

(147) 常時微動を用いた鉄道橋梁の振動特性の推定

(財) 鉄道総合技術研究所 中村 豊

(財) 鉄道総合技術研究所 滝沢太郎

1. はじめに

河川を横断する橋梁の橋脚は洗掘の危険にさらされている。合理的で省力的な施設管理を行なう上で、また、洪水時の運行管理を的確に行う上で、橋脚の簡便な健全度調査手法の確立が急務となっている。

ここでは、直接基礎の古い煉瓦造橋脚とケーソン基礎橋脚についての常時微動測定結果と、これに基づいて洗掘深度を推定する方法の予備的検討結果について報告する。

2. 測定計器と分析方法

測定に使用した計器は、鉄道総研で開発されたPIC87である。これは3方向2組のセンサを持ち、2測点が同時に測定できる。ローパスフィルターは10Hzを選択したので、測定振動数範囲は1~10Hzとなっている。しかし、成分毎の特性は揃えられているため、スペクトル比においては、0.3~30Hz程度を検討の対象とすることができる。すべての各測点で、約41秒間(1/100秒間隔、4096サンプル)の測定を3回ずつ実施して、それぞれの記録から約10秒間(1024サンプル)のデータを取り出してFFTによりスペクトル分析しハニングウィンドウを5回かけて平滑化した。各測定毎に算出された平滑化スペクトル3個を平均してそれぞれの測点のフーリエスペクトルとしている。また、各種のスペクトル比は、平均前の平滑化スペクトルについて計算し、それを3個平均して求めている。

3. 常時微動による橋脚の振動特性の推定

橋脚上で測定した常時微動のフーリエスペクトルや、橋脚上と基礎地盤で同時に測定した常時微動を用いて推定した地震動特性スペクトルには、一般に数多くのピークが卓越して現われる。これらのピークは、橋脚の固有振動のほか、橋桁や表層地盤の固有振動の影響、常時微動発生源の特性などが含まれている。ここでは、直接基礎橋脚のA橋梁とケーソン基礎橋脚のB橋梁について、その振動特性を検討する。

(1) A橋梁

明治に築造された煉瓦積の橋脚(直接基礎)に架かるワー

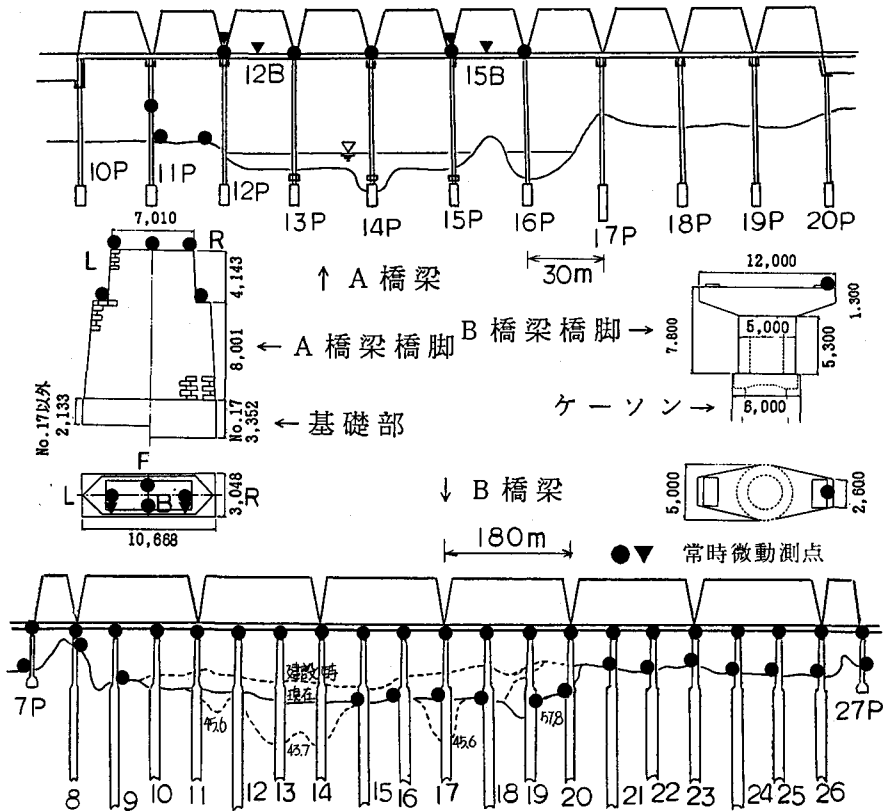


図1 A橋梁およびB橋梁の常時微動測定点

レントラス橋梁（単線、スパン30mの単純桁）である。橋脚群のうち3橋脚が局部洗掘を受け、根固め工事の対象となった。橋脚の高さは12.2mで、コンクリート製の直接基礎の高さは2.1m（17Pのみ3.4m）である。基礎地盤は泥岩（土丹層）であり、上に数mの砂礫層がのっている。常時微動測定は2回実施された。

1回目の測定が行われたのは、13Pの根固め工事が終了した段階で、14Pは基礎部まで周囲の基礎地盤が取り除かれて根固め工事前の状態であった。われわれは、根固め工事の対象となった3橋脚（13P～15P）を含む6橋脚（11P～16P）の常時微動を測定した。測定位置を図1に●印で示す。

2回目の測定の測定位置は図1中に▼印で示している。この時には、3橋脚とも根固め工事は終了していた。

12Pと15Pの橋脚の上で測定するとともに、12Pと12B、15Pと15Bをそれぞれ同時に測定した。

まず、橋桁の振動特性を明らかにするため、12Bおよび15Bでの測定結果について述べる。図2に、12Bと12P、15Bと15Pのフーリエスペクトル、および脚／桁スペクトル比（12P/12B、15P/15B）を示す。HL（橋軸）方向のスペクトル比をみると、ほぼ10Hz以下の成分については、桁上と橋脚上とで概ね一致しており、HL方向の振動は橋梁全体に加わる外乱やそれに対する各所の応答が平均化されたものになっていることをうかがわせる。なお、HL方向で最も卓越する振動数は5.2Hzである。

橋桁におけるHT方向とV方向の卓越振動数について検討した結果、4.4Hzと13.3Hzは横たわみ（HT方向）振動のそれぞれ第1次、第3次の固有振動数、7.2Hzは上下たわみ振動の1次固有振動数、10.0Hzはねじり振動の1次固有振動数と推測された。

桁の横たわみ振動やねじり振動は、橋脚の左右方向のロッキング振動を誘起する。さらに横たわみ振動は、橋脚の鉛直軸まわりのねじり振動も誘起すると考えられる。したがって、橋脚天端の左右両端の測点（R、L）で3方向に共通して観測されるが、橋脚中央測点（F、B）ではHT方向にしか現れない振動は、橋桁の横たわみ振動の影響と考えられる。また、桁の上下振動は橋脚に上下振動と前後方向のロッキング振動を誘起する。

脚／桁スペクトル比から、橋脚の方が橋桁よりも大きな振幅で振動するものを選びだすと、12Pでは、HL方向：12.2Hz（2.8倍）、HT方向：9.1Hz（2.5倍）、V方向：14.4Hz（1倍）となる。15Pでは、HL方向：13.2Hz（3倍）、HT方向：9.0Hz（3.0倍）、V方向：14.6Hz（2倍）である。12Pと15Pとでほぼ同じ振動数が卓越している。橋脚上のR測点やL測点のフーリエスペクトルをみると、HT方向の9.0Hz付近の振動はV方向にも認められるが、HL方向は小さく、橋脚が左右にロッキングしていることが推測される。これは橋脚の固有振動数と考えられる。1回目のP11～P16の測定と2回目のP12およびP15の測定結果から各橋脚のHT方向の9Hz近傍の固有振動数を推定したものを図7に示した。1回目の測定時には、13Pは根固め工が施工済みであり、14Pは施工前ではほぼ基礎部が露出している状態であった。14Pで多少振動数が低くなっている。2回目の測定時には、14Pと15Pの根固め工事は完了していた。15Pについては根固め工を施工する前と後で測定したことになるが、両者の固有振動数の差はあまりなかった。

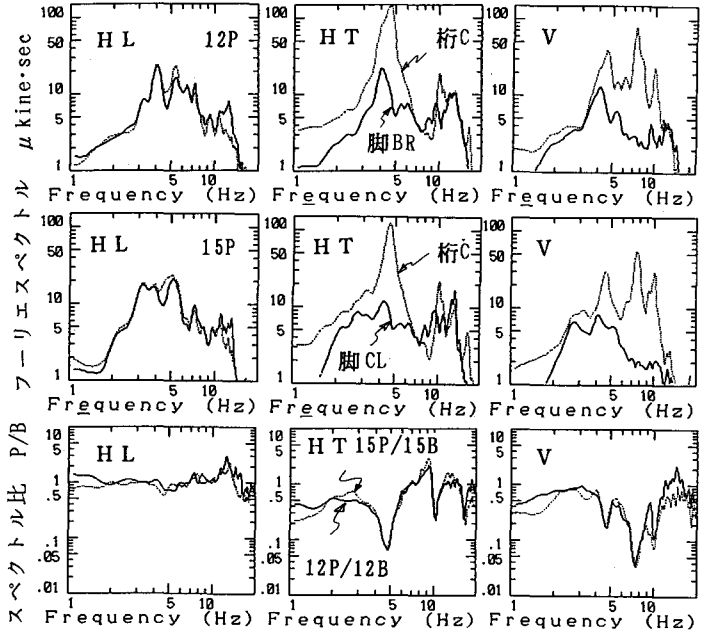


図2 A橋梁の橋脚と橋桁の常時微動スペクトルとスペクトル比

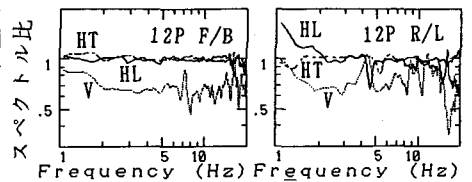


図3 前後および左右のスペクトル比

図3は、P12の橋脚上の測点R、L、FおよびBについてフーリエスペクトル比R/LおよびF/Bを算定したものである。HL方向やHT方向については、すべての振動数域でスペクトル比がほぼ1.0になっていることがわかる。HT方向については橋脚の左右でほとんど同じ動きをするのは当然であるが、HL方向については鉛直軸回りのねじり振動がないか、またはその中心が偏っていないことを示している。V方向をみると、RとL測点またはFとB測点で振動数によって多少異なった動きをしていることがわかる。これは橋脚の基礎地盤の支持力特性が底面全域にわたって一様ではないことを示唆している。

(2) B橋梁

60m3径間連続ワーレントラス橋（複線）で、ケーソン基礎橋脚により支えられている。橋脚の高さは7.8mで、ケーソン基礎は15mと17m（固定シュー設置橋脚）の長さのものがある。基礎地盤は玉石混じりの砂礫で、ボーリング結果は25m程度までしかないが基盤がこれより下にあることを示唆する資料となっている。ここでは、すべての橋脚について測定が行われている。基礎地盤における測定も測点が設定できないところ以外は実施した。測点の配置を図1に示す。図に示すように橋脚上の測定は上り線側の端部で行っている。

B橋梁に沿った地盤上での常時微動測定によれば、この河川敷では、概ね1Hz～3Hz程度が卓越し、基礎地震動は3倍～5倍に増幅されると推測される。

図4は、橋脚上の常時微動のフーリエスペクトルを例示したものである。橋脚上のHT方向微動は、3Hz前後が卓越している。また、HT方向とV方向のフーリエスペクトルは形状が互いに類似している。図5はHT方向スペクトルとV方向スペクトルの比を例示したものであるが、主要な振動数領域でほぼ一定となっている。例示した橋脚以外にも同様な特性を示すが、これは、橋脚の左右方向のロッキング中心が比較的広い振動数範囲であり変動しないことを示している。

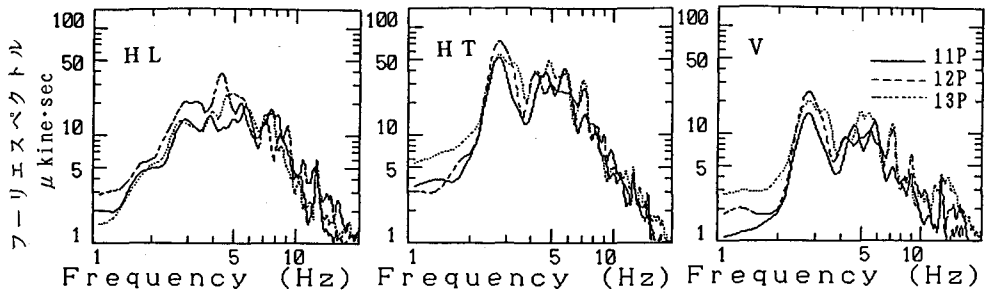


図4 橋脚上の常時微動のフーリエスペクトル例

4. 洗掘深度推定の予備的試み

橋脚のロッキング中心は地盤から受ける水平反力の合力が作用する位置と密接な関係がある。水平反力の作用位置は、有効な根入れ長と関係している。したがって、ロッキング中心が求められれば、これから根入れ深さを推定できる可能性がある。根入れ深さは橋脚の健全度を判定する重要な指標である。

図6に示す測点①、②のロッキング振動による水平振幅 H_1 や垂直振幅 V_1 などは、橋脚を剛体と考えると、つぎのようにおくことができる。

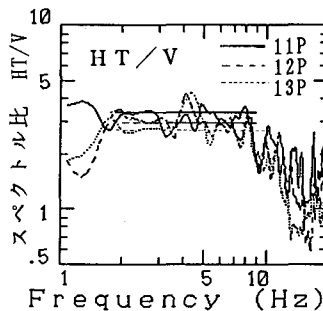


図5 スペクトル比HT/V

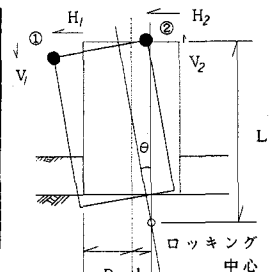


図6 ロッキング振動

$$H_1 = H_2 = L \theta$$

$$V_1 = (B + b) \theta$$

$$V_2 = (B - b) \theta$$

ここに、Lは測点からロッキング中心までの鉛直距離、

Bは橋脚の幅の1/2、bはロッキング中心の偏心量、
 θ はロッキングの角度振幅である。

$$\begin{aligned} \text{ゆえに、 } L &= B (H_1 + H_2) / (V_1 + V_2) \\ b &= B (V_1 - V_2) / (V_1 + V_2) \\ &= B (1 - V_2/V_1) / (1 + V_2/V_1) \end{aligned}$$

bが正值の場合、ロッキング中心は②側に偏心し、①側の支持地盤がより軟弱であるか、欠落していることを示唆していると考えられる。負値の場合はこれと逆になる。

片側しか測定していない場合は $b=0$ と考え、 $L=B(H/V)$ とする。

図7は、A橋梁の11P~16Pについて左右方向ロッキング固有振動(9Hz前後)のLやbを算定して図示したものである。これには各橋脚の左右ロッキング固有振動数も示している。根固め工事のため周囲の地盤がはぎ取られて基礎部が露出している14Pと、工事中の暫定流路にある16Pでロッキング中心深度が深くなっている。

15Pは1回目の測定時には根固め工は未施工であり、2回目は根固め工事は終了していた。両者を比較すると、卓越振動数に変化は認められないが、ロッキング中心が浅くなっており、根固め工の効果が現れている。また、根固め工の対象橋脚13P~15Pで上流側に偏心しているが、下流側の洗掘がより著しいことを示しており、局部洗掘後の調査結果と調和的である。なお、15Pの偏心は根固め工事によってあまり変化しなかったものと思われる。

B橋梁については、主要な卓越振動数域について H/V がほぼ一定になる。これからLを算定したものと、3Hz付近の最も卓越する振動についてLを算定したものを図8に示す。これには現在の河床形状や既往の最大洗掘深度なども示している。推定されたロッキング中心は両者とも類似の傾向を示し、河床形状や既往最大洗掘深度とよい相関があるように見える。一部に大きな差が認められるので、今後、実態調査や再測定などを実施してさらに検討を進めていく。

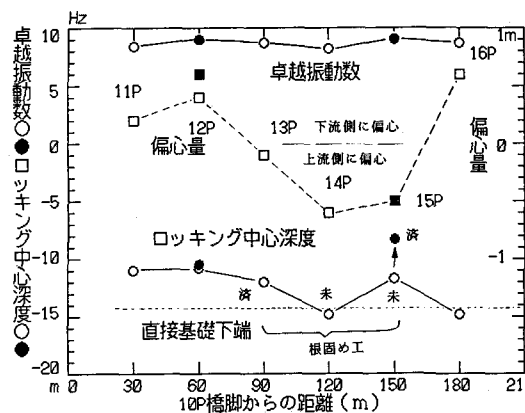


図7 常時微動によるロッキング中心の推定 (A橋梁)

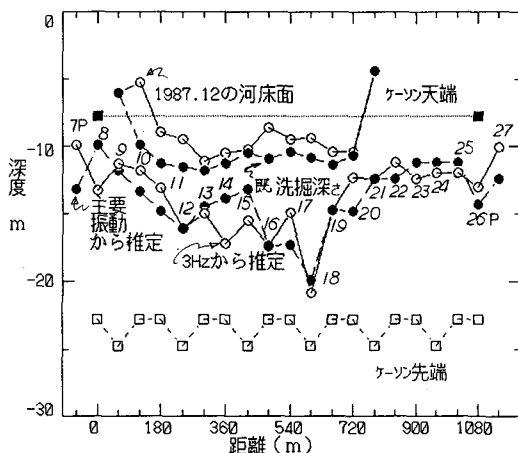


図8 常時微動によるロッキング中心の推定 (B橋梁)

5. おわりに

常時微動を用いて橋脚の振動特性を推定するとともに、施設管理上重要な洗掘深度に関連してロッキング振動の中心位置の推定を試みた。今後、洗掘の実態調査結果などと照合しながら簡便な橋脚の健全度評価手法として確立させたい。

謝辞：JR東日本・大宮構造物検査センターの田中勉所長、JR東海・施設部工事課山本美博課長をはじめ、JRの方々には、測定に協力していただき貴重な資料を提供していただいた。深甚の謝意を表します。