

実大三次元震動破壊実験装置の 加振機構開発

○佐藤 栄児¹・小川 信行²・清水 信行³

¹工修 科学技術庁防災科学研究所 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1)

²工博 科学技術庁防災科学研究所 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1)

³工博 いわき明星大学教授 理工学部機械工学科 (〒970-8551 福島県いわき市中央台飯野 5-5-1)

For aiming the completion of 2005, 3-D Full-Scale Earthquake Testing Facility is now under construction. The basic performances of this facility are the maximum velocity of 200 cm/s and the maximum displacement of 200 cm p-p in the horizontal excitation with the test weight of 1200 ton. To realize such performances, we need much larger actuators than those used in former shaking table systems. After the completion of the prototype system, we have conducted verification tests of the large shaking mechanism and completed successfully. This paper describes the outline of verification tests of the large actuator system for 3-D Large Scale Shaking Table.

Key Words: large shaking table, hydraulic actuator, oil column resonance, 3-D earthquake motion

1. 緒言

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では6400人余りの方々が亡くなり、数十万人の人々が家を失う被害が発生した。またちょうど1年前の1994年1月17日、アメリカのロサンゼルス近郊を震源としたノースリッジ地震でもビルの倒壊やライフライン施設に大きな被害が発生した。これらの地震では、現代都市機能と社会基盤施設のもろさを浮かび上がらせた。これらの地震被害の経験からそれまで安全だと思っていた構造物の中にも安全でないものがあることがわかってきた。そこで構造物の破壊過程を解明するため、科学技術庁と防災科学技術研究所は、三次元地震動を再現できる大型震動台を提案し、現在「実大三次元震動破壊実験施設」の整備を進めている。

現在整備中の実大三次元震動破壊実験施設（以下、「本施設」という）の基本性能は、水平軸で最大変位±100cm、最大速度200cm/sec、震動台搭載重量は、最大1200tonまで搭載可能であり、過去に類を見ないほどの規模である。これらの性能を満足するためには、新たな加振機構等の技術開発が必要となってくる。防災科学技術研究所は、本施設の加振機構の要素技術開発として震動台面積6m×6m、水平加振機合計4本、垂直加振機合計4本を有した確認試験装置を製作し、各種確認試験を行った。確認試験では、震動台上に試験体を搭載しないで行った無負荷試験と、震動台上に

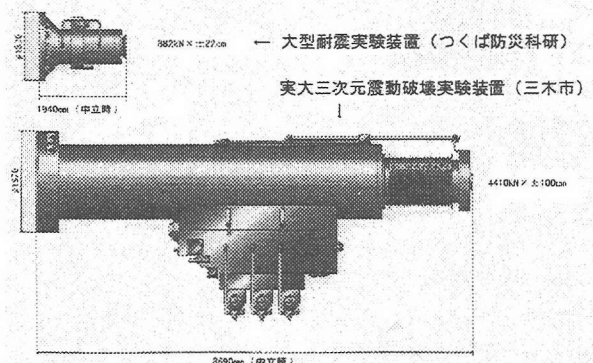


図-1 水平加振機外形比較図

剛体負荷試験体又は弾性負荷試験体を搭載した負荷試験を行い、加振機構の基本性能を確認した。本論文では、加振機構要素技術開発の概要と確認試験結果を報告する。

2. 加振機構要素技術開発

(1) 加振機構要素技術開発の目的

過去に大小様々の振動台が製作されているが本施設は、図-1に示すように過去に類をみないほど大規模な加振機を用いる。そのため過去に開発されてきた技術

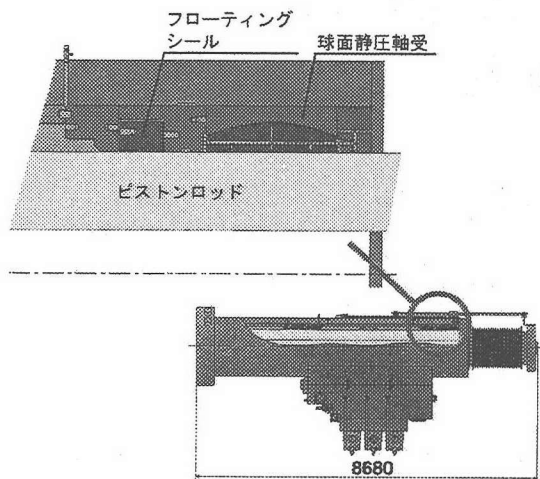


図-2 水平加振機静圧球面軸受構造図

をさらに発展させた新たな技術開発が必要となってくる。また開発した加振機構の技術が本施設の加振機構として性能を満足しているかどうかを確認する必要がある。

(2) 要素技術開発の新規開発技術

要素技術開発において新たに開発した技術を以下に示す。

a) 加振機静圧球面軸受

油圧加振機で大変位と高出力を実現するためには、かなり長い大型のピストンとシリンダーが必要となってくる。しかし、ピストンが大型のため自重によるたわみと高出力によるたわみが無視できないほどのものとなってくる。従来の軸受け方法では、このたわみにより加振機自身の故障につながる可能性がある。また、たわみによりピストンとシリンダーの摩擦が増加し加振波形の歪みに悪影響を及ぼし、精度のよい加振波形が得られない恐れがある。

それらの問題を解決するため、図-2に示す球面静圧軸受と呼ばれる新しい軸受方式を今回採用した。

この軸受けによりピストンが変形しても軸受け間隔を一定に保つことができ、駆動差圧で38kPa程度に摩擦力を低減させることができた。

b) 大型三次元継手

三次元継手には、加振機の力と動きを正確に震動台に伝える役割がある。そのためには、軸受隙間のガタ要素の影響を小さくすること及び潤滑による摩擦力を極力低減させる必要がある。今回の大型三次元継手では、摩擦係数が比較的小さい流体潤滑を採用した。三次元継手の構造を図-3に示す。また、高速・高荷重における軸受けの耐久性を確保するため、静圧を34.5MPaとした。

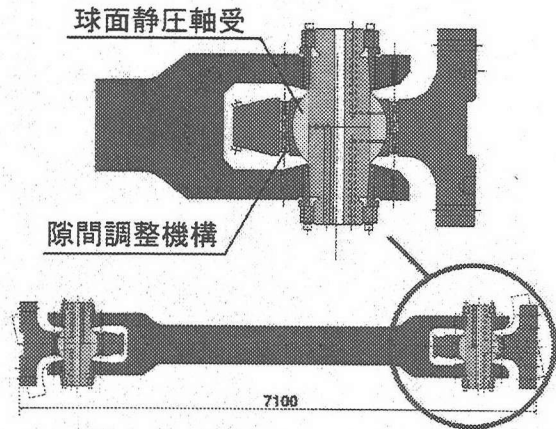


図-3 三次元継手静圧球面軸受構造図

表-1 確認試験装置仕様

項目	仕様		
	水平X軸	水平Y軸	垂直Z軸
搭載面積	6m×6m		
搭載重量	50ton		
駆動方式	アキュムレータ蓄圧/電気油圧制御		
最大加速度	0.4G*	0.4G*	0.4G*
最大速度	200cm/s	200cm/s	70cm/s
最大変位	±100cm	±100cm	±50cm

*仮反力壁の強度による制限を設けたものであり、加振機自体の性能とは異なる。

c) 大型サーボ弁

本施設の震動台において、水平軸で最大速度200cm/secを実現するためには、加振機内へ加振機1本あたり約45000ℓ/minの供給油量が必要となる。これほどの流量を実現するため、新たに15000ℓ/minの供給流量を発生する大型のサーボ弁を開発した。水平加振機1本あたり3台のサーボ弁を搭載することにより45000ℓ/minの供給流量を確保している。また垂直加振機の場合は、1本あたり1台のサーボ弁を搭載することにより最大速度70cm/secを実現できる。

3. 加振機構確認試験

(1) 加振機構確認試験装置の仕様

新たに開発した加振機構の基本的な性能を確認するため、加振機構確認試験装置を製作した。表-1に確認試験装置の仕様を示す。6m×6mの震動台は、確認試験装置用として製作された。しかし、加振機や三次元継手などは改良を加え本施設の震動台に使用することとなっている。また、主油圧ポンプユニットは、確

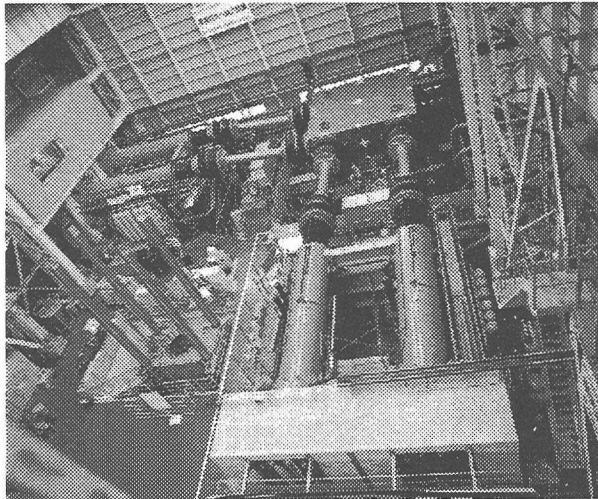


写真-1 検証試験装置外観

表-2 無負荷試験項目

試験項目		検討項目
基本性能試験	最大変位試験	<ul style="list-style-type: none"> 最大変位 クロスсток補償性能 摩擦特性
	最大速度試験	<ul style="list-style-type: none"> 最大速度
	加速度性能試験	<ul style="list-style-type: none"> 加速度波形歪み
総合性能試験	静特性試験	<ul style="list-style-type: none"> 直線性
	動特性試験	<ul style="list-style-type: none"> 周波数特性

検証試験装置においてディーゼルエンジンによる駆動方式を採用したが、本施設においては対環境性を考慮し、ガスエンジンによる駆動方式を採用することとなった。写真-1に検証試験装置の外観を示す。

(2) 無負荷試験

a) 無負荷試験目的

本施設を設計製作するにあたり、基本的な仕様を確認し基礎データを取得するため、震動台上に何も搭載しない状態で各種性能試験を行った。表-2に主要な無負荷試験項目を示す。

b) 基本性能試験

最大変位、最大速度、加速度性能を確認するため基本性能確認試験が行われた。

最大変位試験では、振幅 100cm、周波数 0.03Hz の正弦波を用いて行った。X軸の最大変位試験の結果を図-4にクロスсток補正の結果を図-5と表-3に示す。最大変位は十分に仕様を満足し、またクロスсток補償により他軸の変位が 0.2%以下に抑えられていることがわかる。また、最大速度試験の結果を図-6、図-7及び表-4に示す。最大速度についても仕様である水平軸 200cm/s、垂直軸 70cm/s を十分に満たしていることが

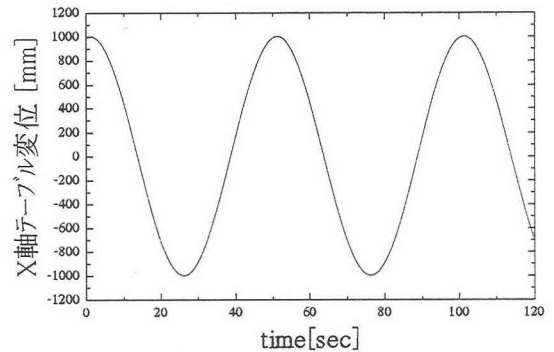


図-4 X軸テーブル変位 (X軸最大変位試験)

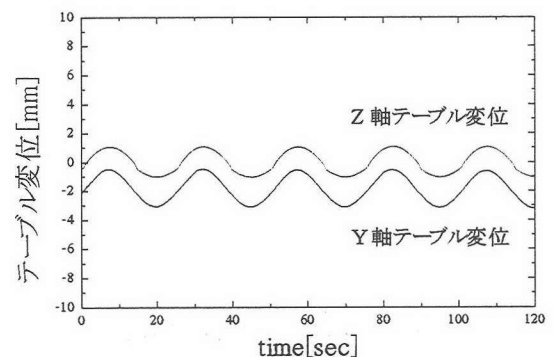


図-5 Y, Z軸クロスсток量 (X軸最大変位試験)

表-3 最大変位時クロスсток量

	目標値 [mm]p-p	観測値 [mm]p-p	他軸最大変位 [mm]p-p
X軸	2000	2001	2.8
Y軸	2000	2001	2.7
Z軸	1000	1000	0.9

わかる。

加速度性能試験においては、振幅 400Gal、周波数 5Hz の正弦波を用いて行った。各軸の加速度性能試験結果を図-8から図-10及び表-5に示す。反力壁の強度のため 400Gal までしか加速度性能試験は行うことができなかったが、目標である 400Gal は達成できた。しかし加速度波形の歪み率は、目標である各軸 15%以内を Z軸で満足していない。加振機構の機械的な要素で波形歪みを大きく改善することは難しい。従って、制御方法などソフト的な改善が今後の課題となる。

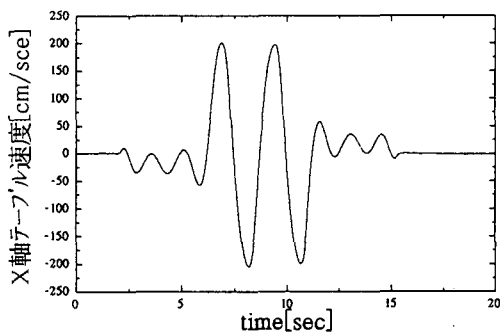


図-6 X軸最大速度試験結果

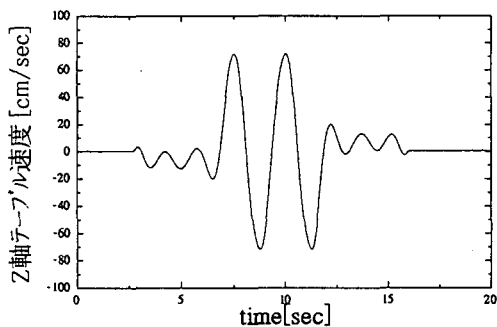


図-7 Z軸最大速度試験結果

表-4 最大速度試験結果

	定格速度 [cm/sec]	計測値 [cm/sec]
X軸	±200	+202.4 -203.2
Y軸	±200	+207.3 -206.2
Z軸	±70	+72.2 -72.1

c) 総合性能試験

総合性能試験は、検証試験装置の静的な特性と動的な特性を把握する目的で行われた。静特性試験は、主に加振機の直線性を確認するために行われた。振動台の目標値と計測値との誤差は、X軸及びY軸で0.2mm以下、Z軸で0.1mm以下であった。また回転についてであるが、各軸まわりにおいて誤差は0.002°以下であった。

また、動特性試験では、検証試験装置の周波数応答を把握する目的で行われた。0.5Hzから30Hzの有色ノ

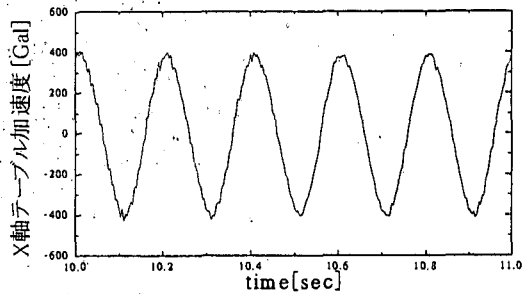


図-8 X軸加速度性能試験結果

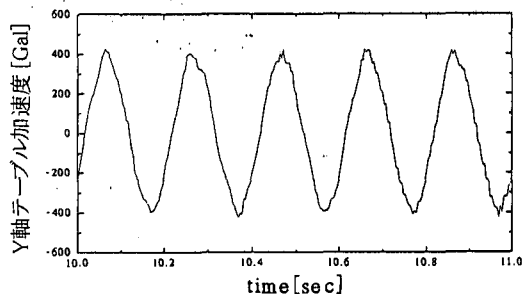


図-9 Y軸加速度性能試験結果

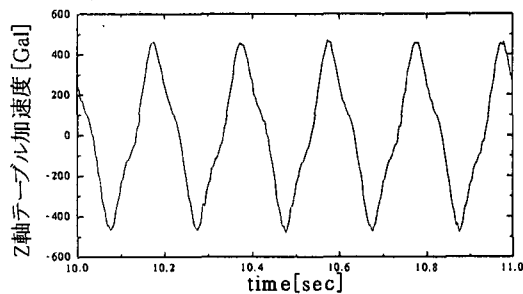


図-10 Z軸加速度性能試験結果

表-5 加速度性能試験結果

	目標加速度 [Gal]	計測加速度 [Gal]	歪み率
X軸	400	+399.8 -431.7	4.1%
Y軸	400	+420.2 -419.9	3.7%
Z軸	400	+471.1 -482.2	17.9%

イズ信号による加速度指令のランダム波を用いて3軸同時加振を行い、入力波と出力波より周波数特性を求

表-6 負荷試験項目

試験項目	検討項目
油柱共振 確認試験	負荷条件、震動台姿勢による油柱共振周波数の変化の確認
周波数特性 試験	震動台の周波数特性と軸間干渉の影響の確認
周波数掃引 試験	入力信号の違いに対する、周波数特性変化の確認
加速度性能 試験	負荷重量に対する加振機駆動力の変化の確認
加振系影響 確認試験	共振負荷試験体が震動台に与える影響の変化の確認

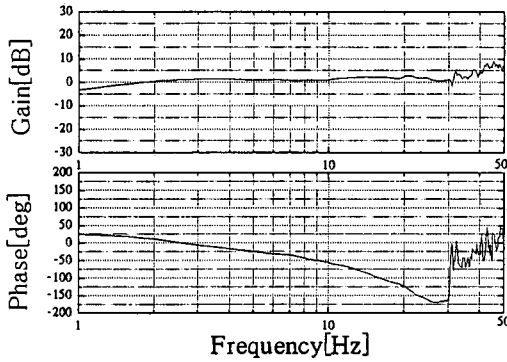


図-11 X軸加速度周波数応答（無負荷）

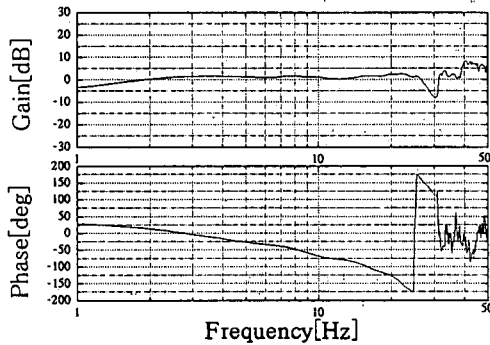


図-12 Y軸加速度周波数応答（無負荷）

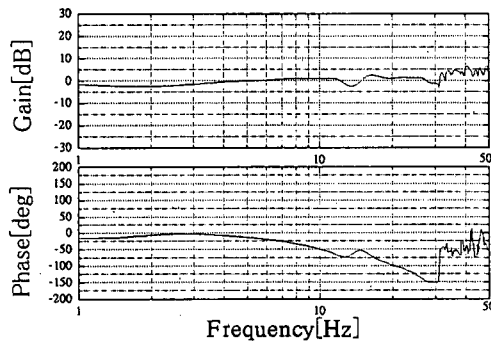


図-13 Z軸加速度周波数応答（無負荷）

めた。各軸における周波数応答を図-11から図-13に示す。確認試験装置における油柱共振周波数（油圧加振機内の油の圧縮性によるばね作用と、駆動部の質量によって、一般のばね質量系と同様な共振現象が現れる）は、水平軸で約7.3Hz、垂直軸で約16Hzである。しかし、この油柱共振現象を軽減させるため、確認試験装置ではThree Variable Control (TVC)（変位・速度・加速度を同時に制御する手法）とノッチフィルターを

用いた制御を行った。これにより各軸とも30Hz付近まで、ゲインに関しては±3dB以内でほぼフラットな特性を示し、また位相に関しては周波数に比例した滑らかな特性を示した。

(3) 負荷試験

a) 負荷試験目的

確認試験装置に負荷を搭載した場合の油柱共振、加振駆動力への影響などを把握するために、動的な試験を中心に負荷試験を行った。負荷による影響の違いを調査するため負荷試験体としては、剛体負荷試験体と弾性負荷試験体の2種類の試験体を用いた。

それぞれ試験体の重量は50tonで、弾性負荷試験体の固有振動数は、計算による数値として9Hzと5Hz、ハンマー打撃による数値として7.15Hzと5.9Hzであった。表-6に主要な負荷試験項目を示す。

b) 負荷試験結果

負荷試験結果として、油柱共振確認試験結果から求めたY軸についての周波数応答を図-14に、周波数特性試験結果から求めた周波数応答を図-15に示す。油柱共振確認試験は、負荷による共振周波数の変化を調査するため制御系の調整をそれほど行わず試験を行い、また周波数特性試験では、制御系の調整を行った上で試験を行った。実線は剛体負荷試験体で、点線は弾性負荷試験体の結果である。

油柱共振確認試験において弾性負荷試験の場合、試験体の固有振動数が確認試験装置の油柱共振周波数の付近にあるため、連成により2つの共振ピーク（固有振動数）が両側に移動していることが解る。また、周波数特性試験においてはTVC及びノッチフィルターの各パラメータを十分に調整したため、剛体負荷試験及び弾性負荷試験と共に共振ピークが消え30Hz付近までゲインがフラットになり、また位相においては周波数に比例した滑らかな特性を示している。

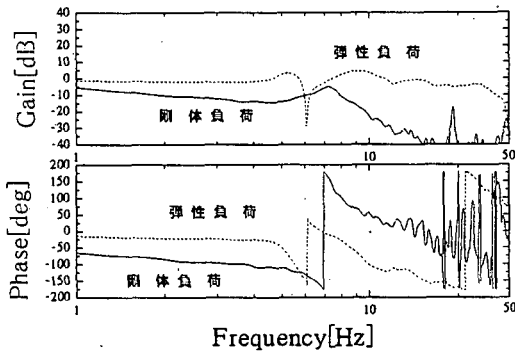


図-14 Y軸油柱共振確認試験（負荷）

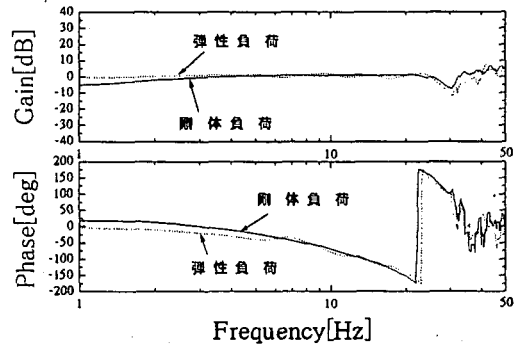


図-15 Y軸周波数特性試験（負荷）

(4) 地震波再現試験

確認試験装置において、地震波が再現可能かどうかを確認するため、兵庫県南部地震の際に JR 鷹取駅で観測された3成分同時記録⁴⁾の主要部を抽出した波形を用いて試験を行った。Y軸及びZ軸は、観測波に対しレベルを90%に抑え、また無負荷（震動台のみ）の状態で行った。目標加速度波形と計測波形を図-16から図-18に示す。加振軸により応答特性に差がみられる課題が残るものの、目標とした地震波が再現できることを確認した。

4. 結言

新たに開発した技術等を用いた加振機構の基本的な性能が仕様を満足していることを確認した。また、本施設の今後の設計製作において参考となる基礎的なデータが取得できた。しかし、今回の確認試験により、制御手法をはじめとするいくつかの課題が残り、今後これらの解決策を検討する必要がある。

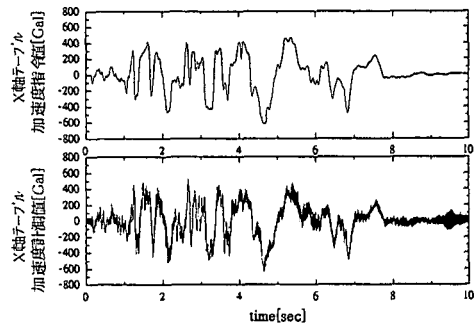


図-16 X軸加速度波形（地震波）

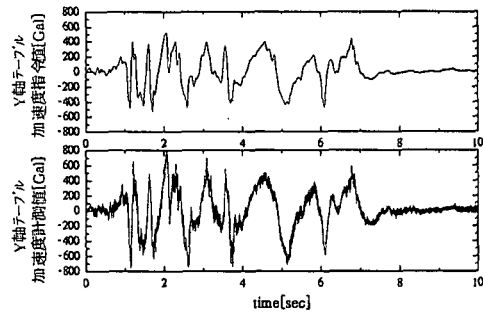


図-17 Y軸加速度波形（地震波）

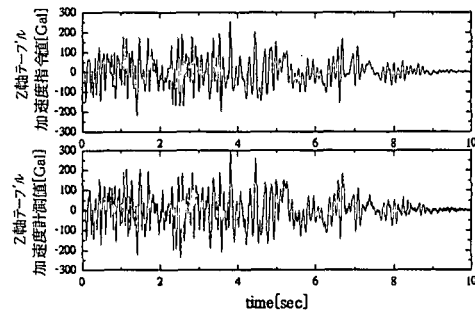


図-18 Z軸加速度波形（地震波）

謝辞：本施設を建設するにあたり、大学、研究機関、民間等の方々のご助言、ご支援を常々頂いている。これらの方々にご場を借りて深謝申し上げる次第である。また、本報告書を作成するにあたり三菱重工業下関造船所機械部 関係者に協力を得た。ここに感謝する。

参考文献

- 1) JR 警報地震計（鷹取，FD 番号 T065）
NAKAMURA, Yutaka, "Waveform and its Analysis of the 1995 Hyogo-Ken-Nanbu Earthquake", JR Earthquake Information No.23c, Feb. 1995 Railway Technical Research Institute.