effectiveness of the proposed test method was shown.
- The seismic response characteristics of the lead rubber bearing (LRB) has a good correspondence with time history response analysis results because the bilinear restoring force characteristics depend on it. The seismic response characteristics of high-damping rubber bearing (HDR) show complex response due to its very high nonlinearity. The excitation of the model's eigen-periodic components confirmed the response characteristics different from the numerical analysis results.
- The differences between the response analysis methods and the real-time on-line test became clear. In addition, the horizontal performance that decrease due to the repeated deformation dependence are compared.

(2020年9月4日原稿受理, 2021年3月15日採用決定)