

実大三次元震動破壊実験装置の新開発トライボロジー要素

Newly Developed Tribological Elements for 3-D Full-Scale Earthquake Testing Facility

技術本部 渡辺真太郎*¹ 前川和彦*²
田中保幸*³
下関造船所 小池明士*⁴ 山崎幸治*⁵

現在建設が進められている実大三次元震動破壊実験装置は兵庫県南部地震クラスの地震動を再現し、実物大の構造物の震動破壊実験が可能な世界最大の震動台である。構造物が載るテーブルには、三次元の振動を与えるために加振機が継手を介して取り付けられており、加振機および継手には軸受、シールなど多くのトライボロジー要素が含まれている。しかし、これら要素には非常に苛酷な作動条件と大型化が必要とされるため、従来技術の延長では成立が困難となる。これらの課題を解決するため、種々の新構造を採用することにより大荷重が支持可能な軸受、許容値内のリーク量を実現できるシールを開発した。

3-D Full-Scale Earthquake Testing Facility is being constructed which is the largest shaking table in the world for failure testing full-scale objects that simulate high-level ground motion of earthquakes such as the Kobe earthquake. Actuators are connected to the shaking table via 3-D links and actuators and 3-D links involve tribological elements such as bearings and seal. These tribological elements are operated under severe condition, requiring new elements. We developed high-performance bearings and seals with low leakage of hydraulic oil and low friction by using new tribological elements.

1. ま え が き

平成7年1月17日、大地震が阪神・淡路地区を襲った。後に兵庫県南部地震（震度7）と命名された大地震による被害は甚大なものであり、強く造ったつもりで構造物が予想に反して壊れていく現実を経験した。これを契機に構造物の耐震性の見直しと共に強い地震動を受けた場合にどのように壊れるのか、どこまで壊れるのか、なぜ壊れるのかが重要視されてきた。振動台は試験体に地震の振動を模擬して与える実験装置であり、構造物が地震動に対してどう挙動するのかについて貴重な実験結果が得られ、構造解析・構造設計手法の評価に役立てられてきた。しかしこれまでの振動台では寸法、搭載重量、加振力、加振方向などの性能の制約から、大地震による実大構造物の破壊過程を追う実験を行うことは困難であった。そこで実大三次元震動破壊実験装置は兵庫県南部地震などの大地震による地震動を正確に再現し、実物大の各種構造物の破壊実験を行うことにより、耐震設計、耐震補強技術等の一層の向上を図ることを目的に、防災科学技術研究所殿からの受注により兵庫県三木市の“三木震災記念公園”（仮称）内に建設中であり、平成17年3月の完成を目指している。図1にその概観を示す。最大搭載重量1200t（4階建ての鉄筋コンクリートのビルを想定）の震動台（20m×15m）に三次元の振動を与えるために、水平X方向およびY方向にそれぞれ5台、垂直Z方向に14台の加振機が三次元継手を介して震動台に取り付けられている。加振機および三次元継手に含まれるトライボロジー要素の課題を表1に示す。表1に示すように本実験装置と現在世界最大の（財）原子力発電技術機

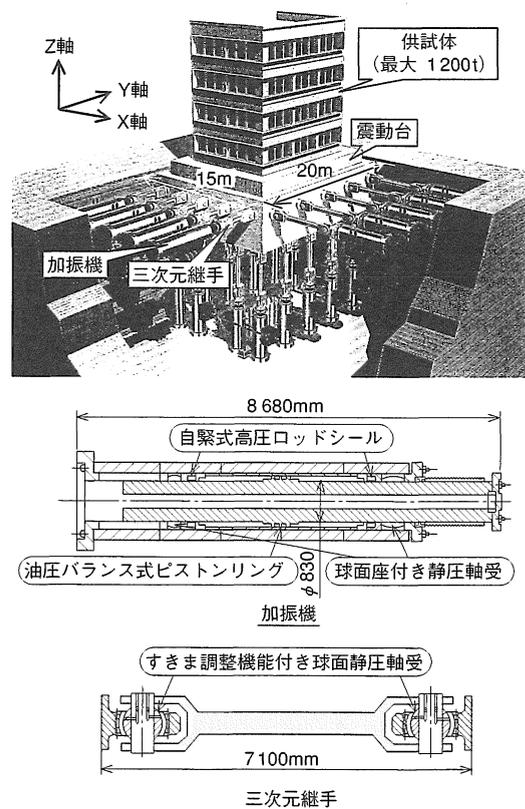


図1 実大三次元震動破壊実験装置概観 震動台に三次元の振動を与えるため、加振機が三次元継手を介して震動台に取り付けられている。大型化や往復動速度の増大に対応するため新構造のトライボロジー要素を開発した。
General view of 3-D Full-Scale Earthquake Testing Facility

*1 長崎研究所トライボロジー研究室長 *4 機械部 主席
*2 長崎研究所トライボロジー研究室主席 *5 機械部 工博
*3 長崎研究所強度研究室主席

表1 振動台の仕様の比較
Comparison of earthquake testing facilities

		実大三次元 震動破壊実験装置	(財)原子力発電技術機構 多度津振動台
最大搭載重量	(t)	1 200	1 000
テーブルサイズ	(m)	20×15	15×15
最大加速度 (G)	X 軸	0.9	1.84
	Y 軸	0.9	—
	Z 軸	1.5	0.9
最大速度	(cm/s)	200(Y 軸)	75(X 軸)
最大ストローク	(cm)	±100(Y 軸)	±20(X 軸)

構多度津工学試験所の振動台⁽¹⁾との違いは、まずストロークが±100 cm と多度津振動台±20 cm の5倍になるため、装置の大型化が避けられず加振機長さは中立時に8.68 m、三次元継手長さは7.10 m と大型化することである。大型化に伴い各部の変形量も大きくなるため、特に大荷重が作用する場合に軸受すきまやシールすきまの確保が困難になって焼付きに至ることが懸念される。また最大往復動速度が200 cm/s と多度津振動台75 cm/s の2.7倍になることもしゅう動面の条件を苛酷にするが、震動台に目標通りの地震加速度を与えるためには、しゅう動面の摩擦抵抗を低減させて加速度ひずみを抑える必要がある。

これらの従来にない条件におけるトライボロジー要素を成立させるために、図1の中に示したように加振機については球面座付き静圧軸受、油圧バランス式ピストンリング、自緊式高圧ロッドシールを、三次元継手についてはすきま調整機能付き球面静圧軸受を開発したので、以下にその特徴について紹介する。

2. 加振機における新構造トライボロジー要素

2.1 球面座付き静圧軸受

加振機の軸受の課題は、軸径φ830 mmの大径軸受で最大300 tの大荷重に対応するための負荷能力向上と、ピストンの傾斜に追従して片当りによる焼付きを防止することである。そこで図2に示すように軸受を給油圧力18 MPaの静圧軸受で構成し、静圧ポケットの個数および位置の最適化による負荷能力の向上を実現するとともに、外周面を球面にして往復動軸の傾斜に対して自動調心機能を持つ静圧軸受を開発した。実物の軸受を用いた単体検証試験では図2に示すように予測した300 tを上回る330 tの負荷能力をもち、またピストンの傾斜に対しては外周面の球面座で回転して軸受の姿勢が調節できることを確認した。

2.2 油圧バランス式ピストンリング

加振機の往復動はピストンの両側の油圧の大小を変化させることにより得られるが、実大三次元震動破壊実験装置では大型化に起因するピストン自身のたわみが大きいため、従来のようにピストンの部分を非接触にしてたわんだ場合にも接触しないだけのすきまをもたせると、漏れ量が増加してしまう。そこで図3のようにピストンにピストンリングを装着し、さらに低摩擦力が要求されるため、しゅう動面に切り欠きを

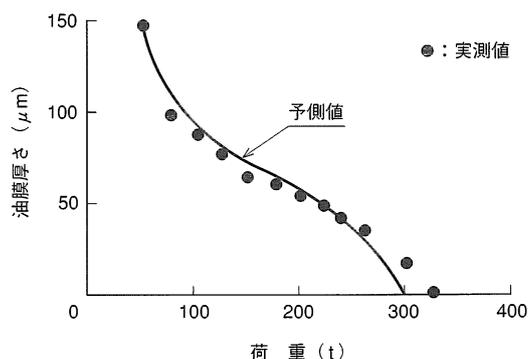
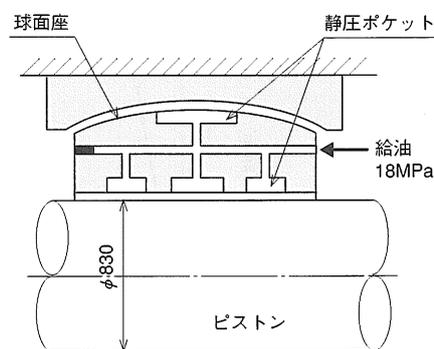


図2 加振機の球面座付き静圧軸受 ピストンの傾斜に対して自動調心機能を持つ静圧軸受を開発した。
Hydrostatic bearing with sphere surface

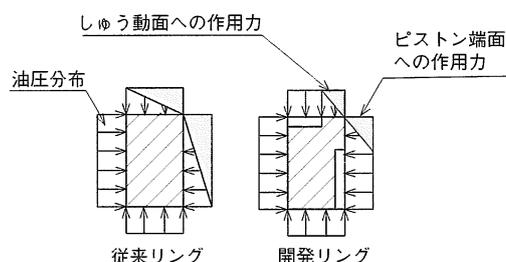
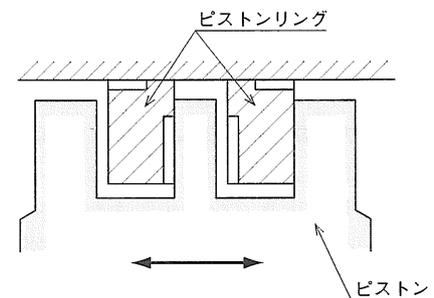


図3 油圧バランス式ピストンリング 加振機のピストンに漏れ量低減のためピストンリングを装着し、摩擦低減のためしゅう動面に切り欠きを設けた圧力バランス構造を採用した。
Pressure balanced piston rings

設けた圧力バランス構造とした。これらの技術の採用により、図4 (a)のように漏れ量を目標値である20 l/min以下に確保でき、かつ摩擦力は図4 (b)のように従来リングの1/5の低摩擦リングを実現させた。

2.3 自緊式高圧ロッドシール

加振機のシリンダ内から高圧作動油（最大油圧21 MPa）が

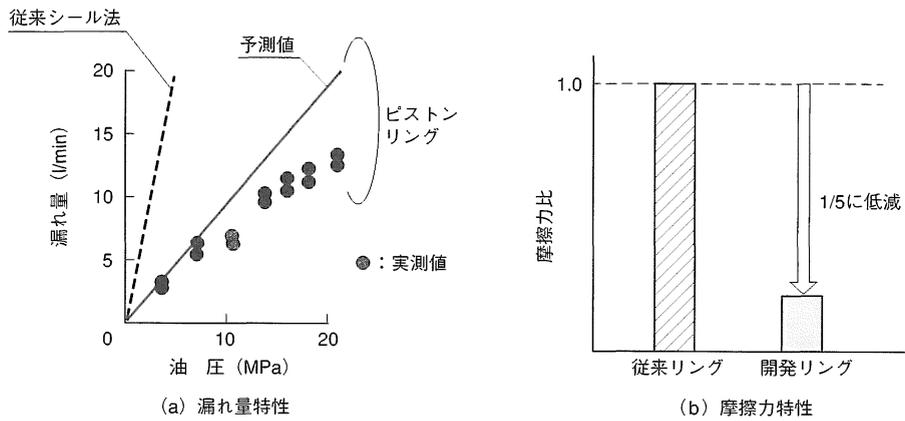


図4 ピストンリングの漏れ量および摩擦力特性 漏れ量を目標値 20 l/min 以下に確保できることを確認した。また開発リングの摩擦力は従来リングの 1/5 である。
Leakage and friction force of piston ring

外部へ漏れる量を低減させるため、ピストン往復動域の両端にはロッドシールを設置している。このロッドシールは通常 Oリング系の接触式が考えられるが、本装置のように高圧・高速の加振機では接触による摩擦力が大きく、波形ひずみを悪化させることになる。従って本装置では金属をリング状に加工し、特殊な油圧バランス技術を採用したフローティングシールを適用した。

フローティングシールは図5のように外周側と内周側に作用する油圧のアンバランスにより収縮変形するが、従来のフローティングシールでは最大速度 2 m/s の場合には図6 (a) のようにすきまがなくなり、焼付きが発生してしまう。

そこで本装置では内周面を段付き形状にして収縮変形をコントロールし、最大油圧 21 MPa の場合でも 50 μm の残存直径すきまが確保できるようにした。またこのシールは、油圧が高くなるほど変形が大きくなりすきまが小さくなるため、図6 (b) に示すように油圧と漏れ量の関係は、高圧時に漏れ量が低減できる特性を持っており、全油圧域で 1ヶ所のロッドシールからの漏れ量を目標値である 100 l/min 以下にできることを確認した。

3. 三次元継手のすきま調整機能付き球面静圧軸受

三次元継手の軸受は図7に示すように、直径 φ 570 mm の球形の内輪を二分割の外輪で覆い、自由に回転できるようにしている。内輪と外輪の間の微小な軸受すきまを精度良く設定するため、外輪の外側にあるテーパリングを締めて外輪を弾性変形させてすきまを調整する構造になっている。三次元

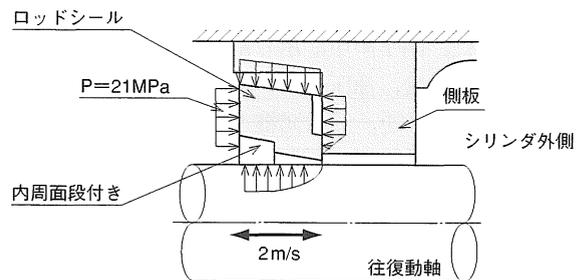


図5 自緊式高圧ロッドシール 内周側段付き構造として油圧のアンバランスによる収縮変形をコントロールしている。
Deformation controlled rod seal

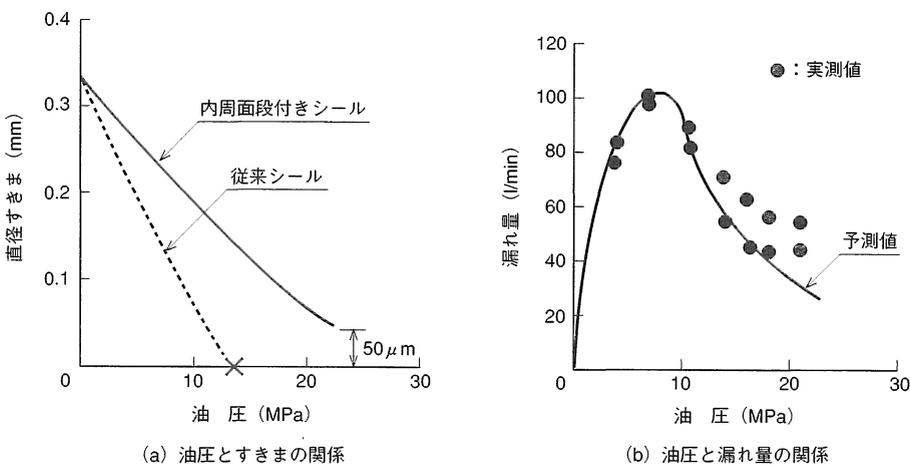


図6 自緊式高圧ロッドシールの特性 内周段付き構造により、最大油圧 21 MPa の場合でも 50 μm の直径すきまが確保できる。また全油圧域で漏れ量を目標値である 100 l/min 以下にできることを確認した。
Characteristic of deformation controlled rod seal

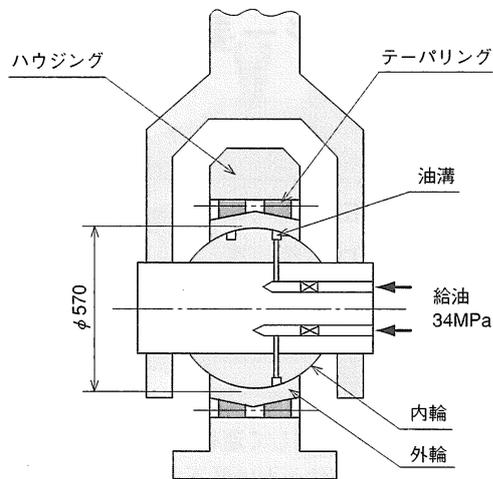


図7 すきま調整機能付き球面静圧軸受 内輪および外輪の間の微小な軸受すきまを精度良く設定するため、外輪の外側にあるテーパリングを締めて外輪を弾性変形させてすきまを調整する構造になっている。
Sphere hydrostatic bearing with clearance control function

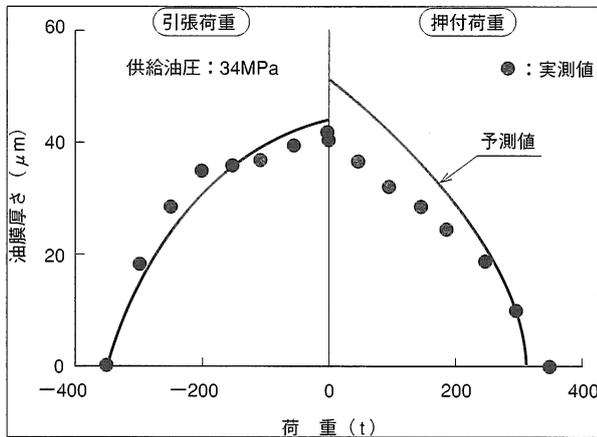


図8 三次元継手軸受の負荷能力 押付けおよび引張り両方向の荷重に対して350 tの負荷能力を持つ。
Load capacity of bearing of 3-D link

継手の軸受では高負荷能力と、加速度ひずみの制限から低摩擦とガタの低減が技術課題となった。従来の継手の多くはグリース潤滑軸受を採用しているが、本装置の継手はこれらの技術課題により給油圧力34 MPaの静圧軸受を採用した。しかしハウジング内周面に均等に34 MPaの油圧が作用すると大きな変形が生じてしまう。そこでハウジングの変形を考慮して弾性静圧流体潤滑を用いた設計を行い⁽²⁾⁽³⁾、最適変形を与えるハウジング形状、球状の内輪表面に設けた油溝形状などを決定した。これにより従来設計では100 t以下だった流体負荷能力を、図8のように押付けおよび引張り両方向の荷重に対して350 tに上昇させることができた。なお実機においては本軸受には最大640 tの荷重が作用するが、その条件下でも350 tの流体負荷能力と固体接触のハイブリッドで荷重を支持でき、苛酷な斜め方向12°の荷重に対しても十分対応できることを実大の単体試験により確認した。

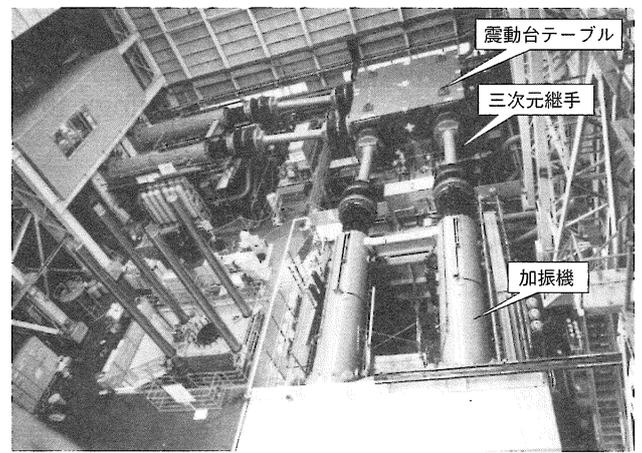


図9 確認試験機概観 確認試験により加振機の最大変位、最大速度などの目標性能が実現されることが確認され、今回新たに開発したトライボロジー要素の性能が予測通りであることが確認された。
Verification tester of large shaking mechanism

4. む す び

実大三次元震動破壊実験装置の開発の一環として、平成8年より当社下関造船所において加振機および三次元継手を実機と同じ仕様とした確認試験機(加振機は水平X軸2台、Y軸2台、垂直Z軸4台、加振テーブル6 m×6 m)を設計・製作し、平成10年には加振機構の確認試験を実施した。図9に確認試験機の写真を示す。この試験により加振機の最大変位、最大速度などの目標性能が実現されることが確認され、今回新たに開発したトライボロジー要素の性能が予測通りであることを確認している。約1年の確認試験終了時には全部品を分解チェックし、耐久性の確認、しゅう動部の摩耗の確認、作動油の化学成分の確認、製作/加工のバラツキ誤差の影響確認など、開発したトライボロジー技術の検証を行った。

本装置はあらゆる構造物の破壊過程を解明し、“強い揺れのもとで構造物がある程度壊れるのは許すが、人命は損なわない”という設計手法の確立を目的に、平成17年3月の完成を目指して現在建設が進められている世界最大の震動実験施設であり、この施設を通じてもたらされる研究成果に対して国内外から大きな期待が寄せられている⁽⁴⁾。本装置を通じて地震防災技術の開発に寄与できるよう、施設の建設を進めていく所存である。

参 考 文 献

- (1) 大野ほか、大型高性能振動台機械装置、三菱重工技報、Vol.20 No.3 (1983) p.225
- (2) 高橋、変形を考慮した静圧軸受特性の解析、日本トライボロジー学会トライボロジー会議予講集、金沢(1994-10) p.535
- (3) 桃園ほか、部分接触を考慮したTEHL解析、日本トライボロジー学会トライボロジー会議予講集、金沢(1994-10) p.89
- (4) 防災科学技術研究所パンフレット、世界最大の震動台をつくります(2001-6)