

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560571

研究課題名(和文) 橋梁 - 車両系の動的応答解析とモンテカルロ法を用いた疲労設計用衝撃係数の定式化

研究課題名(英文) Formulation of Impact Coefficient for Fatigue Design of Steel Highway Bridges Based on Dynamic Response Analysis to a Moving Vehicle and Monte Carlo Method

研究代表者

中村 聖三 (NAKAMURA, Shozo)

長崎大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40315221

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：現在、鋼道路橋の疲労設計に用いられている指針では、疲労設計用衝撃係数として道路橋示方書における規定の1/2の値を用いてよいとされている。その根拠として既往の実験結果を示しているが、この値が適切に疲労損傷度に対する動的効果を考慮しているかは必ずしも明確ではない。そこで、本研究では、単一走行車両による動的応答解析とモンテカルロシミュレーションを組み合わせた疲労設計用衝撃係数算定法を用いて、支間長、路面状態、車両速度、車両モデルの違いによる衝撃係数の変化を明らかにし、振動数比の関数として定式化された新たな疲労設計用衝撃係数を提案した。

研究成果の概要(英文)：The current Japanese design code specifies the impact factor as a function of only span length. The fatigue design recommendation specifies impact factor as a half of the value determined in the design code based on the judgment that its average value should be used for fatigue design. However, it is not clearly shown that this value represents adequately dynamic influence on fatigue damage. In this study, influence of bridge span, road surface condition, vehicle speed and vehicle model on the impact factor for fatigue design is elucidated by using a calculation method combining Monte Carlo simulation and dynamic response analysis of bridge-vehicle system. Moreover, a new formula of impact factor for fatigue design is proposed as a function of frequency ratio.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：疲労 衝撃係数 構造工学 長寿命化

1. 研究開始当初の背景

(1) 社会的背景

わが国の鋼道路橋の設計においては、鋼床版を除き比較的近年まで疲労の影響は考慮しなくてもよいものとされてきた。これは主桁等の設計に用いる荷重状態が実橋で再現される確率は極めて低く、通常の供用状態であれば疲労が問題となるような応力変動が生じることはないとの認識によるものと考えられる。しかし、交通量の急激な増加や車両の大型化などに起因して、現在では鋼道路橋の各部位において疲労による損傷が無視できなくなってきた。特に、鋼製橋脚隅角部や鋼床版デッキプレートの疲労損傷は、大きな社会問題となった。また、従来は見られなかった落橋に直接つながるような疲労損傷も発見されるようになってきており、疲労損傷問題の解決は鋼橋の長寿命化における喫緊の課題である。

(2) 道路橋の疲労設計の現状と問題点

上述した状況に対して、平成 14 年 3 月に改訂された道路橋示方書・同解説では、「鋼橋の設計にあたっては、疲労の影響を考慮するものとする」と明記されるとともに、具体的な疲労設計にあたっての参考書として、研究代表者もその策定に WG 幹事の一人として関与した「鋼道路橋の疲労設計指針」が示された。現在、鋼橋の疲労設計はこの指針に基づき実施されている。同指針においては、T 荷重に活荷重補正係数を乗じたものを疲労設計荷重として用い、さらに走行車両の動的効果を疲労設計用衝撃係数で考慮するよう規定されており、衝撃係数の値として通常の静的強度設計に用いる値の 1/2 が与えられている。これは、疲労現象が変動応力の繰り返しに支配され、最大応力が問題となる降伏や座屈など強度設計で対象とする現象とは性質が異なることから、動的影響の最大値を用いる必要はなく、むしろ平均的な値を用いればよいとの判断に基づき、既往の研究成果を参考に定められたものである。しかし、動的効果を考慮した応力変動による疲労損傷度の試算等に基づき、平均的な衝撃係数を用いればよいことが示されている訳ではなく、規定の合理性が必ずしも明確ではない。

2. 研究の目的

以上のような背景から、本研究では鋼道路橋に対する疲労設計用衝撃係数について解析的に検討する。その際、鋼道路橋の疲労設計指針の考え方に倣い、T 荷重を基本疲労設計荷重として用い、車両重量の分布、実車両の軸配置と T 荷重との違い、橋上に複数の車両が同時に載ることによる影響などを活荷重補正係数として、また、走行車両による動的効果を疲労設計用衝撃係数として考慮するとの立場を取る。日本各地における交通流の調査結果に基づいて設定した種々の交通流モデルをモンテカルロシミュレーションにより発生させて橋梁-車両系の動的応答

を求め、それを用いた疲労損傷度解析に基づき、対象構造に対する疲労設計用衝撃係数を構造および交通流の特性を代表するパラメータの関数として提案することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 疲労設計用衝撃係数算定方法

疲労設計用衝撃係数の算定の流れを図-1 に示す。まず、車両重量が対数正規分布に従うものとして、モンテカルロシミュレーションにより車両上部の質量を決定する。車両および橋梁モデルのその他の諸元は確定量とする。次に、1 軸自由度車両-橋梁の連成振動系に対して、荷重内挿関数、変位内挿関数の概念を用いて得られる運動方程式を Newmark  $\beta$  法を用いて解く。解析結果より得られた着目部位の曲げモーメント時刻歴をレインフロー法によって処理し、曲げモーメント範囲の頻度分布を求める。最後に、線形累積被害則を用いて疲労損傷度を算定し、静的な疲労損傷度に対する動的な疲労損傷度の比の 3 乗根を用いて衝撃係数を算定する。

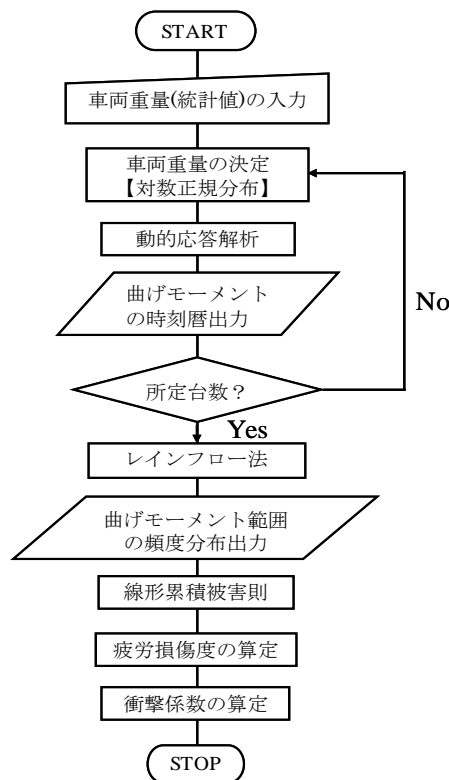


図-1 衝撃係数算定の流れ

(2) 解析条件

橋梁は、2 車線単純活荷重合成桁橋を想定した節点数 11 の等断面はりモデルとし、曲げモーメントの着目部位は支間中央とする。支間長は 20m, 30m, 40m, 50m とし、その他の構造諸元は設計例を参考に概略設計ソフト JSP-4W を用いて設計する。車両モデルの構造諸元は既往の文献を参考に設定し、ばね上部質量は平均値 14,550kg, 標準偏差

6,290kg の対数正規分布に従うものとする。車両速度は 20km/h, 40km/h, 80km/h と変化させる。路面凹凸はパワースペクトル密度 (PSD) でモデル化し、ISO 基準に基づいてレベル A, B, C の三種類の PSD を設定する。同レベルのスペクトルを持つ路面モデルを 10 個作成し、10 回の衝撃係数の算出結果の平均値を当該条件での衝撃係数とする。

#### 4. 研究成果

##### (1) 衝撃係数に対する支間長の影響

路面状態レベル B, 車両速度 40km/h での支間長による衝撃係数の変化を図-2 に示す。指針の規定では、支間長が長くなるにしたがって衝撃係数は減少するが、本研究では 40m で最も大きな値となった。固有振動数比  $\gamma=f_v/f_b$  ( $f_v$ : 車両の固有振動数,  $f_b$ : 橋梁の固有振動数) に対する車両台数分布と 1 台ごとの衝撃係数を図-3 に示す。1 台ごとの衝撃係数は  $\gamma=1$  となる付近でピークになっており、車両と橋梁との共振現象により動的効果が大きくなっていることが確認できる。また、支間長が 40m に近づくにしたがって、車両発生台数のピークと衝撃係数のピークが近づいているため、支間長が 40m の場合に衝撃係数が最大になったと考えられる。

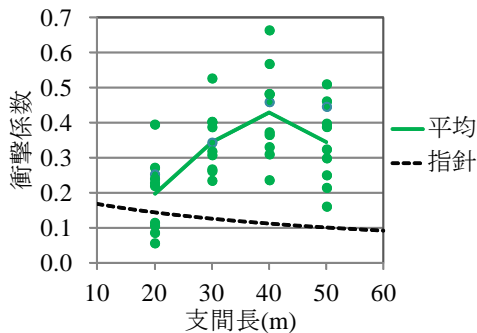


図-2 支間長による衝撃係数の変化

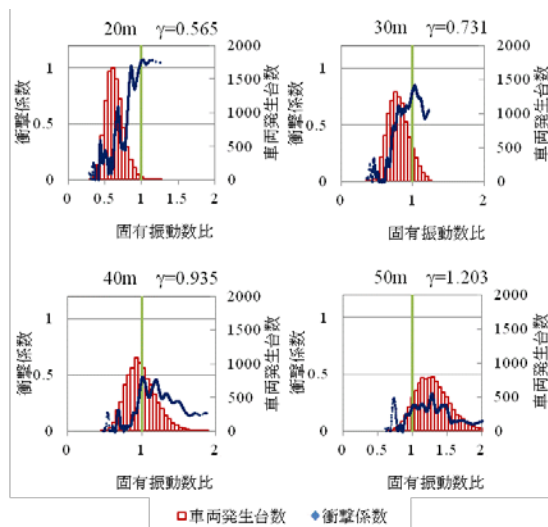


図-3 固有振動数比ごとの衝撃係数と台数分布

##### (2) 衝撃係数に対する路面形状の影響

車両速度が 40km/h での、衝撃係数に及ぼす路面形状の影響を図-4 に示す。路面状態に

よって衝撃係数の値が大きく変化している。また、路面状態が悪いほど衝撃係数の結果のばらつきが大きく、支間長に対する変化も大きいことがわかる。

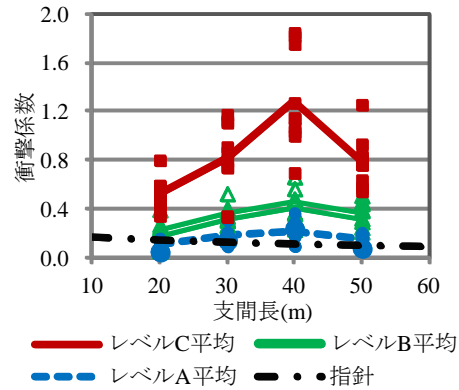


図-4 衝撃係数に及ぼす路面形状の影響

##### (3) 衝撃係数に対する車両速度の影響

衝撃係数に及ぼす車両速度の影響を路面状態レベルごとに図-5 に示す。路面状態レベルが A, B の時は、車両速度が増加すると衝撃係数の値も若干増加する傾向にある。一方で、路面状態レベル C の時は、車両速度が増加すると衝撃係数の値は減少する傾向にある。平均質量の車両 1 台が、同じ路面に対して走行した場合の車両変位の PSD を確認したところ、速度によって変化していたため、本解析では車両だけが橋梁に働く外力となることから、橋梁の応答は車両速度の変化による影響を受けていると言える。

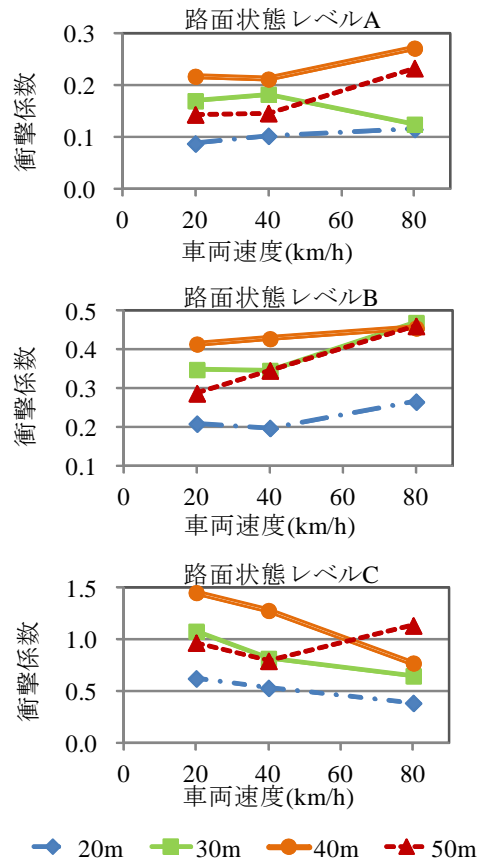


図-5 衝撃係数に及ぼす車両速度の影響

(4) 衝撃係数の定式化

衝撃係数算出結果を用いて、疲労設計用衝撃係数の定式化を行う。衝撃係数は路面形状によって大きく変化し、路面状態はその橋梁（道路）の維持管理の水準に影響されるため、橋梁が架設される道路の種類や架設後の維持管理のレベルによって表-1 のように分類し、 $F_{in}=2.0$ ,  $F_{out}=2.0$  にて変数増減法による回帰分析を Microsoft Excel 2007（使用アドインソフト：社会情報サービス「エクセル統計2010」）を用いて行う。ただし、4. (3) に示したように、路面が良い状態では車両速度の影響はあまり大きくないため、高速道路と一般道 A は統合した上で、変数  $\alpha$  のみを説明変数として回帰分析する。回帰式は式(1)~(4)とし、決定係数  $R^2$  が最も大きくなる回帰式を採用する。

$$i_f = a_1\alpha + a_2v + e \quad (1)$$

$$i_f = a_1\sqrt{\alpha} + a_2v + e \quad (2)$$

$$i_f = a_1\alpha^2 + a_2v + e \quad (3)$$

$$i_f = a_1\ln\alpha + a_2v + e \quad (4)$$

ここに、 $i_f$ ：衝撃係数予測値、 $\alpha=(1-\gamma)^2$ 、 $\gamma$ ：固有振動数比、 $v$ ：車両速度(km/h)、 $a_1, a_2$ ：回帰係数、 $e$ ：定数項である。

表-1 対象橋梁分類

	分類名	道路の種類	路面状態レベル	車両速度
1	高速道路	高規格幹線道路	A	80km/h
2	一般道A	一般国道 (維持管理良好)	A	20~ 40km/h
3	一般道B	一般国道 (その他) 都道府県道 (維持管理良好)	B	20~ 40km/h
4	一般道C	都道府県道 (その他) 市町村道	C	20~ 40km/h

回帰分析の結果、高速道路・一般道 A, B では式(2)が採用され、一般道 C では式(4)が採用された。車両速度は一般道 C のみで採用された。しかし、一般道 C での式(2)での決定係数  $R^2$  も 0.9098 と十分高い値であることから、式の簡易化の観点から、すべての分類で 1/2 次回帰式を用いることとする。さらに、一般道 C は安全側となる車両速度 20km/h のときのみを採用することですべての回帰式を式(5)で表現し、最小二乗法によって回帰係数  $b$  を決定した結果を表-2 に示す。

$$i_f = b(\sqrt{\alpha} - 0.8) \quad (5)$$

高速道路・一般道 A, 一般道 B での、本研究で提案する疲労設計用衝撃係数と指針における衝撃係数を図-6 に示す。指針の値が安全側となったのは高速道路・一般道 A の 20m だけであり、指針の衝撃係数は多くの場合で疲労損傷に対する動的な影響を過小評価し

ている可能性がある。これは、指針では固有振動数比の影響を考慮していないためだと考えられる。

表-2 回帰係数  $b$  算出結果

	分類名	$b$
1	高速道路	-0.3032
2	一般道A	
3	一般道B	-0.5769
4	一般道C	-1.7037

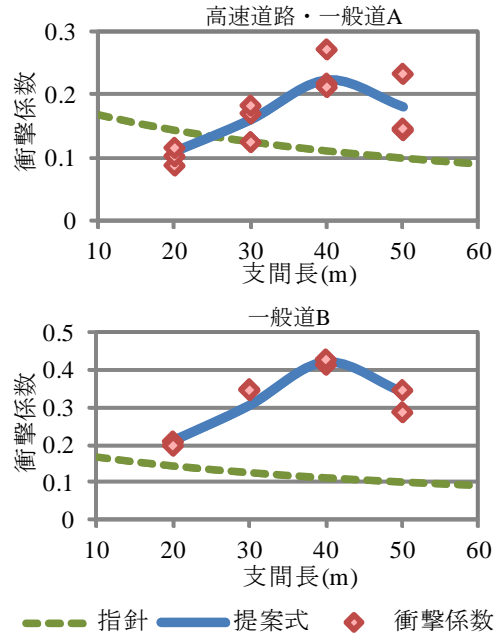


図-6 本研究の提案する衝撃係数

(5) まとめ

本研究では、固有振動数比、路面形状、車両速度が疲労損傷度による衝撃係数に与える影響を明らかにした。特に、固有振動数比と路面形状は大きな影響を与えており、これらの影響を考慮した新たな疲労設計用衝撃係数を提案した。今後は、さらに広範囲な条件下での衝撃係数のデータを蓄積していくとともに、使用車両モデルや交通流の違いによる影響の詳細な分析、車両の連行走行時との比較等を行う必要がある。また、既往の研究や実験値との比較による解析精度の検証も必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 中野一也, 中村聖三, 西川貴文, 奥松俊博: 走行荷重解析を用いた疲労設計用衝撃係数に関する基礎的研究, 鋼構造年次論文報告集, 査読有, 第 20 巻, 2012,

[学会発表] (計 5 件)

- ① Shozo Nakamura, Kazuya Nakano, Takafumi Nishikawa, Toshihiro Okumatsu and Yoshitaka Mitsui: Formulation of impact coefficient for fatigue design of steel highway bridges based on dynamic response analysis to a moving vehicle, Proceedings of the 12th Japan-Korea Joint Symposium on Steel Bridges, pp.436-447, University of the Ryukyus, Okinawa (2013.8.23)
- ② 中村聖三, 中野一也, 奥松俊博, 西川貴文: 走行荷重解析を用いた疲労設計用衝撃係数に対する車両速度の影響, 平成 24 年度土木学会西部支部研究発表会, 2013 年 3 月 9 日, 熊本大学黒髪北キャンパス (熊本市中央区)
- ③ 中村聖三, 中野一也, 西川貴文: 走行車両応答解析に基づく平均的な路面状態に対する疲労設計用衝撃係数の試算, 土木学会第 67 回年次学術講演会, 2012 年 9 月 5 日, 名古屋大学東山キャンパス (名古屋市千種区)
- ④ Kazuya Nakano, Shozo Nakamura and Takafumi Nishikawa: Fundamental study on impact factor for fatigue design of highway bridges based on moving vehicle response analysis, The 5th International Conference on New Dimensions in Bridges, Flyovers, Overpasses & Elevated Structures, pp.127-133, Wuyishan, China (2012.7.28)
- ⑤ 中村聖三, 中野一也, 西川貴文: 走行車両応答解析に基づく疲労設計用衝撃係数の試算例, 平成 23 年度土木学会西部支部研究発表会, 2012 年 3 月 3 日, 鹿児島大学群元キャンパス (鹿児島市群元)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中村 聖三 (NAKAMURA, Shozo)  
長崎大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 40315221