

鋼橋の複線同時載荷確率を考慮した疲労照査法

小林 裕介* 杉本 一朗*

Fatigue Design Considering Simultaneous Train Loading On Double-track Bridges

Yusuke KOBAYASHI Ichiro SUGIMOTO

Since the daily number of trains has dramatically increased recently, it has become a significant factor for the fatigue design of railway steel bridges to assess the impact of simultaneous train loadings on double-track bridges. This research conducted Monte Carlo simulation to assess the impact considering several kinds of parameters, and evaluated the degree of the contribution of each parameter to the fatigue damage in the simultaneous train loadings. Finally, this research proposed a new method and coefficient in the fatigue design which takes the simultaneous train loading into consideration.

キーワード：複線同時載荷，疲労照査，鋼鉄道橋，シミュレーション，累積疲労損傷度

1. はじめに

鋼鉄道橋では、列車の通過によって橋梁部材に繰り返し生じる応力を考慮した疲労設計を従来から行っている。

具体的には、設計荷重として考慮すべき列車を、設計する橋梁の影響線に移動載荷し（以降、影響線載荷と呼ぶ）、1列車の通過によって生じる変動応力を算出する。この変動応力から1列車による疲労損傷度を求め、想定している設計寿命における総列車本数に応じた累積疲労損傷度が、その限界値を超えないかを照査する¹⁾。

複線を有する橋梁については、各線に個別に影響線載荷した結果の合計について照査することを基本としており、複線に同時に列車が通過する場合の疲労の割増し分については、同時に載荷される確率が低いことで考慮していない。特別に複線が同時に載荷される確率の高い線区については、簡便的な式²⁾によって疲労の割増し分を考慮することは可能であるが、設計の実務においては、

- ・“特別に複線が同時に載荷される確率の高い線区”の列車本数が明確ではない。
- ・複線同時載荷を考慮する場合の簡便的な式では、疲労の割増し分を過大に評価する場合がある。
- ・今回改訂した構造物等設計標準では、従来と疲労の照査方法が異なるため³⁾、簡便的な式から得られる同時載荷を考慮するための係数を、直接用いることができない。

といった問題がある。また、従来の疲労設計では、一日の列車本数を最大でも190本としていたが（この本数を超えた場合に複線同時載荷を考慮するという意味ではな

い）、近年、この本数を遥かに上回る線区が多数ある。したがって、今後の鋼鉄道橋における疲労設計において、複線に同時に載荷された場合の疲労に対する影響を考慮するケースは増加すると考えられ、疲労に対する複線同時載荷の影響を精度良く評価する方法が必要となっている。

本研究では、シミュレーション解析を行うことによって、列車本数、橋梁支間、列車速度、影響線形状、応力分担率比のパラメータが、複線同時載荷による疲労にどの程度影響するかを評価した。また、この結果を踏まえて、疲労設計の実務における、複線同時載荷の考慮の方法について提案した。

2. 従来の複線同時載荷の考え方

現行の鋼鉄道橋における疲労の照査では、図1に示すように複線桁については各線に個別に影響線載荷して算出した累積疲労損傷度の和 D_s が、1.0を超えないことを確認している。複線が同時に載荷される確率が高い線区と判断された場合には、複線同時載荷した場合の累積疲労損傷度を算出し、概略としては以下の(1)式によって照査が行われる。

$$D_s \cdot (1-b) + D_d \cdot b < 1.0 \quad (1)$$

ここで、 D_s は複線に同時に載荷されない場合の累積疲労損傷度、 D_d は複線に同時に載荷される場合の累積疲労損傷度、 b は複線に同時に載荷される確率を表す。

複線に同時に載荷される場合の累積疲労損傷度 D_d は、図2に示すように、上下線の列車が同一方向に、全く同じタイミングと速度で走行した場合の変動応力をもとに算出される。ただし、実際には図3のように、すれ違う

* 構造物技術研究部（鋼・複合構造）

特集：鋼・合成構造物の設計技術

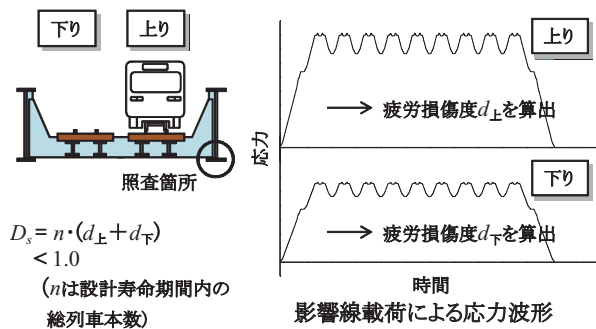


図1 複線同時載荷を考慮しない疲労設計

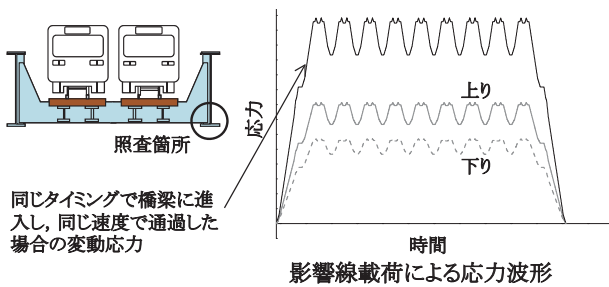


図2 同時載荷の場合の変動応力（現行の設計）

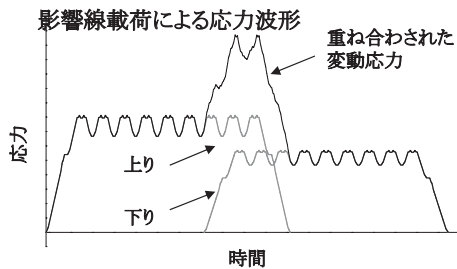


図3 同時載荷の場合の変動応力（実際）

タイミングや速度によって考慮すべき変動応力は異なり、現行の設計で考えている図2の変動応力とは大きく違うことが分かる。

式(1)における複線に同時に載荷される確率 b は、以下の式(2)で表される簡易な割合であり、朝夕の通勤時間帯における過密な列車運行といった状況は考慮されていない。

$$b = \frac{L}{500v} \times n \quad (2)$$

ここで、 L は列車長 (m)、 v は列車速度 (km/h)、 n は単線当り一日の列車本数、 T は1日の列車運行時間 (h) を表す。

以上のように、現行の設計では、複線同時載荷を考慮したとしても、その精度は決して高いものとは言えない。

3. 複線同時載荷の影響の検討概要

3.1 検討方法

上下線の列車のすれ違うタイミング、通勤時間帯は列車本数が過密になること、橋梁の構造形式によって影響線が異なり複線同時載荷が累積疲労に与える影響が異なること、などのパラメータをより精度よく評価するため、本研究ではモンテカルロシミュレーション⁴⁾により検討を行った。具体的にはある線区の一駅間を設定し、乱数によって生成した時刻表にもとづき列車を運行させ、二駅間に位置する橋梁の累積疲労損傷度が複線同時載荷によってどの程度割り増されるべきかを、後述する同時載荷係数によって評価する。

表1 検討で考慮したパラメータ

列車荷重	M荷重（電車・内燃動車荷重）
橋梁支間	1m, 6m, 10～50m (5m間隔), 100m
列車本数	644, 505, 425, 366, 319, 210 (複線合計本数)
列車速度	72km/h, 25km/h
構造形式	単純桁, 2径間連続桁, 3径間連続桁 (端径間), 3径間連続桁 (中央径間)
応力分担率比	1.00, 0.75, 0.50, 0.25

本シミュレーションでは、表1に示すパラメータを検討対象とした。列車荷重については、設計で考慮すべき荷重として、機関車とそれに牽引される貨車を代表するEA荷重、一般的な列車を代表するM荷重、新幹線を代表するH荷重がある¹⁾。このうち、機関車については列車本数の多い線区ではその多くが夜間に走行し、複線同時載荷には大きな影響を及ぼさない。また、新幹線については速度が速く、複線同時載荷の確率は低い。したがって、本検討ではM荷重のみを考慮した。

列車速度については、72km/hと25km/hの2種類を考慮したが、これは二駅間の列車運行の中で、上下線の列車が72km/hですれ違う箇所に橋梁を位置させた場合（一般区間を想定）、駅の近くで25km/hですれ違う箇所に橋梁を位置させた場合という形で、シミュレーションの中で考慮している。

影響線形状としては、表1に示す4種類を考慮しているが、疲労の照査を行った断面は、いずれも対象とした径間の支間中央としている。なお、2径間連続桁の場合は1:1の径間比、3径間連続桁の場合は1:1.25:1の径間比とした。

応力分担率比については表1に示す4種類を考慮した。応力分担率比とは、ある部材に着目した場合に列車が各線を走行する際にそれぞれ生じる応力の比（高い応力が生じる線の応力に対する別の線の応力の比）を表す。

複線の種類については、最も一般的と考えられる、列車の走行が異方向である2線の複線桁を検討対象とした。

複線の種類については、最も一般的と考えられる、列車の走行が異方向である2線の複線桁を検討対象とした。

3.2 乱数の発生方法および試算回数

モンテカルロシミュレーションでは、乱数の発生方法により、その検討結果の精度が左右される。本検討では、実際の列車運行の状態を再現し、かつ列車が様々なタイミングで橋梁上を通過する状態を再現できるよう、二駅

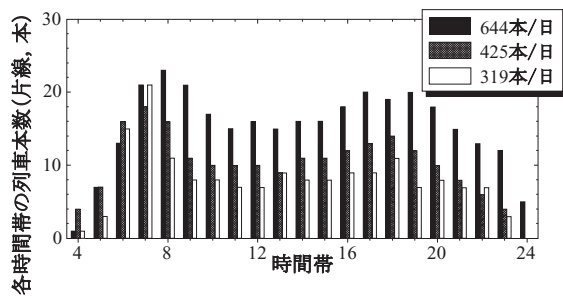


図4 各時間帯の列車本数の例

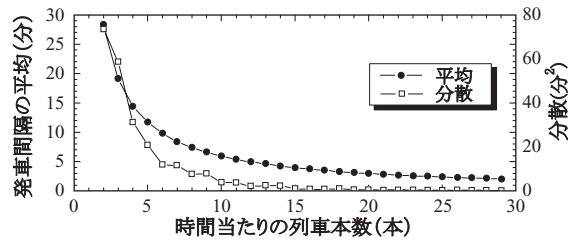


図5 列車発車間隔の平均と分散

間の上下線列車を運行させるための時刻表を、以下の規則に従って乱数により生成した。

- (1) 1日を一単位として上下線の時刻表を生成する。
- (2) 時間帯ごとの列車本数の密度の違いを考慮するため、各時間帯の列車本数は、一日の全体の列車本数ごとに固定している。この各時間帯の列車本数は、実際の時刻表を参考に定めた。その例を図4に示す。
- (3) 各時間帯の時刻表を乱数によって生成するが、列車の発車間隔が極端な偏りを持たないよう、発車間隔が平均 μ と分散 σ^2 に従う正規乱数によって生成する。平均 μ は、60分を時間帯あたりの列車本数で除して算出したが、分散 σ^2 については約200の実時刻表から統計的に取得した。本シミュレーションで用いた列車発車間隔の平均 μ と分散 σ^2 を図5に示す。なお、ここで生成した時刻表の各時間帯の列車本数が、上項(2)で定めた列車本数と同じになるまで、時刻表の生成を試行する。
- (4) 実際の時刻表は分単位で定められているが、上下線の列車による変動応力の微妙な重なり具合の違いも再現するため、生成する時刻表の時刻はミリ秒単位とする。

上記の規則に従って生成した時刻表をもとに、一日単位で列車運行シミュレーションを行い、後述する同時乗荷係数を算出する。これを360日(約1年)繰り返し、その同時乗荷係数を平均することによって、表1に示した各パラメータの複線同時乗荷への影響を評価する。ここで、平均値によって評価を行ったのは、疲労の照査は必ずしも最大値に対して行う必要はなく、平均的な状態を考慮すればよいためである。また、シミュレーション回数を360回としたのは、同時乗荷係数の平均値がおおよそ250回程度で収束していたため、余裕度を考慮してのことである。

3.3 同時乗荷の影響を表す係数(同時乗荷係数)

表1に示す各パラメータの複線同時乗荷への影響は、式(3)で表わされる同時乗荷係数 γ によって評価する。

$$\gamma = (D_r / D_s)^{1/m} \quad (3)$$

ここで、 D_r は本シミュレーションから算出される様々な複線同時乗荷の状態を考慮した場合の累積疲労損傷度、 D_s は同一の列車本数において同時乗荷することなく列車が運行した場合の累積疲労損傷度である。 m 乗根としているのは、累積疲労損傷度が応力範囲の m 乗に比例することを考慮し、改訂された設計標準において複線同時乗荷の影響を変動応力に乗じる係数として表現するためである。なお、本研究では垂直応力を対象とした検討を行っているため、 $m=3$ としている。

4. シミュレーション結果

4.1 列車本数と橋梁支間の影響

一般的な構造形式として単純桁を、また速度を72km/hと想定して、応力分担率比が1.0のときについてシミュレーションを行った。結果を図6に示す。一日の列車本数に応じて、同時乗荷係数の値が増加していることが分かる。また、いずれの列車本数の場合でも、支間長が30mくらいまでは同時乗荷係数が増加の傾向にあり、支間長35mを頂点としてその後は緩やかに下降し、支間長100mでは支間30mのときの同時乗荷係数よりも明らかに小さな値となっている。これらの特徴について、複線同時乗荷が生じる割合、および上下線の列車による変動応力の重なり具合に着目して、以降分析を行う。

図7には、シミュレーションの中で複線同時乗荷が発生した回数を、片線の列車本数で除して算出した確率の平均について、一日の総列車本数が644本と366本について示している。列車本数の増加に応じて複線同時乗荷の発生確率が大きく増加しているが、支間については列車本数が644本の場合は10%程度、366本の場合は5%程度でほぼ一定の値を示している。したがって、図6において列車本数の増加に応じて同時乗荷係数の値が増加したのは、複線同時乗荷の発生確率が増加したためであり、支間には大きな影響を受けていないと言える。

図8に、上下線の1列車ずつだけから算出した場合の、すれ違うタイミングと同時乗荷係数の関係を、支間が15m, 35m, 100mのときについて示す。横軸の時間は、上り線に対する下り線の橋梁に進入した時間差を示す。いずれも単純桁で速度は72km/hである。

支間が15mのときは、上下線の列車が橋梁へ進入するタイミングによって、同時乗荷係数が大きく異なっている。これは図9に示すように、支間が15mでは、1列車通過時の応力振幅は台車ごとに生じ $\Delta\sigma_s$ となっているが、

特集：鋼・合成構造物の設計技術

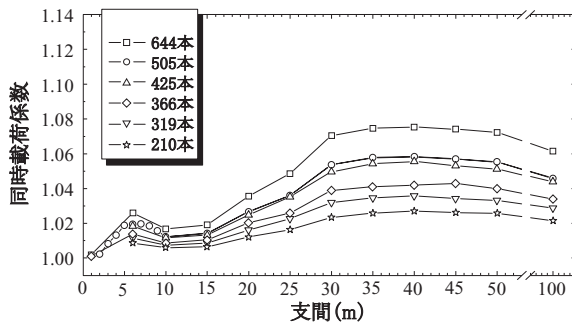


図6 列車本数と支間ごとの同時乗荷係数

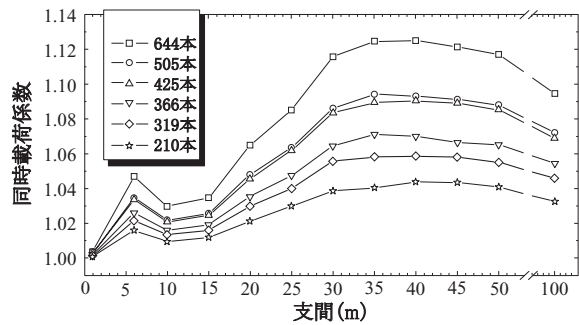


図10 低速(25km/h)の場合の同時乗荷係数

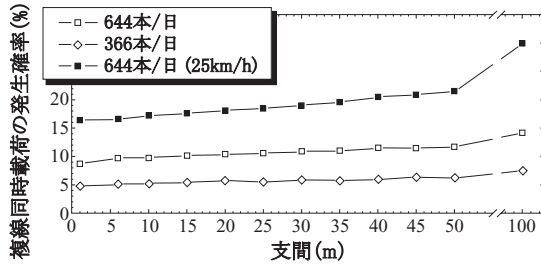


図7 複線同時乗荷の発生割合

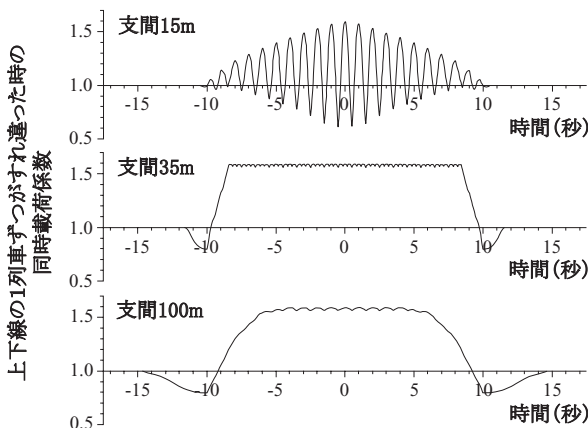


図8 すれ違うタイミングと同時乗荷係数の関係

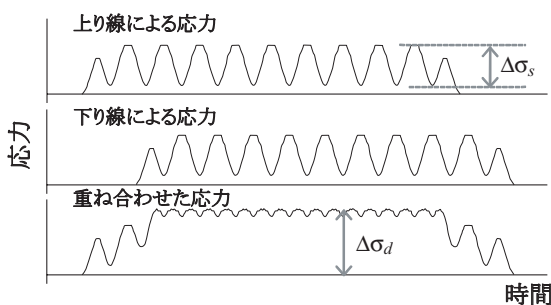


図9 単純桁支間15mにおける変動応力

上下線の列車のすれ違うタイミングによっては、その応力振幅を打ち消し合うように変動応力が重なることがある。このため、応力の最大値は $\Delta\sigma_d$ のように大きくなるものの振幅の回数が大幅に減り、結果として同時乗荷係数が1.0を下回るケースが多数生じるものとなっている。

支間が35mあたりを超えると、1列車が通過したときの変動応力は、列車の輪軸や台車間隔に依存しなくなり、横長の台形のような形状を呈す。したがって、上下線の列車による変動応力の重ね合わせは、すれ違うタイ

ミングに依存しなくなり、同時乗荷係数は図8に示すように一定値に近い状態となる。ただし、1列車の変動応力における台形の斜辺の箇所のみで上下線の列車の変動応力が重なり合うと、これも応力の振幅を打ち消すことになるので、一部分は同時乗荷係数が1.0を下回る結果となっている。支間が100mのときは、その同時乗荷係数の1.0を下回る範囲が大きくなっている。

複線同時乗荷が生じた場合に、すれ違うタイミングがランダムであるとする、図8に示した上下線の1列車ずつのみで算出した同時乗荷係数の平均値が、支間に対する複線同時乗荷の疲労への影響を表すことになる。このため、図6のように支間が35m程度までは同時乗荷係数が増加し、それより長い支間では緩やかに減少するものと考えられる。以上のように、同じ列車本数における同時乗荷係数については、支間の違いによる1列車の変動応力の形状が大きく影響していると言える。

4.2 速度の影響

列車のすれ違い時の速度が25km/hである場合のシミュレーション結果を、図10に示す。本条件は、駅などの近傍に橋梁が位置している場合を想定している。シミュレーションにおけるその他のパラメータは、構造形式が単純桁、応力分担率比が1.0である。

72km/hのときのシミュレーション結果である図6と比べて、25km/hである図10の同時乗荷係数の値が全体的に大きいものとなっているが、同一の列車本数の中で比べると、支間が35mくらいまでは同時乗荷係数の値が増加し、その後緩やかに減少するといった傾向は同様であることが分かる。図7には、列車本数が366本/日について速度が25km/hのときの複線同時乗荷の発生確率についても示しているが、速度が遅くなったことによって複線同時乗荷の発生確率が大きくなっていることが分かる。

以上のことより、速度が遅い場合の同時乗荷係数は、複線同時乗荷の発生確率が高くなったため、72km/hの時と比べて大きいものとなっているが、速度が遅くなった場合でも列車通過時の変動応力の形状は変わらないので、支間による同時乗荷係数の増減傾向は、72km/hの時と同様であると言える。

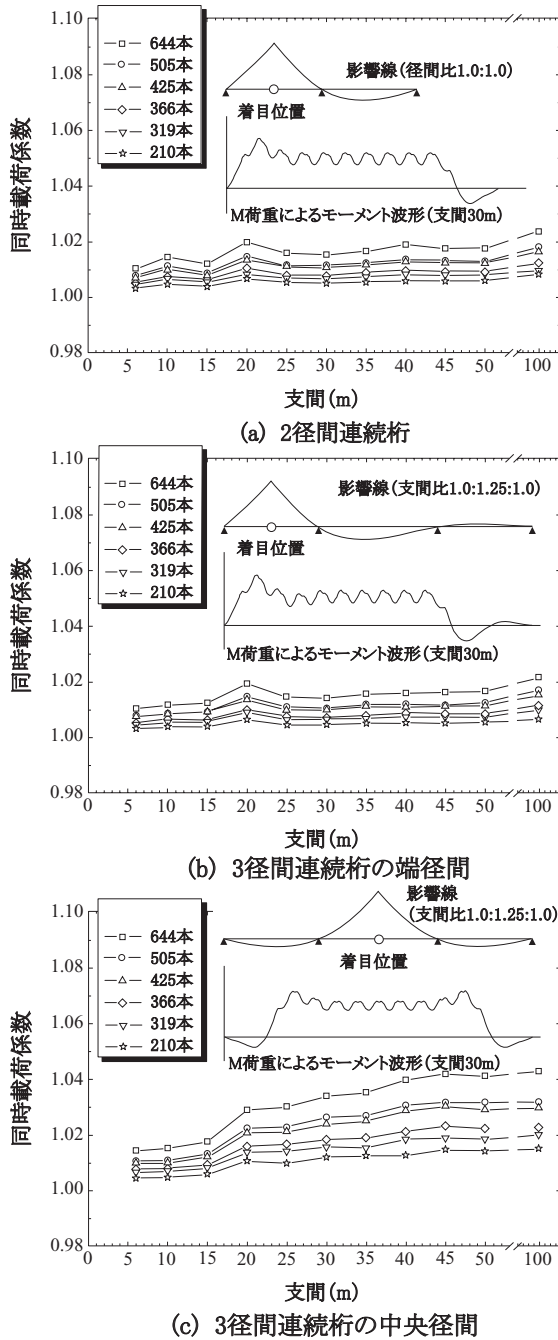


図 11 構造形式の違いによる同時乗荷係数

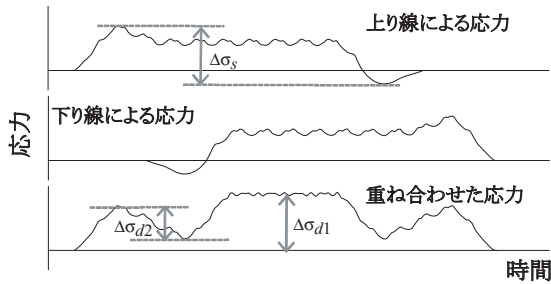


図 12 2 径間連続桁支間 35m における変動応力

4.3 構造形式の影響

図 11 の (a) ~ (c) に、それぞれ 2 径間連続桁、3 径間連続桁の端径間、3 径間連続桁の中央径間に着目した

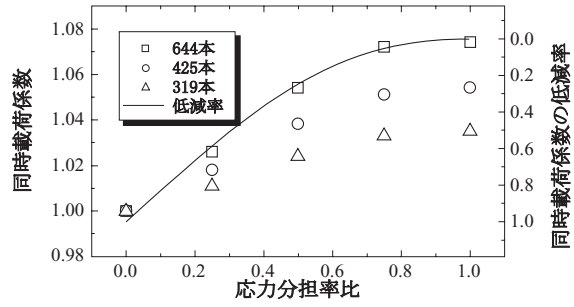


図 13 応力分担率比と同時乗荷係数 (支間 35m)

場合の、同時乗荷係数のシミュレーション結果について示す。いずれも列車速度は 72km/h で、上下線の応力分担率比は 1.0 である。

全ての結果において、単純桁における同一条件のシミュレーション結果 (図 6) よりも同時乗荷係数は大幅に小さく、最大でも 1.04 程度となっている。これは以下のことが理由として挙げられる。

図 12 に支間が 35m に対する、列車通過時の変動応力を示す。連続桁における 1 列車通過時の変動応力は正負が交番し、疲労に最も影響している応力振幅は図中の $\Delta\sigma_s$ である。上下線の列車が通過した場合は、この $\Delta\sigma_s$ が 2 回生じることとなる。一方で、重ね合わされた変動応力では、最大の変動応力は $\Delta\sigma_s$ と大きさがさほど変わらない $\Delta\sigma_{d1}$ であり、1 回しか生じないことになる。 $\Delta\sigma_{d2}$ が 2 回生じてはいるものの、複線同時乗荷によって疲労に大きな影響を及ぼしていない。

このように、連続桁においては 1 列車ずつの通過では生じる正負交番する応力振幅が、複線同時乗荷によって打ち消され、大きな応力振幅の回数が減るため、同時乗荷係数は、単純桁と比べて大きくなる。

4.4 応力分担率比の影響

図 13 に、単純桁で支間が 35m の場合の同時乗荷係数と応力分担率比の関係を示す。いずれの列車本数の場合でも、次の式 (4) と (5) によって応力分担率比から求まる単純な同時乗荷係数の低減率の曲線と、その傾向がよく一致していることが分かる。

$$\gamma' = \left\{ \frac{(\sigma_{1\max} + \sigma_{2\max})^3}{\sigma_{1\max}^3 + \sigma_{2\max}^3} \right\}^{1/3} \tag{4}$$

$$= \left\{ \frac{(1+R)^3}{1+R^3} \right\}^{1/3} \tag{5}$$

ここで、 γ' は応力分担率比から求まる同時乗荷係数、 $\sigma_{1\max}$ 、 $\sigma_{2\max}$ はそれぞれ上り線と下り線によって生じる応力の最大値、 R は応力分担率比 ($\sigma_{1\max}$ と $\sigma_{2\max}$ の比)、 α は同時乗荷係数の低減率、 γ'_0 は応力分担率比が 1.0 とした場合に求まる γ' の値を表す。

特集：鋼・合成構造物の設計技術

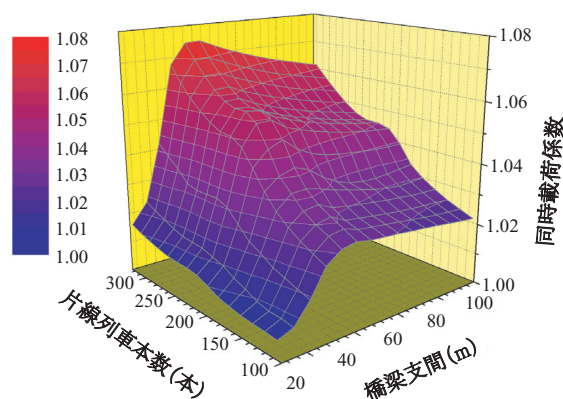


図14 列車本数・支間と同時載荷係数の関係

表2 設計で用いる同時載荷係数（一般区間）

1日の列車本数の合計	橋梁支間	
	30m未満	30m以上
400本未満	1.00	
400本以上	1.00	1.05

表3 設計で用いる同時載荷係数（低速区間）

1日の列車本数の合計	橋梁支間		
	20m未満	20m以上	30m以上
300本未満	1.00		
300本以上	1.00	1.05	
500本以上	1.00	1.05	1.10

5. 同時載荷係数の設計計算への適用

最も一般的な構造形式である単純桁、および一般的な速度として72km/hを想定したシミュレーション結果(図6)を、列車本数および橋梁支間と同時載荷係数の関係として整理したものを図14に示す。この図に示されるように、本来、同時載荷係数は列車本数および橋梁支間に応じて変化する値であるが、設計においては、設計実務における簡便性を考慮し、表2に示すように同時載荷係数が1.05を超える1日の列車本数が400本以上、かつ橋梁支間が30m以上に対し、1.05という同時載荷係数を応力範囲に乗じることが提案する。

同時載荷係数として1.05を超える範囲に対して、設計では1.05を用いるというのは、下限値を使用しており、複線同時載荷についてのみ考えれば危険側の設計となる。しかし、設計における設計速度は100km/hを超えるのが一般的であり、本検討で想定している速度72km/hで算出した同時載荷係数は高めの値となる。一方で100km/hを超える速度で設計した橋梁において、実際の列車が70km/h程度で走行した場合には、同時載荷係数としては危険側であるが、その逆に衝撃係数は高めの値となり、トータルとしては妥当な設計であると考えられる。このように、下限値として設定したのは、同時載荷係数と衝撃係数が、速度の大きさに対して逆の相関を有することを考慮したためである。

その他のパラメータについては、本検討結果から以下

のような考え方で、設計実務に反映できるものとする。

- ・低速区間(25km/h)では、表3に示す同時載荷係数を用いる。
 - ・一般区間における連続桁においては、同時載荷係数が1.05未満であるため、同時載荷を考慮しない。
 - ・応力分担率比については、式(4)と(5)で表わされる低減率によって同時載荷係数を低減する。
- なお、本検討で考慮していない条件については、提案する同時載荷係数を適用できないことを付記しておく。

6. 結論

本研究では、モンテカルロシミュレーションにより、複線を有する橋梁に対して、複線同時載荷が生じた場合の疲労への影響として、同時載荷係数を用いて定量的な評価を行った。以下にその結果をまとめる。

- (1) 列車本数が多くなると、複線同時載荷の確率が高くなるため、同時載荷係数は大きくなる。
- (2) 橋梁支間が長くなると、変動応力の形状に依存して同時載荷係数は大きくなるが、その支間は35m程度までである。
- (3) 低速区間では、複線同時載荷の確率が高くなり、同時載荷係数は大きくなる。
- (4) 連続桁では、正負交番する変動応力が、複線同時載荷により打ち消され、同時載荷係数は単線桁よりも低くなる。
- (5) 応力分担率比から求めた低減率によって、同時載荷係数を低減することが可能である。

また、本研究では、上記の結果をもとに、設計実務における簡便性を考慮した形で、同時載荷係数の設計への適用方法について提案した。

謝辞

本検討は、国土交通省からの委託を受けて実施した「鉄道技術基準整備のための調査研究」の一環として行ったものである。ここに記して謝意を表す。

文献

- 1) 国土交通省監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・解説 鋼・合成構造物，2000
- 2) 土木学会：本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査研究報告書 別冊2 本州四国連絡橋の疲労設計，1974
- 3) 小林裕介，杉本一朗：繰返し荷重を受ける鋼部材の累積疲労損傷度による照査法，鉄道総研報告，21年5月号，2009
- 4) 森猛：2車線道路橋の疲労設計荷重に用いる同時載荷係数の検討，土木学会論文集，No.759/I-67，pp.247-258，2004