

鉄道の地震災害を予測する

是永 将宏
防災技術研究部
(地震防災 研究員)

野上 雄太
構造物技術研究部
(耐震構造 研究員)

室野 剛隆
構造物技術研究部
(耐震構造 主任研究員)

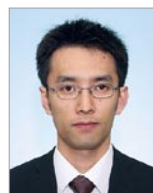
宮本 岳史
鉄道力学研究部
(車両力学 研究室長)



これなが まさひろ



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

地震が発生して大きな揺れに見舞われた場合、鉄道では構造物が壊れたり、車両が脱線するなどの被害が発生する場合があります。地震による被害を低減させるために、構造物の耐震補強などのハード対策や早期地震情報による列車運行制御などのソフト対策が行われています。これらの対策をより効果的に行い、地震に対する鉄道の防災性能を向上させるためには、地震による災害のリスクを正しく評価し、把握することが重要です。ここでは、鉄道地震災害に対するリスクを簡易に評価する手法についてご紹介します。

公的な面的情報の活用

将来地震が起こった場合にどれほどの大きさの揺れに見舞われるかをあらかじめ把握しておくことは、地震対策を行う上でも重要です。日本では、国レベルの公的機関等において、地震ハザード(地震危険度)の評価が行われています。例えば中央防災会議(内閣府)では、東海・東南海・

南海地震や首都直下地震などが発生した場合の各地の揺れの大きさや、津波の予想、被害の予測などを行っています。また、地震調査研究推進本部(文部科学省)では、「全国を概観した地震動予測地図」を作成しています。これは、主要活断層や海溝型の地震の影響を総合的に考慮し、地震発生の可能性や地震の揺れの大きさを評価した地震ハザード情報です。検討された成果は、ホームページなどで公開されています。

これらの面的な情報を、鉄道路線の位置に対して抜き出すことによって、鉄道の地震対策の検討に利用することができます。例として、図1に地震調査研究推進本部で検討された「今後50年以内に39%の確率で見舞われる震度の分布図」¹⁾を示します。また、図2に、図1の情報(予測震度)のある路線に沿って抜き出したものを示します。図2から、この路線では、キロ程250km周辺で最も大きな揺れに見舞われる可能性が高いと推測され、耐震補強などの地震対策の優先度を検討する際の補助情報として活用することができます。

地震ハザードを詳細に検討する場合、震源の特性、地震波が伝わる過程での影響、また、対象とする場所の地盤の揺れの特性(地盤増幅特性)を考慮する必要があります。特に、地盤増幅特性は場所ごとに異なり、わずかに離れた場所でもその特性が

大きく異なることが知られています。そのため、鉄道構造物のように、特定の限られた範囲を対象として、地震ハザードを詳細に検討する場合には、対象箇所の局所的な地盤増幅特性を知る必要があります。

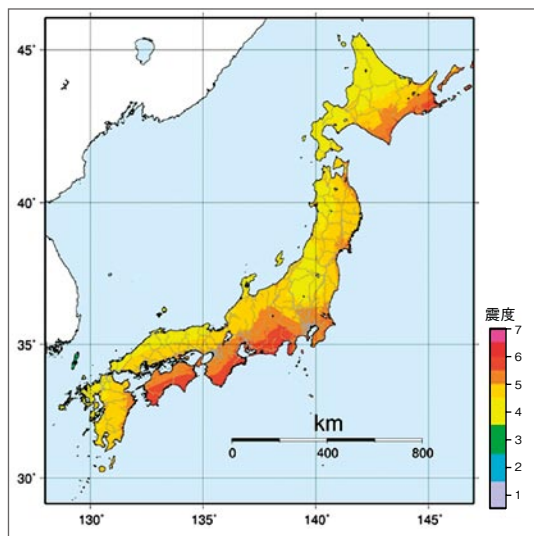


図1 今後50年以内に39%の確率で見舞われる震度の分布

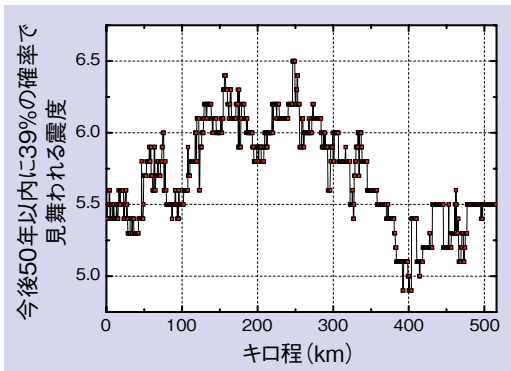


図2 ある路線沿線における予測震度

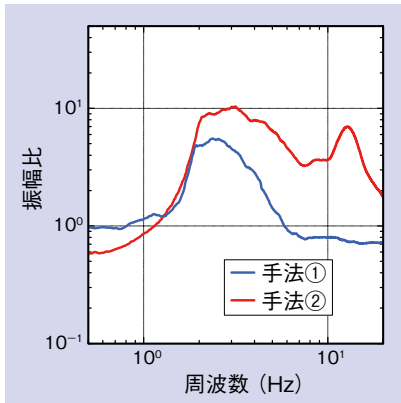


図3 地盤増幅特性の検討結果 (KiK-net大月観測点)

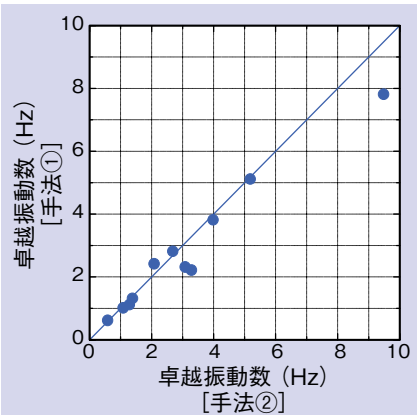


図4 卓越周波数の比較

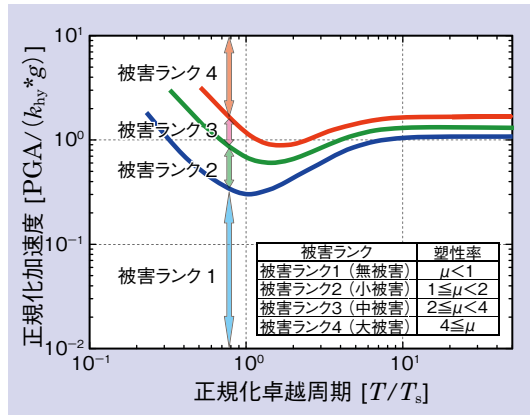


図5 構造物の被害推定ノモグラム

鉄道総研では、特定箇所の地盤増幅特性を簡易に取得するために、常時微動を用いた手法の検討を行っています。常時微動とは、波浪や気圧変化などの自然現象や自動車などの人工的な振動源などによる地表面の恒常的なごくわずかな揺れのことです。ここでは、常時微動記録における水平動(H)のスペクトルを上下動(V)のスペクトルで除して算出したH/Vスペクトルを用いた手法の検討を行っています。

検討には、(独)防災科学技術研究所の基盤強震観測網(KiK-net)観測点の周辺で行った常時微動測定の結果を用いました。KiK-net観測点は、地中と地表に地震計が設置されており、地表の地震計で観測された実地震の水平動のスペクトルを、地中の地震計の水平動スペクトルで除すことにより、地盤増幅特性を実測データから直接得ることができます。

検討結果の一例として、図3に、KiK-net大月観測点におけるH/Vスペクトル(以下、手法①とします)と、実地震による地盤増幅特性(以下、「手法②」とします)との比較を示します。

図3より、手法①と手法②の結果を比較すると、振幅比は若干異なるものの卓越する周波数は概ね一致していることが分かります。手法②は、基盤から地表への伝達特性(増幅特性)そのものであることから、ここで卓越する周波数はその地点における表層地盤の卓越周波数と考えられます。

図4に示すように、手法①で得られた卓越周波数と実測(手法②)を比較すると、多少のばらつきはあるものの両者の結果はよく対応しており、地盤増幅特性のうち、地盤の卓越周波数を簡易に取得する方法として、常時微動のH/Vスペクトルが有効であると考えられます。

構造物の被害推定ノモグラム²⁾

地震が発生した場合の構造物の被害を推定する時、現在

は、地震による揺れの大きさを代表させた一つの指標(地震動指標)を用いることが一般的です。鉄道では、この地震動指標に対して基準値を設定して、地震時には地震計で観測した値に応じて運転中止や構造物の点検巡回、運転再開など運転規制を行う際の判断に利用しています。運転規制のための地震動指標として、これまでは最大加速度が広く用いられてきましたが、近年では被害との相関がより高いとされる計測震度やSI値が採用される事例が増えてきています。

しかし、地震時の揺れの特徴は発生した地震ごと、対象とする場所ごとにより異なり、また、鉄道構造物も多種多様であるため、単一の指標のみから常に適切に被害の程度を分類することは困難です。そこで、地表面での地震動の最大加速度(PGA, peak ground acceleration)と卓越周期 T の2つの地震動指標に関して構造物被害との関係を調査したところ、この2つの指標を用いることで構造物の被害程度をより明確に分類することができることが明らかになりました。さらに、様々な地震動特性や構造物条件に対して被害予測を行った結果を、図5に示すように、横軸に地表面から構造物に入力する地震動の卓越周期 T を構造物の降伏周期 T_s で割ったもの(T/T_s : 正規化卓越周期と呼びます)、縦軸に入力地震動のPGAを構造物の降伏加速度 $k_{hy} * g$ (g は重力加速度)で割ったもの($PGA / (k_{hy} * g)$: 正規化加速度と呼びます)をとった図面で整理すると、構造物の被害程度を明確に分類できることが分かりました(図5: 以下、構造物の「被害推定ノモグラム」と呼びます)。構造物の被害程度については、応答塑性率 $\mu = \delta_{max} / \delta_y$ (δ_{max} : 構造物の最大応答変位、 δ_y : 構造物の降伏変位)を用いて、被害ランク1~4(無被害・小被害・中被害・大被害)に分類しています。

図5を見ると、入力地震動の卓越周期 T と構造物の降伏周期 T_s とが等しい時に($T/T_s = 1$)、 $PGA / (k_{hy} * g)$ が最小

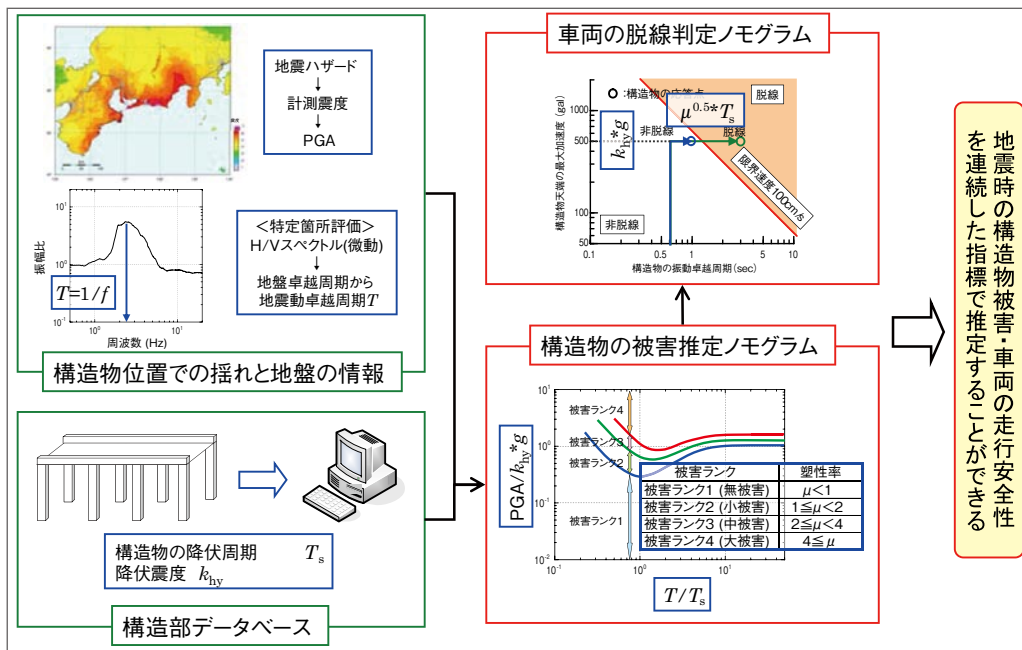


図9 総合的なリスク評価に関する概念図

囲内にあるので、構造物の振動卓越周期 T'_s はおおむね降伏周期 T_s に等しくなります。また、構造物天端の最大加速度PSAが降伏加速度 $k_{hv} * g$ に達すると、構造物天端の加速度が頭打ちになるとともに、構造物が塑性化することで振動卓越周期 T'_s が伸びることになります。これらを模式的に表すと図7のようになります。さらに、図6より、構造物の応答と車両脱線限界（図6における脱線／非脱線の境目）の関係を見ると、多少の誤差はあるものの、構造物天端の最大速度PSVで100～150kine程度を境にして、脱線／非脱線を判定することが可能であることが分かります。

これらのことより、図5に示した構造物の被害推定ノモグラムから構造物の応答塑性率 μ が得られたとすると、構造物の降伏後も含めた、地震動に対する脱線の判定（図8：以下、「車両の脱線判定ノモグラム」と呼びます）が可能となります。

地震時の被害を推定する具体的な方法を下記に示します（図9）。

- (1) 地震ハザード解析などにより、地表面の最大加速度PGA、最大速度PGVを予測します。また、公的機関から発表されている面的情報、例えば地震調査研究推進本部の地震動予測地図などを利用することも可能です。
- (2) 地表面地震動のPGAおよびPGVより地震動の卓越周期 T を $T = 2\pi (PGV/PGA)$ より算定します。
- (3) 構造物の被害推定ノモグラムを用いて、構造物の応答塑性率 μ を算定します。
- (4) 構造物の振動卓越周期 T'_s と構造物天端における最大

加速度PSAを算定します（図7）。

- (5) 車両の脱線判定ノモグラムに構造物の振動卓越周期 T'_s と構造物天端の最大加速度PSAをプロットして、脱線の危険性を判定します。

本手法による被害想定に必要な情報は、地震ハザードに関しては最大加速度PGAと最大速度PGVの2つのみです。また、構造物に関しては降伏震度 k_{hv} と降伏周期 T_s のみになります。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関連した指標を用いて統一的に評価できる点が本手法の利点です。

謝辞

本検討を行うにあたり、防災科学技術研究所のK-NET、KiK-net、および気象庁の強震動記録を使用しました。ここに記して感謝します。RRR

文献

- 1) 地震ハザードステーションホームページ：<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 2) 室野剛隆、芦谷公稔：早期被害予測のための鉄道構造物の地震被害ランク推定法の開発、鉄道総研報告、Vol.16, No.8, pp.7-12, 2002.8
- 3) 野上雄太、室野剛隆、宮本岳史、佐藤勉：地震時の広域な構造物被害および走行安全性に関する簡易推定法、鉄道総研報告、Vol.22, No.10, pp.29-34, 2008.10