

地震時の広域な構造物被害および 走行安全に関する簡易推定法

野上 雄太* 室野 剛隆*
宮本 岳史** 佐藤 勉*

Methodology to Predict Structure Damage and Vehicle Running Safety due to Earthquake

Yuta NOGAMI Yoshitaka MURONO
Takefumi MIYAMOTO Tsutomu SATO

In order to ensure the seismic safety of railway system, it is important to consider the following points. First, we have to investigate the safety of the railway, which spreads extensively. Second, we should consider not only the safety of structures but also the vehicle running safety as seismic required performance. In this study, we have developed the methodology to predict the seismic damage of railway structures and the seismic running safety of the railway vehicle using only four parameters, which are peak ground acceleration, peak ground velocity, yield strength, and equivalent natural period.

キーワード：被害予測，構造物被害推定ノモグラム，脱線危険度判定ノモグラム

1. はじめに

近年，我が国は地震活動期に入ったとされ，今後想定される地震に対して，鉄道の安全性をいかに確保するかが極めて重要な課題となっている。想定される地震に対して，鉄道システム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，鉄道には，

- (i) 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
- (ii) 地震時に要求される性能としては，構造安全性以外に，走行安全性が求められる

という特徴があり，このことを考慮する必要がある。そのためには，まず，地域全体，路線全体の広域な被害程度の概略をマクロに予測し，その中から特に危険な箇所に対して個別に対応するといった2段階の予測法が望ましいと考えられる。

そこで，本研究では，前者に着目し，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，構造物の損傷及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簡易な予測手法を提案する。

2. 検討方法

本来であれば観測記録や過去の震災データに基づく検討が望ましいが，様々な地震特性や構造特性に対応した検討を行うだけの被害データの蓄積が無いのが現状である。そこで，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応答や被害レベルの関係を述べる。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。検討の流れのイメージを図1に示す。

(1) 検討に用いた地震動

検討に用いた地震動を表1に示す。これらは既往の観測記録の中から，卓越周期が0.2秒～4秒程度までをカバーするように選定した。なお，解析では，幅広い振幅での検討を行うために，全ての地震動について最大加速度を100～1000galまで振幅調整した波形を用いた。ただし，地震時の車両挙動解析の検討では，表1の中から重要な周期帯域が卓越する代表的な2つの地震動（兵庫県南部地震と釧路沖地震）に検討ケースを絞り込んだ。

(2) 構造物条件

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¹⁾。そこで，構造物の解析モデルは，図2に示すような非線

* 構造物技術研究部（耐震構造）

** 鉄道力学研究部（車両力学）

特集：構造物技術

表1 検討に用いた地震動

| 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_v (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 | $h=0.04/T_v$ |

表3 被害ランクと塑性率の関係

| 被害ランク | ランク I (無被害) | ランク II (小被害) | ランク III (中被害) | ランク IV (大被害) |
|-------|-------------|------------------|------------------|--------------|
| 塑性率 | $\mu < 1$ | $1 \leq \mu < 2$ | $2 \leq \mu < 4$ | $4 \leq \mu$ |

復元力特性を有する1自由度系でモデル化することとした。必要なパラメータは、降伏震度 k_{hy} 、降伏周期 T_v (原点と降伏点を結ぶ割線剛性に対応した周期で、耐震標準²⁾では等価固有周期と呼んでいる)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や現行の耐震標準を踏まえて、構造物の条件を設定した。表2に設定した降伏震度、降伏周期などの構造物モデルの諸元を示す。構造物の被害程度は、表3に示すように、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している。なお、ここで言う塑性率は部材単位の塑性率ではなく、構造系全体としての塑性率である。

(3) 車両条件

地震時の車両運動シミュレーションプログラム(VDS)³⁾を用いて、構造物上の車両挙動について解析した。検討対象の車両は新幹線とした。これはボルスタレス台車を採用した車両であり、1車両モデルの場合は図3に示すような1車体、2台車、4輪軸の合計7個の剛体を結合した車両モデルとした。運動の自由度は、車体、台車、輪軸が各々6自由度、8個の車輪を支える各レールが上下・左右の2自由度で、合計58自由度となっている。

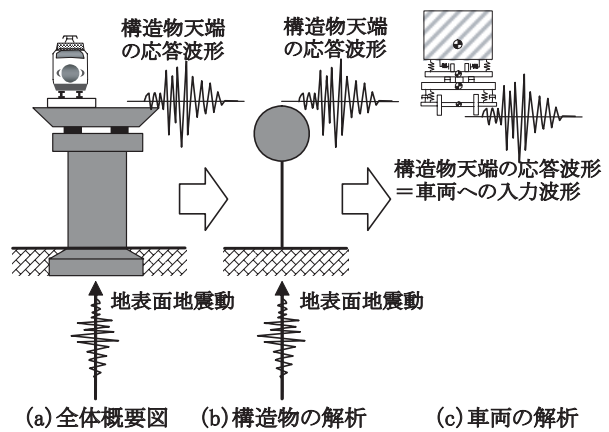


図1 解析的検討の流れ

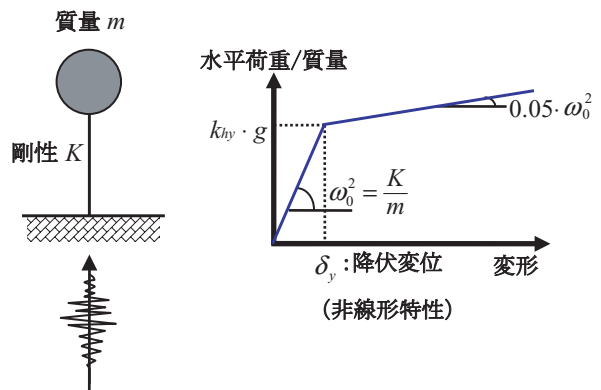


図2 構造物の解析モデル

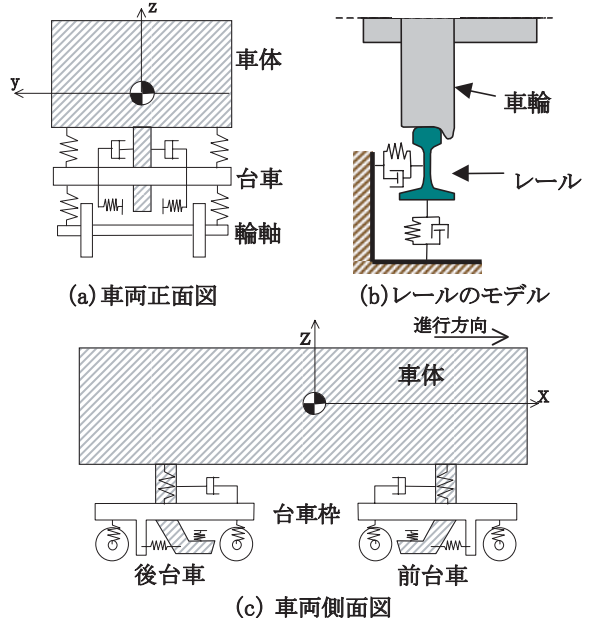


図3 車両・レールの解析モデル

ルが上下・左右の2自由度で、合計58自由度となっている。構造物天端での絶対変位波形をスラブ軌道の振動変位と考えるとレール下に入力する。本検討では車両の挙動に大きな影響を及ぼす水平方向の振動成分のみを扱い、全ての振動は車両進行方向に対して直角方向(左右方

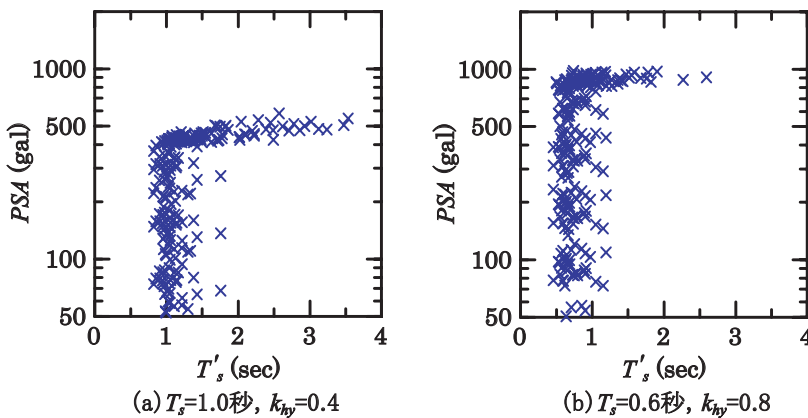


図4 構造物の解析結果例 (PSAと T'_s の関係)

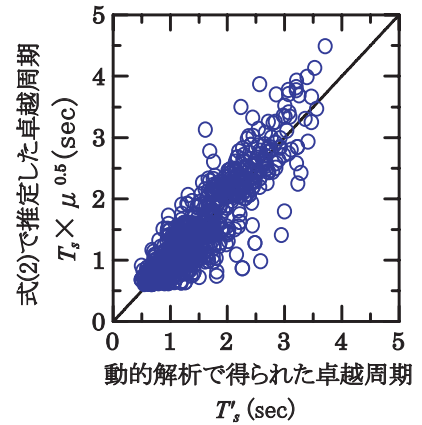


図5 T'_s と T_s との関係

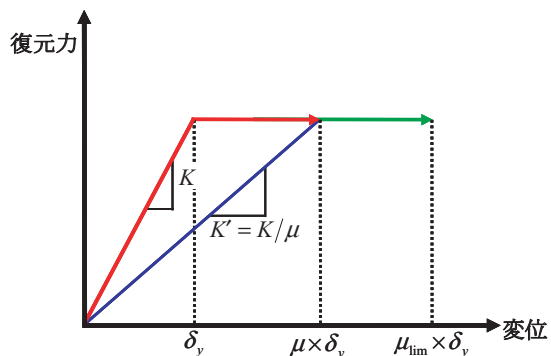
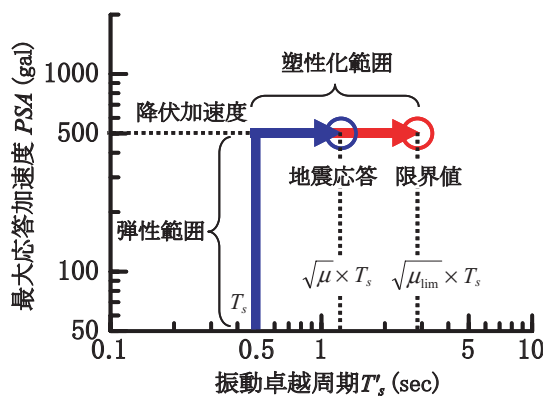


図6 振動卓越周期と構造物天端の最大応答加速度の関係概念図

向)に入力し、地震波に対する車両運動の時刻歴解析を実行した。なお、解析条件は新幹線車両モデルが直線軌道を一定速度で走行するという変位制限標準⁴⁾で使用した条件と同じとした。また、本解析では車輪・レールの左右相対変位が70mmに達したときを脱線と判定した⁴⁾。

3. 解析結果

3.1 構造物の解析結果

構造物の地震応答解析の結果の一例を図4に示す。図4は、構造物天端の応答加速度の最大値 (PSA) と構造物の応答振動の卓越周期 (T'_s) の関係をプロットしたものである。応答の卓越周期 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、近似的に式(1)で求めた。

$$T'_s = 2\pi(PSV/PSA) \quad (1)$$

ここに、PSAは構造物天端の絶対加速度の最大値 (peak structure acceleration)、PSVは絶対速度の最大値 (peak structure velocity)である。図4より以下のことが分かる。(a) 構造物天端の最大応答加速度 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内なので、振動卓越周期 T'_s は概

ね降伏周期 T_s に等しい。

(b) 構造物天端の最大応答加速度 PSA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って構造物の振動卓越周期 T'_s が延びる。

これらの結果を模式的に表したのが図6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 μ_{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 μ を用いて $K' = K/\mu$ 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。式(2)を用いて推定した構造物天端の振動卓越周期と、動的解析から得られた振動卓越周期を比較したものを図5に示す。この図は、降伏後の振動卓越周期を比較するために、応答塑性率 μ が1より大きいケースのみを示している。両者の関係はほぼ1:1の線形関係にあり、式(2)の適用性は高いことが確認できる。

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

3.2 車両の解析結果

3.1で解析した構造物天端の応答波形をレール下面への入力波形と考え、車両運動シミュレーションプログラム (VDS)を用いた解析を行った。解析結果として脱線限界と構造物の応答の関係を図7に示す。これらの図は、

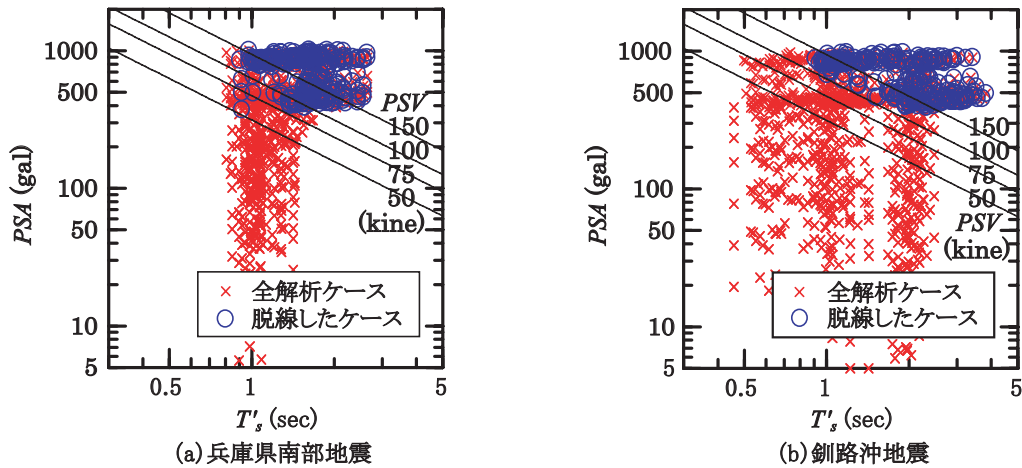


図7 脱線限界と構造物の応答との関係

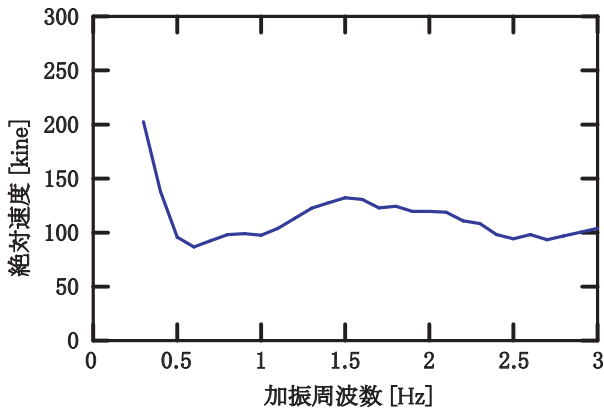


図8 正弦波加振による脱線限界曲線

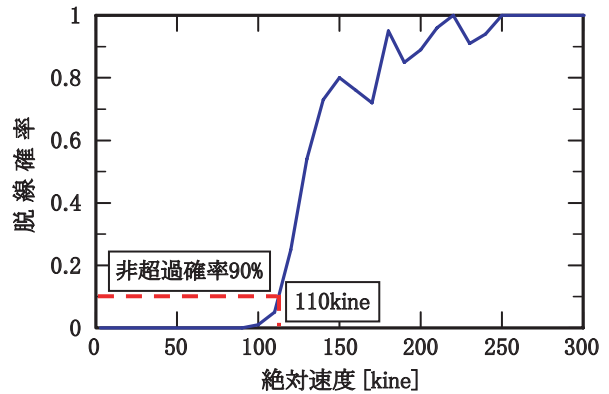


図9 脱線に対する fragility 曲線

検討した構造物諸元の全ケースを×印で示し、そのうち脱線した場合を○印で示しており、地震毎に整理したものである。図中には絶対速度 PSV 一定の直線も記入している。これらの図より、多少の誤差はあるものの、概ね構造物天端の最大速度 PSV が $100 \sim 150$ kine を境界にして、脱線および非脱線を判定することが可能であることが分かる。これは、変位制限標準による正弦波加振の条件で得られる脱線限界曲線の速度表示 (図8) に示す下限値と概ね整合しており、正弦波加振により作成された脱線限界図が地震波による加振にも適用できることを示唆している。

さて、脱線限界の絶対速度として、どの程度の値にするか、その判断は難しいところであるが、ここでは、その判断基準の1つになるように、図9に脱線に対する fragility 曲線を示す。この曲線は、図7で示した全検討ケースより、 PSV 毎に脱線するケースの割合を求めたものである。例えば、安全側の評価をするという観点から、 PSV を約 110 kine に設定すると、脱線するケースを非超過確率 90% 以上で判定できることになる。実際の限界値の設定においては、様々な条件を勘案しながら、図9の fragility 曲線を用いて設定すればよい。なお、この fragility 曲線は、変位制限標準による車両条件で解析し

た結果である。車両条件が変われば、脱線限界が異なり、図9とは異なる fragility 曲線が得られることになる。

4. 被害推定法

4.1 構造物の被害推定

構造物の被害推定については、著者の一人が本研究と同条件で解析的検討を行っており、図10に示す構造物の「被害推定ノモグラム」を提案している⁵⁾。よって、構造物の被害推定にはこのノモグラムを適用する。このノモグラムは、地表面地震動の最大加速度 PGA 、卓越周期 T 及び構造物の降伏震度 k_{hp} 、降伏周期 T_s が分かっているとき、これらの値を用いて図10にプロットすることで、想定される地震に対する対象構造物の応答塑性率 μ が得られるものである。この応答塑性率 μ と表3に示す被害ランクとの関係を比較することで構造物の被害程度を推定できる。ここで、地表面地震動の卓越周期 T は式(3)に示すように地表面最大加速度 PGA (peak ground acceleration)、最大速度 PGV (peak ground velocity) より算出する。

$$T = 2\pi(PGV/PGA) \quad (3)$$

なお、図10は表3に示す被害ランクの下限値の境界線

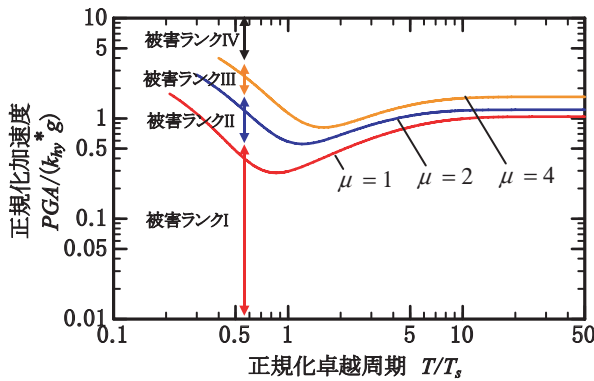


図10 構造物の被害推定ノモグラム

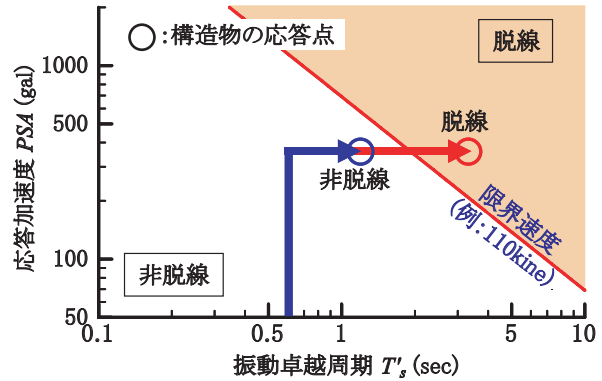


図11 脱線危険度判定ノモグラム

表4 式(4)の各パラメータ(下限値の境界線)

| | a | b | c | d |
|-----------|------|------|------|------|
| 被害ランク II | 5.65 | 0.31 | 5.55 | 1.04 |
| 被害ランク III | 3.83 | 0.41 | 8.13 | 1.22 |
| 被害ランク IV | 2.95 | 0.35 | 12.3 | 1.64 |

のみが描かれており、式(4)で定式化されている。しかし、実際には細分化した塑性率の推定曲線が設定可能である。

$$y = c \times e^{-ax} + d \times \{-e^{(-bx)} + 1\} \quad (4)$$

ここに、 y は正規化加速度 $PGA/(k_{hy} \cdot g)$ 、 x は正規化卓越周期 T/T_s 、 $a \sim d$ は表4に示す境界線毎のパラメータである。

4.2 車両の走行安全性の推定

構造物上を走行する車両の走行安全性は、図6および図7の関係を考慮することで評価できる。概念図(以降、「脱線危険度判定ノモグラム」と呼ぶ。)を図11に示す。車両の脱線限界の絶対速度を図9を参考にして例えば110kineとすると、図中の網掛け部が脱線と判定される領域である。次に、構造物の振動卓越周期 T'_s と最大応答加速度 PSA を求める。具体的には、以下のように算出できる。

- ① 構造物の振動卓越周期 T'_s の算定
 - ・ 塑性率 μ が $\mu < 1$ ならば、
 $T'_s = T_s$ (弾性範囲)
 - ・ 塑性率 μ が $\mu \geq 1$ ならば、
 $T'_s = \sqrt{\mu} \times T_s$ (塑性範囲)
- ② 最大応答加速度 PSA の算定
 - ・ 塑性率 μ が $\mu < 1$ ならば、
 $PSA = \mu \times k_{hy} \times g$ (弾性範囲)
 - ・ 塑性率 μ が $\mu \geq 1$ ならば、
 $PSA = k_{hy} \times g$ (塑性範囲)

求めた構造物の振動卓越周期 T'_s と最大応答加速度 PSA を図11にプロットし、設定した脱線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脱線判定、つまり地震時の車両走行安全性の評価が可能となる。

4.3 被害推定法の統合化

4.1, 4.2で個々に述べた推定法は、式(5)、式(6)中において、図10に示した構造物の「被害推定ノモグラム」から得られた応答塑性率 μ を用いることで、応答塑性率 μ を介して、構造物被害と車両走行安全性を連続的に評価できる。構造物の被害および車両の走行安全性を連続的に推定する具体的な方法を、下記に示す。また、全体フローを図12に示す。

- 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 を予測する。ここで、例えば地震調査研究推進本部⁶⁾により公開されている地震動予測地図など他機関の成果を利用することも可能である。
- ② 地表面地震動の PGA および PGV より地震動の卓越周期 T を式(3)により算定する。
- ③ 構造物のデータベースなどによって得られる、対象とする構造物の降伏震度 k_{hy} および降伏周期 T_s と上記①、②で算定した地表面最大加速度 PGA 、卓越周期 T を用いて、図10に示した構造物の「被害推定ノモグラム」から構造物の損傷レベル(応答塑性率 μ)を算定する。
- ④ 上記③で算定した応答塑性率 μ を用いて、構造物の振動卓越周期 T'_s を式(5)により算定する。
- ⑤ 上記③で算定した応答塑性率 μ を用いて、最大応答加速度 PSA を式(6)により算定する。
- ⑥ 図11に示す車両の「脱線危険度判定ノモグラム」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。

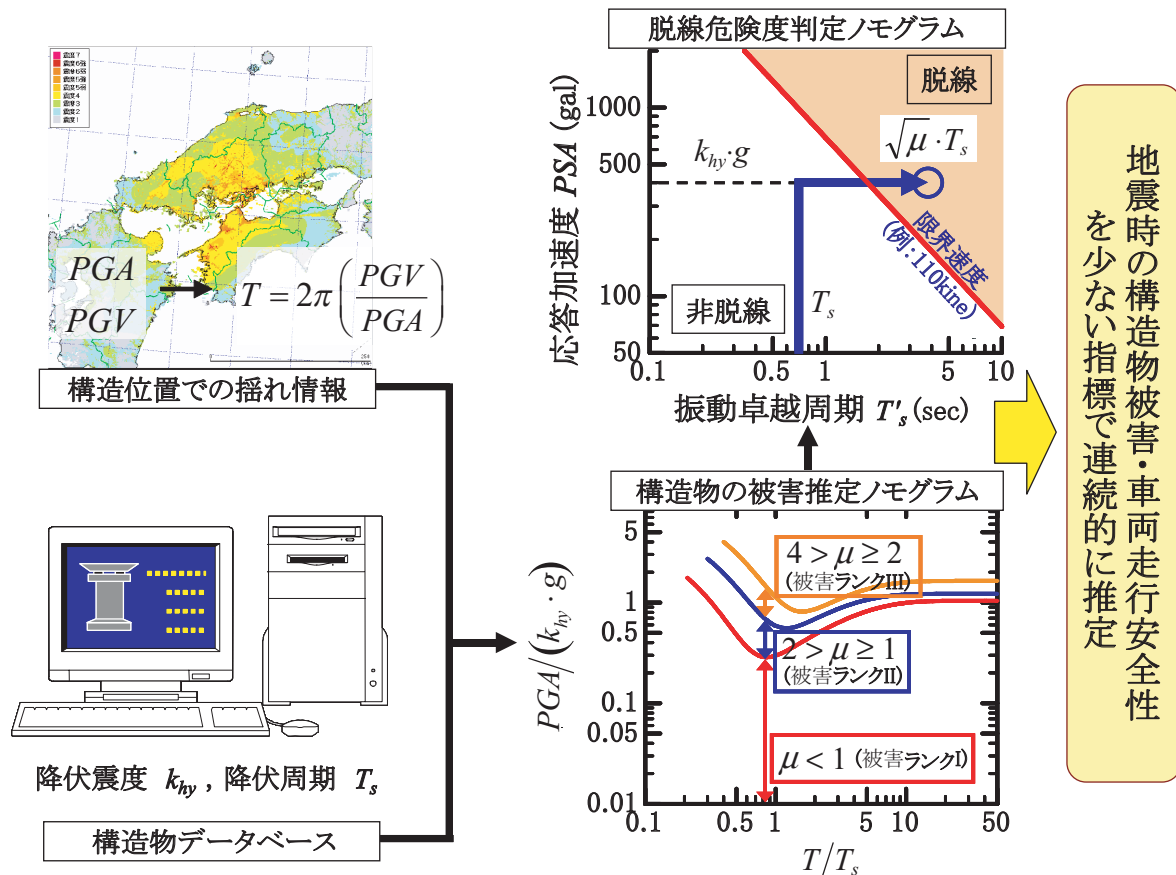


図 12 提案手法の具体的な適用方法の全体フロー

本手法では、被害想定に必要な情報は、地震ハザードに関しては、地表面地震動の最大加速度 PGA と最大速度 PGV の2つのみである。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、構造物の応答塑性率 μ 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ある。

5. 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スクリーニングを目的として、想定される地震動に対して構造物の損傷および車両の走行安全性を統一的な指標を用いて連続的に評価するための簡易な予測手法を提案した。

具体的には、想定地震の PGA , PGV , 構造物の降伏周期 T_s , 降伏震度 k_{hy} の4つの指標を用いることで、地震時の構造物被害および車両走行安全性を連続的に評価できる手法である。

謝 辞

本検討を行うに当たり、防災科学技術研究所の K-NET, および気象庁の強震動記録を使用させていただきました。記して謝意を表します。

文 献

- 1) 室野剛隆, 佐藤勉: 構造物の損傷過程を考慮した非線形応答スペクトル法の適用, 地震工学論文集, Vol.29, pp.520-528, 2007
- 2) (財) 鉄道総合技術研究所編, 運輸省鉄道局監修: 鉄道構造物等設計標準同解説 耐震設計, 丸善, 1999
- 3) 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, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.64, No.626, 1998
- 4) (財) 鉄道総合技術研究所編, 国土交通省鉄道局監修: 鉄道構造物等設計標準同解説 変位制限, 丸善, 2006
- 5) 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手法の開発, 鉄道総研報告, Vol.16, No.8, 2002
- 6) 地震調査研究推進本部ホームページ:
http://www.jishin.go.jp/main/index.htm