

防災科学技術研究所大型耐震実験施設の大型振動台の準静的制御性能について

山下 太^{*1}・福山英一^{*1}・溝口一生^{*2}・東郷徹宏^{*1}・御子柴正^{*1}・佐藤 誠^{*3}・箕輪親宏^{*4}

Quasi-Static Control Performance of the Large-Scale Shaking Table at National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

Futoshi YAMASHITA^{*1}, Eiichi FUKUYAMA^{*1}, Kazuo MIZOGUCHI^{*2}, Tetsuhiro TOGO^{*1},
Tadashi MIKOSHIBA^{*1}, Makoto SATO^{*3}, and Chikahiro MINOWA^{*4}

^{*1}*Earthquake and Volcano Research Unit,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan
yamafuto@bosai.go.jp*

^{*2}*Geosphere Science Sector, Civil Engineering Research Laboratory,
Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan*

^{*3}*Advanced Engineering Services Co., Ltd.*

^{*4}*Visiting Researcher, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan*

Abstract

We investigated the control performance of the large-scale shaking table at National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, with a wide velocity range (0.9-900 mm/s) including quasi-static movement. We measured three-dimensional displacements of the shaking table by laser displacement sensors. The measurements revealed that the shaking table rises by 0.361 mm at maximum before the start of shaking, which was caused by the pressurization of main- and sub-oil-pressure systems for preparation of shaking. The rotation of the shaking table around a point at the west of southern edge of table was observed as a solid body during the pressurization of main-oil-pressure system after the completion of sub system pressurization. Horizontal displacement caused by the rotation attained to 1.442 mm at maximum. The maximum horizontal displacement in the direction perpendicular to the shaking direction was equal to 0.477 mm during the shaking. The displacements during the shaking tend to increase with increasing the shaking velocity. Maximum difference between the input displacement signal and the measured displacement along the shaking direction reached 6.932 mm. These measurement data will help us conduct the experiment of rock friction with large-scale samples using this shaking table.

Key words : Large-scale shaking table, Quasi-static control performance, Displacement measurement of large body

1. はじめに

防災科学技術研究所の大型耐震実験施設に設置されている大型振動台は、これまでに数多くの振動実験に利用されてきた（例えば、国立防災科学技術センター、1983；防災総合研究部、1996）。建設当初は垂直方向にも加振可能であったが、何度かの更新をおこない、水平一軸方向

の振動に特化することで最大速度や最大変位、波形再現性等の性能を向上させてきた（例えば、箕輪ほか、1989）。この更新により、現在、多方面で基準的記録として利用されている JMA 神戸強震記録の加速度・速度・変位を最大 110 % まで再現可能となった。現在の振動台の諸元を表 1 に示す。振動台の駆動方式は油圧式であり、油圧

^{*1} 独立行政法人 防災科学技術研究所 地震・火山防災研究ユニット

^{*2} 財団法人 電力中央研究所 地球工学研究所 地圏科学領域(独立行政法人 防災科学技術研究所 客員研究員)

^{*3} 株式会社 エイ・イー・エス 筑波事業所 宇宙技術部

^{*4} 独立行政法人 防災科学技術研究所 客員研究員

表 1 振動台の諸元
Table 1 Specification of the shaking table.

| Elements | Specification |
|-----------------------|--|
| Table size | 14.5 m x 15 m |
| Driving system | Hydraulic servo control |
| Power supply | Hydraulic pump system |
| Table control method | Displacement control |
| Shaking direction | Horizontal (one dimension) |
| Excitation force | 3600 kN (900 kN x 4) |
| Max. loading capacity | 500 t |
| Max. displacement | ±220 mm |
| Max. velocity | 1 m/s |
| Max. acceleration | 5 m/s ² (500 t), 9.4 m/s ² (less than 200 t) |
| Frequency range | DC - 50 Hz |
| Excitation wave | Sinusoidal, Random, Earthquake wave |

系統は主油圧系統と副油圧系統から成っている。主油圧系統は加振機のピストンを動かして振動台を振動させるためのもので、副油圧系統は振動台を浮揚させるための静圧軸受けや回転を抑えるためのガイドシリンダ等の油圧機器を動かすためのものである。振動台を用いてこれまでにおこなわれた実験の多くは、地震動が実大スケールの構造物に与える影響の調査が主目的であり、そのため、振動台の動的な特性についてはよく調べられている。例えば振動台の動的特性および機械的動作方法について、箕輪ほか(1989)による詳細な報告がある。

著者らも「地殻活動の観測予測技術開発」プロジェクト(平成 23 年 4 月～平成 28 年 3 月)において、本振動台を利用した大型岩石試料の二軸摩擦実験を予定している。地震の本質は断層の摩擦すべりであることから、岩石の摩擦特性を理解することは地震発生のメカニズムを解明するうえで極めて重要である。この観点から、1970 年代に岩石試料を用いた摩擦実験が精力的におこなわれ、現在の地震学において標準的な摩擦構成則である速度・状態依存摩擦則が提唱された(例えば、Dieterich, 1972, 1978, 1979; Ruina, 1983; Marone, 1998)。ただしこの構成則が導き出された摩擦実験は、試料サイズの制限のため極めてゆっくりとしたすべり速度(～ $\mu\text{m/s}$)でおこなわれており、通常の地震におけるすべり速度(～ m/s)とは大きなギャップがある。近年はこのギャップを埋めるための高速摩擦実験が数多くおこなわれ、低速度の実験では見られなかったさまざまな摩擦特性が明らかとなっている(例えば、Tsutsumi and Shimamoto, 1997; Di Toro *et al.*, 2004, 2011; Hirose and Shimamoto, 2005; Mizoguchi *et al.*, 2007; Reches and Lockner, 2010)。これらの高速摩擦実験は、円柱もしくは円筒状に成形した岩石試料の端面同士を接触させ、一方を固定したままもう一方を回転させる回転せん断方式を採用している。この方式により高速度かつ大変位での実験が可能となったが、すべりの様子が通常の地震や過去の摩擦実験とは異なるため、その結果を直接的に比較できるかについては検証が必要である。また、試料サ

イズについても自然地震とは大きなギャップがあり寸法効果の影響も不明である。著者らが計画している摩擦実験は、大型の岩石試料を用いることでこのようなギャップを埋めようとするものである。すなわち、大きな試料を用いることで、高速度であっても大きな変位での実験を可能とし、幅広い速度レンジで統一的に摩擦特性を調べることができる。計画している実験は、大型の角柱岩石試料 2 本を接触させて垂直荷重をかけ、振動台の動きにより相対変位(すべり)を生じさせるというものである。つまり、一方の試料を振動台上に設置した治具に固定し、もう一方の試料を、金属棒を用いて振動台外側の反力受け基礎に固定する。この状態で振動台を変位させれば、試料間にすべりが発生する。

この実験のもう一つの目的は、断層面上における動的破壊伝播の観察である。断層面上の破壊開始点で始まったすべりがどのように広がるのかについては、これまでも岩石試料を用いた室内実験で調べられており、その結果から破壊核形成過程が明らかにされた(例えば、Ohnaka *et al.*, 1986; Ohnaka and Kuwahara, 1990)。ただし、試料サイズの制限のため、破壊核が形成された後に伝播する破壊の様相を観察することはできなかった。同様の実験の中で最も大きな試料を用いたのは Dieterich (1981) や Okubo and Dieterich (1981, 1984) による実験で、1.5 m 四方の正方形柱試料(厚さ 0.4 m)の対角線を切って 2 つの三角柱試料として使用したものである。彼らはこの試料を用いてスティックスリップ実験をおこない、断層表面の形状と破壊エネルギー等のパラメータの関係性について論じているが、破壊伝播に関しては言及していない。Dieterich (1981) が用いた岩石試料の形状では、断層面にかかる垂直応力の制御が困難であったことが予想されるが、著者らの計画している実験ではそれが比較的容易で、さまざまな条件の下で実験をおこなえると考えている。

以上のように、計画している摩擦実験ではさまざまな実験条件を用意する必要があり、通常の振動実験に比べはるかにゆっくりとした変位速度(～1 mm/s)から振動台の最大変位速度(～1,000 mm/s)までの幅広い速度レンジでの加振を予定している。しかしながら、振動台において低速度の準静的な制御での実験例はなく、その制御特性は明らかではない。本研究の目的は、摩擦実験で用いる治具の余裕度や、得られたデータを解釈する上で組み込むべき誤差を見積もるために、さまざまな速度条件の下で加振実験をおこない、特に準静的な条件での振動台の制御性能を調査することである。なお、今回は全実験を通して振動台に何も載せない無負荷状態でおこなわれた。

2. 変位測定方法

振動台の変位測定には、2 台のレーザー変位計(KEYENCE LK-G150, MICRO-EPSILON ILD-1700-50)を使用した。それぞれの仕様は表 2 の通りである。この表に示す通り、測定レンジの広い LK-G150 でも ±40 mm しか測定できないため、振動台の最大変位(±220 mm)を直接的に測定することはできなかった。さらに、振動台の表

表 2 レーザー変位計の性能
Table 2 Specifications of the laser displacement sensors.

| Elements | Specifications | |
|------------------------------|-----------------|---------------------------|
| | KEYENCE LK-G150 | MICRO-EPSILON ILD-1700-50 |
| Measurement range | 150 ± 40 mm | 70 ± 25 mm |
| Resolution | 0.5 μm* | 2 μm |
| Effective sampling frequency | 500 Hz | 625 Hz |
| (Sampling frequency) | (2 kHz) | (2.5 kHz) |
| (Averaging) | (4 times) | (4 times) |

* The value when measuring the standard target 4,096 times average at the reference distance.

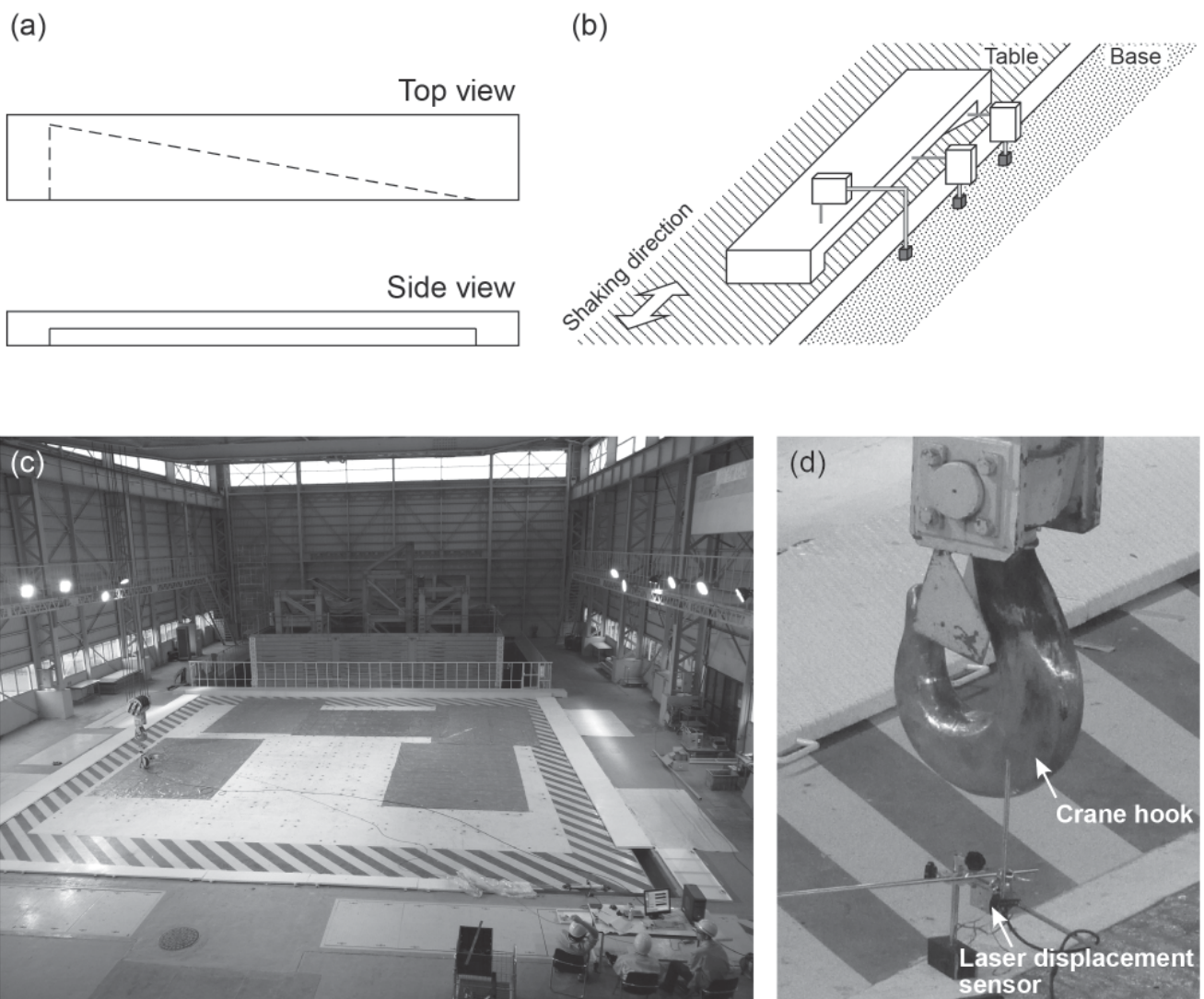


図 1 (a) ステンレスターゲットの概略図。側面に対し 10° 傾いた傾斜面がある。(b) ステンレスターゲットを用いた変位測定の概要図。(c) LOC4 における鉛直変位測定の写真。(d) クレーンフックを用いた鉛直変位測定の写真
Fig. 1 (a) Schematic design of stainless target of the laser displacement sensor. The target has a face inclined at 10 degrees from the side face. (b) Schematic diagram of displacement measurements using the stainless target. (c) Photograph of measurement of vertical displacement at LOC4. (d) Photograph of measurement of vertical displacement using the crane hook as a target.

面は塗装等による凹凸があり高い精度での測定には適していない。これらのことから、表面を高い精度で仕上げたステンレス製のターゲットを作成し、これを振動台上に固定して測定対象とした(図 1a, b)。ステンレスターゲットの表面精度はおよそ 20 μm である。ターゲットには 10° の傾斜面をつけ、この面の変位を測定することにより間接的に振動方向の変位を測定できるようにした。すなわち測定された変位を tan10° で除すことで振動方向の変位を得ることができる。測定をおこなった地点を図 2 に示す。今回使用したレーザー変位計の測定中心は最大でも 150 mm であるので、ターゲットを使用した測定は基礎から近い南北両端に制限された。したがって、LOC1-3, 7-9 においては図 1b に示す方法で水平および鉛直変位の測定をおこなったが、LOC4-6 においては、レーザー変位計を振動台上に固定し、耐震施設の天井から吊したクレーンフックをターゲットとして鉛直変位のみを測定した(図 1c, d)。なお今後は、図 2 に示す通り、東を X、北を Y、鉛直上方を Z として表す。振動台の振動方向は X 方向である。レーザー変位計の数の制限から、測定は後に示す入力波形一つに対し X および Y 方向と、X および Z 方向の 2 回おこなった。レーザー変位計の出力は、PC に挿した A/D 変換ボード (NI-4474; 24 bit) によって 1 kHz のサンプリング周波数で収録した。また、X 変位については、振

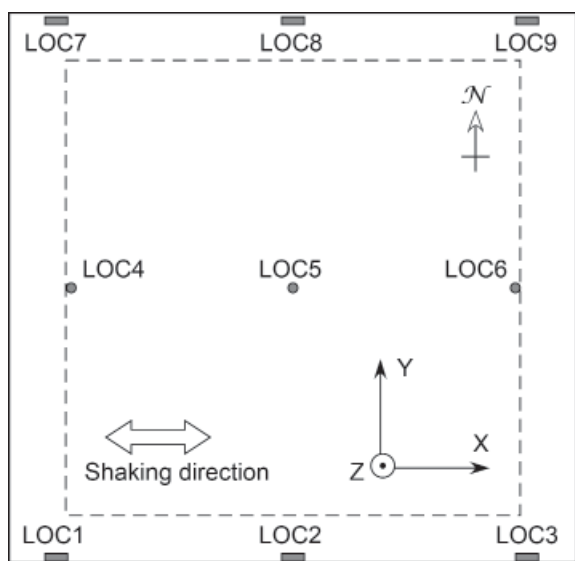


図 2 振動台上の測定地点。東を X、北を Y、鉛直上方を Z として表す。振動台の振動方向は X 方向である。破線は振動台本体の縁を示している。この線より外側は振動台の本体から張り出した部分であり、鉄板の下には何も支えがない。

Fig. 2 Locations of displacement measurements on the shaking table. East, North and Up directions are labeled as X, Y and Z, respectively. The shaking table moves along the X axis. The dashed line represents the edge of the main body of the shaking table. Outside of the area, steel plates are overhung surrounding the edge of the shaking table and thus there is no support below this region.

表 3 入力波形の詳細

Table 3 Descriptions of inputted waveform of displacement.

| No. | Velocity wave form | Maximum velocity, mm/s | Displacement, mm |
|-----|--------------------|------------------------|------------------|
| I | Step | 0.9 | 200 |
| II | Step | 9 | 200 |
| III | Step | 90 | 200 |
| IV | Step | 90 | 400 |
| V | Yoffe | 900 | 400 |
| VI | Yoffe | 900 | 400 |

動台床下のピストン付近に設置された変位計によっても測定した。微小変位に対する精度は高くないが、参照信号として収録をおこなった。なお、図 2 に示す破線より外側の領域は、振動台の本体から張り出した部分であり、最上部の鉄板下には何も支えがない。したがって、LOC1-3, 7-9 での測定結果は、本体部分に比べ不安定要素を含む可能性がある。

計画中の摩擦実験では非常に幅広い速度レンジでの加振を予定しているため、本測定においても幅広いレンジの入力波形を用意した(表 3, 図 3.1, 図 3.2)。なお、ここで入力波形とは振動台の制御システムへ入力する信号を意味している。入力波形の作成にあたっては、理想的な変位波形を 2 回微分した後の加速度波形が振動台の仕様(表 1)を越えないように調整をおこなった。この振動台の加速度の制限と最大変位量の制限により、高速度では理想的な変位波形の再現が困難であった。これは、加速度を制限して 900 mm/s まで加速するには総変位量が不足しており、速度がステップ状になるよう加振しようとしても実際に 900 mm/s の速度に達するのはほんの一瞬であるためである。これでは安定した速度条件下でのデータが取得できず、既存の研究結果との比較もできない。そこで 900 mm/s の速度での加振においては、速度がステップ関数ではなく規格化 Yoffe 関数 (Tinti et al., 2005) となるように設計した。規格化 Yoffe 関数は、Yoffe (1951) が解析的に導きだした一定長のモード I クラックが一定速度で伝播する場合の破壊伝播記述式を、Tinti et al. (2005) が規格化して特異点を取り除き、断層の運動学モデリングに適用できるようにしたものである。この関数で再現されるすべりは、すべり弱化など地震時の断層すべりの特徴を再現できており、岩石試料を用いた室内実験でも用いられている (Fukuyama and Mizoguchi, 2010)。今回は速度がピークに達した後の減衰が比較的早い ($\tau_r=0.6$ s) 波形 V と、減衰が比較的遅い ($\tau_r=1.4$ s) 波形 VI の 2 種類の入力波形を用意した。これらは、短いすべり弱化距離 (Dc) をもつ摩擦構成則と、長い Dc を持つ場合に対応する。

LOC1-3, 7-9 においてターゲットを設置する際には、スケールおよび水準器を用いて可能な限り振動台と平行かつ水平となるよう努めた。しかしながらその誤差を完全にゼロにすることは不可能であり、また、振動台の真の振動方向も不明である。測定結果を確認すると、理想

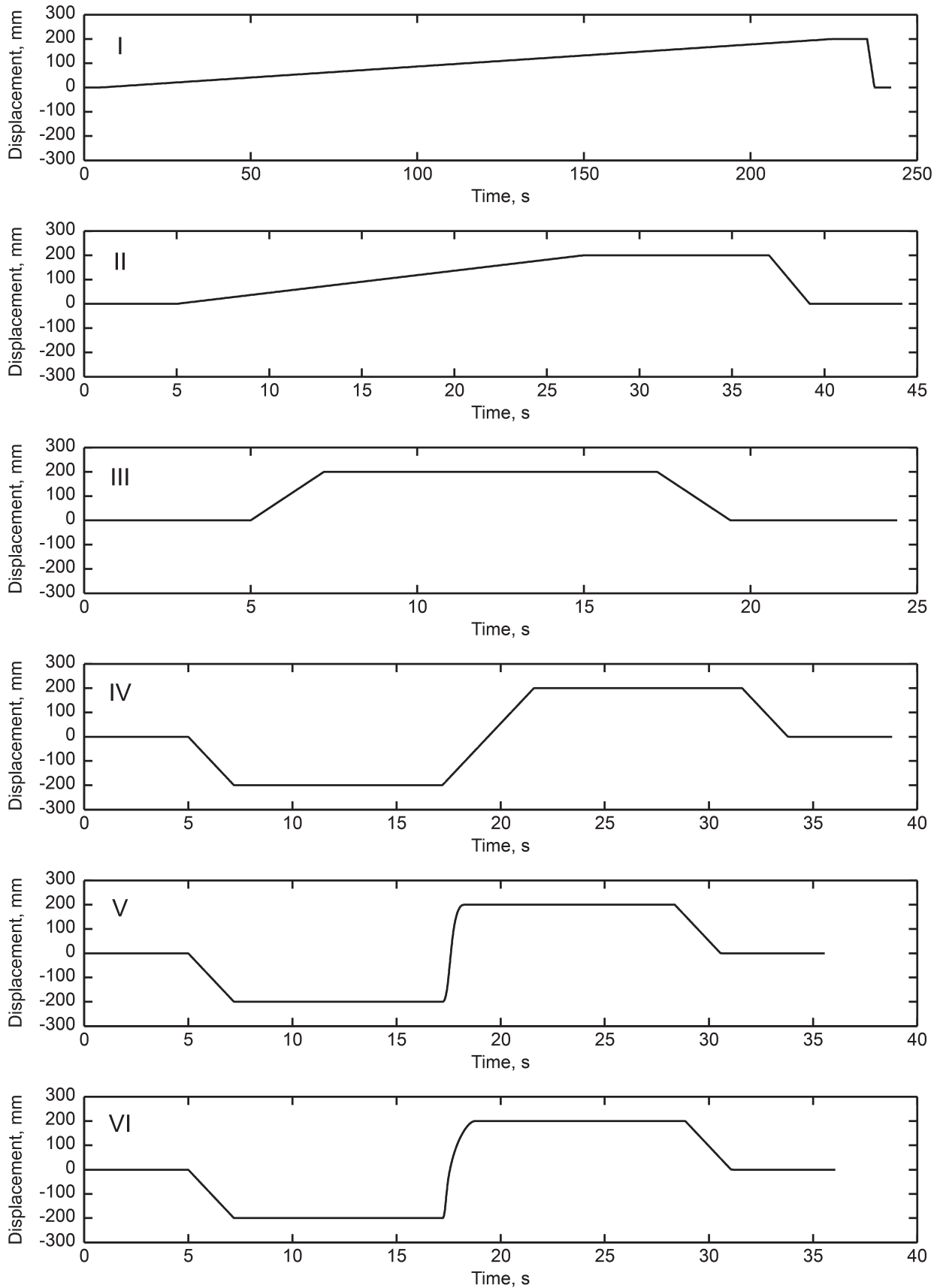


図 3.1 入力した変位波形. 詳細は表 3 の通り

Fig. 3.1 Input displacement waveforms. The details are listed in Table 3.

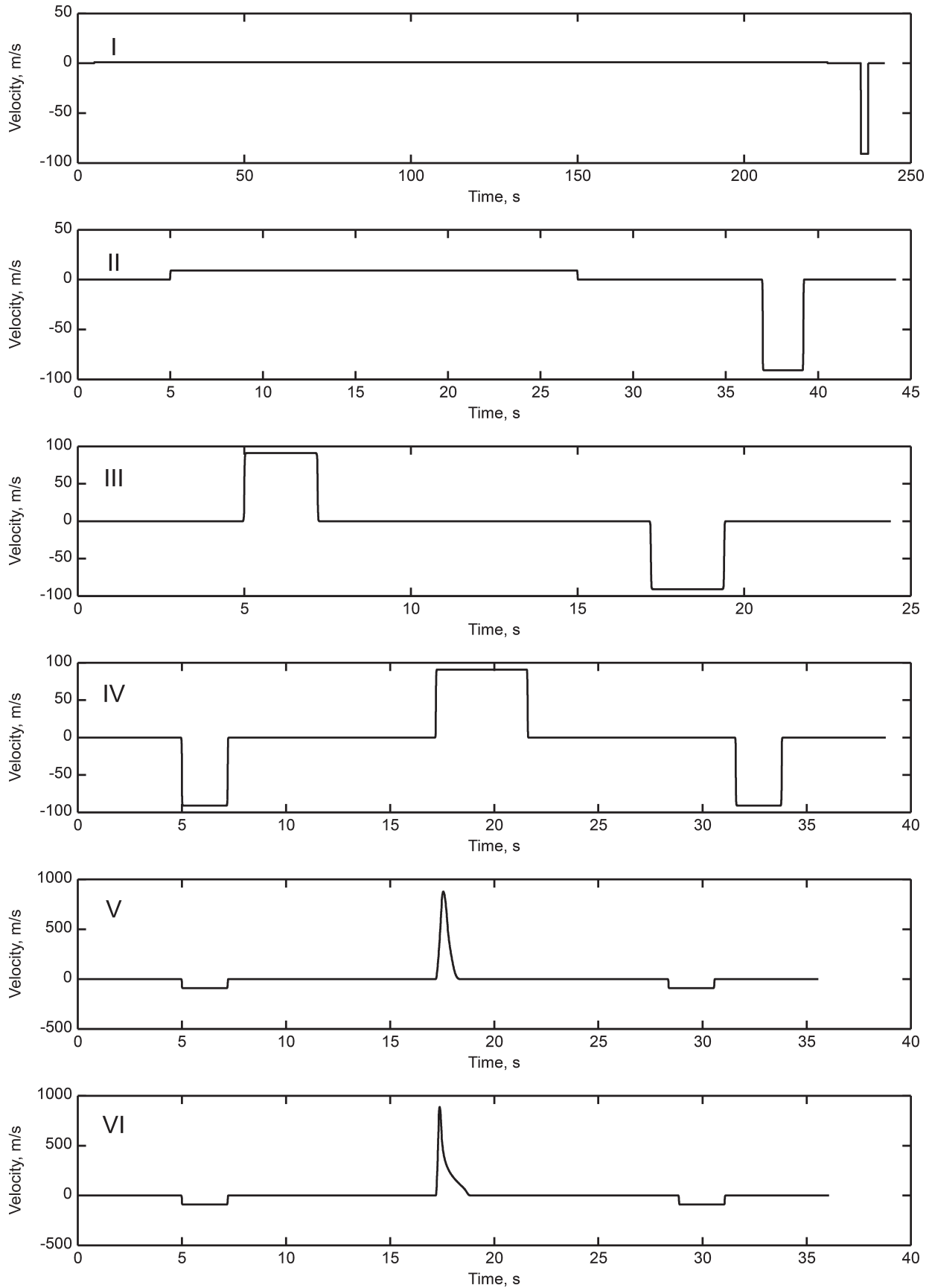


図 3.2 入力した変位波形を時間微分して得られた速度波形
Fig. 3.2 Velocity waveforms acquired by differentiating the input displacement waveforms with time.

的には加振中の変位がゼロであるべき Y および Z 変位に、X 変位に比例した変位が含まれていた。これはターゲットが振動方向および水平に対し傾いていることを示している。そこで、用意した入力波形で加振する前にサイン波（振幅：200 mm，周波数：0.05 Hz）で加振をおこない、その記録を用いてターゲットの傾きを計算した。表 4 に計算したターゲットの傾きを示す。これはサイン波での加振中に Y および Z の変位が最小となる傾きを最小二乗法で推定したものである。今後を示す変位記録は全てこの傾きを補正した結果である。

振動台を希望する波形で加振するには、いくつかの手続が必要である。第 1 章で述べた通り、防災科学技術研究所の大型振動台は振動台を浮き上がらせるための副油圧システムと、振動台を振動させる主油圧システムの 2 つの油圧システムによって動作している。希望する波形で加振する前に、これらの油圧システムに加圧しスタンバイ状態にしなければならない。振動台を加振する一連の手順は、(1) 副油圧システムへの加圧、(2) 主油圧システムへの加圧、(3) 希望する波形での加振、(4) 主油圧システムの減圧、(5) 副油圧システムの減圧、である。振動台上での作業は油圧システムへの加圧がなされていない状態に制限されているため、摩擦実験の治具や岩石試料の設置は (1) 以前に終了している必要がある。そのため治具が許容する余裕度を見極める上では、加振時の制御性能のみならず (1) や (2) の段階で停止時と比較してどのような変位が生じるかも重要となる。次章では、測定結果をスタンバイ時と加振時に分けて示す。

表 4 推定した各測定点でのターゲットの傾き

Table 4 Estimated inclinations of target at measurement locations.

| Location | Azimuth, degree | Dip, degree |
|----------|-----------------|-------------|
| LOC1 | 0.0510 | 0.0482 |
| LOC2 | 0.0290 | -0.0487 |
| LOC3 | -0.8419 | 0.1777 |
| LOC4 | -0.6506 | -0.0448 |
| LOC5 | -0.0911 | -0.0703 |
| LOC6 | -0.4030 | 0.0068 |

3. 変位測定結果

3.1 スタンバイ時

加振を開始するまでに振動台に生じる X, Y, および Z 方向の変位を、それぞれ図 4, 図 5, および図 6 に示す。LOC4-6 において Z 方向の変位を測定したのは、このスタンバイ時のみである。図中の矢印は副油圧システムへの加圧が完了した時刻を示している。停止時に対する最終的な変位は X, Y, および Z 方向で、それぞれ最大 1.224, 0.638, 0.361 mm であった。X および Y 方向の水平変位は、副油圧システムへの加圧時に比べ、主油圧システムへの加圧時の方がはるかに大きい。一方、Z 変位は、副油圧、主油圧の加圧にともなう変位は、測定場所によるばらつきはあるもののおおむね同程度である。副油圧システムの加圧完了後に大きな水平変位が生じている理由は、主油圧への加圧によりガイドシリンダやピストンが振動台を押さえるためと考えられる。

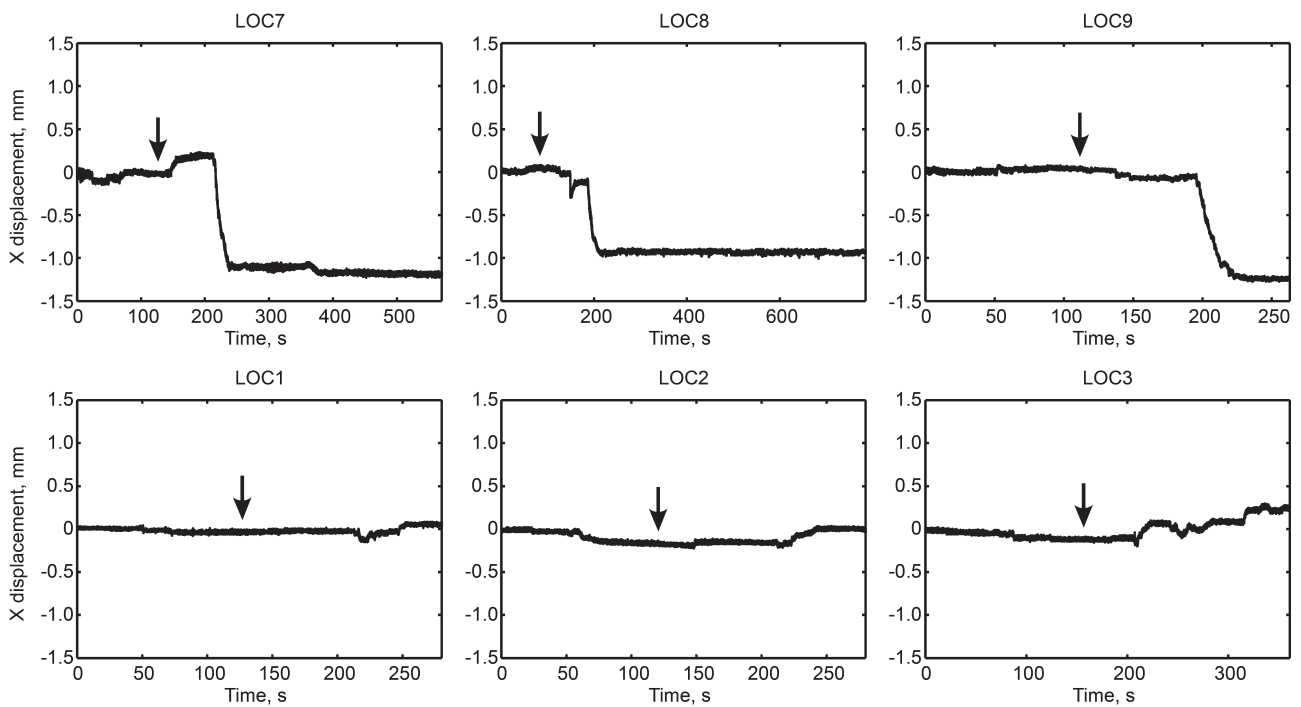


図 4 LOC1-3, 7-9 における主油圧・副油圧システムへの加圧にともなう X 変位。矢印は副油圧システムへの加圧が完了した時刻を示す。

Fig. 4 X displacement at LOC 1-3 and 7-9 accompanying the pressurization of main- and sub-oil-pressure system. The arrows indicate the timing when the pressurizations of the sub-oil-pressure system were finished.

3.2 加振時

振動台に入力した X 変位の波形に対する測定した X 変位の偏差を図 7 に示す。また、偏差がゼロを中心にガウス分布していると仮定して計算した標準偏差と、偏差の最大値を表 5 にまとめた。ここで、スタンバイ完了後における変位をゼロと再設定した。測定点および波形ごとの違いも大きいですが、LOC1 を除いておおむね 1 mm 程度の偏差があることがわかった。また、図 7 から明らかに、振動台の最大速度で加振している波形 V および VI での偏差が大きく、大きい速度での再現性が悪いことが分かった。表 5 に示される通り、大きい速度で再現性が悪くなる傾向は全ての測定地点および波形でおおむね共通した特徴である。入力波の再現性が、入力波の特性や負荷の大きさ等によって異なることはすでに知られており、通常の振動実験では、振動台上で測定した波を真の入力波として取り扱っている。今回の測定で、特に大きな速度での加振時にその様な取り扱いが必要であることが確認できた。

図 7 および表 5 に示す通り、他の測定地点に比べて LOC1 における偏差が際だって大きく、全地点を通して最大の 6.932 mm の差が生じている。ターゲットの傾き補正が不十分である可能性もあるが、図 7 に示されるように中心を境に変位がプラスとなる領域で非線形な偏差が生じている。これは、振動台の南西側にスムーズな変位を妨げる障害がある可能性を示唆している。

図 8 および図 9 は加振時の Y および Z 方向の変位である。X 変位と同様にスタンバイ完了時の変位をゼロと再設定

している。表 6 および表 7 には Y および Z 変位の標準偏差および最大値を示す。理想的には加振中の Y および Z 変位はゼロであるはずだが、実際には変位が生じている。X 変位と同様に、速度が大きくなるほど変位も大きくなる傾向にあり、特に、波形 V および波形 VI での変位が大きい。ただし X 変位の偏差の大きさと比較すると明らかに小さく、Y および Z 変位は最大でもそれぞれ 0.477 mm, 0.197 mm である。測定地点の違いも X 変位の偏差ほど大きくはないが、LOC1 の Z 変位は他の測定地点に比べ明らかに大きい。

4. 考察

ここでは、得られた変位データを元に振動台の制御性能に関する考察をおこなう。図 10 に副油圧系統スタンバイ完了時の変位分布を示す。副油圧系統への加圧がおこなわれると、振動台全体がほぼ一様に上昇しており、その上昇量は平均で 0.126 mm である。一方、水平変位は最大で 0.2 mm 程度で鉛直変位よりは大きいですが、全体として系統的な変位は示していない。

次に、副油圧系統スタンバイ後から主油圧系統スタンバイ完了時までの変位分布を図 11 に示す。副油圧系統への加圧時と異なり、水平変位は有意な変位分布を示しており、最大で 1.422 mm に達している。そこで、振動台が剛体的に運動したと仮定してその運動を推定した。運動は回転運動と並進運動からなるとして、回転中心の位置と回転量および並進運動量を、グリッドサーチにより求めた。その結果、振動台の南西端を X=0 mm, Y=0 mm と

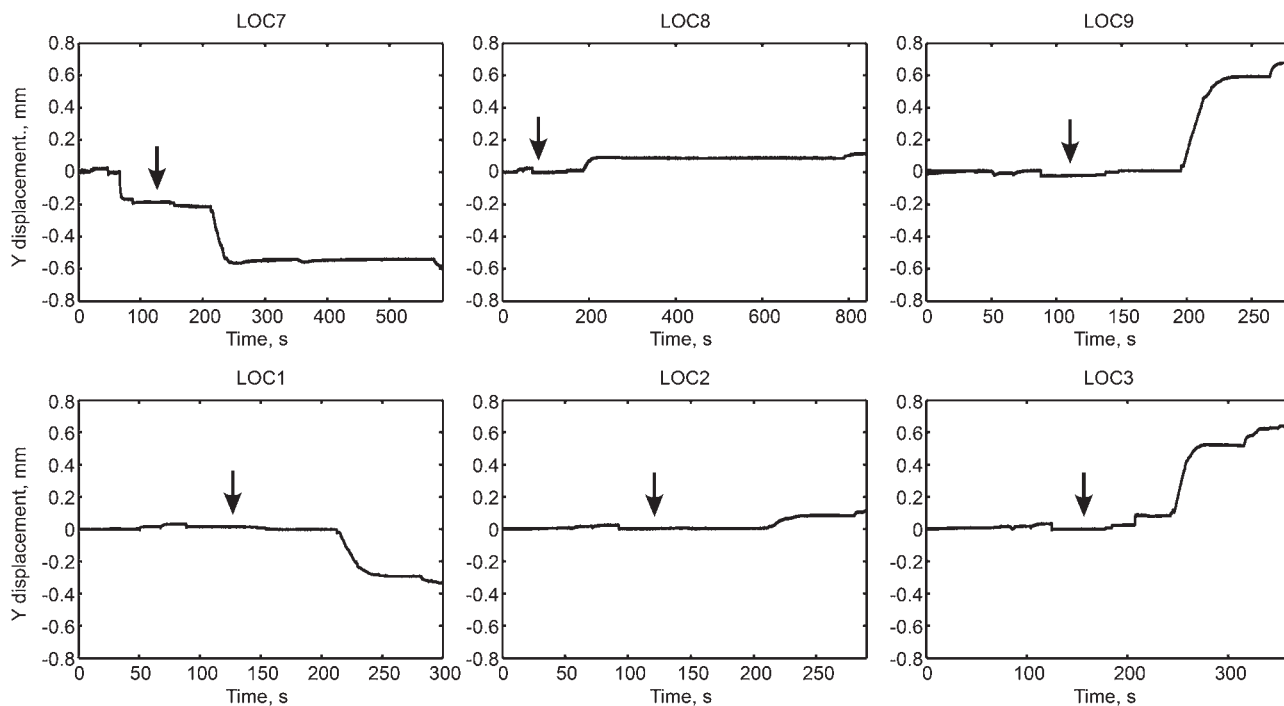


図 5 LOC1-3, 7-9 における主油圧・副油圧系統への加圧にともなう Y 変位。矢印は図 4 と同様
 Fig. 5 Y displacement at LOC 1-3 and 7-9 accompanying the pressurization of main- and sub-oil-pressure system.
 The meaning of the arrow is same as Fig. 4.

した時に、回転中心は $X=5,230$ mm, $Y=1,910$ mm の位置にあり、この点を中心に反時計回りに 0.0051° 回転し、さらに X 方向に 0.02 mm, Y 方向に -0.04 mm 移動したことが推定された。図 11 に、推定した回転中心の位置と、推定した運動によって測定されるべき水平変位分布を示す。変位の測定値と推定値はよく一致しており、正しく推定できていることが確認できる。回転運動の中心は振動台の南西部にあり、振動台の張り出し部分ではない本体の南端に位置している。この位置は、加振時に大きな Z 変位や X 変位の偏差が生じている測定点 LOC1 に近い。したがって、振動台の南西部に何らかの障害（比較的摩擦の大きな接点等）があり、それが LOC1 の大きな偏差やその接点を中心とした回転運動を引き起こしている可能性がある。一方、垂直変位に関して有意な変位分布が見られ、北東部及び南西部においては、副油圧系統スタンバイ後に比べ下降している。振動台の剛体的運動と関連している可能性はあるが、その変位分布は剛体運動では説明できず、北西 - 南東方向の軸を対称に折り曲げられたよう

な分布を示している。

どのような原因であれ、スタンバイおよび加振を通して、本来生じるべきではない変位の中で最大のものは主油圧系統への加圧によって引き起こされる水平変位である。振動台を利用した実験をおこなう際には、この変位を考慮し治具に余裕を持たせる必要がある。また、図 8, 図 9 および表 6, 表 7 に示しているのは、振動方向に平行かつ水平からの変位であり、注意深く治具を設置しても、表 4 程度の設置誤差は生じる可能性はある。したがって、この設置誤差に起因する変位も考慮に入れなければならない。たとえば振動方向に対し設置誤差がわずか 1° でも発生すれば、 400 mm の変位に対し約 7 mm もの変位が発生することが幾何学的に導き出される。さらに、X, Y, Z 全ての成分で、速度が大きくなるにつれて偏差および変位が大きくなる傾向にあることにも注意が必要である。また、今回の測定結果は全て無負荷状態でおこなわれており、振動台に荷重がかかった状態での挙動は異なる可能性がある。

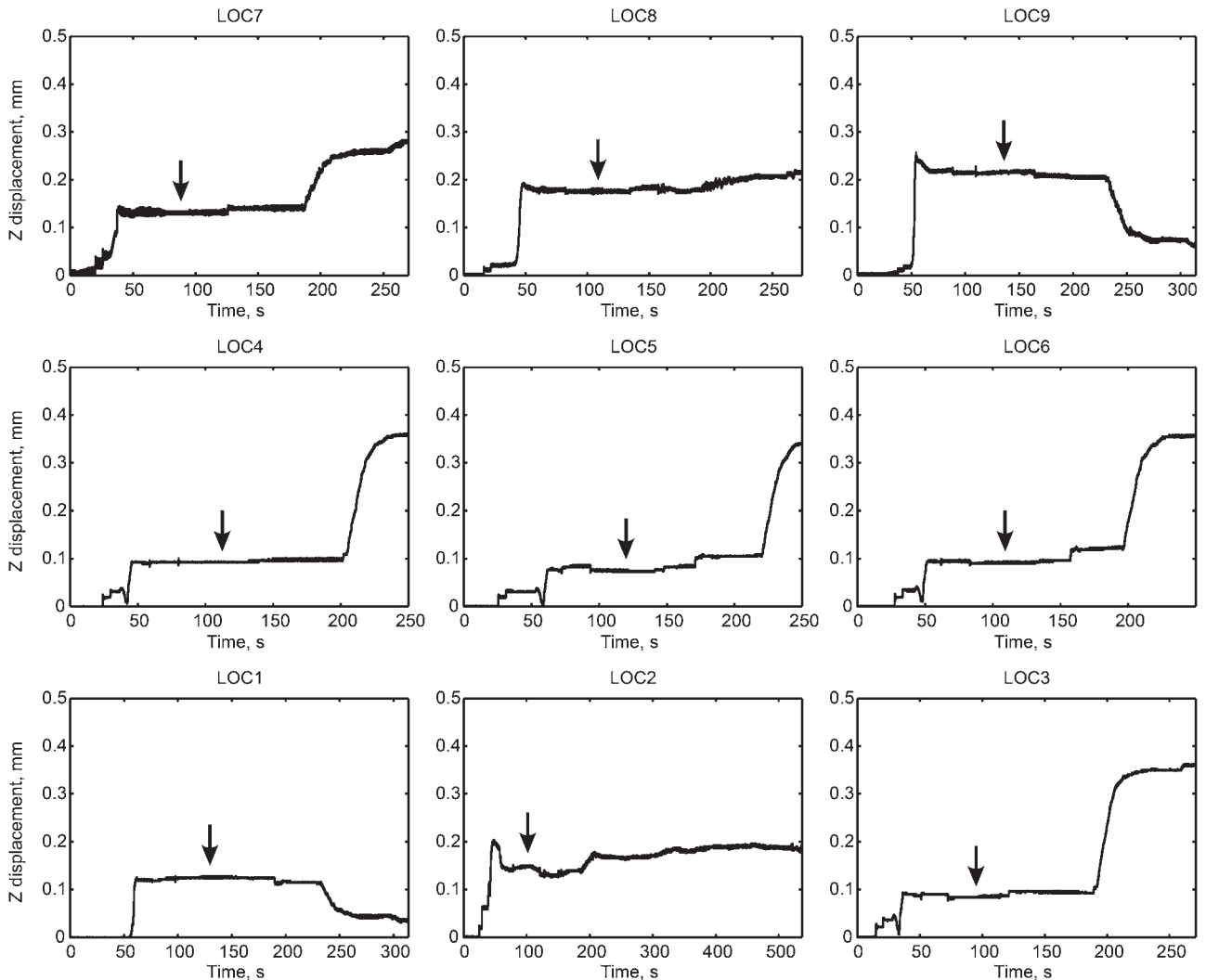


図 6 LOC1-9 における主油圧・副油圧系統への加圧にともなう Z 変位。矢印は図 4 と同様

Fig. 6 Z displacement at LOC 1-9 accompanying the pressurization of main- and sub-oil-pressure system. The meaning of the arrow is same as Fig. 4.

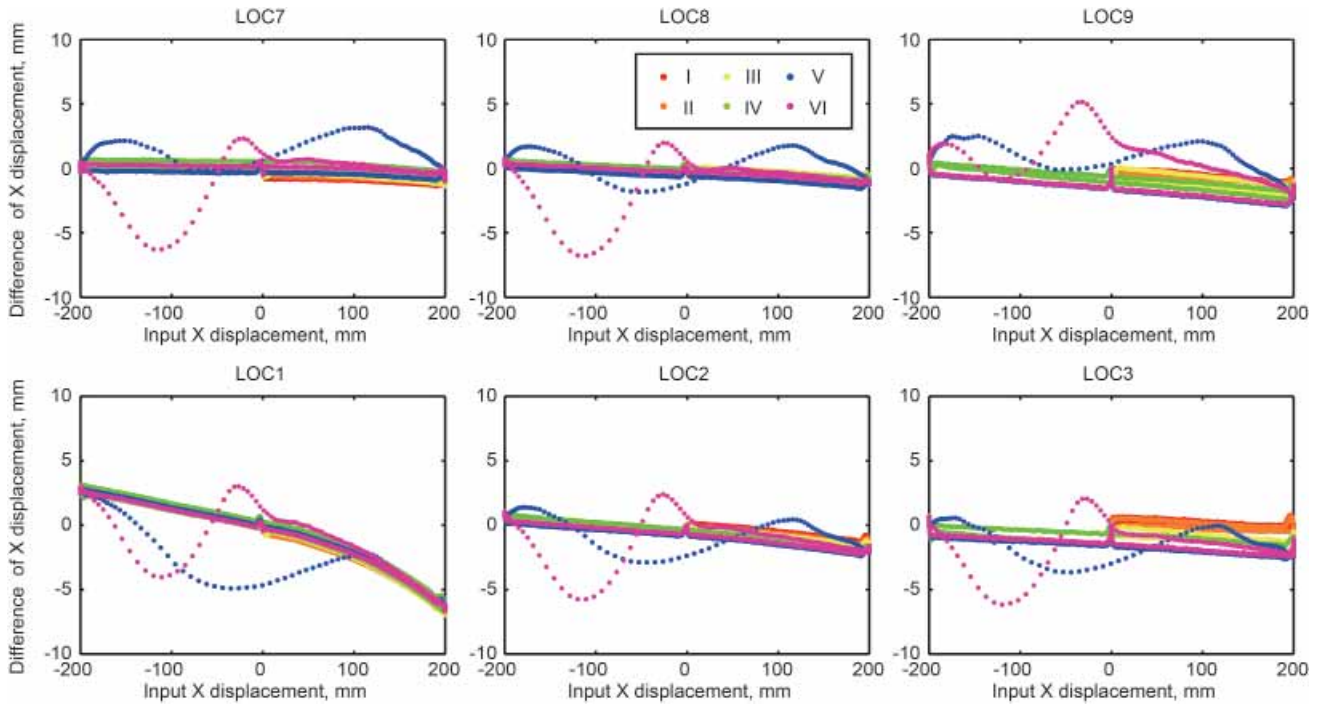


図 7 LOC1-3, 7-9 における, 図 3 の入力波形 I-VI を用いて加振した際の, 入力した X 変位と測定した X 変位との差と入力した X 変位の関係

Fig. 7 Differences between input X displacements and measured X displacements as a function of input X displacement for different input signals I-VI (Fig. 3) at LOC1-3 and 7-9.

表 5 加振中の入力 X 変位と測定した X 変位との差の標準偏差および最大値

Table 5 Standard and maximum deviations of the differences between input and measured X displacements during the shaking.

| Wave form | Deviation of X displacement, mm | | | | | | |
|-----------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | LOC1 | LOC2 | LOC3 | LOC7 | LOC8 | LOC9 | |
| I | Standard deviation | 2.079 | 0.482 | 0.104 | 0.320 | 0.286 | 0.343 |
| | Maximum deviation | -6.856 | -1.579 | 0.781 | -1.393 | -1.025 | -1.338 |
| II | Standard deviation | 2.668 | 0.611 | 0.193 | 0.421 | 0.361 | 0.425 |
| | Maximum deviation | -6.932 | -1.603 | 0.686 | -1.332 | -1.238 | -1.359 |
| III | Standard deviation | 3.087 | 0.778 | 0.453 | 0.536 | 0.461 | 0.640 |
| | Maximum deviation | -6.922 | -2.052 | -1.718 | -1.368 | -1.333 | -2.042 |
| IV | Standard deviation | 3.642 | 1.041 | 0.773 | 0.441 | 0.630 | 0.977 |
| | Maximum deviation | -6.750 | -2.050 | -2.427 | -1.026 | -1.222 | -2.439 |
| V | Standard deviation | 3.744 | 1.124 | 0.944 | 0.461 | 0.711 | 1.135 |
| | Maximum deviation | -6.627 | -2.891 | -3.647 | 3.167 | -1.828 | -2.928 |
| VI | Standard deviation | 3.743 | 1.127 | 0.909 | 0.501 | 0.767 | 1.126 |
| | Maximum deviation | -6.667 | -5.757 | -6.153 | -6.294 | -6.787 | 5.144 |

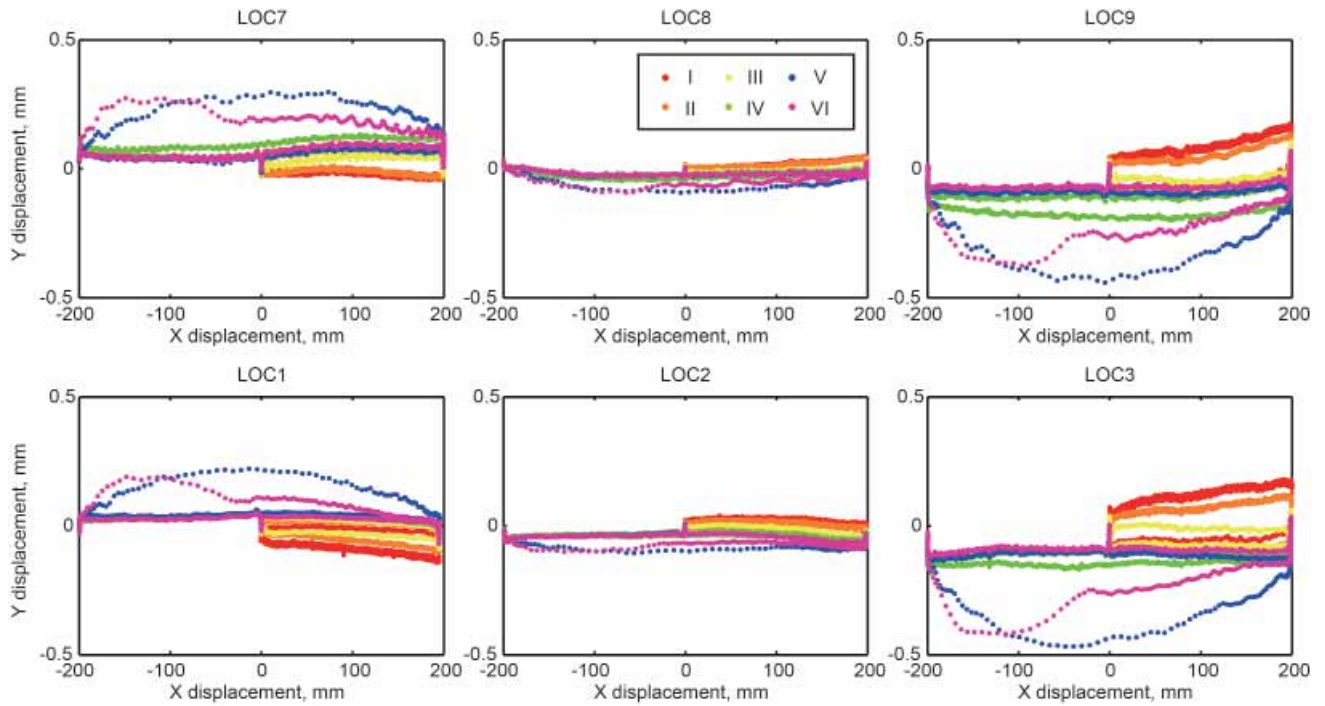


図8 LOC1-3, 7-9 における, 図3の入力波形 I-VI を用いて加振した際の, 加振時の Y 変位と入力した X 変位の関係
 Fig. 8 Y displacement at LOC1-3 and 7-9 during the shaking using different input signals I-VI (Fig. 3).

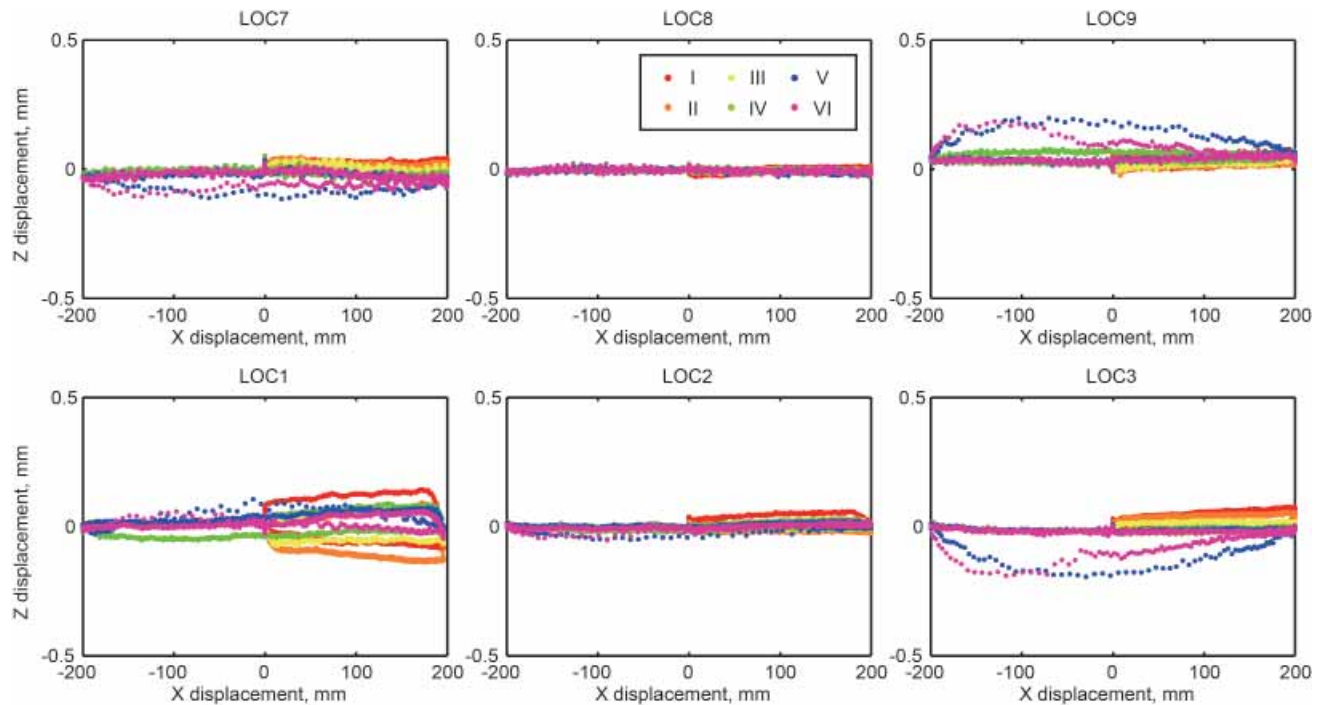


図9 LOC1-3, 7-9 における, 図3の入力波形 I-VI を用いて加振した際の, 加振時の Z 変位
 Fig. 9 Z displacements at LOC1-3 and 7-9 during the shaking using different input signals I-VI (Fig. 3).

表 6 加振中の Y 変位の標準偏差および最大値
Table 6 Standard and maximum deviations of Y displacements during the shaking.

| Wave form | | Deviation of Y displacement, mm | | | | | |
|-----------|--------------------|---------------------------------|--------|--------|-------|--------|--------|
| | | LOC1 | LOC2 | LOC3 | LOC7 | LOC8 | LOC9 |
| I | Standard deviation | 0.029 | 0.009 | 0.041 | 0.013 | 0.014 | 0.043 |
| | Maximum deviation | -0.146 | -0.045 | 0.186 | 0.100 | 0.049 | 0.176 |
| II | Standard deviation | 0.034 | 0.013 | 0.049 | 0.020 | 0.016 | 0.054 |
| | Maximum deviation | -0.103 | -0.052 | -0.122 | 0.081 | 0.045 | 0.134 |
| III | Standard deviation | 0.038 | 0.016 | 0.035 | 0.025 | 0.015 | 0.052 |
| | Maximum deviation | -0.093 | -0.055 | -0.090 | 0.082 | 0.035 | 0.109 |
| IV | Standard deviation | 0.030 | 0.021 | 0.054 | 0.034 | 0.017 | 0.061 |
| | Maximum deviation | -0.071 | -0.073 | -0.177 | 0.137 | -0.048 | -0.204 |
| V | Standard deviation | 0.031 | 0.025 | 0.063 | 0.043 | 0.017 | 0.054 |
| | Maximum deviation | 0.220 | -0.107 | -0.477 | 0.302 | -0.092 | -0.444 |
| VI | Standard deviation | 0.031 | 0.024 | 0.057 | 0.041 | 0.017 | 0.053 |
| | Maximum deviation | 0.194 | -0.102 | -0.427 | 0.274 | -0.094 | -0.381 |

表 7 加振中の Z 変位の標準偏差および最大値
Table 7 Standard and maximum deviations of Z displacements during the shaking.

| Wave form | | Deviation of Z displacement, mm | | | | | |
|-----------|--------------------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | | LOC1 | LOC2 | LOC3 | LOC7 | LOC8 | LOC9 |
| I | Standard deviation | 0.029 | 0.007 | 0.017 | 0.009 | 0.007 | 0.010 |
| | Maximum deviation | 0.144 | 0.059 | 0.077 | 0.048 | -0.030 | 0.078 |
| II | Standard deviation | 0.056 | 0.011 | 0.021 | 0.014 | 0.005 | 0.009 |
| | Maximum deviation | -0.138 | 0.030 | 0.055 | 0.047 | -0.024 | 0.064 |
| III | Standard deviation | 0.036 | 0.009 | 0.016 | 0.013 | 0.007 | 0.013 |
| | Maximum deviation | 0.081 | 0.032 | 0.031 | -0.045 | -0.022 | 0.045 |
| IV | Standard deviation | 0.026 | 0.009 | 0.015 | 0.014 | 0.010 | 0.023 |
| | Maximum deviation | 0.088 | 0.029 | 0.044 | 0.051 | -0.030 | 0.078 |
| V | Standard deviation | 0.019 | 0.008 | 0.022 | 0.019 | 0.010 | 0.022 |
| | Maximum deviation | 0.105 | -0.051 | -0.195 | -0.116 | -0.029 | 0.197 |
| VI | Standard deviation | 0.019 | 0.008 | 0.021 | 0.018 | 0.008 | 0.018 |
| | Maximum deviation | 0.059 | -0.053 | -0.190 | -0.107 | -0.028 | 0.185 |

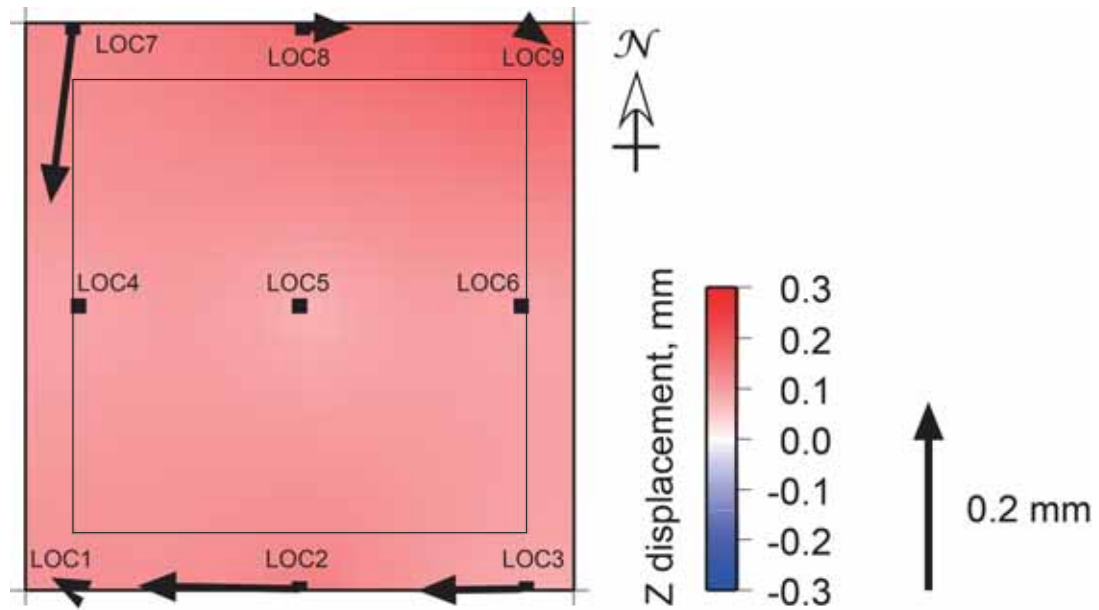


図 10 副油圧系統への加圧にともなう振動台の変位分布．水平変位は矢印，鉛直変位は色で表している．四角は測定地点を示す．

Fig. 10 Distribution of the displacements of the shaking table caused by the pressurization of sub-oil-pressure system. Horizontal displacements are denoted by arrows. Vertical displacements are denoted by color map. Solid squares represent the locations of displacement measurement.

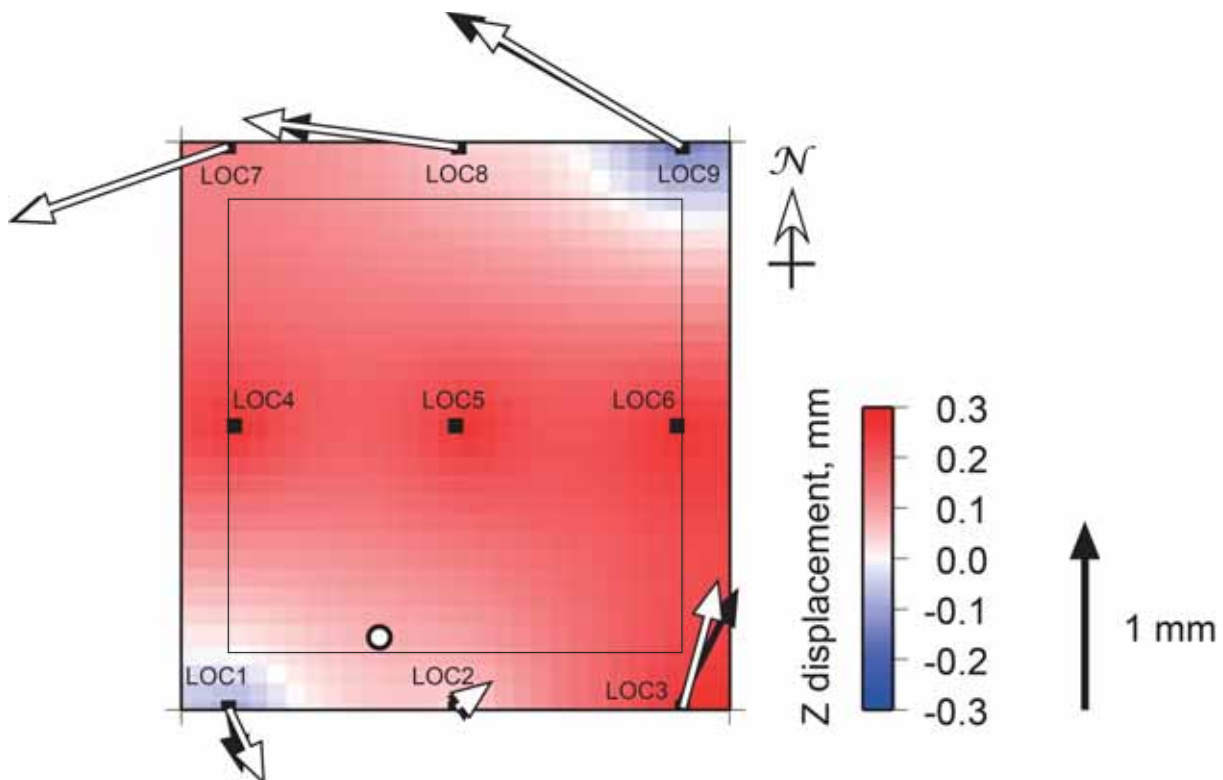


図 11 主油圧系統への加圧にともなう変位分布．記号は図 10 と同様．白矢印は振動台の動きが剛体運動と仮定した際の水平変位分布の推定値を示し，白丸は推定した回転運動の中心を示す．

Fig. 11 Distribution of the displacements caused by the pressurization of main-oil-pressure system. Open arrows represent the estimated horizontal displacements under the assumption that the shaking table moves as a solid body. Open circle represents the estimated center of rotation. The meanings of other symbols are the same as in Fig. 10.

5. まとめ

第3期中期計画中に大型耐震施設を利用して実施を予定している摩擦実験に先立ち、振動台の準静的な台移動を含めた広帯域な速度域における振動台の制御性能を調査した。振動台を加振するための入力波形として0.9 mm/sから900 mm/sの幅広い速度レンジの波形を使用し、2台のレーザー変位計を用いて振動台の3次元的な変位を測定した。また、加振時のみならず、加振準備段階での副油圧系統および主油圧系統への加圧にともなう変位についても測定をおこなった。副油圧系統スタンバイ時には振動台全体が平均で約0.126 mm上昇しているが、水平変位分布には系統だった変位が見られなかった。一方、主油圧系統スタンバイ時には最大で1.442 mmに達する大きい有意な水平変位が発生した。解析の結果、その振動台の水平変位分布は、主に振動台の南西端を中心とした回転運動で表されることが明らかになり、振動台南西部分に何らかの障害がある可能性が示唆された。副油圧系統を加圧し始めてから主油圧系統を加圧し加振準備完了するまでの最終的な最大上昇量はLOC3（南東端）における0.361 mmであった。

加振中のX, Y, およびZ方向の変位を調べたところ、入力波形に対するX方向の実測変位の偏差が最も大きく、最大で6.932 mmの差が生じていることが分かった。YおよびZ方向の変位は、最大でそれぞれ0.477 mm, 0.197 mmであった。これらの偏差および変位は加振速度とともに大きくなる傾向にある。逆に言えば、低速度での加振は偏差が小さいため、より高い制御性能で実験をおこなえるだろう。ただし前述の変位は全てターゲットの傾きを修正した後のものである。わずかな設置誤差であっても、振動変位にともなって理想からの逸脱が大きくなるため、治具の設計にはこれらの変位を吸収する余裕を持たせるとともに、可能な限り設置誤差が小さくなるよう設置する必要がある。

謝辞

読者のコメントは本稿の改善に有益でした。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 防災総合研究部(1996): 大型耐震実験施設利用実験概要集. 防災科学技術研究所研究資料, No.172, 1-200.
- 2) Di Toro, G., Goldsby, D. L., and Tullis, T. E. (2004): Friction falls towards zero in quartz rock as slip velocity approaches seismic rates. *Nature*, **427**, 436-439.
- 3) Di Toro, G., Han, R., Hirose, T., De Paola, N., Nielsen, S., Mizoguchi, K., Ferri, F., Cocco, M., and Shimamoto, T. (2011): Fault lubrication during earthquakes. *Nature*, **471**, 494-498.
- 4) Dieterich, J. H. (1972): Time-dependent friction in rocks. *J. Geophys. Res.*, **77**, 3690-3697.
- 5) Dieterich, J. H. (1978): Time-dependent friction and the mechanics of stick-slip. *PAGEOPH*, **116**, 790-806.

- 6) Dieterich, J. H. (1979): Modeling of rock friction 1. Experimental results and constitutive equations. *J. Geophys. Res.*, **84(B5)**, 2161-2168.
- 7) Dieterich, J. H. (1981): Potential for geophysical experiments in large scale tests. *Geophys. Res. Lett.*, **8**, 653-656.
- 8) Fukuyama, E. and Mizoguchi, K. (2010): Constitutive parameters for earthquake rupture dynamics based on high-velocity friction tests with variable sliprate. *Int. J. Fract.*, **163**, 15-26.
- 9) Hirose, T. and Shimamoto, T. (2005): Growth of molten zone as a mechanism of slip weakening of simulated faults in gabbro during frictional melting. *J. Geophys. Res.*, **110(B5)**, B05202.
- 10) 国立防災科学技術センター-(1983): 国立防災科学技術センター-(筑波)大型振動台のあゆみ. 防災科学技術研究資料, No.83, 1-273.
- 11) Marone, C. (1998): Laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **26**, 643-696.
- 12) 箕輪親宏・小川信行・大谷圭一(1989): 大型耐震実験装置更新報告. 防災科学技術研究資料, No.140, 1-63.
- 13) Mizoguchi, K., Hirose, T., Shimamoto, T., and Fukuyama, E. (2007): Reconstruction of seismic faulting by high-velocity friction experiments: An example of the 1995 Kobe earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L01308.
- 14) Ohnaka, M. and Kuwahara, Y. (1990): Characteristic features of local breakdown near a crack-tip in the transition zone from nucleation to unstable rupture during stick-slip shear failure. *Tectonophysics*, **175**, 197-220.
- 15) Ohnaka, M., Kuwahara, Y., Yamamoto, and K., Hirasawa, T. (1986): Dynamic breakdown processes and the generating mechanism for high-frequency elastic radiation during stick-slip instabilities. in *Earthquake source mechanics*, edited by S. Das, J. Boatwright, and C. H. Scholz, 13-14, AGU, Washington, DC.
- 16) Okubo, P. G. and Dieterich, JH. (1981): Fracture energy of stick-slip events in a large scale biaxial experiment. *Geophys. Res. Lett.* **8**, 887-890.
- 17) Okubo, P. G. and Dieterich, JH. (1984): Effects of physical fault properties on frictional instabilities produced on simulated faults. *J. Geophys. Res.*, **89(B7)**, 5817-5827.
- 18) Reches, Z. and Lockner, D. A. (2010): Fault weakening and earthquake instability by powder lubrication. *Nature*, **467**, 452-455.
- 19) Ruina, A. (1983): Slip Instability and State Variable Friction Laws. *J. Geophys. Res.*, **88**, 10359-10370.
- 20) Tinti, E., Fukuyama, E., Piatanesi, A., and Cocco, M. (2005): A Kinematic Source-Time Function Compatible with Earthquake Dynamics. *Bull. Seism. Soc. Am.* **95**, 1211-1223.

21) Tsutsumi, A. and Shimamoto, T. (1997): High-velocity frictional properties of gabbro. *Geophys. Res. Lett.* **24**, 699-702.

(2011年 9月 28日原稿受付,
2011年 10月 25日改稿受付,
2011年 11月 1日原稿受領)

要 旨

防災科学技術研究所大型耐震実験施設にて運用されている大型振動台の、準静的な台移動を含めた広帯域な速度域 (0.9-900 mm/s) における制御性能の調査をおこなった。レーザー変位計を用いた測定から、振動台は加振準備段階における副油圧系への加圧開始から主油圧系への加圧完了までに最大で 0.361 mm 上昇していることが明らかとなった。副油圧系の加圧完了後から加振直前までは、振動台が南西端を中心に剛体的に回転運動していることが推定された。回転運動にともなう水平変位は最大で 1.442 mm に達していた。加振中の振動方向に直交する水平変位は最大で 0.477 mm で、この変位は高速度の入力波形ほど大きくなる傾向にあった。入力した変位波形と実際に測定された振動方向の変位との差は最大で 6.932 mm であった。これらの測定データは、この振動台を用いた大型岩石試料の摩擦実験に役立てられる予定である。

キーワード：大型振動台，準静的制御性能，大型試験体の変位計測