

# 免震・制震装置で補強された 鉄道橋りょうの地震時走行性を確保する



**徳永 宗正**  
Munemasa Tokunaga  
鉄道力学研究部  
構造力学研究室  
主任研究員



**成田 顕次**  
Kenji Narita  
前 鉄道力学研究部  
構造力学研究室  
研究員



**宇野 匡和**  
Masakazu Uno  
四国旅客鉄道株式会社  
工務部工事課  
担当課長

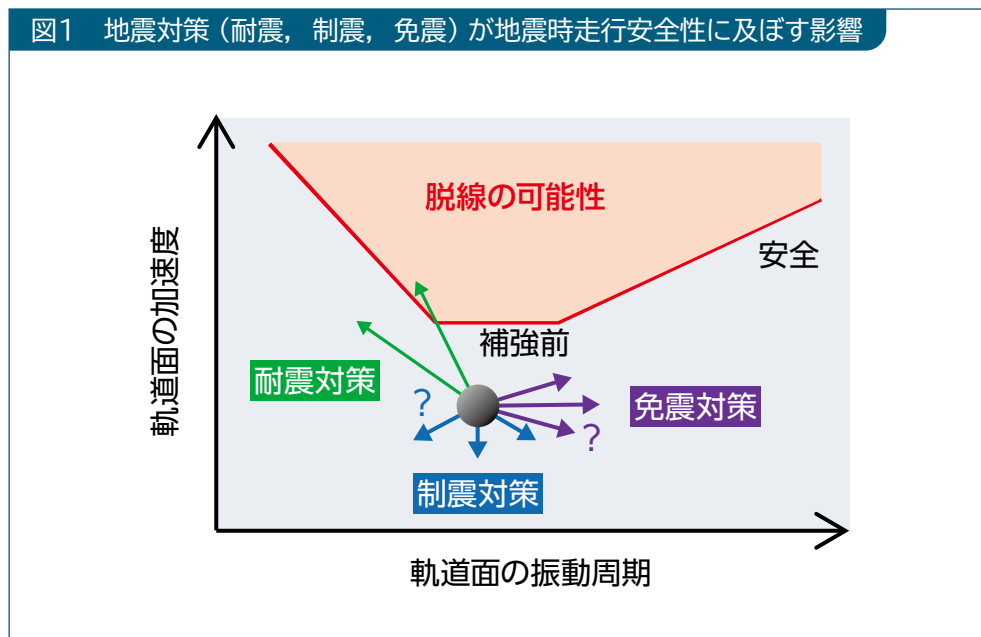
## はじめに

「鉄道構造物等設計標準・同解説(変位制限)」(以下、変位制限標準とする)<sup>1)</sup>に基づく橋りょうの設計では、L1地震動(地表面加速度で100~200gal程度)を尺度として立地条件や構造物の重要度、経済性などを考慮しながら、地震時の走行安全性に有利な構造物を採用することにより、脱線に至る可能性をできるだけ低減することを設計の基本的な考えとしています。変位制限標準が適用される以前の既設橋りょうを耐震補強する場合、必ずしも同様の基準が求められるわけではありませんが、脱線発生の確率

を可能な限り低減するという考え方に違いはありません。ここでは、特集記事4(免震・制振装置で鉄道橋りょうを耐震補強する)で紹介された免震装置を導入した北浦港橋りょうの地震時走行安全性について、車両と橋りょうの力のやり取り(動的相互作用)を考慮した動的解析により評価した事例<sup>2)</sup>を紹介します。

## 各種地震対策が地震時走行安全性に及ぼす影響

図1に、地震対策(耐震, 制震, 免震)が地震時走行安全性に及ぼす影響を示します。軌道面



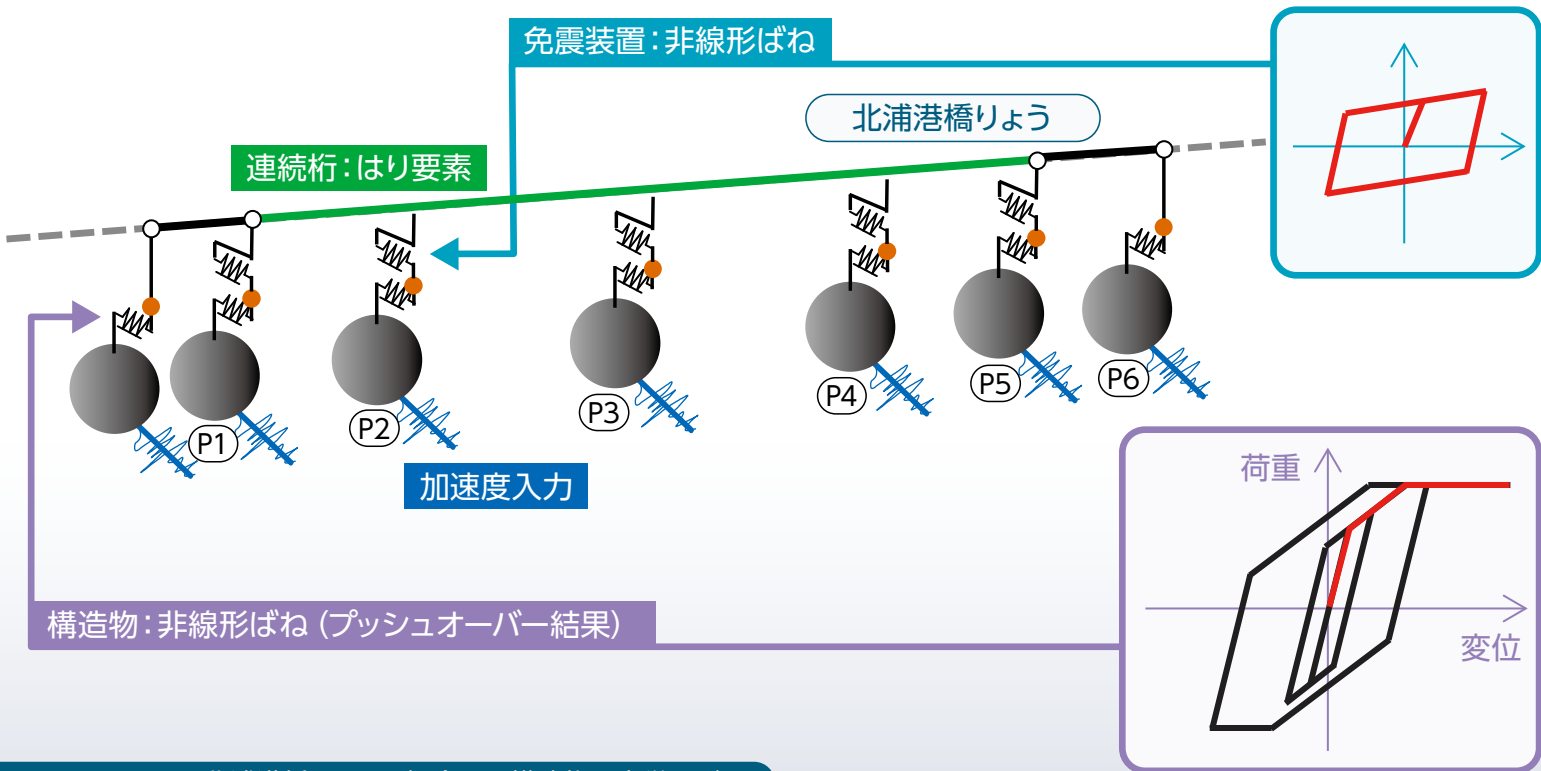


図2 北浦港橋りょうの概念図と構造物の力学モデル

の固有周期が車両の固有周期と近くなると、車両の応答が大きくなりますので脱線の可能性が高まります。この図では軌道面の加速度の大きさに脱線の可能性が高い範囲を模式的に示しています。

一般的な耐震補強を実施すると橋りょうの剛性と耐力が上がりますので、軌道面の振動周期は短く、加速度は大きくなる傾向となります。制震対策ではダンパーなどを用いて地震動のエネルギーを吸収させることで応答を低減しますので、軌道面の振動周期は短く、加速度は小さくなる傾向となります。

鉄道橋りょうを橋軸直角方向に免震化させた場合、橋りょうの長周期化とともに免震装置のエネルギー吸収などにより、軌道面の加速度は低下する傾向にあります。また、橋脚の変位が減少するため、大規模地震時の橋脚の損傷が軽減し復旧性は一般的に向上します。一方で、支承部が柔らかくなる分、軌道面の変位が増加する可能性があることから地震時走行安全性の低下が懸念されてきました。とくに、北浦港橋りょうのような長大橋りょうを免震化させた場

合、車両が走行する軌道面の変形形状や揺れ方が複雑となることから詳細な検討が必要でした。これらの対策方法は別々に用いられる場合もありますし、北浦港橋りょうのように条件に応じて組み合わせて用いられることもあります。

### 車両/橋りょうの動的相互作用解析方法

本研究では、脱線前後の車両挙動を解析可能な、新幹線車両と鉄道構造物との動的相互作用解析プログラムDIASTARSⅢを用いました<sup>3)</sup>。

図2に、北浦港橋りょうの概念図と構造物の力学モデルを示します。図に示すように、連続桁ははり要素で、免震装置、橋脚は図中に示す非線形ばね要素でモデル化しました。免震装置の非線形特性は、特集記事4(免震・制振装置で鉄道橋りょうを耐震補強する)で設計された支承部の仕様により設定しました。

図3に、車両の力学モデルを示します。力学モデルの妥当性は、実物大車両模型を用いた検証実験により確認されています。列車は8両編成とし、走行速度は130km/hとしました。車輪とレールの力のやり取りは、両者の形状や接

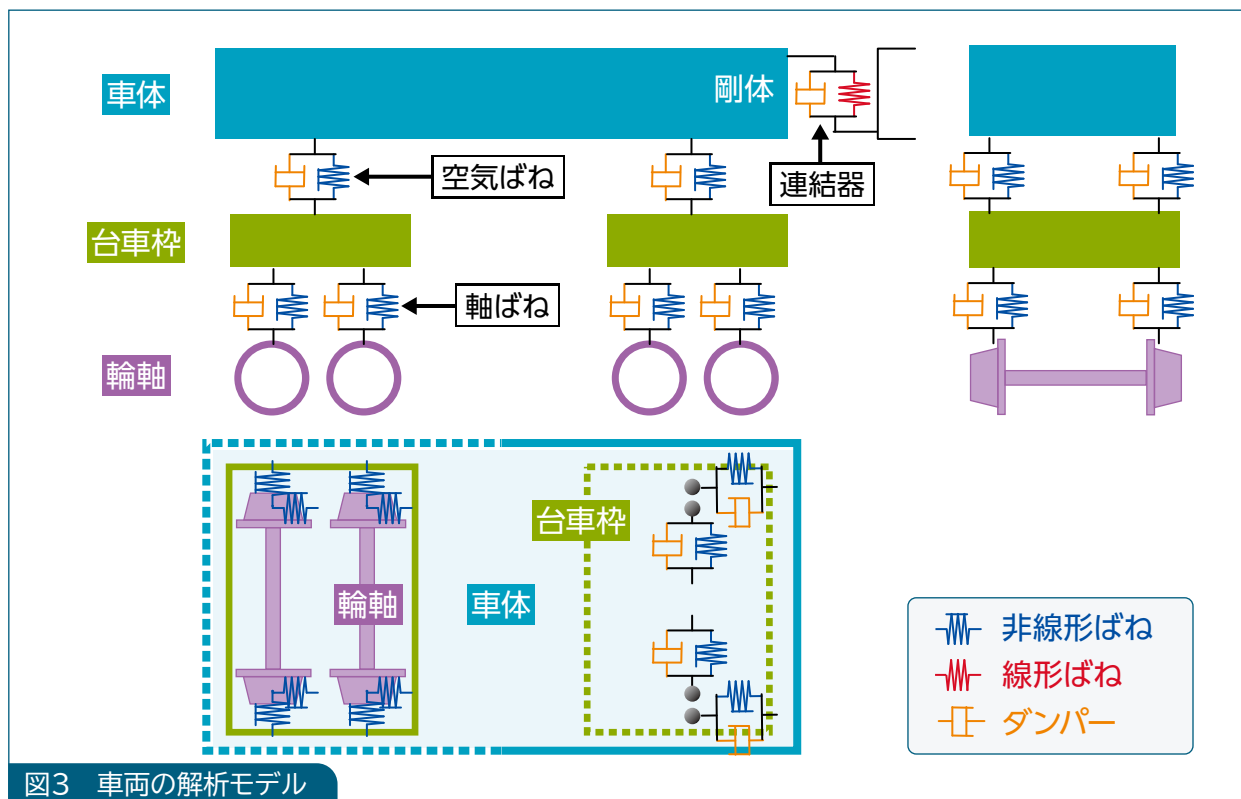


図3 車両の解析モデル

触位置を考慮して計算しました。脱線判定には、車輪とレールの相対水平移動量を用い、その限界値は±70mmとしました。

入力地震動は、特集記事1(本四備讃線橋りょうを耐震補強する)にて実施された強震動予測手法に基づく地震動評価により当該地点を対象として算出したL1地震動を検討対象としました。

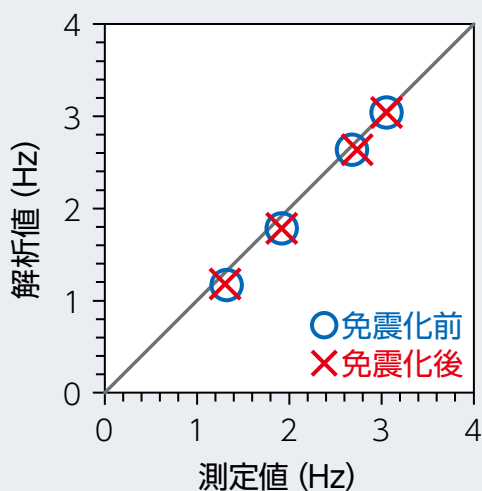
### 北浦港橋りょうの地震時走行安全性

地震時の橋りょうの揺れ方を正しく評価するためには固有振動モード<sup>®</sup>を正確に把握する必要があります。

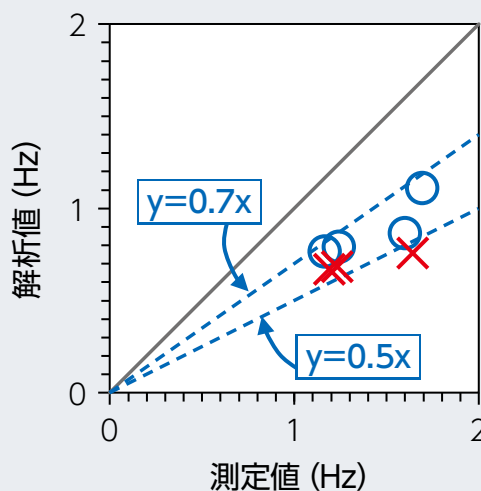
図4に、固有振動数の解析結果と実測値の比較を示します。縦軸は固有値解析から得られた解析値、横軸は実測値です。

連続桁が鉛直方向に変形する振動モードに着

図4 固有振動数の解析結果と実測値の比較



(a) 連続桁が鉛直方向に変形する振動モード



(b) 連続桁が線路直角方向に変形する振動モード

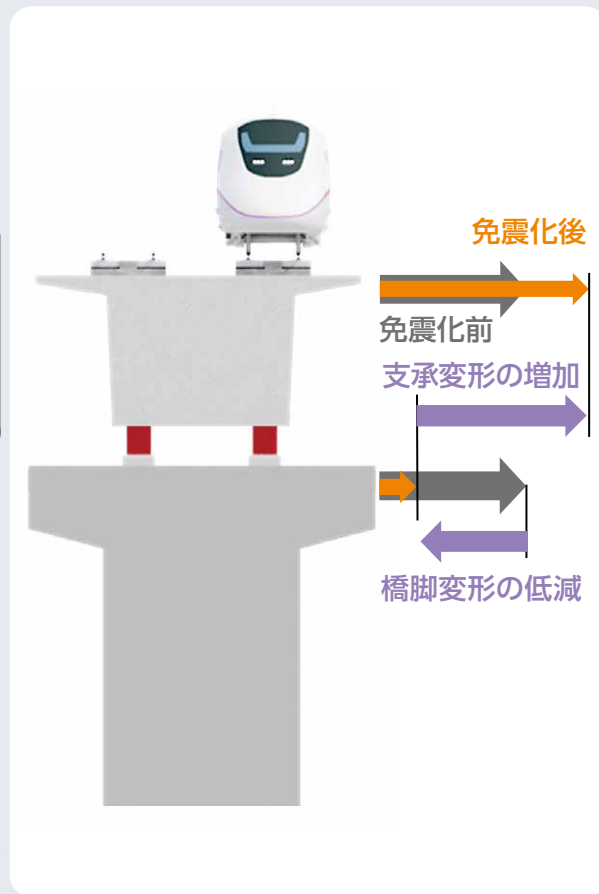
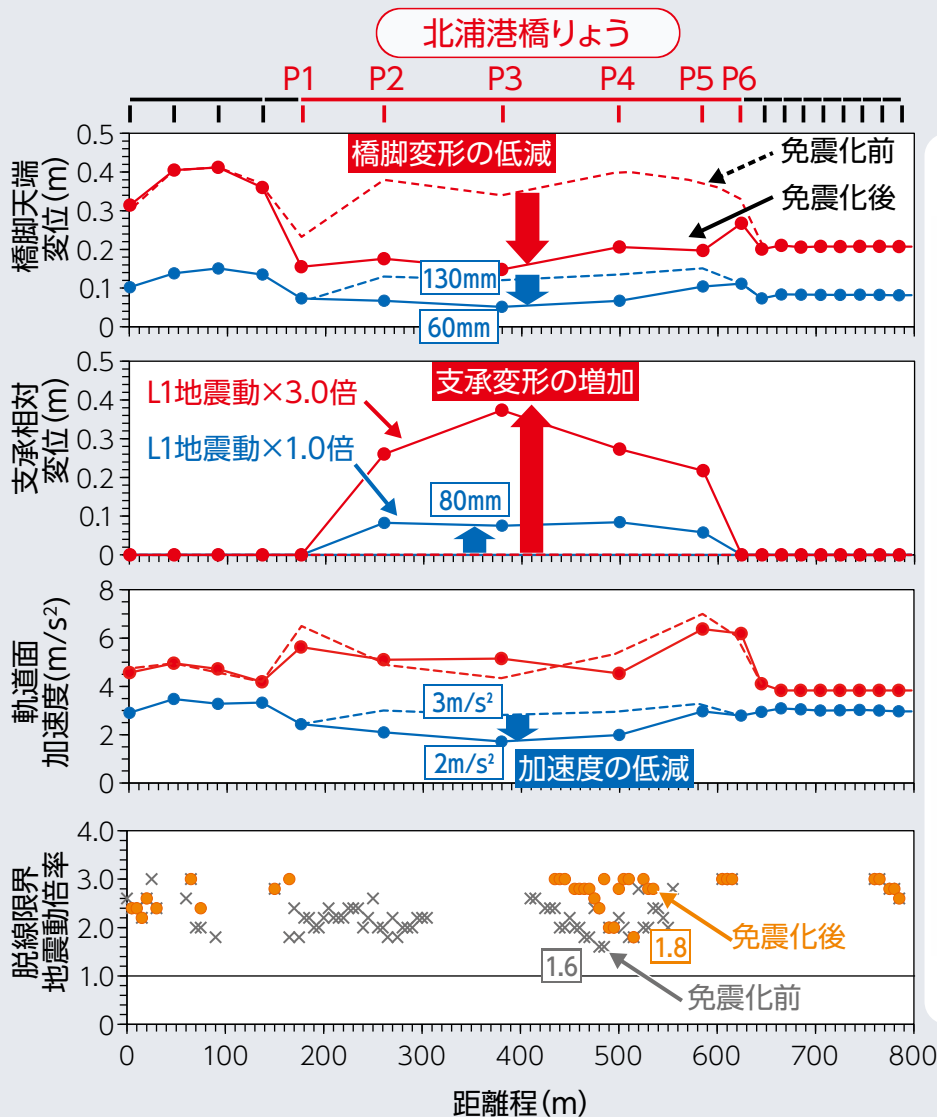


図5 北浦港橋りょうの地震時応答と脱線限界地震動倍率

目すると、1次から4次の固有振動数が固有値解析値と実測値でおおむね一致しており、連続桁の解析モデルが妥当であることがわかります。また、免震化前（未対策）と免震化後でその傾向が変化しておらず、支承免震化が連続桁が鉛直方向に変形する振動モードに与える影響が小

#### 固有振動モードと固有値解析

地震が起きると構造物が揺れますが、実際にはいろいろな揺れ方（揺れる周期、形状）が合成されています。揺れる周期が固有周期、揺れる形状が振動モード形に対応します。固有振動数(Hz=1/sec)は固有周期(sec)の逆数です。どのような揺れ方があるのか調べる方法で、数値計算で行うのが固有値解析です。また、実際の構造物の振動を測定して測定波形を分析することで振動モードを調べる方法もあります。

さいことがわかります。

連続桁が橋軸直角方向に変形する振動モードに着目すると、概して固有振動数の解析値は実測値の50～70%程度の値であることがわかりますが、これは解析では実際よりも柔らかい地盤剛性を想定しているためです。筆者らのラーメン高架橋に対する検討結果ではこの値は50%程度であり、対象とする構造形式はまったく異なるものの俯瞰的に見れば整合性がとれる結果でした。免震化後の実測値は大きな変化はみられない一方で、解析値は免震化の効果により15%程度低下していることがわかります。

図5に、北浦港橋りょうの最大応答値および脱線限界地震動倍率を示します。ここでは、



図6 免震構造の提案

図2, 図3で示す橋りょうと車両の解析モデルによる地震時挙動の動的解析結果を示しています。具体的には、橋りょうの応答値は、L1地震動とその加速度を3.0倍した地震動を入力したときの、橋脚天端の絶対変位、支承部（軌道、橋脚天端間）の相対変位、軌道面加速度を示しています。図の最下段の脱線限界地震動倍率は、L1地震動を基準として入力加速度を増幅させていったときに、はじめて車両に脱線が発生する地震動の加速度とL1地震動の加速度の比を表しています。

図の免震化前に着目すると、下り線走行においてはP4橋脚付近（500m付近）において脱線発生地震動倍率が1.6倍を示しています。橋りょうが車両を大きく加振したことが脱線の支配要因と考えられます。

図の免震化後に着目すると、支承部を免震化することで免震装置にはL1地震動1.0倍（青

線）の大きさの場合80mm程度の変形が発生する一方、支承免震化の影響で軌道面の加速度は $3\text{m/s}^2$ 程度から $2\text{m/s}^2$ 程度へととくに橋りょうの中間部で減少しており、また橋脚天端の変位は130mm程度から60mm程度へと大きく低下していることから橋脚の損傷が低減されることがわかります。免震化前と比較して脱線の発生ケースが顕著に減少しており、脱線発生地震動倍率はP4橋脚付近において1.8倍程度となっています。以上から、支承免震化により橋りょうの応答加速度が減少することから、地震時走行安全性が向上したと考えられます。

### 免震化と地震時走行安全性の関係

以上は北浦港橋りょうの事例ですが、近年の研究開発で免震化と地震時走行安全性の関係についてより一般的な検討を行いました。前述のDIASTARSⅢにより、構造物や支承部の特性、

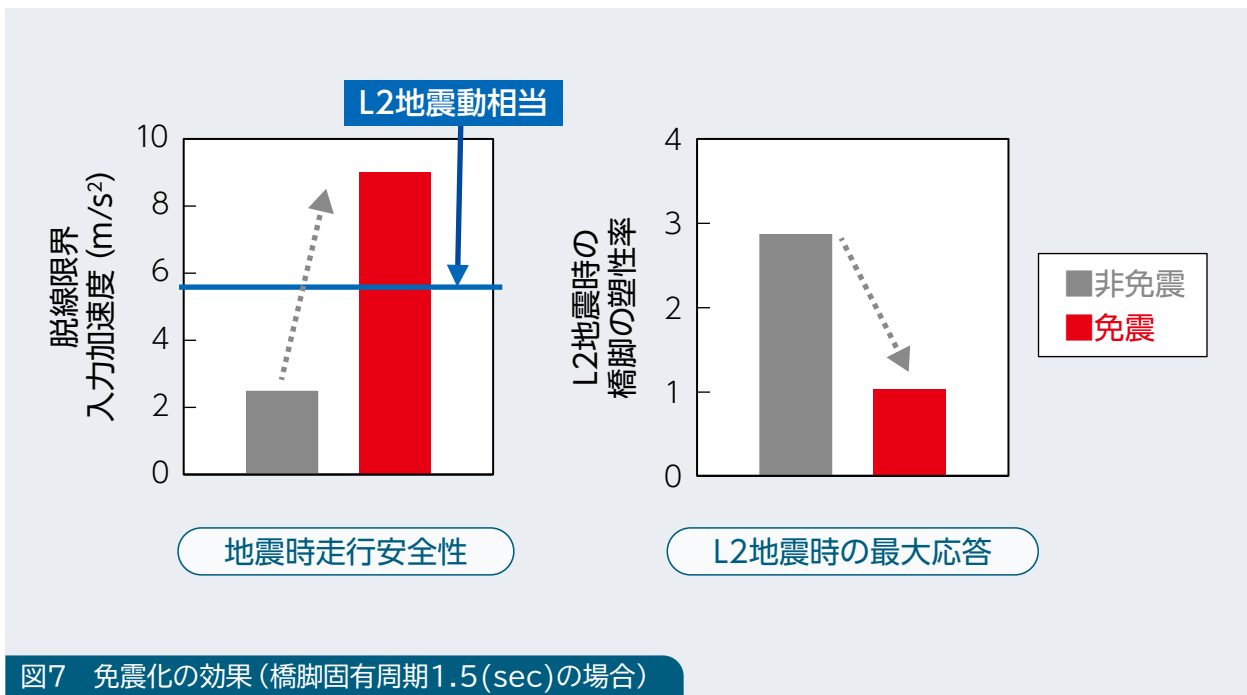


図7 免震化の効果 (橋脚固有周期1.5(sec)の場合)

列車速度，地震動の種類や規模などをパラメータに，数万ケースに及ぶ膨大な解析を行い，免震化によって，復旧性と地震時走行安全性を同時に向上できる条件を調査しました。その結果，橋脚は固有周期1秒以上で，かつ免震装置を大規模地震時に桁上で卓越周期が2秒以上に長周期化するように設定することにより，これら両者の向上が実現できることを明らかにしました。さらに，免震効果が最大限発揮されるように，橋りょう端部の角折れや目違いを抑制できる構造を考案しました(図6)。

5径間連続桁橋りょう(橋長400m)にこれらを適用することにより，図7に解析結果の一例を示すように，L2地震動でも列車は脱線せず，走行安全性の向上が図れること，さらに橋脚の応答が50%以上低減され，損傷が軽減し復旧

性も向上することが確認できます。

北浦港橋りょうの免震対策は積極的に長周期化するものではありませんでしたので，軌道面の卓越周期は2秒まで長周期化されてはいたませんが，先述したように地震時走行安全性を悪化させずに，橋脚の復旧性を大きく向上した例となっています。

### おわりに

ここでは，北浦港橋りょうに免震装置を適用した場合の地震時走行安全性の評価事例<sup>2)</sup>を紹介したうえで，近年の免震化橋りょうの地震時走行安全性に関する研究成果も一部示しました。これらが橋りょうの耐震設計の合理化や耐震補強の低コスト化に貢献できますと幸いです。

RRR

### 文献

- 1) 国土交通省監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説(変位制限)，丸善出版，2006
- 2) 徳永宗正，古屋卓稔，豊岡亮洋，岡本大，曾我部正道，室野剛隆，中田裕喜，宇野匡和：鉄道長大橋りょうの支承免震化を考慮した地震時列車走行性解析，第71回土木学会年次講演会，I-236，pp.471-472，2016
- 3) 涌井一，松本信之，松浦章夫，田辺誠：鉄道車両と線路構造物との連成応答解析法に関する研究，土木学会論文集，No.513/I-31，pp.129-138，1995