

動的応答を考慮した鉄道PRC桁の鋼材の疲労寿命に関する検討

(公財)鉄道総合技術研究所	博(工)	○後藤 恵一
(公財)鉄道総合技術研究所	工修	箕浦 慎太郎
(公財)鉄道総合技術研究所	正会員 博(工)	渡辺 勉
(公財)鉄道総合技術研究所	博(工)	上半 文昭

Abstract : Recently dynamic components have appeared in the vibration waveform of the structure during the train passing. There is concern about increase in fatigue amplitude due to uplift and increase in the number of equivalent repetitions due to superimposition of the natural vibration of the girder when considering the dynamic waveform components. Therefore, in this study, the influence of dynamic response on fatigue life of PC steel on the PRC girder was investigated using three dimensional nonlinear FEM analysis. As a result, we clarify that (1) the influence of dynamic waveform components on fatigue life of PC steel can not ignored in the PRC girder to be analyzed and (2) the uplift more influences the fatigue life of PC steel than the superimposition of the natural vibration of the PRC girder.

Key words : Railway , PRC Girder , Resonance , Fatigue

1. はじめに

現在の鉄道構造物の疲労設計¹⁾では、列車の軸重、軸配置および本数の影響が考慮される体系となっている。この設計法では、列車通過の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、動的な波形成分については考慮されていない。一方、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低剛性の桁の設計も可能となってきたため、動的な波形成分が生じる事例が散見されるようになってきた²⁾。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。列車の走行速度が増加して車両による加振振動数が構造物の固有振動数

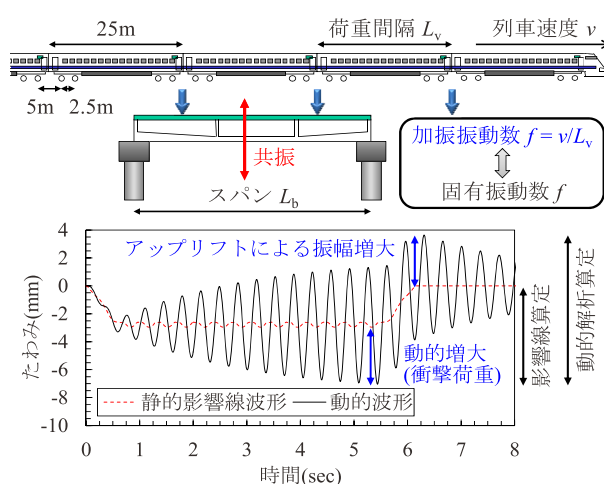


図-1 高速列車走行による共振と動的波形成分

に近づけば共振が発生し、動的な波形成分が顕著となる。図中の静的な影響線波形は、等価繰り返し回数が約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り返し回数の増加が懸念される³⁾。

そこで本研究では、実際に共振の発生が確認されている新幹線PRC桁を対象として、詳細な三次元非線形FEM動的解析により共振時のPRC桁の鋼材（以下、PC鋼材と鉄筋をまとめて「鋼材」と呼ぶ）の応答応力を算出するとともに、動的な波形成分が鋼材の疲労寿命に及ぼす影響を検討した。

2. 共振発生時の桁の挙動と鋼材の応答応力

本章では、PRC 桁の詳細な三次元 FEM モデルを構築し、静的荷重によって基本的な鋼材の応答特性

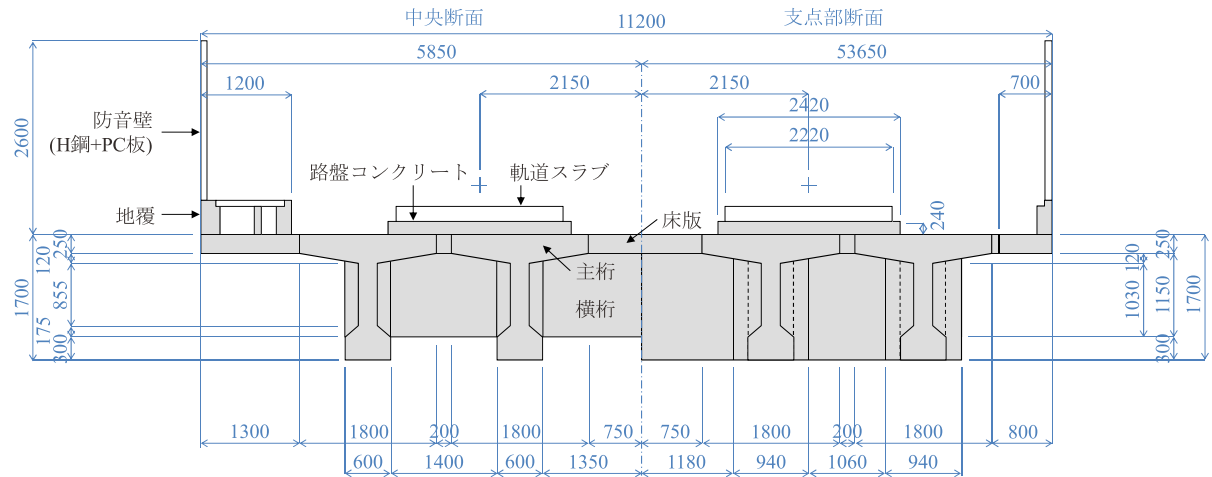


図-2 検討対象 PRC 桁の断面図 (単位: mm) (着色箇所がモデル化範囲)

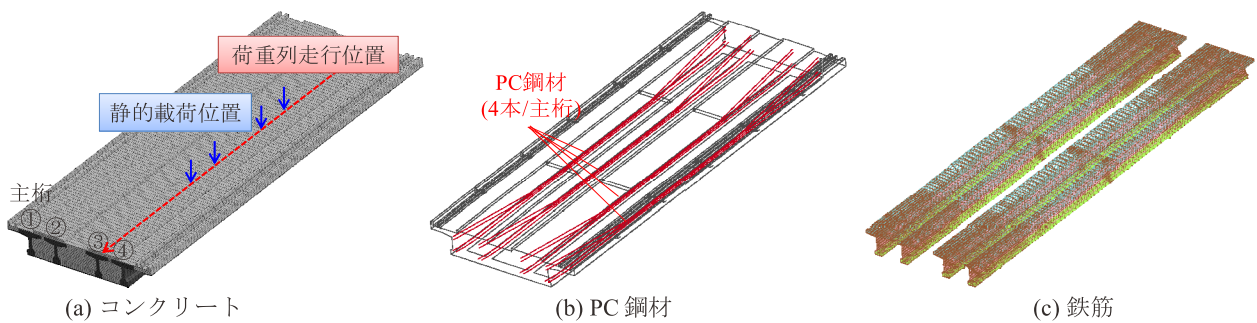


図-3 解析モデル

表-1 材料物性

材料	密度 (kg/m ³)	弾性係数 (GPa)	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)
コンクリート (主桁)	2.50	31.0	40.0	2.69
コンクリート (床版・横桁)	2.50	28.0	30.0	2.22
PC 鋼材	7.80	200.0	-	1562.4
鉄筋	7.80	200.0	-	343.2

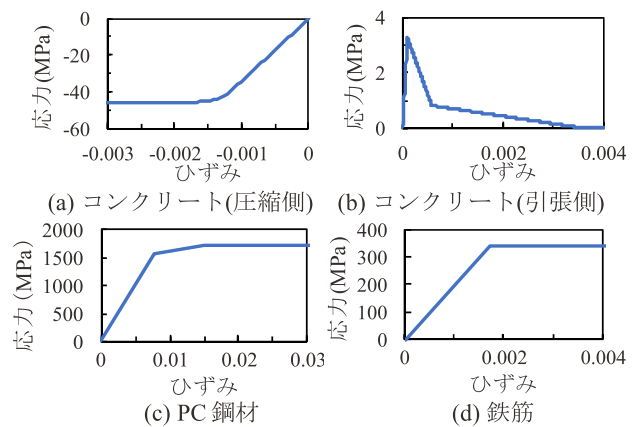


図-4 材料モデル

を把握するとともに、動的荷重によって共振時の鋼材の応答応力を算出した。本検討には、非線形動的解析用汎用コード LS-DYNA (Ver. R9.0.1)⁴⁾を用いた。

2.1 検討方法

図-2に検討対象とした桁の断面図を示す。本検討では、実際に共振の発生が確認されている新幹線 PRC 桁 (ポストテンション式 I 形 4 主桁, スパン 29.2m) を対象とした。図-3に解析モデルを示す。解析モデルは、コンクリート、PC 鋼材、鉄筋から構成した。コンクリートは 1 積分点を有する 8 節点ソリッド要素で、鋼材は 4 積分点を有する 2 節点はり要素でモデル化した。鋼材要素についてはコンクリート要素の内部に埋め込み、鋼材要素の節点位置がコンクリート要素に追従するものとした。プレストレスは PC 鋼材要素に設計上の緊張力と等価になる軸方向の初期引張応力を与えることで表現した。支承はゴム支承位置に配置したばね要素によりモデル化した。軌道および防音壁については、その質量のみを考慮し、軌道の質量は路盤コンクリートの上の節点に、防音壁の質量は地覆上の節点に質量を与えることで表現した。なお、本解析モデルの節点数は 152436、要素数は 135187、桁全体の質量は約 711t であった。

表-1に本解析で用いた材料物性を、図-4に材料モデルを示す。コンクリートはひび割れ軟化を考

表-2 解析ケース

Case	载荷パターン	载荷方法
1	静的単調	定点荷重：単線 4 軸分
2	静的繰り返し	〃
3	動的	移動荷重：単線 12 両分 (170kN/軸, 290km/h)

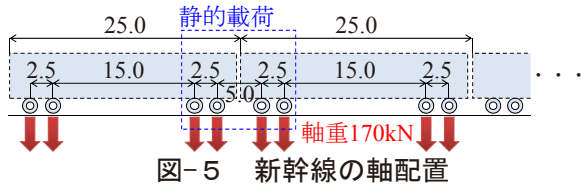


図-5 新幹線の軸配置

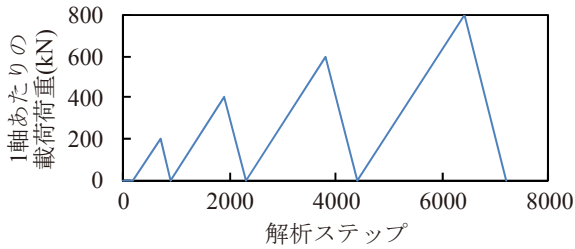


図-6 静的繰り返し载荷の载荷荷重

慮した応力-ひずみ関係を、PC 鋼材はトリリニア型、鉄筋はバイリニア型の応力-ひずみ関係を仮定した。これらの材料は除荷時には初期剛性で弾性復帰するものとした。各材料物性および材料モデルは、設計標準¹⁾および設計値を基に設定した。また、コンクリートについては動弾性係数を用いることでひずみ速度効果の影響を考慮した⁵⁾。

表-2 に解析ケースを示す。本検討では、静的時および共振時の応答を比較するために、静的単調载荷、静的繰り返し载荷、動的载荷の 3 パターンの解析を実施した。静的単調载荷は、図-5 に示す新幹線の軸配置と桁スパンを考慮した際にもっとも曲げモーメントが大きくなるように、スパン中央部に 4 軸分を载荷した (载荷位置は図-3 (a) 参照)。静的繰り返し载荷は、図-6 に示すように载荷荷重を増減させて実施した。動的载荷は、図-5 に示す新幹線荷重 (H 荷重：軸重 170kN) 12 両分の荷重列を共振速度の 290km/h で走行させた (走行位置は図-3 (a) 参照)。軸重についてはコンクリート要素にひび割れが生じるように通常の疲労設計で用いられるものよりも大きな値を用いた。共振速度は桁の固有値解析結果 (1 次曲げモード：3.3Hz) から逆算した。また、静的载荷および動的载荷は、全要素に重力加速度 9.8m/s^2 を与え、桁全体の応答が概ね落ち着いた状態から開始した。動的载荷時の減衰は Rayleigh 減衰を用いて桁の基本固有振動数 3.3Hz で減衰比が 2%¹⁾となるように設定した。本検討方法に関しては、列車通過時の変位の観点から実測との比較を別途実施し、その妥当性を確認している。

2.2 検討結果

図-7 に静的単調载荷における曲げモーメントと各応答値の関係を示す。鋼材応力については各主桁で最大の応答を示す要素を、コンクリート応力については最初にひび割れが発生する要素 (主桁4のスパン中央下面) について示した。主桁変位に着目すると非载荷側の主桁と比較して载荷側の主桁で大きな応答が生じていることが確認できる。また、各応力に着目するとプレストレスにより初期応力が発生していることが分かる。コンクリート応力に着目すると 6000kN*m 程度の曲げモーメントでひび割れが発生し、それに伴い主桁変位および鋼材応力が急激に増加することを確認できる。図には列車走行により想定される曲げモーメントの範囲について示しているが、PC 鋼材および鉄筋の降伏に対して

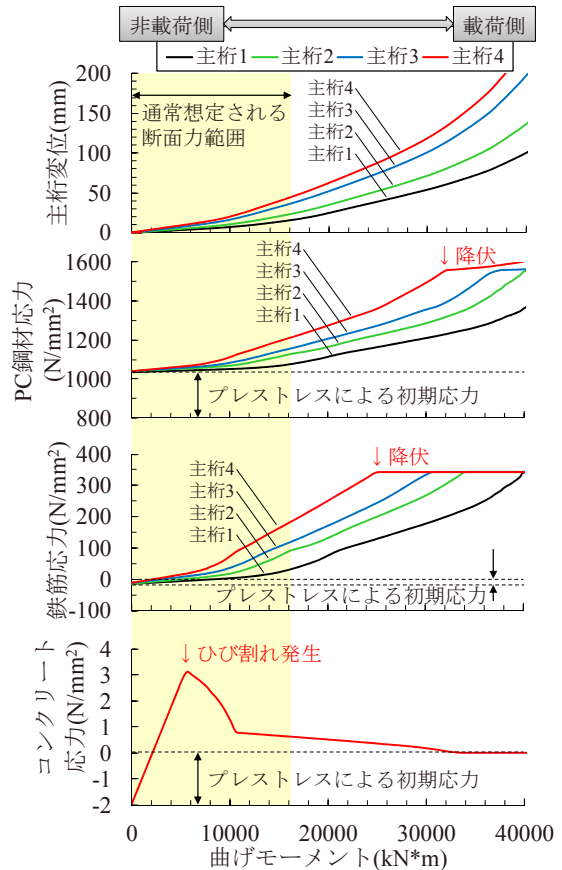


図-7 曲げモーメントと各応答値の関係 (静的単調载荷)

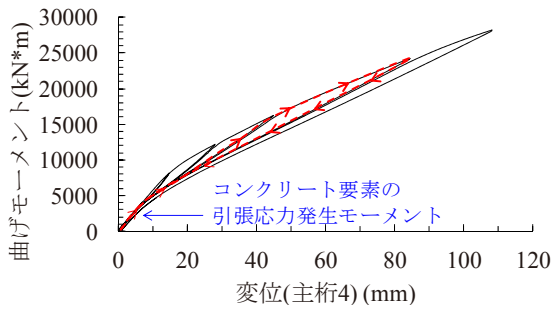


図-8 曲げモーメントと主桁変位の関係 (静的繰り返し載荷)

は比較的余裕があることが分かる。

図-8に静的繰り返し載荷における曲げモーメントと変位の関係を示す。図より、曲げモーメントが増大するにつれて、ひび割れの発生と進展により剛性が低下していく様子が確認できる。図には一部の載荷ループの経路を示しているが、一度ひび割れが発生するとそれ以降の載荷では載荷時および除荷時の剛性が大きく低下していることが確認できる。変位が除荷時にほぼ原点に戻るのには、プレストレスの影響である。一般的に鉄道PRC桁の設計においては、動的応答(衝撃係数¹⁾)を評価する際にひび割れ発生に伴う剛性低下の影響を考慮することは少ないため、ひび割れ発生 の程度によっては剛性低下の影響を適切に評価する必要があると考えられる。

図-9に動的載荷における時刻歴波形の例を示す。

鋼材応力については各主桁で最大の応答を示す要素を、コンクリート応力については最初にひび割れが発生する要素(主桁4のスパン中央下面)について示した。主桁変位に着目すると静的単調載荷と同様に非載荷側の主桁と比較して載荷側の主桁で大きな応答が生じていることが分かる。PC鋼材応力に着目すると、共振による応答振幅の増大、アップリフトおよび固有振動の重畳が確認される。設計時の疲労照査では応答振幅の増大は考慮されるが、アップリフトおよび固有振動の重畳の影響は考慮されないため、これらが鋼材の疲労寿命に与える影響が懸念される。コンクリート応力に着目すると、ひび割れ発生応力に達していることが確認できる。

図-10に静的単調載荷と動的載荷の各主桁変位の比較を示す。動的載荷の変位は応答曲げモーメントが最大となった時の変位、静的単調載荷の変位は動的載荷と同じ大きさの曲げモーメントが発生する時の変位である。動的載荷は静的単調載荷と比較して、共振時には桁の1次曲げモードが卓越するため、同値の曲げモーメントが作用した場合に載荷側主桁の変位が低減されることが分かる。即ち、共振による応答増大を静的荷重に換算して疲労強度を算出する現在の疲労照査は、応答振幅の増大の観点からは安全側の照査となっていると考えられる。一方、前述したようにアップリフトおよび固有振動の重畳の影響は考慮されていない。

3. 動的な波形成分が鋼材の疲労寿命に及ぼす影響

本章では、2章で算出した共振時の鋼材の応答応力を基に、共振の動的な波形成分が鋼材の疲労寿命に及ぼす影響について検討する。本検討では、疲労の観点から厳しい条件となるPC鋼材のみについて

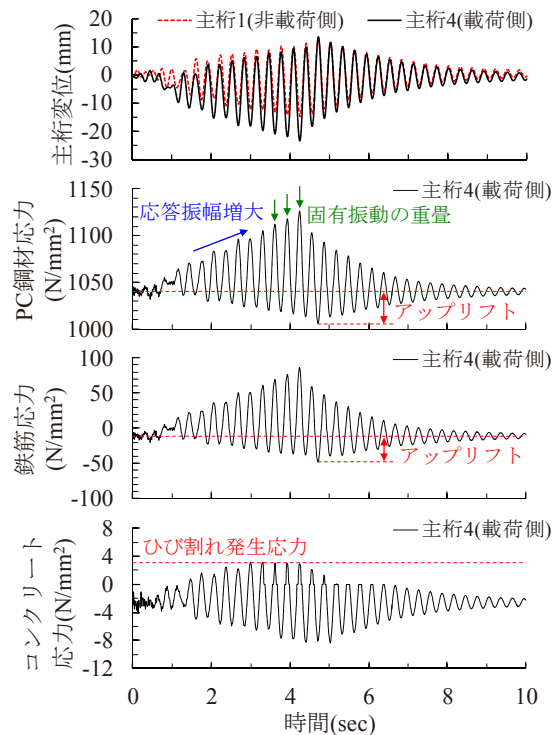


図-9 時刻歴波形の例 (動的載荷)

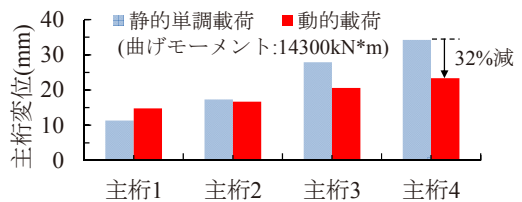


図-10 静的載荷と動的載荷の主桁変位の比較

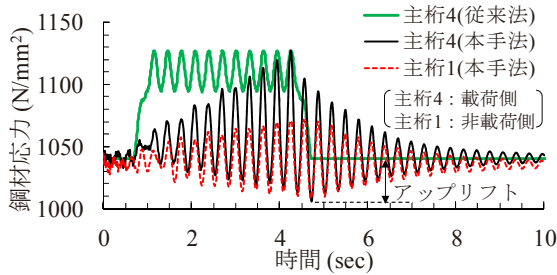


図-11 疲労寿命の検討に用いた応力波形

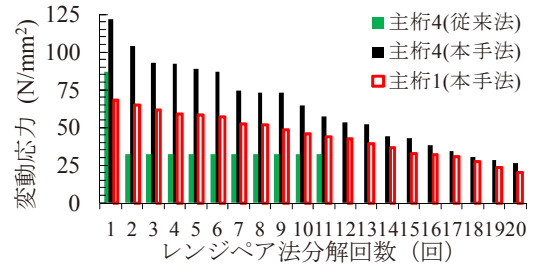


図-13 レンジペア法により分解した変動応力

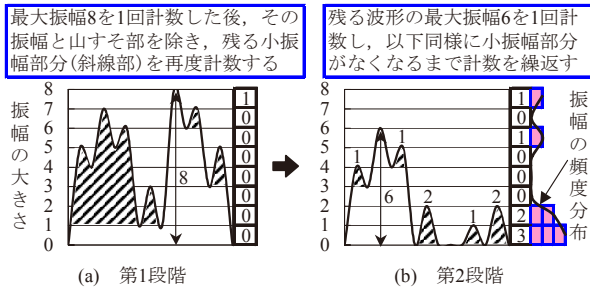


図-12 レンジペア法の概念図

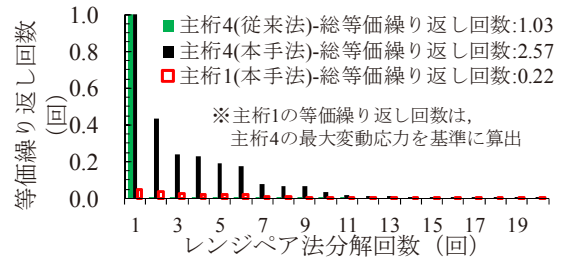


図-14 最大変動応力換算の等価繰り返し回数

て検討を行った。

3.1 検討方法

図-11 に疲労寿命の検討に用いた PC 鋼材の応力波形を示す。2 章の動的載荷で算出した載荷側の主桁 4 および非載荷側の主桁 1 の波形（以下、「本手法」と呼ぶ）である。また、動的な波形成分を有しない現在の設計¹⁾で用いられる静的な応力波形（以下、「従来法」と呼ぶ）についても比較として示した。従来法については、衝撃係数を乗じることでアップリフト分を除く動的な最大振幅は考慮されるが、アップリフトおよび固有振動の重畳は考慮されていないことが分かる。

本検討では、これらの応力波形をレンジペア法と修正マイナー則により評価する。図-11 にレンジペア法⁶⁾の概念図を示す。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鋼材のランダムな応答波形を、個々の独立波 ($\sigma_{sr1}, \sigma_{sr2}, \dots, \sigma_{srm}$) とその繰返し回数 (n_1, n_2, \dots, n_m 回) に分解し、式(1)に示す修正マイナー則を用いて、各列車の最大変動応力 $\sigma_{sr(max)}$ に換算した 1 列車通過あたりの等価繰り返し回数 $N_{r(max)}$ を求める。

$$N_{r(max)} = \sum_{i=1}^m n_i \cdot \left(\frac{\sigma_{sri}}{\sigma_{sr(max)}} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (1)$$

ここに、 k は $S-N$ 線の傾きであり、本検討では 0.19 を仮定した¹⁾。

3.2 検討結果

図-13 に各応力波形をレンジペア法により変動応力に分解した結果を示す。従来法ではアップリフト分が考慮されていないため変動応力は最大でも約 90N/mm² にとどまるのに対し、動的載荷の本手法では載荷側主桁 4 で最大 120N/mm² 程度の変動応力が発生していることが分かる。また、本手法では最大変動応力だけでなく、6 番目に大きくなる変動応力まで従来手法を上回る値であることが確認できる。

図-14 に図-13 の各変動応力をマイナー則により最大変動応力に換算した、列車 1 編成あたりの等価繰り返し回数を示す。従来法では、等価繰り返し回数の合計（総等価繰り返し回数）が約 1.03 回と、列車 1 編成あたりの応力の総等価繰り返し回数がほぼ 1 回としかカウントされないのに対し、本手法では 2.57 回と 2 倍以上の値となっていることが確認できる。

図-15 に、図-13 の最大変動応力（分解回数 1 回目の変動応力）と図-14 の 1 列車通過通あたりの総

等価繰り返し回数から算出した PC 鋼材の疲労寿命に関する検討結果を示す。図中には検討条件も示している。本検討では、全ての列車が共振速度の 290km/h で走行した場合を仮定していること、また鋼材応力を算出する際の軸重も通常設計で用いられるものよりも大きな値を用いていることから、疲労寿命の絶対値自体には大きな意味はない。しかし、静的波形の従来法と動的波形の本手法の相対比較を行うことで、動的波形の影響、すなわちアップリフトと固有振動の重畳の影響を確認することができる。図より、動的応答を考慮した本手法が従来手法と比較して極端に疲労寿命が短くなっており、動的成分の影響を無視できないことが確認できる。また、特に本検討対象桁については、疲労強度に影響する繰り返し回数の影響、すなわち固有振動の重畳よりも、限界値となる最大変動応力の影響、すなわちアップリフトの影響の方が疲労寿命に及ぼす影響が大きいことが読み取れる。

なお、本研究は PRC 桁を対象とした検討であったが、PC 桁や RC 桁などの構造の違い、またスパンや固有振動数が異なれば、動的応答の影響も大きく異なることが想定される。また、本研究では単線走行を仮定しているが、複線すれ違い走行や列車速度のばらつきの影響など未解明な点も多い。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、これらを踏まえて鉄道構造物に対する疲労の照査法および余寿命評価法の提言を行いたいと考えている。

4. 結論

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- 1) 三次元 FEM 解析により、本検討対象 PRC 桁については、通常想定される断面力範囲でひび割れの発生により鋼材応力が急激に上昇すること、鋼材応力は降伏までには余裕があることを確認した。また、主桁変位について静的載荷と動的載荷を比較すると、共振時には 1 次曲げモードが卓越するために、同程度の曲げモーメントが作用した場合には動的載荷の変位の方が小さくなることを示した。
- 2) 三次元 FEM 動的解析により算出した PC 鋼材の応答応力から疲労寿命を算出した結果、従来の静的波形を用いる手法と比較して極端に疲労寿命が短くなり、動的成分の影響は無視できないことを示した。また、本検討対象 PRC 桁については、固有振動の重畳よりもアップリフトの方が疲労寿命に及ぼす影響が大きいことを示した。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) John O. Hallquist：LS-DYNA User's Manual，Livermore Software Technology Corporation，2000
- 5) LenSchwer：The Winfrith Concrete Model，8th European LS-DYNA User Conference，2011
- 6) 伊藤文人：実動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

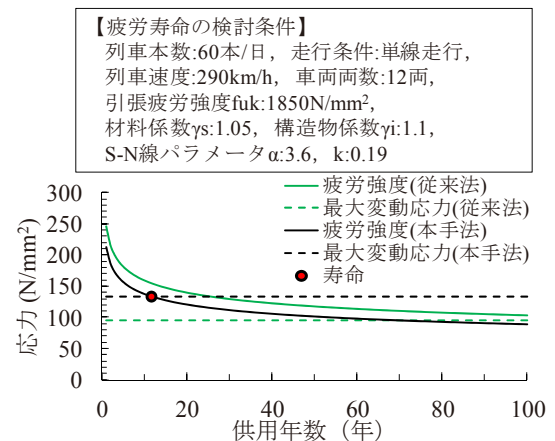


図-15 疲労寿命に関する検討結果（主桁 4）