

中小2車線鋼道路橋の構造特性を考慮した疲労寿命評価パラメータの検討

A Study on Fatigue Life Evaluation Parameters Considering Structural Properties of Short and Medium Span Steel Highway Bridges with Two Traffic Lanes

森 猛*, 李 熙賢**, 慶 甲秀***

Takeshi MORI, Hee-Hyun LEE, Kab-Soo KYUNG

*工博, 法政大学教授, 工学部土木工学科 (〒184-8584 東京都小金井市梶野町)

**工博, 韓国構造安全技術院代表理事(ソウル松坡区可樂洞 8)

***工博, 韓国海洋大学校助教授, 工科大学土木環境システム工学部(釜山影島区東三洞 1 番地)

An effect of structural properties (bridge type, span, steel used) on fatigue lives of small and medium span I and box section girder steel highway bridges with two traffic lanes has been studied by analyzing the fatigue lives of the bridges under the movements of vehicles row obtained from the Monte Carlo simulation on the basis of the Fatigue Design Recommendations by Japanese Society of Steel Construction. The results indicate that the fatigue problems are apt to occur with increase in the static strength of the steel used and with decrease in the span of the bridges regardless of the bridge type. The fatigue life of the non-composite girder bridge is shorter than that of the composite one, and the continuous span bridge has shorter fatigue life than that of the simple span. On the basis of the above results, a new parameter for arranging the fatigue life has been proposed, and the validity of the parameter has been confirmed.

Key Words : steel highway bridges, structural property, fatigue life, bridge type, span, steel

キーワード : 鋼道路橋, 構造特性, 疲労寿命, 橋梁形式, 支間, 鋼材

1. はじめに

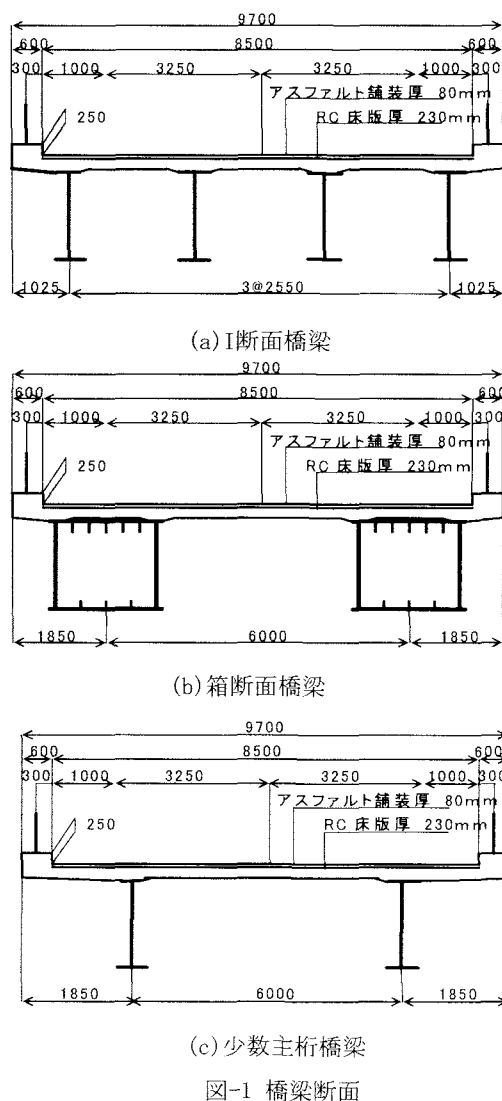
現在, 日本には橋長15m以上の橋梁だけでも, その数はおよそ12万橋を超え, それらの約半数は2030年までに供用年数50年を超えと言われている¹⁾. 周知の通り, 日本は高齢化社会を迎えつつあり, 社会基盤整備にかけられる公的予算の期待は薄く, これまでのような量産的な新設橋梁の建設は期待できない. これからは, 経済的で耐久性の高い橋梁の設計と建設が一層重要となる. 鋼橋の耐久性を支配する因子の1つが疲労である^{1, 2)}.

AASHTO³⁾やBS5400⁴⁾などのように諸外国の示方書では鋼道路橋の疲労設計基準が既に設けられているが, 日本では鋼橋の疲労設計は鉄道橋に限って行われ, 道路橋においては鋼床版を除いて必要ないとされていた. これは, 設計応力に占める活荷重応力の割合が小さく, また設計荷重が十分に大きいものとなっているために, 通常の設計を行えば疲労の問題は生じないと考えられていたためである. しかし, 日本の鋼道路橋においても疲労が原因と考えられる損傷事例が多数報告されており²⁾, これらの多くは, 設計時には想定しなかった2次応力が原因で生じたものである. 疲労が特に問題とされる溶接構造が道路橋に多用されるようになったのは1960年代以降であり, これらの鋼橋については, 供用年数の増加に伴い, 通常の設計計算で対象とする主要部材の応力によっても疲労損傷が発生する可能性も十分に考えられる. このような1

次応力による疲労損傷を防止するためには, 適切な方法で疲労に対する安全性の照査を行うことも有効であり, 2002年3月の道路橋示方書の改定⁵⁾に伴い新たに鋼道路橋の疲労設計法が示された⁶⁾.

一般に, 支間の短い橋梁ほど, あるいは静的強度レベルの高い鋼材を用いた橋梁ほど疲労損傷を受けやすいとされている. その原因は, 支間が短いほど, また使用鋼材の静的強度が高いほど疲労荷重の死荷重に対する比が高くなることにあると考えられている. このような関係を橋梁の試設計を通して定量的に明らかにすることによってどのような橋梁で疲労が問題となりやすいかを示すことは, 設計だけではなく, 維持管理を行う上でも有効である.

第1著者らは, 鋼I断面合成単純桁橋梁を対象として, 疲労寿命に対する支間と使用鋼材の影響について検討し, それらの定量的な関係を示した⁷⁾. 本研究では, 鋼I断面合成単純桁橋梁に加えて, 一般的な中小規模橋梁である箱断面, 非合成形式, 連続桁形式の鋼道路橋も対象とし, 自動車荷重列のモンテカルロシミュレーションと日本鋼構造協会の『鋼構造物の疲労設計指針・同解説』⁸⁾(以後, JSSC指針と称する)に示されている疲労照査方法を利用して, 2つの交通荷重条件下で疲労寿命解析を行い, 疲労寿命に対する構造特性(橋梁形式, 支間, 使用鋼材)の影響について検討する. そして, それらの結果に基づいて鋼橋の疲労寿命評価に用いる新たなパラメータを提案



し、その有効性について検討する。

2. 対象橋梁と設計条件

設計の対象とした橋梁は、鋼I断面の合成単純桁、非合成単純桁、非合成3径間連続桁と合成3径間連続桁、鋼箱断面の合成単純桁と非合成単純桁、そして鋼I断面少数主桁タイプの合成単純桁と合成3径間連続桁の計8種類の2車線道路橋である。これらの標準的な橋梁断面を図-1に示す。橋梁断面形状は支間・鋼種によらず同じとし、いずれの場合も同じ断面寸法の外桁と内桁を有する4つあるいは2つの主桁とした。なお、主桁の断面は、橋軸方向ですべて同じ、すなわち断面変化は設けていない。設計活荷重は、幹線道路橋を想定し、B活荷重とした。橋梁の断面設計には、市販の概略設計ソフトを利用した。横分配の計算法としては、I断面橋梁でレオンハルト、箱断面橋梁でホンベルグの格子理論を用いた。2主桁橋梁については1-0法を用いた。曲げ格子剛度は15とした。ここで設計対象とした橋梁の一覧を表-1に示す。対象橋梁の総数は170である。鋼桁の断面寸法は、主桁下フランジの計算応力が各鋼材の静的許容応力度の95～98%になるように決

表-1 橋梁一覧

桁形式	主桁 本数	使用鋼材	支間 (連続橋の場合は 中央径間)	種 類
I断面単純 非合成桁	4本	SM400, SM490 SM490Y, SM570	25m, 30m, 40m, 50m, 60m, 70m, 80m	28
I断面単純 合成桁	4本	SM400, SM490 SM490Y, SM570	25m, 30m, 40m, 50m, 60m, 70m, 80m	28
I断面連続 非合成桁	4本	SM400, SM490 SM490Y, SM570	30m, 40, 50m, 70m, 100m スパン比* 1:1:1 および0.8:1:0.8	40
I断面連続 合成桁	4本	SM490Y, SM570	30m, 50m, 70m スパン比* 0.8:1:0.8	6
箱断面単純 非合成桁	2本	SM400, SM490 SM490Y, SM570	25m, 30m, 40m, 50m, 60m, 70m, 80m	28
箱断面単純 合成桁	2本	SM400, SM490 SM490Y, SM570	25m, 30m, 40m, 50m, 60m, 70m, 80m	28
I断面単純 合成桁	2本	SM490Y, SM570	30m, 50m, 70m	6
I断面連続 合成桁	2本	SM490Y, SM570	30m, 50m, 70m スパン比* 0.8:1:0.8	6
計				170

*スパン比は、側径間の支間:中央径間の支間:側径間の支間

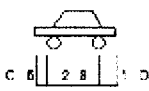
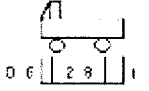
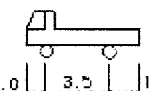
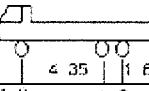
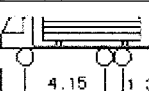
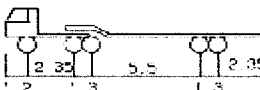
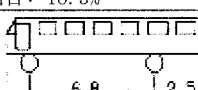
定した。

非合成桁も通常の荷重下においては合成桁と同じような挙動を示すと考えられるため、I断面非合成単純桁と箱断面非合成単純桁を合成桁とみなした場合についても疲労寿命を計算した。なお、非合成桁を合成桁とみなした場合の下フランジ応力の非合成桁として計算した応力に対する比は、70～90%であった。また、この比は支間が短いほど小さくなる傾向が認められた。

3. 変動応力の解析方法

一般に橋梁には様々な溶接継手や構造詳細が含まれるため、疲労亀裂の発生が予想される位置、すなわち疲労寿命を計算すべき位置も多数ある。ここでは、疲労寿命評価位置(継手位置)を設計上もっとも大きい応力が発生すると考えられる、単純桁については支間中央、連続桁においては側径間中央、中間支点上と中央径間中央の主桁フランジとし、その位置に疲労強度の異なる様々な継手が存在するものと仮定した。このフランジの疲労寿命を計算するためには、疲労荷重による応力変動、対象部位の疲労強度、疲労寿命計算法を明らかにする必要があるが、疲労強度と疲労寿命計算法についてはJSSC指針に従うものとした。疲労荷重は、一般国道での測定結果に基づき、当時の建設省により示された表-2の車両諸元(軸配置、重量分布)⁹⁾と、それらの構成比、交通量、車速に基づいたモンテカルロシミュレーションを行うことにより作成した車両列を利用した^{10,11)}。ここで、用いた車両構成比は表-3に示すとおりである⁹⁾。以後、これらを交通荷重モデルA、Bと呼ぶ。車両走行は対面交通とし、車両の走行速度は50km/hr、時間交通量は1,000台とした。これらの条件は、交通荷重モデルAとBで共通である。道路橋を走行する車両の幅員方向の位置は走行レーンの中央を中心として正規分布に従うものと仮定し、その標

表-2 車両の分類と各車両の重量分布

	車種	車両特性	軸重分布	交通荷重モデルA	交通荷重モデルB
小型車	乗用車 C	全長(m) 4.4 車両幅(m) 1.50	 1軸目: 50.2% 2軸目: 49.8%	平均重量(t) 1.30 最大重量(t) 3.10 最小重量(t) 0.20 分布形 対数正規 標準偏差 0.36	平均重量(t) 3.01 最大重量(t) 11.0 最小重量(t) 1.0 分布形 対数正規 標準偏差 0.59
	小型トラック ST	全長(m) 4.4 車両幅(m) 1.40	 1軸目: 23.9% 2軸目T: 76.1%	平均重量(t) 3.52 最大重量(t) 12.50 最小重量(t) 1.00 分布形 対数正規 標準偏差 1.31	平均重量(t) 4.27 最大重量(t) 13.0 最小重量(t) 1.0 分布形 対数正規 標準偏差 1.40
大型車	中型トラック MT	全長(m) 5.0 車両幅(m) 1.50	 1軸目: 19.5% 2軸目: 80.4%	平均重量(t) 5.19 最大重量(t) 18.30 最小重量(t) 1.60 分布形 対数正規 標準偏差 2.50	平均重量(t) 6.24 最大重量(t) 39.0 最小重量(t) 3.0 分布形 対数正規 標準偏差 2.58
	大型トラック LT	全長(m) 8.5 車両幅(m) 1.95	 1軸目: 14.1% 3軸目: 31.1% 2軸目: 54.8%	平均重量(t) 16.75 最大重量(t) 45.20 最小重量(t) 3.80 分布形 対数正規 標準偏差 6.29	平均重量(t) 15.46 最大重量(t) 59.0 最小重量(t) 3.0 分布形 対数正規 標準偏差 7.45
	大型ダンプ LD	全長(m) 7.5 車両幅(m) 1.95	 1軸目: 11.7% 3軸目: 44.0% 2軸目: 44.3%	平均重量(t) 19.52 最大重量(t) 61.90 最小重量(t) 5.40 分布形 対数正規 標準偏差 9.54	平均 最大 最小 偏差 載荷 26.76 55.0 3.0 6.02 空荷 13.36 55.0 3.0 5.23 台数比 載荷61.5 : 38.5空荷
	タンクローリー TR	全長(m) 8.0 車両幅(m) 1.95	 1軸目: 13.7% 3軸目: 32.1% 2軸目: 54.2%	平均重量(t) 13.82 最大重量(t) 33.70 最小重量(t) 3.90 分布形 対数正規 標準偏差 8.31	平均 最大 最小 偏差 載荷 24.26 31.0 3.0 24.3 空荷 10.02 31.0 3.0 10.86 台数比 載荷33.5 : 66.5空荷
	セミトレー TT	全長(m) 14.0 車両幅(m) 2.05	 1軸目: 8.4% 4軸目: 29.4% 2軸目: 18.5% 5軸目: 27.4% 3軸目: 18.3%	平均重量(t) 24.78 最大重量(t) 86.70 最小重量(t) 5.1 分布形 対数正規 標準偏差 12.92	平均重量(t) 26.93 最大重量(t) 91.0 最小重量(t) 5.0 分布形 対数正規 標準偏差 14.38
	大型バス BS	全長(m) 10.5 車両幅(m) 2.0	 1軸目: 37.1% 2軸目: 62.9%	平均重量(t) 13.84 最大重量(t) 18.70 最小重量(t) 5.80 分布形 対数正規 標準偏差 2.41	平均重量(t) 8.42 最大重量(t) 21.0 最小重量(t) 3.0 分布形 対数正規 標準偏差 4.68

標準偏差は15cmとした。これは、大阪市の測定結果に基づくものである¹²⁾。また、走行中に車両の幅員方向の位置は変化しないものとした。以上の条件をもとに、交通流を交通量とその車種構成で代表させ、自動車の配列、重量と車頭間隔を確率変量として自動車荷重列のモンテカルロシミュレーションを行い、荷重列が橋上を通過する際に生じる応力変動を着目部位の応力の影響面を利用して解析する。なお、本解析には、第1著者らが開発した応力変動解析プログラム¹¹⁾を使用した。

橋梁部材に生じる応力は解析から計算した応力よりも

小さくなることが多い。その場合、疲労照査は過度に安全となるため、設計計算応力補正係数 α を乗じて補正する。この補正係数 α は、類似の構造物での測定結果や模型実験の結果に基づき設定するとされている^{6,7)}。ここでは、日本道路協会の「鋼道路橋の疲労設計指針」⁶⁾に示されている $\alpha=0.8$ をすべての橋梁に対して適用した。また、疲労照査用衝撃係数 i_f も同指針にしたがって、断面設計に用いられる衝撃係数の1/2とした。

以上の条件下で自動車荷重列のモンテカルロシミュレーションを行い、荷重列が橋上を走行する際に生じる応

表-3 車種構成比

			大型車混入率	
			モデルA	モデルB
			32.5%	49.0%
車種	小型車	乗用車 C	55.1%	39.1%
		小型トラック ST	12.4%	11.9%
	大型車	中型トラック MT	13.1%	21.1%
		大型トラック LT	10.3%	11.0%
		大型ダンプ LD	3.0%	8.5%
		タンクローリーTR	1.7%	1.5%
		セミトレーラーTT	3.4%	5.5%
		大型バス BS	1.0%	1.6%

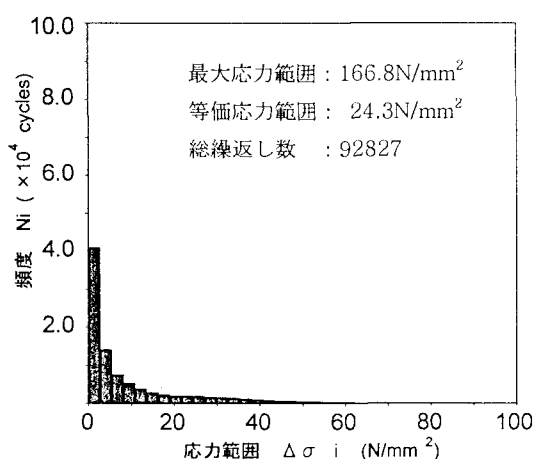


図-4 応力範囲頻度分布の解析例

力変動を解析する。図-2は、影響面の例を示したものである。なお、影響面の縦距は、集中荷重10kNあたりの値としている。このような応力の影響面と荷重列のモンテカルロシミュレーションを利用して疲労荷重が橋上を走行するときの応力変動を解析した例を図-3に示す。この応力変動にレインフロー法を適用し、応力範囲頻度分布を求める。なお、交通荷重のシミュレーションは、4日分を行った。4日分のシミュレーションにより求めた応力範囲頻度分布の例を図-4に示す。

4. 疲労寿命の計算方法

本研究では、直応力を受ける継手を対象とする。これらの継手に対して、JSSC指針では強度等級(A~H)の8本の疲労設計曲線を設定している。先に示した各橋梁・部位別の応力範囲頻度分布とJSSC指針の疲労設計曲線を比較することにより疲労寿命を求める。この比較を行うために、マイナー則、修正マイナー則、ハイパッサの方法、打ち切り限界付き修正マイナーの方法など、様々な方法

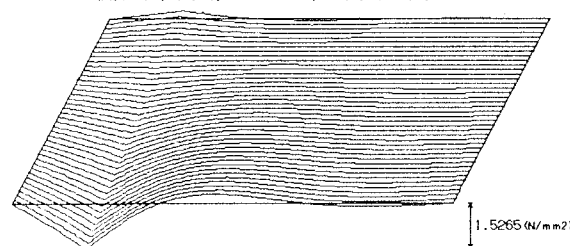
I断面非合成連続桁(支間比1:1:1)外桁
側径間中央, SM490Y, 中央径間40m

図-2 応力影響面の例

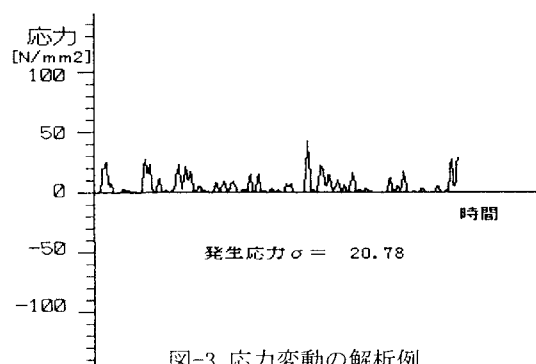
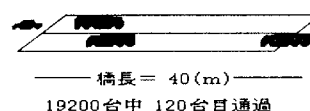


図-3 応力変動の解析例

が提案されている。しかし、現状ではどの方法が最も寿命評価に適しているかは明らかとなっていない¹³⁾。そのため、ここでは最も安全側の疲労寿命評価となる修正マイナー則を用いて疲労寿命を算出することとした。なお、JSSC指針では、打ち切り限界付き修正マイナーの方法あるいは修正マイナー則で疲労寿命を求めることとしている。修正マイナー則と4日分の応力範囲頻度分布を用いれば、疲労寿命N(年)は次式より求めることができる。

$$N(\text{年}) = \frac{(4/365) \cdot 2.0 \times 10^6 \cdot \Delta \sigma_f^3}{\sum \Delta \sigma_i^3 n_i} \quad (1)$$

$\Delta \sigma_f$: 強度等級ごとに与えられている200万回
基本許容応力範囲

$\Delta \sigma_i$: 4日分の応力範囲頻度分布を構成する
応力範囲

n_i : $\Delta \sigma_i$ の頻度

5. 疲労寿命の計算結果

本章では、交通荷重モデルAを用いた場合の結果を示す。なお、交通荷重モデルBを対象とした検討結果については、6.6節において示す。

5.1 疲労寿命に対する支間の影響

図-5は交通荷重モデルAに基づいたモンテカルロシミュレーションを行うことにより作成した車両列を利用し

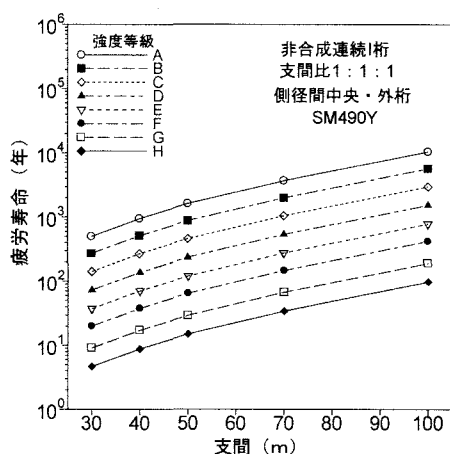


図-5 非合成連続I桁の側径間中央の疲労寿命と支間の関係

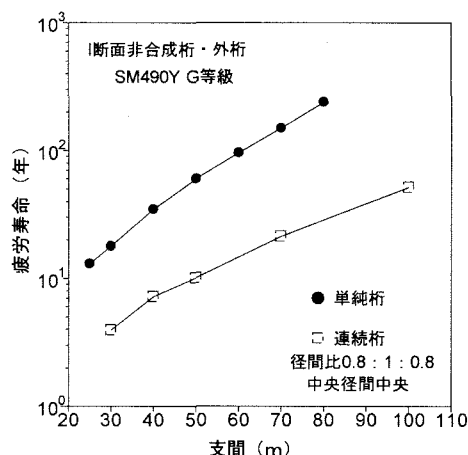


図-7 単純桁と連続桁の疲労寿命の比較

て計算したI断面非合成連続桁の側径間中央・外桁における疲労寿命と支間の関係を示している。支間が長くなるにしたがって疲労寿命は長くなっている。支間100mの疲労寿命は支間30mの約8倍、40mの約5倍、50mの4倍程度となっている。これは支間が長くなるにしたがって、死荷重が大きくなり全荷重に占める疲労荷重の割合が小さくなるためと考えられる。また、この図からわかるように、継手の強度等級によっても疲労寿命は大きく異なっている。これらの疲労寿命の比は各強度等級における基本許容応力範囲の3乗の比となる。その他の形式の橋梁についても、同様な結果が得られた。

5.2 疲労寿命に対する使用鋼材の影響

疲労寿命と鋼材の静的許容応力度の関係の例を図-6に示す。ここでは、強度等級Gの継手を対象として、支間50mで径間比1:1:1のI断面非合成連続桁・外桁の側径間中央、中間支点上、中央径間中央で得られた結果を示している。いずれの場合も、使用鋼材の静的許容応力度が高いほど疲労寿命は短くなっている。これは静的許容応力度が大きくなるにしたがって全荷重に占める死荷重の割合が低くなり、疲労荷重の割合が高くなるためと考えられる。このような、関係は、いずれの形式の橋梁、支間、部位においても同様であった。

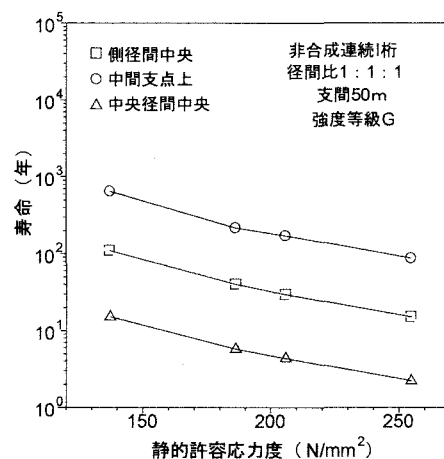


図-6 非合成連続I桁の側径間中央の疲労寿命と鋼材の静的許容応力度の関係

各部位での疲労寿命を比較すると、中間支点上でもっとも長く、側径間中央、中央径間中央の順となっている。このような傾向は、径間比0.8:1:0.8の非合成連続桁と合成連続桁においても同じであった。したがって、この程度の径間比の3径間連続桁であれば、中央径間中央が疲労に対してもっともクリティカルな位置となる。

5.3 疲労寿命に対する橋梁形式の影響

橋梁形式によって疲労寿命がどのように異なるかを整理する。ここでは、単純桁と連続桁、非合成桁と合成桁、I桁と箱桁、I断面2主桁とI断面4主桁の疲労寿命を比較する。使用鋼材はSM490Yとし、強度等級Gの継手を対象とする。

(1) 単純桁と連続桁の比較

連続桁と単純桁の疲労寿命を比較した結果の例を図-7に示す。ここでは、I断面非合成の連続桁（径間比0.8:1:0.8、中央径間中央）と単純桁の疲労寿命を比較している。いずれの支間においても、単純桁に比べて連続桁で疲労寿命が短くなっている。例えば、支間30mの疲労寿命を比較すると、単純桁の疲労寿命は連続桁の約4.5倍となっている。また、この比は支間が長くなるにしたがって大きくなっている。このような傾向は、他の形式の橋梁においても同じであった。このような疲労寿命の相違は、連続桁の影響面が交番する形状となり、応力の変動幅が大きくなることに原因があると考えられる。

(2) 非合成桁と合成桁の比較

I断面合成単純桁とI断面非合成単純桁の疲労寿命を比較した結果を図-8に示す。図中には、非合成桁を合成桁とみなして計算した疲労寿命も示している。合成桁の疲労寿命は、非合成桁に比べて、1.5~2.0倍程度長くなっている。また、非合成桁を合成桁とみなした場合の疲労寿命は、合成桁とほぼ同じとなっている。このような傾向は、I断面連続桁においても同じであった。

(3) I桁と箱桁の比較

I断面合成単純桁と箱断面合成単純桁の疲労寿命を比較した結果の例を図-9に示す。I断面合成単純桁に比べて、箱断面合成単純桁のほうが、若干ではあるが疲労寿命が長くなっている。このような傾向は、非合成桁においても同じであった。

(4) 4本主桁と2本主桁の比較

I断面合成単純2主桁・I断面合成連続2主桁とI断面合成単純4主桁・I断面合成連続4主桁で得られた疲労寿命と支間の関係を図-10に示す。単純桁では、2本主桁の疲労寿命が4主桁よりも2～3倍程度長くなっているものの、連続桁では両者の疲労寿命がほぼ同じとなっている。少なくとも、2本主桁の疲労寿命は4本主桁よりも短くなることはないと言える。

6. 疲労寿命評価パラメータの検討

前章では、疲労寿命と橋梁の構造特性（橋梁形式、部位、支間、使用鋼材）の関係について検討した。本章では、前章の結果に基づいて構造特性を考慮した疲労寿命評価パラメータについて検討する。ここでは、主として交通荷重モデルAを対象とした検討結果を示し、交通荷重モデルBを対象とした検討結果については6.6節において示す。また、強度等級Gの継手を対象として計算した疲労寿命を用いて検討する。

6.1 活荷重応力比による疲労寿命の整理

疲労寿命に対する支間と使用鋼材の影響は、一般に疲労荷重の大きさと死荷重の大きさの比に原因があるとされている。そのため、ここでは橋梁の設計計算によって求めた活荷重応力と死荷重応力の比で橋梁の形式・支間・使用鋼材が疲労寿命に及ぼす影響を整理できるのではないかと考えた。この2つの応力の比を活荷重応力比と呼び、以下のように定義する。

$$\text{活荷重応力比} = \frac{\text{活荷重応力}}{\text{死荷重応力} + \text{活荷重応力}}$$

図-11(a)はI断面非合成連続桁で得られた、支間ごとの疲労寿命と活荷重応力比の関係を示している。各支間の活荷重応力比は、支間が短くなるほど大きくなり寿命は短くなっている。しかし、疲労寿命-活荷重応力比関係は支間ごとに大きく異なっている。このような傾向は、他の形式の橋梁においても同じであった。したがって、支間の影響を活荷重応力比で整理できるとは言えない。

図-11(b)はI断面非合成連続桁で得られた、使用鋼材ごとの疲労寿命と活荷重応力比の関係を示したものである。使用鋼材の静的強度が高くなるほど寿命は短くなるという傾向はこの図からも認められる。しかし、疲労寿命-活荷重応力比関係は使用鋼材ごとに大きく異なっている。このように、活荷重応力比によって使用鋼材の影響を整理することはできない。

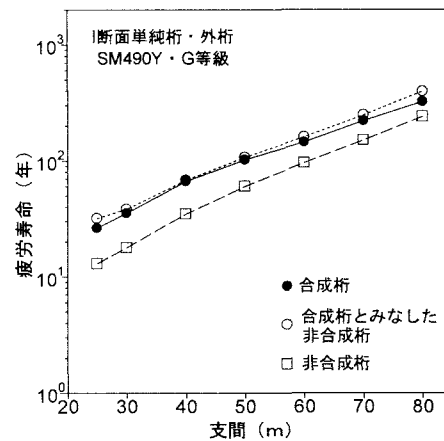


図-8 非合成桁と合成桁の疲労寿命の比較

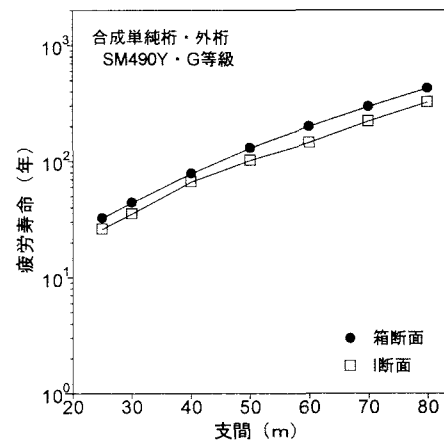


図-9 I桁と箱桁の疲労寿命の比較

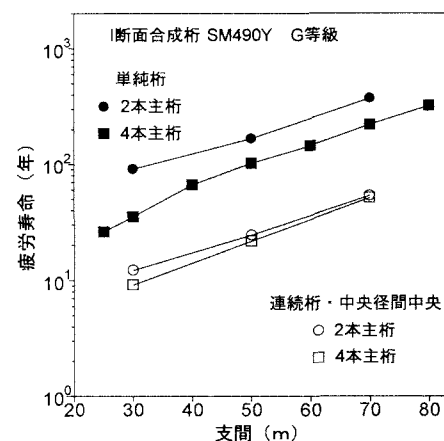


図-10 2本主桁と4本主桁の疲労寿命の比較

図-11(c)はSM490Yを用いた場合の橋梁形式ごとの疲労寿命と活荷重応力比の関係を示したものである。橋梁形式・部位によって、疲労寿命-活荷重応力比関係は異なっているため、活荷重応力比だけでは疲労寿命に対する橋梁形式の影響を整理できるとは言えない。

6.2 修正活荷重応力比による疲労寿命の整理

前節で示したように活荷重応力比だけでは、疲労寿命に対する支間、使用鋼材と橋梁形式の影響を整理できなかった。周知の通り、疲労寿命は応力範囲に依存し、鋼

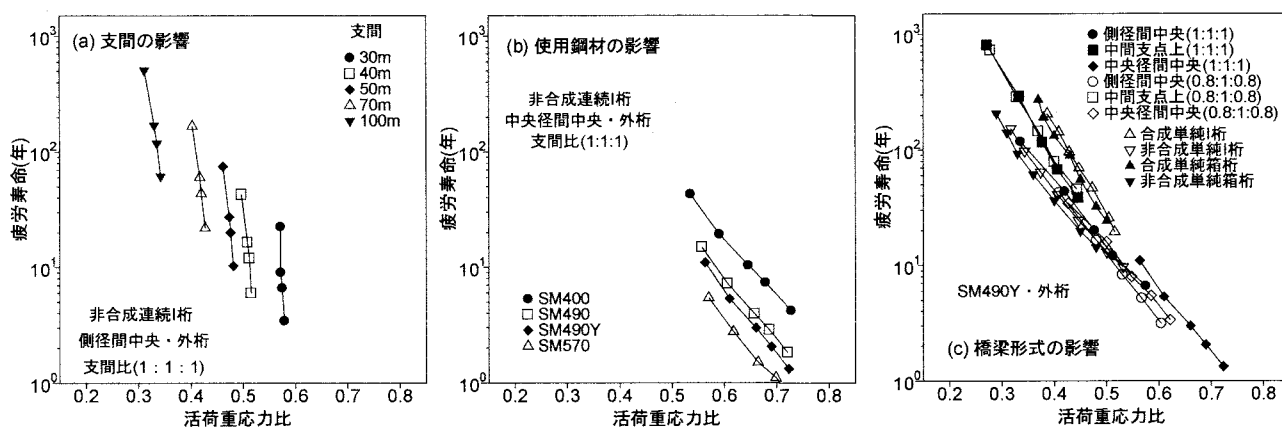


図-11 疲労寿命と活荷重応力比の関係

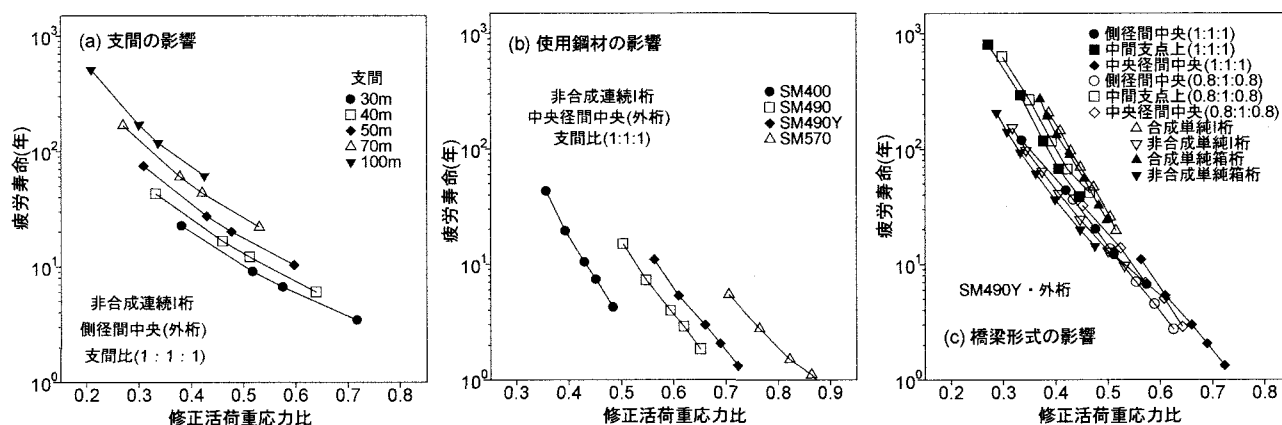


図-12 疲労寿命と修正活荷重応力比の関係

材の静的強度には依存しない。また、主桁の断面寸法は鋼材の静的強度に依存する。そのため、同じ活荷重応力比でも、疲労荷重による応力範囲は静的強度の高い鋼材ほど、疲労荷重による応力範囲が大きくなり、図-11(b)に示したような疲労寿命－活荷重応力比関係が得られたものと考えられる。そこで、ここでは鋼材による静的許容応力度の違いを考慮して修正した活荷重応力比で疲労寿命を整理することを試みた。

鋼橋において最もよく使用されている鋼材SM490Yを基準とし、それぞれの鋼材の静的許容応力度を用いて、以下のように活荷重応力比を修正する。ここではこれを修正活荷重応力比と呼ぶ。

$$\text{修正活荷重応力比} = \frac{\text{鋼材の静的許容応力度}}{\text{SM490Yの静的許容応力度}} \times \text{活荷重応力比}$$

疲労寿命と修正活荷重応力比の関係の例を図-12(a)～(c)に示す。図-12(a)は支間の影響を示したものであるが、図-11(a)と比べて疲労寿命の支間による変化は小さくなっているものの、支間の短いものほど、寿命が短いという傾向は図-11(a)と同じである。また、鋼材の影響を示した図-12(b)では、図-11(b)とは逆に静的許容応力度の低い鋼材を用いた場合に疲労寿命が短くなっている。また、図-12(b)では、鋼材間の疲労寿命の差が、図-11(b)に比べて若干大きくなっている。図-12(c)に示す橋梁形

式・部位ごとの疲労寿命－修正活荷重応力比関係は、鋼材を固定しているため、図-11(c)とまったく同じである。このように、修正活荷重応力比を用いても、疲労寿命に対する支間、使用鋼材、橋梁形式・部位の影響を整理することはできない。

6.3 最大縦距範囲による疲労寿命の整理

疲労寿命は応力の変動幅に依存し、また応力変動幅は応力影響面の形状と縦距に依存する。単純桁であれば応力変動幅は最大縦距に比例し、連続桁では、最大縦距と最小縦距の差に依存するであろう。ここでは、これを最大縦距範囲と呼び、これを用いて疲労寿命の整理を試みる。

図-13(a)と図-13(b)に、支間ごとあるいは使用鋼材ごとにまとめた疲労寿命と最大縦距範囲の関係の例を示す。いずれの場合も支間や使用鋼材によらず、ほぼ1つの直線関係で疲労寿命－最大縦距範囲関係が与えられている。したがって、最大縦距範囲は疲労寿命に対する支間と使用鋼材の影響を整理するためのパラメータとして適切であると言える。

図-13(c)は、疲労寿命に対する橋梁形式・部位の影響を示したものである。合成単純箱桁橋と非合成単純箱桁橋で他の形式の橋梁に比べて疲労寿命が短くなっている。したがって、最大縦距範囲では橋梁形式の影響を整理することはできないと言える。

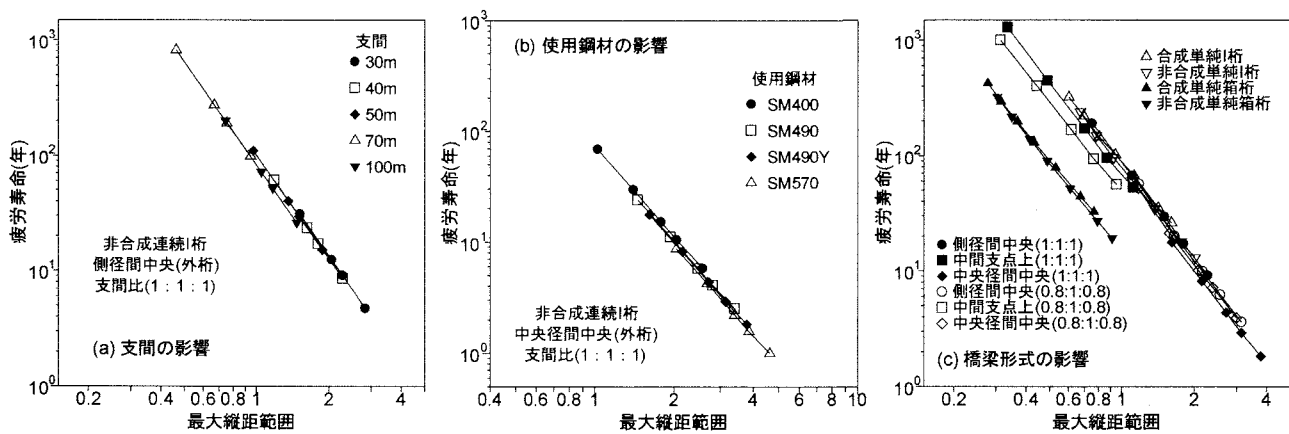


図-13 疲労寿命と最大縦距範囲の関係

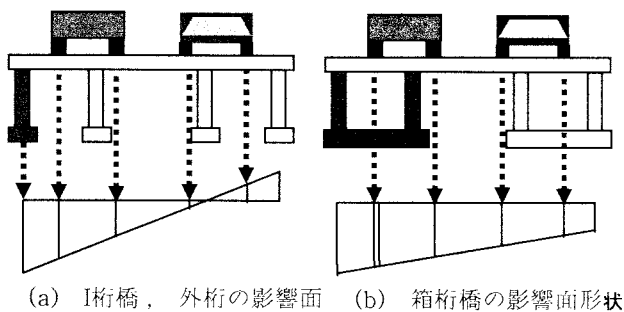


図-14 橋軸直角方向の影響面形状

6.4 修正縦距による疲労寿命の整理

前節に示した最大縦距範囲で疲労寿命を整理した場合の問題点として、箱桁で疲労寿命が短くなっていることが挙げられる。これは箱桁とI桁の横分配係数が異なるために生じたものと考えられる。すなわち、最大縦距範囲は、2車線の内、1車線のみを車両が走行する場合には、応力変動の大きさを表すための最適なパラメータと考えられるが、車両は2つの車線を走行するので、それぞれの車線を車両が走行する際の応力変動の大きさを考慮したパラメータが必要と考えられる。そのため、ここではそれぞれの車両走行位置の応力影響面の最大縦距範囲を利用すれば疲労寿命を整理できるのではないかと考えた。

図-14にI桁橋、箱桁橋の外桁の橋軸直角方向の応力影響面形状を示す。このように、橋梁形式の違いにより、

車両走行位置での応力影響面縦距は異なる。そのため、図-14に示すように4つの車輪位置の応力影響面の最大縦距範囲 ($ML1$, $ML2$, $ML3$, $ML4$) を求め、それらの3乗和の3乗根(以後、修正縦距と呼ぶ)を求め、疲労寿命を整理した。

$$\text{修正縦距} = \sqrt[3]{ML1^3 + ML2^3 + ML3^3 + ML4^3}$$

その結果を図-15(a)-(c)に示す。なお、車両の位置はレーンマーク中央とし、車輪の間隔は1750mmとした。これは床版の設計に用いられているT荷重の幅である。図-15(a)と図-15(b)に示す支間、使用鋼材ごとにまとめた疲労寿命-修正縦距関係は前節と同様、ほぼ1つの直線関係で与えられている。すなわち、修正縦距で疲労寿命に対する支間と使用鋼材の影響は整理できるといえる。図-15(c)に示す疲労寿命に対する橋梁形式の影響は、図-12(c)でみられた箱桁で疲労寿命が短くなるという傾向は認められない。しかし、連続桁の中間支点上の疲労寿命-修正縦距関係が他の橋梁形式・部位よりも若干ではあるが、下に位置している。

6.5 有効縦距による疲労寿命の整理

前節で修正縦距により疲労寿命を整理した場合の問題点として、連続桁の中間支点上で疲労寿命が短くなることが挙げられた。これは単純桁と連続桁の影響面形状の

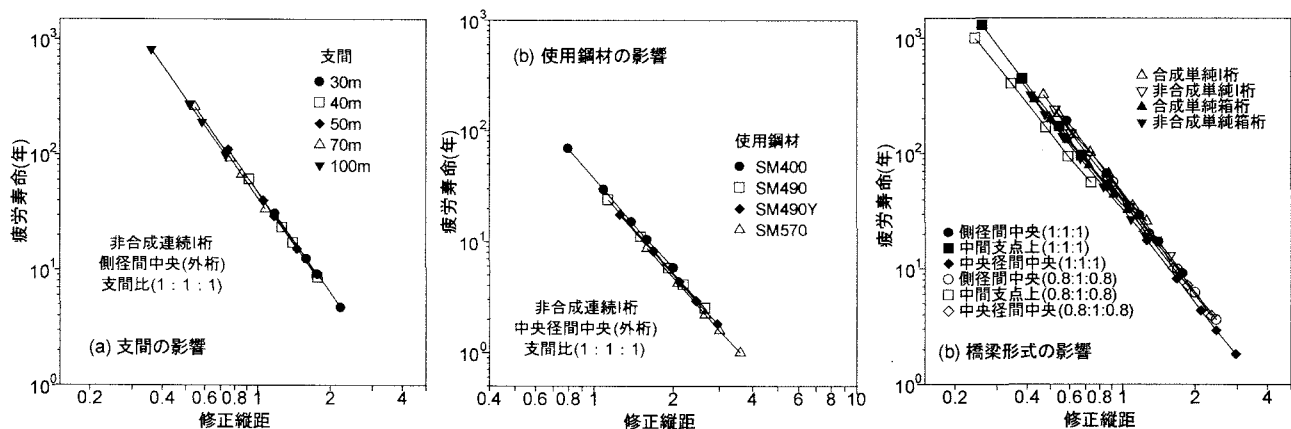


図-15 疲労寿命と修正縦距の関係

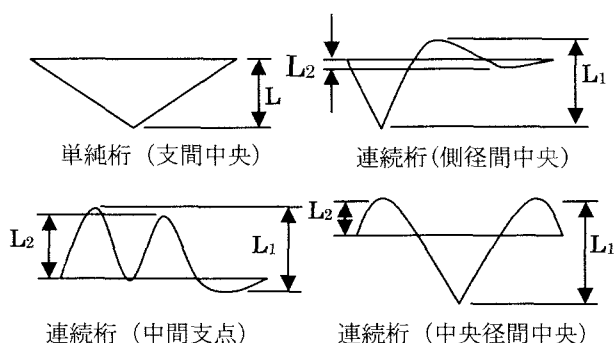


図-16 応力縦距範囲と頻度

違いによって生じるのではないかと考えられる。すなわち、疲労寿命が応力範囲のみではなく、その頻度にも依存することを、修正縦距では十分に考慮できていないためと考えられる。そのため、ここでは連続桁の影響面に対して、レインフロー法を適用することにより求められる応力縦距範囲と頻度を用いれば、疲労寿命を整理できるのではないかと考えた。

図-16は、単純桁の支間中央、連続桁の側径間中央、中間支点上、中央径間中央における橋軸方向の影響面形状を示している。単純桁においては1つの縦距範囲L、連続桁においては2つの縦距範囲L₁、L₂が生じる。したがって、前項で示した修正縦距が連続桁においては2つ算出されることになる。この2つの修正縦距の3乗和の3乗根を有効縦距と呼び、疲労寿命を整理するためのパラメータとした。

$$\text{有効縦距} = \sqrt[3]{(\text{修正縦距①})^3 + (\text{修正縦距②})^3}$$

疲労寿命と有効縦距の関係の例を図-17(a)～(c)に示す。支間、使用鋼材、橋梁形式・部位のいずれの影響も認められず、いずれの図においても疲労寿命－有効縦距関係は1つの直線関係で与えられている。なお、有効縦距は、「鋼道路橋の疲労設計指針」⁶⁾の疲労照査法で用いられている「T-20荷重が各車線のレーンマーク中央を走行した際に生じる応力変動を求める」こととほぼ等価である。

6.6 パラメータの汎用性

図-18(a)は、交通荷重モデルAを対象として、また強度等級Gの継手を対象として求めた全疲労寿命データを有効縦距で整理した結果を示している。疲労寿命と有効縦距の関係は、支間、使用鋼材の静的強度、橋梁形式と部位によらず、両対数紙上でほぼ傾き-3の1つの直線で与えられている。図中には、疲労寿命の対数値と有効縦距の対数値の相関係数も示しているが、その値は-0.980である。

交通荷重モデルBを対象に図-18(a)と同様に疲労寿命－有効縦距関係を求めた結果を図-18(b)に示す。疲労寿命－有効縦距関係は、交通荷重モデルAと同様に、両対数紙上でほぼ傾き-3で与えられている。疲労寿命の対数値と有効縦距の対数値の相関係数は-0.984である。

以上より、有効縦距は、疲労寿命を整理する適切なパ

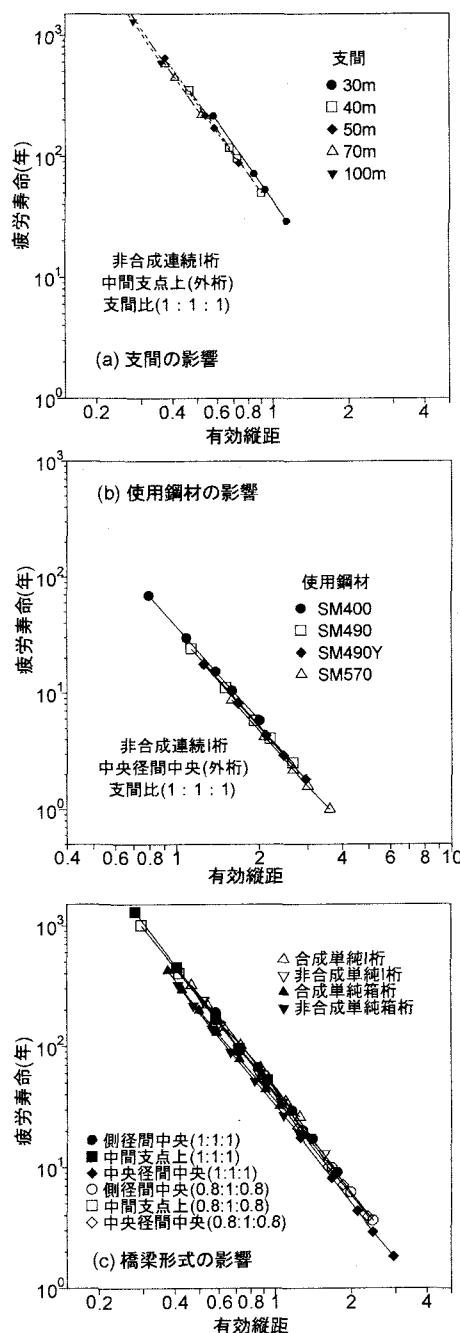


図-17 疲労寿命と有効縦距の関係

ラメータといえる。また、疲労寿命は有効縦距の3乗に反比例するといえる。

7. まとめ

- (1) 疲労寿命に対する、橋梁形式・部位・支間・使用鋼材の影響を整理するパラメータとして、車両走行位置での応力影響面の縦距をもとに算出される有効縦距を提案する。疲労寿命と有効縦距は、橋梁形式・部位・支間・使用鋼材によらず、両対数紙上でほぼ傾き-3の1つの関係にあり、有効縦距は疲労寿命を整理するパラメータとして適しているといえる。

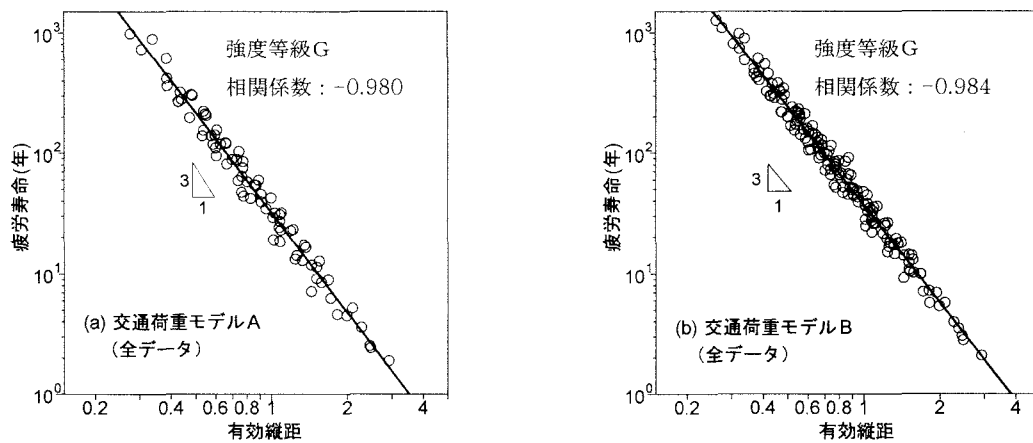


図-18 すべての橋梁の疲労寿命と有効縦距の関係

- (2) 非合成桁の疲労寿命は、合成桁と比較して短い。ただし、非合成桁を合成桁と見なして計算した疲労寿命は、合成桁と同程度である。1桁と箱桁橋梁を比較すると、箱桁橋梁の方が疲労寿命は長くなる。連続桁の疲労寿命は、単純桁に比べて短い。3径間連続桁では、中央径間中央でもっとも疲労の問題が生じやすい。
- (3) 疲労寿命は、支間が長くなるにしたがって、また橋使用鋼材の許容応力度が低くなるにしたがって、長くなる。

参考文献

- 1) 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理，土木学会論文集，No.501，pp.1～10，1994.
- 2) 日本道路協会：鋼橋の疲労，丸善，1997.
- 3) American Association of State Highway and Transportation Officials：Standard Specifications for Highway Bridges, 17th Edition, 2002.
- 4) British Standards Institution：BS5400, Steel Concrete and Composite Brides, Part10, Code of Practice for fatigue, 1980.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（共通編・鋼橋編），丸善，2002.
- 6) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，丸善，2002.
- 7) 森猛，山口英治：鋼 I 断面合成桁橋梁の疲労寿命に対する支間長と使用鋼材の影響，土木学会構造工学論文集，Vol.46A，pp.1271-1280，2000.
- 8) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，技法堂出版，1993.
- 9) 建設省土木研究所：土木研究所資料第2682号，既設橋梁の耐久性評価・向上技術に関する調査研究，1988.
- 10) Miki,C., Goto,Y., Mori,T. and Yoshida,H.：Computer Simulation Studies on The Fatigue Load and Fatigue Design of Highway Bridges，土木学会論文集，No.356，pp.37-46，1985.
- 11) 森猛，梶原仁，長谷川洋介：JSSC指針に基づく鋼構造物の疲労安全性照査プログラムの開発とその応用，鋼構造論文集，第2巻第8号，pp.37～45，1995.
- 12) 関西道路研究会・道路橋調査研究委員会：疲労小委員会報告書，1989.
- 13) 森猛：繰返荷重を受ける溶接鋼構造物の寿命予測（疲労き裂進展解析と変動振幅応力下の寿命予測），第67巻第2号，溶接学会誌，pp.5-9，1998.

(2003年9月12日受付)