常時微動観測に基づく鉄道橋梁・高架橋の減衰定数の概略評価

（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
（株）テス　正会員○赤坂大介

１．はじめに　地震に対する構造物の安全性や列車の走行安全性を判断するうえで，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）は重要なパラメータとなる．例えば，東北地方太平洋沖地震で新幹線が脱線した原因のひとつとして，共振現象の可能性が指摘されているが[1]，減衰定数が小さいと，共振点での増幅が大きくなるため，より小さな入力に対しても被害が発生する可能性が高くなる．実測に基づく減衰定数の評価事例は，いくつかある[例えば 2]が，測定方法が個々で異なっていることや，構造物の種類が多岐に渡っているのに対して標本数が多くない．このような背景から減衰定数に関する十分な評価方法は確立されておらず，鉄道構造物の耐震設計標準[3]では，一般的と思われる条件における値を設定している．しかしながら，先述したような地震時の被害事例を踏まえると，構造物の減衰定数を適切に評価することは，より精緻な耐震評価を行うために重要となる．

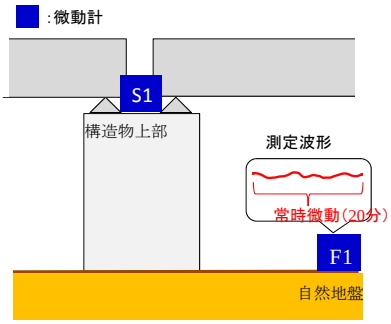


図-1　常時微動観測の概要

そこで，構造型式や地盤条件が異なる多数の鉄道橋梁・高架橋（RC 造）について，常時微動観測および重錘打撃での衝撃振動試験を実施し，減衰定数の概略評価を試みた．本論文では，常時微動観測結果に基づき算定した固有周期と減衰定数の関係性について述べる．

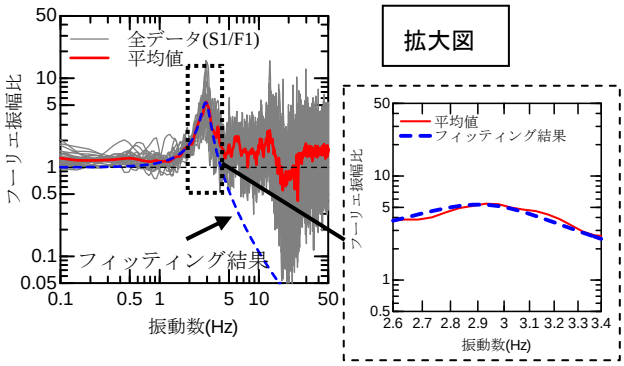
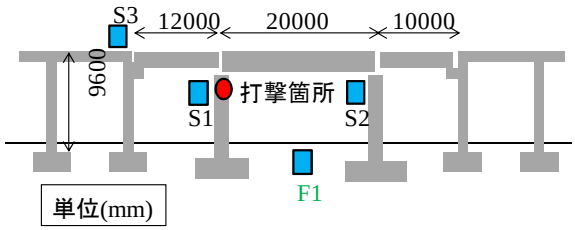


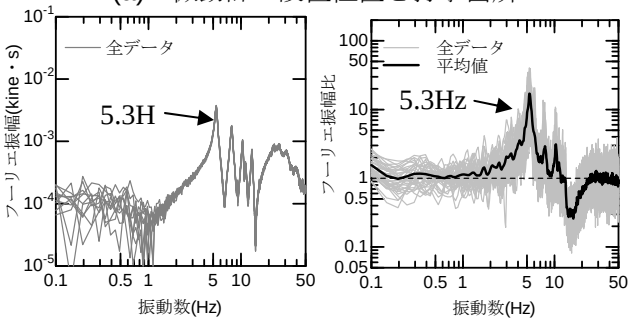
図-2　常時微動測定結果の整理方法

２．常時微動観測概要　地盤条件（G1～G7 地盤[3]）や構造型式（桁式，ラーメン式）が多様な 136 箇所の構造物で，図-1 に示すように構造物上部，自然地盤に微動計を設置し，1 地点あたり 20 分間（200Hz サンプリング）の微動観測を行った．また，一部の構造物については，隣接橋脚の桁も含めた多点で計測を行い，振動モードの分析に利用した．

減衰定数は以下の手順で評価した. まず, 計測結果を 20.48 秒（4096 個）のデータごとに分割し，それぞれのフーリエ振幅スペクトルを算出した．この時，車両通過などの常時微動ではない振動は除いた．続いて，自然地盤（F1）に対する構造物上部（S1）のフーリエ振幅スペクトル比（図-2 の灰色線），すなわち自然地盤の振動に対する構造物の振動の周波数応答関数を算定した．次に，この平均値（図-2 の赤線）の 1 次の卓越振動数にカーブフィット法を用いて，1 自由度系の周波数応答関数をフィッティングさせる（図-2 の青点線）．そして，フィッティングさせた周波数応答関数の減衰定数をその構造物の減衰定数と評価する．なお，本算定法の妥当性は３章にて述べる．



(a)　微動計の設置位置と打撃箇所



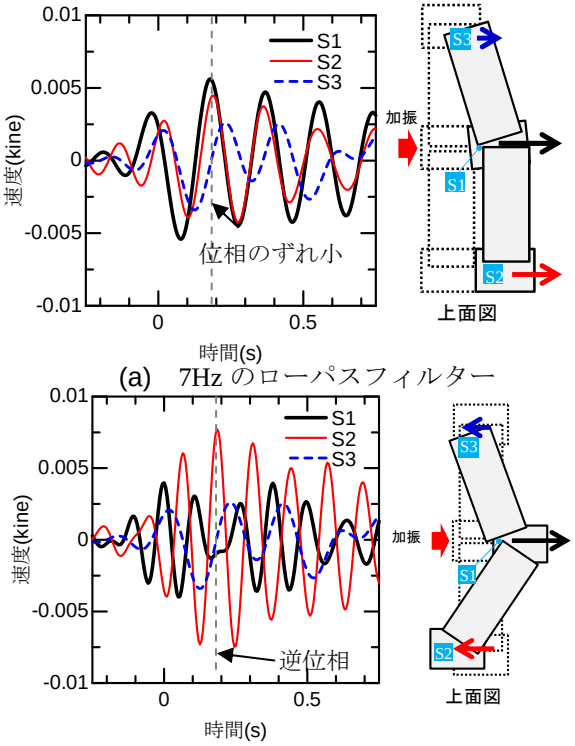
(b)フーリエ振幅スペクトル　(c)周波数応答関数
（衝撃振動試験，S1）　（常時微動観測，S1/F1）

図-3　隣接橋脚も含めた計測を行った橋脚

キーワード　常時微動観測，固有周期，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　ＴＥＬ042-573-7336

３．振動モード分析による減衰定数の算定法の妥当性検証　隣接橋脚を含めた多点計測の結果より振動モードを分析することで，２章で述べた減衰定数の算定法の妥当性を検証する．

多点計測を行った構造物と微動計の配置を図-3(a)に示す．また，衝撃振動試験でのフーリエ振幅スペクトル（図-3(b)），常時微動観測での周波数応答関数（図-3(c)）を示すが，最も低振動数側のピークは，両結果ともに明瞭に見られ，その振動数はほぼ同値であることがわかる．次に，衝撃加振後の速度波形にフィルター処理を施した結果を図-4 に示す．7Hz のローパスフィルターを施した場合，打撃した橋脚（S1）と隣接橋脚（S2）との位相のずれが小さいことがわかる（図-4(a)）．この結果から，5Hz 付近で卓越している振動モードは構造物全体が同一に振動するモード（図-4(a)右）であることがわかる．一方で，7-12Hz のバンドパスフィルターを施した場合，打撃した橋脚（S1）と隣接橋脚（S2）とが逆位相で振動していることがわかる（図-4(b)）．この結果から，10Hz 付近の振動モードは打撃した橋脚のみが局所的に振動するモード（図-4(b)）であることがわかる．このことから，1 次の卓越振動数で現れるモードは，構造物全体が同一に振動するモードであることがわかる．また，このような振動モードは，地震時に主要な振動モードと考えられるため，1 次の卓越振動数について減衰定数を算定することが妥当であると確認できた．



(a)　7Hz のローパスフィルター

(b)　7-12Hz のバンドパスフィルター

図-4　フィルター処理を施した単柱橋脚の速度波形と推定モード形状

４．減衰定数の概略評価結果　図-5 に減衰定数 h と構造物の固有周期 T_s の関係を示す．なお，構造型式ごとの傾向の違いは見られなかったため，地盤条件ごとの結果を示す．また，図中には，T_s と h の経験式 [2), 3)]（h=0.02/T_s，0.04/T_s）も合わせて示す．本結果では，T_s と h には経験式のような反比例の傾向が明瞭には見られず，ばらつきが大きいことがわかる．

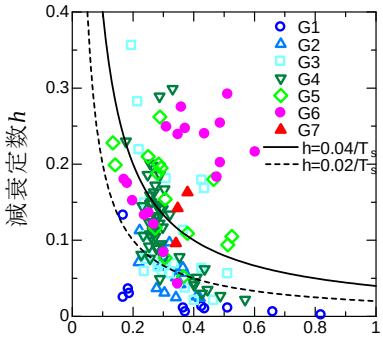


図-5　固有周期と減衰定数

次に，図-6 に地盤の固有周期 T_g と構造物の固有周期 T_s の周期比 T_s/T_g と減衰定数 h の関係を示す．ここで，T_g は各観測記録における自然地盤の H/V スペクトル比のピークから算定した．図-6 より，T_s/T_g>1 の領域は減衰定数が小さく，T_s/T_g<1 の領域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．しかしながら，T_s と h の関係（図-5）と比較すると傾向が見られるため，T_s/T_g を用いることで減衰定数が概略評価できる可能性が考えられる．

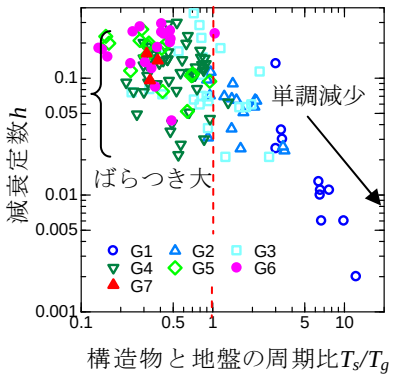


図-6　固有周期比と減衰定数

５．おわりに　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）について，常時微動観測・衝撃振動試験を実施し，常時微動観測結果から減衰定数の概略評価を試みた．その結果，構造物と自然地盤の周期比を基に減衰定数を評価できる可能性を見出した．また，本結論に基づく評価方法の詳細は，文献 4)を参考にされたい．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)運輸安全委員会：鉄道事故調査報告書，2013．2)栗林栄一，岩崎敏男：橋梁の耐震設計に関する研究（Ⅲ）－橋梁の振動減衰に関する実測結果－，土木研究所報告，No.139，1970．3)鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説　耐震設計，丸善出版，2012．4)和田一範，坂井公俊，室野剛隆：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，第 71 回年次学術講演会，2016（投稿中）．