

長周期地震動による高減衰ゴム系積層ゴムの地震応答特性に関する研究

その1. リアルタイムオンライン応答試験システムの概要および高減衰ゴム系積層ゴムのモデル化

Study on Seismic Response Characteristic of High Damping Rubber Bearings by Long Period Ground Motions

Part 1. Outline of real-time on-line test system and modeling of high damping rubber bearing

秦一平¹, 阿久戸信宏¹, ○山田健太², 藤生浩純²Ippei Hata¹, Nobuhiro Akuto¹, *Kenta Yamada², Hirozumi Fujiu²

Abstract: This paper discusses the effect of dependence on cyclic loading of high-damping rubber bearings on the seismic response of long-period seismic ground motions. In this study, real-time on-line test system is used to evaluate the validity of the numerical results. This paper reports on the outline of real-time on-line tests, test plan and modeling of high-damping rubber bearing based on the results of sinusoidal vibration tests. The analysis model considers the hardening characteristics in the high shear strain region.

1-1. はじめに

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対策について」の資料¹⁾がまとめられた。免震構造物に長周期地震動が入力されると、共振現象による大変形や長時間の繰り返し変形によって、免震層に設置される免震部材の温度が上昇する。それに伴って水平性能が変動し、構造物全体の応答に影響を与えることが懸念されている。

長周期地震動に対する応答評価を行う数値解析手法は大きく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」)がある。詳細法は、時刻歴応答解析中に時々刻々と繰り返し依存性による水平性能の特性変化を考慮する手法である。簡略法は、時刻歴応答解析を2回行うことで簡易的に繰り返し依存性を考慮する手法である。簡略法は、詳細法のような高度な技術を要することなく簡便な応答評価を行える。しかし、いずれの数値解析手法においても実応答との比較や検討はなされておらず、応答評価手法の妥当性を確認する必要があると考えられる。

そこで本研究では、部材の複雑な非線形特性を時刻歴応答解析に反映させることが可能なリアルタイムオンライン応答試験(以下、「本試験」)システムを用いて、地震動による高減衰ゴム系積層ゴム(以下、「HDR」)の繰り返し依存性を含めた非線形特性について検討する。その際に、簡略法や詳細法を用いた数値解析手法による結果との相違点を示し、実応答による地震応答特性について考察する。さらに、高ひずみ領域におけるハードニング特性を考慮したモデル化でも比較・検討を実施し、モデル化による相違が地震応答特性に及ぼす影響について考察する。

1-2. リアルタイムオンライン応答試験システム

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)を評価するために、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)。手順としては、まず、数値解析を行う演算用コンピュータにより第1ステップの応答変位を算出する。この変位を指令値とし、制御装置を介して油圧アクチュエータで試験体に載荷する。試験体に載荷した時に得られる復元力を演算用コンピュータにフィードバックし、第2ステップの応答計算に用いる。この手順を、地震波継続時間だけ10[msec]間隔で制御する。数値積分法はNewmarkの β 法により、第1ステップのみ線形加速度法($\beta = 1/6$)、第2ステップ以降は衝撃加速度法($\beta = 0$)を用いる。また、応答計算に用いる変位は解の安定のために、計算変位を用いる。

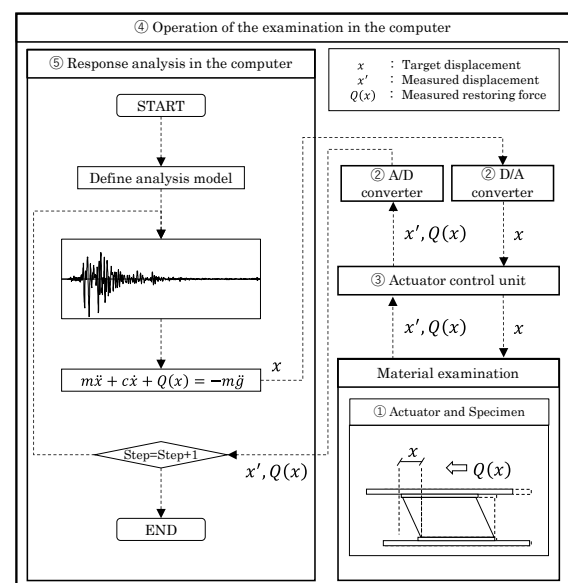


Fig.1 Outline of real-time on-line test

1-3. 試験計画

本試験で用いる HDR の縮小試験体概要を Table1, セットアップ図を Fig.2 に示す. 動的载荷が可能な性能を有した油圧アクチュエータ (最大加力: ±400[kN], 最大ストローク: ±200[mm], 最大速度: 1.0[m/s]) を 3 台使用する. 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基準面圧 (15[N/mm²]) を負荷させ, 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. 試験体と反力部材の間に 3 軸ロードセル (水平 2 方向: 150[kN], 鉛直方向: 1[MN]) を設置して計測を行う. また, 水平変形によって生じる試験体の傾斜角度をレーザ変位計により計測し, 試験中のフランジ温度を K 型熱電対, 試験前後でゴム中央部の表面温度を放射温度計にて計測する.

1-4. 単体試験およびモデル化

単体試験は周期 4[s]の正弦波をせん断ひずみ別に 3 サイクル入力する. 単体試験より得られる 3 サイクル目の水平性能の特性値およびモデル概要を Fig.3 に示す. 本研究では 2 種類の履歴モデルを用いる. 1 つは, 設計値に用いられるもので各パラメータは設計値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^[2]を適用させたものである. もう 1 つは, 吉田らが提案する大変形領域におけるハードニング特性を考慮したモデル^[3]である. (1)式から(5)式に算出式を示す. 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. 本研究では, $h = 3.0$, $m = 2.5$, $n = 1.5$ と決定した. これらのモデルを用いて詳細法と簡略法を用いた時刻歴応答解析を実施する. 詳細法については, (6)式に示す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, (7)式から(13)式に示す評価式に従い水平性能を逐次低下させる手法とした. 簡略法については文献[4]に従う.

1-5. まとめ

本報では, リアルタイムオンライン応答試験システムの概要および単体試験について示した. 次報ではリアルタイムオンライン応答試験結果について示す.

1-6. 参考文献

- [1] 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), 2016.
- [2] プリヂストン: 建築免震用積層ゴム製品仕様一覧, Vol.2, 2018.
- [3] 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ニアンモデル, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.70, No.2, pp.238-251, 2014.
- [4] プリヂストン: 長周期地震動に対する免震材料の性能変化 (プ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

Table1 Specimen specifications

Total rubber thickness [mm]	44.8
Effective loaded area [mm ²]	39800
Rubber diameter [mm]	225
First shape factor	35.2
Second shape factor	5.02

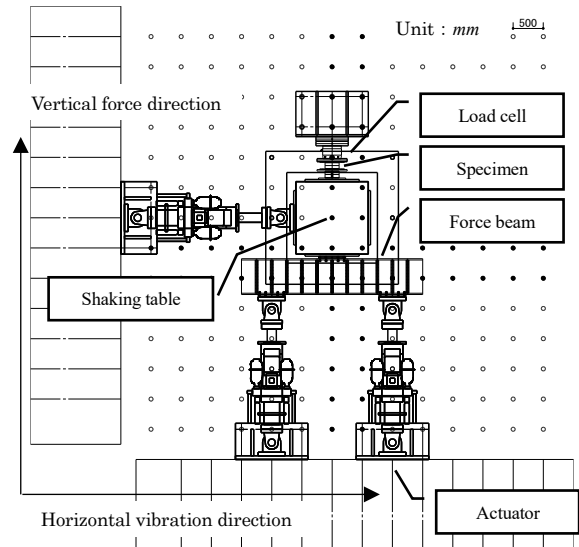


Fig.2 Test set up

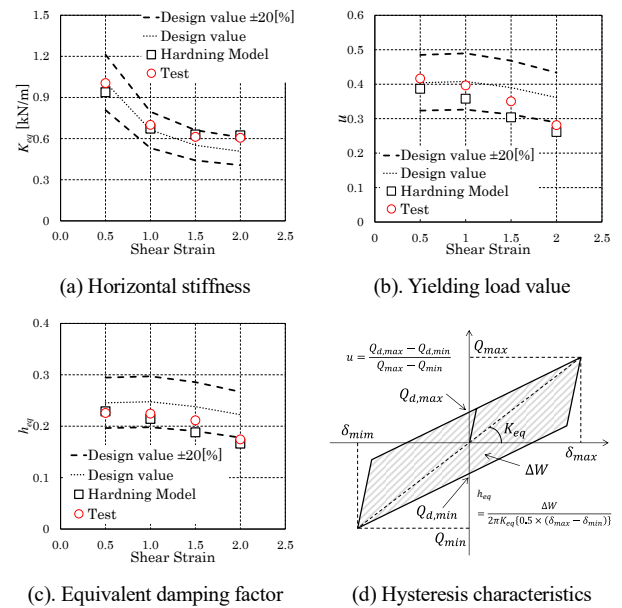


Fig.3 Compression and shearing test of HDR

$$\begin{aligned} \tau &= f_1(\gamma) + k_2\gamma & (1) \\ \bar{k}_1 &= k_1 - k_2 & (2) \\ g_1(\gamma) &= 1 + \frac{|\gamma|}{h}^m & (3) \\ g_2(\gamma) &= 1 + \frac{|\gamma|}{h}^n & (4) \\ \bar{\tau} &= g_1(\gamma) \cdot f_1(\gamma) + g_2(\gamma) \cdot k_2(\gamma) & (5) \\ E_n &= E_{n-1} + 0.5 \cdot (Q_n + Q_{n-1}) \cdot (\delta_n - \delta_{n-1}) & (6) \\ T &= \begin{cases} T_0 + \frac{E}{V_R \rho_R c_R} & (E/V_R \leq 10 [N/mm^2]) \\ T_0 + \frac{10}{\rho_R c_R} + \frac{E - 10V_R}{V_R \rho_R c_R + V_S \rho_S c_S} & (E/V_R > 10 [N/mm^2]) \end{cases} & (7) \\ K'_{eq} &= C_R K_{eq} & (8) \\ C_k &= \begin{cases} 1.288 - 0.0144T & (T \leq 20) \\ 1.668 - 0.548 \log(T - 3.45) & (T > 20) \end{cases} & (9) \\ h'_{eq} &= C_h h_{eq} & (10) \\ C_h &= -0.0065T + 1.130 & (11) \\ u' &= C_u u & (12) \\ C_u &= -0.0065T + 1.130 & (13) \end{aligned}$$