

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	既存試験機を用いた応答遅れの小さい免震建築物サブストラクチャ・リアルタイム・オンライン応答実験システムの開発
Title(English)	DEVELOPMENT OF SUBSTRUCTURE REAL-TIME ONLINE TESTING SYSTEM FOR SEISMICALLY ISOLATED BUILDING WITH A SMALL RESPONSE DELAY USING EXISTING EXPERIMENTAL EQUIPMENT
著者(和文)	竹内貞光, 森隆浩, 佐藤大樹, 犬伏徹志, 扇谷匠己, 神田亮
Authors(English)	Sadamitsu Takeuchi, Takahiro Mori, Daiki Sato, Tetsushi Inubushi, Narumi Ougiya, Makoto kanda
出典(和文)	日本建築学会技術報告集, Vol. 28, No. 68, pp. 121-126
Citation(English)	AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 28, No. 68, pp. 121-126
発行日 / Pub. date	2022, 2
権利情報	日本建築学会

既存試験機を用いた応答遅れの小さい免震建築物サブストラクチャ・リアルタイム・オンライン応答実験システムの開発

DEVELOPMENT OF SUBSTRUCTURE REAL-TIME ONLINE TESTING SYSTEM FOR SEISMICALLY ISOLATED BUILDING WITH A SMALL RESPONSE DELAY USING EXISTING EXPERIMENTAL EQUIPMENT

竹内貞光 — * 1 森 隆浩 — * 2
佐藤大樹 — * 3 犬伏徹志 — * 4
扇谷匠己 — * 5 神田 亮 — * 6

Sadamitsu TAKEUCHI — * 1 Takahiro MORI — * 2
Daiki SATO — * 3 Tetsushi INUBUSHI — * 4
Narumi OUGIYA — * 5 Makoto KANDA — * 6

キーワード：
サブストラクチャ・リアルタイム・オンライン応答実験法、
免震建築物、地震動、風外乱、応答遅れ、既存試験機

Keywords:
Substructure real-time online testing, Seismically isolated building,
Earthquake ground motion, Wind excitation, Response delay, Existing
experimental equipment

This paper describes development of substructure real time online response testing system (SROLT) for seismic ally isolated building with a small response delay using existing experimental equipment Authors made analytical examinations of the influence of response delay to the test results caused by using existing experimental equipment, and developed a control method to minimize the problem. It was demonstrated by various test results that the developed system has sufficient accuracy as SROLT for seismically isolated buildings.

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震, 2011年東北地方太平洋沖地震などで性能が実証された免震構造は, その建設戸数も年々増加する一方, 適用される建築物も戸建て建築物から超高層建築物へと多種多様である。

最近では, 免震建築物の安全性検証のため, 既往波や告示波だけでなく, さまざまな特性をもつ地震動や, 台風通過における風外乱などの検討が求められるようになってきた¹⁾。

免震建築物においてその挙動に支配的な免震部材は, 変位依存性, 速度依存性, 温度依存性, 繰り返し回数依存性, 水平クリープなど, 多くの依存性を有している¹⁾ため, 現在のところ免震建築物の地震および風外力時の挙動などをコンピュータによる数値解析によって正確にシミュレーションすることは困難である。

上記問題を解決するために, サブストラクチャ・リアルタイム・オンライン応答実験法 (以下 SROLT) (例えば 2)~4) に着目した。SROLT は, 構造物の縮尺率による制限を緩和できるという特長と速度依存性のある構造物の部材の依存性を応答に取り込んだ実験が可能であるという特長をあわせもつ。SROLT の免震建築物への適用は, 従来から研究が行なわれてきている (例えば 5)~7) が, 免震部材の非線形挙動が顕著になる免震建築物の長周期地震や風外乱の応答シミュレーション⁵⁾ などの実施例は少ない。

そこで, SROLT による免震建築物の応答をシミュレーションするため, システムの導入を検討した。ソフト面において, リアルタイムに

精度のよい数値解析を行うことが大事である。本システムでは, 数値積分法に, 陽な方法にモード除去法を適用した^{8), 9)}。一方, ハード面である試験機は, 新たに試験機を導入するのはコストがかかることから既存の設備である鉛直-水平方向の動的 2 軸試験機 (以下, 動的 2 軸試験機) を用いることとした。SROLT では試験機の摩擦力や慣性力, アクチュエータの遅れが応答結果に大きな影響を与える。しかし, この動的 2 軸試験機は, 試験体の荷重を直接計測できる分力計を用いているため, 試験機の摩擦力, 慣性力の影響を考慮する必要がなく, 本研究で開発したシステムの利点の一つである。この特長を活かし, 動的 2 軸試験機を PC で制御するシステムを開発することとした。この動的 2 軸試験機はアクチュエータの遅れが懸念¹⁰⁾ されたため, 制御方法に工夫をする必要がある。制御に関しては, 既往の研究^{4), 11), 12)} がある。文献 4), 11) では, 目標変位に対して試験機の応答遅れを考慮した変位指令値を制御に用いている。変位指令値を過去の変位履歴から多項式を用いて外挿した値としている。その際, 変位指令値と目標変位で差が生じた場合は補正を行っている。本報では, 補正を行わない方法を用いる。

本報の目的は, 既存の動的 2 軸試験機を用いて開発した SROLT システムが, 免震建築物に対して地震および風応答をシミュレーションできる試験機の応答遅れの小さいシステムであることを示すことである。試験機の応答遅れの影響を解析的に分析し, 実験結果から免震建築物を対象としたシステムが十分な精度があることを検証する。

¹⁾ ㈱ブリヂストン 修士 (工学)
(〒244-8510 神奈川県横浜市戸塚区柏尾町1番地)

²⁾ ㈱ブリヂストン 博士 (理学)
東京工業大学未来産業技術研究所 准教授・博士 (工学)

³⁾ 近畿大学建築学部建築学科 講師・博士 (工学)

⁴⁾ ㈱長谷工コーポレーション技術研究所 博士 (工学)

⁵⁾ 日本大学生産工学部建築工学科 教授・博士 (工学)

¹⁾ Bridgestone Corporation, M.Eng.

²⁾ Bridgestone Corporation, Dr.Sci.

³⁾ Assoc. Prof., FIRST, Tokyo Institute of Tech., Dr.Eng.

⁴⁾ Lecturer, Faculty of Arch., Kindai Univ., Dr.Eng.

⁵⁾ Technical Research Institute, Haseko Corporation, Dr.Eng.

⁶⁾ Prof., Dept. of Architectural Eng., College of Industrial Tech., Nihon Univ., Dr.Eng.

2. 遅れ時間による応答結果への影響

2章では、開発した SROLT システムについて述べる前に、まず、数値解析により、試験機の応答遅れが SROLT の応答結果に与える影響について述べる。

Fig. 1 に示すように、試験体に対して目標変位 (Target) を変位指令値として与えたときに、試験体の実変位 (Measured) が遅れた場合、時刻歴応答解析結果にどのような影響を与えるか、Table 1 に示す 1 質点のモデルを用いて検討を行った。ここで、ピーク時間の差を応答遅れの時間 (以下、遅れ時間 Dt) とする。復元力モデルは、ゴム外径 1000mm ゴム厚さ 200mm の高減衰ゴム系積層ゴム (以下、HDR) を想定したノーマルバイリニアモデルとし、質量は固有周期 2, 4, 6s となるように設定した。遅れ時間 $Dt=0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.1s$ としてそれぞれ時刻歴応答解析を行った。数値解析の時間間隔 $\Delta t = 0.01s$ とした。

検討に用いた地震波は、EL Centro NS (地動最大速度 50 cm/s), BCJ L2 と建築基準整備促進事業の平成 23 年度「超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討」¹³⁾ で作成された長周期地震動の中で此花 (OSKH02 (平均)) 波である。Fig. 2, 3 に T2 モデル, EL Centro NS 波での時刻歴応答解析結果を示す。遅れ時間 $Dt=0.0, 0.06, 0.1s$ の結果をそれぞれ黒線, 青線, 赤線で示す。Fig. 2 より、遅れ時間 Dt が大きくなると、応答変位が大きくなり、周期も長くなる。また、Fig. 3 の履歴図から、遅れ時間 Dt が大きくなると、振幅は大きくなるが、復元力が小さくなることや反時計周りの履歴 (Fig. 5, 後述) を示すため吸収される面積が小さくなる。Fig. 4 に、遅れ時間が生じたときの最大応答変位 $X_{max}(Dt)$ と遅れ時間 $Dt = 0$ 時の最大応答変位 $X_{max}(Dt = 0)$ の比率 $X_{max}(Dt) / X_{max}(Dt = 0)$ と、遅れ時間 Dt / 固有周期 T の関係を示す。遅れ時間 Dt / 固有周期 T が大きくなると、地震動によりばらつきはみられるが、最大応答変位が増大することが確認できる。これは、遅れ時間 Dt により Fig. 5 に示すような履歴となるのが原因である。黒線で示すバイリニア型の履歴を有する試験体に、一定時間間隔で目標変位 (Target) $x(1), x(2), \dots, x(i)$ の順に与えると、 $Q(1), Q(2), \dots, Q(i)$ の復元力が得られるものとする。ここで、目標変位 $x(i)$ に対して実変位 (Measured) が 1 ステップ分遅れた場合、得られる復元力は 1 ステップ前の復元力 $Q(i-1)$ となる。 $x(i)$ と $Q(i-1)$ からなる履歴は、Fig. 5 の赤線のようになり、黒線で示す試験体の本来の履歴に対して、7) 履歴面積が小さくなる。8) 変位のピーク近傍で履歴が反時計回りの挙動を示す。9) 剛性が低下する。などの違いが生じる。

Fig. 4 の結果から、 $Dt/T \leq 0.01$ であれば $X_{max}(Dt) / X_{max}(Dt = 0)$ が 1.1 以下となることから、許容値とした。

3. SROLT の実験システムの概要

3章では、開発した SROLT の実験システムの概要を述べる。

SROLT を免震建築物に適用するため、Fig. 6 に示すように建築物を質点系モデルに置換し、上部構造を解析部分、免震層を実験部分とする。質点系モデルに置換した上部構造の応答は、一般的にほぼ線形な挙動を示すため数値解析により求める。また、複雑な非線形挙動を示す免震部材の応答は、試験体を用いた載荷実験によってその挙動を求める。両者を振動方程式上で組み合わせることによって、地震や風外力下における免震部材の複雑な挙動を精確に考慮した建築物全

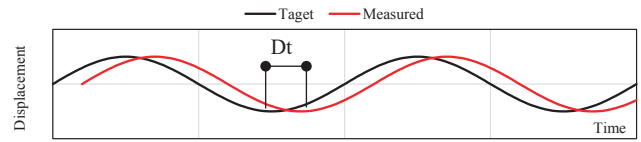


Fig. 1 Response Delay Time

Table. 1 Analysis Model

Model	Mass m(ton)	Natural Period T(s)	Initial Shear Stiffness K_1 (kN/m)	Post-Yield Stiffness K_2 (kN/m)	Characteristic Strength Q_d (kN)	Equivalent Stiffness*1 K_{eq} (kN/m)
T2	246	2	14300	1430	199	2425
T4	983	4	14300	1430	199	2425
T6	2211	6	14300	1430	199	2425

*1 Shear Strain 100%

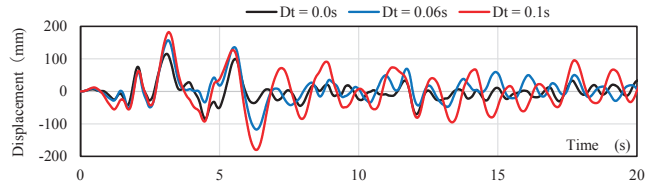


Fig. 2 Response of Displacement (T2model, EL Centro NS)

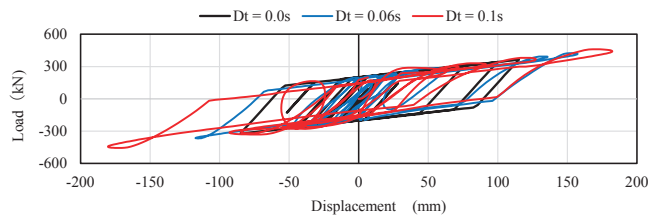


Fig. 3 Characteristic of Restoring Force (T2model EL Centro NS (0 to 10sec))

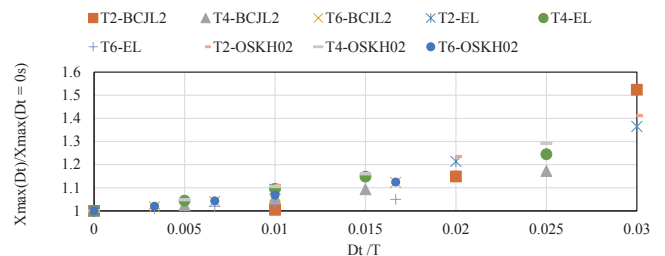


Fig. 4 Effect of Dt

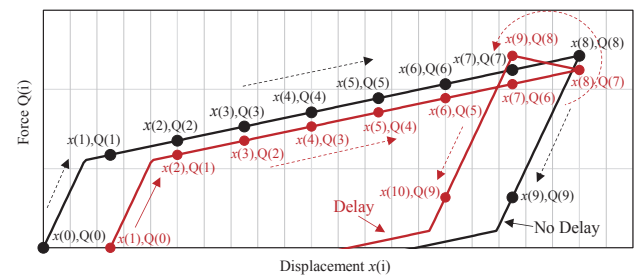


Fig. 5 Effect of Delay time on Restoring Force

体のシミュレーションを行うことができる。SROLT の支配方程式は式 (1) のようになる。

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + \{r\}^a + \{r\}^e = \{f\} \quad (1)$$

$[m]$: Mass matrix
 $[c]$: Damping matrix
 $\{\ddot{x}\}$: Acceleration vector

- $\{\dot{x}\}$: Velocity vector
- $\{r\}^a$: Restoring force vector at upper structure in analytical sub-assembly
- $\{r\}^e$: Restoring force vector at base isolated layer in experimental sub-assembly
- $\{f\}$: External force vector

本システムに用いた数値積分法は、陽な方法にモード除去法を適用した数値積分法である^{8), 9)}。

積層ゴムの実験は、動的 2 軸試験機で行う。積層ゴムの動的な実験では、試験機の摩擦や慣性力の影響、アクチュエータの応答遅れなどが、SROLT の応答結果に大きな影響を与える。Fig. 7 に本報で用いた試験システムの概要を、Table 2 に実験システムの仕様を示す。Fig. 7 の左側部分が既存の動的 2 軸試験機である。

動的 2 軸試験機では、試験体に対して鉛直方向(高さ方向の上部構造から)の荷重は Fig. 7 の試験体上部の油圧アクチュエータ 1 により与えられる。水平方向の変位は Fig. 7 の油圧アクチュエータ 2 により与えられる。試験体に作用する水平荷重および鉛直荷重は、試験体直上に取り付けられた 2 分力計(Load Cell)により荷重を直接計測する。そのため、水平荷重測定時の摩擦力や慣性力の影響のない計測ができる。Fig. 7 の右側部分が、今回新たに追加した部分で、SROLT の解析や変位の指令を与える。使用する PC の OS はマイクロソフト社 Windows 7 64 bit, CPU はインテル社 Core i7-5820K と一般的なものである。試験機の制御は、変位制御とした。解析で得られた水平変位の指令値を、水平アクチュエータにより試験体に与える。試験機より得られた水平荷重データを PC に取り込み、応答計算を行う。

本報の実験には、天然ゴム系積層ゴム(以下、NRB 試験体)と高減衰ゴム系積層ゴム(以下、HDR 試験体)のゴム外径 $\phi 225$ mm の縮小体を用いた。形状を Fig. 8 に、仕様を table 3 に示す。本実験は試験機の制約上縮小体で行うが、スケール効果の影響のあるタイプの積層ゴムを、縮小試験体により実施する場合、応答結果に対してスケール効果の影響¹⁴⁾を考慮する必要がある。

4. SROLT 実験システムの精度検証

4.1 水平変位の制御方法

4 章では、3 章で述べた SROLT システムの精度の検証を行う。

試験体を取り付けない状態で、本報で使用する動的 2 軸試験機を正弦波(振幅 20mm, 周期 5 秒)で加振したところ、おおよそ 0.15s 前後の遅れがあることを確認した。2 章の結果から、SROLT の応答結果に影響を与えてしまう。そこで、遅れを極力小さくするため、保有する動的 2 軸試験機に対して試行錯誤的に行った結果、変位指令値を以下のように設定した。

Fig. 9 に示すように、時間 t から時間 $t+\Delta t$ になる間に変位 $x(t)$ から目標変位(Target) $x(t+\Delta t)$ に達するために、遅れ時間を考慮して $t+\Delta t$ よりの先の時間帯 $t+dt(1) \sim t+dt(n)$ における変位 $x(t+dt(1)) \sim x(t+dt(n))$ から変位指令値(Displacement command value)を求める。 $x(t+dt(1)) \sim x(t+dt(n))$ を式(1)の支配方程式より求め、式(2)に示すように最大値と最小値を除き平均した値を変位指令値とする。文献 4), 11)では、計算機の計算時間の影響もあって多項式を用いている。一方、本報では最近の PC の計算速度の向上により、

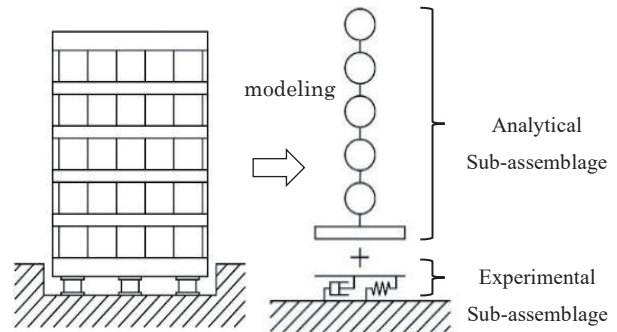


Fig. 6 Modeling and Concept of SROLT

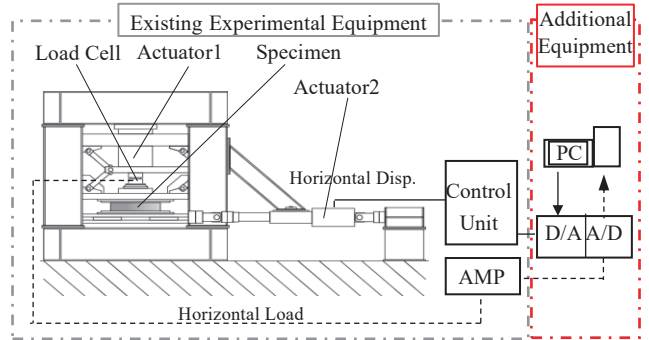


Fig. 7 Experimental System

Table 2 Specifications of Experimental System

①Experimental Equipment	Maximum Load	Vertical Direction	
		Compression : 1000 kN	Horizontal Direction ±200 kN
		Tension : 300 kN	
Maximum Stroke	±100 mm	±300 mm	
Control Method	Load control	Displacement control	

②Control	PC	CPU: Intel core i7-5820K, Memory: 64 GB OS: Microsoft Windows 7 64 bit
	A/D:D/A Converter	16 bit (Input 16 ch Output 2 ch)
	Control Software	Labview 2013

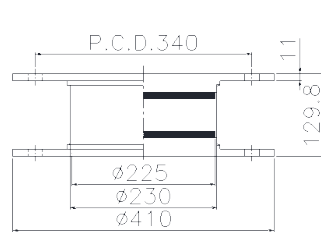


Fig. 8 Test Laminate Rubber (HDR specimen)

Table 3 Test Laminated Rubber Detail Specification

Type	NRB	HDR
Diameter (mm)	225	225
Rubber thickness (mm)	1.6×35layer	1.6×28layer
Shear Modulus (MPa)	0.39	0.62
Internal Steel sheet thickness (mm)	1.0×34layer	1.0×27layer
First shape factor	35.2	35.2
Secondary shape factor	4	5

変位指令値を過去の変位履歴から多項式を用いて外挿した値とするのではなく、支配方程式から直接求めるため、補正を行う必要がない。

Displacement command value

$$= \left\{ \sum_{i=1}^n [x(t+dt(i))] - \max[x(t+dt(i))] - \min[x(t+dt(i))] \right\} / (n-2) \quad (2)$$

$x(t+dt(1)) \sim x(t+dt(n))$ と複数の変位を求めたのは、傾向の違う値を削除し、平均すれば安定した値になると考えたためである。ただし、 $dt(i)$ の値は振動方程式の解の安定性を考慮し、系の 1 次固有円振動数 ω から $\omega \cdot dt(i) \leq 0.5$ を満足する¹⁵⁾ものとする。 $dt(1) \sim dt(n)$ の値は実験により最適な条件を求める。

4.2 精度検証

本システムでの精度を確認するため、1 質点モデルを用いて SROLT の実験を行う。積層ゴムの 100% 時の等価剛性に対して固有周期が 2s となるようにモデルを設定した。鉛直方向の面圧は、15 MPa で一定とし、地震動を Fig. 10 に示す加振周期 0.5s の正弦波 1 波だけ与えた。最大加速度は、NRB 試験体の応答変位が 40 mm 程度となるように 120 cm/s^2 とした。解析の時間間隔 $\Delta t = 0.01 \text{ s}$ とした。本報では、 $n=5$, $dt(1) \sim dt(5)$ を 0.03~0.07s の 0.01s 間隔とした。これらの値は試行錯誤的に決めた。設定手法については今後の課題である。

応答変位の時刻歴を Fig. 11 に示す。黒線が目標変位 (Target), 赤線が試験体の実変位 (Measured) である。図中①~④の各ピーク時の遅れ時間 Dt の平均値は、NRB 試験体を用いた実験で遅れ時間 $Dt = 0.013 \text{ s}$ ($Dt/T = 0.0063$), HDR 試験体を用いた実験で遅れ時間 $Dt = 0.015 \text{ s}$ ($Dt/T = 0.0075$) となり、遅れ時間による影響を Fig. 4 と比較すると $X_{\max}(Dt) / X_{\max}(Dt = 0)$ が 1.05 程度以下であることから、遅れ時間による影響は小さい。Fig. 12 に示す目標変位と復元力 (実験値) の履歴と実変位と復元力 (実験値) の履歴を比較するとほぼ同様となっている。

NRB 試験体の実験で、遅れ時間による影響を Fig. 13 に示す。遅れ時間が大きくなると、2 章で行った数値解析結果と同様、振幅が大きく、周期が長くなる。Fig. 14 に目標変位と復元力 (実験値) の履歴を示す。遅れ時間により、目標変位に実変位が達していないと、その差分だけ異なった荷重をフィードバックして SROLT の応答計算を行う。Fig. 12 a) に示す $Dt/T = 0.0063$ での目標変位と復元力 (実験値) の履歴は、時計回りの履歴で履歴面積を有するが、Fig. 14 a) の $Dt/T = 0.0125$ での目標変位と復元力 (実験値) の履歴は、履歴面積がほとんどない。Fig. 14 b) の $Dt/T = 0.03$ での目標変位と復元力 (実験値) の履歴は反時計回りの履歴となる。Fig. 15 に NRB 試験体の遅れ時間による影響の概念図を示す。 $Dt/T = 0.03$ の場合、黒線で示す試験体の履歴に対して遅れ時間により、Fig. 5 と同様に、目標変位に対して実変位の遅れた分だけ復元力に差異が生じ、反時計回りの履歴を示す。その結果、試験体の実際の履歴より剛性が低下し、振動系にエネルギーを入力するような履歴となっている。

正弦波での効果が確認できたことから、NRB 試験体を用いて Fig. 16 に示す EL Centro NS 波 (最大加速度 45 cm/s^2) の加振を行った。結果を Fig. 17, 18 に示す。黒線で示す SROLT の目標変位に対して赤線で示す実変位の遅れ時間はすべてのピーク時における平均値で 0.01s 程度 ($Dt/T = 0.005$) と小さく、履歴はよく一致している。

新たに開発した SROLT システムは、試験機の応答遅れの小さいシステムあることが確認できた。ただし、振幅が数ミリ程度の小さい加振を行う場合など試験機の能力上限界があるので適用範囲を注意して実験を行う必要がある。

5. 免震建築物の SROLT による応答シミュレーション

5.1 実験概要

5 章では、免震層に HDR を用いた超高層免震建築物の長周期地震および風外力の応答について、本 SROLT システムを用いたシミュレーションを行い、SROLT の有用性を示す。

検討した建築物は、42 階建て (以下 42F モデル) の RC 造建築物の基礎免震構造である¹⁶⁾。建物形状および免震部材の配置を Fig. 19,

20 にそれぞれ示す。使用する HDR は 16 基と、弾性すべり支承 16 基である。上部構造は 43 質点のせん断ばねモデルに置換した。上部構造の 1 次固有周期は 3.13s, 免震層のせん断ひずみ 100% 時の等価周

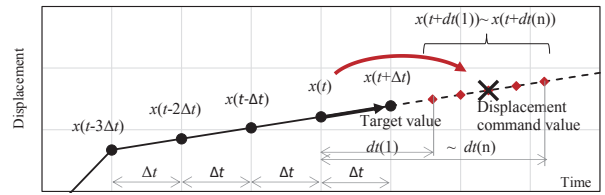


Fig. 9 Setting of Displacement Command Value

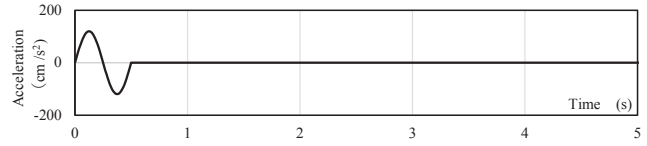
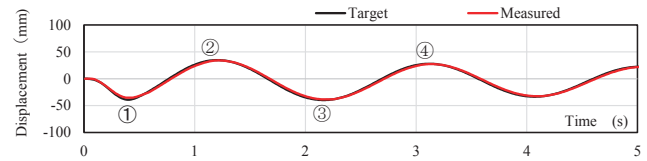
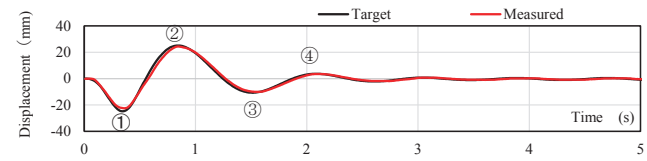


Fig. 10 Input Acceleration

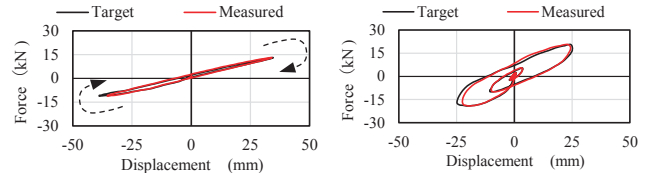


a) Result of NRB specimen



b) Result of HDR specimen

Fig. 11 Response of Displacement



a) NRB specimen ($Dt/T = 0.0063$) b) HDR specimen ($Dt/T = 0.0075$)

Fig. 12 Restoring Force-Displacement

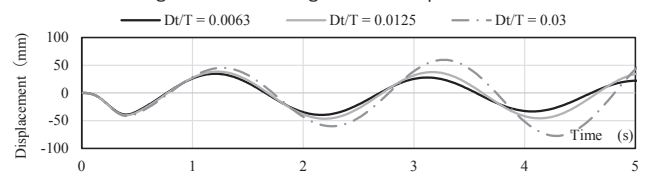
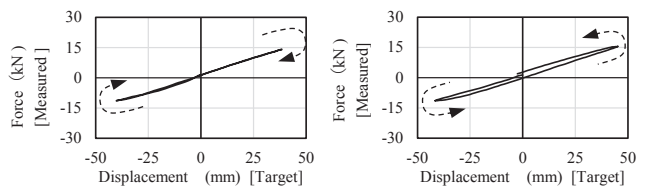


Fig. 13 Response of Displacement (NRB specimen)



a) $Dt/T = 0.0125$ b) $Dt/T = 0.03$

Fig. 14 Restoring Force-Displacement (NRB specimen)

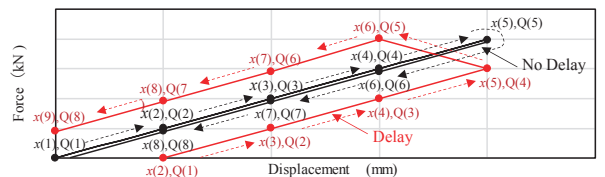


Fig. 15 Effect of Delay time on Restoring Force

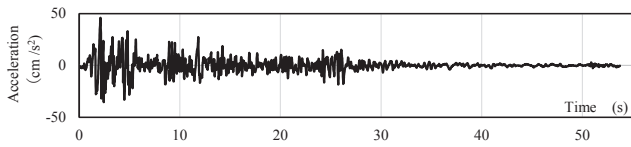


Fig. 16 Input Acceleration (EL Centro NS)

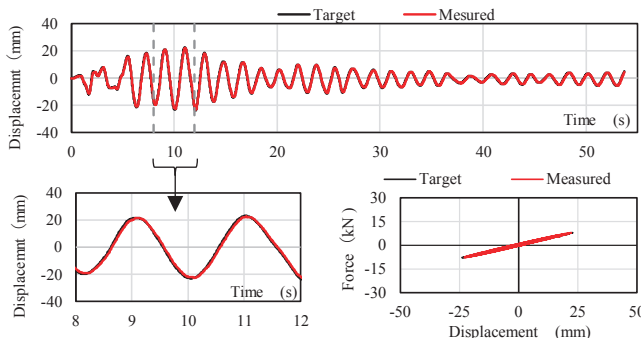


Fig. 17 Response Displacement

Fig. 18 Characteristic of Restoring force

期は 6.45s である。上部構造は、弾性、各次の減衰定数を 2% とした。地震波として、長周期地震動の此花 (OSKH02 (平均))¹³⁾ × 80% を用いる。加速度波形を Fig. 21 に示す。OSKH02 (平均) は、固有周期 6~7s に卓越した応答を示す地震波で、継続時間は 739.8s と長い。

一方、風力波形は、極めて稀に発生する暴風 (再現期間 500 年) に相当する時刻歴風力波形 (以下、Level 2 相当波形) を用いる¹⁷⁾。地表面高さ約 100 m 位置における風方向の風力波形を Fig. 22 に示す。文献 16) の風力波形は、Level 2 相当の風荷重に至るまで最初の 10 分間、徐々に荷重を増分したのち、Level 2 相当の風荷重を 10 分間与える波形となっているが、本実験においては、最初の 30s で Level 2 相当の風荷重に到達するような風力波形とした。

本システムに用いた数値積分法は、陽な方法にモード除去法を適用した数値積分法である^{8), 9)}。これは、応答全体には、ほとんど含まれない高次モードの成分を除去できる手法である。高い自由度をもつ建築物モデルの実験をする場合でも、 Δt をむやみに小さくすることがないので、計算量を削減することができる。解の精度を確保するため、モデルの固有円振動数を ω_m とした時、 $\omega_m \cdot \Delta t < 0.5$ を満足することが必要である¹⁵⁾。本建築物モデルの場合、全 43 モードを考慮すると $\Delta t < 0.004s$ とすることが必要であるが、計算時間の制約から 10 次を超えるモードを除去し、 $\Delta t = 0.01s$ で実験を行う。その時、 $\omega_{10} \cdot \Delta t = 0.275 < 0.5$ で、解の精度を確保している。事前に、数値解析により 10 次を超えるモードを除去した場合と全 43 次モードを考慮した場合で比較を行い、高次モードの影響が小さいことを確認している。

試験体は、Fig. 8 の HDR 試験体を用いる。鉛直方向の面圧は、基準面圧 15 MPa で一定とし、HDR 試験体への水平変形を建築物モデルの免震層に設置された HDR と HDR 試験体のせん断ひずみが等価となるように与える。HDR の復元力は、ゴムの断面積に比例するとして、建築物モデルの免震層に設置された HDR の総ゴム断面積と HDR 試験体のゴム断面積の比率分を乗じて求めた。弾性すべり支承は摩擦係数が十分小さいとして、復元力を考慮しないこととした。

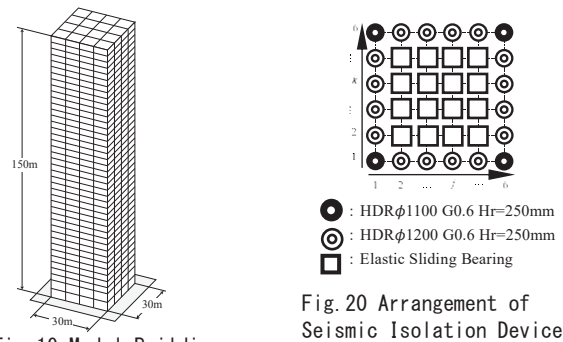


Fig. 19 Model Building

Fig. 20 Arrangement of Seismic Isolation Devices

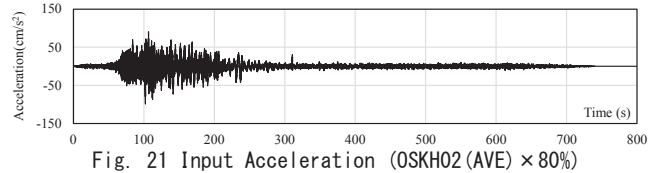


Fig. 21 Input Acceleration (OSKH02 (AVE) × 80%)

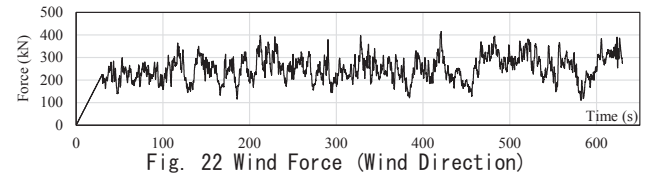


Fig. 22 Wind Force (Wind Direction)

5.2 実験結果

SROLT の地震応答結果として HDR のせん断ひずみの時刻歴と履歴図を Fig. 23 a), 24 a) に示す。せん断ひずみは、特に 100~300s の間に振幅が大きくなっている。履歴図には、せん断ひずみ 200% の振幅が発生している時間 1, 2 の履歴と、その前後の時間でせん断ひずみ 100~150% の振幅が発生している時間①~③の履歴を示す。HDR が多数繰り返し変形すると、剛性が低下していく傾向がある¹⁴⁾が、本実験では、顕著な違いは見られない。これは、縮小試験体を用いたためと考えられ、今後はスケール効果¹⁴⁾を考慮した検討が必要となる。

SROLT の風応答結果として HDR のせん断ひずみ、せん断応力の時刻歴と履歴図を Fig. 23 b), 24 b) に示す。せん断応力の振幅は概ね一定であるが、せん断ひずみは徐々に変形が増えている。Fig. 24 b) の履歴図で、加振開始から前半 5 分 (黒線) と後半 5 分 (グレー線) と比較すると、HDR に水平クリープが生じていることが確認できる。鉛プラグ入り積層ゴム⁵⁾と同様に水平クリープの発生を確認できる。

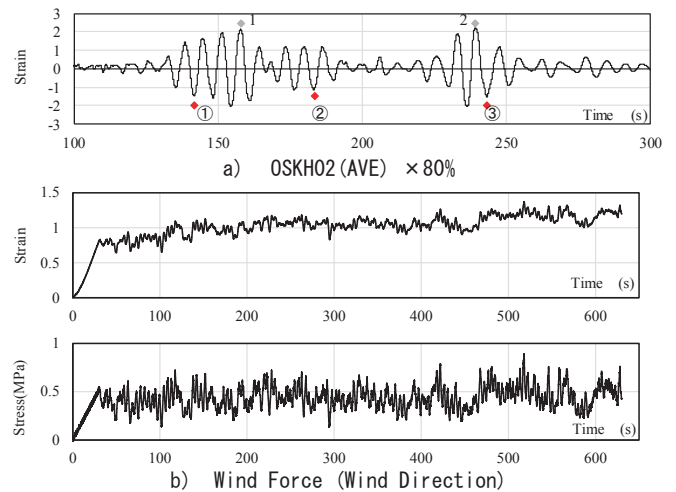


Fig. 23 Response of HDR

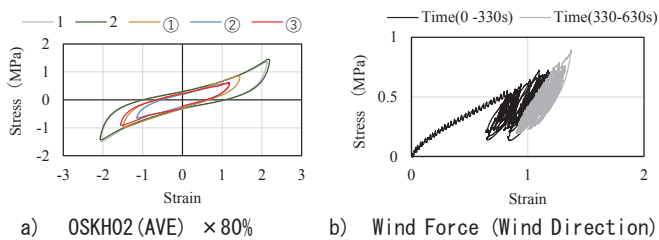


Fig. 24 Stress-strain

6. まとめ

本報では、既存の動的 2 軸試験機を用いて開発したサブストラクチャ・リアルタイム・オンライン応答実験システムが、免震建築物に対して、地震および風応答をシミュレーションできる試験機の応答遅れの小さいシステムであることを示す目的で行った実験結果を報告した。以下に得られた知見を示す。

- ・解析的な検討により、遅れ時間が大きくなると応答変形が大きくなる傾向にあることが分かった。遅れ時間による応答への影響は、遅れ時間 Dt / 固有周期 T で示すことができる。 $Dt/T \leq 0.01$ であれば、SROLT の応答結果に与える影響は小さい。

- ・新たに開発した SROLT システムは、試験機の応答遅れを考慮した変位指令値の適用により、 $Dt/T \leq 0.01$ となることを今回の検証で確認した。免震建築物の挙動をシミュレーションするのに十分な精度を有している。

- ・本 SROLT システムを用いて、免震部材に HDR を用いた超高層免震建築物の長周期地震および風外力の応答シミュレーションを行い、HDR の風荷重による水平クリープを確認した。

試験体が縮小体のため、スケール効果¹⁴⁾など考慮すべきことはあるが、既存の動的 2 軸試験機を用いて開発した SROLT システムは、数値積分法に、陽な方法にモード除去法を適用することで Δt を緩和することができるため、高い自由度を持つ高層免震建築物に対しても地震および風応答をシミュレーションできる試験機の応答遅れの小さいシステムであることを確認することができた。今後、さまざまな免震建築物の地震および風外力の挙動について検討を進めていく。

謝辞

検討にあたり、サンユウシビルエンジニアリング 土屋敬宣氏より意見をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 免震設計指針, 日本建築学会, 2013.10
- 2) Nakashima, M., et al.: Integration Techniques for substructure pseudo dynamic test (Pseudo dynamic test using substructuring techniques), Journal of Struct. Constr. Eng, AIJ, No.417, pp107-117, 1990.11(in Japanese)
中島正愛, 石田雅利, 安藤和博: サブストラクチャ仮動的実験のための数値積分法, 日本建築学会構造系論文集, 第 417 号, pp107-117, 1990.11
- 3) Kanda, M., et al: IMPLICIT INTEGRATION SCHEME BASED ON INITIAL STRESS METHOD FOR SUBSTRUCTURE ON-LINE TEST, Journal of Struct. Constr. Eng, AIJ, No.473, pp75-84, 1995.7(in Japanese)
神田亮, 安達洋, 白井伸明, 中西三和: サブストラクチャ・オンライン応答実験法に適用する初期応力法に基づく陰な積分法, 日本建築学会構造系論文集, 第 473 号, pp75-84, 1995.7
- 4) 中島正愛, 政岡暢昭: リアルタイムオンライン応答実験システムの開発と

免震建物地震応答への適用 (その 1, その 2), 日本建築学会大会学術講演会梗概集, B-2, pp961-964, 1998.9

- 5) Takaoka, E., et al: LONG-DURATION LOADING TEST ON LEAD RUBBER BEARINGS CONSIDERING WIND LOAD, AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 18, No.38, pp61-66, 2012.2(in Japanese)
高岡栄治, 竹中康雄, 近藤明洋, 引田真規子, 片村立太, 飯場正紀, 大熊武司: 風荷重を想定した鉛プラグ入り積層ゴムの長時間加振実験, 日本建築学会技術報告集, 第 18 巻, 第 38 号, pp.61~66, 2012.2
- 6) Ito, A., et al: EFFECTIVENESS OF REAL TIME HYBRID TEST IN SEMI-ACTIVE CONTROLLED BASE ISOLATION SYSTEM, Journal of Struct. Constr. Eng., AIJ, Vol. 76, No.663, pp891-879, 2011.5(in Japanese)
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, pp891-897, 2011.5
- 7) 五十子幸樹, 池永昌容, 谷口 洵, 菅野秀人, 黒澤祐, Brian M. Phillips: 非線形を有するダンパーに対するリアルタイム・ハイブリッドシミュレーションの適用 その 1~3, 日本建築学会大会学術講演会梗概集, B-2, pp899-904, 2016.8
- 8) A.Blakebroth, M.S.Williams, A.P.Derby, D.M.Williams: The Development of real-time substructure testing, The Royal Society 2001,359,pp1869-1891, 2001.
- 9) 扇谷匠己, 谷脇紗和, 神田 亮, 丸田榮藏: ハイブリッド空力振動法に適用する無条件安定と等価な陽的積分法 多自由度系弾性挙動に対する検討, 日本風工学会論文集, 第 114 号, pp1-15, 2009.1
- 10) Nakashima, M., et al.: Part3 :EXPERIMENTAL ERROR GROWTH IN PSEUDO DYNAMIC TESTING, Journal of Struct. Constr. Eng, AIJ, No.386, pp36-48, 1988.4
- 11) 中川正紀, 堀内敏彦, 亀谷正嗣, 今野隆雄: 加振機の応答遅れを補償した実時間ハイブリッド実験システムの開発, 日本機械学会論文集 (C 編), 61 巻 584 号, pp64-72, 1995.4
- 12) Matsuyama, T., et al: DEVELOPMENT OF NEW HYBRID AERODYNAMIC VIBRATION EXPERIMENTAL SYSTEM WITH MULTI-SIMULTANEOUS AIR PRESSURE SENSORS IN 3-DIMENSIONAL FLOW, AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 22, pp139-144, 2005.12(in Japanese)
松山哲雄, 神田 亮, 平田和也, 名波 航, 丸田榮藏: 多点同時風圧計を組み込んだ 3 次元ニューハイブリッド空力振動実験システムの開発, 日本建築学会技術報告集 第 22 号, pp139-144, 2005.12
- 13) 大川出, 佐藤智美, 藤堂正喜他: 超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討-長周期地震動作成のための改良経験式の提案と南海トラフ 3 連動地震による超高層・免震建物の応答解析, 建築研究所資料, No.144 号, 2013.8
- 14) Mori, T., et al.: MODELING FOR ANALYSIS OF HIGH DAMPING RUBBER BEARINGS WITH EFFECTS OF FATIGUE AND TEMPERATURE INCREASE DUE HIGH DAMPING RUBBER BEARINGS, Journal of Struct. Constr. Eng., AIJ, Vol. 77, No.680, pp1517-1526, 2012.10(in Japanese)
森 隆浩, 加藤秀章, 室田伸夫: 繰り返し変形による疲労と温度上昇の効果を取り入れた高減衰積層ゴムの解析モデルの検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻 第 680 号, pp1517-1526, 2012.10
- 15) 神田 亮, 扇谷匠己, 矢作 貴, 丸田榮藏: ハイブリッド振動法の制御アルゴリズムに関する研究-無条件安定と等価な陽的積分法-, 日本大学生産工学部研究報告 A, 第 8 巻第 1 号, pp41-55, 2005.6
- 16) 竹内貞光, 山下忠道, 神田 亮, 森 隆浩, 加藤秀章, 扇谷匠己, 梁川幸盛: 高減衰ゴム系積層ゴムを適用した超高層免震建物の XY 方向風応答シミュレーション, 構造工学論文集, Vol.60B, pp499-506, 2014.3
- 17) 扇谷匠己, 神田亮, 山下忠道, 梁川幸盛, 佐藤大樹, 原田浩之, 中村遼太郎: 台風通過時に高層免震建築物に作用する風外乱の作成とその応答に関する研究, 構造工学論文集, Vol.59B, pp427-433, 2013.3

[2021 年 6 月 2 日原稿受理 2021 年 8 月 17 日採用決定]