

NACHI
**TECHNICAL
REPORT**
Components

Vol. **17** D1
October/2008

機能部品事業

■ 技術講座

知りたいトライボロジー講座⑧

「免震とトライボロジー」

Things to Know about Tribology
"Base Isolation and Tribology"

〈キーワード〉 免震構造・免震システム・摩擦コントロール
交差型レール溝支承・減衰力・復元力

部品事業部／技術一部

渡辺 孝一

Kouichi Watanabe



要 旨

近年の地震報道が頻発する中で、地震対策としての免震構造の関心が高まっている。しかし、免震構造ないし原理については、適切な理解はされつくされていないのが実情である。

NACHIでは、2003年から免震機器デバイスを製造・販売しているが、免震そのものに理解を深めていただく意味で、ここでは動作原理を紹介する。

一般に、転がり軸受は摩擦が嫌われるようなところに使用され、機械の回転部品では、摩擦は動力損失を招く。しかし、人が歩いたり、タイヤが道路を回転するときには、摩擦はなくてはならない。免震システムにおいても同様である。

摩擦コントロールという意味で、トライボロジーを免震システムに応用した事例を紹介する。

Abstract

Due to the reporting of frequent earthquakes, an interest in base isolation systems has increased lately as the system is designed to protect goods and structures from earthquakes. However, the structure and mechanism of base isolation systems are not understood properly and fully.

NACHI has been manufacturing and selling the base-isolating devices since 2003. The mechanism of the device is explained here with few numerical formulas to give a greater understanding. Generally, a roller bearing is used to reduce friction while friction causes a loss of power in rolling parts. Friction must be present for walking and driving. Likewise, the base isolation system requires some friction.

The examples of applied tribology in a base isolation system are shown to explain the control of friction.

1.地震対策としての免震構造

地震対策は、現在、主に次の3つの視点からとり組まれている。

耐震・・・地面に固定されたままで、揺れに対する強度を上げる。

制震・・・地面に固定されているが、揺れのエネルギー吸収体を付帯し、揺れを鎮める。

免震・・・地面との縁を切り、直接的には揺れが伝わらないようにする。

これらのうち、コストのことを抜きにすれば、免震が最も優れている。ビルなどの中低層建物は、積層ゴムにより建物と地面を分離して免震構造が採れるが、高層建物の場合には制震構造がよく採用される。

耐震構造は、筐体を補強することであるが、内部にあるものを地震から護るには十分ではない。だが、コスト的には、最も小さく抑えることができる利点がある。

(地震時の加速度の単位)

地震のことを扱う時には、どうしても必要な専門単位を1個使う。

^{※1}(gal)ガル・・・980galが1Gに相当する。

地震時には水平および上下方向に力を受けるが、この力を、物体の重力に対して、どれだけの割合で作用しているかの尺度として評価する。

例えば、上方向に980ガルの力を受けるとすると、その瞬間は体重が2倍になる。逆に、下方向に980ガル受けると、その瞬間体重は0となる。

この単位は、テレビ放映でもよく使われるので、ぜひ覚えてほしい単位である。単位の由来は、「それでも地球は回っている」と唱えた、ガリレオ・ガリレイ(Galileo Galilei;伊1564~1642)にちなんでいる。

2. 免震機能の具現化

免震構造には、①载荷品を支えること、②揺れを鎮めること、③地震終了時にもとの位置に戻ることの3つの機能が要求される。

载荷品の荷重を支える軸受のことを、免震業界では支承と呼ぶ。揺れを鎮めるのは、減衰機能と呼ばれるもので、既存の技術ではオイルダンパ、摩擦そのもの、または金属の塑性変形力を利用したものなどがあり、これらの力は減衰力とよばれる。

また、もとの位置に戻る原点復帰機能は、復元力と呼ばれる力を免震構造に与えることで得られる。

復元力は、バネによる力または支承に設けた勾配などで与えられる。

これらの機能は、別々の部品を使用して達成することもできるが、最も低コストで免震性能を達成するには、支承に全ての機能を併用して持たせることが望ましい。

NACHIでは、免震台Gシリーズ・マグネクレドールにおいて、交差型レール溝支承を開発し、これらのことを具現化した。

3. 交差型レール溝支承の機能原理

1) 载荷能力

载荷重量は、ボールを介して構成される、一組のレール溝支承で支えられている。

溝はボール半径に近い曲率半径とし、ボールを抱き込むことで、面圧分布が緩和されるので、小さなボールでも大きい荷重を受けることができ、免震台のサイズを小さくすることができる。

ボールは熱処理されているので高負荷に耐え、大量生産されている部品としては、最も安価で高精度であり、狙いの設計に近い性能を設計段階で期待できる。

2) 減衰力

図1のように、溝のある2つのレールにボールを平行に挟み、一方のレールを移動させると、ボールは転がり運動を行ない、転がり摩擦に近い摩擦力しか発生しない。

ところが、2つのレールを90°交差させて、一方のレールを移動させると、ボールは完全すべりの状態になり、摩擦力もすべり運動のため、かなり大きい数値になる。

したがって、2つのレールを0~90°の間で交差させると、ボール運動にすべりと転がりの両方が混在するであろうということは想像が付き、この交差角を調整することで、狙いの摩擦力を得ることが可能になると推定される。

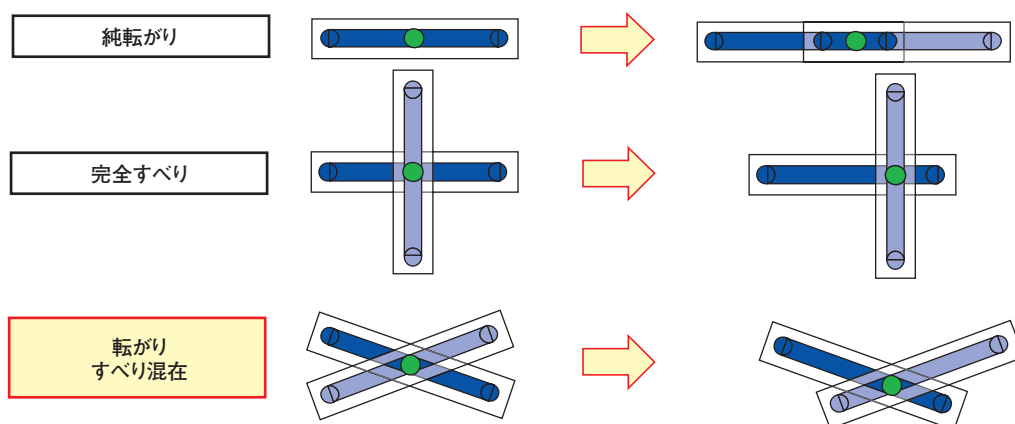


図1 レール溝支承のボール運動

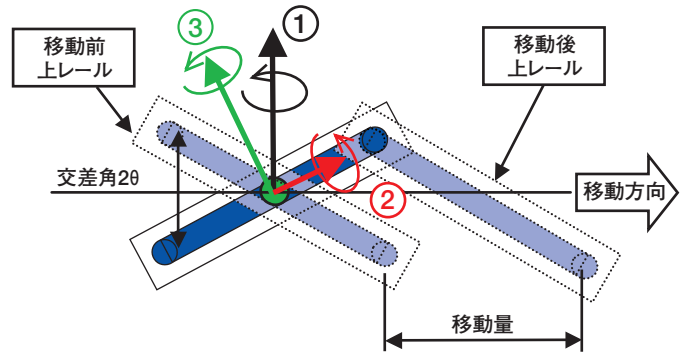


図2 交差型レール溝支承のボールの回転ベクトル

交差したレールを移動させるとき、転がり駆動の回転ベクトルを描くと、転がり運動がどの程度発生しているのかがわかりやすくなる。この様子を図2に示す。

上レールが移動しようとする時、上レールはボールに、移動方向に回転させようとする駆動力を与える。この回転ベクトルを①で表わす。

ところが、上レールと下レールとが交差角を有しているため、ボールは上レールが指示する方向とはθだけ偏った方向へ、下レール溝上を移動しなければならない。

そこで、①の回転ベクトルを、下レールの溝長さ方向の②と、下レールに直角方向の③に、ベクトルに分解すると、③は下レールにしてみれば転がり運動方向になり、②は移動方向に渦を巻くようなスピン運動になる、として①のベクトルが分解される。③は転がり成分なので摩擦は大きくならないが、②はすべるので大きな摩擦が発生する。

実際にレール溝を交差させて、その間にボールを介して一方のレールを移動させると、ボールの進行方向に渦を巻くように運動しながら、転がり運動をしている様子が観測される。

ベクトル分解すると

$$\text{②} = \text{①} \times \sin\theta \quad \text{③} = \text{①} \times \cos\theta$$

となり、θ=0のときは②=0となってすべりは発生しなくなる。

このようにして、θを調整することで、発生摩擦力をコントロールできる。図3は、載荷時に実測された摩擦係数から摩擦係数を求め、θとの関係を実測値で記載した。

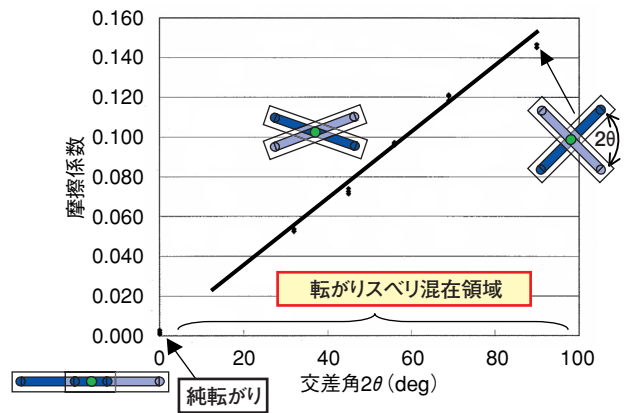


図3 交差型レール溝支承の交差角と発生摩擦係数の関係

この構造が優れているのは、発生する摩擦力が載荷品の重量と比例して得られることである。いい換えると、重い載荷品には大きい摩擦力が得られ、摩擦係数が一定となる減衰力が得られるということであり、後述のように、免震性能が載荷品の重量や載荷位置に左右されず、一定になるということの要件になっている。

3) 復元力

レール溝には、わずかな勾配が設けてあり、支承が移動すると、この勾配をボールがかけ上がるので、これが復元力として原点に戻る力を発生してくれる。

この勾配による復元力は、載荷品の重量に比例した大きさとして発生する。この点も大切であり、後述のように、復元力は載荷品の重量に関係なく、一定の係数になるので、免震性能が載荷品の重量や載荷位置に左右されないということも、達成させる要件となっている。

4. 減衰特性に摩擦係数を使う理由

免震性能は、復元力および減衰力を使用して、ほぼ計算することができる。

少し難しい計算式を用いなければならないが、振動環境で物を揺らすと、揺らされた物の変位が時間と共に、どのように変化していくのかは、振動力学で運動方程式をたてて解析することができる。ここでは、要点だけを理解するため、振動力学の1次振動モデルの運動方程式で、なるべく数値を使わないように表わしてみる。

運動方程式の概略は次のようになる。

$$m \cdot \text{地震波の加速度} = m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + \text{復元力} + \text{減衰力}$$

ここに

m：地震波を受ける物体の質量

x：変位

t：経過時間

g：重力加速度

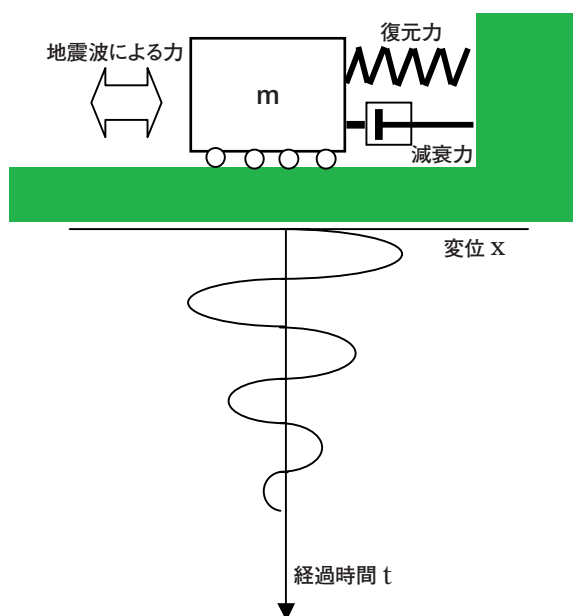


図4 復元力、減衰力があるときの振動変位特性

復元力は、支承に設けた勾配(例えば1/30、1/20など)で、次のように得られる。

$$\text{復元力} = m \cdot g \cdot \text{勾配}$$

減衰力は、摩擦で得られるのだが、載荷物の質量mに比例した摩擦力を得ることができるので、その比例係数は摩擦係数 μ となり、

$$\text{減衰力} = \mu \cdot m \cdot g$$

となる。

これらを先の運動方程式に代入すると、

$$\text{地震波の加速度} = \frac{d^2x}{dt^2} + g \cdot \text{勾配} + \mu \cdot g$$

となって、mを消去することができ、地震波を受ける物体の重さには依存しない運動方程式に置き換えることができる。

いい換えると、摩擦係数が常に一定となる減衰力を持ち、勾配により載荷質量に比例する復元力を構成できる支承であれば、どんな重さのものであろうと、運動方程式は同じになるということになる。

このことが、免震性能が載荷重量にも偏荷重にも依存せず、安定した免震性能が得られるということの数理的な理由になっている。

(摩擦係数一定ではない減衰力は使えないか?)

では、摩擦係数が一定ではない減衰力は、免震性能が良くないのかというと必ずしもそうではない。

一般には、減衰力の設定を摩擦係数一定で設定することは、技術的に困難なことが多く、そのため重さが重いと大きく変位し、軽いと変位量は少なくなるように、減衰力が速度や積載物重さに依存せざるを得ない設定がほとんどである。

このため、支承ごとに受ける荷重がばらつく(これを偏荷重という)、免震台は振れやすくなるので、摩擦力の適正値を事前に把握しておく必要がある。また、住宅の内部は、重い場所や軽い場所がまばらにあり、住宅免震では支承とは別に摩擦ダンパーなどの減衰力を使うことが多い。この減衰性能は荷重の依存を受けるので、振れ防止のため、偏荷重による影響を吟味して、減衰力の大きさの設定ないしはダンパーの設置場所が設定されている。

このように、載荷荷重範囲がある程度分かっているならば、摩擦力を一定にした減衰特性でも構造的には成立することが分かっているため、これらの減衰力は今日でも使われている。

5. 摩擦線図の特長

NACHIのGシリーズ・マグニクレードルは、摩擦係数一定型の支承構造を設計的に成立させたので、免震性能が積載荷重に依存することなく、偏荷重に対しても、捩れは一切発生しない。

このように、摩擦係数の減衰特性をもつ支承を水平方向に移動させると、例えば、次のような摩擦線図(P- δ 線図ともいう)が観測される。

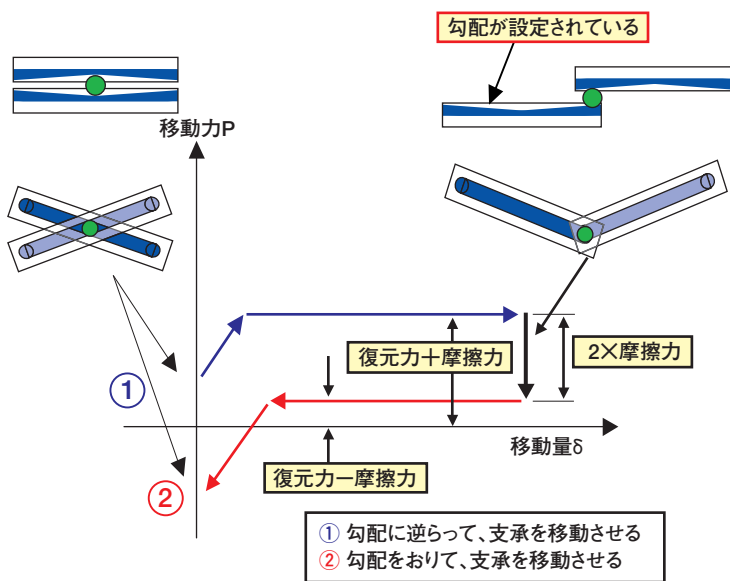


図5 摩擦(P- δ)線図

①のように、勾配に逆らって支承を移動させると、初期は支承底の曲率形状をせり上げるので、移動量 δ と共に次第に移動力Pは大きくなっていく。勾配の部位にボールが来ると、一定勾配の場合、復元力は載荷荷重に対して一定値になる。また、摩擦力も交差角に対し一定値になるので、移動力Pは復元力と摩擦力の和になるものの、一定値として観測される。移動力Pが復元力と摩擦力の和として観測されるのは、摩擦力が運動方向と逆向きに作用するためである。

一方、②のように、勾配をおりて来るときは、その力に対して同様に摩擦力は反対向きに作用するので、移動力Pは、勾配による復元力と摩擦力の差として観測される。

したがって、摩擦線図は、図5のように矩形断面を描き、この高さが摩擦力の2倍として観測されることになる。

(摩擦線図の実測値)

Gシリーズ・マグニクレードルの代表的な摩擦線図の実測チャートを、図6に記載した。1プレート当たり、交差型レール溝支承4個を配した免震台そのものでの実測チャートで示す。載荷荷重に比例した、摩擦力が観測されていることが分かる。

摩擦線図が矩形形状になっているが、このことはボールの任意の位置でも、ダンパーとしての摩擦係数が一定であることを示している。これは振動解析上、有益な効果をもたらしている。

運動方程式は、ここでは原理の分かる簡単な式でしか表示しなかったが、実際は計算式を使えば、変位がひとつの数式となって表わされるような簡単なものではない。というのは、地震波は頻繁に加速度の大きさと方向が変わる波であり、これが免震支承に入力されるので、十分に短い時間間隔で運動方程式を解かねばならない。これは時刻歴解析と呼ばれている。

いい換えると、0.001秒単位で免震支承がどの方向にどれだけ力を受けて、どれだけ移動するかを計算し、その地点を改めて原点として、運動方程式を解き、次の0.001秒後にはどの位置にいるかをくり返し計算する方法を採る。この方法は、電算機があれば精密に計算できる方法であり、宇宙の惑星運動やロケットの軌道計算もこれと似た方法が採られている。

このような解析方法のとき、免震支承がどの位置にあると、復元力の係数は勾配だけ、減衰力是一定の摩擦係数だけとなるので、支承の位置に依存しない運動方程式となり、比較的解きやすくなる。

このようにして、Gシリーズ・マグニクレードルは、地震波の素性が分かれば、実験しなくとも計算でどのような応答特性が得られるのか、事前に予測がつくようになっている。

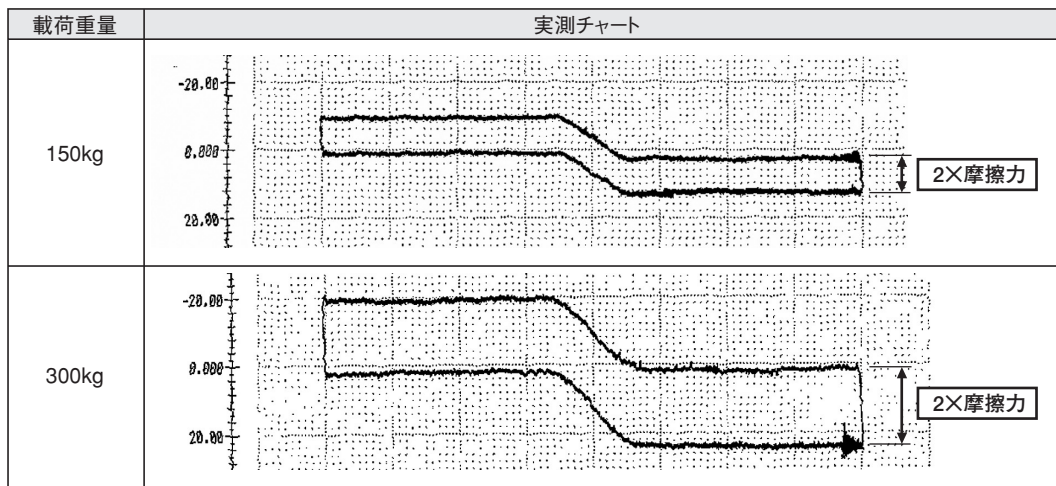


図6 摩擦(P-δ)線図実測例

6. 振動実験による検証

免震台の免震性能の妥当性の確認は、3軸方向に同時に加震できる振動台を揺らす実験で検証できる。地震波は、気象庁や、^{※7}(独)防災科学技術研究所などの観測所で、南北方向、東西方向および上下方向で観測され、この一部がインターネットで公開されている。

これらの波は、英語の頭文字を採って、各々NS波、EW波およびUD波と呼ばれることもある。観測は0.01秒程の単位で、どれだけの加速度が発生していたのか、デジタルで記録されている。

これを時間ごとにプロットすると、いわゆる地震波が描ける。このデジタルの数値を振動台に入力して、実際に揺らすのが、振動台実験である。このとき、免

震台の上には3軸方向に加速度センサーが置かれ、免震効果として、各々どれだけの発生加速度で済んだのかが計測される。これを応答加速度と呼ぶ。

一般に、応答加速度がある数値以下になるように免震台の設計が行なわれる。設計の要点は、減衰力と復元力の採り方が主に議論され、おおむね、美術品を扱う免震台は100ガル以下、ラックなどの通信機器の場合は200ガル以下の応答加速度となるように設計される。

Gシリーズ・マグニクレードルは、トライボロジーを応用して、いずれの分野にも対応できる仕様を用意しており、数種の地震波による振動実験で、その効果が検証されている。

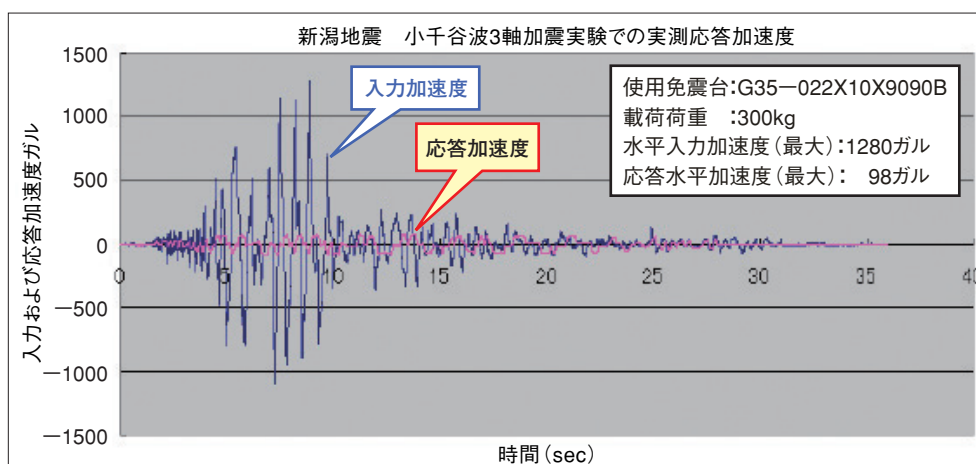


図7 Gシリーズ・マグニクレードルの振動実験観測波形例(許容応答変位350mmとした美術免震仕様)

7. 免震が教えてくれるもの

摩擦を積極的につくり、商品化につなげるという発想は、転がり軸受の世界では浮かびにくい。また、摩擦が良いとか悪いとかの発想は、転がり軸受の一般的な話の中でだけでいえることである。

重力があるから、重い物が持ちあがらないという苦情はあるが、反面、重力がないと風呂にも入れないし、コップの水も飲むことはできない。あつて当たり前の世界では、その恩恵にはなかなか気づかず、あるこ

との弊害ばかりが、論じられることが多い。良いとか悪いとかの発想ではなく、上手につきあうことが大切であるということを免震構造は教えてくれる。

なお、免震機構として本稿で紹介した交差型レール溝支承は、日本国土開発株式会社殿との協同開発研究によるものであり、性能の妥当性検証に多大の協力をいただいた。

用語解説

※1 (gal) ガル

地震の分野で建造物などに作用する加速度の単位を示し、1ガル=1cm/sec²。980ガルは重力加速度の1Gに相当する。

※2 支承

建造物などの重量を支えるもので、機械分野の軸受に相当する。建築業界では軸受とは呼ばず、支承(もしくは支承体)と呼ばれている。

※3 マグニクレードル

地震の揺れの程度(マグニ: Magnitude)をゆりかご(クレードル: Cradle)のように緩和する。

※4 回転ベクトル

回転には必ず回転軸があり、この軸と回転の方向を示すのに用いるのが回転ベクトル。右ねじのように矢印の方向を表す荷重などのようなベクトルと同様の性格をもち、ベクトルとして扱える。

※5 摩擦ダンパー

ダンパーとは振動を減衰させる装置で、マグニクレードルGシリーズでは、交差角をもったレールとボールとのスピン摩擦によって振動を減衰させている。

※6 時刻歴解析

建物に地震波が入力されるときに、建物に発生する変位、加速度を免震装置を含めて微小時間間隔で運動方程式を解いて求める解析手法。

※7 (独) 防災科学技術研究所

防災科学技術研究所は、災害から人命を守り、災害の教訓を活かして発展を続ける災害に強い社会の実現をめざし、地震・火山・気象・土砂および雪氷災害による被害の軽減に関する研究開発を行なっている。

関連記事

- 1) 渡辺 孝一: 知りたいトライボロジー講座①「トライボロジー入門」
NACHI-BUSINESS news、Vol.7 D1、May/2005
- 2) 横山 良彦・渡辺 孝一: 知りたいトライボロジー講座②「摩擦・摩耗」
NACHI-BUSINESS news、Vol.9 D2、November (2005)
- 3) 高木 俊行・渡辺 孝一: 知りたいトライボロジー講座③
「転がり接触について」
NACHI-BUSINESS news、Vol.10 D1、June (2006)
- 4) 渡辺 孝一: 知りたいトライボロジー講座④
「弾性流体潤滑理論(EHL理論)」
NACHI TECHNICAL REPORT、Vol.11 D1、October (2006)
- 5) 菅洞 英樹・渡辺 孝一: 知りたいトライボロジー講座⑤
「転がり運動について」
NACHI TECHNICAL REPORT、Vol.13 D1、June (2007)
- 6) 渡辺 孝一: 知りたいトライボロジー講座⑥
「転がり接触面下の応力」
NACHI TECHNICAL REPORT、Vol.14 D1、October (2007)
- 7) 渡辺 孝一: <<基礎講座>>転がり軸受の潤滑グリース
マシナリールアプリケーション 2007年 11・12月号
- 8) 岡島 正和: 知りたいトライボロジー講座⑦
「潤滑グリースについて」
NACHI TECHNICAL REPORT、Vol.16 D1、June (2008)
- 9) 渡辺 孝一: 情報・財産を地震から守る免震台「マグニクレードル」
NACHI-BUSINESS news、Vol.4 B3、August (2004)
- 10) 笠松 利安: 小型・軽量・組合わせ自在形免震台
「マグニクレードル Gシリーズ」
NACHI TECHNICAL REPORT、Vol.14 D1、February (2007)