

# 高速列車走行が構造物の耐疲労性能に及ぼす影響

曾我部 正道\* 後藤 恵一\* 徳永 宗正\*

Influence of High-speed Train Running on Fatigue Performance of Structure

Masamichi SOGABE Keiichi GOTOU Munemasa TOKUNAGA

The dynamic response of railway bridges is just a problem of the resonant response of girders that are subject to constant periodical exaitation by running trains. In general, this phenomenon is referred to as “the speed effect of multiple-axle moving loads”. In this study, the influence of high-speed train running on fatigue amplitude and equivalent number of cycles was examined by numerical analysis and measurement. Based on the results of the analysis, we clarified that the dynamic amplitude to be adopted in fatigue design becomes 1.2 to 2.0 times larger than the static one at resonance speed of girder, and equivalent number of cycles increases on girders of over 25m span length. In addition, we showed by measurement that the dynamic amplitude becomes 1.1 to 1.7 times larger than the static one.

キーワード：疲労設計，高速鉄道，共振，レンジペア法，マイナー則

## 1. はじめに

鉄道コンクリート構造物の疲労設計は、例えば、「建造物設計標準（1970年制定）」<sup>1)</sup>や「全国新幹線網建造物設計標準（東北，上越，成田用：1972年制定）」<sup>2)</sup>のように、疲労の影響を受けやすい短スパン（20m未満）の部材に対して、許容応力度を通常より厳しく制限することから始まった。

「建造物設計標準（1983年制定）」<sup>3)</sup>からは、列車の軸重，軸配置および本数の影響等が取り入れられた。即ちレンジペア法<sup>4)</sup>を用いて列車通過による構造物のランダム応答波形を個々の独立波に分解し，これにマイナー則<sup>5)</sup>を用いて設計変動断面力とその繰返しに換算し，修正 Goodman 線図<sup>6)</sup>上で疲労強度を算定する手法である。ここでは，複線や継手の影響などについても定められ，これが現在の疲労照査法のベースとなっている<sup>7)</sup>。また，実務的には，スパン長に関する数表が提供された。

「鉄道構造物等設計標準（1992年制定）」<sup>8)</sup>は，前記を総合的に発展させたもので，限界状態設計法により算定式全体が再構築されたほか，せん断に対する疲労照査法についても示された。また，実務的に用いられる数表は，列車荷重の種類，その組合せ，断面力の種類，スパン長などにより大幅な改訂がなされたほか，民鉄各社の列車への対応も図られた。更に，「鉄道構造物等設計標準（2004年制定）」<sup>9)</sup>では， $2 \times 10^6$ 回を超える鉄筋に疲労限を設けた設計法が取り入れられた<sup>10) 11)</sup>。

一方で，これらの設計法は列車通過による構造物の応答波形を算出する際に，静的な影響線解析を用いており，動的な波形成分に関しては考慮されていない。

図1に高速列車走行による共振と動的波形成分の概念図を示す。走行する列車荷重は，規則的な周期で高架橋・橋梁を加振する，いわゆる起振機とみなせ，列車の走行速度が増加して加振振動数が高架橋・橋梁の固有振動数に近づけば，共振現象が発生し，動的な波形成分が生じる。

近年，新幹線の営業速度は飛躍的に向上しつつあり，加えて限界状態設計法やPRC構造の導入により比較的low剛性の桁の設計も可能になってきたため，動的な波形成分が散見されるようになってきた<sup>12)</sup>。図中の静的な影響線波形は，等価繰返し回数1回と判定されるが，動的な波形成分を考慮した場合，列車通過後のアップリフト

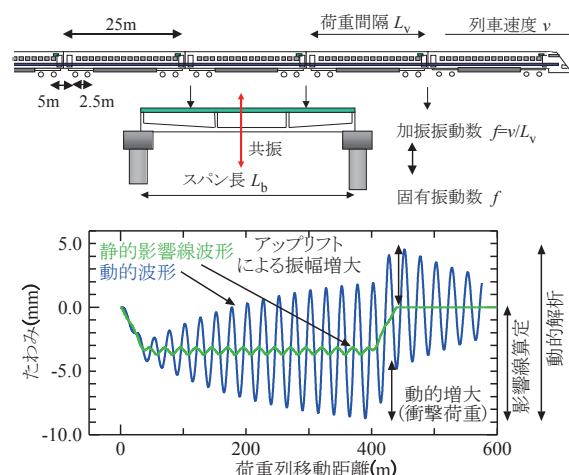


図1 高速列車走行による共振と動的波形成分

\* 鉄道力学研究部 構造力学研究室

特集：鉄道力学

トによる疲労振幅の増大や、桁の固有振動の重畳による等価繰返し回数が増加等が懸念される。また、構造物の余寿命評価の観点からも高速列車通過時の疲労性状の定量化は課題となっている。

以上のような背景から、本研究では、高速列車走行下において、鉄道構造物の動的な波形成分が疲労振幅と等価繰返し回数に及ぼす影響に関して、単純桁を対象として数値解析等により検討を行うとともに、一部測定による検証を試みた。

2. 検討方法

2.1 数値解析法

2.1.1 影響線を用いた算定法

影響線を用いた算定法は、従来から疲労設計で用いられてきた手法で、影響線を用いて列車荷重を静的に移動させて応力波形を算出し、レンジペア法とマイナー則により評価する手法である（以下、影響線算定法という：図1参照<sup>9)</sup>）。

図2にレンジペア法概念図を示す<sup>4)</sup>。レンジペア法では、図中に示した手順により列車通過によるランダムな応答波形を、個々の独立波 ( $S_{r1}, S_{r2}, \dots, S_{rm}$ ) とその繰返し ( $n_1, n_2, \dots, n_m$  回) に分解し、式(1)に示すマイナー則を用いて、各列車の最大変動断面力  $S_{r(max)}$  に換算した等価繰返し回数  $N$  を算出していく。

$$N = \sum_{i=1}^m n_i \cdot \left( \frac{S_{ri}}{S_{r(max)}} \right)^k \quad (1)$$

ここで  $k$  は  $S$ - $N$  線の勾配である。

この手法では、応答波形の算出に静的な影響線を用いているが、断面力に設計衝撃係数を乗じることにより、アップリフト分を除く動的な最大振幅は考慮される。固有振動の重畳は考慮されない。

2.1.2 動的解析を用いた算定法

動的解析には、列車を非振動の定荷重列と見なす、線路構造物の汎用構造解析プログラム DIARIST (Dynamic and Impact Analysis for Railway Structure) を用いた。この解析手法は車両と構造物との相互作用を無視した手法であるが、既往の影響評価結果から、疲労の検討に関しては十分な精度であると判断した<sup>12)</sup>。

列車は、標準的な 25m 新幹線車両の軸配置でモデル化し、16 両編成とした。列車内の軸重は一定とした。構造物は、FEM によりモデル化した。検討対象は、5 ~ 75m の単純桁とし、各桁を 40 分割の梁要素でモデル化した。桁の固有振動数については、RC 桁 (20m 以下) は  $80L_b^{-0.8}$ 、PRC 桁 (20m 以上) は  $55L_b^{-0.8}$  と仮定した ( $L_b$  はスパン長)。数値計算法にはモーダル法 (考慮モード数は 20 次) を用いた。減衰定数は各モードに対し  $\xi = 2\%$  とした<sup>12)</sup>。

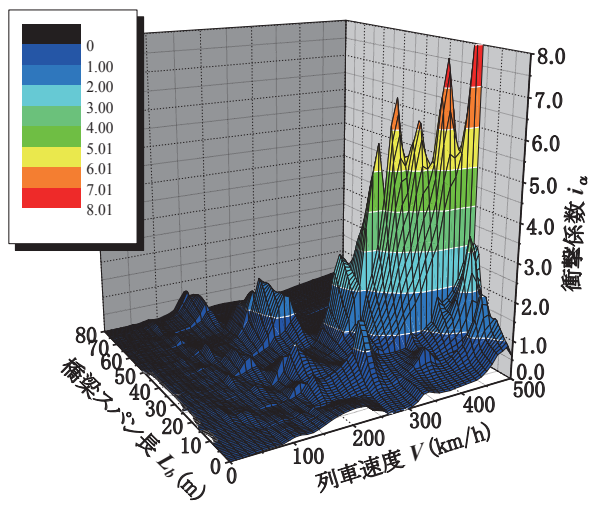
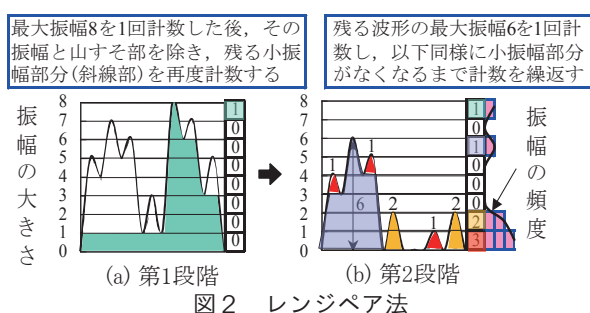


図3 列車速度  $v$ 、スパン長  $L_b$  が衝撃係数  $i_\alpha$  に及ぼす影響

動的解析の波形処理に関しては、影響線算定法と同様に、レンジペア法とマイナー則を用いた。また、本研究では単純梁の断面力に含まれる動的な波形成分を検討対象とし、曲げモーメントと密接な関係にあるたわみを評価指標として用いて整理した。

2.2 測定法

数値解析の検証のために 25 の新幹線桁において測定を実施した。波形の処理は動的解析と同様である。桁のたわみは、主としてリング式変位形 (RTD-10) により測定した。サンプリング周波数は 100Hz (準静的低速時) ~ 200Hz 程度とした。列車は、標準的な 25m 新幹線車両で、8 ~ 10 両編成を用いた。

3. 検討結果

3.1 構造物の動的応答の基本性状

図3に列車速度  $v$ 、スパン長  $L_b$  が衝撃係数  $i_\alpha$  に及ぼす影響を示す。衝撃係数とは、列車の走行により発生する動的な断面力またはたわみの静的応答に対する増加分の割合を意味する<sup>12)</sup>。

速度をパラメータとして見ると、図1に示したように、桁の共振は加振振動数が固有振動数  $f$  の整数倍になった時に生じる。共振速度  $v$  は式(2)のように求まる。

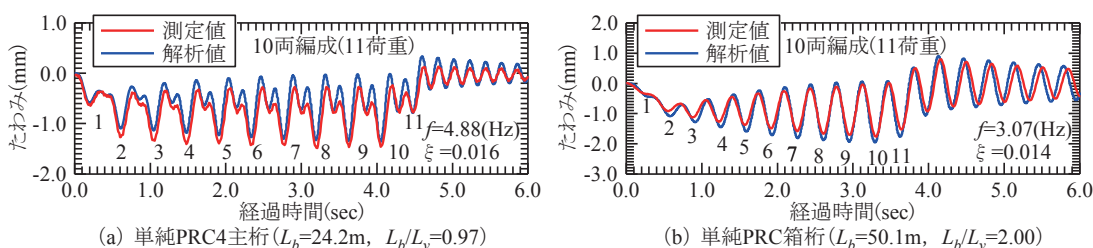


図4 時刻歴たわみ波形の例

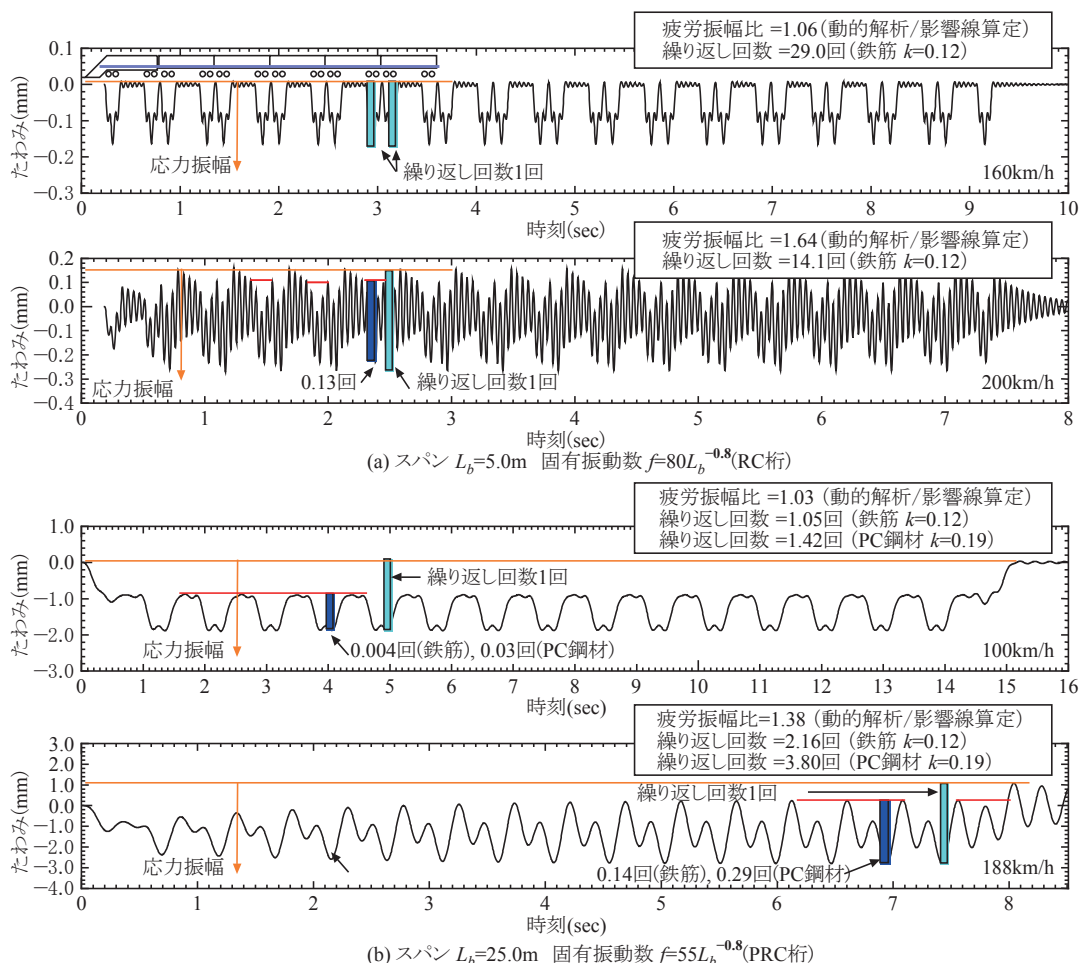


図5 時刻歴波形のレンジペア法とマイナー則による分析例

$$v = f \cdot L_v \quad (2)$$

ここに、 $f$ は桁の基本固有振動数、 $L_v$ は荷重間隔で、軸距、台車間隔、車両長等である。また20m超の桁では、 $L_v$ は車両長25mとみなせる(図1参照)。共振ピークは式(2)の1/2, 1/3の速度においても発生しており、これは、1次の振動モードに対する2次共振、3次共振によるものである。

図4に時刻歴たわみ波形の例を示す。図4(a)は、2次共振の時刻歴波形の例であるが、測定値は、その特徴を非常によく捉えており、数値解析の結果とも概ね一致している。図4(b)は、1次共振の時刻歴波形の例であるが、測定値は、桁の固有振動数と列車の加振振動数が一致した1次共振の特徴を非常によく捉えており、数値解析の結果とも概ね一致している。測定値からは、10

両編成の列車が桁上を通過していく際の共振増幅現象を明確に読みとることができる。

また、図3を俯瞰すると共振ピークの大きさは、スパン $L_b$ にも依存していることが分かる。無次元化スパン $L_b/L_v$ が整数の時、共振が最も顕著となり、逆に1次共振点の消失するスパンも存在する。高速鉄道構造物において、1次共振点消失するスパンは式(3)で表される。

$$L_b/L_v = n + 0.5 \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

これは、非減衰振動において残留振動が零となる特異点であり、連行移動荷重による繰返し効果が消失することによる<sup>12)</sup>。

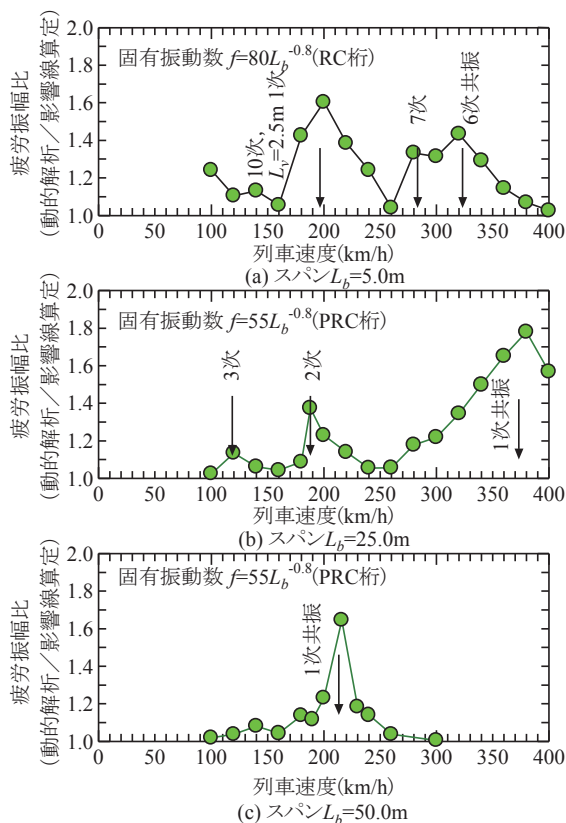


図6 列車速度が疲労振幅比に及ぼす影響

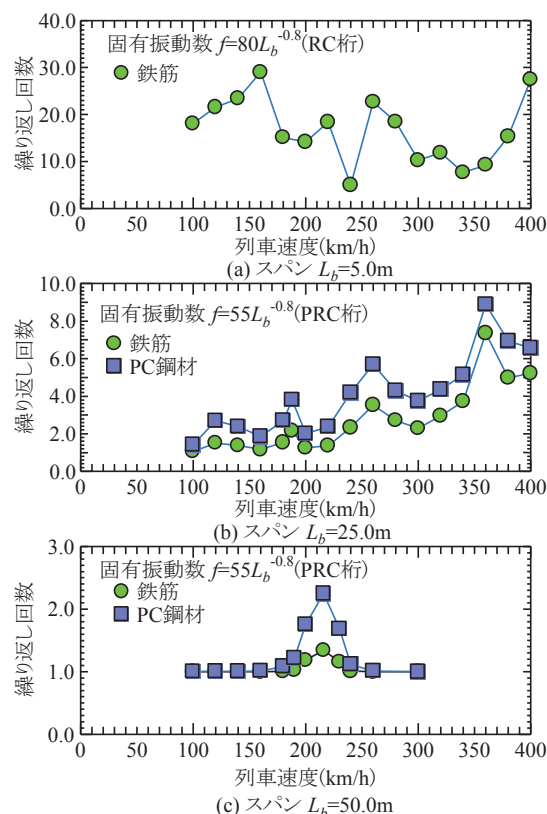


図7 列車速度が繰り返し回数に及ぼす影響

3.2 数値解析による検討結果

図5に時刻歴波形のレンジペア法とマイナー則による分析例を示す。図中の棒はレンジペア法によりカウントされる振幅の大きさを表している。図5(a)は、短スパンの例としてスパン  $L_b = 5.0\text{m}$  について分析した結果である。列車速度  $160\text{km/h}$  では、桁の応答はほぼ静的であり、疲労振幅比は  $1.06$  に留まっている。ここで、本研究で定義した疲労振幅比とは、動的解析と影響線算定との比である(図5参照)。影響線算定では、前述のように応力振幅方向の動的な増加率は衝撃係数を乗じることにより評価しているため、疲労振幅比はアップリフトによる振幅の増加率を表している。疲労振幅比  $2.0$  は、振動が完全な両振り状態であることを意味している。この桁には同時に1台車しか載荷されないため、静的な応力波形算出では繰り返し回数は  $16 \times 2 = 32$  回となるが、動的解析では各台車の応答に若干の差が生じるため、繰り返し回数は減少し  $29$  回となった。列車速度  $200\text{km/h}$  は、軸距  $2.5\text{m}$  を  $L_v$  とした場合の1次共振速度に相当し、加振振動数が桁の固有振動数  $22\text{Hz}$  と一致する。連結器を挟んだ2つの台車の応答増幅率が変化するため、最大応力振幅換算で繰り返し回数を算定すると繰り返し回数は  $14$  回に半減した。一方で、疲労振幅比は  $1.64$  となった。

図5(b)は、長スパンの例としてスパン  $L_b = 25.0\text{m}$  について分析した結果である。列車速度  $100\text{km/h}$  では、

桁の応答はほぼ静的であり、動的応答と影響線算定との疲労振幅比は  $1.03$  に留まっている。この桁のようにスパンが長くなると、列車通過中に完全に除荷される状態が生じなくなるため、静的な応力波形算出では繰り返し回数は1回に近づいていく。繰り返し回数は鉄筋で  $1.05$  回、PC鋼材で  $1.42$  回となった。列車速度  $188\text{km/h}$  は、車両長  $25\text{m}$  を  $L_v$  とした場合の2次共振速度に相当する。列車速度  $100\text{km/h}$  の準静的な応答波形に桁の固有振動が重畳した共振波形となり、繰り返し回数は鉄筋で  $2.16$  回、PC鋼材で  $3.80$  回となった。また疲労振幅比も  $1.38$  に増加した。

図6に、列車速度が疲労振幅比に及ぼす影響を、図7に列車速度が繰り返し回数に及ぼす影響を示す。図6に示した疲労振幅比は、いずれの桁も共振発生速度において増大した。一方、図7に示した繰り返し回数であるが、スパン  $L_b = 5\text{m}$  といった短スパンの桁では、共振により減少した。これは図5に示したように、共振による応答増幅のばらつきから生じたものと考えられる。一方、スパン  $L_b = 25.0\text{m}$  を超える桁では、準静的な応答時の1回から、共振による固有振動の重畳により繰り返し回数が増大した。

図8にスパン、減衰定数、車両編成が疲労振幅比と繰り返し回数に及ぼす影響を示す。動的解析に用いた各スパンにおける検討列車速度は式(2)に従い、1次又は2

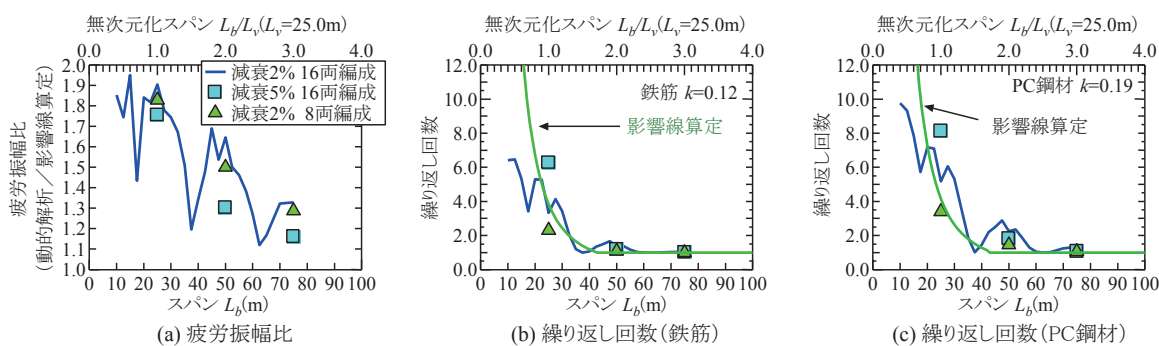


図8 スパン、減衰定数、車両編成が疲労振幅比と繰り返し回数に及ぼす影響

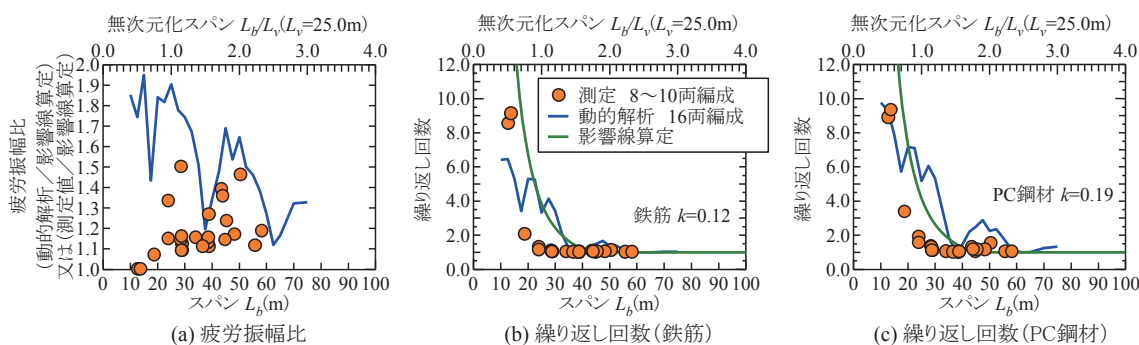


図9 疲労振幅比と繰り返し回数の測定結果

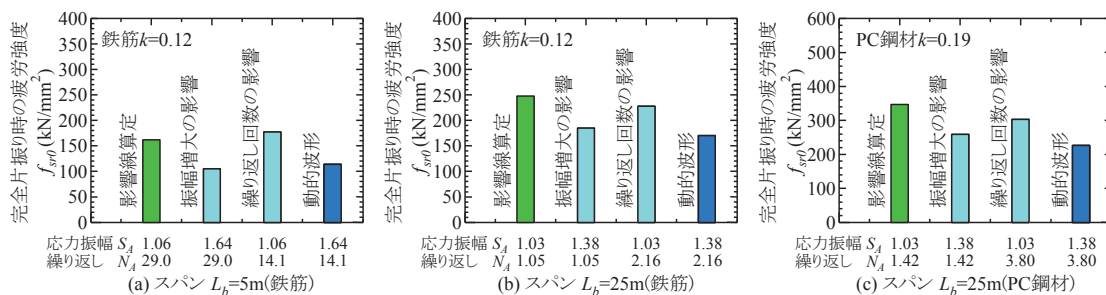


図10 疲労振幅比と繰り返し回数の変動が完全片振り時の疲労強度に及ぼす影響

次の共振速度とした。

図8(a)から無次元化スパン  $L_b/L_v$  が1,2,3の整数の時、疲労振幅比のピークが生じていることが分かる。共振状態における疲労振幅比は、無次元化スパン  $L_b/L_v=1.0$  前後で1.5~2.0、 $L_b/L_v=2.0$  前後で1.2~1.7となった。また、式(3)と等しくなるスパンにおいては特異点における共振消失により疲労振幅比が小さくなっていることが分かる。減衰定数  $\xi=5\%$  の場合、共振の影響が薄れ疲労振幅比も減少した。16両編成と8両編成では大きな差は見られなかったが、これは、減衰定数  $\xi=2\%$  の場合、10両程度で共振増幅が定常状態に達するためであると考えられる。

図8(b),(c)をスパン  $L_b$  の観点から見ると、車両長25mの前後で傾向が異なる。スパン25m以下の桁は、繰り返し回数が減少した。図5で考察したように、スパン25m以下の桁は、同一振幅で繰り返し回数が多い基本性状を有しているが、これが動的な波形成分によ

り乱され、各独立波の振幅に差が生じ、最大振幅に対する繰り返し回数が減少したと考えられる。一方、スパン25m以上の桁は、現行の影響線算定法に沿いつつ、無次元化スパン  $L_b/L_v=2,3$  の共振の影響を受けやすいスパンで、繰り返し回数が増加していることが分かる。繰り返し回数の増加は疲労の影響を受けやすいPC鋼材の方が顕著である。列車を8両編成とした場合、繰り返し回数は荷重数の減少を反映して減少したが、減衰定数を  $\xi=5\%$  とすると、繰り返し回数は増加した。これは減衰定数  $\xi=5\%$  の場合には共振増幅が早い段階で定常応答に達し、一定振幅が持続するためであると考えられる。ただし、図8(a)で示したように疲労振幅比は減衰定数  $\xi=2\%$  の方が大きい。

### 3.3 測定による検討結果

図9に疲労振幅比と繰り返し回数の測定結果を示す。動的解析に用いた各スパンにおける検討列車速度は、式

(2) に従い、1次又は2次の共振速度とし、減衰定数は $\xi=2\%$ 、列車は16両編成とした。

まず、図9(a)であるが、疲労振幅比の測定値は、無次元化スパン $L_b/L_v=1.0$ 前後では1.1~1.5、 $L_b/L_v=2.0$ 前後では1.1~1.7となった。測定は、必ずしも共振速度では行われていないため、疲労振幅比は図上で1.0~動的解析の間に分布することとなったが、無次元化スパン $L_b/L_v$ に対する疲労振幅比の傾向は読み取ることができる。

次に、図9(b),(c)であるが、繰り返し回数は、測定が8~10両編成で行われたため、動的解析や影響線算定に比べて全体に少ない傾向となった。測定は、必ずしも共振速度では行われていないため、繰り返し回数は影響線算定と動的解析の包絡線以下に分布することとなった。図9(b)の $L_b=10\text{m}$ において、測定の繰り返し回数が動的解析を上回るのは、測定した列車速度では波形に動的な影響が少なく振幅が均一化されたためである(図5(a)参照)。

### 3.4 性能照査に及ぼす影響

最後に、疲労振幅比と繰り返し回数の変化が性能照査に及ぼす影響について、完全片振り時の疲労強度 $f_{s,0}$ をベースに考察した。

図10に疲労振幅比と繰り返し回数の変動が完全片振り時の疲労強度に及ぼす影響を示す。検討ケースは、図5の条件とした。完全片振り時の疲労強度算出法は文献9)によったが、断面力は静的な影響線算定による断面力を1.0として基準化した。よって疲労振幅比が応力振幅となる。またこれに対する設計最大断面力は1.6とした。設計耐用期間は100年、列車本数は100本/日とした。

限られた検討ケースではあるが、ここでは動的応答を考慮した疲労強度 $f_{s,0}$ の低下に対し繰り返し回数の増加よりも疲労振幅比の増加の影響が大きく出ていることが分かる。

なお、本研究は、断面力ベースでの検討であるが、厳密には、断面力と鋼材の応力との関係は完全な線形ではなく、複線すれ違いや荷重分担比率など未解明な点も多い。また鉄道コンクリート構造物では軌道等の非構造部材の寄与により実鋼材応力も設計に対して低くなるのが一般的である。これらの検討事項についても別途深度化を図る予定であり、これらを踏まえて最終的な照査法の提言を行いたいと考えている。

## 4. 結論

本研究で得られた知見を以下にまとめて示す。

(1) 数値解析による動的解析と影響線算定との疲労振幅

比は、各スパンの共振速度において、無次元化スパン $L_b/L_v=1.0$ 前後で1.5~2.0、 $L_b/L_v=2.0$ 前後で1.2~1.7となった。

(2) 繰り返し回数については、スパン25m以下の桁では、同一振幅で繰り返し回数が多い基本性状を有しているが、これが動的な波形成分により乱され、各独立波の振幅に差が生じて、最大振幅に対する繰り返し回数は減少する傾向となる。

(3) 一方、スパン25m以上の桁は、現行の影響線算定法に沿いつつ、無次元化スパン $L_b/L_v=2,3$ の共振の影響を受けやすいスパンで、繰り返し回数が増加する。

(4) 疲労振幅比の測定値は、無次元化スパン $L_b/L_v=1.0$ 前後では疲労振幅比は1.1~1.5、 $L_b/L_v=2.0$ 前後では疲労振幅比は1.1~1.7となった。

## 文献

- 1) 日本国有鉄道：建造物設計標準，1970
- 2) 日本国有鉄道：全国新幹線網建造物設計標準（東北，上越，成田用），1972
- 3) 日本国有鉄道：建造物設計標準解説（鉄筋コンクリート構造物および無筋コンクリート構造物），1983
- 4) 伊藤文人：実働荷重による鉄道橋の疲労被害推定，鉄道技術研究報告，No.676，1969
- 5) Miner, M.A. : Cumulative Damage in Fatigue, Journal of Applied Mechanics, Vol.12, pp.A159-A164, 1945.
- 6) Nordby, G.M. : Fatigue of Concrete - A Review of Research, Journal of ACI, Vol.55, pp.191-220, 1958.
- 7) 石橋忠良，大坪正行，青木桂一；コンクリート構造物の疲労設計，国鉄構造物設計資料，No.70, pp.3-8, 1982, 同No.71, pp.20-26, 1982
- 8) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物），1992
- 9) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物），2004
- 10) 曾我部正道，鎌田卓司，谷村幸裕，渡辺忠朋：高繰返し領域での鉄道構造物の疲労照査法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, pp.37-42, 2009
- 11) 吉田幸司，鎌田卓司，谷村幸裕，佐藤勉：高繰返し回数での異形鉄筋の疲労強度に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, pp.1135-1140, 2003
- 12) 曾我部正道，松本信之，藤野陽三，涌井一，金森真，宮本雅章：共振領域におけるコンクリート鉄道橋の動的設計法に関する研究，土木学会論文集，No.724/ I -62, pp.83-102, 2003