

鋼プレートガーダー橋における応力測定結果に関する報告

A REPORT ON THE RESULT OF STRESS MEASUREMENTS OF STEEL HIGHWAY BRIDGES

藤原 稔*、村越 潤**、鹿嶋久義***

By Minoru FUJIWARA , Jun MURAKOSHI , Hisayoshi Kashima

Stress measurements of 61 bridges were carried out by the Public Works Research Institute, Ministry of Construction, in order to investigate acting stress of existing plate girders.

This paper reports about the ratio(measured stress/calculated stress) obtained by 20 tonf static loading tests, maximum stress and equivalent stress due to traffic loads during a single day.

1. はじめに

建設省土木研究所では昭和61~63年度に既設橋梁の耐久性の評価および向上技術に関する調査研究を行っており、その中で鋼橋の安全性の照査方法に関する検討を実施している¹⁾²⁾³⁾。この検討の一環として、橋梁の交通条件や構造条件と橋梁部材に生じる応力度との関連性を把握し照査方法の検討のための基礎資料を得ること、既設橋の健全度診断の一手法としてのヒストグラムレコーダー(応力頻度計測器)の適用性を検討すること等を目的として、鋼プレートガーダー橋において、総重量20トンの荷重車の静的載荷時における応力測定や交通供用下における応力測定を実施してきた。

本文では鋼プレートガーダー橋の応力測定により得られた多数のデータのうち、主桁に生じる応力に着目し、荷重車載荷実験により得られた実測応力度とそれに対する計算応力度との差、交通供用下における日最大応力度、およびレインフロ-法により波形処理された日応力範囲頻度分布の実態についての分析結果を報告する。

2. 検討内容

2. 1 荷重車静的載荷時における応力度と計算応力度の差について

現行のプレートガーダー橋の設計では、横桁による荷重分配のみを考慮しRC床版による荷重分配を考慮しないこと、また非合成桁においてはRC床版と主桁の合成効果を考慮しないこと等により、車両が載荷した時の実際の応力度はその載荷に対する計算応力度と一致しないことが多い。仮に計算応力度に基づいて照査を行なう場合、既設橋の安全性の照査を適切に行うためには両者の差を推定し照査に取り込むことが必要と考えられる。

* 建設省土木研究所 橋梁研究室 室長 (〒305 茨城県 つくば市 旭1番地)

** 建設省土木研究所 橋梁研究室 研究員 (〒305 茨城県 つくば市 旭1番地)

*** 建設省土木研究所 橋梁研究室 (〒305 茨城県 つくば市 旭1番地)

昭和41年度に建設省土木研究所で行なわれた既設橋梁の耐力力と供用限界に関する研究の成果⁹⁾をもとに提案された『鋼道路橋(プレートガーダーおよびトラス)供用荷重算定指針(案)』⁴⁾においても、非合成桁17橋の静的荷重試験(幅員並列荷重、中央2台縦列荷重、側端2台縦列荷重の3種類の荷重ケース)に基づいて、実測応力度と計算応力度の差を考慮するための係数(実測応力度/計算応力度)の検討を行っている。具体的には次のとおり2種類の荷重状態に対する係数の計算を行い、各橋梁について得られる係数の最小値に基づき、係数1/1.2(≈ 0.83)を提案している。

①支間中央並列荷重

各車線の支間中央に荷重車を並列(橋軸方向には1台)荷重した場合を考え、係数を((各主桁の実測応力度の和)/(各主桁の計算応力度の和))とする。

②片側縦列荷重

片側の車線に荷重車3台を縦列荷重した場合を考え、上下車線にそれぞれ荷重した場合の荷重側外桁の(実測値/計算値)を計算し、係数をその平均値とする。

なお計算応力度は慣用計算法(1-0荷重分配計算法)により求められている。

また鋼部材の疲労の評価を行なう場合、部材の疲労寿命は作用応力範囲の m 乗(m :S-N線の傾き)に反比例することから、(実測応力度/計算応力度)は照査結果を過大評価しないようにするための重要なファクターとなる。文献⁵⁾では、この(実測応力度/計算応力度)を α 値と呼んでおり、実橋での応力測定に基づき橋軸方向の主部材の α 値を安全側の値として0.7としている。このような α 値の考え方についてはAASHTO⁶⁾、OHBD⁷⁾の疲労に関する規定を作成する際にも適用されている。三木ら⁸⁾は代表的な橋梁形式について動的荷重試験結果に基づき、その性質や傾向の分析を行っている。

本文では主として計算応力度に対する実測応力度の比を把握することを目的に、種々の荷重状態における応力度と計算応力度の関係について検討を行った。

2. 2 交通供用下における日最大応力度、応力範囲の頻度分布について

交通供用下において測定される日最大応力度には、その橋梁の交通や構造の特性が含まれており、供用下における部材の安全性を評価する際の基礎資料となるものである。また鋼部材の疲労寿命の評価方法の一つとして、部材に生じる応力範囲の頻度分布と部材の疲労強度を与え、線形累積被害則を適用することにより評価する方法が挙げられる。このような応力範囲の頻度分布データについては、部材が受ける疲労損傷の程度を評価する上で有用なデータとなる。

しかし応力測定データについては今まで主として個々の橋梁の健全度の検討あるいは余寿命の診断に利用されているが、多数の橋梁の応力測定データを系統的に検討した事例⁹⁾は少ないと考えられる。多数の橋梁における応力測定結果から、応力の実態や応力に影響を及ぼす要因が把握できれば、その結果を既設橋の安全性の照査や疲労に対する耐久性の評価に反映させることができるものと考えられる。またこれらのデータは今後の道路橋の設計を考えていく上でも貴重な資料となると考えられる。

本文では主として交通要因や構造要因と供用下における実測応力度との関連性を把握することを目的として、日最大応力度、応力範囲の頻度

分布から得られる等価応力範囲およびその頻度の実態について分析を行った。

3. 調査概要

本文では昭和61-63年度の既設橋梁の耐久性の評価および向上技

表-1 調査項目と対象橋梁 (橋梁数)

調査項目 年度	20ton車静的荷重 時の応力測定	24時間応力測定 (PV法)	24時間応力測定 (RF法)	24時間応力測定 時の交通量観測	備考
S61	—	4	4	—	非合成桁 3橋
S62	—	27	19	—	非合成桁 13橋
S63	30	30	27	30	非合成桁 7橋 TL-20未満4橋

注)PV法(ピークバレー法):極大値極小値の頻度分布を求めるための波形処理方法

RF法(レインフロー法):応力範囲の頻度分布を得るための波形処理方法

術に関する調査研究¹⁾²⁾³⁾において実施した応力測定調査の主な結果に関して分析を行っている。

表－1に各年度の主な調査項目および対象橋梁数を示す。昭和61年度に4橋(うち非合成桁3橋)、昭和62年度に27橋(うち非合成桁13橋)、昭和63年度に30橋(うち非合成桁7橋)の計61橋のプレートガーダー橋において、24時間の応力測定を実施している。なお昭和62年度の調査では、構造条件の違いによる影響をできるだけ小さくするため、主として支間が20～40m程度の直橋を選定することとし、斜橋の場合でも斜角70°以上でかつ支間/幅員が大きい橋を選定するようにした。測定の対象部材は主桁とし、測定箇所は主桁支間中央の下フランジ下面側とした。

主な調査は次の2項目である。

①荷重車の静的載荷時における応力測定

総重量約20トンの3軸トラック1台を、各レーンにつき支間中央および支間の1/4点に後軸タンデム軸の中央部が一致するように静的載荷し、その時の各主桁の応力度を測定した。なお荷重車載荷時の実測応力度に対する計算応力度については格子桁理論に基づき求めた。その際横桁および対傾構については、荷重分配横桁あるいは荷重分配対傾構として設計されている場合に計算に取り込んだ。またRC床版と主桁との合成効果については、設計条件に合わせて非合成桁の場合は考慮せず、合成桁の場合は現行道示の規定に基づいて考慮することとした。また計算応力度には衝撃の影響を考慮していない。

②交通供用下における24時間応力測定

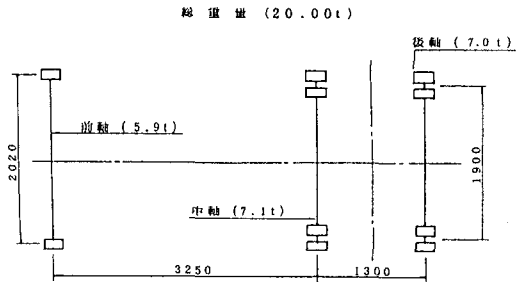
ヒストグラムレコーダー1台を用いて、各橋梁の各主桁についてピークバレー法(PV法)により、24時間の極大極小値の頻度の計測を行った。また各橋梁のうち、日最大応力度の生じる1主桁については、レインフロー法(RF法)により波形処理を行い、24時間の応力範囲の頻度の計測を行った。なお、データ収集に用いたヒストグラムレコーダーは同時に8チャンネル分のデータ(1測定点につき1ch.かつ1解析につき1ch.が必要)しか取れないことから、PV法の測定を優先し、チャンネルが余った場合にRF法による測定を行うこととした。したがって、主桁数の多い橋梁の中にはRF法による測定を行わなかった橋梁もあり、そのため表－1のPV法とRF法の実施橋梁数は一致していない。

なお測定日については交通条件の異なる土、日曜日を避け、月曜日から金曜日までの間とした。また昭和63年度の調査では交通条件を正確に把握するため、応力測定期間中(24時間)に上下車線8車種別の交通量観測も実施している。

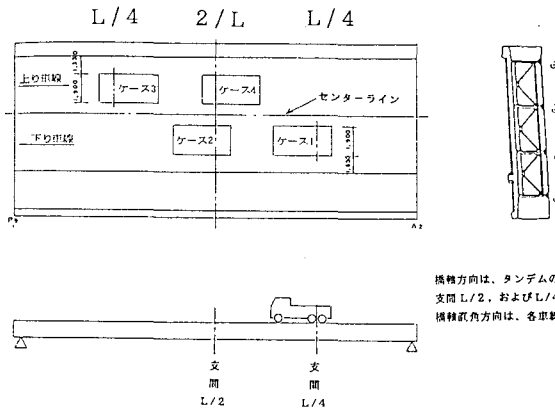
4. 荷重車静的載荷時における応力測定結果

4. 1 荷重車静的載荷試験の概要

静的載荷試験は、橋梁上の交通



図－1 荷重車諸元例



図－2 荷重車の載荷位置例

を一時的に遮断した状態で行った。計測は、①橋梁上に車両が載荷されない状態でひずみの0点を取る、②総重量約20tonの3軸トラック1台を、各レーンの走行位置をゆっくりと走行させ所定の位置（各レーンにつき支間中央、支間1/4点の2ケース）で停止させる、③その時のひずみを計測する、という手順で実施した。図-1に荷重車の諸元例を示す。図-2に荷重車の載荷位置例を示す。なお各軸重については軸重計を用いて事前に計測を行った。

4. 2 荷重車1台載荷時の(実測応力度/計算応力度)

ここで検討する荷重車1台載荷時の(実測応力度/計算応力度)とは、供用中定常的に繰り返される載荷状態の(実測応力度/計算応力度)に対応するものであり、疲労を評価する際に重要となる。

図-3は支間中央載荷時における(実測応力度/計算応力度)と計算応力度との関係を、各橋梁の全主桁について示したものである。両者の関係を比較した結果、計算応力度が100kg/cm²程度以下の低応力度側では1.0を超えるデータが多数見られたが、疲労を評価する上で重要とならないことから、図中にはプロットしていない。

全体的な傾向として計算応力度が大きくなるに従い、(実測応力度/計算応力度)は小さくなる傾向にある。これは荷重車の載荷位置近くの主桁では、(実測応力度/計算応力度)が小さく、載荷位置から離れるにつれて(実測応力度/計算応力度)が大きくなることを意味しており、計算における荷重分配効果の見積もりが実際と異なるためと考えられる。

図-4は、図-3のプロットのうち各橋梁の計算応力度が最大の桁に着目して、(実測応力度/計算応力度)と計算応力度の関係を示したものである。図中の番号は、63年度に計測を行った橋梁の番号を示しており、後述の番号と対応する。(実測応力度/計算応力度)の平均値は0.65であり、標準偏差は0.19である。図中の番号15の橋梁については設計荷重8tonで設計され歩道の増設および床組の補強が行われている。番号16の橋梁については2主桁の間に7本の縦桁を有する中路橋である。

合成桁の(実測応力度/計算応力度)は、100~300kg/cm²の計算応力度に対して0.20~0.96の範囲にばらついており、1.

0に近い値も見られており、実測応力度と計算応力度の差を一律に決めることは難しいと考えられる。非合成桁の(実測応力度/計算応力度)は、0.39~0.77の範囲(番号16を除く)となっており、データは少ないが計算応力度が大きくなるにつれて(実測応力度/計算応力度)が小さくなる傾向が見られる。ここで主桁下フランジの継手として荷重非伝達型の非仕上げのすみ肉溶接継手を考えた場合、JSSC疲労設計指針(案)¹⁾ではE等級(200万回疲労強度:80MPa)であり、変動応力下での応力範囲の打ち切り限界が29MPaとなっている。この打ち切り限界29MPaに対応する非合成桁の(実測応力度/計算応力度)は、図-4では最大で概ね0.7程度の値となっており、実測応力度を推定する場合、計算応力度に対して0.7程度の値を見込む必要があると考えられる。

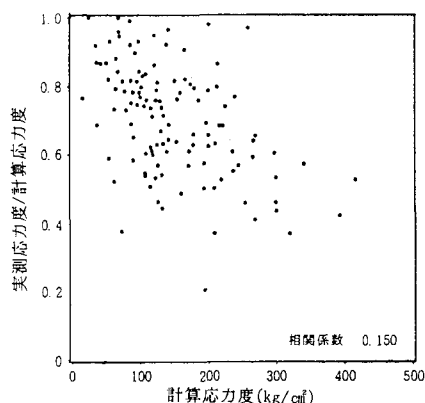


図-3 実測応力度/計算応力度
(荷重車1台載荷、全橋梁全主桁の値をプロット)

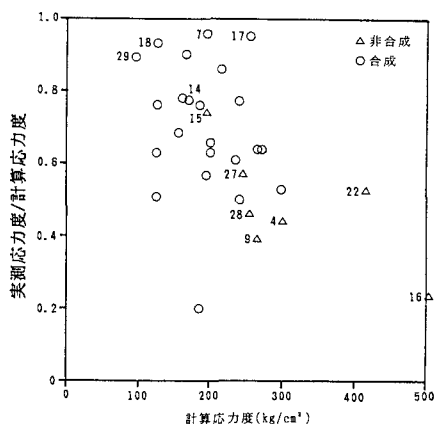
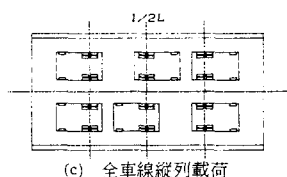


図-4 実測応力度/計算応力度
(荷重車1台載荷、各橋梁の最大値のみプロット)



(c) 全車線縦列載荷
図-5 全車線縦列載荷状態

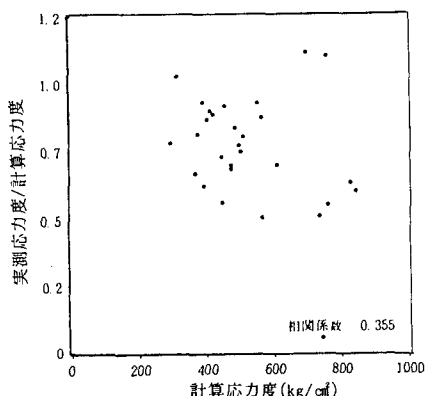


図-6 実測応力度/計算応力度
(全車線縦列載荷、各橋梁の最大値のみプロット)

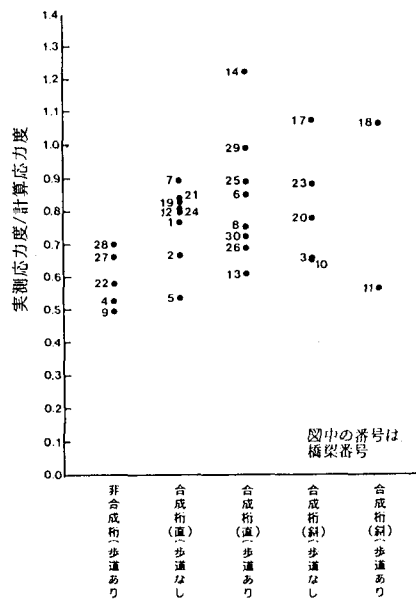


図-7 実測応力度/計算応力度
(全車線縦列載荷、各橋梁の最大値のみプロット)

4. 3 複数台の車両の載荷時の(実測応力度/計算応力度)

部材の降伏等に対する安全性の照査を計算応力度に基づいて行う場合には、発生応力度の大きくなる載荷状態に対して計算応力度と実測応力度との差を求めておくことが重要と考えられる。また各車線に車輛が満載される状態を想定した場合、計算と実際の荷重分配効果の差が相殺され、前節で述べた荷重車1台載荷時の場合と比較して、実測応力度と計算応力度の差が小さくなることも考えられる。そこで複数台の車両の載荷時の(実測応力度/計算応力度)について検討することとした。

4.1節で述べたように載荷試験では橋上に各載荷ケースについて一台ずつしか荷重車を載荷しておらず、発生応力度の大きくなる複数台の載荷は実施していない。従ってここでは各載荷ケースによる発生応力度の重ね合わせができると仮定して、図-5に示すように全車線に荷重車を3台縦列載荷した場合を想定することとした。この場合支間長によっては、荷重車を同一車線上の $L/2$ および $L/4$ (L :支間長)の位置に同時に載荷できない場合も生じるが、計算上は可能なので載荷することとした。

図-6は、各橋梁のデータの中で計算応力度の比較的大きい1主桁のデータについて、(実測応力度/計算応力度)と計算応力度との関係を示したものである。(実測応力度/計算応力度)の平均値は0.77で標準偏差は0.18であり、荷重車1台載荷時の場合より平均値は大きくなっている。

図-7は図-6中のデータを構造形式、桁形状、歩道の有無により分類して示したものである。非合成桁の(実測応力度/計算応力度)は、0.49~0.70であり、合成桁と比較して小さいが、床版の合成効果を計算上見込んでいない分だけ、計算応力度が大きくなっていると考えられる。合成桁については桁形状、歩道の有無により分類してみたが、(実測応力度/計算応力度)の差異は特に見られない。また番号14,17,18,29の橋梁について、(実測応力度/計算応力度)は1.0に近い値となっている。また番号17,18,29の橋梁では図-4に示すように荷重車1台載荷時の(実測応力度/計算応力度)が既に1.0に近い値を示しており、(実測応力度/計算応力度)を一律に決めることは難しいと考えられる。

5. 交通供下における24時間応力測定結果

5. 1 日最大応力度

図-8および図-9に $\sigma_{\max}$ ($\sigma_{\max}$:日最大応力度)および $\sigma_{\max}/\sigma_{20}$ (σ_{20} :設計活荷重応力度)と日大型車交通量との関係を示す。図中の数字は主要な橋梁の番号(○-○:観測年-測定年度)を示したものである。日大型車交通量が大きくなるに従い $\sigma_{\max}$ および $\sigma_{\max}/\sigma_{20}$ は大きくなる傾向が見られるが、その値はばらついている。24時間測定の結果ではあるが、 σ_{20} に対して比較的大きい応力度が生じている。 $\sigma_{\max}$ が大きい(630kg/cm²以上)橋梁としては、大きい方から順に番号17-3の($\sigma_{\max}$ (kg/cm²), $\sigma_{\max}/\sigma_{20}$)=(780, 0.83)、25-2の(660, 0.67)、12-2の(630, 0.88)、18-2の(630, 0.78)、7-2の(630, 0.61)、1-1の(630, 0.56)の6橋が挙げられる。これらの6橋は昭和39年の示方書に基づいて設計された歩道地覆のない橋梁であるという点で共通している。またこれらの橋梁のうち、番号25-2および1-1を除く橋梁は単純合成桁である。25-2は支間22.6m、斜角35度の単純非合成の斜橋である。なお25-2については橋軸方向に20本の桁が配置されており、その桁において測定を行なっている。

図-10に、63年度の計測橋梁について、日大型車交通量と $\sigma_{\max}/\sigma_{T-20}$ の関係を示す。ここで σ_{T-20} は20トンの荷重車の静的載荷試験で得られた最大応力度であり、 σ_{T-20} で無次元化することにより、構造上のばらつきがある程度取り除けるものと考えられる。なお σ_{T-20} は $\sigma_{\max}$ の生じた主桁と同一の桁の値である。 $\sigma_{\max}$ としては20トン車載荷時の2~4倍程度の応力が生じている。同一の日大型車交通量に対して、 $\sigma_{\max}/\sigma_{T-20}$ のばらつきが見られるが、これは主として荷重の載荷条件(重車両の載荷、複数台の載荷、載荷位置のずれ等)の差異によるばらつきと推測される。

5. 2 応力頻度分布

ここでは等価応力範囲を次式により求めた値と定義する。

$$S_{\text{req}} = \sqrt[3]{(\sum N_i \cdot S_i^3) / \sum N_i}$$

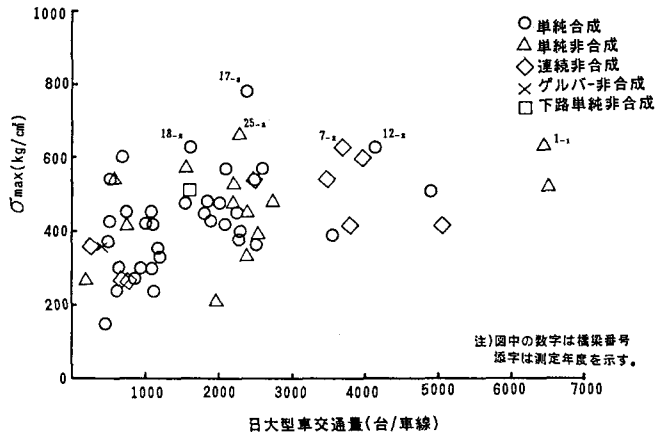


図-8 $\sigma_{\max}$ と日大型車交通量の関係

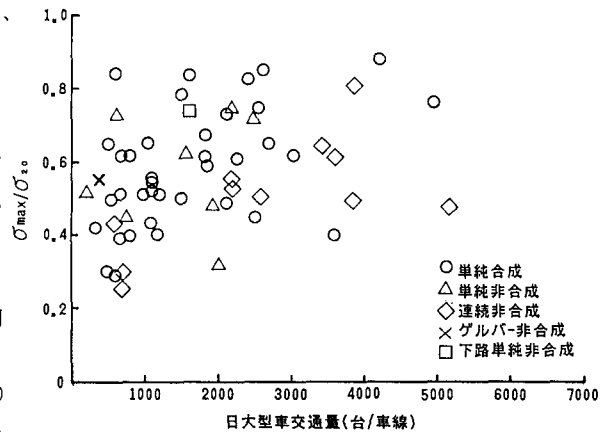


図-9 $\sigma_{\max}/\sigma_{20}$ と日大型車交通量の関係

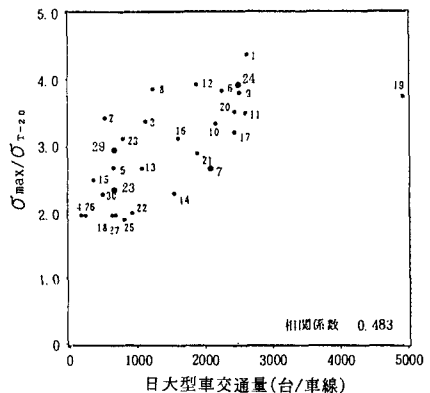


図-10 $\sigma_{\max}/\sigma_{T-20}$ と日大型車交通量の関係

ここで S_{ri} 、 N_i はレベル i に対する応力範囲とその繰返し数である。 S_{req} の計算には24時間内に計測された全ての応力範囲を考慮している。

図-11および図-12に各橋梁の支間中央下フランジにおける等価応力範囲と日大型車交通量および設計活荷重応力度との関係を示す。等価応力範囲の平均値は 122kg/cm^2 、標準偏差 22kg/cm^2 であり、前述の日最大応力度と比較してばらつきは非常に小さい。応力範囲の頻度分布データは、どれも低応力側に極端に偏った分布形状をしており、そのため等価応力範囲で整理すると低い応力範囲の影響を受け、日最大応力度と比較して極端に小さい値となっている。等価応力範囲と日大型車交通量の間には特に相関は見られないが、日大型車交通量と設計活荷重応力度との間には若干の相関が見られる。

図-13に24時間測定中の応力範囲の総繰返し回数と日大型車交通量との関係を示す。図中の直線は最小二乗法により求めた回帰直線を示している。24時間測定中の全頻度と大型車交通量との間には、若干の相関が見られる。

以上の3つの図から得られる日大型車交通量、等価応力範囲とその頻度および設計活荷重応力度の関係をそれぞれ定式化し、対象とする継手の疲労強度、橋梁の日大型車交通量および設計活荷重応力度を与えることにより既設橋の疲労寿命をある程度予測できるものと考えられる。

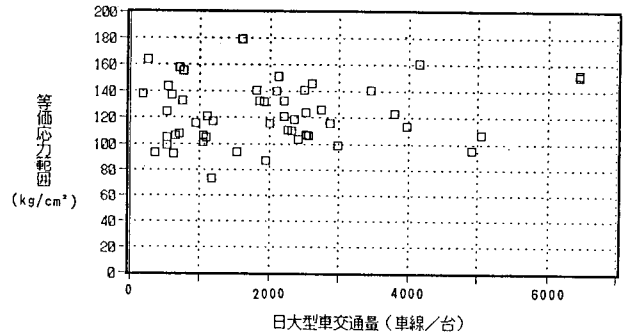


図-11 等価応力範囲と日大型車交通量の関係

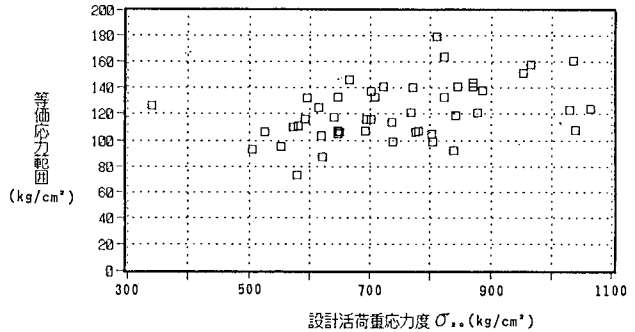


図-12 等価応力範囲と設計活荷重応力度 σ_s の関係

6. まとめ

実橋における応力測定結果に基づき、実測応力度と計算応力度の差、日最大応力度および応力範囲の頻度分布から得られる等価応力範囲およびその頻度の実態について分析を行った。本文では得られた実態を説明しうだけの十分な分析まで至らなかったが、既設橋の安全性および耐久性を評価するためには、ここで得られた結果を評価手法に活かしていくことが必要と考えられる。主な結果を以下にまとめる。

(1) 大型車一台の载荷に対する(実測応力度/計算応力度)

(実測応力度/計算応力度)は計算応力度が大きくなるにつれ小さくなる傾向にある。合成桁の(実測応力度/計算応力度)は、同程度の計算応力度に対して0.2~0.96の範囲となっており、1.0に近い値も数データ見られており、実測応力度と計算応力度の差を一律に決めることは難しいと考えられる。

非合成桁の(実測応力度/計算応力度)は、0.39~0.77の範囲となっており、データは少ないが計算応力度が大きくなるにつれて(実測応力度/計算応力度)が小さくなる傾向が見られる。JSSC疲労設計指針(案)のE等級

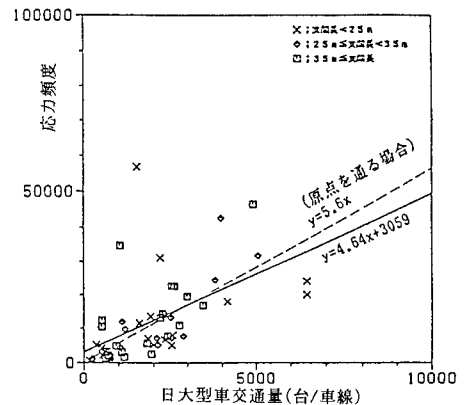


図-13 応力頻度と日大型車交通量の関係

の継手の変動応力下での打ち切り限界29MPaに対して、非合成桁の(実測応力度/計算応力度)は概ね0.7程度の値となっており、実測応力度を推定する場合、計算応力度に対して0.7程度の値を見込む必要があると考えられる。

(2)車両満載時に対する(実測応力度/計算応力度)

合成桁については1.0を越えるものも見られており、(実測応力度/計算応力度)を一律に決めることは難しいと考えられる。(実測応力度/計算応力度)は非合成桁については0.49~0.70であり、合成桁と比較して、床版の合成効果を計算に見込んでいない分だけ(実測応力度/計算応力度)が小さくなる傾向にある。

(3) $\sigma_{\max}$ および $\sigma_{\max}/\sigma_{\pm 2\sigma}$ の実態

24時間計測における $\sigma_{\max}$ および $\sigma_{\max}/\sigma_{\pm 2\sigma}$ の最大値は、それぞれ780kg/cm²および0.83であった。また、 $\sigma_{\max}/\sigma_{\pm 2\sigma}$ は2~4程度であった。

(4)応力範囲頻度分布の実態

等価応力範囲(5.2節において定義している)の平均値は122kg/cm²、標準偏差22kg/cm²であり、日最大応力度と比較してばらつきは非常に小さい。等価応力範囲と日大型車交通量の間には特に相関は見られない。日大型車交通量と設計活荷重応力度との間には若干の相関が見られる。24時間測定中の全頻度と日大型車交通量は、若干の相関が見られる。

謝辞

本検討は昭和61~63年度の建設省技術研究会の指定課題『既設橋梁の耐久性評価・向上技術に関する調査研究』の中で行ったものであり、応力計測にあたっては、建設省各地方建設局、北海道開発局、沖縄総合事務局のご協力を頂いた。ここに感謝致します。

参考文献

- 1)建設省土木研究所：既設橋梁の耐久性評価，耐久性向上技術に関する調査研究，土木研究所資料 第2420号，昭和61年11月
- 2)建設省土木研究所：既設橋梁の耐久性評価，耐久性向上技術に関する調査研究Ⅱ，土木研究所資料 第2615号，昭和63年2月
- 3)建設省土木研究所：既設橋梁の耐久性評価，耐久性向上技術に関する調査研究Ⅲ，土木研究所資料 第2682号，昭和63年12月
- 4)橋梁委員会示方書小委員会耐荷力分科会：鋼道路橋(プレートガーダーおよびトラス)供用荷重算定指針(案)、道路 1970-11
- 5)Fisher J. W. : BRIDGE FATIGUE DESIGN GUIDE-DESIGN AND DETAILS, AISC, 1977
- 6)AASHTO:Standard Specifications for Highway Bridges 14th edition, 1989
- 7)Ontario Ministry of Transportation and Communications:Ontario Highway Bridge Design Code, Commentary, 1983
- 8)Miki, Toyohuku, Yoshimura, Murakoshi:STRESS REDUCTION FACTOR FOR FATIGUE ASSESMENT OF HIGHWAY BRIDGES
- 9)建設省：第20回 建設省技術研究会報告,昭和41年度
- 10)日本鋼構造協会：疲労設計指針(案)、JSSCレポート No.14、平成元年11月

(1990年10月12日受付)