

論文 高速すれ違いを考慮した鉄道コンクリート構造物の耐疲労性能

後藤 恵一*1・曾我部 正道*2・徳永 宗正*1・轟 俊太郎*3

要旨：本研究は、高速列車のすれ違い走行が鉄道コンクリート構造物の耐疲労性能に及ぼす影響を、数値解析により検討したものである。具体的には、列車ダイヤの基準時間からのシフト量と確率密度の関係、及び複線すれ違いによる断面力波形を用いて鋼材の疲労強度に関する検討を行った。その結果、複線すれ違い载荷の最大疲労振幅比は共振の影響が顕著になるスパンで大きくなること、完全片振り時の引張疲労強度は複線すれ違い载荷の影響よりも共振によるアップリフトの影響の方が大きいこと、などを明らかにした。

キーワード：疲労設計，レンジペア法，マイナー則，高速鉄道，共振，すれ違い

1. はじめに

鉄道コンクリート構造物の疲労設計は、疲労の影響を受けやすい短スパン（20m未滿）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^{1),2)}。

現行の疲労設計^{3),4)}では、列車の軸重、軸配置及び本数の影響等が考慮される体系となっている。具体的には、レンジペア法⁵⁾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⁶⁾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⁷⁾上で疲労強度を算定する。

筆者等はこれまで、新幹線による高速走行に伴う構造物の共振と、それが疲労に及ぼす影響について研究を進めてきたが⁸⁾、本研究では、複線すれ違い载荷の影響を考慮して、これらの検討の深度化を図ることとした。

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、規則的な周期で構造物を加振する、いわゆる起振機のようなものであり、列車の走行速度が増加して加振振動数が構造物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⁹⁾。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の増加等が生じることとなる⁸⁾。ここで、特に列車ダイヤの交差点、即ち複線すれ違い基準位置がこうした構造物の近傍に設定された場合、特定の構造物で疲労損傷が進行することが懸念される。

複線構造物の疲労設計については、複線同時载荷確率を考慮し、疲労強度を算出する設計式がすでに提案されているが、この複線同時载荷確率について具体的に検討された事例は少ない。小林等¹⁰⁾は、在来線を対象として、モンテカルロシミュレーションと静的な波形の重ね合

せを行い、その影響を評価しているが、新幹線構造物では応力波形の性質が大きく異なることから、新幹線構造物の適切な余寿命評価のためには、より詳細な検討が必要であると言える。

以上のような背景から、本研究では、新幹線列車の高速すれ違いを対象とした以下の課題について検討した。

- (1) ダイヤ基準時間からのシフト量と確率密度の関係を明らかにする。
- (2) 影響線による波形の重ね合わせと、動的解析による波形の重ね合わせの違いについて、明らかにする。
- (3) 上記の影響を考慮した、ダイヤ交差点における鋼材の疲労強度を明らかにする。

2. 検討手法

2.1 単線载荷の応答波形の算出

(1) 動的解析を用いた動的応答波形の算出

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

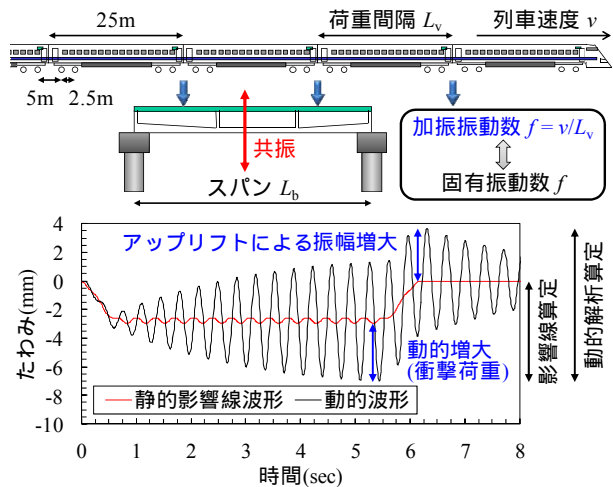


図-1 高速列車走行による共振と動的波形成分

*1 (公財)鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 構造力学研究室 研究員 工修 (正会員)

*2 (公財)鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 構造力学研究室 室長 博(工) (正会員)

*3 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室 研究員 工修 (正会員)

解析手法は車両と構造物との動的相互作用（車両の振動系）を無視した手法であるが、既往の研究結果から、この動的相互作用が応答波形に与える影響は小さいと判断し、この簡易な手法を用いることとした⁹⁾。なお、ここで用いた数値解析手法は、詳細な時刻歴波形レベルに至るまで十分な精度を有することを、実測との対比において既に確認している^{8),9)}。

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、列車速度は新幹線の一般的な設計速度である260km/hとした。

構造物はFEMによりモデル化した。表-1に検討対象構造物の諸元を示す。検討対象は、5~50mの単純桁とし、各桁を40分割の梁要素でモデル化し、桁の固有振動数については260km/hで極力低次の共振速度となるように設定した。

数値計算法は、モーダル法（考慮モード数40次）を用いた。減衰定数は、各モードに対して $\zeta=2\%$ とした⁹⁾。また、本研究では、疲労強度を算出する際の断面力としてスパン中央の曲げモーメントに着目した検討を行った。

(2) 影響線を用いた静的応答波形の算出

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答波形を算出する（以下、影響線という）⁴⁾。

2.2 複線すれ違い载荷の応答波形の算出

図-2に複線すれ違い载荷の応答波形の算出概念図を示す。複線すれ違い载荷の応答波形は、2.1で算出した単線载荷の応答波形に、着目側線及び非着目側線（以下、着目側及び非着目側）の荷重分担率を考慮した上で、すれ違いのタイミングに合わせて応答の開始時間をシフトさせた後、線形に重ね合わせて算出する。

2.3 列車1編成あたりの等価繰り返し回数の算出

(1) レンジペア法による波形の分解

図-3にレンジペア法概念図を示す。複線すれ違い载荷のランダムな応答波形を、レンジペア法⁵⁾を用いて個々の独立波($S_{r1,x,y}, S_{r2,x,y}, \dots, S_{rm,x,y}$)とその繰返し($n_{1,x,y}, n_{2,x,y}, \dots, n_{m,x,y}$ 回)に分解する。

(2) 等価繰り返し回数の算出

(1)で分解した独立波とその繰り返し回数から、マイナー則を用いて、式(1)により最大変動断面力 $S_{r(max)}$ に換算した等価繰り返し回数 $N_{r(max),x,y}$ を求める。

$$N_{r(max),x,y} = \sum_{i=1}^m n_{i,x,y} \cdot \left(\frac{S_{r_i,x,y}}{S_{r(max)}} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (1)$$

ここに、 k はS-N線の傾きである。

2.4 複線すれ違い载荷の確率密度曲線の算出

図-4に基準時間からのシフト量と確率密度の関係を示す。シフト量に対する確率密度は、新幹線の駅通過時

表-1 構造物の諸元

スパン L_b (m)	固有振動数 (Hz)	共振速度(km/h)			
		1次	2次	3次	4次
5	11.59	1043	522	348	261
10	8.72	785	392	262	196
15	5.84	526	263	175	131
20	5.73	516	258	172	129
25	2.89	260	130	87	65
30	2.90	261	130	87	65
35	2.91	262	131	87	65
40	2.88	259	129	86	65
45	2.90	261	131	87	65
50	2.89	260	130	87	65

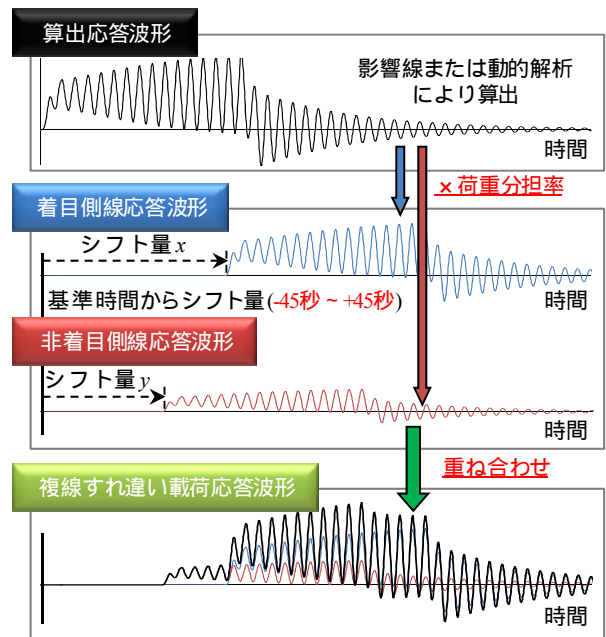


図-2 複線すれ違い载荷の応答波形の算出概念図

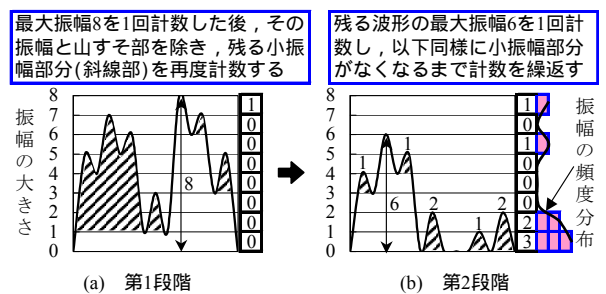


図-3 レンジペア法

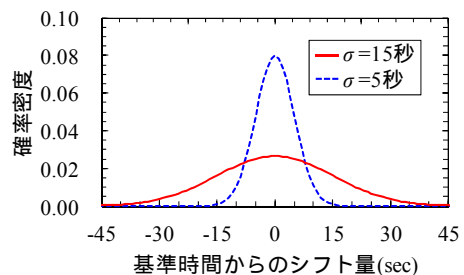


図-4 基準時間からのシフト量と確率密度

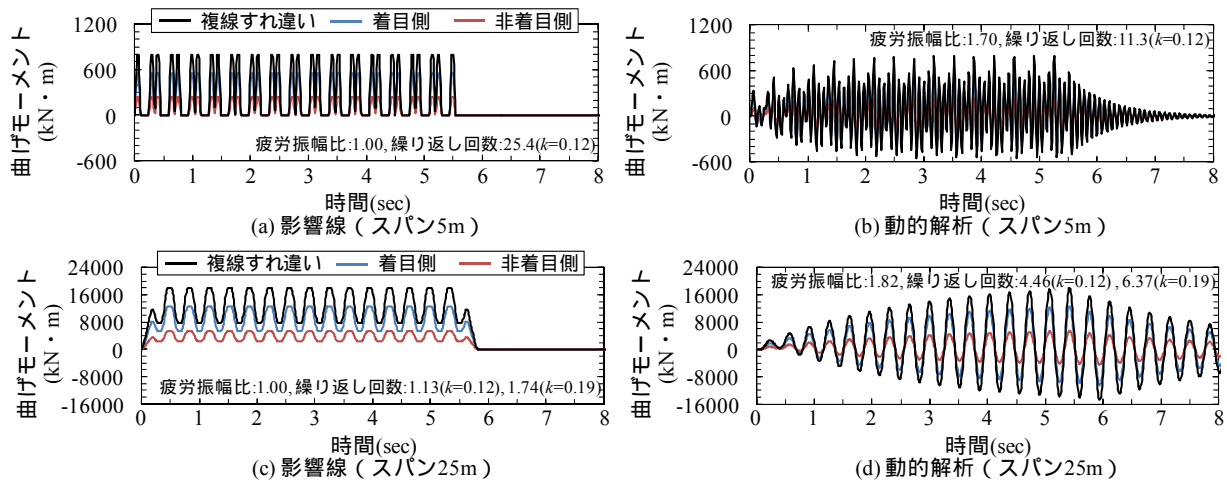


図 - 5 複線すれ違い载荷の時刻歴波形の例 (基準時間からのシフト量：着目側 $x=0$ 秒, 非着目側 $y=0$ 秒)

の許容誤差が一般的に 15 秒程度であることから、標準偏差を 15 秒とした正規分布として仮定した。また、よりすれ違いが生じやすい場合を想定して、標準偏差 5 秒についても検討した。複線すれ違い载荷の確率密度曲線は、この確率密度を着目側・非着目側の列車がそれぞれ持つと仮定し、互いにかけて合わせることで算出した。

2.5 設計列車荷重換算の総等価繰返し回数の期待値の算出

各列車の本数を加味し、式(2)により設計列車荷重による最大変動断面力 S_d に換算した総等価繰返し回数の期待値 $E(N)$ を求める。

$$E(N) = 365T \cdot j \cdot \sum_{x=-45}^{45} \sum_{y=-45}^{45} \left\{ p_{x,y} \cdot N_{r(\max),x,y} \cdot \left(\frac{S_{r(\max)}}{S_d} \right)^{\frac{1}{k}} \right\} \quad (2)$$

ここに、 T は設計耐用期間 (年)、 j は 1 線・1 日あたりの本数 (本/日)、 $p_{x,y}$ は 2.4 で算出した基準時間からのシフト量 x 及び y に対応した複線すれ違い载荷の確率密度である。

2.6 完全片振り時の引張疲労強度の算出

式(3)を用いて、式(2)で求めた総等価繰返し回数の期待値 $E(N)$ から、鉄筋径の影響を補正し、完全片振り時の引張疲労強度 f_{sr0} を求める。

$$f_{sr0} = \frac{10^{\alpha}}{\{E(N)\}^k} \quad (3)$$

ここに、 α_r は鉄筋の径および形状を表す係数である。

2.7 設計引張疲労強度の考え方

比較のため設計疲労強度の考え方についてもここで述べておく。鉄道橋の疲労設計では、繰返し回数、荷重分担、複線等の影響を全て疲労強度側で考慮する手法を用いている。設計における手順では、基準時間からのシフト量 $x \cdot y$ 及び式(2)の確率密度 $p_{x,y}$ を無視し、総等価繰返し回数の期待値 $E(N)$ を総等価繰返し回数 N に置き換え、式(3)を用いて完全片振り時の引張疲労強度を算定

する。次に、完全片振り時の引張疲労強度 f_{sr0} を式(4)に示す修正 Goodman 線図に照らして最小応力度 σ_{\min} による補正を行い、これに継手、複線载荷の影響などを考慮して異形鉄筋の設計引張疲労強度 f_{srd} を求める。

$$f_{srd} = r_1 \cdot r_2 \cdot f_{sr0} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{\min}}{f_{suk}} \right) / \gamma_s \quad (4)$$

ここに、 r_1 は鉄筋の継手、曲げ加工による低減係数 (圧接: 0.7, 曲げ加工: 0.65)、 r_2 は複線を支持する部材における荷重負担率による補正係数で、式(5)により求める。 f_{suk} は鉄筋の引張強度の特性値 (N/mm^2)、 γ_s は鉄筋の材料係数 (一般に 1.05) である。

$$r_2 = \left(\frac{1}{\{a^{1/k} + (1-a)^{1/k}\} \cdot (1-b) + b} \right)^k \quad (5)$$

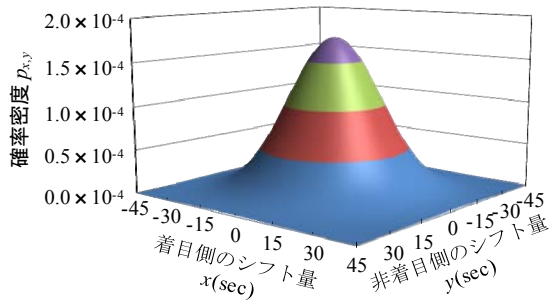
ここに、 a は荷重負担率であり照査対象部材の [1 線载荷による最大断面力] / [複線载荷による最大断面力] で計算され、 b は複線を支持する部材において列車が同時に载荷する確率 (複線同時载荷確率) である。本研究では、T 型桁を想定し、荷重負担率は 0.7 とした。

本研究での式(1)~(3)の手順により求められる f_{sr0} は、設計における式(4)の $r_2 \cdot f_{sr0}$ に相当する。

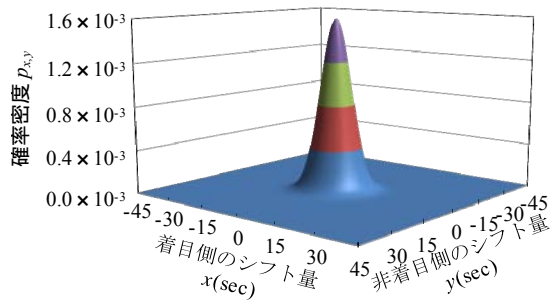
3. 検討結果

3.1 時刻歴波形

図 - 5 に複線すれ違い载荷の曲げモーメントの時刻歴波形の例として、スパン $L_b=5\text{m}, 25\text{m}$ 、基準時間からのシフト量 x, y がともに 0 となる場合を示す。同図は影響線及び動的解析を比較する形で示し、各図には対応する疲労振幅比及び繰返し回数についても示す。ここで、本研究で定義した疲労振幅比とは、各種応答波形の最大変動断面力と影響線における複線同時同方向载荷 ($b=1$) の最大変動断面力との比である。影響線では、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



(a) 基準時間からのシフト量の標準偏差 $\sigma=15$ 秒



(b) 基準時間からのシフト量の標準偏差 $\sigma=5$ 秒

図 - 6 複線すれ違い载荷の確率密度の分布

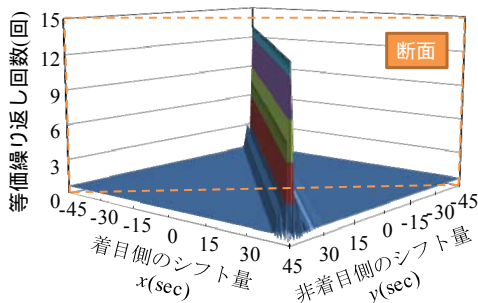


図 - 7 複線すれ違い载荷の等価繰り返し回数の分布 (動的解析, スパン $L_b=25$ m)

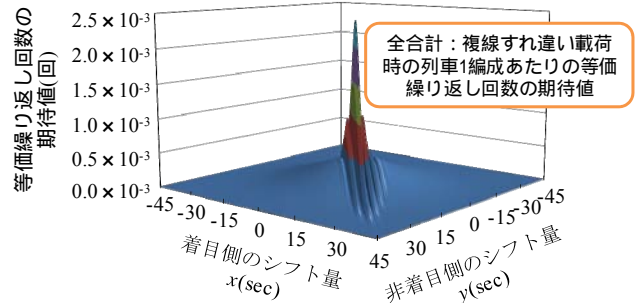
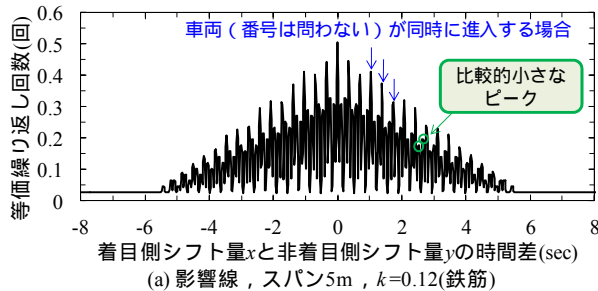
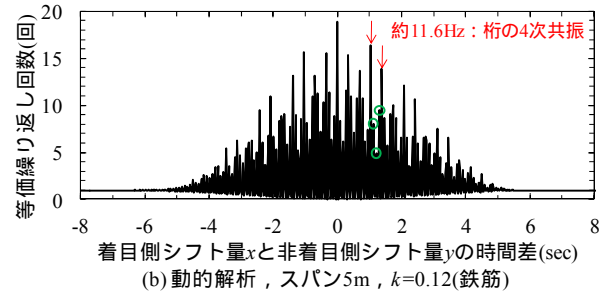


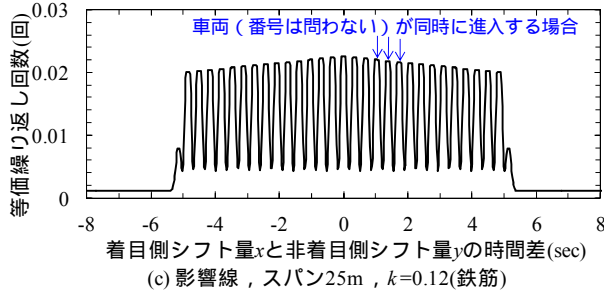
図 - 8 複線すれ違い载荷の繰り返し回数の期待値の分布 (動的解析, スパン $L_b=25$ m, シフト量の標準偏差 $\sigma=15$ 秒)



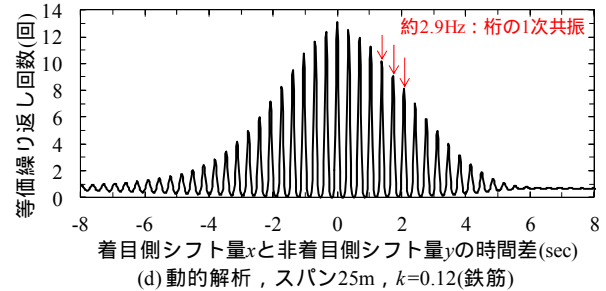
(a) 影響線, スパン5m, $k=0.12$ (鉄筋)



(b) 動的解析, スパン5m, $k=0.12$ (鉄筋)



(c) 影響線, スパン25m, $k=0.12$ (鉄筋)



(d) 動的解析, スパン25m, $k=0.12$ (鉄筋)

図 - 9 等価繰り返し回数と着目側シフト量・非着目側シフト量の時間差の関係例

率を表している。つまり疲労振幅比 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。

図 - 5(a), (b)にスパン $L_b=5$ m の場合の曲げモーメントの時刻歴波形を示す。疲労振幅比に関して、動的解析ではアップリフトの影響により 1.7 に増加した。繰り返し回数に関しては、この桁には同時に 1 台車しか载荷されないため、影響線での繰り返し回数は $16 \times 2=32$ 回となるが、波形出力誤差 (0.01 秒単位で時刻歴波形を出力) のため、繰り返し回数は減少し 25.4 回となった。一方、動的解析は 4 次共振波形であり、アップリフトの影響により繰り返し回数は 11.3 回に半減した。

図 - 5(c), (d)にスパン $L_b=25$ m の場合の曲げモーメント

の時刻歴波形を示す。影響線では、波形が連結器をまったく 2 台車の通過時間に支配されている。一方、動的解析は 1 次共振波形であり、連結器をまったく 2 台車の加振周期 (約 $2.9\text{Hz}=25\text{m}/(260\text{km/h}/3.6)$) に支配されていることが確認できる。疲労振幅比に関しては、アップリフトの影響により 1.8 に増加し、両振りに近い結果になっている。繰り返し回数に関しては、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、繰り返し回数は 1 回に近づいていく。よって、影響線では、鉄筋で 1.13 回、PC 鋼材で 1.74 回となるが、動的解析では、1 次共振による桁の固有振動の重畳により、鉄筋で 4.46 回、PC 鋼材で 6.73 回となった。

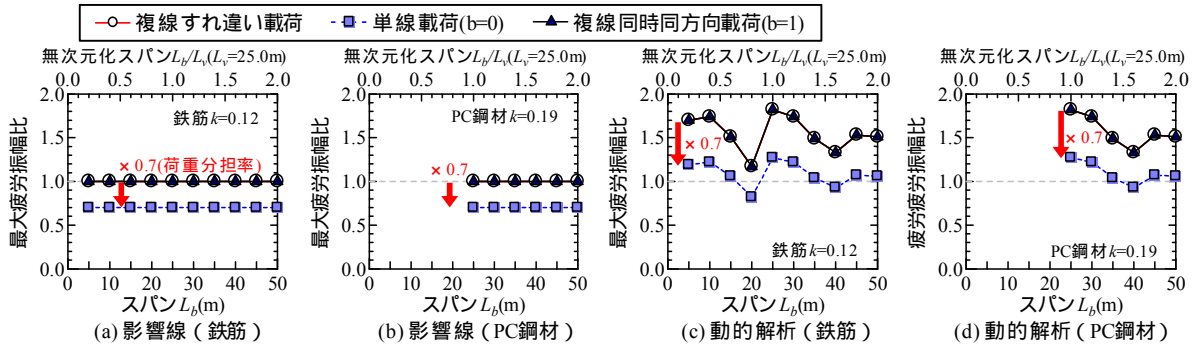


図 - 10 複線すれ違いが最大疲労振幅比に及ぼす影響 ($S_r(\max)$ を影響線の複線同時同方向荷重で基準化)

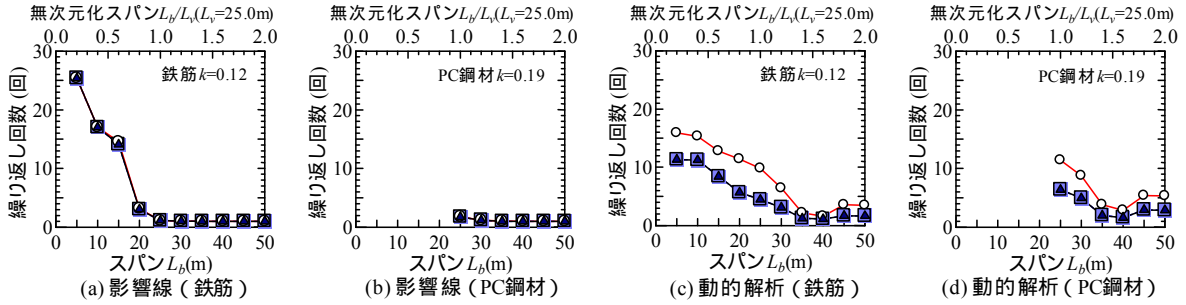


図 - 11 複線すれ違いが繰り返し回数 $n_{i,x,y}(\max)$ に及ぼす影響

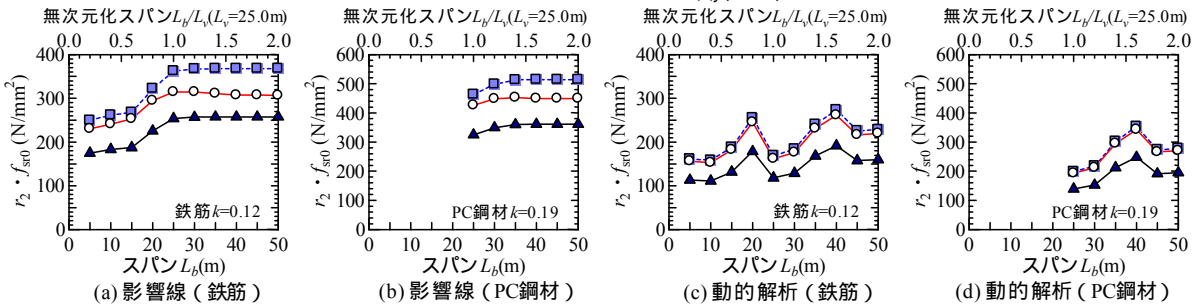


図 - 12 複線すれ違い荷重, 算定法が完全片振り時の引張疲労強度に及ぼす影響 ($t = 15$ 秒)

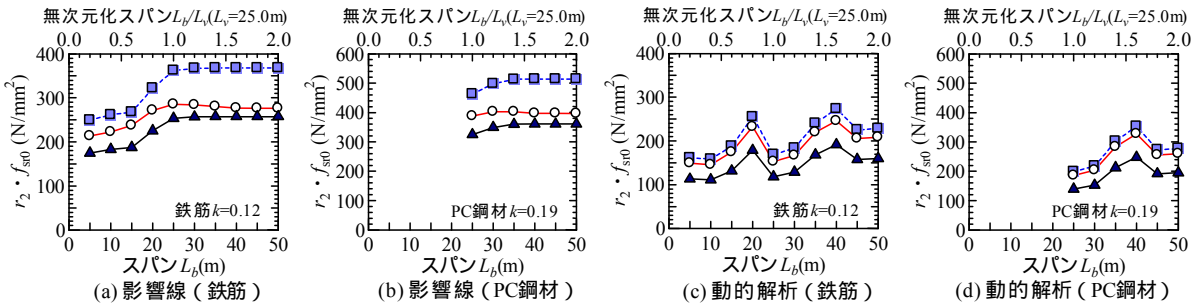


図 - 13 複線すれ違い荷重, 算定法が完全片振り時の引張疲労強度に及ぼす影響 ($t = 5$ 秒)

3.2 複線すれ違い荷重時の確率密度関数

図 - 6 に複線すれ違い荷重の確率密度を示す。図 - 4 で設定した基準時間からのシフト量と確率密度の関係から、すれ違い荷重に用いる確率密度関数 (式(2)の $p_{x,y}$) は図に示すような三次元曲面で表されることとなる。

3.3 複線すれ違い荷重時の等価繰り返し回数

図 - 7 に設計列車荷重による最大変動断面力 S_d に換算した複線すれ違い荷重の等価繰り返し回数の分布を示す。図中の縦軸は、式(2)の中括弧内から $p_{x,y}$ を除いたものに相当する。

図 - 8 には参考までに、複線すれ違い荷重の等価繰り

返し回数の期待値の分布を示す。同図は、図 - 6 と図 - 7 を掛け合わせたものである。図中の縦軸は、式(2)の中括弧内に相当する。この分布を全て合計し、設計耐用期間 (日), 1 線・1 日あたりの列車本数 (本/日) を乗ずることによって、複線すれ違い荷重の影響を考慮した総等価繰り返し回数の期待値 $E(N)$ が算出される。

図 - 9 に設計列車荷重による最大変動断面力 S_d に換算した複線すれ違い荷重の等価繰り返し回数と、着目側シフト量 x と非着目側シフト y の時間差の関係例を示す。同図は、図 - 7 に示す等価繰り返し回数の分布を破線で示す断面でスライスしたものである。同図から、等価繰

り返し回数のピークは、影響線では車両の通過時刻に支配されていることが読み取れる。一方、動的解析では桁の固有振動数と共振次数によりピークが定まっていることが特徴的に読み取れる。ここで、同図中の影響線での小さいピークは、着目側と非着目側の台車の通過時刻が一致した場合、動的解析での小さなピークは、4次共振波形が同位相で重なった場合である。

3.4 性能照査に及ぼす影響

図 - 10 に複線すれ違いが最大疲労振幅比に及ぼす影響を示す。影響線では、アップリフトが生じないため、複線すれ違い荷の最大疲労振幅比は1.0で一定となる。一方、動的解析の場合は、共振の影響が顕著になる無次元化スパンの整数位置（スパン長 25m, 50m）で大きなアップリフトが生じて最大疲労振幅比が大きくなる。

図 - 11 に複線すれ違い荷が繰り返し回数に及ぼす影響を示す。影響線の場合、繰り返し回数が最大となるのは着目側と非着目側の列車が同時には構造物上に存在しない場合となるが、非着目側の列車による振幅は着目側の振幅に比べて小さいため、繰り返し回数はほとんど変動しない。一方、動的解析の場合、共振の位相が逆転した場合にアップリフトの影響で振幅の大きさが整い、見掛け上、繰り返し回数が増大する場合がある（ただし振幅は減少する）。同図から、動的解析においては、複線すれ違い荷の最大疲労振幅比は、列車の加振周期に支配される共振波形の同位相の重ね合わせにより生じていると説明できる。

図 - 12 に複線すれ違い荷が完全片振り時の引張疲労強度に及ぼす影響を示す（シフト量の標準偏差 15 秒）。ここで、設計最大変動断面力と複線すれ違い荷の最大変動断面力の比は 1.6 とした。また、設計耐用期間は 100 年、列車本数は 100 本/日とした。複線すれ違い荷を考慮した引張疲労強度の検討結果は、単線荷（ $b=0$ ）と複線同時同方向荷（ $b=1$ ）の間に位置する。影響線と動的解析を比較すると共振が発生しやすいスパンではアップリフトにより疲労強度が低下している⁷⁾。一方、共振が生じにくいスパンでは、影響線の複線同時同方向荷に近い値となっている。また、動的解析の場合、複線すれ違いの影響は、単線荷に近い傾向となっている。

図 - 13 に複線すれ違い荷が完全片振り時の引張強度に及ぼす影響を示す（シフト量の標準偏差 5 秒）。基本的な傾向は図 - 12 と同様であるが、複線すれ違い荷の発生頻度が増加するため、複線すれ違い荷による引張強度の低下割合が、図 - 12 より大きくなっている。

これらの結果を俯瞰すると、完全片振り時の引張疲労強度は、複線すれ違い荷の影響よりも、共振によるアップリフトの影響の方が大きいと言える。

ただし本研究の結果は限られた条件の内容であり、今

後も更に検討を行う必要がある。例えば、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) ダイヤ交差点における複線すれ違い確率密度曲線を基準時間からのシフト量 15 秒、及び 5 秒について算出した。
- (2) 影響線では、アップリフトが生じないため、複線すれ違い荷の最大疲労振幅比は 1.0 で一定となる。一方、動的解析の場合は、共振の影響が顕著になる無次元化スパンの整数位置で大きなアップリフトが生じて最大疲労振幅比が大きくなる。
- (3) 完全片振り時の引張疲労強度は、すれ違いの影響よりも、共振によるアップリフトの影響の方が大きい。

参考文献

- 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) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) Miner, M.A. : Cumulative Damage in Fatigue, Journal of Applied Mechanics, Vol.12, pp.A159～A164, 1945
- 7) Nordby, G.M. : Fatigue of Concrete - A Review of Research, Journal of ACI, Vol.55, pp.191～220, 1958
- 8) 曾我部正道，後藤恵一，徳永宗正，浅沼潔：高速列車走行が疲労振幅及び等価繰り返し回数に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.2，pp.793-798，2011
- 9) 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
- 10) 小林裕介，杉本一郎：鋼橋の複線同時荷確率を考慮した疲労照査法，鉄道総研報告，Vol.23，No.5，pp.23-28，2009