

A

多軸試験技術の高度化 (免震支承から自動車・航空機部材まで)

1995年の阪神淡路大震災で、ゴム支承を使用した橋梁の被害が少なかったことから、免震支承の性能評価試験方法の規格化のニーズが高まった。これを契機に、当社では国内に先駆けて免震支承の性能評価試験方法の開発に着手し、まず試験速度100kine(1,000mm/sec)のジャッキ型疲労試験機(400kNサーボ型アクチュエータ)を備えた水平1方向と鉛直1方向の加振ができる2軸動的試験装置を設計・製作した。鉛直荷重は一定圧縮面圧を付与する目的のみであったので両軸の同期は不要であった。当社では、本装置を用いて土木分野である道路橋の免震支承を含めた支承材の評価試験を数多く行ってきた。

2009年頃、建築分野では、実大試験体を用いた水平2方向加振試験を実施した際、試験に用いた高減衰積層ゴム内にねじれ変形が発生し、水平1方向加振時と比べて破断せん断ひずみが大きく減少することが確認された*1)。これを機に、当社でも水平2方向に所定の軌道で同期加振させる積層ゴム支承(免震支承の一種)の評価試験方法の確立に取り組み(第1図)、既存の2軸動的試験装置を改造し、実績として、直径400mmの免震支承に対して、同期した水平2方向の大荷重、大変位および鉛直荷重の3軸動的試験を実現した。

現在、さらに土木・建築以外の業界からの広範なニーズにも応えるため多軸制御の応答精度向上に取り組み、試験体寸法、試験条件に合わせ、載荷荷重2kNから2MNまでのジャッキ型疲労試験機を用い、第2図に示すようにX、Y、Zのいずれの方向の固定が可能な大荷重、大変位、高速度条件下での実働波試験を実施できる3軸動的試験を実現した。この多軸制御技術を用いて、負荷条件において、目標波形と試験体から計測した応答波形間のイタレーションが必要な輸送機分野(航空機、鉄道、自動車)の小型部品から大型構造物を対象に、任意方向の多軸荷重条件下での評価試験を継続受注している。

本稿では、第1章(A-1)において、第1波目から目標波形の加振が必要であり、応答制御のための初期伝達関数を取得するステップを採用できない積層ゴム支承(建築分野)評価試験の事例について述べるとともに、第2章(A-2)において、輸送機分野の試験に用いた3軸動的試験装置の応答制御精度向上に関する取り組みを紹介する。

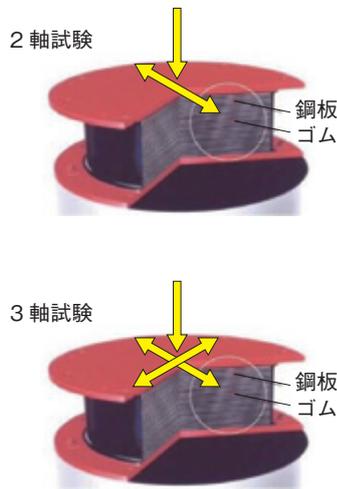


技術本部
機械・プロセスソリューション事業部
構造技術部
ふかや つとむ
深谷 力

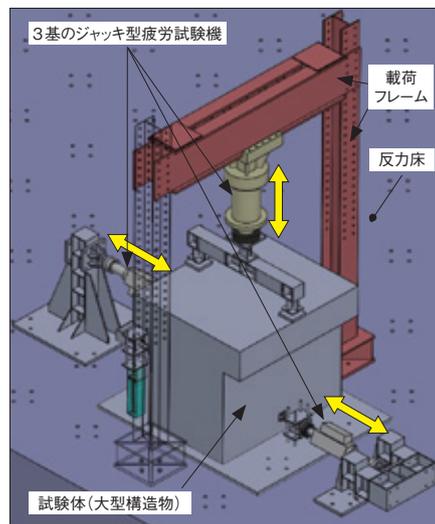


技術本部
機械・プロセスソリューション事業部
構造技術部
まえだ ゆうすけ
前田 裕介

第1図 免震支承の水平1方向と水平2方向試験概要



第2図 任意方向の多軸荷重条件下での試験事例



A-1 免震支承評価装置

1-1 免震支承

免震支承は、振動エネルギーの吸収機構の相違から主として、変位依存型、摩擦型、速度依存型の3種

類に分類される。本稿で対象とする免震支承は、変位依存型に属する積層ゴム支承である。

積層ゴム支承の構造は、ゴムと鉄板が何層にも相互に貼り合わされ、鉛直方向には硬く、水平方向には柔らかく作られている。

参考文献

- *1)
山本雅史ほか:高減衰積層ゴム支承の水平2方向変形の力学特性に関する実大実験およびモデル化,日本建築学会構造系論文集,第74巻第638号(2009-4),pp.639-645

参考文献

- *2) 八木和茂ほか:免震支承の性能評価試験装置 神戸製鋼技報, Vol.53, No.1(2003-4)
- *3) JIS 建築免震用積層ゴム支承-第2部:試験方法 JIS K 6410-2(2015-10), pp.16-17

免震支承は、主として高速道路の橋桁と橋脚との間、および建築物の柱脚と基礎との間に使用される。これの狙いは構造物の重量を支えるとともに、地震時の水平方向入力および揺れを低減することにある。振動論的には、構造物の固有周期を地震動のもつ卓越周期帯より長周期方向にシフトし入力を低減させると同時に、ゴム自身の粘弾性による減衰性能を利用して構造物の応答(揺れ)を低減しようとするものである*2)。

1-2 3軸動的試験装置の概要

試験装置の能力を第1表、装置に備えているジャッキ型疲労試験機の能力を第2表、装置の構造概要を第3

第1表 3軸動的試験装置の能力(実績値)

項目	水平二方向試験	
	水平一方向試験	水平二方向試験
鉛直荷重(kN)	-2,000	-1,800
水平荷重(kN)	±400	X方向:±250 Y方向:±100
水平変位(mm)	±250	X方向:±200 Y方向:±100
試験速度(mm/sec)	1,000	X方向:500 Y方向:200
試験体寸法(mm)	φ500	φ400
	□400	—

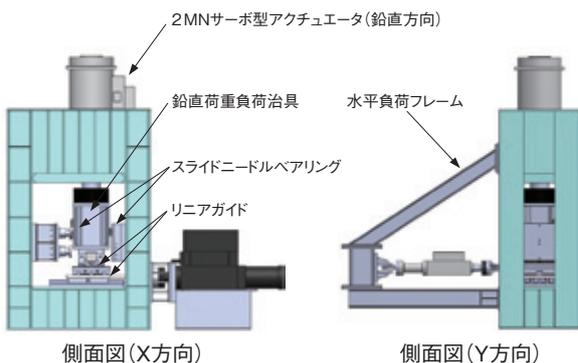
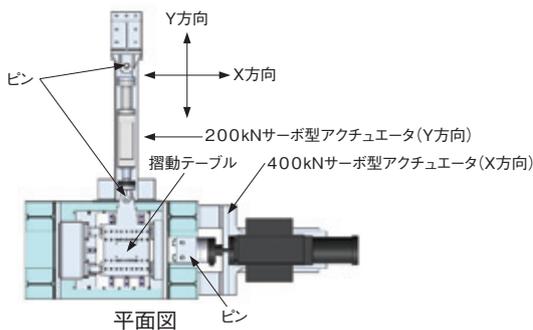
※+符号が引張、-符号が圧縮

第2表 3軸動的試験装置のジャッキ型疲労試験機

項目	ジャッキ型疲労試験機		
	200kN	400kN	2MN
設置方向	水平Y方向	水平X方向	鉛直方向
荷重(kN)	±200	±400	±2,000
ストローク(mm)	±250	±250	±200
試験速度(mm/sec)	250	1,000	25

※+符号が引張、-符号が圧縮

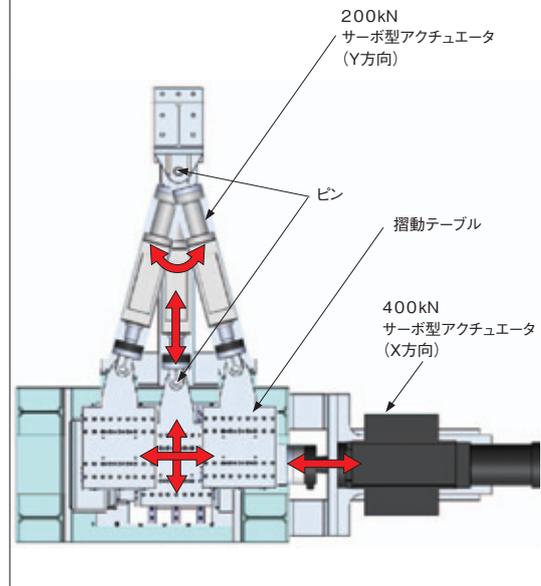
第3図 3軸動的試験装置の構造概要



図に示す。本装置は、フレーム本体、水平荷重フレーム、鉛直荷重負荷治具、摺動テーブルの四つの部品より構成されており、装置に備えた3基のジャッキ型疲労試験機を用いて、同期した水平2方向のせん断荷重と鉛直方向の圧縮荷重が同時に負荷でき、すべての反力がフレーム本体および水平荷重フレームが受け持つ3軸動的試験装置である。

水平2方向の摺動機構については、試験体を固定する摺動テーブルは直交する2方向が摺動できるよう、リニアガイドを2組上下に設けた二重構造である。また、荷重および変位を負荷するジャッキ型疲労型試験機は、X方向の試験機(400kNサーボ型アクチュエータ)の動きに、Y方向の試験機(200kNサーボ型アクチュエータ)が水平荷重フレームと連結しているピンを基点に回転しながら追従する機構である(第4図)。

第4図 試験装置の水平2方向摺動機構のイメージ



本装置の滑動部には摩擦抵抗を少なくするため、リニアガイドおよびスライドニードルベアリングを用いて、装置の摩擦係数を0.001程度に抑えている。

水平方向荷重フレームを取り外すことにより、従来の水平1方向動的試験も対応可能である。

1-3 試験の概要

本試験は、積層ゴム支承の「2方向加力を考慮したせん断限界ひずみ」*3)などを評価する試験である。

試験方法は、鉛直方向に規定面圧相当の圧縮力を保持しながら、水平2方向が変位制御のもと、第5図に示すような軌道、または実動波(地震波)の軌道を、1サイクルあたり数秒から数十秒の試験速度で、数回から数十回のサイクルを負荷するものである。

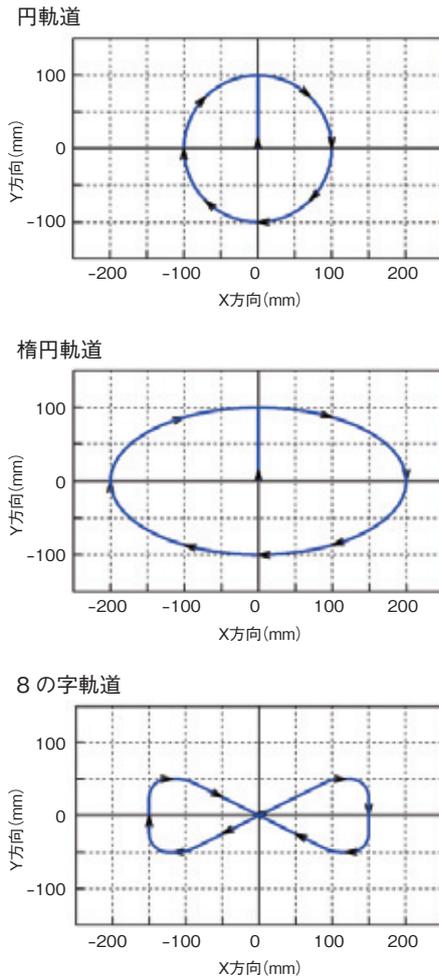
積層ゴム支承評価試験の特徴は、第1波目から目標波形の加振が必要である。その理由として、第1項(A-1)で述べた主に輸送機分野で行われている多軸制御では、一般に弾性変形なので、本試験前の波形補正のための短い期間の寿命消費は無視できる。一方、積層

ゴム支承は、第1波目から非線形ヒステリシスを描くような大きな繰り返しひずみをもとに加振を行うため、1サイクルでも損傷が無視できないことがある。

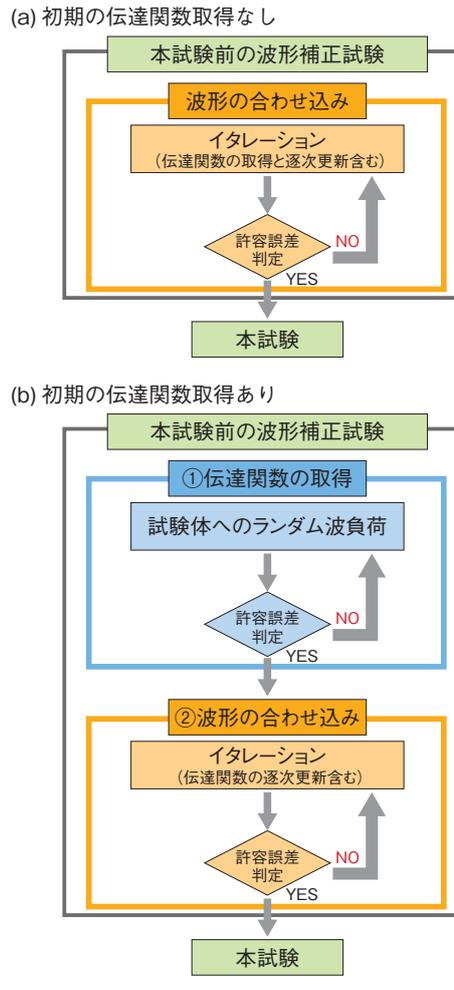
当初の2軸動的試験（水平1方向）では、同期の必要のない水平1基のみの加振であったため、第1波目から目標波形加振は可能であった。しかし、3軸動的試験（水平2方向）では試験機2基の同期によるずれ（位相、振幅）が発生し、十分な制御ができなかった。積層ゴム支承の評価試験においては、試験体の特性にかかわ

らず、変位制御が要求されるため、この評価試験と同じ条件（軌道、試験速度、繰り返し回数）のもとで、あらかじめ試験装置を空加振しながらのずれ補正を行った。ずれの補正は、第6図(a)に示すように、初期の伝達関数を取得せずにイタレーションを行う方法とした。伝達関数は、イタレーションを行っている間、取得と逐次更新をしている。それにより、空加振で得られた波形を試験体に負荷することで、3軸動的試験（水平2方向）の第1波目の加振を実現した。

第5図 水平2方向加振軌道のイメージ



第6図 制御系統図

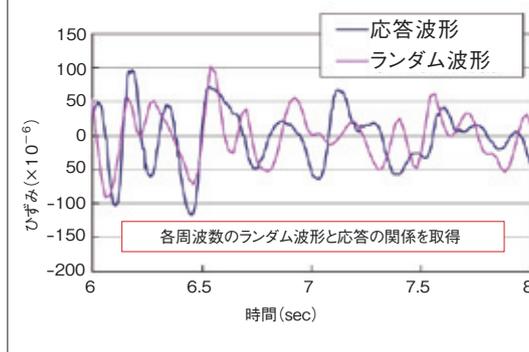


A-2 多軸制御の精度向上

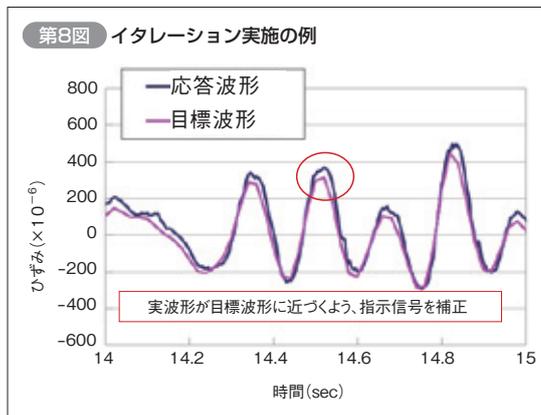
実動波再現試験では、第6図(b)に示すように、試験を行う前に、①試験体に適切なランダム波形を負荷して、初期の伝達関数（各周波数の指示信号と応答の関係）を取得（第7図）した後、②目標波形と試験体から計測した応答波形の合わせ込み（入力信号の補正）および初期に取得した伝達関数の逐次更新をイタレーションによって行う波形補正試験（第8図）が必要である。多軸制御には、①と②において1軸制御よりも高い精度が要求される。

当初導入した多軸制御ソフトでは、①は変位制御に適したランダム波形がなく、②は精度が不十分であることが原因で、大変位、大荷重、高速度、実働波の条件

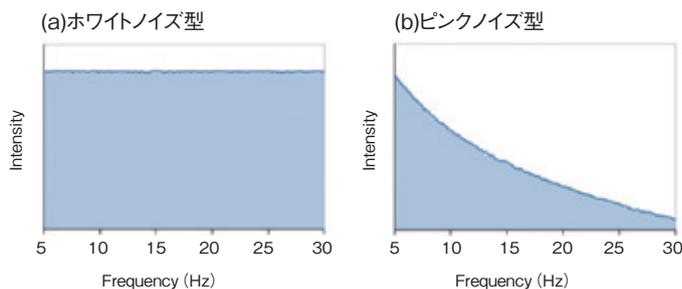
第7図 伝達関数取得の例



第8図 イタレーション実施の例



第9図 ランダム波形の例

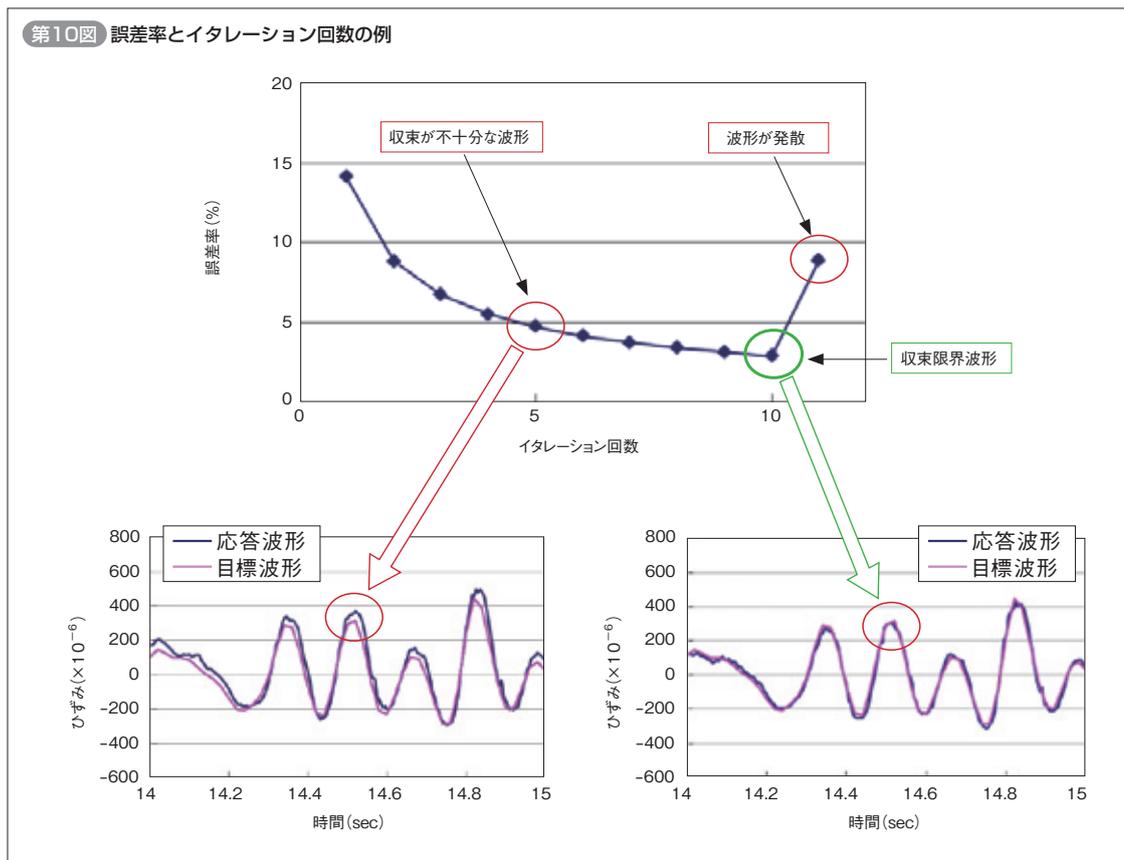


を想定した加振制御に不十分であったため、これらの精度向上に取り組んだ。

精度向上の対策として、①についてはホワイトノイズ型（第9図(a)）しかないランダム波形にピンクノイズ型（第9図(b)）を追加したことである。ホワイトノイズ型とピンクノイズ型では、前者は周波数の高低にかかわらず振幅がほぼ一定であるに対して、後者は周波数が高くなるに連れて振幅が低下する関係性を有している。そのため、周波数が比較的高い領域（約20Hz）での変位制御では、振幅一定のホワイトノイズ型は試験体への過負荷を引き起こす可能性が高いが、ピンクノイズ型はその可能性が低い。②については一つ前のステップの計算に戻せる機能（第10図）をソフトに追加したことである。この機能により、イタレーションを多くおこなうことによる波形の発散（誤差率の急激な増加）を避けるために精度が不十分な段階でイタレーションを終了することをなくすことができた。

①と②の取り組みにより、ジャッキ型疲労試験機を用いた任意軸の組み合わせのもと、大変位、大荷重、高速度、実働波の3軸同期試験を実現し、先述のとおり輸送機分野における各種の実動波形耐久試験に適用している。

第10図 誤差率とイタレーション回数の例



東日本大震災以降、免震支承の性能評価については、動的・大型サイズの実験機運が高まっており、直径1000mmクラスの実大サイズについては海外機関の大容量設備を用いて試験が実施されている。当社においても、このようなニーズに対応すべく現有3軸試験装置のさらなる大型化のための設計・開発を進めている。

さらに、輸送機分野については、自動車分野では欧州の標準である多軸ホイルの動的試験、航空機分野では構造部材への4軸以上の動的試験、鉄道分野では鉄道車両への多軸動的試験に対して、制御精度の向上とともに、開発段階から顧客とのパートナーシップを図りながら取り組んでいく。