

鉄道構造物と自然地盤の周期比に基づく減衰定数の簡易推定と車両走行性の概略評価への活用

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員○和田一範, 坂井公俊, 室野剛隆

1. はじめに 構造物～地盤系が地震時の主要な振動モードで発揮される減衰定数(以下, 減衰定数)は発生機構が複雑かつ実測事例が少ないために未解明な点が多い. このため, 鉄道構造物における車両の走行性を確認する際は, 一般的と思われる減衰定数(5%)を設定している¹⁾が, 5%よりも小さい場合は, 応答がより増幅し, 車両の走行性が低下する可能性が相対的に高くなる. 鉄道路線は多数の構造物が並ぶため, 全線を詳細に評価することは非現実的であり, 地震時に弱点となり得る減衰定数の小さな構造物を簡易に抽出することが重要と言える.

著者らは構造型式や地盤条件の異なる多数の鉄道橋梁・高架橋(RC造)を対象に, 常時微動観測結果を分析し, 構造物と自然地盤の周期比から減衰定数を評価できる可能性を見出した²⁾. 本論文では, この知見に基づき, 構造物と自然地盤の周期比を用いて減衰定数を簡易に推定する方法を提案するとともに, 本手法の活用として車両走行性を满足するために必要な減衰定数を概略評価するノモグラムを提案する.

2. 周期比に基づく減衰定数の簡易推定法 図-1に減衰定数 h と構造物の弾性固有周期 T_s と自然地盤の固有周期 T_g との周期比 T_s/T_g との関係を示す. なお, 各物理量の算定法は文献2)を参考にされたい. 各結果には様々な構造型式と地盤条件の組合せがあるが, 後述する傾向はそれらに依らなかったため, 一律で表記する. 図-1より, $T_s/T_g > 1$ の範囲は減衰定数が小さく, $T_s/T_g \leq 1$ の範囲は減衰定数が小さいものから大きいものまで幅広くばらつくことがわかる. これは, $T_s/T_g \leq 1$ の範囲は地盤と構造物が各々振動し, 構造物の材料減衰(数%)と地盤の逸散減衰(数十%)それぞれが期待できるが, $T_s/T_g > 1$ の範囲は構造物のみが振動し, 材料減衰のみしか期待できないためと思われる(図-2). また, 本傾向は既往の解析的検討^{3), 4)}でも見られる. 上記傾向と実測結果に基づき, 減衰定数 h の簡易推定式として式(1)を提案し, 図-1に赤線で示す.

$$h = \begin{cases} 0.05 & (T_s/T_g \leq 1) \\ 0.05(T_s/T_g)^{-0.7} & (T_s/T_g > 1) \end{cases}$$

ここで, T は構造物の弾性固有周期 T_s , もしくは後述する走行安全性評価では等価固有周期 T_{eq} である. これは, 発揮される減衰がある振動に対して揺れている構造物と地盤の周期比で決まると考えられるためである. 式(1)について, $T_s/T_g \leq 1$ の範囲は, 逸散減衰が期待できる(図-2(a))ことから10%以上の減衰定数が多数見られるものの, ばらつきも大きいいため, 一般的な減衰定数(5%)で一定値とした. 一方で, $T_s/T_g > 1$ の範囲は材料減衰のみしか期待できず(図-2(b)), 実測結果に負の相関が見られるため, その傾向を考慮し, 実測結果の概ね平均値を評価するような負の勾配を持つ推定式とした.

3. 車両走行性に基づく限界減衰定数 地震時の車両走行性に関して, 鉄道構造物の設計標準(変位制限標準)¹⁾では図-3に示すような評価を行う. 具体的には, 等価固有周期 T_{eq} の構造物について, 地震応答解析により地表面地震動(L1地震動)に対する構造物天端の応答波形を算定し, それに対する速度応答スペクトルを求め, 周期 T に

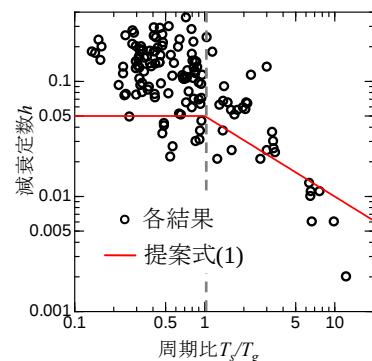
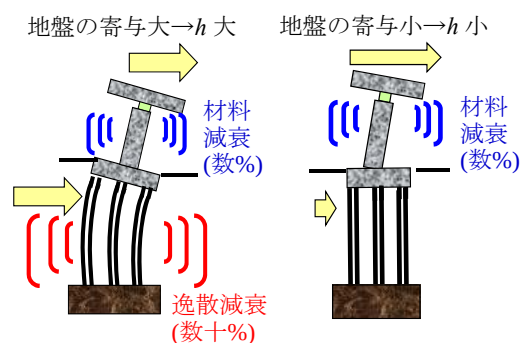


図-1 周期比と減衰定数の関係



(a) $T_s/T_g \leq 1$ の場合 (b) $T_s/T_g > 1$ の場合

図-2 周期比と発揮される減衰の概念

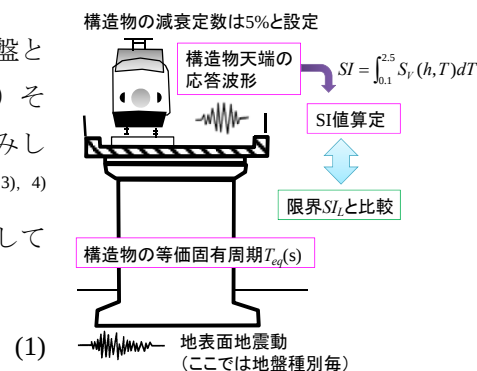


図-3 走行安全性評価の概要

キーワード 固有周期比, 走行安全性, 限界減衰定数, 必要減衰定数

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 地震応答制御 TEL 042-573-7336

ついて積分することでスペクトル強度 SI^D (以下, 応答 SI) を算定する. その結果と, 走行安全性に係る変位の限界値 SI_L (以下, 限界 SI_L) とを比較することで走行安全性を評価する.

図-4 に SI_L と地盤種別ごとの L1 地震動に対する応答 SI を示す. T_{eq} が小さい範囲では限界 SI_L と応答 SI の差が大きく, 限界値に対して余裕が大きい. T_{eq} が大きい範囲では限界 SI_L と応答 SI の差が小さく, 余裕が小さいことがわかる. また, この応答 SI は構造物の減衰定数 h が 5% での算定結果であり, 5% よりも減衰定数が小さい場合は, 余裕度がより小さくなっている可能性がある. そこで, 減衰定数をパラメータとし, 各地盤種別・等価固有周期の構造物に対して, L1 地震動に対する応答 SI を計算することで, 限界 SI_L に一致する減衰定数, すなわち走行性が満足できる最小の減衰定数 h_L (限界減衰定数と呼ぶ) が算定できる.

図-5 に地盤種別ごとの限界減衰定数 h_L を示す. この図より T_{eq} が大きいほど, 限界減衰定数 h_L が大きくなることがわかる. これは, T_{eq} が小さい範囲では, 限界 SI_L に対する余裕が大きいため, 比較的小さな減衰定数まで走行安全性を満足できるのに対して, T_{eq} が大きい範囲では限界 SI_L に対する余裕が小さく, 走行安全性を満足するには, 変位制限標準で設定される減衰定数 (5%) と同程度の減衰定数が必要となるためである.

4. 必要減衰定数の算定ノモグラム 2, 3 章より, 地盤の固有周期 T_g , 構造物の等価固有周期 T_{eq} から, 限界減衰定数 h_L と式(1)より実際の減衰定数 h が評価できるため, $\Delta h = h_L - h$ が算定できる. Δh は走行安全性を満たす最小の減衰定数 (限界減衰定数) h_L に対して必要な減衰定数 (必要減衰定数と呼ぶ) を表す. Δh が負の場合は, 走行安全性の観点から問題はないと判断されるのに対し, Δh が正の場合は, 走行安全性の観点から減衰が必要であると判断される.

横軸に構造物の等価固有周期 T_{eq} , 縦軸に地盤の固有周期 T_g をとり, 上記の必要減衰定数 Δh をコンターで表示した結果 (必要減衰定数の算定ノモグラムと呼ぶ) を図-6 に示す. 図-6 より T_g が小さいほど, また T_{eq} が大きいほど, Δh が正となる可能性が高いことがわかる. これは, 地盤が良好 (一般的に T_g 小) で, 構造物高さが高い (一般的に T_{eq} 大) ほど, Δh が大きく, 走行性安全性の観点から注意を要する傾向があることを意味する. 本図を用いれば, 地盤の固有周期と構造物の等価固有周期のみから, 走行安全性の観点からの要注意な構造と必要な減衰定数を簡易に評価できる.

5. おわりに 多数の鉄道橋梁・高架橋 (RC 造) の常時微動観測結果を分析し, 構造物と自然地盤の周期比から減衰定数を簡易に推定する式を提案した. また, 鉄道構造物の設計標準における車両の走行性を満たす最小の減衰定数を定義し, 簡易推定式で得られる減衰定数との差分として, 走行性を満たすために必要な減衰定数 (必要減衰定数) を算定した. さらに, 上記結果を取りまとめ, 地盤の固有周期, 構造物の等価固有周期から必要減衰定数を概略評価するノモグラムを提案した. このノモグラムより, 走行安全上, 要注意な箇所の抽出とそこで必要な減衰定数を簡易に評価可能となった. なお, 本研究の一部は国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した.

【参考文献】1) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限, 丸善出版, 2006. 2) 和田一範, 坂井公俊, 室野剛隆, 赤坂大介: 常時微動観測に基づく鉄道橋梁・高架橋の減衰定数の評価, 第 71 回年次学術講演会, 2016 (投稿中). 3) 若原敏裕, 川島一彦: 剛体基礎で支持される道路橋橋脚の地下逸散減衰, 土木学会論文集, No.432/I-16, pp.145-154, 1991. 4) 室野剛隆: 強震時の非線形動的相互作用を考慮した杭基礎の耐震設計法に関する研究, 京都大学博士論文, 1999.

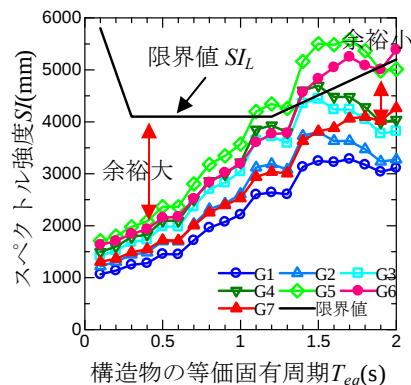


図-4 等価固有周期とスペクトル強度

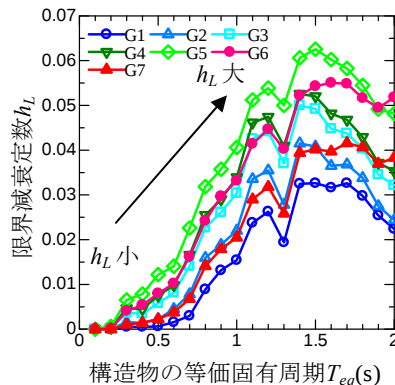


図-5 等価固有周期と限界減衰定数

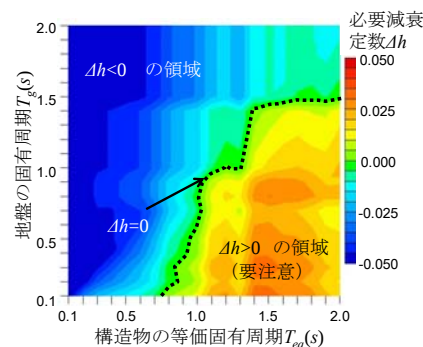


図-6 必要減衰定数の算定ノモグラム