

地震時の構造物および車両走行性に関する広域な被害推定法

(財)鉄道総合技術研究所 ○野上 雄太, 室野 剛隆, 宮本 岳史

1. はじめに

想定される地震に対して、鉄道システムの安全性を確保するには、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す必要がある。しかし、鉄道は広域に線状・面状に路線が敷設されており、検討対象範囲が広いこと、地震時に要求される性能としては、構造安全性の他に走行安全性が求められることが特徴であり、このことを考慮しなければならない。そこで、本研究では、路線全体の広域な被害程度の概略をマクロに予測することを目的とし、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. 検討方法

本研究では、入力地震動や構造物特性を仮定した数値解析により構造物の応答値を算定し、その結果を基に地震動指標と構造物の被害レベルとの関係を述べる。さらに、地震時の車両走行安全性の検討では、構造物天端の応答波形を車両への入力波と考え、地震時の車両挙動解析を行ない、脱線するか否かを判定して地震時の車両走行安全性を評価した。以下に、解析条件を示す。

(1)地震波条件

検討に用いた地震動を表1に示す。既往の観測記録から、卓越周期が0.2秒～4秒程度をカバーするよう選定した。なお、解析では、最大加速度を100～1000galまで振幅調整した。ただし、地震時車両挙動解析の検討では、表1から重要な周期帯域が卓越する代表的な地震動(兵庫県南部地震と釧路沖地震)にケースを絞り込んだ。

(2)構造物条件

構造物の解析モデルは、非線形復元力特性としてClough modelを有する1自由度系でモデル化した。必要なパラメータは、降伏震度 k_{hy} 、降伏周期 T_s (原点と降伏点を結ぶ割線剛性に対応した周期)および減衰定数 h である。各パラメータは既設構造物の調査等を踏まえて、表2のように設定した。構造物の被害程度は、表3に示すように、応答塑性率 $m = d_{max}/d_y$ (d_{max} :構造物の最大応答変位、 d_y :構造物全体としての降伏変位)を用いて整理した。一般的なRC橋脚や高架橋を想定した場合、被害ランクは無被害、ランクⅠ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Ⅱ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している。

(3)車両条件

車両の走行安全性は、地震時の車両運動シミュレーションプログラム(VDS)¹⁾を用いて検討した。モデルの詳細は文献1)を参照されたい。なお、本解析では車輪・レール相対左右変位が70mmに達したときを脱線と判定した。

3. 解析結果

(1)構造物の解析結果

構造物の地震応答解析結果の一例を図1に示す。図1は、構造物天端の最大応答加速度PSAと構造物の応答振動の卓越周期 T'_s の関係を示している。なお、応答の振動卓越周期 T'_s は、被害予測に利用することを念頭に、近似的に式(1)で求めた。

$$T'_s = 2\pi(P_{SV}/PSA) \quad (1)$$

ここに、PSAは構造物天端の最大絶対加速度、PGVは最大絶対速度である。

表1 解析に用いた地震動

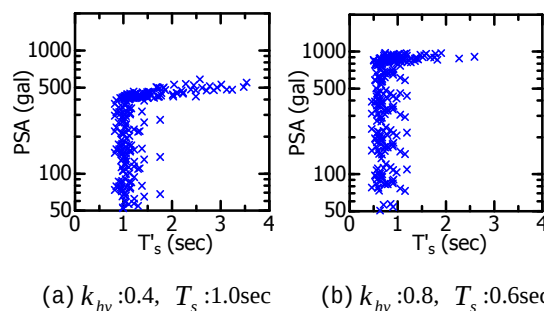
地震	用いた記録数
釧路沖地震(1993)	36
北海道南西沖地震(1993)	10
北海道東方沖地震(1994)	10
三陸はるか沖地震(1994)	26
兵庫県南部地震(1995)	32
台湾集集地震(1999)	54
鳥取県西部地震(2000)	48

表2 構造物モデルの諸元

パラメータ	値
降伏周期 T_s (s)	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 2.0
降伏震度 k_{hy}	0.3, 0.4, 0.8
復元力モデル	Clough model
減衰定数 h	$h=0.04/T$

表3 被害ランクと塑性率の関係

被害 ランク	RankI (無被害)	RankII (小被害)	RankIII (中被害)	RankIV (大被害)
塑性率	$\mu < 1$	$1 \leq \mu < 2$	$2 \leq \mu < 4$	$\mu \geq 4$

(a) $k_{hy}:0.4, T_s:1.0\text{sec}$ (b) $k_{hy}:0.8, T_s:0.6\text{sec}$ 図1 構造物の解析結果例(T'_s とPSAの関係)

キーワード 被害予測, 構造物被害, 車両脱線

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 耐震構造 TEL042-573-7394

図1より,PSAが降伏加速度(降伏震度 $k_{hy} \times$ 重力加速度 g) 以下の場合,構造物の応答は弾性範囲であり,振動卓越周期 T'_s は概ね降伏周期 T_s に等しい. PSAが降伏加速度に達すると,応答加速度は頭打ちとなり,塑性化する事で構造物の卓越周期 T'_s が伸びることが分かる.これらの結果を模式的に表したのが図2である.なお,構造物の変形には様々な損傷に対する限界値 m_{lim} (終局限界)が存在する.例えば表3がそれに相当する.降伏後の割線剛性 K' は,応答塑性率 m を用いて $K' = K/m$ となる.よって,降伏後の振動卓越周期 T'_s は式(2)で求められると考えられる.

$$T'_s = \sqrt{m} \times T_s \quad (2)$$

式(2)で推定した卓越周期と,動的解析から得られた卓越周期の関係をプロットしたのが図3である.両者の関係は,ほぼ 1:1 の関係にあり,式(2)の適用性は高いことが確認できる.

さて,地震動指標と構造物被害との関係については,著者の一人が本研究と同条件で検討し,図4に示す被害推定曲線を提案している²⁾.よって,構造物の被害推定には図4を適用する.これは,地表面最大加速度 PGA , 卓越周期 T 及び構造物の降伏震度 k_{hy} , 降伏周期 T_s を用いて図4にプロットすることで塑性率が得られ,表3に示す被害との関係を把握できるものである.卓越周期 T は後述するように地表面最大加速度 PGA , 最大速度 PGV より算出する.なお,図4は被害ランクの境界線のみ描いているが,実際には細分化した塑性率の線が設定可能である.

(2)車両の解析結果

脱線限界と構造物の応答の関係の一例を図5に示す.この図は,全ケースを×印で示し,そのうち脱線した場合を○印で示している.図中には絶対速度一定の線も示している.多少の誤差はあるものの,概ね $PGV=100 \sim 150$ kine 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る.具体的には,例えば, $PGV=110$ (kine)と設定すれば,脱線するケースを非超過確率90%以上で判定できる.

4. 鉄道システムの被害推定法の提案

以上の検討より,鉄道路線全体の地震時における構造物被害及び車両走行安全性を下記の手順で推定できる.

地震ハザード解析等により,地表面最大加速度 PGA , 最大速度 PGV を予測する.なお,他機関の成果を利用することも可能である.

地表面地震動の PGA 及び PGV より地震動の卓越周期 T を次式により算定する. $T = 2p(PGV/PGA)$

図4で示した構造物の被害推定曲線を用いて,構造物の損傷レベル(応答塑性率 m) を算定する.

構造物の振動卓越周期 T'_s を式(2)により算定する.

$m < 1$ $T'_s = T_s$ (弾性範囲), $m \geq 1$ $T'_s = \sqrt{m} \times T_s$ (塑性範囲)

応答加速度 PSA を算定する.

$m < 1$ $PSA = m \times k_{hy} \times g$ (弾性範囲), $m \geq 1$ $PSA = k_{hy} \times g$ (塑性範囲)

図6に示す車両の脱線推定ノモグラムに構造物の振動卓越周期 T'_s と応答加速度 PSA をプロットして,脱線の危険性を判定する.

5. まとめ

鉄道路線全体の地震時における構造物及び車両の脱線に関する被害の概略をマクロに予測することを目的とし,簡易かつ互いに連続性のある4つの指標により判定する手法を開発した.

参考文献

- 1) 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
- 2) 室野剛隆, 芦谷公稔: 地震時の車両挙動解明と地震防災への適用(その1) - 構造物の被害推定ノモグラムの提案 -, 第14回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.213-216, 2007

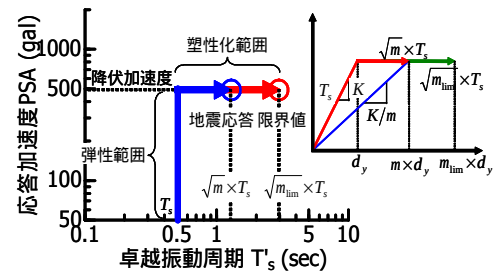


図2 T'_s と PSA の関係の模式図

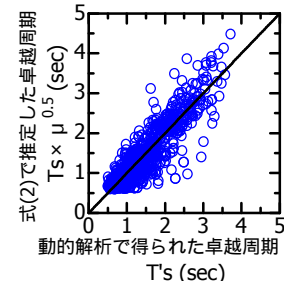


図3 T'_s と T_s との関係

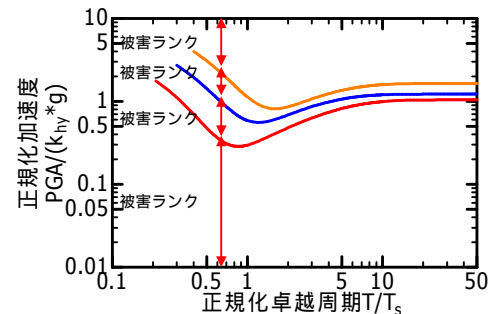
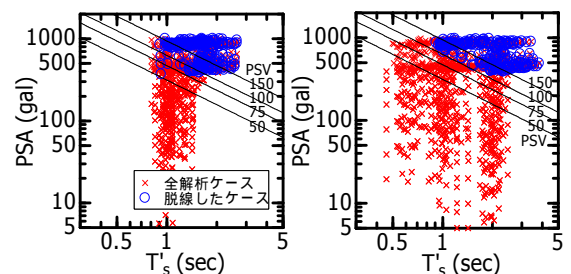


図4 構造物の被害推定曲線



(a)兵庫県南部地震 (b)釧路沖地震
図5 構造物の応答と脱線/非脱線の関係

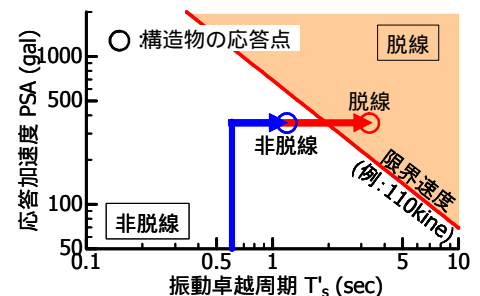


図6 車両の脱線推定法