

構造物の部材振動特性評価技術

渡辺 勉

鉄道力学研究部
(構造力学 研究員)

原田 和洋

ジェイアール九州コンサルタンツ(株)
(元 構造物技術研究部 コンクリート構造)



わたなべ つとむ



はらだ かずひろ

構造物の振動測定

鉄道土木構造物には、高架橋、橋梁、トンネル、盛土など様々な構造物があります。これらの構造物が何らかの外力を受けて振動する時に、変位、速度、あるいは加速度を測定して分析すると、固有振動数、固有振動モード、あるいは減衰定数といった、構造物の振動に関する固有の情報を得ることができます。これらの情報は、構造物が所定の構造性能を満たしているか、自然災害や環境作用によ

て損傷を受けていないかを判定する指標の1つとなるため、これまでも様々な研究開発が行われてきました。

表1に現在鉄道分野で広く普及している振動測定技術の例を示します。図1にそれらの技術を用いた構造物の振動測定の概要を示します。

IMPACTⅢは、主として重錘等の衝撃振動により構造物の振動を励起し、橋脚や橋台等の基礎構造物の安定度に関する健全度評価、ラーメン高架橋の柱の健全度評価等で

活用されています。健全度判定は豊富な測定実績に基づき定められた標準値に照らして行われます。また耐震診断の指標となる高架橋や橋脚の固有振動数の推定にも活用されています。

MESSEは、早期地震防災システムのための地震計の設置箇所選定や、耐震診断の指標となる構造物の固有振動数、地盤の卓越周期及び増幅特性の分析に活用されています。

ビーエムシーシステムは、鋼橋やコンクリート橋のたわみや応力測定のために開発されたもので、橋梁の維持管理業務のほか、新幹線等の速度向上試験、新設構造物の入線検査等でも活用されています。

Uドップラーは、レーザードップラー速度計により非接触で振動を測定するものであり、前述の様々な測定分野に対して、効率化、高精度化が期待されています。

表1 振動測定技術の例

名称	構造物の加振方法	センサの種類	用途
IMPACTⅢ	常時微動 衝撃加振(重錘)	速度計	・基礎の安定度に関する健全度評価 ・高架橋、橋脚の固有振動数の推定 ・ラーメン高架橋の柱の健全度評価
MESSE	常時微動	速度計	・構造物の固有振動数の推定 ・地盤の卓越周期、増幅特性
ビーエムシーシステム	強制振動(列車)	リング式変位計 光学式変位計 ひずみゲージ	・中小橋梁のたわみ ・長大橋梁のたわみの非接触測定 ・部材の局所応力
Uドップラー	常時微動 衝撃加振(ハンマ) 強制加振(列車)	レーザードップラー 速度計	・高架橋の固有振動数の測定 ・桁のたわみの非接触測定
部材振動測定システム	衝撃加振(ハンマ) 強制加振(列車)	加速度計 (アレイ配置)	・部材の固有振動数の推定 ・高剛性部材の固有振動数測定

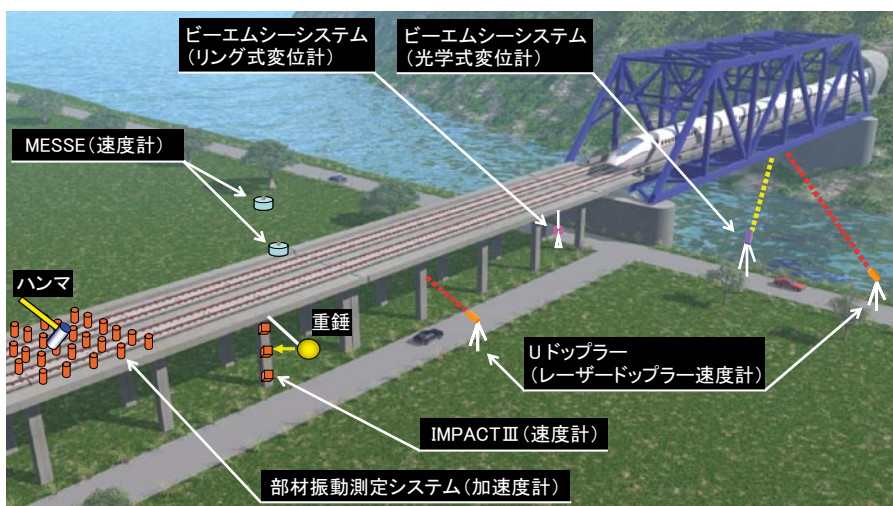


図1 構造物の振動測定の概要

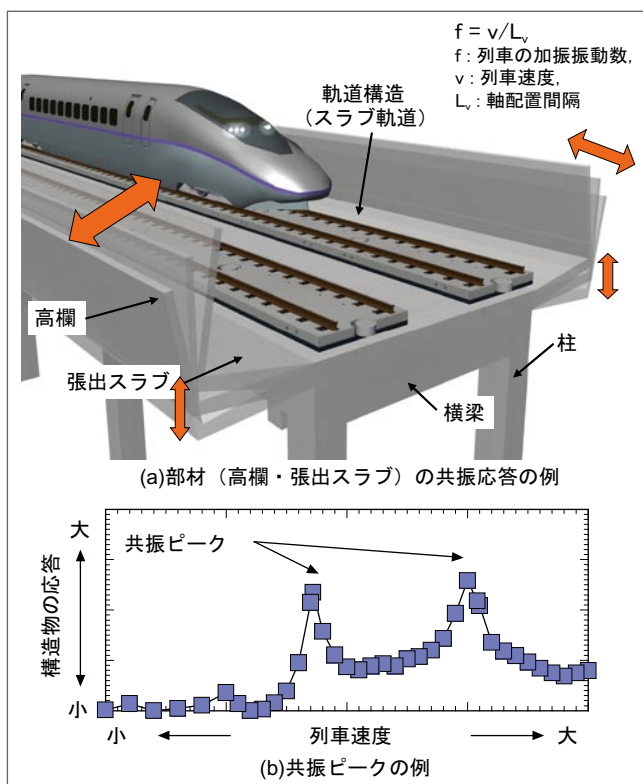


図2 列車通過に伴う共振応答の概念

これらの振動測定は、主として50Hz程度までの比較的低い振動数をターゲットとしたものです。一方で、近年では列車の高速化に伴い、高架橋や橋梁の部材レベルでの共振現象や、構造物音の解明が重要となってきています。本稿では200Hz程度までのより高い振動数に対する測定方法について紹介します。

部材レベルでの共振

図2に列車通過に伴う部材の共振応答の概念図を示します。列車には一定間隔で規則正しく輪軸が配置されています。従って、一定速度で通過する列車によって構造物はある一定の振動数で加振されます。この加振振動数と部材の固有振動数が近づくと共振が発生します。この共振については古くから知られており、橋梁全体系の固有振動モードに対する共振が内外で確認されています。一方で、列車の速度、つまり加振振動数が更に向上しつつあるため、従来は固有振動数が高くて安全であると考えられていたような部材レベルでの共振も懸念されるようになってきました。また高欄等の非構造部材についても安全性の確認の必要性が高まってきています。

図2 (a) は、鉄筋コンクリート製の張出スラブと高欄と呼ばれる部材が共振している様子を模式的に表しています。共振が発生すると、図2 (b) に示すように、振動が急激に増大し、それに伴って発生する応力も急激に増加します。十分な耐荷性能を有していれば、共振そのものは問題では

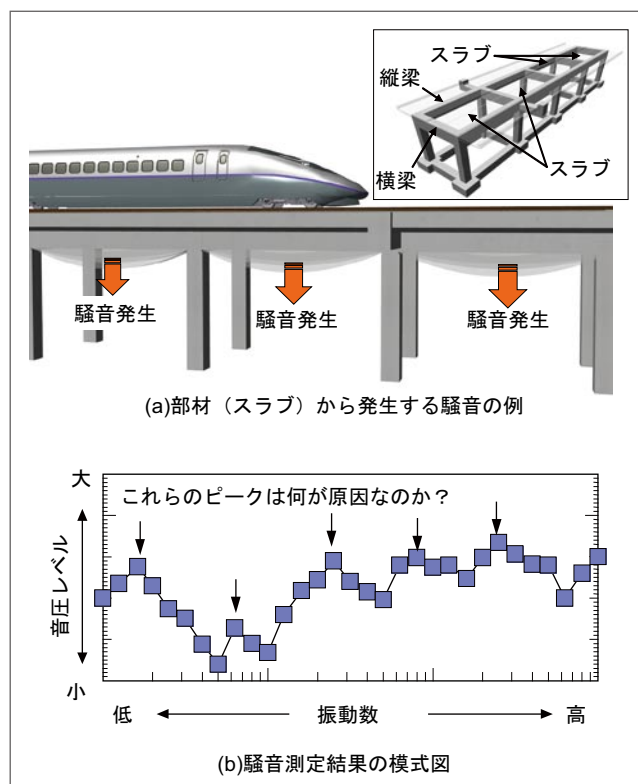


図3 列車走行に伴う騒音発生概念

ありませんが、応答の増加は数倍に至る急激なものであるため、注意する必要があります。

列車速度の向上において、確実に安全性を確認していくためには、振動測定により部材レベルでの共振の発生の有無を確認していく必要があります。

構造物から発生する騒音

もう一つの課題は、騒音の発生源の解明です。騒音の発生源には、集電音 (パンタグラフの風切音、架線/パンタ間のしゅう動音等)、空力音 (車両の先頭や側面付近の空気流の乱れによる音)、駆動音 (ファンやギア等による音)、転動音 (レール/車輪からの音)、そして、構造物音が挙げられます。構造物音のメカニズム解明もまた、速度向上に欠かせない要素となっています。

図3に構造物音の概念図を示します。構造物音は、面積の大きな平板状の部材が、丁度、太鼓の皮のように働き、音源となると考えられています。図3 (a) に示す鉄筋コンクリート製の高架橋では、列車が通過する軌道の下に縦梁と横梁と呼ばれる部材で囲まれた、スラブという平板状の部材 (軌道構造のスラブではありません) が配置されています。この部材が、列車に叩かれることによって振動します。高架橋から発生する音は、振動する部分の速度と密接な関係があります。図3 (b) には、列車が高速で通過する鉄筋コンクリート製の高架橋の沿線で騒音測定をした際の結果を、模式的に表しています。いくつかの振動数で音が

大きくなるピークが発生しています。このようなピークに対して、個々に様々な方法で音源を特定していくことになります。構造物音に関しては、振動数のピーク付近に構造物の固有振動モード（構造物の寸法、硬さ、重さに依存した固有の振動形状）が存在するかどうか重要となります。

振動測定により、構造物が振動しやすい固有振動数や、振動しやすい形状である固有振動モードを明らかにすることができれば、構造物音のメカニズムの解明や対策に役立てることができます。

構造物の部材振動測定

図4に部材振動測定システムの概要を示します。測定には、圧電型加速度計を用いています。圧電型加速度計には、加速度によるひずみ加わるとその量に応じた電荷を発生するピエゾ素子が組み込まれています。このタイプの加速度計は、小型軽量で、応答周波数帯が広く、扱いやすいといった利点があります。データ集積ユニットでは、得られた電圧をアンプにより増幅し、A/D変換器によりデジタル信号に変換します。ノートパソコンは、加速度データ収録用の大容量ハードディスクを装備するとともに、データ分析を行って測定対象物の振動特性を求めめるためのソフトウェアを搭載しています。

図5に加振方法と加速度計の配置を示します。振動特性を把握する方法については、古くから機械工学の分野でその理論と実証が進められてきました。近年では、安価なセンサが開発されたことにより、質量の大きな土木構造物に対しても適用が進んでいます。ここでは現場での使用を重視して最も簡易な方法を用いて、鉄道構造物への適用の可否について検討を行いました。

一つは、加速度計をアレイ配置して、インパルスハンマ（叩いた強さを測定することができるハンマ）により振動

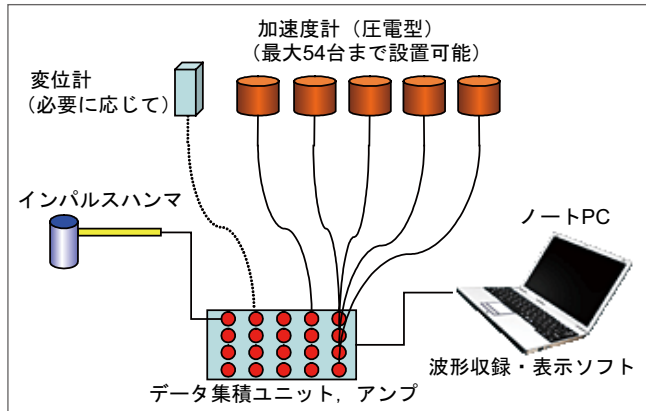


図4 部材振動測定システム

モードの腹となることが予想される点を加振する方法です。この時の測定された振動加速度を高速フーリエ変換と呼ばれる手法を用いて整理します。この処理により各測定点の固有振動数ごとの振幅を得ることができます。これらの振幅を集計することにより、固有振動モードを得ることができます。これらの手法は実験モード解析と呼ばれています。

また、A点を加振した力とB点で測定された加速度の関係は、B点を加振した力とA点で測定された加速度と等しくなるという法則があります。これを利用すれば図5 (b)のように、多くの加速度計を用いる代わりに、叩く点を多くすることでより安価に測定をすることも可能です。ただしこの手法では、加振力が不足する場合もあり、低い振動数の測定で誤差が入りやすいという欠点もあります。また列車通過時の振動を測定できないという欠点もあります。

もう一つの方法は、加速度計をアレイ配置して、列車を加振源として測定する方法です。ここで重要となるのは列車が加振源として適切であるかどうかです。具体的には対象とする振動数帯に対して、偏りのない安定した加振力を与えられるかどうかということです。

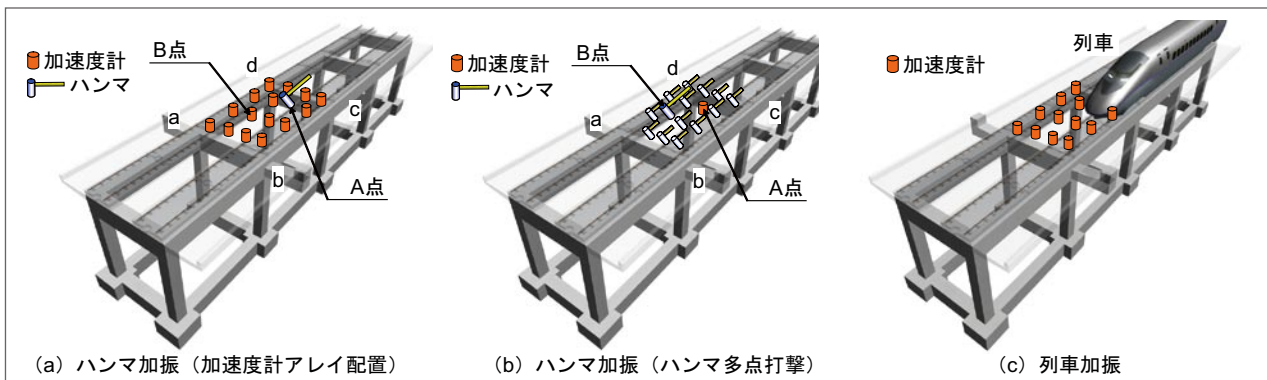


図5 スラブを対象とした振動測定の例

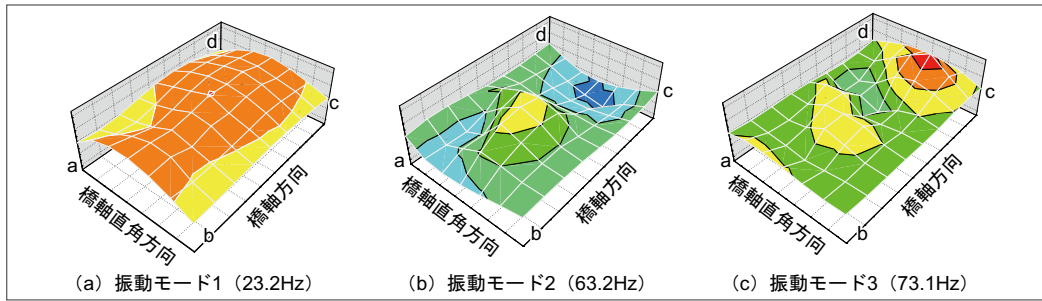


図6 ハンマ加振(加速度計アレイ配置)によりスラブの振動モードを求めた例

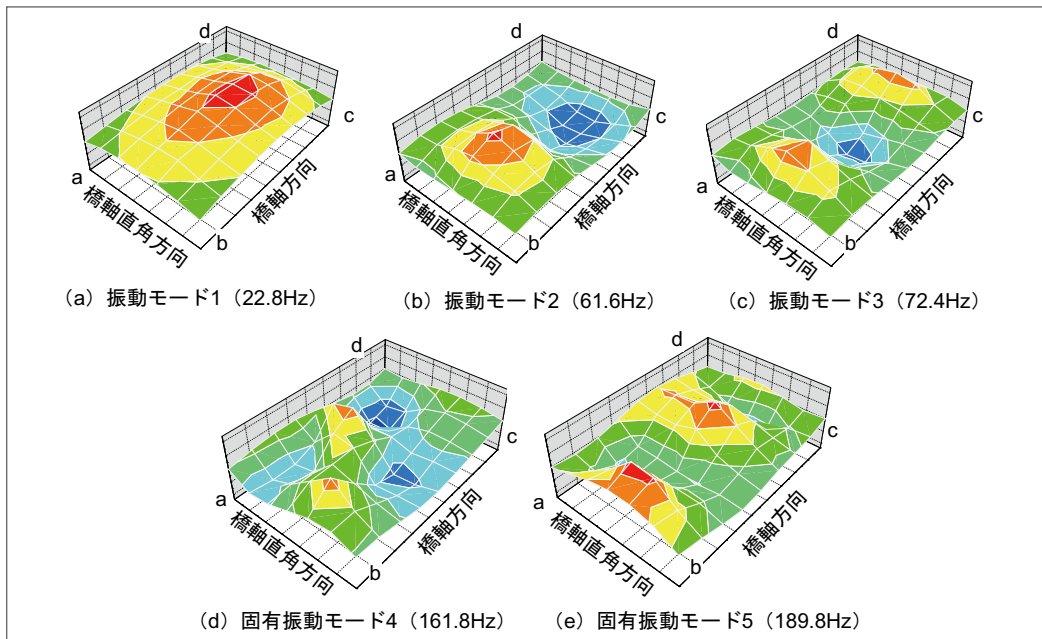


図7 列車加振によるスラブの振動モードを求めた例

部材振動測定の事例

前述の部材振動測定システムを用いて、部材振動特性を求めた事例を紹介します。

図6にハンマ加振(加速度計アレイ配置)、図7に列車加振を用いて鉄筋コンクリートラーメン高架橋のスラブの振動モードを求めた例をそれぞれ示します。それぞれの図において、振動モード1はスラブの中央が腹となるモード、振動モード2はスラブ中央が節となり橋軸と直角方向の $L_{ad}/4$ 点(L_{ad} は辺adの長さで辺cdの長さも等しい)が腹となるモード、固有振動モード3はスラブ中央及び橋軸方向の $L_{ad}/6$ 点が腹となるモードです。構造物の実際の振動はこれらの振動モードが連成し、複雑な挙動をしています。本システムの解析ソフトを用いることにより、各振動モードが全体振動に対してどれだけ寄与しているかを表すモード寄与率も求めることができます。

加振方法の違う両者を比較すると、列車加振の方が振動モードの形状がきれいに描かれていることがわかります。また、列車加振で求めた振動モードの周波数が、ハンマ加

振に比べて数Hzだけ小さいのは、列車加振では、構造物に列車の重量も含まれているためであると考えられます。

図7(d)および(e)に列車加振によってのみ求められた、高振動数領域における振動モードを示します。振動モード4および振動モード5は振動モード1, 2, 3に比べて、腹と節の数がより多い振動モードであることがわかります。列車を加振源とすることで、従来ハンマ加振では得ることが不可能だった振動モードまで求めることができました。このように列車を加振源として用いることは、部材の振動モードを求めるために有効であることがわかりました。

おわりに

構造物の振動測定の概要について述べるとともに、実験モード解析を利用した構造物の部材振動測定システムについて紹介しました。これらの技術を部材レベルの構造成能評価や構造物音の解明等、鉄道の高速度化に活用していきたいと考えています。RRR