



電動スライダを用いた二軸振動台の開発と評価

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2018-04-09 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 西村, 拓巳, 真野, 純司, 岩本, いづみ, 阪本, 吉一 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24729/00007513

電動スライダを用いた二軸振動台の開発と評価

西村拓巳*, 真野純司**, 岩本いつみ***, 阪本吉一****

Development of Two-axis Shaking Table Using Electric Sliders

Takumi NISHIMURA*, Junji MANO**, Izumi IWAMOTO***, and Yoshikazu SAKAMOTO****

要 旨

地震動を再現するために、電動スライダを2台組み合わせた二軸振動台を開発した。地震動の平面変動を直交する二軸に分解し、各軸の時系列の位置の変化をマイコンで制御した電動スライダの動きで再現した。地震波を含む任意波形は、パソコン上のC#言語で開発されたWindowsアプリで生成しUSB通信を介して振動台に送信する。振動台の動きは加速度センサによって測定する。代表的な地震波に対して振動台の加速度を測定し時刻歴加速度波形と地震波応答スペクトルを計算した。実験計測波は目標地震波をよく再現していることを示した。

キーワード：模型実験装置，振動台，二軸，電動スライダ，地震動，応答スペクトル

1. はじめに

世界有数の地震国である日本では、建造物の耐震化が急務であるとともに、専門家だけではなく広く市民に対する防災教育の必要性が高まっている。また、高専や大学で土木・建築を学ぶ学生に対しては、地震による地盤と構造物の振動について深い理解が求められている。

これらの目的のため、著者らは、構造物可視化振動実験装置^[1]と木造住宅の耐震性能実験装置^[2]を開発してきた。これらの実験装置は、建物の固有周期、共振現象、耐震・制震・免震の効果などを容易に可視化することができる。さらに、これらの実験装置に対する加震装置として一軸振動台を開発した^[3]。市販の電動スライダにマイコンとパソコン(PC)を組み合わせることにより、地震波を含む任意波形の一次元振動を再現することができる。評価の結果は、実際の地震動に対しても十分な再現性を持つことを示している^[3]。写真1は一軸振動台の全体像を示す。

振動台は、地震動を可視化して体験できるだけでなく、高い再現性により、その上に載せた構造物に対して

定量的な実験を繰り返し行うことができる。

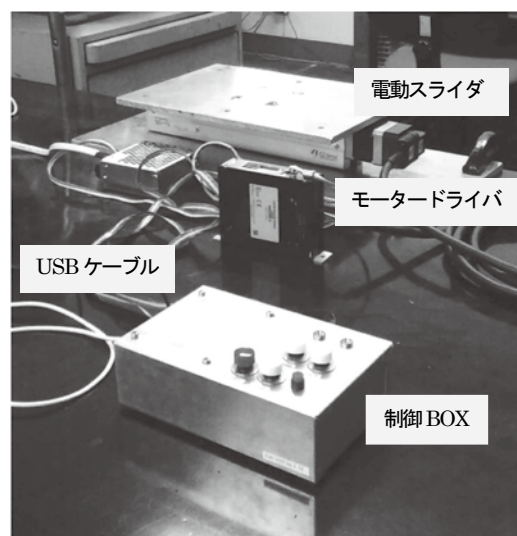


写真1 一軸振動台

本研究では、一軸振動台を拡張して二軸振動台を開発する。二軸振動台は、地震動の平面的運動を再現するため、立体的な構造物に対する振動の影響を調べることができる。

2章では使用する電動スライダの仕様について述べる。3章は二軸振動台の物理的構成とシステム構成について述べる。4章では本振動台の評価方法と結果について述べる。5章は本論文のまとめである。

2017年8月21日 受理

* 総合工学システム専攻 電気電子工学コース (Advanced Course, Dept. of Technological Systems : Electrical and Electronic Engineering Course)

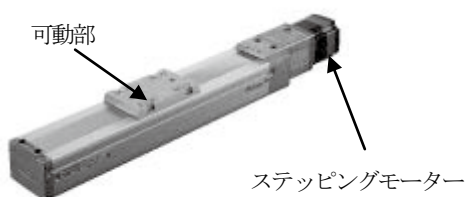
** 電子情報コース (Electronics and Information Course)

*** 都市環境コース (Civil Engineering and Environment Course)

**** 技術教育支援室 (Support Center for Technical Education)

2. 電動スライダ

電動スライダは製品の組み立て工場などで、部品の高速搬送や高精度な位置決めで使用されている。移動量や速度に応じてさまざまな製品が開発されている。本研究では、オリエンタルモーター(株)のEZS6-D020-AZAA-3^[4]を使用した。外観と仕様をそれぞれ写真2および表1に示す。写真2(a)は電動スライダ本体部を示す。同2(b)はスライダのステッピングモーターを駆動するモータードライバAZD-A^[5]である。



(a) 電動スライダ本体



(b) モータードライバ

写真2 電動スライダとモータードライバ

表1 電動スライダの主要仕様

項目	仕様
使用モーター	ステッピングモーター
駆動方式	ボールねじ
ストローク	200 [mm]
リード	12 [mm/回転]
回転パルス	1200 [パルス/回転]
位置決め精度	±0.02 [mm]
最高速度	800 [mm/s]
可搬質量	~30 [kg]

電動スライダは、ステッピングモーターの回転をボールねじによって直線運動に変換する。モーターの回転量は、入力パルス数によって正確に制御することができる。

表1より、この電動スライダは、最大振幅が200 [mm]、最大移動速度が800 [mm/s]以内の1次元地震動を再現でき

ることが分かる。また、可搬質量が大きいため、電動スライダを連結したり、構造物模型を置いたりすることができる。

この電動スライダとモータードライバをそれぞれ2台使用し、X軸スライダの上に垂直方向にY軸スライダを直結させて二軸振動台を構成する。

3. 二軸振動台

3.1 動作原理

一般に地震動は3次元(東西方向, 南北方向, 上下方向)の変動としてとらえられるが、本研究では、平面上の変動の再現を考える。

図1は平面上の微小変位 ΔA を示す。 ΔA はX軸方向およびY軸方向成分に分解できる。この分解された変位成分を以下の原理に基づき、同期をとりながら独立に制御することにより平面上の変位を再現する。

地震動による位置の変化は固定サンプリング周期の離散値として与えられるものとする。離散化された位置データと時間の関係を図2に示す。隣り合う位置データの差分を計算することにより時間ステップごとに必要な移動量を求めることができる。

本研究で開発した二軸振動台は、各電動スライダに対して、時間ステップ t_i ごとに移動量 δ_i を連続的に与えることにより地震動を再現するものである。時間ステップが十分小さくスライダの応答性が高いとき、よい近似であると考えられる。時間ステップは、一般的な地震波の観測データにあわせて10 [ms]とした。

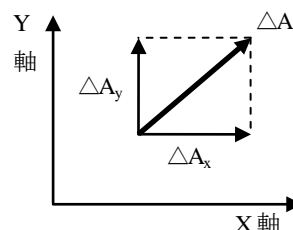


図1 平面上の微小変位

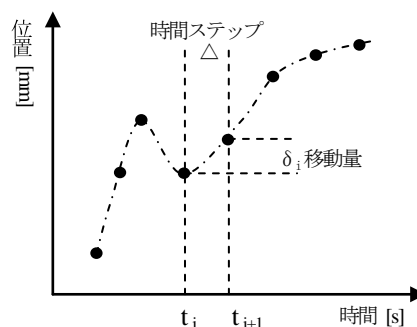


図2 時間ステップと移動量

3.2 二軸振動台の構成

本研究で開発した二軸振動台の全体構成を図3に示す。電動スライダとモータードライバはオリエンタルモーター(株)の既製品を使用した。二軸振動台の全体像、電動スライダ部、制御部をそれぞれ写真3、写真4、写真5に示す。

写真4に示すように、製作した二軸振動台は水平面を確保した重量350[kg]の花崗岩製定盤の上にX軸電動スライダが固定されている。そしてX軸の垂直方向にY軸電動スライダを直結させる構造になっている。振動台の加速度は、振動面の裏側に取り付けられたX軸、Y軸用の独立した加速度センサによって同時測定する。

写真5の制御BOXには、電動スライダの状態表示と動作制御を行うボタンとスイッチが取り付けられている。RESETボタンはコントローラをリセットする。Alarm RESETボタンは、電動スライダが仕様限界(動作範囲、速度など)を超えて異常停止したとき、モータードライバから出力された警告信号をリセットする。HOMEボタンは電動スライダの位置を初期位置に戻す。Freeボタンは、手動による電動スライダの位置調整をON/OFFする。2つのトグルスイッチは、各軸のスライダの位置を前後に移動させる。

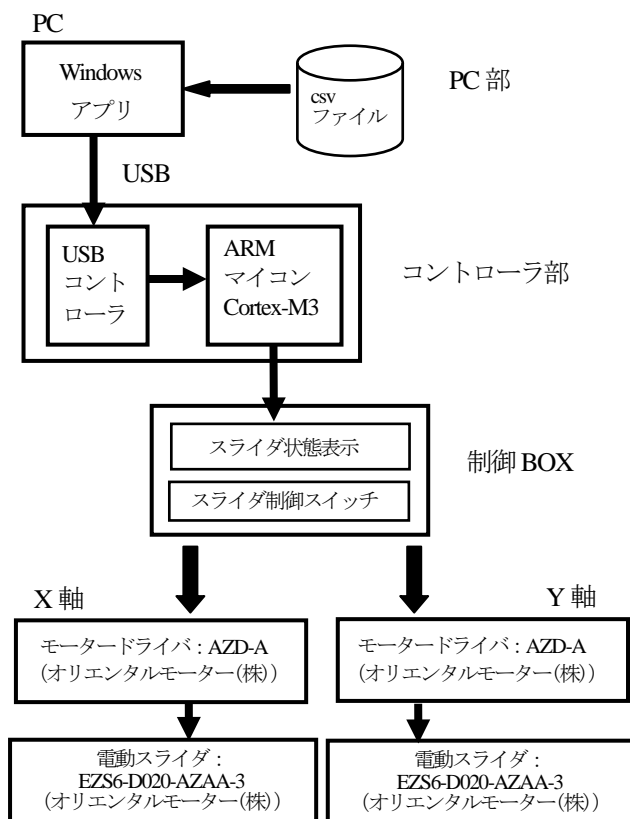


図3 二軸振動台の構成

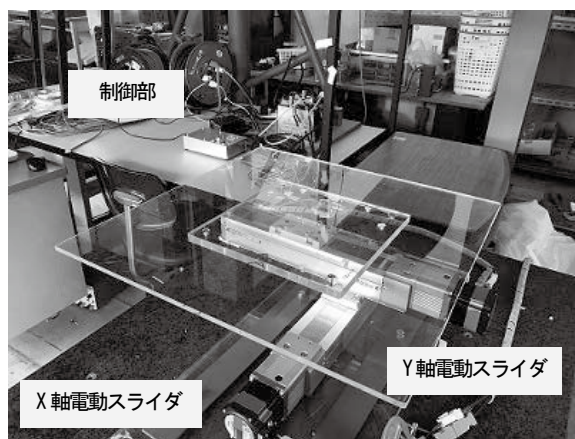


写真3 二軸振動台 (全体像)

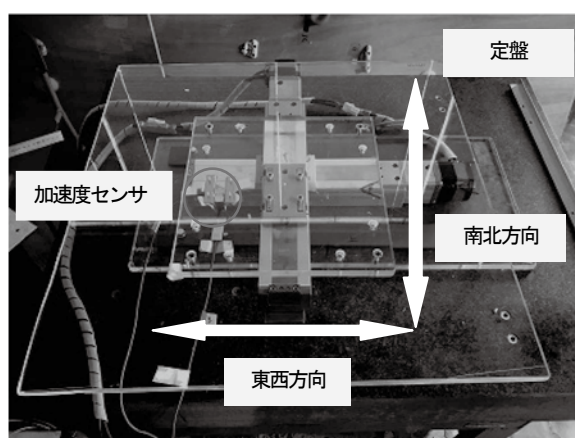


写真4 電動スライダ部

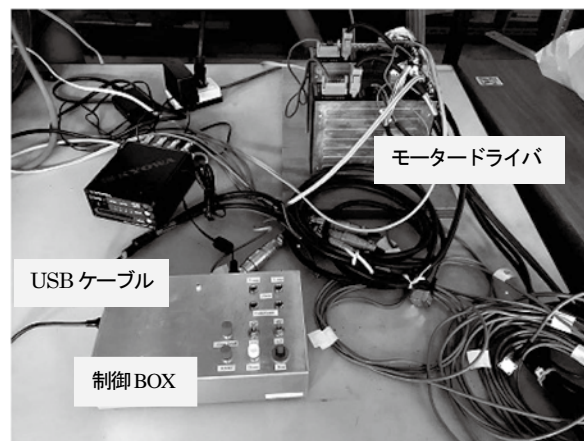


写真5 制御部

PC部は、時間ステップ10[ms]の時系列で与えられる位置データを外部csvファイルから読み込み、移動量に変換する。この移動量はモーター仕様にしたがってパルス数に変換されUSBポートを介してコントローラ部に送信される。これらの処理はすべて、Microsoft Visual Studio 2010のWindowsフォームアプリケーションを使ってプログラムした。開発にはC#言語を使用した。プログ

ラムを Windows アプリとして実装したことにより, 特別な動作環境を持たない通常の Windows PC を使って誰もが簡単に操作することができる。

図4に示す Windows アプリの仕様について詳しく述べる。①では入力する波形を「正弦波」, 「地震波」から選択する。「正弦波」を選択した場合, ②~⑤でそれぞれ X 軸方向 (東西方向) の振幅および振動数, Y 軸方向 (南北方向) の振幅および振動数を入力する。入力後, 「実行」ボタンをクリックするとデータをコントローラ部へ送信する。「正弦波」を実行した場合, 指定された単振動を 100 秒間繰り返す。「地震波」を選択した場合, ②~⑤には何も入力せず「実行」ボタンをクリックする。csv ファイルを選択する画面に切り替わるので, 地震波の位置データが保存されているファイルを選択する。このとき, ⑥にはファイルのパス名が表示される。また, 電動スライダの動作中に「停止」ボタンをクリックすると, 動作を停止させプログラムを初期状態に戻す。「終了」ボタンをクリックすると, 動作を終了させ Windows フォームを閉じプログラムを終了する。

本仕様は, 振動波形の位置データを外部 csv ファイルで指定できるため, 各種地震波に対応することができる。csv ファイルの形式を図5に示す。1 列目に時間[s], 2 列目に東西方向の位置データ[mm], 3 列目に南北方向の位置データ[mm]を入力する。

コントローラ部は, 時間ステップ 10 [ms]ごとに指定された数のパルスを生じさせモータドライバを駆動する。コントローラ部には, 高速処理と多数の高機能タイマ内蔵を特徴とするマイコンボード STBee⁶⁾を使用した。STBee の仕様を表2に示す。

図4 Windows Form

	A	B	C	D
1	0	-22.79	8.28	
2	0.01	-22.28	8.28	
3	0.02	-21.85	8.27	
4	0.03	-21.37	8.25	
5	0.04	-20.89	8.22	
6	0.05	-20.4	8.19	

図5 csv ファイルの形式

表2 STBeeの主要仕様

項目	仕様
プロセッサ	32bit ARM コア内蔵 STM32F103VET6
クロック速度	72 [MHz]
プログラムメモリ	512 [KB]
SRAM	64 [KB]
IO ポート	80 [bit]
高機能タイマ	8 系統内蔵
通信機能 (USART)	5 系統内蔵

プロセッサは, 以下の4プロセスを同時に処理する。

- (1) USB データの受信
- (2) 10 [ms]の時間計測
- (3) パルス波形の出力
- (4) パルス数のカウント

(1)のプロセスでは, PC 部から受信したデータを全て配列に保存する。そのため扱うことのできる地震波の時間長はマイコンの SRAM 容量に依存する。地震波の位置データが 10 [ms]周期のとき, STBee の SRAM が 64 [KB]であるので約 160 [s]まで扱うことができる。(2)と(3)のプロセスをメインループとして繰り返し実行する。10 [ms]の時間計測は, 内蔵タイマを使用する。パルス波形の発生は, 内蔵タイマの PWM モードを使用する。出力されたパルス波は別のタイマによってカウントする。カウント値が規定値に達したら割り込み処理によりパルス波の出力を停止する。処理の時系列を図6に示す。パルス波の出力とカウントを高機能タイマによって各々独立に実行させるため, プロセッサの負荷が大幅に軽減され, 複数のプロセスを並列化することができる。本研究では, 各スライダをそれぞれ独立に制御するため, 図6のようにタイマ B, タイマ C の役割のタイマをそれぞれ二つずつ使用している。

なお, マイコンボードのプログラム開発には, CooCox の CoIDE 開発環境⁷⁾と C 言語を使用した。

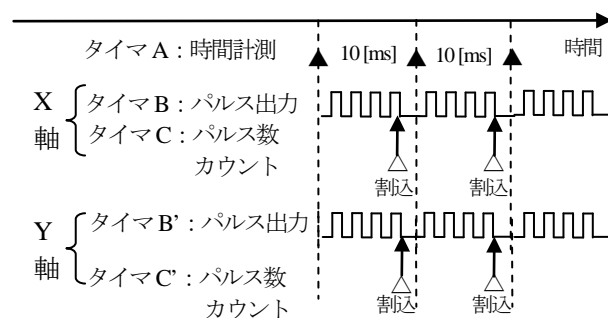


図6 プロセッサの時系列処理

4. 二軸振動台の評価

4.1 モータードライバのフィルタ設定

振動台の性能評価に先立って、モータードライバに実装されているフィルタの最適値を調査した。

このモータードライバには、ステッピングモーターの動作を制御する16段階に設定できるフィルタが内蔵されている。この値を高くするとスライダ運動時の振動を抑え、起動・停止時の動作が滑らかになる。しかし、高くしすぎると制御の同期性が失われてしまう。

振動数2 [Hz]、振幅20 [mm]に固定した単振動運動により、フィルタの適切な値を調べた。その結果を図7～図9に示す。図の縦軸は加速度 [gal]¹、横軸は時間 [s]を表している。また、加速度計から得られた実測値と理論値をそれぞれ、細実線と太実線で示している。図7～図9より、フィルタ値が小さい場合、正弦波形が良く再現できているが、動作音を聞くと、滑らかでない引っかかるような雑音が認められた。逆にフィルタの値が大きいと同期性が失われ、実測値のピーク値が理論値のピーク値に達していないことが分かる。このピーク値が低くなる現象はフィルタ値が7以上で認められた。これらの結果を踏まえて本研究では、図8のフィルタ値4を使用するのが最適であると考えた。以下の各評価ではフィルタ値は4に固定した。

4.2 単振動の再現

本実験装置を用いて、振動数および振幅を変化させた単振動実験を行った。X、Y 両軸に同一の単振動波形を入力し、振動台に取り付けられた加速度計により運動時の加速度を測定する。結果を図10～図15に示す。各図の縦軸は加速度 [gal]、横軸は時間 [s]、太実線は理論値、細実線は実測値を示す。なお、実測値には、カットオフ周波数が20 [Hz]のローパスフィルタ処理を適用した。

図10～図15より、加速度の絶対値の広い範囲で、理論値と実測値はほぼ一致していることが分かる。また、X、Y 軸波形のピークおよび零点の位置の比較より両軸の同期が正しく取れていることが分かる。しかし、Y 軸のみピーク時の値が理論値を超えている部分が見られる。これは、二軸振動台の物理的構造が、X 軸電動スライダの上にY 軸電動スライダを取り付ける構造になっているため、やや不安定になっているためであると考えられる。そのため、測定データに振動ノイズなどが重畳して少し大きくなっているのではないかと推測する。

本実験により、振動数1 [Hz]、振幅25 [mm]～振動数8 [Hz]、振幅5 [mm]の範囲では、二軸振動台の動作は理論値とほぼ一致することが確認できた。

¹ 地震動の加速度の単位、1 [gal] = 1 [cm/s²]

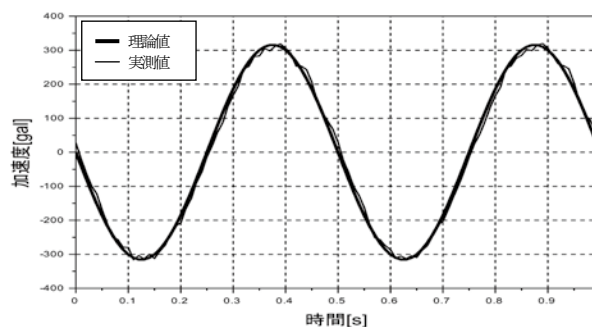


図7 単振動 (振動数2 [Hz]、振幅20 [mm]、フィルタ値0)

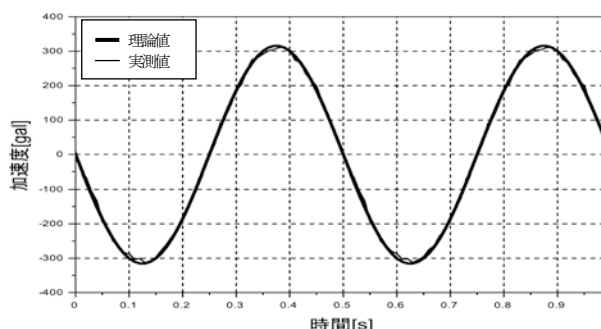


図8 単振動 (振動数2 [Hz]、振幅20 [mm]、フィルタ値4)

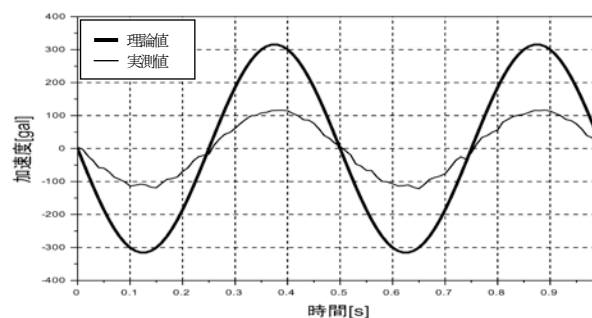


図9 単振動 (振動数2 [Hz]、振幅20 [mm]、フィルタ値F)

4.3 加速度と変位

地震動における観測量は加速度である。各観測地点に設置された地震計により加速度が測定される。公的な地震データベースには、南北方向、東西方向、上下方向の加速度の時間的変化が観測点別に登録されている^[8]。

本研究で開発した電動スライダを用いた振動台は、位置の時間的変化を正確に追跡することにより地震波を再現する。したがって、本振動台で地震波を再現するためには、観測量である加速度データから変位データを求める必要がある。この問題については、いくつかの方法が提案^[9]されており、計算プログラムも公開されている。

本研究では、福山大学鎌田輝男教授によって開発された地震波解析ソフト WAVEANA^[10] と立命館大学伊津野和行教授によって開発された integral^[11] の二つの計算

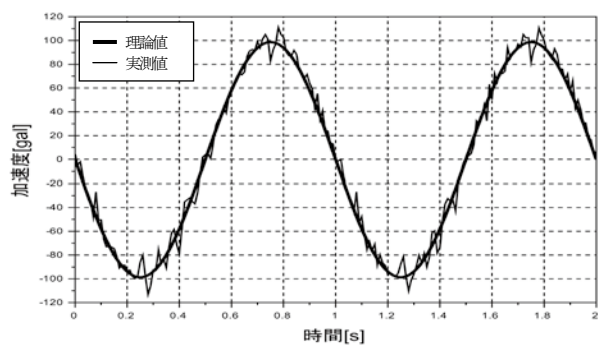


図 10 単振動 (振動数 1 [Hz], 振幅 25 [mm], X 軸)

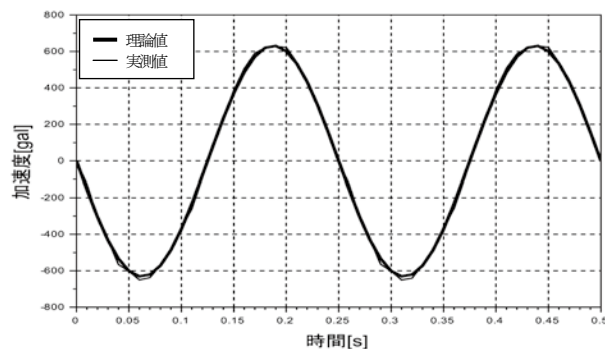


図 14 単振動 (振動数 4 [Hz], 振幅 10 [mm], X 軸)

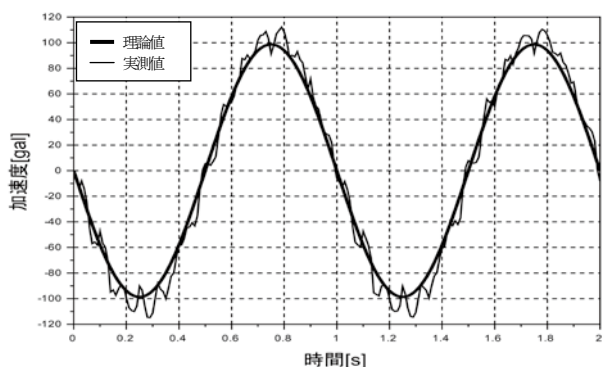


図 11 単振動 (振動数 1 [Hz], 振幅 25 [mm], Y 軸)

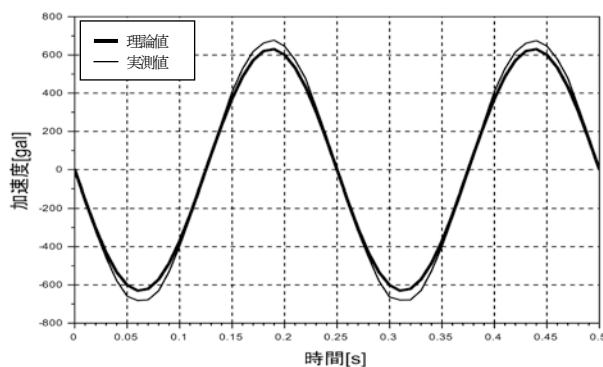


図 15 単振動 (振動数 4 [Hz], 振幅 10 [mm], Y 軸)

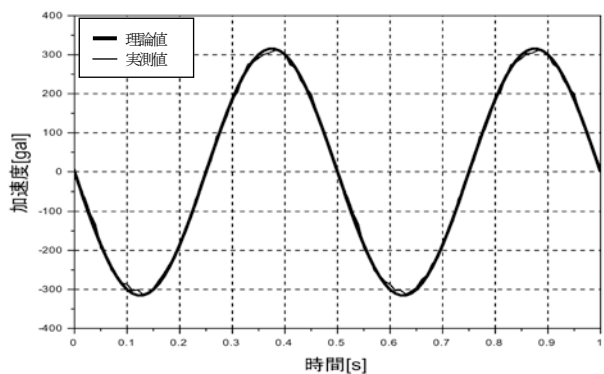


図 12 単振動 (振動数 2 [Hz], 振幅 20 [mm], X 軸)

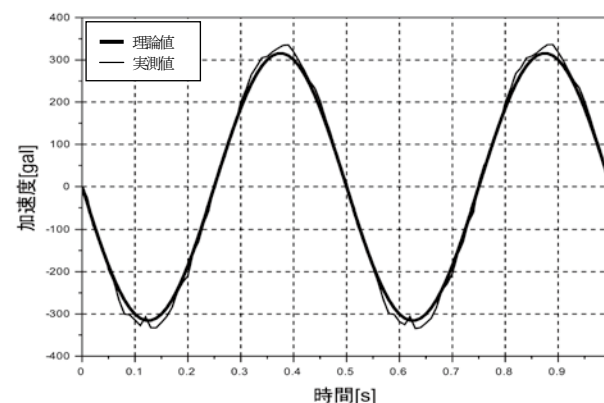


図 13 単振動 (振動数 2 [Hz], 振幅 20 [mm], Y 軸)

プログラムを検討した。

実験は、建築物の構造解析でよく使用される一次元人工地震波 BCJ_L1^[12] (33%) の加速度データをこれらの計算プログラムを使って変位データに変換する。この変位データを二軸振動台の X, Y 軸に同時に入力して加速度を測定する。その結果を元の加速度データと比較する。

図 16~図 19 は X 軸に関する測定結果, 図 20~図 23 は対応する Y 軸の測定結果を示す。また, 図の太実線は元の加速度データを表し, 細実線が WAVEANA, 細点線が integral で変換した変位データによる加速度の実測値を示している。

実験は, X, Y 軸両方に同一のデータを入力しているため, 両軸ともほとんど同じ結果が得られた。また, どちらの方法で変位データに変換しても結果には大きな差がないことが分かる。しかし, integral は固有周期が大きい部分で不一致が認められる。これは, 「計測機器の信頼性がない長周期成分をカット」^[11] しているためと考えられる。以降の実験では, 全般的な再現性が高い WAVEANA を用いて加速度データを変位データに変換する。

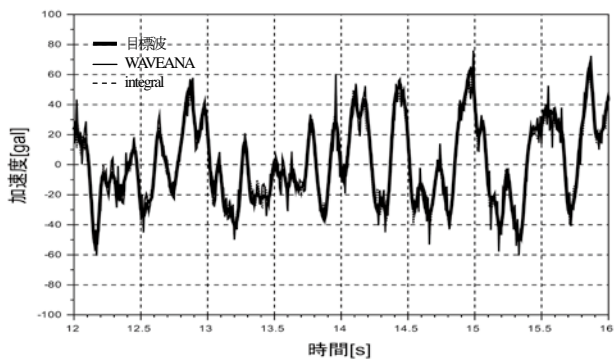


図16 BCJ_L1波 (33%) 時刻歴加速度波形 (X軸)

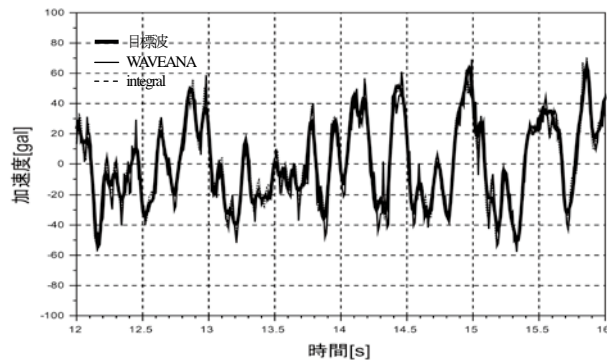


図20 BCJ_L1波 (33%) 時刻歴加速度波形 (Y軸)

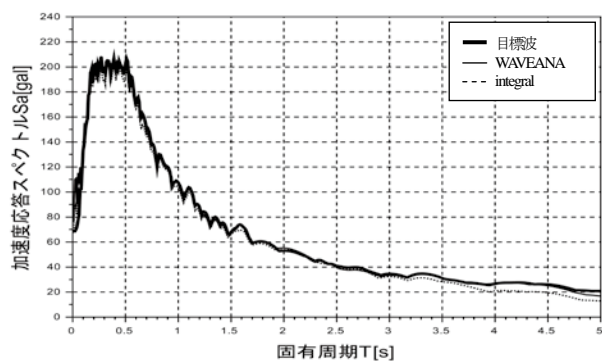


図17 BCJ_L1波 (33%) 加速度応答スペクトル S_A (X軸)

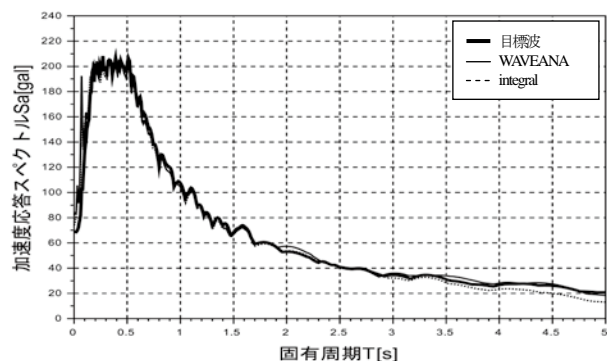


図21 BCJ_L1波 (33%) 加速度応答スペクトル S_A (Y軸)

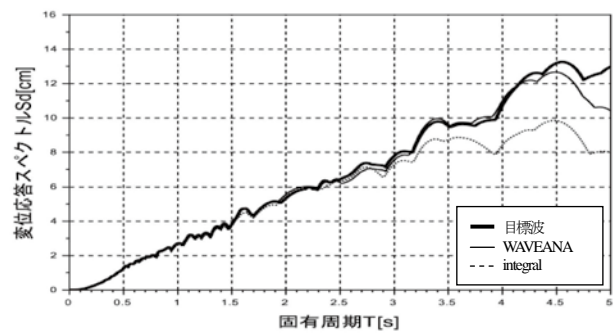


図18 BCJ_L1波 (33%) 変位応答スペクトル S_D (X軸)

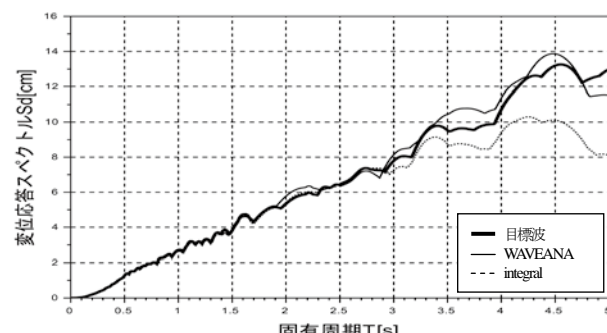


図22 BCJ_L1波 (33%) 変位応答スペクトル S_D (Y軸)

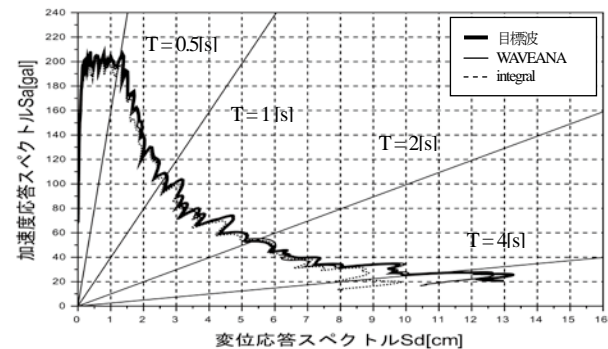


図19 BCJ_L1波 (33%) S_A - S_D 曲線 (X軸)

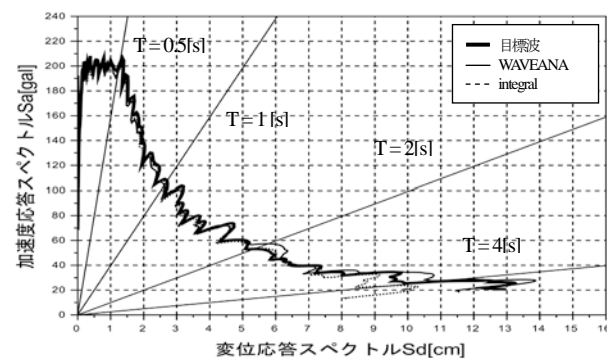


図23 BCJ_L1波 (33%) S_A - S_D 曲線 (Y軸)

4.4 地震動の再現

本研究では, 表 3 に示す代表的地震波を使って再現性を評価した. 観測データに含まれる, 東西方向 (EW) 成分を X 軸, 南北方向 (NS) 成分を Y 軸データとした. いずれのデータも最大 25 [kine]² に基準化した. また, 観測周期が 20 [ms] の地震波は補間により 10 [ms] 周期データに変換した.

表 3 評価地震波

地震波	観測周期	概要
El Centro 波 ^[13] (25kine)	20 [ms]	1940 年 Imperial Valley 地震の際に El Centro で観測された地震波
Taft 波 ^[13] (25kine)	20 [ms]	1952 年 Kem County 地震の際に Taft で観測された地震波
JMA 神戸波 ^[14] (25kine)	10 [ms]	1995 年阪神淡路地震の際に神戸海洋気象台で観測された地震波

地震波形の再現性は, 時刻歴加速度波形やそのフーリエスペクトルを比較することによって評価できる. また, 地震波が構造物に及ぼす影響を調べることも評価することができる.

構造物の一番簡単なモデルとして, 固有周期 T [s] と減衰定数 h [%] をもつ 1 質点・1 自由度系を考える. この構造物にある地震波を与えたときの最大応答値をスペクトルで表したものが地震波応答スペクトル^[15] である. 応答値には, 加速度, 速度, 変位がある. 応答スペクトルの解析によりその地震波が構造物に与える影響を詳しく調べることができる.

応答スペクトルは, 固有周期と減衰定数をパラメータとして地震波の加速度データから計算することができる. 本研究では, 立命館大学伊津野和行教授によって開発された ResponseSpectrum^[16] プログラムを使用した.

観測された地震波の加速度データから計算した応答スペクトル (目標波) と二軸振動台から得られた加速度データによる応答スペクトル (実験計測値) を比較することで地震波の再現性を評価する.

Taft 波 (25kine) と JMA 神戸 (25kine) に対する時刻歴加速度波形, 加速度応答スペクトル S_A , 変位応答スペクトル S_D および加速度応答スペクトル S_A - 変位応答スペクトル S_D 曲線を図 24 ~ 図 39 に示す. 図の太実線と細実線はそれぞれ, 目標波と実験計測値を表す. これらの計算では減衰定数 h を 5 [%] に固定した. いずれの実験結果も, 実験計測値は目標波をよく再現していることが分かる. また, El Centro 波 (25kine) についても同程度の再現性が得られた.

2 地震動の速度の単位, 1 [kine] = 1 [cm/s].

5. おわりに

本研究では, 加振機構に電動スライダを 2 台組み合わせた二軸振動台を開発した. 各電動スライダの時系列の変位をマイコンで制御することにより地震波の平面変位を再現した. 地震波を含む任意波形はパソコン上の Windows アプリで生成し USB 通信を介して二軸振動台に送る.

単振動および二次元地震動の再現評価の結果, 本二軸振動台は現実の地震動をよく再現していることが分かった. 二軸振動台に適した立体構造物模型の開発とそれを使った振動解析が今後の課題である.

参考文献

- [1] 阪本吉一, 2005, 平成 16 年度科学研究費補助金奨励研究成果報告書, 構造物可視化振動実験器の試作研究.
- [2] 岩本いづみ, 2014, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), No.13008.
- [3] 岩本いづみほか, 2016, 大阪府立大学高専研究紀要, 第 50 巻, 39-44 頁.
- [4] オリエンタルモーター(株), 2016, 電動スライダ EZS シリーズカタログ.
- [5] オリエンタルモーター(株), 2013, 取り扱い説明書ドライブ編 (HM-60235-8).
- [6] Strawberry Linux, STBee, <https://strawberry-linux.com/catalog/items?code=32103>.
- [7] CooCox, CoIDE, <http://www.coocox.org/>.
- [8] 防災科学技術研究所, 強震観測網 (K-NET, KiK-net), <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/search/>.
- [9] 大崎順彦, 1994, 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 133-138 頁.
- [10] 鎌田輝男, K-NET/KiK-net 観測波形解析 WAVEANA, <http://www.5b.biglobe.ne.jp/t-kamada/CBuilder/waveana.htm>.
- [11] 伊津野和行, 加速度波形の周波数領域での積分, <http://www.ritsumei.ac.jp/se/rv/izuno/software.html>.
- [12] (一財) 日本建築センター, 日本建築センター模擬波 (基盤波) BCJ-L 及び BCJ-L2, <http://www.bcj.or.jp/download/wave.html>.
- [13] (一社) 建築性能基準推進協会, 代表的な観測地震波 (加速度データ), <https://www.seinokyo.jp/jsh/top/>.
- [14] 気象庁, 強震波形 (1995 年兵庫県南部地震), http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/hyogo_nanbu/index.html.
- [15] 大崎順彦, 1994, 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 7 章.
- [16] 伊津野和行, 応答スペクトルの計算, <http://www.ritsumei.ac.jp/se/rv/izuno/software.html>.

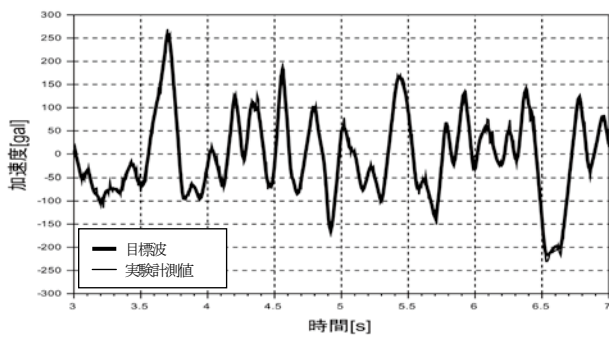


図 24 Taft 波 (25kine) 時刻歴加速度波形 (EW)

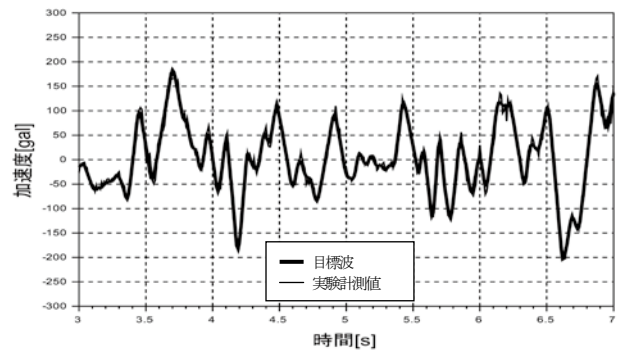


図 28 Taft 波 (25kine) 時刻歴加速度波形 (NS)

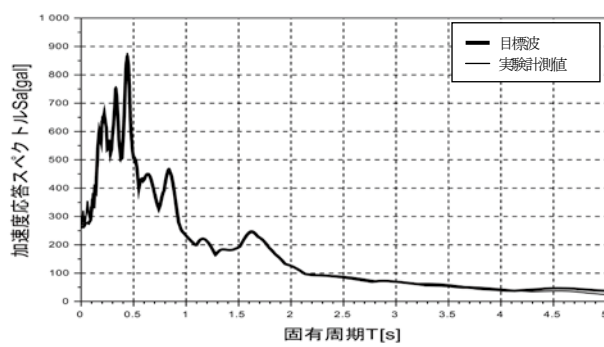


図 25 Taft 波 (25kine) 加速度応答スペクトル S_A (EW)

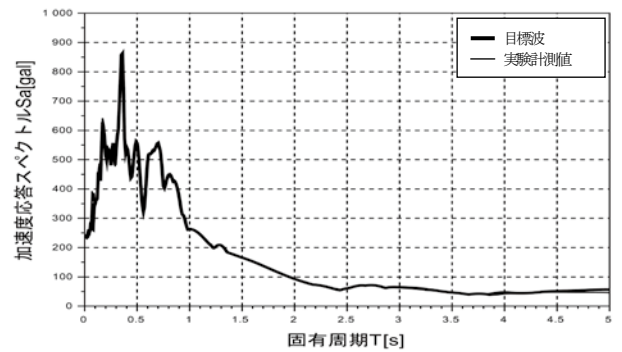


図 29 Taft 波 (25kine) 加速度応答スペクトル S_A (NS)

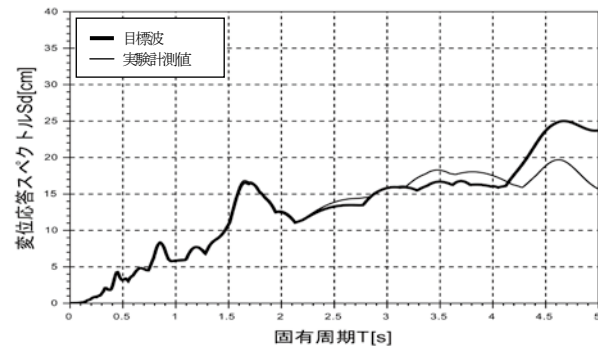


図 26 Taft 波 (25kine) 変位応答スペクトル S_D (EW)

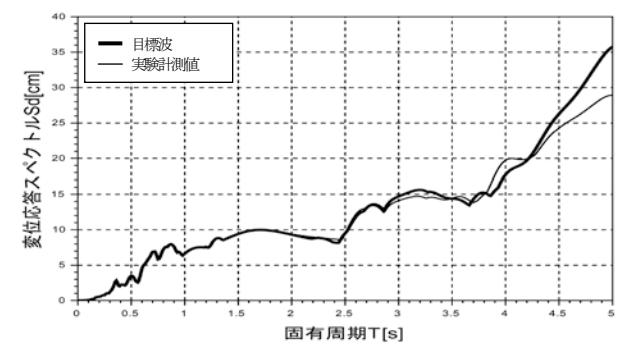


図 30 Taft 波 (25kine) 変位応答スペクトル S_D (NS)

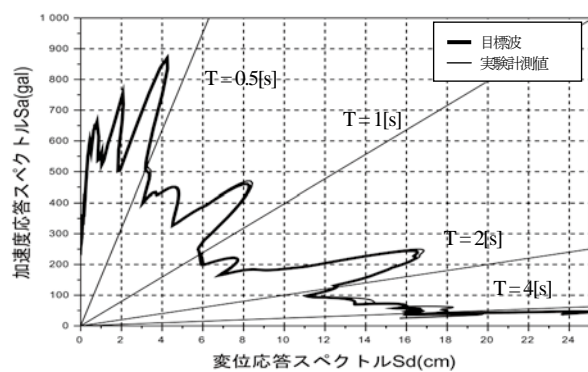


図 27 Taft 波 (25kine) S_A - S_D 曲線 (EW)

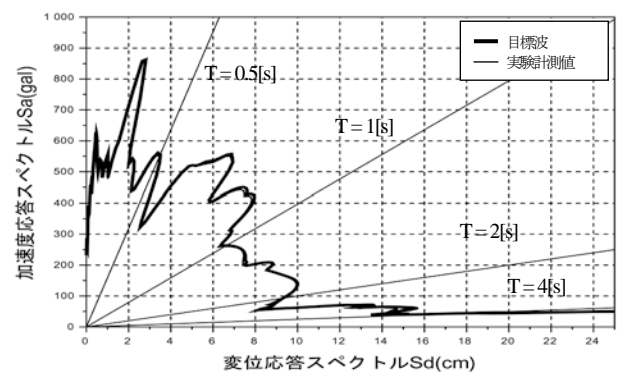


図 31 Taft 波 (25kine) S_A - S_D 曲線 (NS)

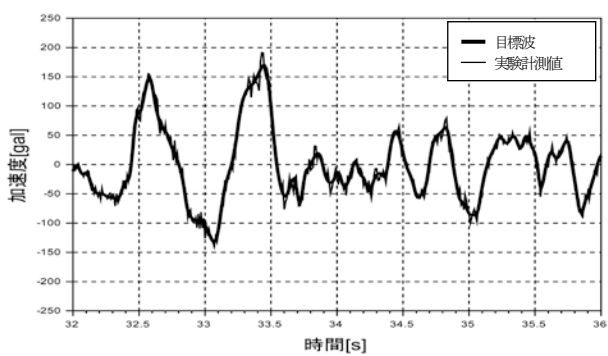


図 32 JMA 神戸 (25kine) 時刻歴加速度波形 (EW)

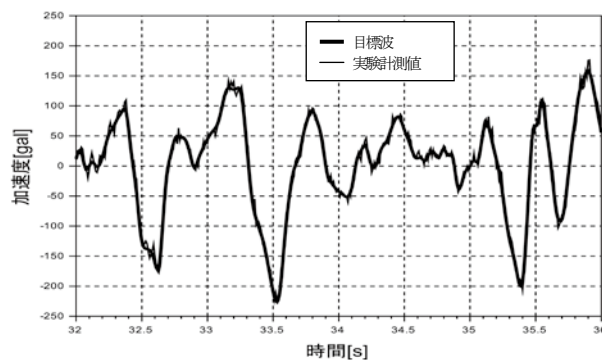


図 36 JMA 神戸 (25kine) 時刻歴加速度波形 (NS)

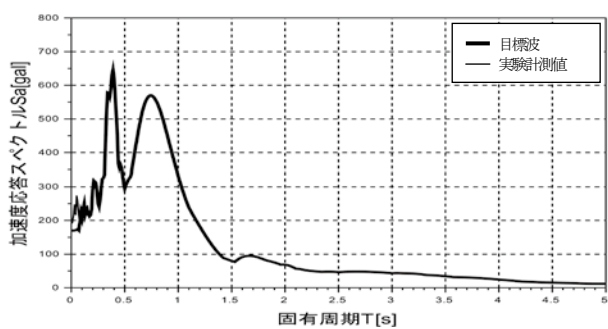


図 33 JMA 神戸 (25kine) 加速度応答スペクトル S_A (EW)

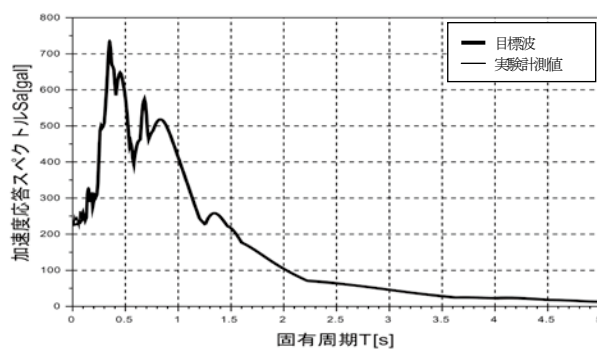


図 37 JMA 神戸 (25kine) 加速度応答スペクトル S_A (NS)

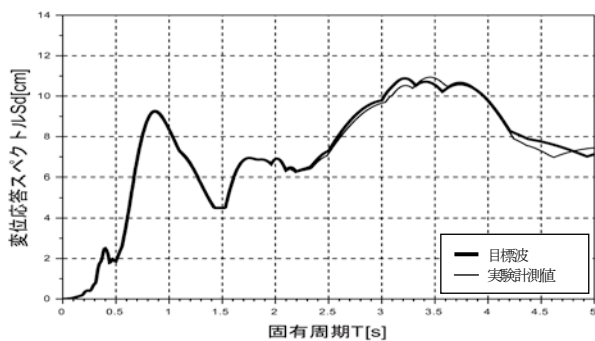


図 34 JMA 神戸 (25kine) 変位応答スペクトル S_D (EW)

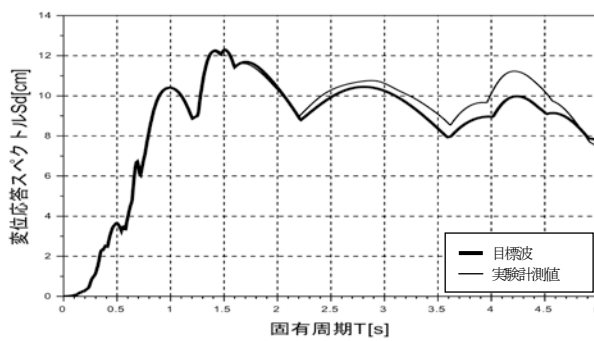


図 38 JMA 神戸 (25kine) 変位応答スペクトル S_D (NS)

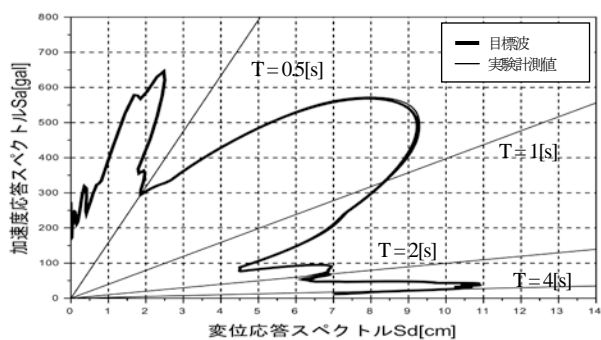


図 35 JMA 神戸 (25kine) S_A - S_D 曲線 (EW)

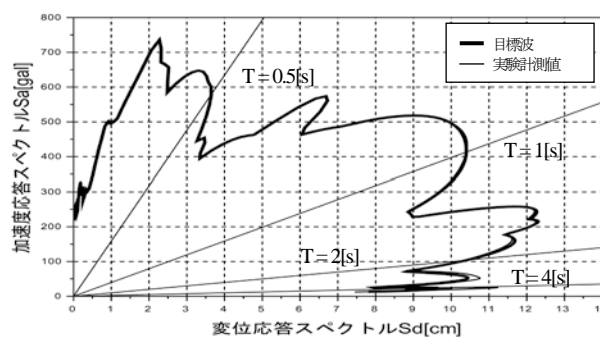


図 39 JMA 神戸 (25kine) S_A - S_D 曲線 (NS)