

地震の揺れを低減する新しい免震構造

豊岡 亮洋

構造物技術研究部
(耐震構造 副主任研究員)

室野 剛隆

同
(同 研究室長)



とよおか あきひろ



むろの よしたか

はじめに

最近、戸建て住宅やマンションなどの宣伝で「免震構造採用」といった言葉をよく耳にするようになりました。免震構造は建物や構造物を柔らかく支持することで、文字通り地震の力を「免れる」構造で、1995年の兵庫県南部地震を一つの契機として、道路や建築、そして鉄道構造物に対して数多く適用されるようになってきています。免震構造が広く普及した要因としては、免震という考え方が振動論的な観点から非常に合理的な構造であることに加え、免震構造を実現する材料や装置の開発が進み、また数値計算法や実地震時における観測事例などが整備されてきたことが挙げられます。本項では、免震構造の基本原則について紹介するとともに、鉄道総研で研究開発をすすめている新しい免震構造についての事例を紹介します。

免震構造とは？

免震構造に限らず、ものの揺れを考える場合、「共振」という現象を考慮する必要があります。鉄道高架橋や駅舎などの構造物やこれを支える地盤、さらには車両や付帯設備など、あらゆる構造には、ある特定の振動数において非常に揺れが大きくなる性質があり、これは共振現象と呼ばれています。この共振を説明するため、次のような実験を考えてみます。今、図1 (a) のようにおもりを輪ゴム (=バネ) 2本で吊し、片方を手で上下に振動させてみます。手の振動の速さ(振動数)を色々変えてみると、ある速さで振動を与えたとき、おもりが大きく揺れる場合があります。このときの手の速さを共振振動数と呼び、この例ではゴムの硬さとおもりの重さで決まることが知られています。ここで重要なことは、動かす手の動きが非常に小さくてもおもりは大きく動くこととなります。このことは地震に対する構造物の振動を考える場合も同じで、輪ゴムの硬さを構造物の硬さ、おもりを構造物の重さとする(実は耐震設計を行う際は多くの場合において構造物をこのようなバ

ネと質量よりなる簡単なモデルに置き換えて計算します)地震の大きさは小さくても、その振動の速さが構造物の共振振動数に近いと非常に大きな揺れを生じる場合があります。

ここで、輪ゴムを図1 (b) のように1本に減らし、先ほど大きな振動が生じたのと同じ速さでおもりを上下させると、おもりはほとんど動かなくなります。これは、輪ゴムを減らしておもりを柔らかく吊ることで、共振振動数を変えることができることを示しています。構造物の振動に置き換えてみると、地震の振動の速さと共振しないよう構造物を柔らかく構築することで、構造物の振動を減らすことができます。これは「地震と構造物の非共振化」と呼ばれ、免震構造の基本的な原理の一つです。

さて、共振振動数をずらすだけであれば、輪ゴムを非常に硬くすることによっても実現することができます。しかし、この場合もう一つの問題が生じます。たとえば、車が急発進したときなどに、移動する方向と逆方向に強い力を感じる場合があります。これは、人間の質量に加速度を乗じた「慣性力」が加速方向と逆方向に作用するためです。地震の際の構造物の揺れも同様で、構造物が地震加速度を受けると、構造物にはその質量に絶対加速度(地震の加速

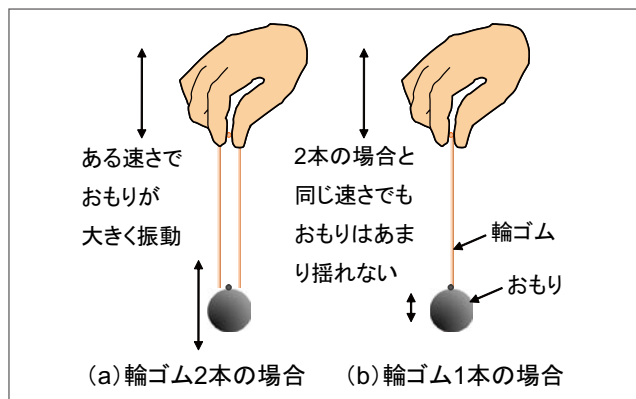


図1 ゴムとおもりによる共振現象

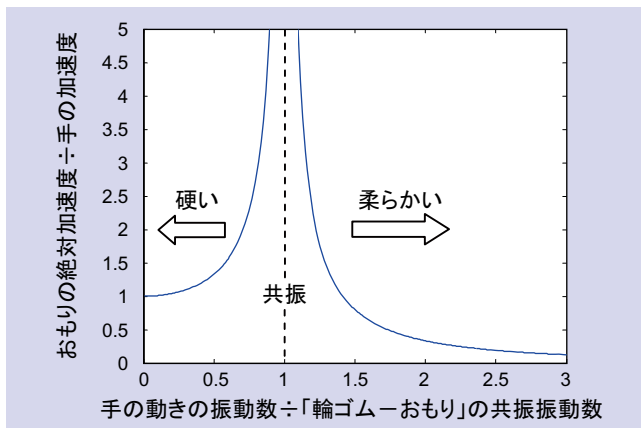


図2 手の振動数とおもりの絶対加速度の関係

度+構造物の振動加速度)を乗じた慣性力が作用します。
 ここで、先ほどの輪ゴム1本の例において、手の動きの速さ(振動数)は一定としたとき、おもりの絶対加速度の大きさを輪ゴムの硬さを変えて計算したものを図2に示します。この図の横軸は、「輪ゴム-おもりの共振振動数」に対する手の動きの振動数の比を表し、左側にいくほど輪ゴムが強く硬いことになります。また、縦軸は手の動きの大きさ(加速度)で基準化しています。

いま、横軸=1、すなわち「輪ゴム-おもりの共振振動数」と手の動きが一致した場合、共振の影響で応答が非常に大きくなっていることが分かります。この共振を避けるため輪ゴムを非常に固くしたとすると、確かに共振のピークからは外れますが、絶対加速度応答は1に収束します。これは、輪ゴムの硬くすると輪ゴム自体の変形が小さくなり、手の加速度がそのままおもりに伝わることを意味します。これを構造物の振動に当てはめると、構造物の強度を上げた場合、地震加速度に構造物の質量を乗じた慣性力が必ず作用することになるため、想定する地震の規模に応じて構造物をより頑丈にする必要があり、建設コストの増加や構造物の肥大化などを招く可能性があります(図3(a))。

これに対して、ゴムを柔らかくすると、絶対加速度を0に近づけることができます。すなわち、ゴムが大きく変形して緩衝材となることで、手の加速度をおもりに伝えない構造とすることができます。構造物で言えば、地震の規模が大きくなっても慣性力の大きさを非常に小さく抑えることが可能であり、これにより構造物自体をスリム化することも可能となります(図3(b))。この効果を一般に「振動絶縁」とよび、これも免震構造の重要な要素です。

さらにこのゴムの変形を利用してエネルギー吸収を行うことで、応答をさらに低減することができます。先ほどの例で、手を振動させることは「輪ゴム-おもりの」振動系にエネルギーを与えていることに他なりません、この振動エネルギーを何らかの装置により吸収すれば、おもりの

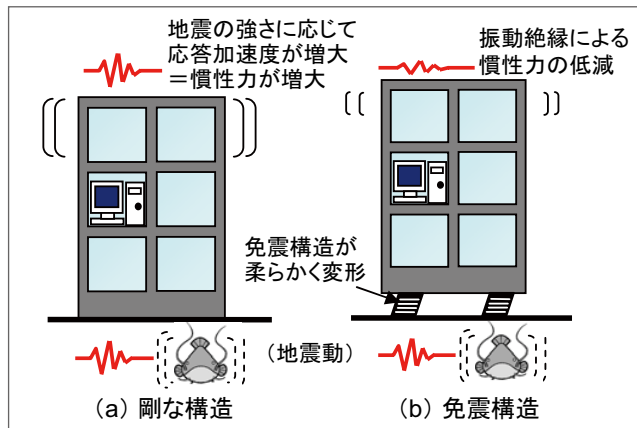


図3 免震構造による振動絶縁

振動はその分減少することになります。柔らかい構造は振動変形が大きくなるため、これを一定規模に抑制する「エネルギー吸収機構」も免震構造の重要な要素となります。エネルギー吸収機構としては、摩擦や流体の抵抗、金属などの材料が大きく変形するときのエネルギー消費を利用するものなど様々なものが提案されています。

鉄道構造物における免震構造

免震装置は様々な鉄道構造物に適用されてきていますが、ここでは橋梁構造物を例にその構造を紹介します。一般に桁と橋脚を有する橋梁では、桁の質量が大きいため、桁と橋脚の間の「支承部」と呼ばれる位置に免震装置を適用し、桁の慣性力を低減させる事例が多く見られます。

この支承部に対する免震装置としては、図4のようなゴムを利用した装置(ゴム支承)がよく用いられています。ゴム支承は、ゴムと鉄板をサンドイッチ状に接着して積層することで、鉛直方向に桁を剛に支えつつ水平方向には柔らかく変形する特性を持っています。ゴム支承は、鉄道では1961年に東北本線鬼怒川橋りょうに初めて採用されたとされており、現在では整備新幹線などを中心に広く使用

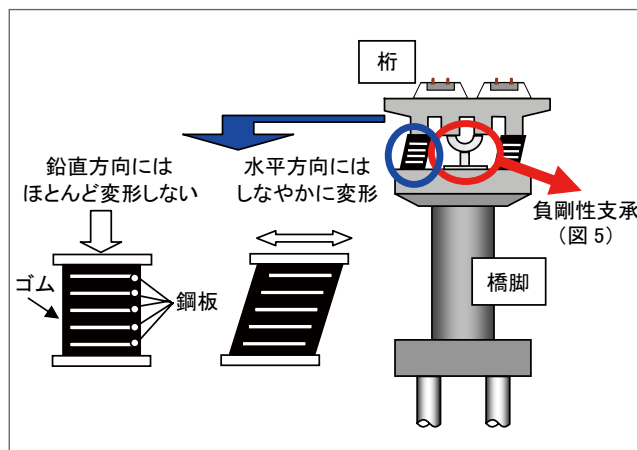


図4 免震ゴム支承の特徴

されています。代表的なゴム支承としては、天然ゴムを用いたゴム支承、およびこれに鉛を入れてエネルギー吸収を図る鉛プラグ入り積層ゴム支承、さらにはゴム材料自体がエネルギー吸収を行う高減衰積層ゴム支承などがあります。

新しい免震構造

鉄道総研では、こうした一般的な免震装置に加え、新しい免震機構および装置についても研究開発を行っています。

負剛性支承

支承部にゴム支承を用いて免震構造とする場合、図2の原理からするとゴムをなるべく柔らかく作ることによって桁の絶対加速度応答を大きく低減することができます。ゴム支承を柔らかくするには、ゴムの平面積に対して高さを高く取れば良いのですが、ゴム支承には桁の自重を支えるという役割もあるため、あまり柔らかいゴムを使うと地震時に水平変形したときにゴム支承が破損する恐れがあります。

そこで、ゴム支承と並列に設置することで、支承部全体としての剛性を下げ、振動絶縁効果を発揮させる、負剛性支承という新しい装置を開発しました(図5)。「負剛性」

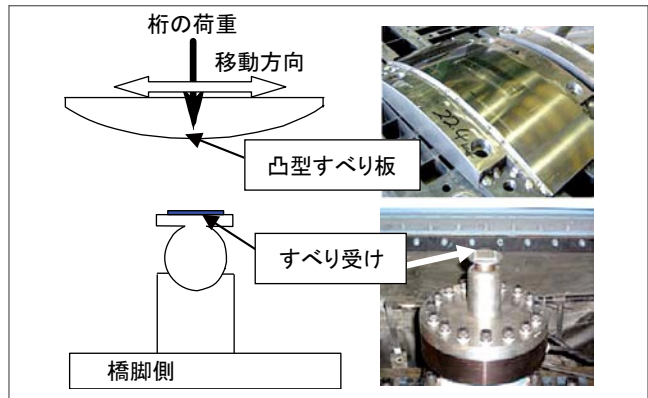


図5 負剛性支承の概要

とは、先ほどの輪ゴムとは逆に、変形に対してより変形を進める方向に力を発揮させる機構を表します。図6 (a)のように、ゴム支承の硬さ=剛性は「正」、すなわち変形を抑制する力を発揮しますが、これを図6 (b)の負剛性と組み合わせると、正の剛性の一部を負の剛性が打ち消し、図6 (c)のように支承部の全体剛性を下げる(=柔らかく支持する)ことができます。この負剛性を実現する装置として、図5のように、ボウルを逆さにしたような凸型の接触面を持つすべり装置を考案しました。これは、変形を受けると重力の作用で球面のすべりが進行して変形を増加さ

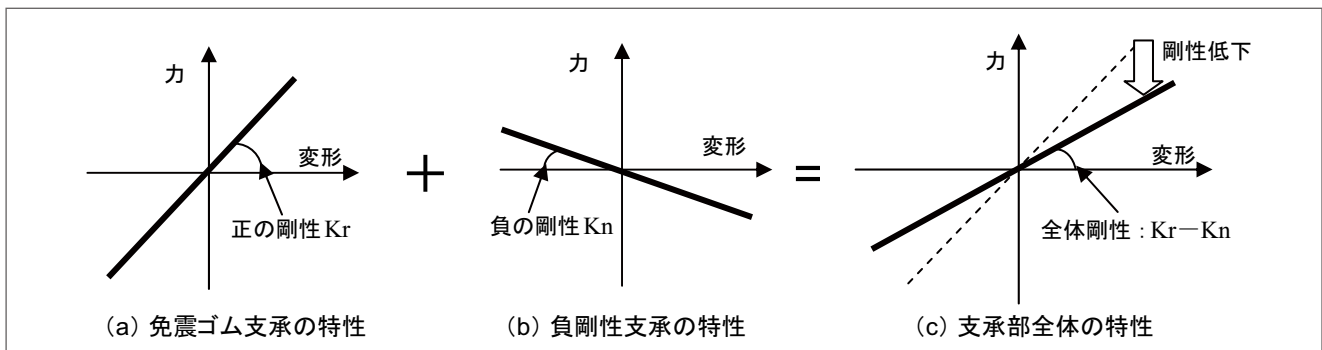


図6 負剛性の効果

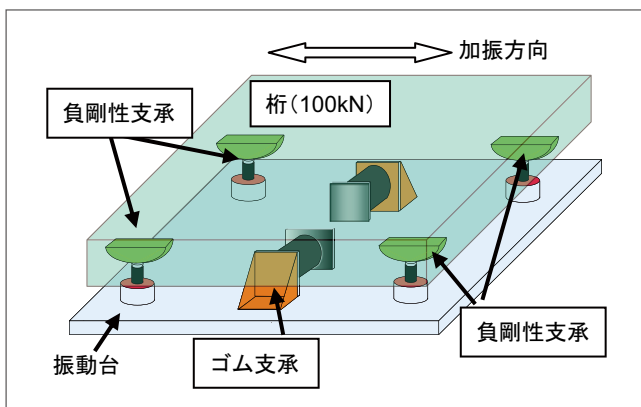


図7 負剛性支承の振動台実験

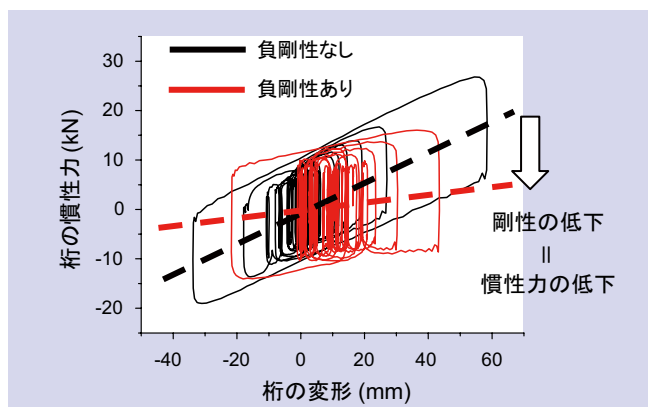


図8 桁の慣性力と変形の関係

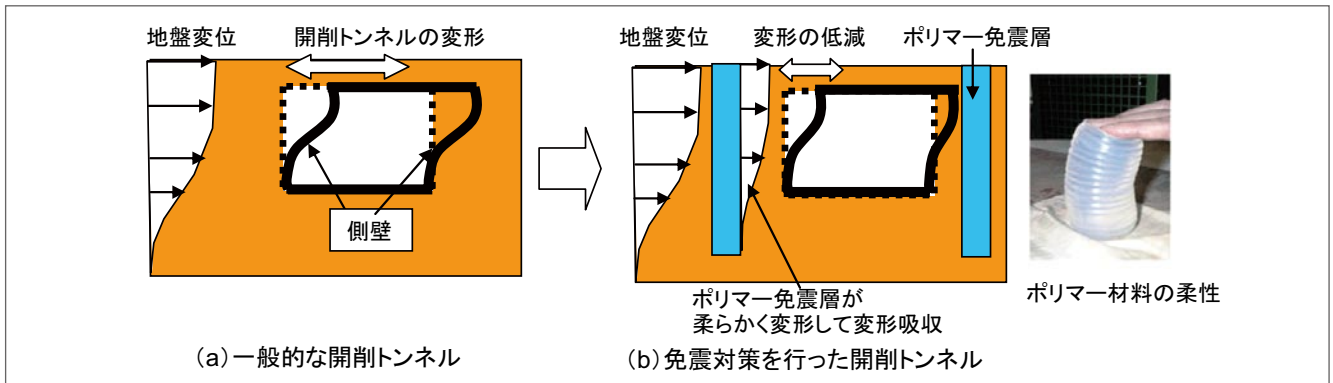


図9 ポリマーによる開削トンネルの免震

せる効果があり、「負」の剛性は桁の荷重と凸面の形状で制御できます。

この装置の有効性を確認するため、図7のように負剛性支承とゴム支承を有する桁模型を用意し、これを大型振動台により地震波で加振しました。図8には、桁の慣性力と変形の関係を示します。この図では、すべり面に凸を付けていない通常のすべり支承との比較を示しています。このように、負剛性が無い場合にみられるゴムの剛性（黒点線）が、負剛性の導入により大きく低下（赤点線）しており、負剛性の導入によりゴム支承単体よりもさらに柔らかく桁を支持し、慣性力を低減できることを確認しました。

なお、図8の慣性力と変形の関係は平行四辺形状となっていますが、これらはすべり面の摩擦により振動エネルギーを吸収しているため、この「エネルギー吸収機構」により支承の変形が過大になることを抑制しています。

ポリマー免震

地中に建設される構造物が地震を受けると、地盤の変形により構造物は強制的に変形を受けます。兵庫県南部地震では、この地盤変位により開削トンネルが崩壊した事例もあります。このような開削トンネルを補強する際、トンネル内の柱は鋼板巻き補強などで対処できますが、地盤に接する側壁については片面しか補強できません。そこで、このような地中構造物に対して、免震構造の「柔らかく変形する」性質を利用して地盤変位を吸収し、構造物に作用する力を低減する地盤免震工法を開発しています（図9）。本工法は、地盤変位を吸収する柔らかい緩衝材（免震材）であるポリマー層を開削トンネルの外側に設置するもので、変形性、環境への適合性、耐久性に優れたポリマー材（ポリビニールアルコールゲル体）を新たに開発しました。このポリマー免震層の効果を地震応答解析や模型振動実験によって検証した結果、ポリマー免震層と地盤の強度（Vs）比を1/100、免震層の厚さを40cmとした場合で、側壁のせん断応力は約50%に低減することが確認されました。

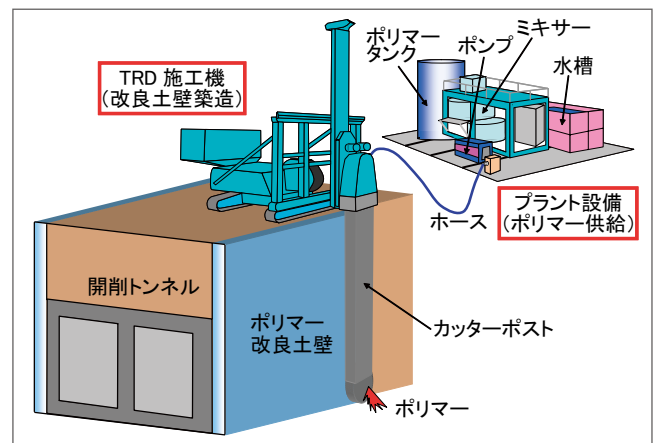


図10 ポリマー免震層の施工イメージ

本工法は、図10のように、従来から地盤改良で用いられている連続横引き（TRD）工法によって効率的な施工が可能で、その他の一般的な地盤改良用施工機でも、セメントミルクをポリマー材に代えるだけで施工することが可能です。なお、本工法は地下鉄の現場でもすでに使用されています。

おわりに

現在改訂中の「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計」においては、免震設計法について従来よりもさらに踏み込んで記載し、免震構造のより一層の普及を図ることとしています。本稿で紹介した免震の基本原則、新しい装置や機構が、この一助となれば幸いです。

特に、地盤の免震構造はまだ事例が少ないのが現状ですが、鉄道総研では地盤改良により地表面地震動を低減させることが可能な新しい地盤免震構造などについても研究開発を進めています。なお、本稿の負剛性支承は、鉄道・運輸機構の基礎的研究推進制度により、京都大学、オイレ工業、ジェイアール総研エンジニアリングと共同で開発しました。RRR