

道路橋示方書（鋼橋編）の疲労設計の考え方

The outline of the fatigue design methods of
"Guideline for Fatigue Design of Steel Highway Bridges".

玉越 隆史*

Takashi TAMAKOSHI

ABSTRACT In March 2002, the Japanese Design Specifications for Highway Bridges were revised and published. In the revision, a concept of fatigue design had been introduced for the first time. At the same time, "Guideline for Fatigue Design of Steel Highway Bridges" was published as a reference for fatigue design. In this paper, the outline of the specifications and the guidelines and the background information to determine the fatigue design methods in the guideline are described.

KEYWORDS ; 鋼道路橋 疲労設計 溶接継手 大型車

steel highway bridge, fatigue design, welded joints, truck traffic

1 はじめに

近年、鋼道路橋において、さまざまな部位で自動車荷重が原因と考えられる疲労損傷の発生が報告されるようになってきている。現状の厳しい重交通の実態を鑑みると、将来の疲労被害の拡大が懸念されることもあり、平成13年に通達された「橋、高架の道路等の技術基準」（以下道路橋示方書）¹⁾では鋼道路橋の設計において疲労の影響を考慮することが規定され、同時に道路橋示方書を補完し、鋼道路橋に対する疲労設計の基本的な考え方についてまとめた参考図書として「鋼道路橋の疲労設計指針」（以下指針）²⁾が出版された。

ここにわが国では、初めて鋼道路橋に対して特別な場合を除いて原則として疲労設計が行われることになり、併せて、設計の前提となる溶接継手の疲労強度等級や細部構造などについても内外の最新の研究成果を反映した統一的な考え方が整理された。本稿では、主に「鋼道路橋の疲労設計指針」に示される疲労設計の考え方とその背景について概要を報告する。

2 疲労設計の変遷

2.1 道路橋示方書（鋼橋編）の変遷

道路橋示方書に関する技術基準の歴史は、明治時代中期の内務省訓令（第13号「道路構造保存法」）にまでさかのぼることができるが、鋼道路橋に関する設計基準として体系的に取りまとめられたのは、昭和14年の内務省土木局「鋼道路橋設計示方書（案）」がはじめである。

その後、昭和47年からは「橋、高架の道路等の技術基準」として建設省から通達されるようになり、現在まで数度の改定が行われている（表-1）。最近では平成5年に車両の大型化への対応や耐久性の向上等を図るために活荷重関連規定を中心とした改訂が行われ、平成8年には阪神淡路大震災の橋梁への被害を受けて、耐震設計に関連する規定を中心とした改訂が行われた。そして、平成13年、性能規定型基準への転換および耐久性に関する規定の充実を主とした改訂が行われ、鋼橋編において先に述べたように原則として疲労の影響を考慮することが規定された（図-1）。

*工修 国土技術政策総合研究所 橋梁研究室 主任研究官（〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地）

表-1 示方書の変遷

	年	示方書	内容
1	S14(1939)	・鋼道路橋設計示方書案 ・鋼道路橋製作示方書案	支間長 120m 以下 リベット接合
2	S15(1940)	・電弧溶接道路橋設計及製作示方書案	SS41
3	S31(1956)	・鋼道路橋設計示方書 ・鋼道路橋製作示方書	TL-20、TL-14 床版の活荷重曲げモーメント式
4	S32(1957)	・溶接鋼道路橋示方書	SS41、SM41
5	S35(1960)	・鋼道路橋の合成桁設計施工指針	鋼単純合成桁 ずれ止め
6	S39(1964)	・鋼道路橋設計示方書 ・鋼道路橋製作示方書	支間長 150m に拡大 50kg 鋼、衝突荷重規定
7	S39(1964)	・溶接鋼道路橋示方書	鋼床版構造を規定 現場溶接の許容応力度
8	S40(1965)	・鋼道路橋の合成ゲタ設計施工指針	
9	S41(1966)	・鋼道路橋高力ボルト摩擦接合設計施工指針	F9T、F11T 継手の設計、施工、検査
10	S47(1972)	・道路橋示方書 Ⅱ 鋼橋編	支間長 200m 以下、TT-43 アーチ等の構造を新設 HTB (F8T、F10T、F11T) 床版関係の大幅変更
11	S55(1980)	・道路橋示方書 Ⅱ 鋼橋編	局部座屈の考慮 HTB 関連改訂
12	H2(1990)	・道路橋示方書 Ⅱ 鋼橋編	RC 床版厚の改訂 ケーブル安全率の見直し
13	H6(1994)	・道路橋示方書 Ⅱ 鋼橋編	B.A 活荷重 (25t) RC 床版厚の改訂
14	H8(1996)	・道路橋示方書 Ⅱ 鋼橋編	一部板厚標準の拡大 予熱温度規定の改訂 耐力点法(ITB)を規定
15	H14(2002)	・道路橋示方書 Ⅱ 鋼橋編	<u>疲労の影響を考慮</u> 溶接構造用耐候性鋼の板厚改訂 高力ボルト引張接合継手規定 PC 床版規定

【H8 3.1.5 疲労の影響】

・ 道路橋においては、鋼床版ならびに道路橋に軌道又は鉄道を併用する場合などを除いて一般に疲労の影響を考慮しなくてよい。

【H14 5.3 疲労設計】

・ 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。

図-1 平成 14 年道路橋示方書での扱い

- ・ 1980 年頃から全国的に疲労損傷が顕在化
- ・ 『鋼構造物の疲労設計指針・同解説』(1993 年 4 月 日本鋼構造協会) 3)
- ・ 『鋼橋の疲労』(1997 年 5 月 日本道路協会) 4)
 - 新しいデータの蓄積 (一部応力照査方法の確立)
 - 疲労試験データの蓄積 (疲労強度等級の明確化、継手の要求品質の明確)
 - 被害の継続 (確実に累積していくため早期に対策が必要)

- ・ 応力照査を行う疲労設計法の例示
- ・ 細部構造など、最新の知見に基づく構造上の疲労耐久性向上策
 - ⇒ 疲労強度等級に基づく合理的な継手設計
 - ⇒ 著しく疲労強度が低い継手の排除 など

図-2 疲労設計導入の背景と対応のイメージ

2. 2 疲労設計の変遷

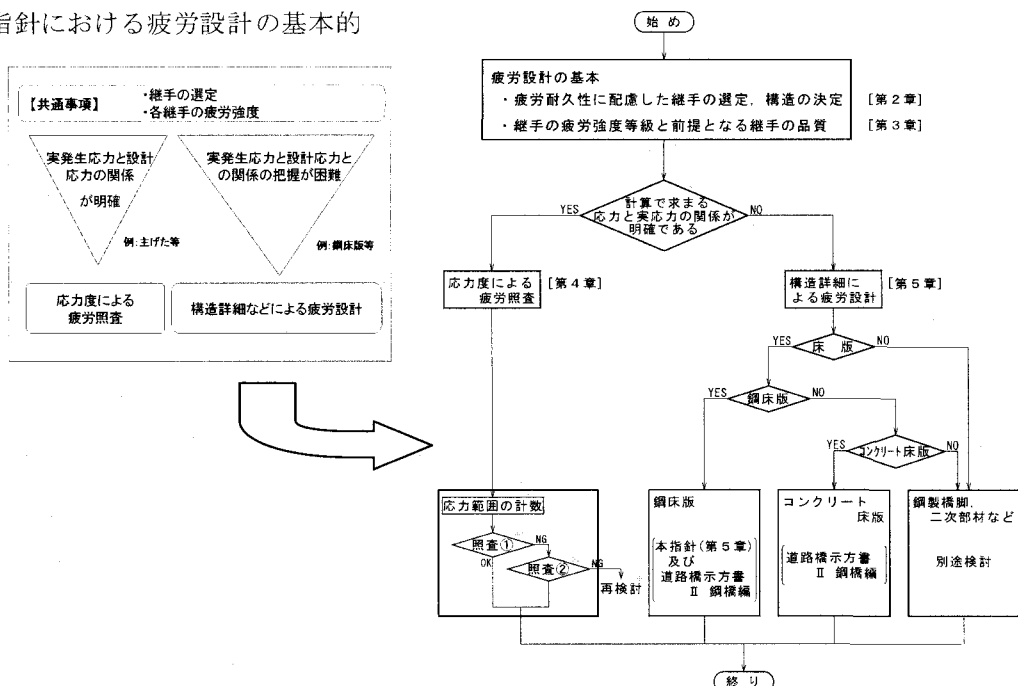
道路橋において疲労損傷が顕在化し始めたのは 1980 年頃からであり、事例数、種類とも増加する傾向にある。従来、道路橋の設計においては鋼床版や軌道が併設される場合などの特別な場合を除いて、一般には疲労の影響を考慮しなくても良いこととしていた。これは、主げた等の設計にあたって考慮されている活荷重のレベルから考えて、疲労の原因として最も有力な個々の車両の走行によって生じる応力変動が問題となるレベルにはなりにくいと考えられてきたことによる。しかし近年、主桁への部材の取り付け部や、鋼製橋脚の隅角部等さまざまな部位、部材で重大な疲労亀裂の発生が報告されるようになっており、一方で、各方面で精力的に行われてきた研究の成果として道路橋の疲労設計に関する知見も蓄積されてきた。これらを背景に、このたび鋼道路橋の設計にあたって疲労の影響を考慮することとしたものである (図-2)。

3 疲労設計 (疲労設計指針) の概要

3. 1 疲労設計の基本

道路橋の鋼部材に生じる疲労損傷については未解明の部分も多く、設計でこれを適切に考慮することは必ずしも容易ではない。しかし従来報告されている疲労損傷には構造上、施工上のわずかな不注意によって生じていると思われるものも多く、設計・施工の各段階で疲労に対する一定の理解のもと適切な配慮を行うことで確実に道路橋の疲労耐久性は改善することが期待される。このようなことから、疲労設計指針では普遍的な要求として、設計にあたって疲労強度が著しく劣ることが明らかにされている継手の排除や過去に疲労損傷が報告されているか、あるいはそれに類似する構造の採用をさけることを設計の基本とした。その上で、構造継手形式や継手位置、構造ディテールの決定にあたって、設計時のモデル化と実構造の違いについても考慮してなるべく二次応力の発生や応力集中の程度を抑える等の配慮を行うことが求められる。このようにある種定性的かつ経験的な対応による疲労への配慮を行うことが疲労設計の基本ではあるが、疲労という現象が応力のくり返しによるものであるという事実と応力と損傷発生の確率の関係がある程度明確にされている以上、基本的にはこの対策として部材に生じる応力を適切に評価し、必要な耐久性が確保できるように部材の設計をすることが合理的である。ただし、鋼床版や橋脚構造等のように通常行われる設計計算によっては実際に生じる変動応力を精度よく評価することが困難 (実発生応力と設計応力の関係の把握が困難) な場合もあるため、構造特性や設計に用いる解析手法等に応じて対応を変えねばならない点に注意が必要である。

図-3 に指針における疲労設計の基本的



注1) 照査①: 一定範囲応力に対する応力範囲の計数と照査を用いた照査
 注2) 照査②: 累積損傷度を考慮した疲労照査
 注3) 再検討: 継手位置、継手形式や構造の変更を検討を行った後、プロセスの適切な段階から再検討する

図-3 疲労設計の流れ (疲労設計指針)

3. 2 疲労強度と継手の分類

指針では疲労設計の前提となる疲労強度について継手形式毎の疲労強度等級数を定めている。これらは、既往の研究結果や近年国土交通省らが行った疲労試験の結果を基に定めたものであり、著しく疲労強度が低いために採用することが望ましくない継手の等級としてH' 等級を設ける⁵⁾など「鋼構造物の疲労設計指針・同解説（日本鋼構造協会）」³⁾の等級と異なる部分があることに注意が必要である。指針における疲労設計曲線の例を図-4 に示す。

このほか施工性から溶接品質の確保や確認が著しく困難な構造や疲労強度が著しく低い継手として、裏当て金付き溶接、荷重伝達十字溶接ですみ肉または部分溶込みとしたもの、主桁貫通ガセット（すみ肉溶接）、重ねガセット（まわし溶接あり）なども採用が望ましくない継手としている（図-5）。

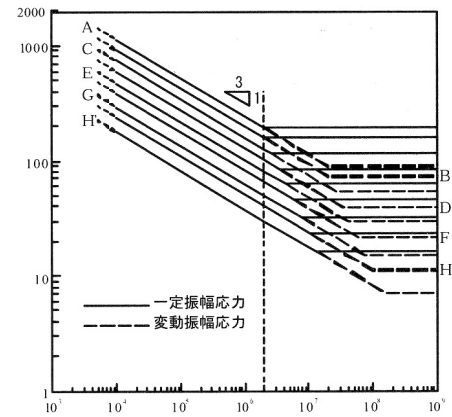


図-4 直応力を受ける継手の疲労設計曲線

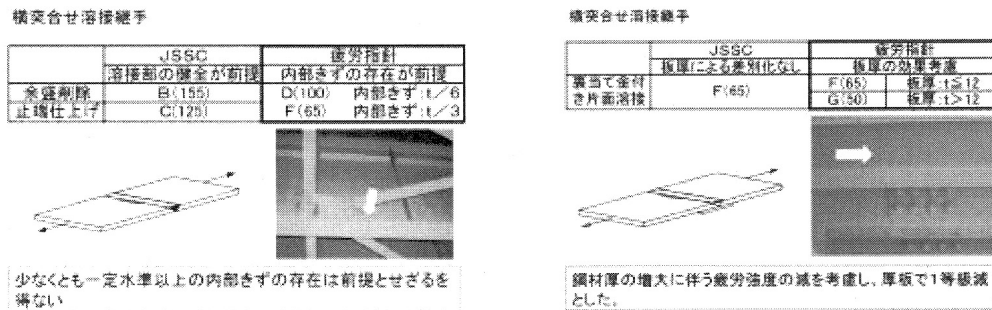


図-5 変更の例

3. 3 疲労強度等級の条件

(1) 許容きず寸法の設定

指針には、鋼道路橋に用いられることの多い代表的な溶接継手の疲労強度等級について規定しているが、それぞれには前提となる溶接部の品質があり、道路橋示方書の規定に則って適切な溶接施工が行われた継手のみが対象である。従来溶接部に関する品質規定としての検査基準が道路橋示方書にも示されていたが、疲労設計で用いる継手の疲労強度等級に直接対応したものとしては示されていなかった。指針では各疲労強度等級が確保できる条件としてそれぞれの溶接品質についても明確化しており、これらの設定にあたっては最新の研究成果が取り入れられている。特に横突合せ溶接継手部については産官学共同研究として多数の疲労試験を実施し、溶接部の品質と疲労強度等級の関係についての検討を行っている。試験体を表-2 に、試験結果の概要を表-3 に示す。結果（図-6）を板厚ごとの限界内部きず寸法として整理したものを表-4、図-7 に示す。これらから横方向突合せ溶接継手（非仕上げ）がD等級を満足するために、試験結果のばらつきなども考慮して若干の余裕を見込むと概ね $t/6\text{mm}$ (t :板厚) までの寸法の内部きずが許容できると判断した。このとき検査の信頼性や溶接施工の容易さなども考慮して許容内部きず寸法の値は 3mm を下限とした。

表-2 試験体

鋼種	開先形状	試験体数	t (mm)
SM490A	V	100	25
SM570QT	V	49	25
SM570QT	X	13	25
SM490C	V	48	50
SM570QT	X	12	50
SM490C	V	6	75
SM570QT	V	6	75
SM490C	V	3	100
合計		237	

表-3 疲労試験結果の破壊形式

試験体の種類	破壊形態		
	欠陥破壊 (%)	止端破壊 (%)	破壊せず (%)
割れ	30	55	15
融合不良	24	71	6
不完全溶込み	53	33	13
スラグ巻込み	47	40	13
群集ブローホール	12	59	29

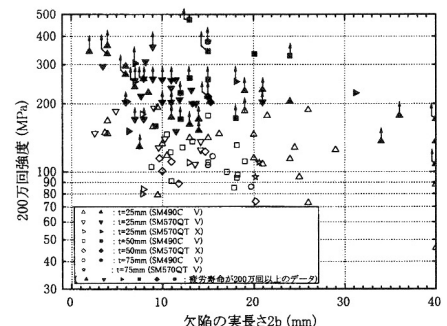


図-6 疲労強度と欠陥の実長さの関係

表-4 限界内部きず寸法

板厚 欠陥種別	t=25mm		t=50mm		t=75mm	
	欠陥破断	欠陥または趾端破断	欠陥破断	欠陥または趾端破断	欠陥破断	欠陥または趾端破断
割れ(CR)	6.7 (t/3.7)	5.5 (t/4.6)	17.0 (t/2.9)	8.3 (t/6.0)	17.6 (t/4.3)	15.1 (t/5.0)
融合不良(LF)	5.1 (t/4.9)	5.1 (t/4.9)	11.3 (t/4.4)	7.8 (t/6.4)	-	-
不完全溶込み(IP)	8.5 (t/2.9)	8.5 (t/2.9)	16.8 (t/3.0)	≤ 10.0 (t/5.0)	-	-
スラグ巻き込み(SI)	40.0 (t/0.6)	8.2 (t/3.0)	8.8 (t/3.7)	8.8 (t/5.7)	-	-
群集ブローム(BH)	31.2 (t/0.8)	7.8 (t/3.2)	24.0 (t/2.1)	26.3 (t/1.9)	-	26.1 (t/2.9)

(単位:mm)

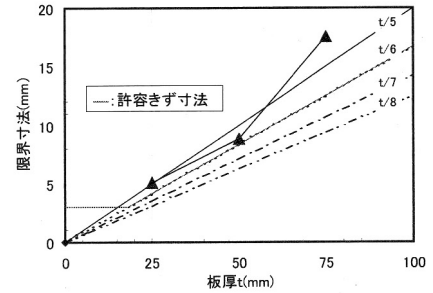


図-7 板厚と許容きず寸法の関係

(2) 溶接部の非破壊検査手法について

今回、疲労試験をもとに溶接部に対する要求品質としての内部きず寸法を規定したが、一方、実施工においてこれらの品質が満足されていることを検証することができなければ規定自体の実効性は不十分なものならざるを得ない。とくに近年、鋼少数主桁形式の採用が増加するなどあって鋼道路橋に用いられる鋼板が厚板化しており 100mm を超えるような厚板の突合わせ溶接も行われている。このような厚板に対しては一般的な内部きず検査手法である放射線透過試験は、原理的に精度を確保することが困難であることや放射線管理上の問題などから実質不可能であり、従来より限定的に超音波探傷試験が用いられてきた。しかし鋼道路橋の疲労耐久性を確保するための非破壊検査手法としての超音波探傷試験の方法や問題点については必ずしも明確にされていなかったことから、国土交通省では先の疲労試験と同様に産官学の共同プロジェクトとして超音波探傷試験の特性の把握と、評価手法の確立に向けた各種の試験、調査を実施し 6)、その結果として「鋼道路橋溶接部の超音波自動探傷検査要領 7)」を策定している。試験ではあらかじめなるべく自然状態に近い形になるように配慮して内部きずを入れた板厚 40mm~100mm までの突合せ溶接継手試験体に対して、さまざまな超音波自動探傷システムによる探傷を実施した。その後全ての試験体を 0.5mm~1.0mm を基本にスライスして内包されていたきずの位置や寸法などの性状を正確に把握するとともに、それらを各探傷システムによる評価結果と照合して検討を行った。試験体は 40mm~100mm までの突合せ溶接継手に対して行った。試験の結果からは以下のことが判明している。

- ・ 板厚が 40mm 程度においては、多くの探傷システムで高い検出率が得られたが、板厚の増加に伴って検出率は低下するとともに、誤検出の危険性が增大する。
- ・ 一定水準の検査精度を確保するためには複数面からの探傷を行い総合的に評価することが有効である。
- ・ 余盛りや裏波の近傍に位置するきずでは相当寸法のきずであっても検出できない場合がある。(写真-1)
- ・ きずの長さや深さ位置の精度は必ずしも充分とは云えず、今後精度向上が望まれる。
- ・ 試験で用いた様々な仕様のシステムの比較においては、検査精度に支配的な影響を及ぼす機器の条件や仕様などの要因は明確にできなかった。

これらの結果から、検査要領では、あらかじめ信頼性を確認した超音波自動探傷システムについて、信頼性を確認した条件下でのみ、かつ信頼性を確認した状態と基本的には同等の機器構成、使用状態でのみ検査に用いることができるものとし、さらに検査結果の保証のために検査中のさまざまな情報のほとんどを記録として凍結し事後に検証が行えるようにすることを求めている。(表-5)

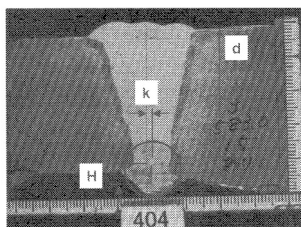


写真-1 内部きずが発見しにくい例

404試験体 きずNo.18(割れ)
X=570mm~590mm / L=20mm
k=1.5mm / d=40mm / H=6mm

当日判定で見逃したケース数	
パルス反射AUT	6ケース(10ケース中)
他手法	4ケース(4ケース中)

表-5 要領での規定項目

○適用の前提条件

- ①良好な施工品質の溶接部
(施工性に配慮した設計・十分な施工品質管理)
- ②適切に検査が可能な溶接部および構造
(探傷面の複数確保、検査に適したビード・止端形状など)

○具体的検査

- ①適切な技術者による検査
- ②検査機器などの適用性、信頼性は個別に事前確認
- ③検査条件などの事後検証が可能な記録の採取

3. 4 応力度による疲労照査のポイント

(1) 疲労設計荷重

自動車荷重を念頭においた疲労設計では、なるべく車両の走行によって部材に生じる実際の応力変動の特性を忠実に考慮するほうが合理的である。過去に検討されている道路橋に対する疲労設計荷重にはこのような理由から実際の大型車両をモデル化したものもあるが、指針では設計実務上の便にも配慮して道路橋示方書に規定のあるT荷重を設計に用いることとした。その一方で、様々な車軸配置、軸重をもった実車両による影響を1軸の集中荷重で表現するために、着目部の応力の影響線形状や基線長等による補正を行うようになっている。また、交通量や支間長によって複数の車両が同時に載荷する確率も異なるため、これについても「同時載荷係数」として考慮している。以下にこれらの補正係数の考え方や検討の背景について概説する。

1) T荷重補正係数

図-8には、つくば市の国道で実測された交通荷重の状況を示す。また図-9には国内の代表的な複数の幹線道路での実測結果を合計して得られた車両重量分布を示す。いずれも60tをこえる重車両が一定台数混入していることが疑われる。

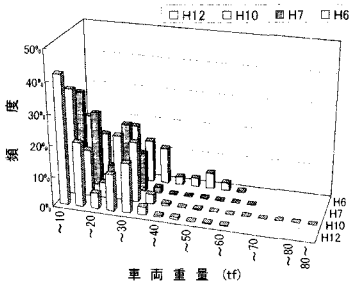


図-8 車両重量計測結果の例

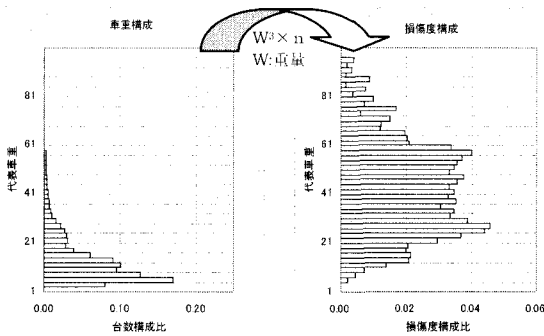


図-9 重量分布と損傷度分布の関係

鋼部材では変動応力範囲のべき乗に比例して疲労の影響が現れるが、仮に個々の車両の通行によって道路橋の鋼部材に車両重量比に相当する倍数比率で応力が発生するとすると、台数は限定的であるものの現状では一定量の混入が想定される超重量車両が部材に蓄積される疲労損傷度のなかで相対的に大きなウェイトを占めることとなり、これらの影響をいかに適切に考慮できるかが疲労設計の精度を左右することとなる(図-9)。

また、実際の車両は複数の車軸が様々な軸間距離、軸重で配分された多点の分布荷重であり、例えば支間の短い単純げたのように影響線の基線長が短い場合には車両重量と比較して相対的に小さな応力しか生じさせないため、設計においてT荷重を、そのまま着目した車両重量に相当する大きさに拡大補正すると過大にその影響を考慮することとなる。「単純桁支間中央」「単純桁1/4支点」「等径間の3径間連続桁の側径間中央」および「中央径間中央」の4つの影響線形状(図-10)を対象に表-6に示した車両モデルを用いて影響線の基線長に応じて同じ車両重量の大型車による影響を表現するために必要なT荷重の拡大倍率がどの程度となるかを計算した結果のうち大型ダンプモデルの例を図-11,12に示す。基線長は3~100mとした。影響線の基線長が短い場合には車両の進行に応じて複雑な応力変動波形があらわれ、応力の最大値も相対的に小さくなっ

表-6 車両モデル

小型	乗用車	平均重量 1.50t 最大重量 3.10t 最小重量 0.20t 分布形 対数正規 標準偏差 0.36t	全長 4.10m 車幅 1.50m		1軸目:50.2% 2軸目:49.8%
	小型トラック	平均重量 3.62t 最大重量 12.60t 最小重量 1.00t 分布形 対数正規 標準偏差 1.51t	全長 4.40m 車幅 1.40m		1軸目:23.9% 2軸目:76.1%
中型	トラック	平均重量 6.19t 最大重量 18.30t 最小重量 1.60t 分布形 対数正規 標準偏差 2.50t	全長 6.00m 車幅 1.60m		1軸目:19.6% 2軸目:80.4%
	大型トラック	平均重量 16.75t 最大重量 45.20t 最小重量 3.80t 分布形 対数正規 標準偏差 6.23t	全長 8.50m 車幅 1.95m		1軸目:11.1% 2軸目:41.3% 3軸目:47.6%
大型	ダンプ	平均重量 19.62t 最大重量 61.90t 最小重量 5.40t 分布形 対数正規 標準偏差 9.54t	全長 7.50m 車幅 1.95m		1軸目:11.7% 2軸目:41.3% 3軸目:47.0%
	タンク	平均重量 13.82t 最大重量 33.70t 最小重量 3.90t 分布形 対数正規 標準偏差 6.31t	全長 8.00m 車幅 1.95m		1軸目:13.3% 2軸目:51.2% 3軸目:35.5%
セミトレーラ	セミトレーラ	平均重量 21.78t 最大重量 88.70t 最小重量 5.10t 分布形 対数正規 標準偏差 12.92t	全長 11.00m 車幅 2.05m		1軸目:18.3% 2軸目:18.5% 3軸目:18.3% 4軸目:39.4% 5軸目:27.2%
	バス	平均重量 13.81t 最大重量 18.70t 最小重量 6.80t 分布形 対数正規 標準偏差 2.41t	全長 10.05m 車幅 2.00m		1軸目:37.1% 2軸目:62.9%

ているが、基線長が長くなると軸間距離など多軸であることの影響は減少し応力変動波形は影響線形状と類似してくる。

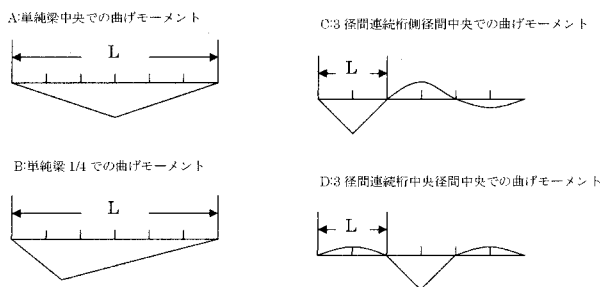


図-10 影響線

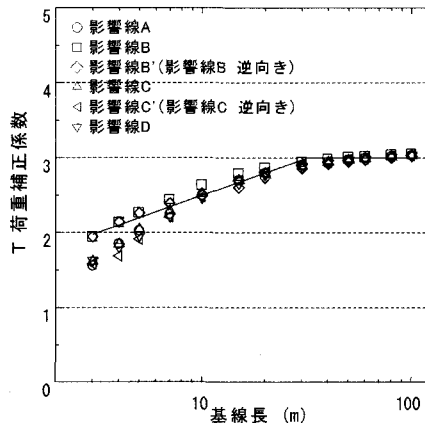


図-12 大型ダンプ (LD) トラック
(影響線 A~D は図 10 に対応している)

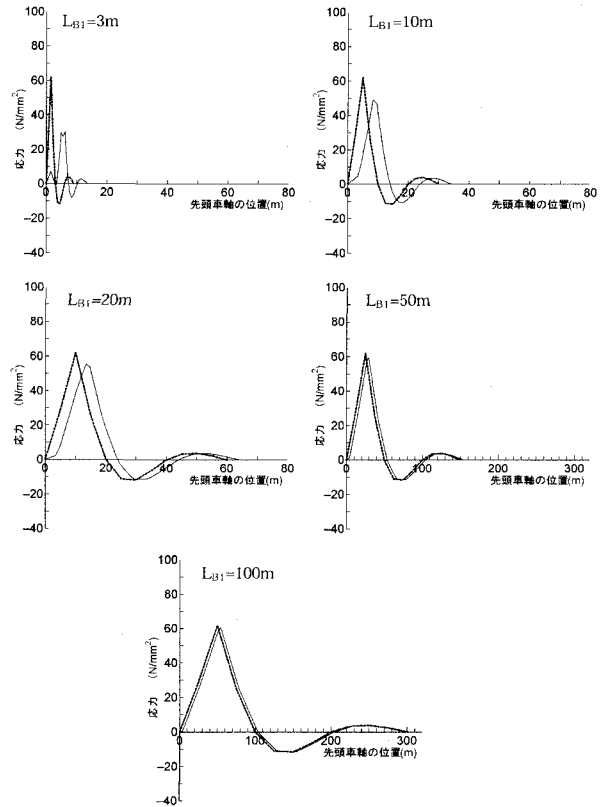


図-11 3 径間連続桁 (等径間) 側径間中央

これらの検討の結果、指針では図-12 に実線で示したような値 (以下の式) で T 荷重を補正することとした。

$$\gamma_{T1} = \log(L_{B1}) + 1.5$$

$$\text{ここに、} 2.0 \leq \gamma_{T1} \leq 3.0$$

なお、 L_{B1} は、着目する部位位置に対する影響線の基線長のうち縦距が最大のものとしてよい。

2) 同時載荷係数

交通量が比較的多く支間長が長い橋では、橋上に複数の車両が同時に載ることにより一組の疲労設計荷重による以上の応力範囲が生じることとなるが指針では、この影響を同時載荷係数 γ_{T2} として考慮することとした。

同時載荷係数 γ_{T2} は設計で考慮する期間内に想定される様々な車両の走行により生じる疲労損傷度と、同じ条件で同時載荷のない場合の疲労損傷度の比で表される。

$$\gamma_{T2} = \left\{ \frac{\text{（実車両走行による疲労損傷度）}}{\text{（同時載荷が生じない場合の疲労損傷度）}} \right\}^{1/3}$$

ここで 3 乗根をとるのは同時載荷の影響を T 荷重重量に乗じる係数として表現するためである。指針の同時載荷係数は車線応力比 0~1.0、1 車線 1 時間あたりの交通量 500~2500 台、車両走行速度 50~100km/h の範囲の種々の条件に対してシュミレーション解析 (モンテカルロシュミレーション) を行い、係数に影響のある因子の分析を行い係数の設定を行った。ここで係数に影響のある因子の影響について、簡単に紹介する。

① 基線長、交通量、車速の影響

基線長や交通量の増加は、いずれも影響線上に載荷される車両の台数を増加させる効果があり γ_{T2} を増加させる。また、車速の影響は、車速が高くなると車間が広がり影響線上に載荷される台数が減少することにより同時載荷係数を減少させる。よって同時載荷係数と、基線長、時間交通量、車速は以下の関係で表すことができる。

$$NS (\text{平均同時載荷台数}) = (\text{基線長}) \times (1 \text{ 車線あたりの時間交通量}) / (\text{車速})$$

②大型車混入率の影響

大型車混入率は、 γ_{T2} を増加させる影響があり、その影響は試算の結果、 γ_{T2} と \log 同時載荷台数 (NS) の関係で、右肩上がりの曲線 (2次放物線とみなせる) 関係にある。これは以下の式で表すことができる。

$$\gamma_{T2}=0 \quad (NS \leq 0.1)$$

$$\gamma_{T2}= a \times \{\log(NS/0.1)\}^2 + 0.1 \quad (NS > 0.1)$$

(a : 2次放物線を表す係数)

③影響線の交番の影響

影響線が正負交番する形状の場合は、交番しない影響線よりも γ_{T2} は小さくなる。その原因は同時載荷台数が増加しても、車両が影響線の正負両側に載荷されることによる応力の打ち消しの影響があるためである。影響線の交番は、同時載荷台数に対して、 γ_{T2} が 2次放物線の位置に影響し、そのずれ量を c で表すと、同時載荷係数の表現式は以下であらわすことができる。

$$\gamma_{T2}= a \times [\log \{(NS/(c+0.1))\}]^2 + 0.1$$

④車線応力比の影響

車線応力比の違いは、2次曲線の傾き (係数) を増加させる影響がある。これは、車線応力比が大きくなると隣の車線から受ける応力が大きくなるためであり、車線応力比の係数は 2次曲線の係数で考慮できる。よってその影響を係数 d で表すと以下の式を得る。

$$\gamma_{T2}= a \times d \times [\log \{(NS^2/(c+0.1))\}]^2 + 0.1$$

以上因子の影響を考慮し、同時載荷係数 γ_{T2} は次式で表すことが出来る。

$$\gamma_{T2} = 1.0 \quad (NS \leq 0.1)$$

$$\gamma_{T2} = a \times d \times [\log \{(NS/(c+0.1))\}]^2 + 0.1 \quad (NS > 0.1)$$

$$a = 0.0780 \alpha^{0.291} \quad (\alpha : \text{大型車混入率})$$

$$c=0 \quad (\text{交番しない形状の影響線})$$

$$c=0.2 \quad (\text{交番する形状の影響線})$$

$$d = 0.705 \log(\beta) + 1.0 \quad (\text{ただし、} d \geq 0.5)$$

$$NS = (\text{影響線の基線長}) \times (\text{時間交通量}) / (\text{車両の総高速度})$$

α : 大型車混入率

β : 車線応力比

さらに、1日1車線あたりの大型車交通量と基線長で同時載荷係数を表すこととし、同時載荷係数に影響を及ぼす他の因子について大型混入率 20%、車速 50km/h、車線応力比 1、影響線の形状を A,B (図-10) として計算を行った結果を整理すると結局、同時載荷係数としては概ね次式で表現できることがわかった。

$$\gamma_{T2} = 0.05 \times \{\log(8.33 \times 10^{-5} \times L \times \text{ADTT}/\text{Lane})\}^2 + 1.0 \quad (\gamma_{T2} \geq 1.0)$$

L : 基線長(m)

AADT : 1日あたりの大型車交通量

Lane : 車線数

この式と先のシュミレーション解析から求めた同時載荷係数を比較したものが図-13,14になる。また、この式より、基線長、1日あたりの日大型車交通量と同時載荷係数を示した例 (単純桁 (正負交番しない) 大型車交通量 20%) が図-15である。これらの図から判断して、また実際の部材での車線応力比は 0~1 の範囲にあることを考慮して、交番しない影響線については表-8にて同時載荷係数を求めることとした。また、交番する形状の影響線については、1.00とした。

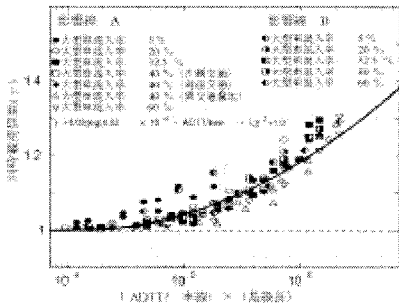


図-13 影響線が交番しない場合

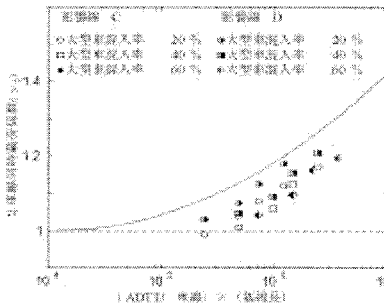


図-14 影響線が交番する場合

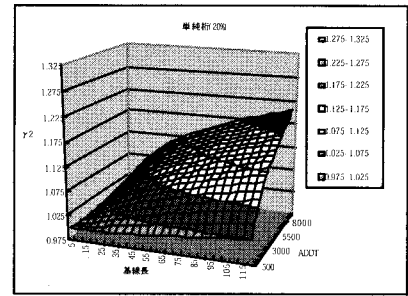


図-15 影響線が交番しない場合

また、図-13より合計基線長 L_{B2} が 50m 以上の橋梁で 1 日あたりの大型車交通量 (ADTT) が 2000 台以上の場合のみ同時荷重係数を 1.10 見込むものとした。また、計画段階で特に大型車交通量の影響が大きいことが想定される場合などには、図-13より同時荷重係数を表-7によらず個別に設定することでより適切な照査ができる。

表-7 同時荷重係数

ADTT _{SL} \ L_{B2}	$L_{B2} \leq 50m$	$50m < L_{B2}$
ADTT _{SL} ≤ 2000	1.00	1.00
2000 < ADTT _{SL}	1.00	1.10

(2) 頻度補正係数

疲労設計では、将来の大型車交通量にもとづいて疲労損傷度を評価する。しかし実交通では必ずしも各車両が定格積載状態で走行しておらず、空荷のものもあれば制限重量を超えるような重車両も一定量混入する可能性があると考えられる。したがって指針では過去に実測された多数の車両重量分布から標準的な幹線道路の車両重量分布を仮定し、これをもとに設計上見込む将来交通量によって着目部材に累積される疲労損傷度を算出することとした。具体には次のような考え方によっている。

まず「車両重量の頻度分布の形状」と「変動応力範囲の頻度分布の形状」が相似と仮定する (図-16)。すると変動応力範囲の頻度から求められる損傷度 (変動応力範囲の 3 乗 × 頻度) の分布形状と、(重量分布の 3 乗に重量を乗じた値 [以下車重損傷度]) は同様に相似となる。ここである部材での疲労損傷の累積に寄与するものは、 $\Delta\sigma_{ve}$ から $\Delta\sigma_{max}$ の間にある変動応力範囲である (図-17 の斜線部)。よって当該部材に生じる全応力範囲のなかで、累積に寄与する変動応力範囲の比率は、上記の仮定に基づき $\Delta\sigma_{ve}$ に相当する車重 (W_{ve}) を超える車重車両の比率であり (図-17)、さらにこれを代表車重 (W_D) のみによる損傷度で等価となるように表現するとその頻度 (台数比率) が次式で与えられる。

$$N_D = \sum (W_i^3 \times N_i) / W_D^3 \quad (W_{ve} < W_i \leq W_{max})$$

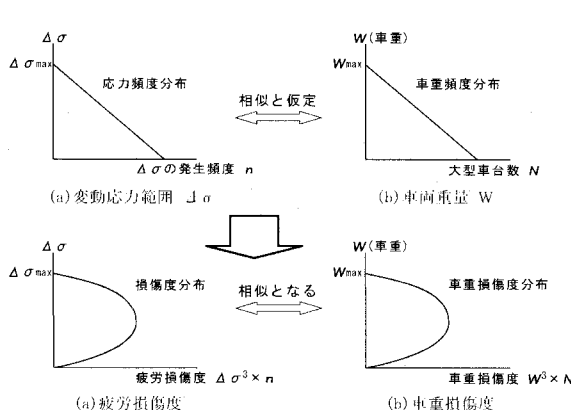


図-16 損傷度分布と車重損傷度分布

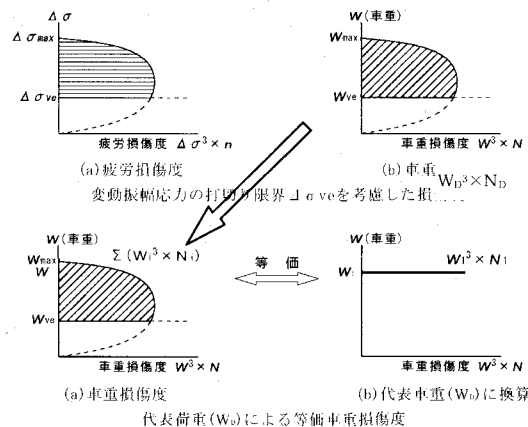


図-17 損傷度の代表車重への換算

等価損傷度を与える60トン車両台数(対大型車比率)の例

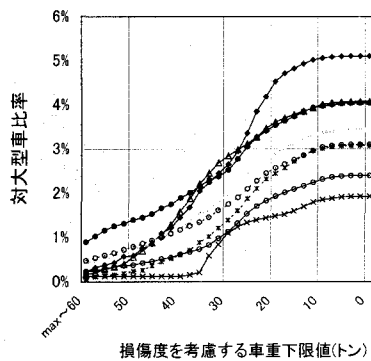


図-18 60tfの車両の比率(1)

等価損傷度を与える60トン車両台数(対中型含む大型車比率)の例

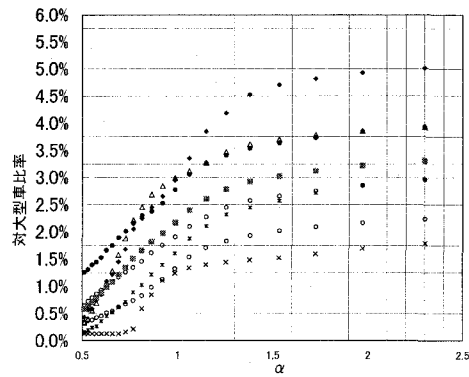


図-19 60tfの車両の比率(2)

例えば代表荷重を60tfとし、疲労損傷度に影響を及ぼす大型車の車重下限値に応じて代表荷重が全大型車台数の何%の台数走行すれば車重頻度分布から算出されるのと等価な疲労損傷度を生じさせることになるのかを表したものが図-18である。すなわち、ある部材に対して、車重40tf以上の大型車が疲労損傷度に寄与するとなった場合には、その影響を大型車台数の概ね2%までに相当する回数の代表荷重(60tf)の走行で表現できるといえる。ここで損傷度を考慮する車重下限値は上記の仮定で、当該部材の変動応力範囲に対する打ち切り限界に相当する W_{ve} として次式で算出される。

$$W_{ve} = 60 \times (\Delta\sigma_{ve} / \Delta\sigma_{max})$$

指針では、疲労設計荷重の移動荷重によって算出される最大応力範囲 ($\Delta\sigma_{max}$) の一定応力範囲に対する打ち切り限界に対する割合 ($\alpha = \Delta\sigma_{max} / \Delta\sigma_{ce}$) に応じて疲労設計荷重の荷重回数を与えており、図-30の横軸を α に変換して得られるのが図-19である。図-19には様々な性格の路線のデータをプロットしているが、指針では一般的な幹線道路を想定して3% (頻度補正係数 0.03) を標準としたものである。したがって計画段階で重車両の比率が平均的な幹線国道と大きな乖離が想定され、車重頻度分布が仮定できるような場合には、頻度補正係数を標準によらず個別に設定することでより適切な照査ができる。

(3) 応力度照査の省略について

指針では、設計の便に配慮して応力による疲労照査を省略できる条件を設けているが、これは指針の方法による様々な条件下での試算結果を検討して設定したものである。以下に試算条件の例を示す。

- 橋梁形式 ; 単純活荷重合成桁 3径間連続合成桁 単純非合成桁 3径間連続非合成桁
- 幅員 ; 8.5m (総幅員 9.7m、2車線)
- 支間 ; 単純桁 25m,30m,35m,40m,45m
; 連続桁 25m,30m(35m),40m,(45m),50m,(55m),(60m) ()は非合成桁
- 設計供用期間 ; 100年
- 大型車交通量 ; 500,1000,3000,5000,10000 台/日・レーン (中型車含む)

このような計算を多数おこなった結果として、コンクリート床版を有する標準的な鋼げた橋において、表-8の条件が全て満足される場合に限って応力に基づく疲労耐久性の照査が省略できるものとした。省略条件の設定は、疲労設計の導入にあたってなるべく実務設計の負担を軽減するために検討を行ったものであるが、試算では想定できる橋の形式や各種の条件にも限界があり結果的にはかなり限定的な条件とせざるを得なかった。今後、道路橋における応力に基づく疲労照査の実績が蓄積されるのをまってこれを分析し、省略条件について充実を図っていく予定である。

表-8 疲労に対する安全性が確保されているとみなしてよい条件

橋梁形式	コンクリート床版を有する鋼げた橋
使用継手	疲労強度等級 A ~ F 等級に分類される継手
使用鋼種	SS400, SM400, SM490, SM490Y, SM520, SMA400, SMA490, SMA490Y, SMA520
支間長	最小支間長が50m以上
ADTT _{SL}	1000台/(日・車線)以下

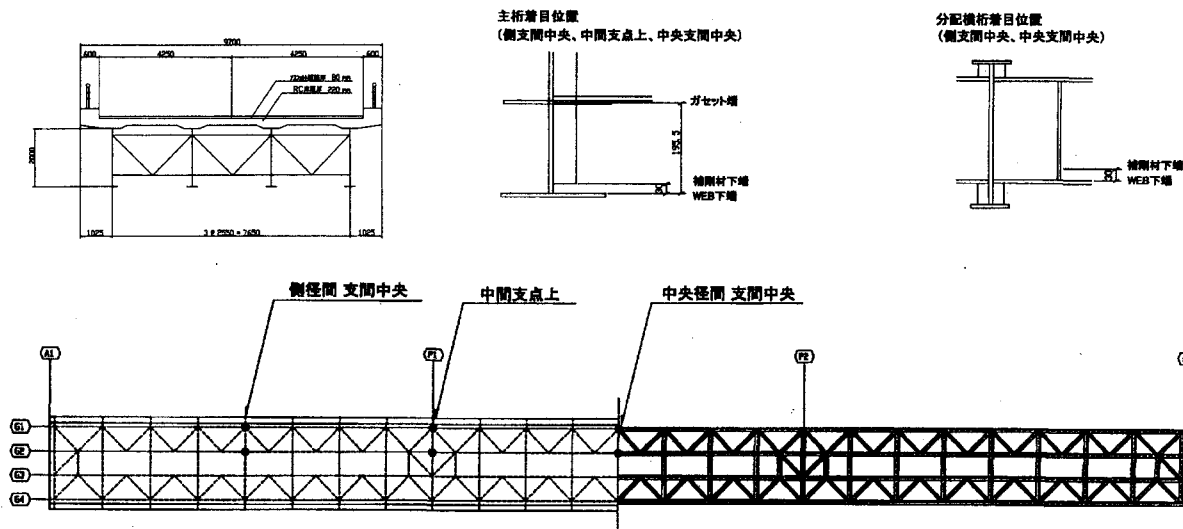


図-20 モデル図 (3 径間連続桁)

4. おわりに

平成 14 年に道路橋示方書の改訂に併せて提示された「鋼道路橋の疲労設計指針」の内容のうち敢えて応力照査の方法を中心に解説を試みた。疲労設計の基本はあくまで細部構造の決定や溶接継手形式の選定など設計全般をとおしてできるだけ疲労耐久性が向上するような配慮を行うことであり指針に示した方法で応力に基づく疲労耐久性の照査が可能な範囲は限られているが、今後は様々な構造形式、部位に対して応力に基づく疲労照査の方法を確立していくことが合理的な疲労設計を行う上で重要な課題である。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編、社団法人日本道路協会、平成 14 年 3 月
- 2) 鋼道路橋の疲労設計指針、社団法人日本道路協会、平成 14 年 3 月
- 3) 鋼構造物の疲労設計指針・同解説、社団法人日本鋼構造協会、1993 年 4 月
- 4) 鋼橋の疲労 社団法人日本道路協会、平成 9 年 5 月
- 5) 町田文孝ら : 主桁ウェブ貫通型横桁取り合い部の疲労特性、土木学会論文集、No.612/I-46, pp349-37, 1999.1
- 6) 鋼道路橋溶接部の非破壊検査手法に関する共同研究(I)、国土技術政策総合研究所資料、2002 年 3 月
- 7) 鋼道路橋溶接部の超音波自動探傷試験要領・同解説、国土技術政策総合研究所資料、2002 年 3 月