

鉄道運行情報ビッグデータを活用した 鉄道構造物の疲労強度の推定手法

徳永 宗正* 曾我部 正道** 成田 顕次* 築嶋 大輔***

Estimation Method of Time Dependent Fatigue Strength of Railway Structure Using Railway Information Big Data

Munemasa TOKUNAGA Masamichi SOGABE Kenji NARITA Daisuke TSUKISHIMA

In this paper, we have developed a method to evaluate time dependent fatigue strength of structures based on train operation simulation using the railway operation information big data such as standard time table, run curve, actual riding ratio and running vehicle type. As a result of application of the method to an actual Shinkansen line, a double-track loading probability where trains on both tracks mostly intersect is 5% in the vicinity of the station and 0.2% to 1% in the middle section. In addition, the probability where trains on both tracks simultaneously intersect is 0.5% and 0.02 to 0.1%, respectively. At the position where the occurrence probability of the double-track loading is high, the probability is about 0.5% of the whole train passage at maximum; however, the proportion of double-track loading to the equivalent repetition number of fatigue strength is about 20%. The proposed method can simulate the time dependent fatigue strength of the PC steel of the target bridge based on the assumption that the current operation conditions will continue in the future.

キーワード：複線載荷確率，鉄道運行情報，ビッグデータ，時刻表，疲労強度

1. はじめに

鉄道構造物には古いものも多く、在来線では100年の供用を超えるものも多数存在する。また、新幹線においても供用期間は50年を超えるものもある。構造物は適切に維持管理されれば設計耐用年数を超えてもなお供用を続けることが可能である¹⁾。

高速鉄道の一部橋梁において共振現象²⁾が報告されており、PRC桁を対象としては過去に多くの検討・研究がなされている³⁾。桁の共振が発生し、たわみが増加した場合、安全性（破壊）に対しては余裕度があったとしても、電車線設備の疲労や列車の乗り心地の低下等の使用性に対する問題、また、長期的な繰り返し作用により、鉄筋、PC鋼材の疲労寿命が低下する可能性がある。供用期間中の実構造物を対象として、鋼材に累積する疲労をモニタリングし、疲労破壊に対する安全性を評価するのは難しい。現状では鉄筋等を部材から取り出して、疲労試験を行う等の方法しかなく、非破壊かつ定量的な評価手法の確立が望まれている。

著者らは、仮想ダイヤおよび設計図書に基づく条件で複線載荷が疲労強度に及ぼす影響を検討している^{4) 5)}が、これは既設構造物の評価に適用できるものではない。一方、鉄道においては、一定期間毎に更新される標準ダ

イヤに基づき発車時刻、車両型式が規定されており、特に近年の新幹線においては乗車率等のデータベースも記録に残っている。これらの鉄道運行情報のビッグデータを活用することで、構造物が経験した荷重履歴をある程度の精度でモデル化できる可能性がある。

本稿では、鉄道運行情報を活用した鉄道構造物の疲労強度の経年評価が可能なシミュレーション手法を開発し、既設新幹線線区を対象として複線載荷確率および疲労強度の経年変化の試算結果を示す。

2. 解析手法

2.1 列車運行シミュレーションに基づく動的応答解析手法

2.1.1 シミュレーションシステムの全体構成

図1に、本研究で開発したシミュレーションシステムの全体構成について概要を示す。本システムは、鉄道運行情報ビッグデータ、およびCROSS, LOAD, RESPONSE, FATIGUEの4つの解析モジュールにより構成される。鉄道運行情報ビッグデータとして、列車運行については日々記録される乗車率、および一定期間毎に更新される標準時刻表、標準ランカーブの3種類を用いる。乗車率は、実際には駅間毎に変動するため、対象とした駅間のデータを抽出して用いた。

標準時刻表、標準ランカーブは概ね1年程度毎に実施されるダイヤ改正毎に変化する。ダイヤ改正では、増便、

* 鉄道力学研究部 構造力学研究室

** 鉄道力学研究部

*** 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター

特集：鉄道力学

減便、新型車両の投入、速度向上等により、構造物に及ぼす作用が大きく変化する。標準時刻表には、発車時刻、到着時刻、車両型式等の情報が規定されていることから、車両種毎に予め算出した車両重量と乗車率から軸重を算出した（一人当たり重量 65kg と仮定）。この際編成毎の車両数も忠実に再現した。標準ランカーブは、駅の停車の有無やダイヤの余裕度で大きく変化する事から、各編成に対応したものをを用いることでその影響を考慮した。実際の運行ランカーブは運行の乱れや運転士に依存して変化するが、本研究の範囲では入手の難易度等を勘案して標準ランカーブを用いた。

LOAD は、対象構造物上を通過する各列車編成に対して、ビッグデータから得られる車両情報と実際の乗車率に基づき、構造物に作用する軸重と位置の関係を算出し、荷重列によりモデル化するモジュールである。この際、LOAD に組み込まれた CROSS によって、対象編成が単線荷重もしくは複線荷重として対象構造物上を通過するのかを判定する。RESPONSE は、算出された荷重列を有限要素解析に導入し、構造物の動的応答を算出するモジュールである。この際、通過毎の構造特性の変化、例えば RC 構造物のひび割れによる剛性低下、基礎地盤やバラストの残留変位の累積等を記録して、次回の解析に反映する機能を導入した。FATIGUE では、着目要素の応力の応答波形をレインフロー法にて応力振幅に分解し、経年によって低下する疲労強度を評価する。次項以降、それぞれのモジュールの詳細を説明する。

2.1.2 CROSS モジュール

CROSS においては、対象列車編成に該当する標準時刻表、標準ランカーブの情報を用いて、対象構造物上において、上下線片方だけに列車が通過する単線荷重となるのか、上下線両方の列車通過の影響を受ける複線荷重^{4) 5)}となるのかを判定する。

図2に、ランカーブとダイヤの関係を示す。図は、終点から起点に向かう上り列車の例である。対象構造物の上下線通過の時刻差を評価するためには、列車運行シミュレーションが必要となる。通常、列車運行で用いられるランカーブを作成する際には、対象線区の勾配、曲線、速度制限、編成車両等の条件と、車両性能に関係する引張力、列車抵抗、制動力等の関係を考慮して、図2(a)に示す位置 s と速度 v の関係が設定される。一方、図2(b)に示すダイヤでは、列車編成の走行する駅の発車時刻、到着時刻、通過時刻が示されている。ダイヤ上では位置 s 、時間 t の関係は直線で示されているものの実際には位置に依存して変化することから時間曲線となる。ランカーブで定義される $s-v$ 関係からダイヤ上の時間曲線である $s-t$ 関係を求めるには、 $\Delta T = \Delta s / \bar{v}$ によりランカーブを微小区間に離散化し数値積分する。ここで、 ΔT は微小区間に要する時間、 Δs は微小区間の距

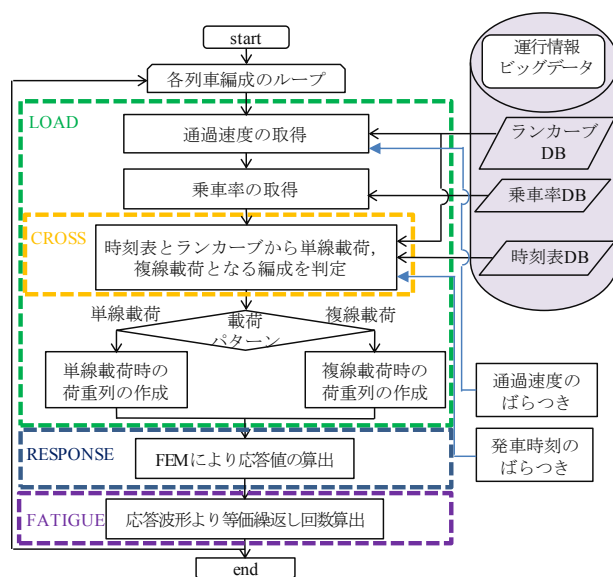


図1 シミュレーションシステムの全体構成

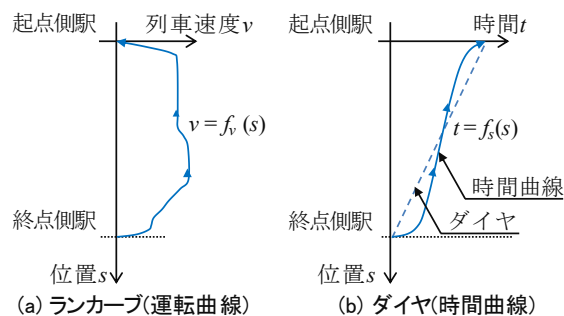


図2 ランカーブとダイヤの関係

離、 \bar{v} は微小区間における平均速度である。本稿では、18420m の駅間を対象として、試行錯誤的に微小区間増分を小さくしていったところ、2m 程度まで分割することで、ランカーブとダイヤから算出される駅間の所要時間が概ね一致する結果となった。以下、微小区間増分 Δs を 2m として検討を進めることとした。

図3に、CROSS における複線荷重の判定方法を示す。図は、対象構造物近傍の駅間におけるダイヤの概念を示している。1日の列車運行ダイヤを考えると、対象構造物上で複線荷重となる組み合わせは限られている。標準ダイヤの発車時刻および到着時刻から、複線荷重となる可能性のある組み合わせに対してのみ、図2で示した時間曲線を算出し、詳細な上下線の交差位置を算出することとした。算出された交差位置と対象構造物の位置の距離が探索範囲以内であれば、上下線の通過波形の重畳の影響があるものとして、複線荷重と判定した。列車速度を 260km/h とすると、300m の編成列車が 30m の橋梁を通過するのに要する時間は 5 秒程度であることから。共振による残留波形と発車時刻のばらつきを考慮しても 15 秒程度の時間差を見込んでおけば十分と考えられる。従って、交差位置が対象構造物から遠い場合には実際

にはほぼ単線載荷の状態となる可能性もあるが、本稿では、列車が 260km/h で 15 秒走行する距離と概ね等しい 1000m を探索範囲として判定を行った。

2.1.3 LOAD モジュール

LOAD は、対象構造物上を通過する対象列車編成を、列車荷重による荷重列でモデル化するモジュールである。

図 4 に、複線載荷時の列車荷重による荷重列のモデル化概要を示す。荷重列では、各列車編成の輪軸の位置に輪重が作用するものとして、列車速度を考慮して荷重 - 時間関係を設定する。輪重は、列車編成で使用される車両の空車重量に定員、単位重量 650N/人、データベースから得られる実際の乗車率を考慮して算出した。CROSS においては、図 1 の発車時刻のばらつきで示すように、上下線駅の発車時刻を標準ダイヤに正規分布による乱数を加えることで、日々のばらつきを考慮した。また、列車通過速度も標準ランカーブにより得られる列車速度に正規分布による乱数を加算することで、日々のばらつきを考慮した。列車速度が乱数の加算により設計速度 260km/h を超えた場合には 260km/h の上限を設けた。

2.1.4 RESPONSE モジュール

RESPONSE は、LOAD により作成された荷重列を有限要素解析⁶⁾に導入し、構造物の動的解析を実行するモジュールである。システム全体の負荷として RESPONSE で要する処理時間の割合が大きく、数十万～数百万編成の列車通過の繰り返しシミュレーションを現実的な時間内に実施するためには、再現すべき現象を必要十分に考慮できる範囲で縮小モデルを用いて計算の高速化を図ることが望ましい。そこで本論文では、基礎的な検討として、図 5 に示すように複線を保持する桁である対象構造物を上下線に分離し、各々を線形梁要素によりモデル化した。列車が載荷側の線の反対側を通過した場合にも一部の荷重を負担することから、この上下線の梁要素に対して、列車通過側となる載荷側と非載荷側の荷重の比を 7:3 として荷重列の絶対値を設定し作用させた。

数値計算では、運動方程式を Newmark- β 法により時間増分 Δt 単位に解いていく。解析に用いた Δt は 1 次固有周期の 1/20 秒を標準とした。

2.1.5 FATIGUE モジュール

鋼材や接合部、鉄筋等の疲労の蓄積を評価するためには、供用開始から経験した各列車通過による応答波形を分析する必要がある。本論文では、コンクリート構造物を設計する際、鉄筋の疲労照査に取り入れられている応力照査による体系¹⁾に準拠した評価手法とした。なお、季節変動による構造物の性能の変化や、コンクリート材料の収縮やクリープ等は考慮せず、活荷重の繰り返しによる疲労強度の低下に着目した検討を実施している。

図 6 に、FATIGUE における時間依存疲労強度 f_{sr} の評価方法を示す。同図に示すように、各列車編成が通過

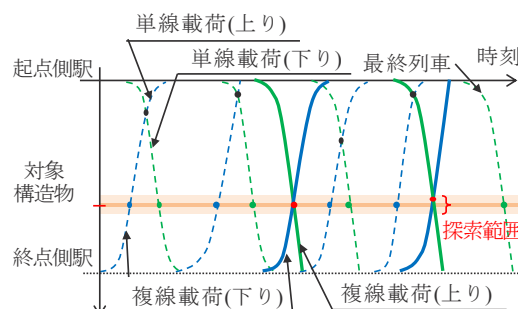


図 3 複線載荷の判定方法

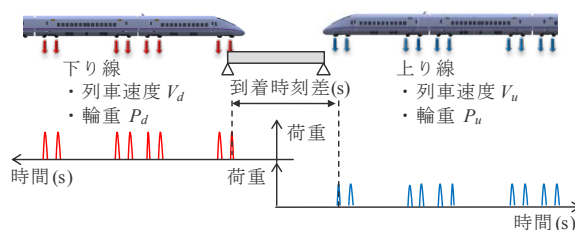


図 4 複線載荷時の列車荷重による荷重列のモデル化

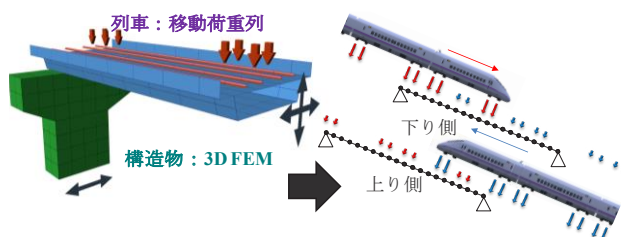


図 5 有限要素法による動的解析手法の概要

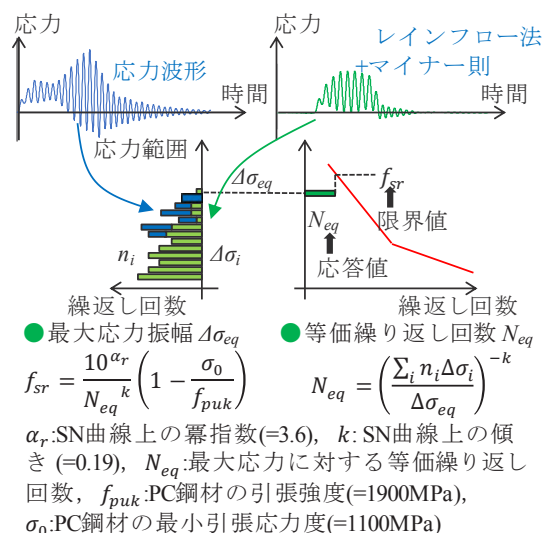


図 6 疲労強度の算出方法

した際に得られる着目点の応力の応答波形をレインフロー法によって各応力振幅の独立波と繰り返し回数に分解し、マイナー則を適用して最大応力振幅 $\Delta \sigma_{eq}$ と等価繰り返し回数 N_{eq} を算出する。着目箇所は主桁最下縁の PC 鋼材応力とする。評価時期における各列車編成 i に対する最大応力振幅 $\Delta \sigma_i$ 、等価繰り返し回数 n_i を算出し、図中に示す式に基づき時間依存疲労強度 f_{sr} を算出する。

特集：鉄道力学

2.2 検討対象構造物および線区

対象線区は、供用20年の既設新幹線のA、B駅間18420m程度の線区とした。本線区においては、供用20年程度で434257編成の列車が通過した。列車は上下各30～40本/日、列車は8両もしくは12両編成、乗車率は5～19.5%、列車の通過速度は20～260km/hであった。現時点の供用期間である20年程度までは実際の運行情報を用い、それ以降は現状の運行状況が継続されると仮定して、最終年のデータを繰り返すことで200年間のシミュレーションを実施した。なお、著者らは、過去に高速鉄道の定点観測における通過時刻のばらつきを実測したが、標準偏差は15秒程度であったことから、この値をCROSSにおいて発車時刻のばらつき標準偏差として考慮した。

対象構造物は、標準設計が適用された支間29.2mの複線PRC桁とし、A駅から8400mと13400mに位置する2構造物とした。対象線区内の本桁においては、個体により固有振動数が2.6～3.8Hz程度にばらつく実測結果が得られている。本論文では代表的なケースとして、1次固有振動数を2.8Hzとなるように主構造の剛性を設定した。

3. 解析結果

3.1 列車運行シミュレーションによる複線載荷の発生回数

図7に、CROSSにより算出した上下線の複線載荷の発生位置と年代の関係を示す。同図は、発車時刻のばらつき標準偏差を15秒とし、期間は供用開始から20年程度の結果である。算出された全ての発生回数を、30m毎の区間に区切って交差回数を積算し、複線載荷の発生回数が多い箇所を黄色、少ない箇所を青色として描画した。縦軸が年代を示しており、軸の上が供用開始で、下が現在となる。この図から、年代に応じて複線載荷の発生箇所の傾向が変化していることが分かる。これは、対象線区では概ね年に1回ダイヤ改正が行われてきたことから、各標準ダイヤにおける上下線の交差箇所が変化したためと考えられる。また、距離程によって複線載荷の発生回数が大きく異なっており、例えば距離程13000m周辺においては、近年に至るまで長期にわたって複線載荷がほとんど発生していないことが分かる。

図8に、上下線の複線載荷の発生回数と構造物の位置を示す距離程を示す。車両長25mの12両編成と仮定すると列車長は300mとなる。この時、交差箇所が対象構造物の前後300m以内に存在すれば複線載荷が発生することとなる。即ち、算出された全ての発生回数を300m毎の区間に区切り交差回数を積算すると、複線載荷の発生回数を得られる。さらに、累積区間を30mまで狭めた場合、空間長で言えば概ね車両1両分以内、時間長で言えば列車速度が260km/hと仮定すると概ね0.4秒以内

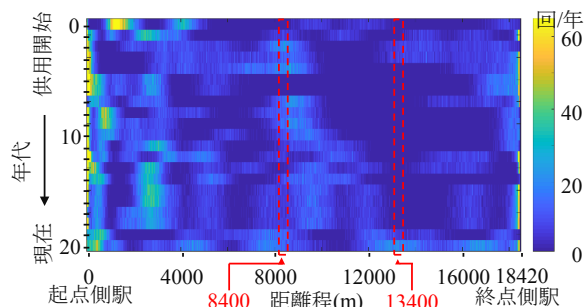
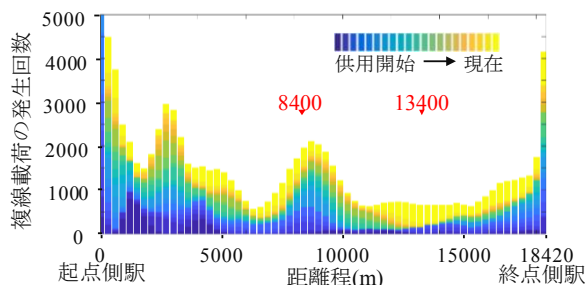
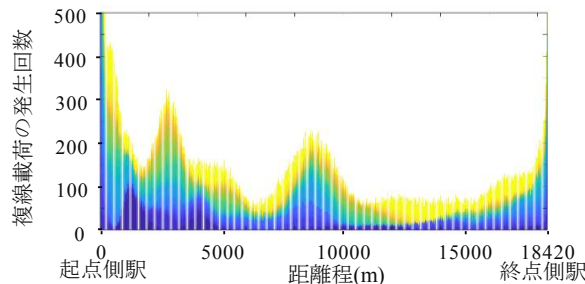


図7 上下線の複線載荷の発生位置と年代（ダイヤ）の関係



(a) 累積区間300m、発車時刻のばらつき標準偏差15秒



(b) 累積区間30m、発車時刻のばらつき標準偏差15秒

図8 上下線の複線載荷の発生回数と構造物位置の関係

の到着時刻差となる場合の交差回数を得られる。この場合、上下線の車両の進入時刻がほぼ一致し、構造物に対して厳しい載荷条件となる。本論文ではこの交差条件を、完全複線載荷と定義して議論を進める。

図8(a)は、累積区間を300mとした場合の結果である。同図から、複線載荷の発生回数に2500m程度、9000m程度の位置等に複数の極大値があることが分かる。これらの箇所においては、供用開始から現在に至るまで定常的に複線載荷の発生回数が多いことが分かる。また、距離程の両端となる0および18420m付近では複線回数の発生回数が急激に増加している。これは両端が駅であり、停車のために低速領域となり滞在時間が増加することから、相対的に上下線が交差する確率が増加するためである。複線載荷発生回数の累積値に着目すると、駅部付近で3000～5000回程度、中間部で1000～3000回程度であり、年換算すると、それぞれ150～250回/年、50～150回/年程度となることが分かる。

図8(b)は、累積区間を30mとした場合の結果、即ち完全複線載荷の発生回数である。図から、図8(a)の傾向と同様であり、累積区間が1/10となった分、発生

回数も 1/10 となる事が分かる。完全複線載荷発生回数の累積値は、駅部付近で 300~500 回程度、中間部で 100 ~ 300 回程度であり、年換算するとそれぞれ 15~25 回/年、5~15 回/年程度となる事が分かる。

図 9 に、複線同時載荷確率を示す。解析条件は、図 7 で示した発車時刻のばらつきの標準偏差が 15 秒の場合に加え、標準偏差を 30 秒とした結果も加えた。複線同時載荷確率は、図 8(a) で示した累積区間を 300m として上下線の列車が短時間でも交差した場合の発生回数を対象として、上下線の総列車本数 455636 回にて除算した値として定義した。複線同時載荷確率に着目すると、駅部付近で最大で 5% 程度、中間部で 0.2~0.7% 程度である事が分かる。このうち構造物に及ぼす影響の大きい完全複線載荷の発生確率は 1/10 であり中間部で 0.02~0.07% となる。

以上から、対象線区における上下線の列車が一部でも交差する複線同時載荷の発生回数は 50 ~ 150 回/年程度であり、このうち到着時刻が一致する完全複線載荷となり得るのは 1/10 程度となる。また、複線同時載荷確率は、駅部付近で 5%、中間部で 0.2 ~ 0.7% 程度であり、完全複線載荷の発生確率は駅部付近で 0.5%、中間部で 0.02 ~ 0.07% 程度となる。

3.2 列車運行シミュレーションに基づく構造物の動的応答解析結果

図 10 に、上下線応答変位の時刻歴波形の例として、列車速度が 252km/h、輪重 150kN の場合の、単線載荷時、複線載荷時の結果を示す。応答変位は桁の上下線の軌道中心直下位置の応答とした。桁の固有振動数を 2.8Hz としたことから、列車速度 252km/h は 1 次共振速度となる。複線載荷時は、下り線側が進入し 0.357 秒後もしくは 0.536 秒に上り線側が進入するケースとした。単線載荷時には、荷重分担率である 7:3 の比で載荷側および非載荷側の応答変位が発生し、最大応答の絶対値は 25mm 程度となる。車両 1 両分の位置ずれがあるケースでは、複線載荷時には上下線の応答波形がほぼ一致しており、変位の絶対値が 35mm 程度に達することが分かる。車両 1.5 両分の位置ずれがあるケースでは、単線載荷よりも応答が小さくなる逆の傾向となっており、絶対値は 20mm 程度である。即ち、複線載荷が発生した場合、到着のタイミングによって、単線載荷の場合と比較して応答が増減することが分かる。これは、対象構造物においては鉛直変位が正となるアップリフトが生じており、上下線の応答が逆位相となった場合に、変位を打ち消し合うためと考えられる。以降の列車運行シミュレーションに基づく応答解析では、各列車編成において、列車速度、輪重、到着時刻差がパラメータとなる。

図 11 に、FATIGUE により算出された、対象線区の 8400m に位置する対象構造物の現在までの疲労強度の

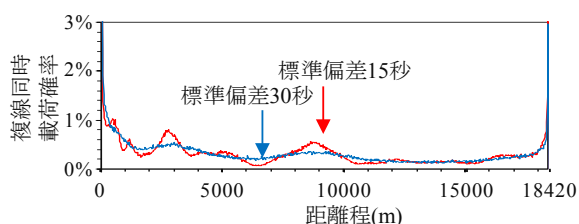


図 9 複線同時載荷確率 (累積区間 300m)

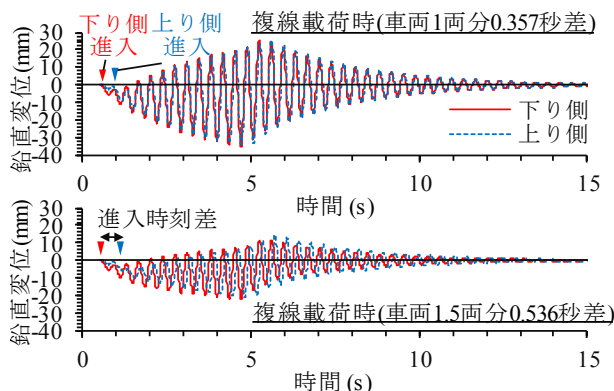


図 10 応答変位の時刻歴波形の例 (列車速度 252km/h)

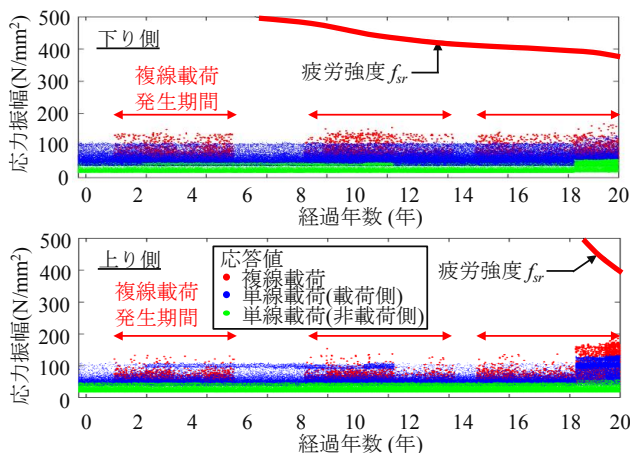


図 11 疲労強度のシミュレーション結果 (距離程 8400m)

経年変化を示す。疲労強度の算出に当たり、各動的解析から得られる鉛直変位に基づきスパン中央断面の曲率を算出し、断面保持の仮定が成立するものとして応力算出点である最外縁の PC 鋼材の応力を求めた。得られた波形を FATIGUE に入力し、疲労強度を算出した。距離程 8400m は図 8 で示したように、複線載荷の発生回数が相対的に多い位置である。図から、経年 1~5 年、8~14 年、15~20 年のダイヤにおいて、複線載荷が発生していることが確認できる。また、単線載荷時の応答に着目すると、経年 18 年時点のダイヤ改正において、特に上り線側の応答が全体的に増加している。これは、ダイヤ改正によるランカーブの変化により、上り線において列車の通過速度が増加したこと起因すると考えられる。加えて、このダイヤ改正で、複線載荷の発生回数も急増しており、図 7、図 8 の傾向とも一致する。さらに、

特集：鉄道力学

これらの応答増加に伴い疲労強度が急激に低下していく傾向が確認できる。

図 12 に、距離程 8400m の構造物の PC 鋼材の応力振幅の発生頻度を示す。図 11 における供用開始から現在までの結果を対象とした。同図から、 130N/mm^2 以上の応力振幅は複線載荷の場合のみであり、供用以来 1 度のみではあるものの、最大で 200N/mm^2 以上の応力振幅を経験していることが分かる。複線載荷のみにより起こりうる $130 \sim 210\text{N/mm}^2$ の発生頻度が現在までに通過した編成数に占める割合は、上下線でそれぞれ 0.04, 0.14% 程度であるものの、疲労強度への影響を表す等価繰返し回数を図 6 中の式により算出すると上下線でそれぞれ 17.6, 23.9% 程度であり、複線載荷が疲労強度に対して一定の影響度を持つと言える。これは、PC 鋼材のように S-N 線図の傾き k が大きい材料では、複線載荷時のような限定的な発生頻度であっても応力振幅の影響が大きいためである。

図 13 に、距離程 8400m の構造物の時間依存疲労強度の 200 年間の予測シミュレーションの試算結果を示す。シミュレーションにより 1 編成毎の応答値が得られているが、見やすくするため複線載荷時、単線載荷時の応答をそれぞれ範囲で示した。図から、疲労寿命は、上り線で 200 年以上、下り線で 120 年程度であり、限界値を超過するのは複線載荷となり著大な応力を発生させる列車編成であることが分かる。

なお、実際の維持管理において将来予測を本手法により実施する場合には、作用係数等により運行列車の輪重や本数の不確実性を考慮する等により一定の安全率を確保することが望ましい。

4. まとめ

本稿では、鉄道運行情報ビッグデータを活用した鉄道構造物の時間依存疲労強度の評価手法を開発し、新幹線実線区を対象に試算を行った。得られた結論は以下の通り。

- (1) 標準ダイヤ、ランカーブ、実乗車率、車両種別等のビッグデータを活用した鉄道構造物の時間依存疲労強度を評価可能なシミュレーション手法を構築した。
- (2) 現在までのデータに対して開発した解析手法を適用した結果、対象線区においては、上下線の列車が一部でも交差する複線同時載荷の発生回数は 50 ~ 150 回 / 年程度であり、このうち到着時刻が一致する完全複線載荷となり得るのは 1/10 程度となる。また、複線同時載荷確率は、駅部付近で 5%、中間部で 0.2 ~ 0.7% 程度であり、完全複線載荷の発生確率は駅部付近で 0.5%、中間部で 0.02 ~ 0.07% 程度となる。
- (3) 対象構造物の PC 鋼材においては、複線載荷特有の

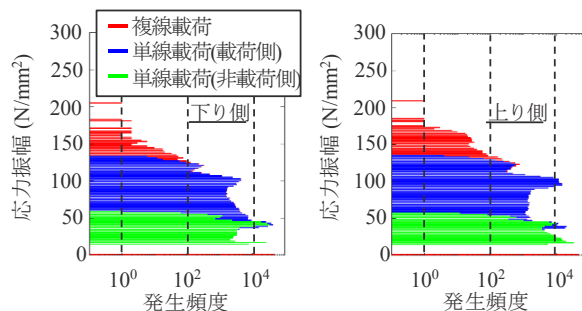


図 12 応力振幅の発生頻度 (距離程 8400m)

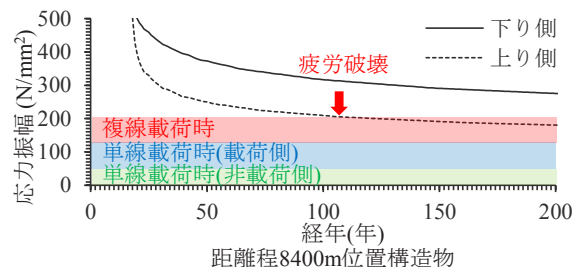


図 13 時間依存疲労強度の予测试算結果 (距離程 8400m)

高い応力振幅の発生確率は最大で全編成の 0.15% 程度であるものの、疲労強度への影響を表す等価繰返し回数に占める割合は 20% 程度となる場合があり、複線載荷が疲労強度に与える影響度は大きい。これは PC 鋼材の疲労強度が繰返し回数より応力振幅に大きく依存するためである。

- (4) 現在の運行条件が将来的に継続されるという仮定の下、対象橋梁の PC 鋼材の時間依存疲労強度を試算し、100 年以上の長期にわたる疲労強度の低下を提案手法により評価可能であることを示した。

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）、丸善、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に関する研究、土木学会論文集、No.724/I-62, pp.83-102, 2003
- 3) 土屋啓佑：北陸新幹線 PRC に生じる大たわみとその対策、新線路、Vo.30, No.3, pp.54-56, 2018
- 4) 後藤恵一、曾我部正道、徳永宗正、轟俊太郎：高速すれ違いを考慮した鉄道コンクリート構造物の疲労設計法、土木学会論文集 A2 (応用力学)、Vol. 68, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 15), I741-I750, 2012
- 5) 小林裕介、杉本一郎：鋼橋の複線同時載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
- 6) 徳永宗正、曾我部正道：鉄道 RC 高架橋相互の地震時繰返し衝突を考慮した耐震設計法、土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)、74(1), pp.173-185, 2018