

鉄道路線の地震時安全性の簡易評価法の提案と適用例

構造物技術研究部 耐震構造研究室
室長 室野剛隆

1. はじめに

鉄道路線全体の安全性を向上させるためには、地震に対する被害の有無やその規模を予測し、それに応じた対策を施さなければならない。ただし、鉄道の場合には、(1) 広域に線状・面状に路線が敷設されており、検討対象範囲が広い、(2) 地震時には、構造安全性以外に、列車の走行安全性が求められる、という特徴がある。そこで、本研究では、これらの背景に鑑みて、広域な鉄道路線全体の地震時安全性に関する概略評価(危険箇所のスクリーニング)を目的に、構造物の損傷及び車両の走行安全性を統一的な指標で評価するための簡易な予測手法を提案する。

2. 構造物被害および車両の走行安全の推定法¹⁾

(1) 構造物の被害推定

一般的な鉄道橋脚や高架橋は比較的単純な構造であり、その動的挙動は1自由度系で表現できることが多い。そこで、構造物をバイリニア型の非線形復元力特性を有する1自由度系モデルで表現し、様々な構造物特性(降伏震度 K_{hy} および等価固有周期 T_s)を有する構造物に対して、複数の地震記録を振幅調整して入力した。その結果、検討ケースは30,000以上に及ぶ。

まず、構造物の応答特性を横軸に構造物の振動卓越周期 T_s' を縦軸に構造物天端の応答加速度の最大値 PSA をとって図化した(図1)。この例は、降伏震度 $K_{hy}=0.4$ 、等価固有周期 $T_s=0.6$ 秒の構造物に、兵庫県南部地震で観測された地震動群を入力した結果である。この図から、

- (a) 構造物天端の最大応答加速度が降伏加速度以下の場合には、構造物の応答は弾性範囲なので、振動卓越周期 T_s' は概ね降伏周期 T_s で振動する
- (b) 構造物天端の最大応答加速度が降伏加速度に達すると、応答加速度は頭打ちになるとともに、塑性化することにより振動卓越周期 T_s' が伸びる

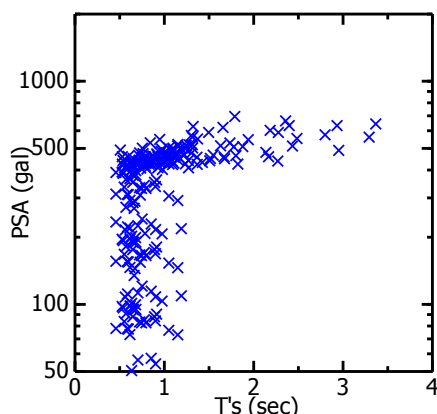


図1 構造物の地震応答解析結果の例

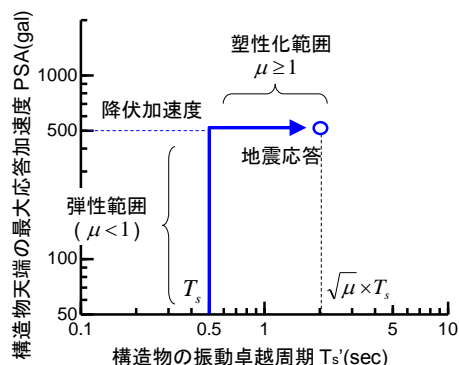


図2 構造物の振動卓越周期と構造物天端の最大応答加速度の関係概念図

ことが分かった。これを模式的に示すと図2になる。

次に、全解析ケースに対して地震動指標と構造物の被害ランクの関係について整理した。図3は、横軸に地震動卓越周期 T を構造物の降伏周期 T_s で正規化した正規化周期、縦軸に地動最大加速度 PGA を構造物の降伏加速度 $K_{hy} * g$ (g は重力加速度)で正規化した正規化加速度をとっている。ここで被害ランクは応答塑性率 μ で分類している(本研究では、 μ が1以下:無被害、1~2:小被害、2~4:中被害、4以上:大被害)。図3から、各被害ランクの境界線が非常に明確に現れているのが分かる。そこで、各被害ランクが発生する「下限値」を包絡すると、式(1)で表現される。

$$y = c \times e^{-ax} + d \times \{-e^{-bx} + 1\} \quad (1)$$

ここに、 y が正規化加速度、 x が正規化周期、 $a \sim d$ はパラメータである(紙面の都合上省略)。これを表すと図4のようになり、これを「被害推定ノモグラム」と呼ぶ。下限値を包絡しているので、被害を過度に大きく見積もる可能性があり、実際には非超過確率70%程度になるように設定するのがよい¹⁾。

図4に示す被害推定曲線ノモグラムを見ると、 $T/T_s=1$ 付近で、被害ランクの境界線が最小値をとる。これは、入力地震と構造物が共振すると、小さい地震動に対してでも構造物の応答が増幅し、容易に損傷することを表している。 $T/T_s < 1$ の領域では、ある傾きで境界線が表現されている。これは、入力に対して構造物が長周期の場合は、地動最大加速度 PGA ではなく地動最大速度 PGV が支配的であることを示している。一方、 $T/T_s > 1$ の領域では境界線は一定値に収束する傾向があるが、これは入力に対して構造物が短周期の場合は、 PGA が支配的であることを示している。また、被害ランクが進むと、構造物が塑性化する影響で周期が延伸し減衰が増大するので、被害推定曲線の全体的な形状が右上に移動するとともに、形状が滑らかになっている。

(2) 車両の走行安全性の推定法

地震時の車両の走行シミュレーションプログラムVDS²⁾を用いて、地震時の高架橋上の車両の挙動を評価した一例を図5に示す¹⁾。対象とした車両は、「構造物等設計標準(変位制限)」の検討で用いたものと同型の車両である。図5の縦軸は構造物天端の応答加速度の最大値 PSA 、横軸は構造物の応答振動の卓越周期 T'_s を表わしており、多少の誤差はあるものの、概ねある PSV (例では100 cm/sec)を境にして、走行安全性を判定することが可能であることが分かる。ここで、構造物の振動卓越周期 T'_s は、一般にはフーリエスペクトルにより求めるのが良いが、ここでは、実際の被害予測に使うことを念頭に、 PSV と PSA から近似的に式(2)で求めた。

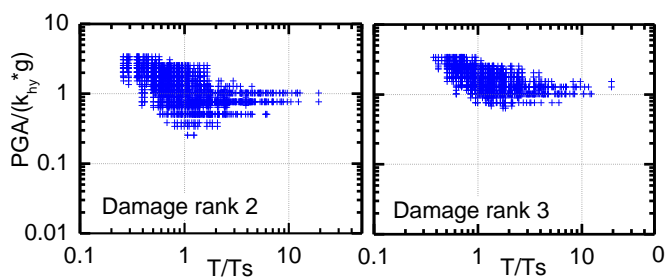


図3 正規化 T/T_s -正規化 $PGA/k_{hy} * g$ の関係図

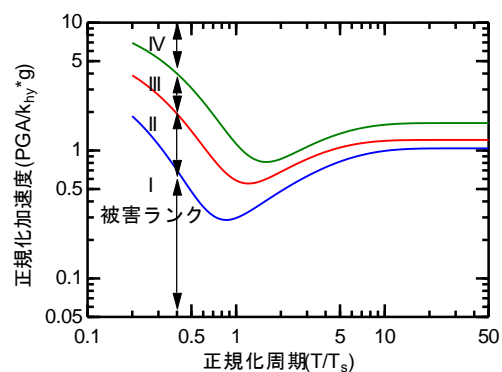


図4 構造物の被害推定ノモグラム

$$T'_s = 2\pi(PSV/PSA) \quad (2)$$

図5に構造物の応答特性(図2)を重ねると図6のようになる。図6の限界速度線より上方に構造物の応答がプロットされると脱線の危険度が高いことを表す。構造物の応答が走行安全限界を脅かすものであるかどうか推定できることから、図6を「走行安全性推定ノモグラム」と呼ぶ。

(3) 被害推定方法の適用方法

提案手法の具体的な適用方法を下記に示す(図7)。地動最大速度 PGV 、地動最大加速度 PGA を予測すれば、構造物情報として構造物の降伏周期 T_s 、降伏震度 K_{hy} を用いることで、「構造物の被害推定ノモグラム」を用いて、構造物の損傷レベル(応答塑性率 μ) が算定できる。次に、応答塑性率に応じて、構造物の振動卓越周期 T'_s と構造物天端の応答加速度の最大値 PSA を算定し、「走行安全性推定ノモグラム」にプロットすると、脱線の危険性を判定できる。

本手法では、被害想定に必要な情報は、地震に関しては地動最大加速度 PGA と地動最大速度 PGV 、構造物に関しては降伏震度 K_{hy} と等価固有周期 T_s のみである。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、お互い関連した指標を用いて連続的に評価できる点が利点である。

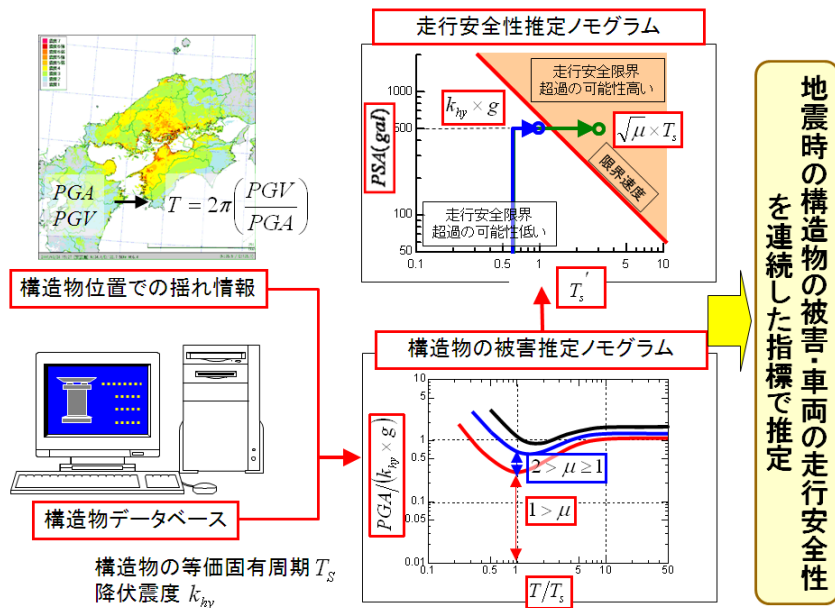


図7 構造物および走行車両の被害推定法に関する概念図

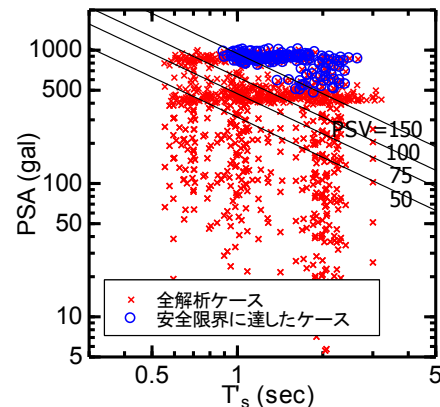


図5 車両挙動シミュレーション結果の例

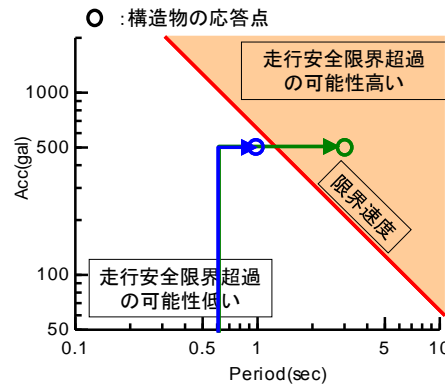


図6 走行安全性推定ノモグラムの概念図 (限界速度は車両型式が異なれば変化)

3. 新潟県中越地震への適用

2004年10月23日に発生した新潟県中越地震では、上越新幹線浦佐～長岡駅間の滝谷トンネルを出て高架橋上を速度200km/hで新潟に向けて走行中の「とき325号」が脱線した³⁾。地震後の脱線痕などの調査結果から、脱線地点付近の橋梁・高架橋などの土木構造物にはほとんど損傷がないことも確認されている³⁾。そこで、今回提案した手法により、この状況を評価できるかどうか検証した。鉄道総研が行った詳細な解析結果⁴⁾では、十日町R3～R5高架橋では地動最大加速度PGAは約380～390gal、地動最大速度PGVは概ね70kine、構造物の降伏震度 K_{hy} は0.6～0.75程度、等価固有周期 T_s は0.5～0.7秒であることが分かっている。なお、車両は2章で検討した車両とは異なる。そこで、これらの情報を用いてノモグラム上に値をプロットすると、図8のようになる。構造物の応答は、限界速度付近であり、構造物は損傷をしないで、車両が脱線する可能性があったと判定され、実被害と整合したものとなる。実際には構造物間に角折れが生じており、それによる影響を考慮していない点や非常に少ないパラメータで評価している点を考慮すれば、提案した手法は十分な適用性があると考えている。

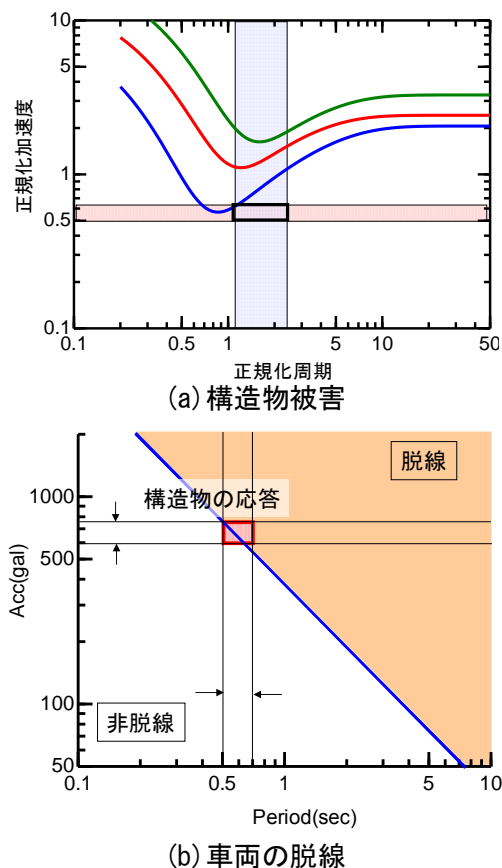


図8 新潟県中越地震への提案法の適用

4. まとめ

本研究では、広域な鉄道システムの地震時安全性に関する概略推定を目的に、構造物の損傷、及び車両の走行安全性を統一的な指標で評価するための簡易な予測手法を提案した。また、提案した有効性を検証するために、新潟県中越地震に本手法を適用して、構造物被害および車両の走行性について評価した。その結果、概略判定としては十分な精度で、被害の発生を予測できることが分かった。今後は、実被害データの蓄積や、データの収集方法などを行い、適用性を高めていく必要がある。

参考文献

- 1) 室野剛隆, 野上雄太, 宮本岳文: 簡易な指標を用いた構造物および走行車両の地震被害予測法の提案, 土木学会論文集A, Vol. 66, No. 3, pp. 535-546, 2010.
- 2) 宮本岳史, 石田弘明, 松尾雅樹: 地震時の鉄道車両の挙動解析—上下, 左右に振動する軌道上の車両運動シミュレーション—, 日本機械学会論文集C編, Vol.64, No.626, pp.236-243, 1998.10.
- 3) 航空・鉄道事故調査委員会: 鉄道事故調査報告書, 東日本旅客鉄道株式会社上越新幹線浦佐駅～長岡駅間 列車脱線事故 (RA2007-8), 2007.11.
- 4) 地震による新幹線脱線シミュレーション解析グループ: 新潟県中越地震新幹線脱線シミュレーション解析, 鉄道総研報告特別第52号, 2008.12.