

1.はじめに

橋梁の健全度を把握する上で、桁の振動特性を知ることはきわめて重要である。桁は支承部の固着により拘束され、桁端部に亀裂が生じる危険がある。支承部の拘束を受けている桁では振動数が高くなり、桁の固有振動数を把握することはきわめて困難である。常時微動を用いて桁の拘束程度を推定し、その影響を除去する手法は著者らにより提案されている。ここでは、3つの PC 実橋梁にこの提案手法を適用して、支承部や固着の影響を除去した桁の固有振動数を推定し、提案手法の妥当性を検討したので報告する。

2.測定機器・分析方法

測定には、鉄道総研で開発した PIC を使用した。これは 3 方向 2 組の振動を同時に測定することができる。各測点において、20Hz のローパスフィルターを介して 1/100 秒サンプリングで約 41 秒間(4096 個)の測定を 3 回実施した。これらの記録を FFT によりスペクトル分析しハニングウインドウを 20 回かけて平滑化し、各測点毎に平滑化スペクトル 3 個を平均してフーリエスペクトルとしている。スペクトル比は平均前に算定し、3 個を平均して求めた。

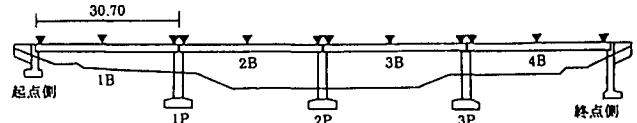
3.常時微動による桁の振動特性

3-1 解析手法

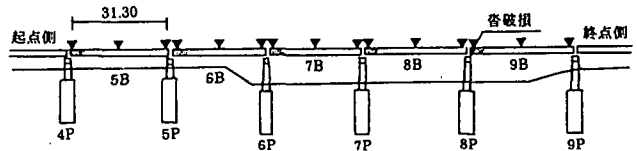
桁の中央で計測される卓越振動数は、桁中央のたわみ量が支承部のバネの沈下を含んで見かけ上大きくなっているため、桁の固有振動数 F より低くなる。見掛けのたわみ量を除去するため、桁の中央と起点側端部、終点側端部にを同時測定する方法が提案されている¹⁾ (図 1 測定位置▼)。この方法によれば、桁の固有振動数 F_b は次のように算出できる¹⁾。

$$F_b^2 = 2 / \left(\frac{1}{F_s^2} + \frac{1}{F_e^2} \right)$$

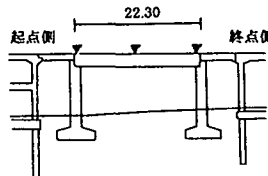
ここに、 F_s 、 F_e は桁中央/端部のスペクトル比から読みとった卓越振動数で、それぞれ起点側、終点側を表す。 F_b には支承部の鉛直方向のバネの影響は除去されているが、線路方向の支承部拘束の影響が含まれている可能性がある。そこで、支承部の影響程度を示す β (桁上端と支間中央での橋軸方向相対変位の 2 倍を支間中央のたわみ量で除した量)¹⁾ を算出する。



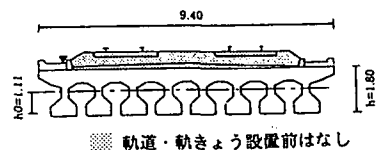
(1)A 橋梁側面図



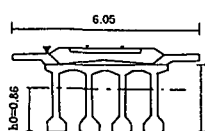
(2)B 橋梁側面図 橋桁端部変状



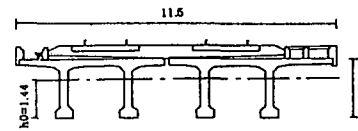
(3)C 橋梁側面図



(4)A 橋梁断面図



(5)B 橋梁断面図



(6)C 橋梁断面図

図 1-全体図及び測定位置図

β は完全自由 β_m から完全固着 β_f の範囲内にあり、固着程度をここでは、

$$\text{固着率} = \frac{\beta - \beta_m}{\beta_f - \beta_m} \times 100$$

で表す。 β を用いて支承部拘束の影響を取り除いた、桁の固有振動数 F は次のように算出される¹⁾。

$$F = F_b \times \sqrt{1 - \pi / (4\alpha)}$$

$$\alpha = \frac{\pi \{ \beta L - 12h + 16h_0 + 8I / (Ah_0) \}}{4\beta L - 8\pi(h - h_0)}$$

h_0 : 梁下から中立軸までの距離, h : 桁高

A : 断面積, I : 断面 2 次モーメント

なお、単純梁の固有振動数は次式により算出される。

$$F = \sqrt{\pi^4 EI / (L^3 W / g)} / 2\pi$$

E : 設計強度に対するヤング率, L : 桁長, W : 桁重量

3-2 常時微動測定結果

以下の 3 つの橋梁について検討を行った。A 橋梁については、軌きょうおよび軌道を設置する前と後の 2 回の測定について検討している。

(1) A 橋梁

本橋梁は 8 主桁 4 連（複線）の新設橋梁でスパンは約 30m である。支承部はゴム沓で、直接基礎である。設計条件によると起点側が固定支承、終点側が可動支承となっている。

(a) 軌きょう・軌道設置前

常時微動測定によると桁の卓越振動数 F_b は 3.4Hz 程度であった。各桁の固着率を求めると、いずれも 10% 前後であり、支承部は正常に機能しているものと推測される。 β より支承部の固着を除去すると、桁の振動数は全体的に 0.3Hz 程度低下し、3.1Hz 前後となると推定される。これから、ヤング率は約 $3.3 \times 10^6 t/m^2$ 前後と推定され、桁の設計強度に対するヤング率にほぼ一致する。

桁のたわみに伴う支承上端の変位は固定支承の上で最も大きく、可動支承の上で最も小さくなる。したがって、線路方向の中央と端部でのスペクトル比をとることによって、可動支承か固定支承かを判断することができる¹⁾。すなわち、一般にたわみが卓越する振動数において固定支承側では 1.0 を下回り、可動支承側では 1.0 を上回る。両端自由の場合は両端で 1.0 を下回るが、 β の値（又は固着率）により完全固着が完全自由かを判断することになる。A 橋梁では支承部が設計条件どおり機能していれば、起点側で 1.0 を下回り、終点側では 1.0 を上回るはずである。スペクトル比からは、1B～3B まではっきりと起点側で 1.0 を下回り、終点側で 1.0

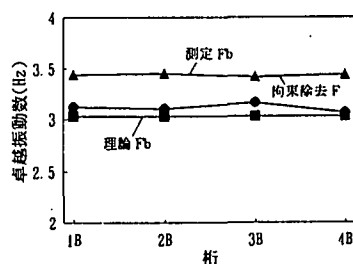


図 2-A 橋梁（前）振動数

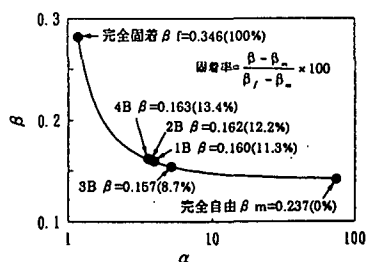


図 3-A 橋梁（前） β 及び固着率

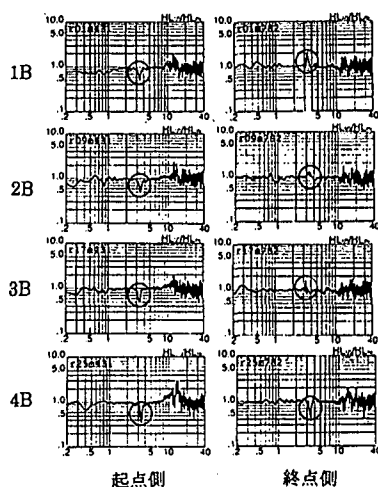


図 4-A 橋梁（前）スペクトル比

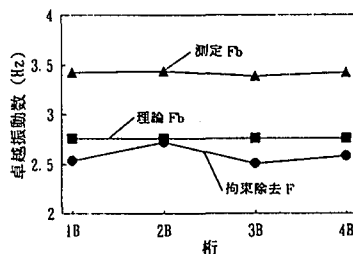


図 5-A 橋梁（後）振動数

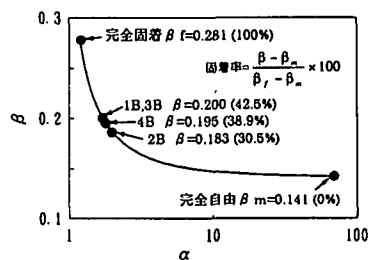


図 6-A 橋梁（後） β 及び固着率

を上回っているのを確認できる。4B では起点側、終点側の両方で 1.0 を下回っているが、固着率が低いことから両端自由であることが推測される。 β およびスペクトル比から 1~3B では両支承部はしっかりと機能し、4B では固定側が可動きみになっていると推測される。

(b) 軌きょう・軌道設置後

常時微動測定によると桁の卓越振動数 F_b はいずれも 3.4Hz 前後であった。各桁の固着率を求めると、1B,3B,4B は約 40% 程度であり、2B は約 30% と比較的小さく、2B が最も可動支承が機能していると推測される。 β より支承部の拘束を除去すると、桁の振動数 F は全体的に 0.8Hz 程度低下し、2B で 2.72Hz、1B,3B,4B で 2.5Hz 前後となると推測される。この支承部の拘束を取り除いた F より推定されるヤング率は約 $3.0 \times 10^6 t/m^2$ となる。スペクトル比は 2B では起点側で 1.0 を下回り、終点側で 1.0 を上回っているのをはっきりと確認することができる。しかし、3B,4B では起点側で 1.0 を下回っているが終点側ではどちらともはっきりしない。1B では両支承部で 1.0 を下回り、固着率=42.5% より両端が固着きみであると推測される。 β およびスペクトル比から判断すると、2B では可動支承が比較的機能しているが、1B,3B,4B では固着きみであると推測される。

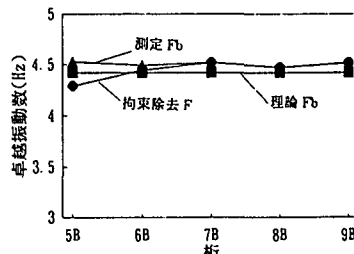


図 8-B 橋梁 振動数

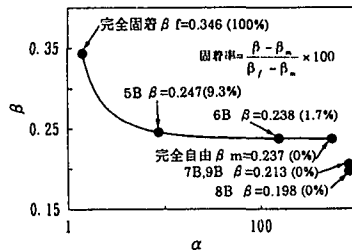


図 9-B 橋梁 β 及び固着率

(2) B 橋梁

昭和 42 年に建設された 4 主桁、13 径間、スパン 31.3m (単線) の橋梁である。橋梁基礎部はケーソンである。支

承部はロッカー沓であり、設計条件によると起点側が可動支承、終点側が固定支承となっている。B 橋梁は釧路沖地震により、ロッカー沓が損傷、桁の固定支承側にひびわれが多く発生した。測定を行った 5B~9B においても固定支承側で桁に亀裂が発生している。特に 8P の可動沓は 4 箇所とも破壊し、転倒したため 8B の桁が 20cm 落下した。桁のひびわれには樹脂を注入し、損傷があった支承部にはゴム沓を設置している。常時微動測定によれば桁の振動数 F_b は概ね 4.5Hz 前後であった。各桁の固着率を求めると、5B、6B では 10% 以下ときわめて低い値となり、7,8,9B では β の下限値 (完全自由) を若干下回っている。よって、下限値を下回る桁については完全自由とみなし、固着率=0% とすることとした。 β により支承部の固着を除去した桁の振動数 F は 4.29~4.52Hz と推測される。ヤング率を推定すると $3.6 \times 10^6 t/m^2$ 前後と問題となる値ではない。スペクトル比からは 6B では起点側で 1.0 を下回り、終点側で 1.0 を上回っているため、ほぼ固定沓と可動沓が機能していると考えられる。5,7,8,9B についてはスペクトル比では両端とも 1.0 を下回り、固着率が低いことから両端自由であると考えられる。 β およびスペクトル比から、6B では両支承部が機能してい

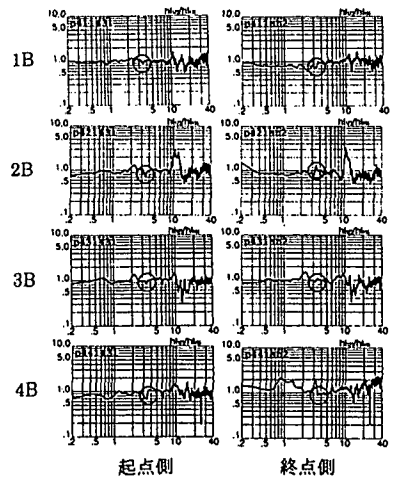


図 7-A 橋梁 (後) スペクトル比

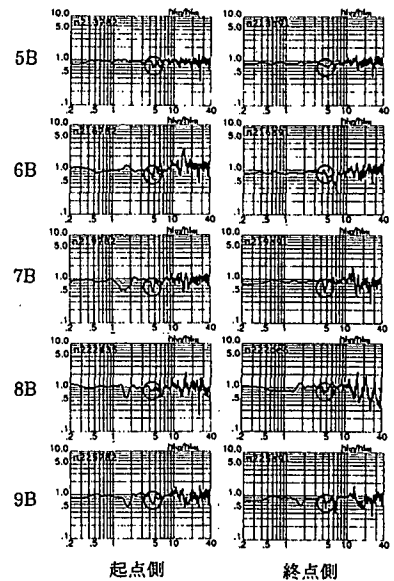


図 10-B 橋梁 スペクトル比

るが、5,7,8,9B では固定支承が機能していないと推測される。地震によって固定支承が損傷した影響があらわれているものであろう。

(3) C 橋梁

本橋梁は 2 主桁 1 径間（複線）、スパン 22.5m の橋梁である。兵庫県南部地震により支承部が破損し、上り線、下り線ともに線路方向（終点側）及び線路直角方向へ 10~20cm 桁ずれしたが、桁自体には損傷がなかったため支承部を補修し、桁を設置している。測定は補修後に行った。常時微動測定によると桁の振動数 F_b は 7.19Hz であった。支承部の固着程度を算出すると、 β は完全自由の下限値を下回る低い値となったが、前項と同様完全自由とみなし固着率=0%とした。推定されるヤング率は $3.8 \times 10^6 t/m^2$ となり、健全であることを示している。スペクトル比から支承部の状態を判断すると、起点側では 1.0 を下回り、終点側では 1.0 を上回っていることが確認できる。 β およびスペクトル比から、起点側では固定支承、終点側では可動支承がしっかりと機能していることが推測される。

3-3 考察

A 橋梁の測定によれば、軌道や軌きょうを設置した後では β は 25% 程度上昇し、スペクトル比でも可動支承と固定支承が判別しにくい結果となることが判明した。これは、桁上部に軌きょう（レール）が敷かれることにより隣接する桁と連結される状態となり、線路方向の動きがおさえられるためと推測される。レールの影響が見掛け上固着率を上昇させ、固有振動数を低く見積もってしまう恐れがある。今後、レールの影響について検討する必要がある。

次に、スペクトル比の状態を図 13 のように便宜的に 5 段階に分け、固着率との比較を行った。これより、起終点のスペクトル比の組み合わせは次の 3 種類が考えられる。①一方で 1.0 を下回り、もう一方で上回るスペクトル比（両支承部が機能している状態）②片方で 1.0 を下回り、もう一方はどちらとも確認できないスペクトル比（固定支承が機能し可動支承が固着きみである状態）③両端で 1.0 を下回るスペクトル比（両端固着又は両端自由の状態）。固着するに従って、①→②→③のように変化していくのがわかる。ただし、○印に示すデータのように、固着率が低いにもかかわらず両端で 1.0 を下回っているのがある。これは両端自由であるためと考えられ、両端自由と両端固着の判別は固着率で判断できることがわかる。以上より、固着率とスペクトル比を用いて支承部の状態を的確に把握できることが判明した。

4. まとめ

3 つの実橋梁において、すでに提案した手法により検討した結果、スペクトル比や β は桁の拘束程度を的確に表しており、桁本体の振動特性を的確に把握することができることが明らかになった。今後、① β が下限値（完全自由）を下回ることに対する改善、②軌きょうによる影響の除去手法の開発、③多数の橋梁を解析することによって、固着による被害と固着率の関係を明らかにすることなどの課題を検討していく。

参考文献 1) 中村、富田、西永：常時微動による橋梁振動特性の推定、鉄道総研報告 Vol7 No12, 1993, 12
2) 富田、中村、西永：常時微動を用いた橋脚の振動特性、第 22 回地震工学研究発表会, 1993.7

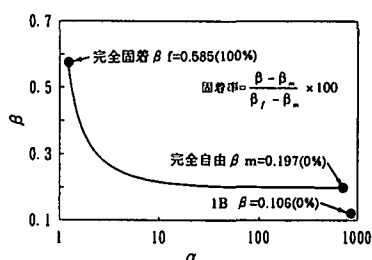


図 11-C 橋梁 β 及び固着率

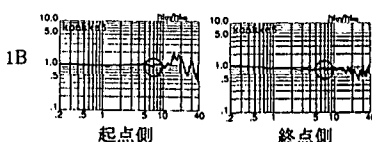
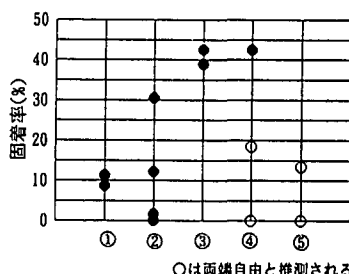


図 12-C 橋梁 スペクトル比



- は両端自由と推測される
①一方で 1.0 を上回り、もう一方を下回るのをはっきりと確認できる
②一方で 1.0 を上回り、もう一方を下回るのを確認できる
③一方で 1.0 を下回るのを確認できる
④両方で 1.0 を下回るのを確認できる
⑤両方で 1.0 を下回るのをはっきりと確認できる

図 13-固着率とスペクトル比