

# 地震時の構造物被害および 走行安全性をマクロに評価する

室野 剛隆  
構造物技術研究部  
(耐震構造 研究室長)

野上 雄太  
前 構造物技術研究部  
(耐震構造)

宮本 岳史  
鉄道力学研究部  
(車両力学 研究室長)



むろの よしたか



のがみ ゆうた



みやもと たけふみ

## はじめに

我が国は、北米プレート、ユーラシアプレート、フィリピン海プレート、太平洋プレートの4枚のプレートが衝突し、複雑に重なり合うところに位置しているために、地震が頻発する地域です。世界全体のわずか0.2%の面積の日本で、世界全体の10%を超えるエネルギーの地震が発生しています。特に1995年以降に関して言うと、世界中で発生した地震の中で、地震の規模を示すマグニチュード(M)が6以上の地震の実に20%以上が日本とその周辺で起こっており、日本は今、地震学的に非常にアクティブな時期にあります。政府の試算によると、今度30年間に宮城県沖地震(M7.5前後)が発生する確率は99%、東海地震(M8.0)で86%、などと予想されています。

ひとたび大きな地震が発生すると、鉄道も大きな被害を受ける可能性があります。例えば、1995年の兵庫県南部地震では、多くの鉄道高架橋が倒壊を含めた損傷を受けました。2004年の新潟県中越地震では、走行中の新幹線が脱線しました。国民の安全に対する要求が高まる中、今後想定される地震に対して、このような被害を抑えるための対策が急務となっています。そのためには、想定される地震に対する鉄道システムの被害の有無やその規模を事前に予測し、それに応じた対策を施さなければなりません。

しかし、鉄道は、広域に線状・面状に路線が敷設されており、検討する領域が広がります。そのため、想定地震に対する鉄道の安全性を評価するためには、まず、路線全体の広域な被害程度の概略をマクロに予測し、特に危険な箇所を抽出し(スクリーニング)、危険箇所に対して個別に対応するという2段階の予測法が望ましいと考えられます。さらに、鉄道の場合には、構造物が安全であることはもちろん、構造物上を走行する列車の安全性も求められます。

路線全体の広域な鉄道システムの地震時安全性に関するスクリーニングを目的とし、構造物の損傷および走行車両

の安全性を統一的な指標で連続的に評価するための予測手法を提案しましたので紹介します。

## 地震を受ける構造物の挙動

構造物が地震を受けた時の動きについて簡単に説明します。ここでは、上記のことを調べるために、構造物を簡単な数値計算モデルに置換し、地震波を入力した応答解析を行いました。用いた地震波は、32地点で観測された地震記録で、その最大加速度を50から1000galまで11段階に調整して使用しました。また、構造物は、降伏震度 $k_{ny}$ が0.4、等価固有周期 $T_s$ が1.0秒を例としてとりあげます。なお、降伏震度とは、構造物に水平荷重を載荷したときに、構造物を構成する部材が降伏するときの荷重を自重で除した値です。等価固有周期とは、構造物が降伏するときの剛性に対する固有周期です。

構造物に入力する地震波の振幅を大きくした場合に、構造物の応答(振動卓越周期 $T'_s$ と応答加速度PSA)がどのように変化するかを示したのが図1です。地震波の振幅が大きくなると、構造物はある周期で振動しながら応答も徐々

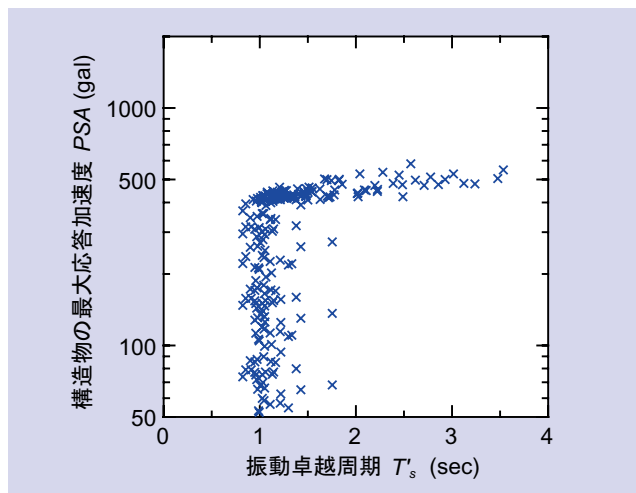


図1 地震を受ける構造物の応答特性

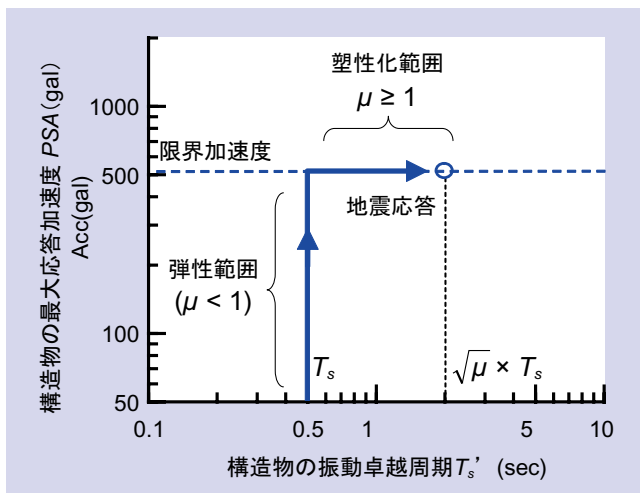


図2 地震を受ける構造物の応答特性の概念図

に大きくなります。このときの振動周期は、概ね構造物の等価固有周期に等しく一定であることが分かります。この範囲の応答を弾性応答と呼び、構造物が損傷をしていない範囲と言えます。さらに、地震波の振幅を大きくすると、構造物の応答が弾性限界値に達し、損傷をします。これを塑性化と呼びます。構造物が塑性化すると、構造物は限界値以上の加速度を負担することはできず、振動周期を伸ばしながら変形のみを増大させて、地震のエネルギーを吸収することになります。この結果を模式的に表したのが図2です。図中の記号  $\mu$  については、後ほど説明します。

### 構造物が地震により被害をうける条件

上記の検討結果から、地震動の揺れが大きくなれば、構造物に被害が発生することが分かりました。ただし、「地震動の揺れの大きさ」を表わす指標としては、最大加速度PGA、最大速度PGV、最大変位PGD、震度I、スペクトル強度SIなどが考えられます。これらの指標の中で、構造物の損傷に最も関連の深い指標が何であるか、そして、その指標がどの程度の値になると、構造物に被害が発生し始めるのでしょうか？

例えば、1995年の兵庫県南部地震では、鉄道構造物も甚大な被害を受けたことは記憶に新しいところです。この地震では、地震動の加速度PGAは大きく、800gal以上の加速度が記録されています。被害が大きかった理由にはいくつかの原因がありますが、加速度が大きかったことがその支配的な理由の一つであることは言うまでもありません。しかし、1993年の釧路沖地震でも800galを越える記録が得られていますが、この地震では大きな被害は発生していません。なぜ、このような差が生じたのでしょうか。

そこで、最大速度PGVに着目すると、兵庫県南部地震では1.21m/s(葺合)と大きいのに対して、釧路沖地震で

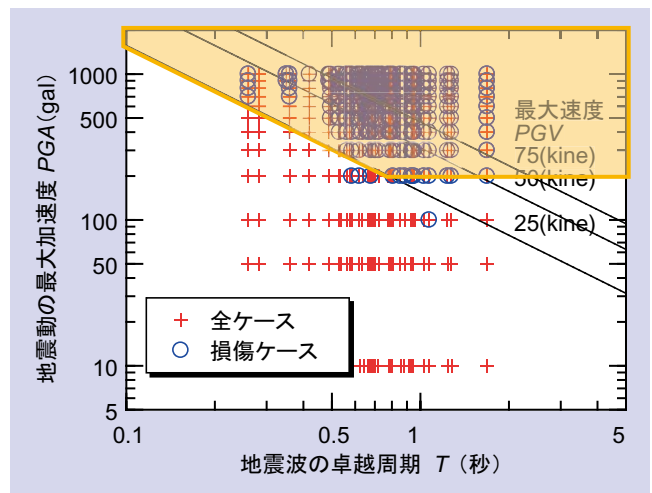


図3 構造物の被害発生の有無と地震力の関係

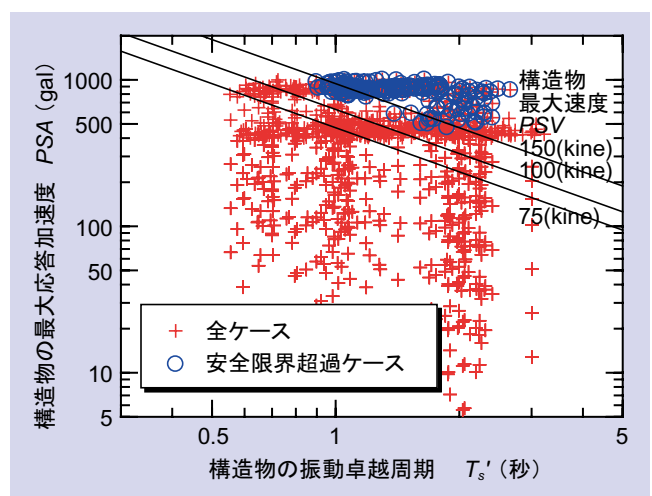


図4 走行車両の走行安全性限界と地震力

は0.67m/s(釧路気象台)と小さな値です。どうやら、秘密はこの辺りにありそうなので、最大加速度PGAと最大速度PGVが構造物の被害に与える影響を調べてみました。

降伏震度 $k_{hy} = 0.4$ 、降伏周期 $T_s = 1.0s$ の構造物に10,000波以上の様々な地震波を入力した場合の解析結果の例を図3に示します。横軸に地表面地震波の卓越周期 $T$ 、縦軸に最大加速度PGAをとります。図中の左上から右下に描かれている直線は、速度一定の線を表しています。図中の+印は解析した全ケースを、○印は被害が発生したケースを示しています。地表面地震波の卓越周期 $T$ が短い場合は被害の有無の境界は等PGV線に沿っており、 $T$ が長い場合には境界は等PGAに沿っており、被害が発生するエリアは図中の太線枠で囲まれた範囲であることが分かります。つまり、構造物の被害の大小は加速度だけでは決まらず、加速度、速度ともある程度の大きさになったときに発生することが分かります。

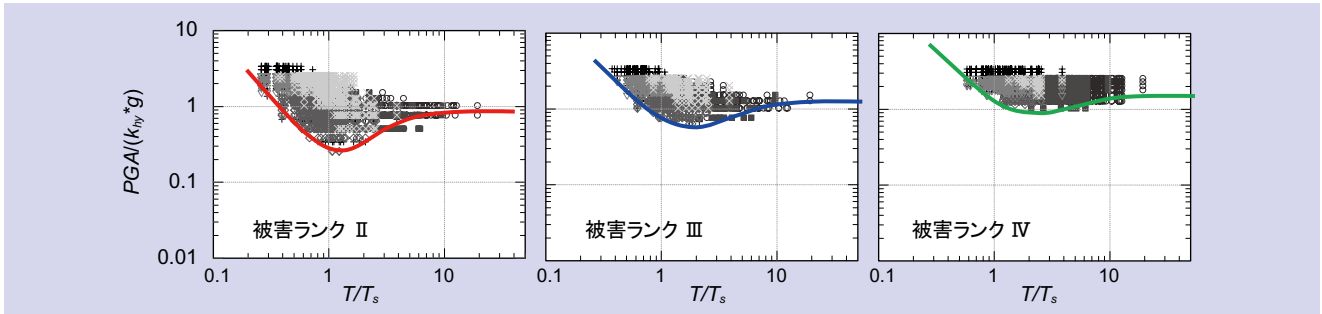


図5 正規化周期－正規化加速度による被害ランクの分類

### 橋梁上を走行する車両が被害を受ける条件

次に地震時に橋梁上を走行している車両の挙動について考えてみます。ここでは、鉄道総研が開発した、『車両運動シミュレーションプログラム (VDS)』を用いて、構造物上を走行する新幹線の挙動についてシミュレーションを行ってみたい。一例を図4に示します。横軸に構造物の揺れの周期、縦軸は構造物の最大加速度をとっています。図中の+印は検討した全ケースを示し、そのうち走行安全の限界を超える場合を○印で示しています。図4より、多少の誤差はあるものの、概ねPSVが100～150cm/sを境界にして、走行安全の限界を超えるか超えないかを判定することが可能であることが分かります。ただし、車両条件が異なれば走行安全を超えるか超えないかの境界は異なります。

### 被害推定への応用

図3より、構造物の被害は最大速度PGVおよび最大加速度PGAが関係していることが分かりましたが、より一般的な傾向を得るために、構造物の降伏震度 $k_{hy}$ と降伏周期 $T_s$ を変化させ、先ほどと同様に様々な特性を含む10,000波の地震波を入力して数値解析を行いました。ここで、横軸を地震波の卓越周期 $T$ を構造物の降伏周期 $T_s$ で除した「正規化周期」とし、縦軸を入力の最大加速度PGAを構造物の降伏加速度( $k_{hy} \times g$ ,  $g$ は重力加速度)で除した「正規化加速度」とした図面で被害ランクを分類しました。被害ランクは応答塑性率 $\mu$  (構造物が損傷する限界の変位で最大応答変位を除いた値)を用いて、表1のように整理しました。ここで言う、被害ランクIとは、「無被害」に相当し、ほとんど被害は無いものの微小な亀裂程度が発

表1 被害ランクと塑性率の関係

被害ランク	ランクI	ランクII	ランクIII	ランクIV
塑性率	$\mu < 1$	$1 \leq \mu < 2$	$2 \leq \mu < 4$	$4 \leq \mu$

ランクIは無被害、ランクII～IIIは柱上下部に幅の大きい曲げひび割れが生じ、場合によっては被りコンクリートも一部剥落する中程度の損傷、ランクIVは被りコンクリートが剥落し、軸方向鉄筋の一部が変形する、またはそれ以上の損傷状態を想定。

生ずる程度で済むことを想定しています。被害ランクIIは「小被害」で、亀裂が発生する程度の被害を想定しています。被害ランクIIIは、「中被害」に相当し、大きな亀裂が発生するような被害、被害ランクIVは、「大被害」に相当し、大きな亀裂がかなり発生し、破壊に至ることをそれぞれ想定しています。図5に整理した結果を示しています。各被害ランク毎に明確に境界線が現れており、構造物の被害ランクの推定曲線 (構造物の被害推定ノモグラム) を図6の

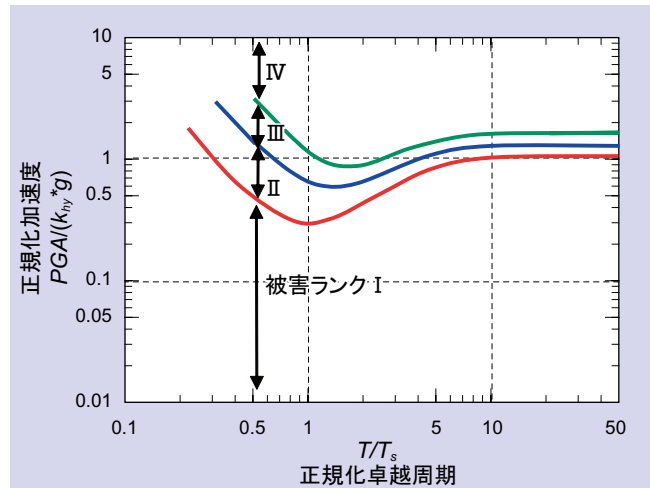


図6 構造物の被害判定ノモグラム

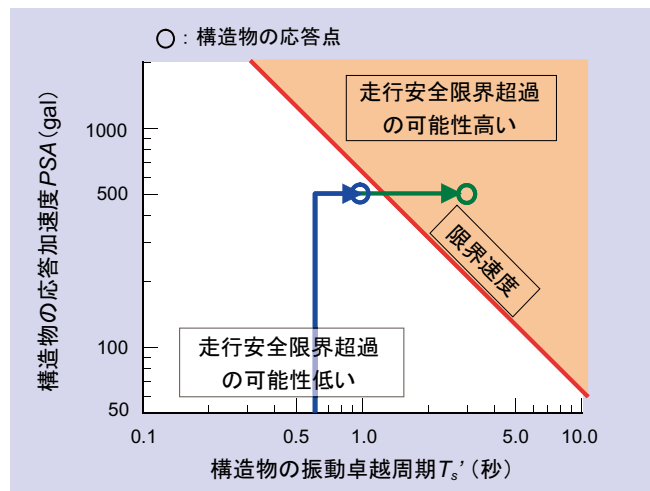


図7 車両の走行安全判定ノモグラム

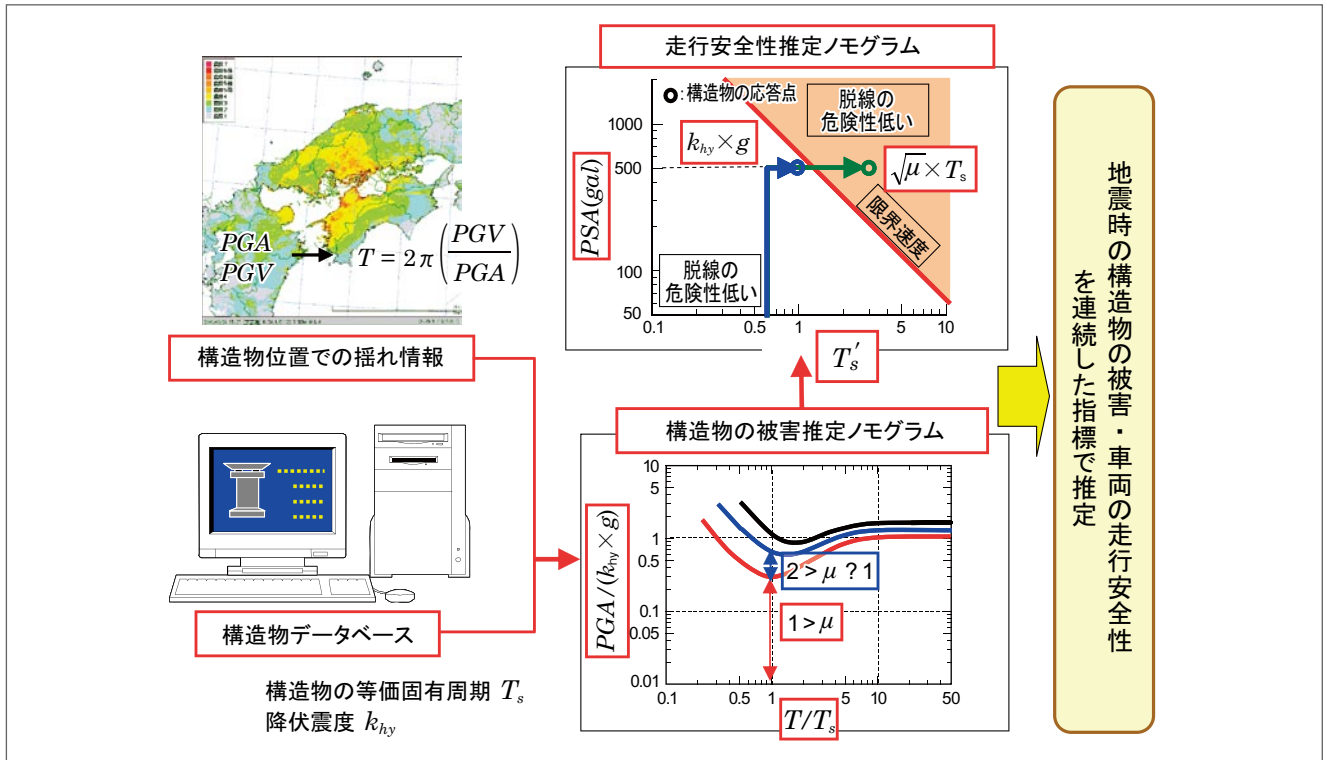


図8 提案手法の具体的な適用方法の全体フロー

ように提案しました。

構造物上を走行する車両の走行安全性は、図2と図4の関係を考慮することで評価できます。その概念図を図7に示します。車両の走行安全を満足するための限界速度を、図4を参考に『例えば』100cm/s程度と仮定すると、図7の網掛け部が走行安全限界を越えて危険と判定される領域です。次に、構造物の振動卓越周期  $T'_s$  と最大応答加速度  $PSA$  を求め図7にプロットし、設定した限界速度を超えているか否かで、想定地震に対する構造物上を走行する車両の走行安全性の評価が可能となります。図7を走行安全限界判定ノモグラムと呼びます。

### 提案する総合的な被害推定法の適用方法

近年では、国のプロジェクトとして、日本全国を0.5～1kmメッシュに分割し、各メッシュ毎に地震動の  $PGA$  や  $PGV$  を予測した結果（『地震動予測地図』など）が公開されています。これらの成果を利用して、事前に想定される地震に対して、構造物および走行車両の安全性を予測することが可能です。その方法を以下に紹介します。全体フローを図8に示す。

- ① 地表面の最大加速度  $PGA$ 、最大速度  $PGV$  を予測します。  
公開されている地震動予測地図などの成果を利用することも可能です。
- ② 地震動の卓越周期  $T$  を  $T=2\pi(PGV/PGA)$  により算定します。
- ③ 構造物のデータベースより、対象とする構造物の降伏

震度  $k_{hy}$  及び等価固有周期  $T_s$  と上記①、②で算定した  $PGA$ 、 $T$  を用いて、図6に示した構造物の被害推定用のノモグラムから構造物の被害ランク（応答塑性率  $\mu$ ）を算定します。

- ④ 上記③で算定した応答塑性率  $\mu$  を用いて、 $T'_s = \sqrt{\mu} \times T_s$  より構造物の振動卓越周期  $T'_s$  及び最大応答加速度  $PSA$  を算定します。
- ⑤ 図7の車両の走行安全性を判定するノモグラムに  $T'_s$  と  $PSA$  をプロットし走行安全性を判定します。

### おわりに

広域な鉄道システムの地震時安全性をスクリーニングすることを目的に、想定される地震に対して構造物の安全性および車両の走行安全性を統一的な指標で連続的に評価するための予測手法を提案しました。この方法では、被害想定に必要な情報は、地震に関しては、地表面地震波の最大加速度  $PGA$  と最大速度  $PSA$  の2つのみです。また、構造物に関しては、降伏震度  $k_{hy}$  と降伏周期  $T_s$  のみです。非常に少ないパラメータで被害を予測でき、また、構造物の被害予測と車両の走行安全性を、構造物の応答塑性率  $\mu$  を介して、互いに関連した指標を用いて連続的に評価できる点が利点です。

ここで提案した手法は既に現場でも使われており、鉄道の地震リスクの低減に少しでも貢献できることを期待しています。RRR