

# 地震に対する安全性向上



室野 剛隆  
Yoshitaka Murono  
鉄道地震工学研究センター  
センター長  
[専門分野] 地震工学

内閣府の想定によると、マグニチュード8以上の巨大地震の発生確率は、今後30年間で60～70%と公表されています。このような巨大地震に対して鉄道の安全性を向上させるためには、大きな揺れを伴う地震動（本震）とそれに続く余震の影響を加味したうえで、地震対策を進める必要があります。そこで、鉄道総研では、①地震動の予測手法の開発、②構造物、電車線柱の安全性の評価法や車両の走行安全性の評価法の開発、そして③従来の地震対策法にこだわらない新しい対策工法を提案しました。

## 巨大地震の揺れを予測する技術

2011年には東北地方太平洋沖地震が発生しました。マグニチュード8クラスの巨大地震が発生すると、震源域近傍の地盤や構造物は、設計での想定を超える大振幅の地震動や大きな余震の繰り返しを受ける可能性があります。また、震源から遠く離れた地点でも、加速度は小さいものの長周期・長継続時間の揺れを受けると想定されます。

マグニチュード8クラスの地震では、大きな揺れを伴う本震の後に、1995年の兵庫県南部地震と同等のマグニチュードの余震が発生します。そこで、大きな本震の揺れと、それに続く余震

群を評価する手法を開発しました。

### ①地震動の予測方法

地震動を予測する手法としては、広い地盤領域を3次元でモデル化し、波の伝播の様子を理論的に計算する手法（理論的手法）と、既往の小地震による観測記録を統計的に調べ、それを震源からの波の伝播特性と解釈して地震動を計算する手法（統計的手法）の2つがあります。理論的手法では、地盤構造が地震動に与える影響を正確に評価できます。しかし、数Hzの波までをこの手法で解くには、深さ数kmに及ぶ地盤構造を数十mメッシュで把握する必要がありますが、これは現実的

には不可能です。そこで、長周期成分を理論的手法、短周期成分を統計的手法によって計算し、それを振動数領域で重ね合わせる「ハイブリッド合成法」によって広域の地震動を広い周期帯域において精度良く推定する地震動予測手法を開発しました。本手法を用いて2011年東北地方太平洋沖地震をシミュレーションしました。その結果を図1に示します。計測震度にして、±1程度の精度で再現できることが確認できました。

### ②余震の予測

過去の膨大な本震・余震資料を収集し、それらを統計的に処理することで、

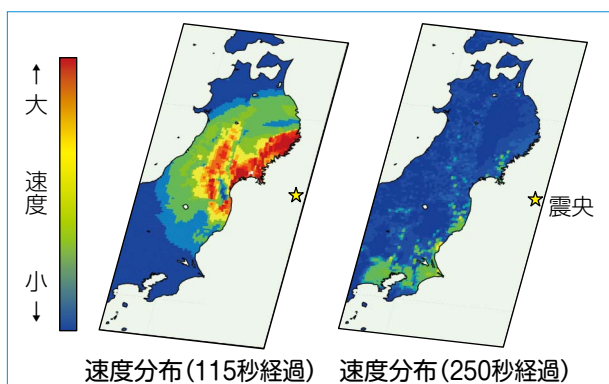


図1 東北地方太平洋沖地震のシミュレーション

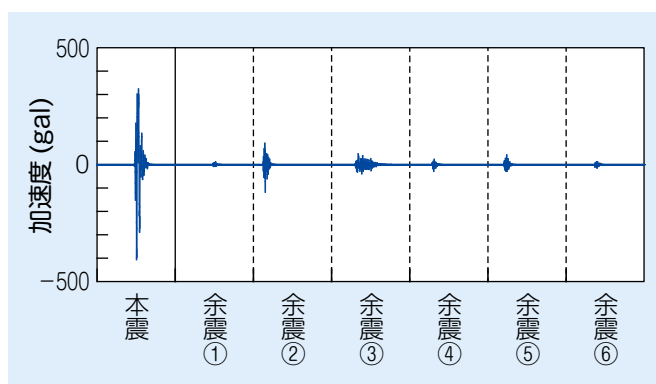


図2 本震から余震の地震動群のシミュレーション事例

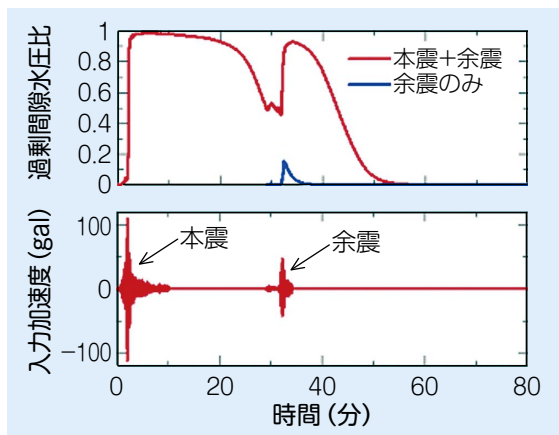


図3 液状化の解析結果

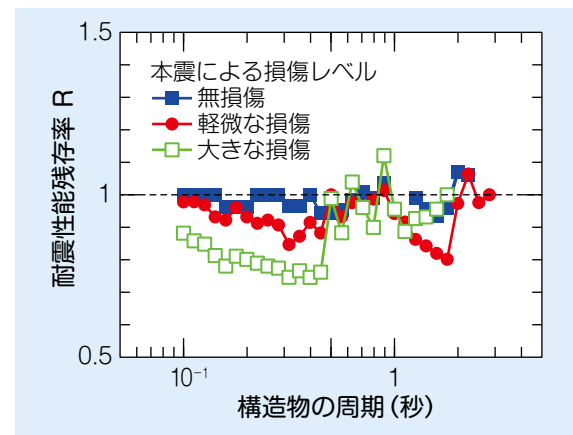


図4 耐震性能残存率のノモグラム

本震後、どれくらいの規模の余震が、どれくらいの時間で発生しているのか調べました。これによると、余震の最大規模は、本震のマグニチュードよりも1小さい程度であり、そのような大きな余震は、本震発生後数時間（10時間以内）で1回程度発生し、その後100時間（4日程度）までの間にもう1～2度発生する可能性があることが分かりました。実際にはばらつきが大きいことに注意が必要ですが、このモデルは過去に発生した地震の平均的な特性を捉えており、1つの目安になります。このモデルを用いて本震～余震（本震から約10時間）の地震動群をシミュレートした事例を図2に示します。

## 挙動予測法

### ①液状化地盤の挙動の予測

これまでの液状化の解析では、過剰間隙水（☞参照）の圧力が上昇し、液状化に至る過程を精度良く評価することに主眼を置いていたので、地震中の間隙水の移動は考えていませんでした。今回は、新たに間隙水の移動（流入・流出）を考慮できるように解析手法を改良したので、地震により間隙水圧が上昇して液状化に至る過程だけでなく、地震後に水圧が消散し地盤が安定する過程、さらには上記の水圧の上昇、消散の繰返しを考慮できるようになりました。この手法を用いて本震から余震の解析を行った事例を図3に示

します。本震の約30分後に余震が発生した結果、本震で一旦液状化していますが、地震の終了とともに地盤が安定化し始めています。その途中で余震が発生すると、再液状化することが分かりました。なお、小さな余震を単独で与えた場合（**図中青線**）には全く液状化しませんでした。

### ②構造物の挙動の予測

構造物の地震時の安全性評価においては、本震に対する損傷程度だけではなく、余震に対する性能（どの程度の性能が残存しているか）を把握することも重要です。従来はその方法がありませんでした。

そこで、まずは、終局状態（破壊）までの挙動を精緻に評価可能な解析手法を開発しました。次に、余震に対する安全性を評価するための指標として、「耐震性能残存率R」を導入しました。これは、「健全な構造物が1回の地震で終局に至る時の最大加速度」と「本震により損傷を受けた構造物が、2回目の地震により終局に至る時の最大加速度」の比で定義されます。開発した手法を用いて、耐震性能残存率Rを計

算し、ノモグラム化することで、本震および余震に対する安全性を実務レベルで照査できるようにしました。**図4**は、その一例です。本震での損傷が小さい場合には、耐震性能はほぼ100%残存していますが、本震での損傷が大きい場合には、耐震性能残存率Rが70%程度まで低下しています。つまり、本震の70%程度の加速度を持つ余震が発生した場合には、終局に至る可能性があることを意味しています。

### ③電車線柱の挙動の予測

巨大地震の際には、構造物が大きく揺れるので、その上の電車線柱も大きく揺れます。これまでは、電車線柱の耐震設計は、弾性応答を前提にしていたため、このような大きな揺れにより、部材や基礎部が塑性化する影響を評価する手法がありませんでした。そこで、実物大電柱の静荷重実験および振動台実験から電柱の非線形特性を把握し、それを評価可能な計算モデルを構築しました。

例えば、コンクリート柱は設計曲げモーメントの0.7～0.8倍程度まで線形な特性を示しますが、それ以上の荷

#### ☞ 液状化と間隙水

土粒子は互いにかみ合い、隙間の水（間隙水）も安定しています。大きな地震が起きると、その揺れで土の体積は小さくならうとし、間隙水に加わる圧力が急激に高くなります。圧力が砂粒子のかみ合う力を越えると、間隙水が砂の粒子を押し広げて上昇し、水の中に砂が混ざった状態になって液体のようになることを液状化と呼びます。

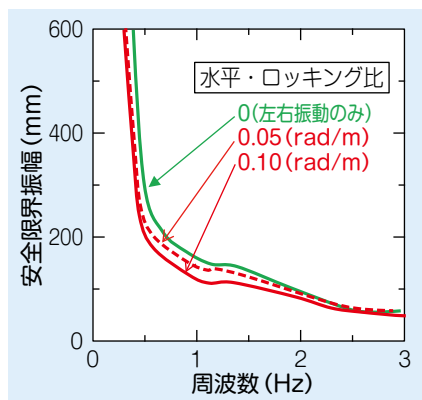


図5 高架橋のロッキングの影響

重が作用すると変形量が増大する非線形な特性を示しました。最大抵抗荷重は、設計荷重の2倍程度あるものの、最大荷重経験後の残存耐力はほとんど期待できないことが分かりました。

砂詰め基礎(☞参照)では、載荷時に基礎内部の砂が電柱に押し固められ、さらに載荷を繰り返すことによって砂の変形が累積することが明らかになりました。

#### ④車両の挙動の予測

地震時には、高架橋は水平振動の他、ロッキング振動(回転振動)をします。従来は、水平振動の影響のみを考慮していましたが、地震動が大きくなると、このロッキング振動が大きくなります。そこで、高架橋天端のロッキング振動が新幹線車両の地震時走行安全性に及ぼす影響を検討しました。その結果を図5に示します。正弦波加振では、左右振動に対するロッキング振動の振幅比(水平・ロッキング比)が0.05(rad/m)より大きくなると、周波数2Hz以下の領域で、左右振動のみの場合より安全限界振幅(☞参照)が10%程度以上減少することが分かりました。

#### ☞ 砂詰め基礎

電車線柱の基礎構造として柱周辺に砂を充填したものを。

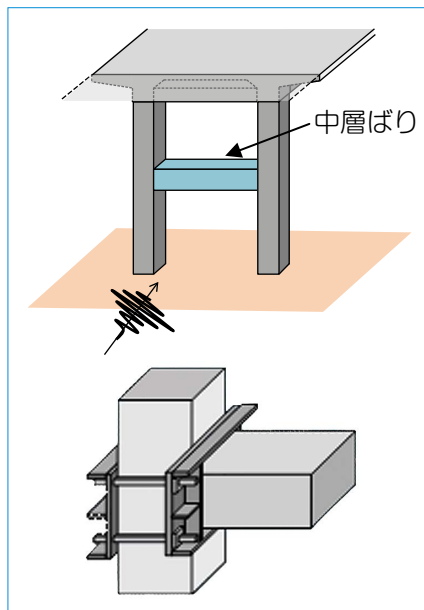


図6 中層ばり挿入工法

### 対策法

#### ①構造物の対策

大地震に対する構造物の対策技術として、既設および新設構造物に適用する方法をそれぞれ提案しました。

既設構造物に適用可能なものとして、「中層ばり挿入工法」と「負剛性摩擦ダンパー」を開発しました。中層ばり挿入工法とは、ラーメン高架橋の損傷制御および残留変位抑制を目的としたものです。具体的には、図6に示すように、柱に取り替え可能な中層ばりを挿入し、地震時に中層ばりを先に損傷させることで、本体構造を保護する工法です。接合方法にはバリエーションがありますが、ここでは中層ばりを鋼板とPC鋼棒によって接合する方法を採用しました。実験および数値解析によると、耐力が最大で50%程度上昇し、変形量は20%抑制できることを確認しました。

「負剛性摩擦ダンパー」は、図7に示すように凸型板とすべり材をガススプ

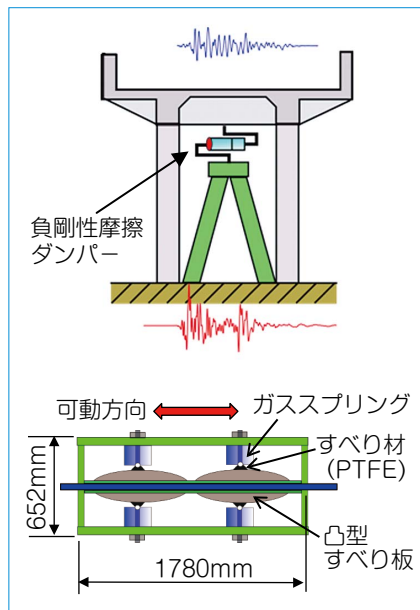


図7 負剛性摩擦ダンパー

リングで高圧接触させることで、地震時に安定した負剛性を発現させるとともに、摩擦による減衰をも発揮させます。これにより、構造全体系の剛性を小さくでき、一般的な諸元のラーメン高架橋では、絶対変位を20%ほど低減できました。

新設構造物への適用を念頭に置いた次世代型高架橋として、「超連続高架橋」と「超連続基礎構造物」を提案しました。超連続高架橋は、既往の研究でも明らかのように、温度および収縮などにより中央径間のはりに大きな軸力が発生するため、技術的に難しいと言われてきました。本検討では、図8に示すように、中心から端部に向かうほど柱の剛性を低減させることで、この問題を克服しました。高架橋のジョイント数を減らす超連続ラーメン高架橋は、近年頻発する地震に対して走行安全性を向上させることが可能であるとともに、支承の数が減るため、メンテ

#### ☞ 走行安全限界振幅

入力振動として正弦波を用い、一定周波数、一定振幅で5波の左右変位をレールに入力して、1回計算を実行します。一つの加振周波数に対して加振振幅を大きくしながら計算を繰返し実行し、脱線の有無を判別します。各加振周波数における脱線しない最大の加振振幅を走行安全限界振幅と呼び、それを図に示したものを走行安全限界線図と言います。

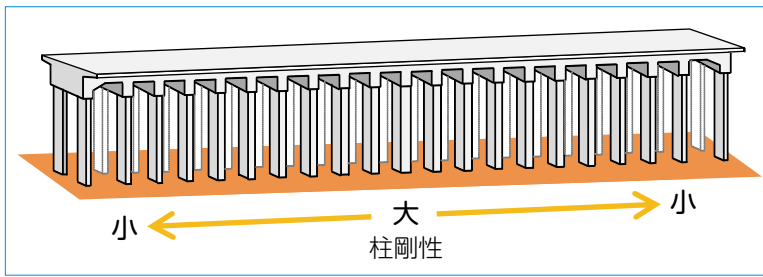


図8 超連続高架橋のイメージ図

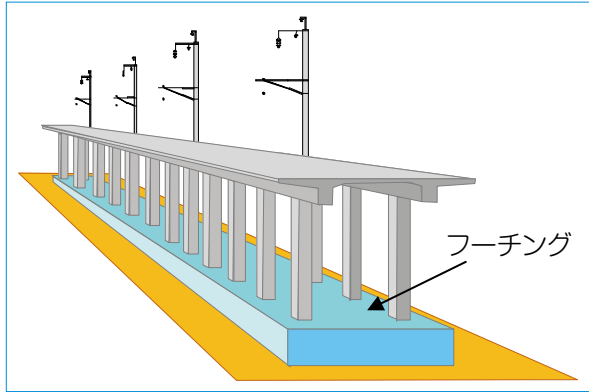


図9 超連続基礎構造物のイメージ図

ランスの負担も軽減可能な構造であると言えます。

超連続基礎構造物は、フーチングを図9のように線路方向に連続化させることで、有効入力動を平準化させるものです。構造物への有効入力動の一樣化により、隣接する構造物間の応答が平準化されるため、相対変位や角折れが減少し、車両の走行安全性が向上します。また、応答が平準化されることで、応答値が大幅に抑制できる場合があります。大きなフーチングを構築することでコストがかかりますが、その分、くい本数を減らしたり、直接基礎化することで、コストの増大を抑えることも可能です。

今回開発した対策工法は、構造物の耐震性能を高めるだけでなく、付帯構造物の応答抑制や走行車両の安全性

**☞ 危機耐性**

危機耐性とは「想定を超える事象が発生しても破局的な状態に至ることを避けること」です。2012年に刊行された鉄道の耐震設計標準<sup>1)</sup>の中で導入された新しい思想です。

向上にも大きく寄与します。数値解析により、表1のような効果が確認できました。

**②電車線柱の対策**

既存電車線柱の地震被害を軽減する対策工法についても複数の工法を提案し、実物大電柱による振動台実験により対策効果を確認しました。そのうち、特に注目される2つの手法を紹介します。

ゴム材挿入工法は、砂基礎の電車線柱への適用を念頭に置いたもので、砂の置換材料としてゴム系材料を挿入するものです。実験では、無対策に比べて応答倍率が1/10程度になっており、応答抑制効果が非常に高いことが分かりました。

H鋼挿入工法は、モルタル基礎への適用を念頭にしており、図10のようにPC電柱の内部にH鋼などの芯材を挿入するものです。これは、「危機耐性(☞参照)」を向上させることを目的としており、従来の地震対策の考え方と大きく異なります。万が一想定を超える地震が発生して電車線柱が破壊しても、芯材のH鋼によって電車線柱が大きく

表1 各地震対策の効果

	耐震性能	走行性 (車輪上昇量)
中層ばり挿入工法	耐力 50%増 変位 20%減	58%減
負剛性摩擦ダンパー	絶対変位 20%減	70%減
超連続高架橋	支承レス ⇒復旧性向上	25%減
超連続基礎構造物	角折れ低減 変位 50%減	70%減

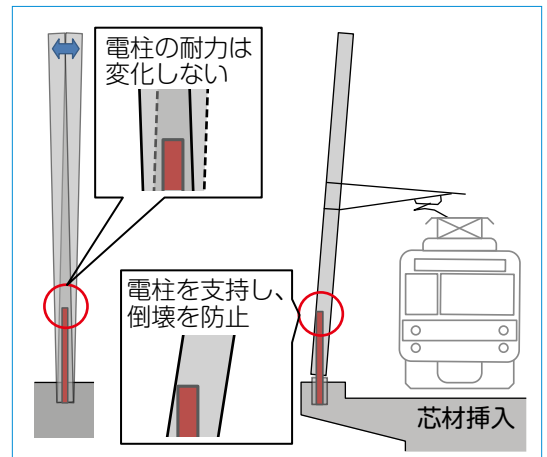


図10 H鋼挿入工法(電柱倒壊防止)

傾斜して走行車両に支障しないように配慮したものです。H鋼挿入工法の効果については、数値解析および実物大の実験により有効性を検証しました。

**成果の活用**

超連続高架橋や超連続基礎構造物など、次世代を目指した新工法は、施工法を含めて、もう少し検討が必要です。しかし、ご紹介した各種の評価技術はすでに実務にも適用可能な水準に達しています。また、中層ばり挿入工法やH鋼挿入工法などはすでに実用化の水準にあり、今後想定される巨大地震に対して積極的に活用して頂くことにより、鉄道の安全性が飛躍的に向上することを期待しています。☐☐☐

**文献**

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)，丸善，2012