

静的載荷試験に基づく既設鉄桁橋の静的耐荷力算定に関する一考察

Estimation on Static Load-Carrying Capacity of the Existing Plate Girder Bridge by Static Loading Test

岩崎正二*, 出戸秀明*, 寺田 晃**, 兼子 清***, 村上 功****

Shoji IWASAKI, Hideaki DETO, Akira TERADA, Kiyoshi KANEKO, Isao MURAKAMI

ABSTRACT In this paper, to grasp loading capacity of used steel bridges for large-sized traffic load, we propose estimation method by using basic loading capacity ratio. This ratio is obtained through the relation between strains of static loading test and bending moment by structural analysis that is little error for hypotheses of design. Basic loading capacity ratio is at the rate of stress for live load and the rest of stress subtracting stress for dead load from allowable stress of steel. To obtain the relation between strain and bending moment, we carry out static loading tests by dump tracks of 20tf and 25tf for used plate girder bridges.

Keywords: 耐荷力、静的載荷試験、合成桁、既設鉄桁橋、可動支承

Loading-Carrying Capacity, Static Loading Test, Composite Girder

Used Plate Girder Bridge, Movable Bearing

1. まえがき

近年の自動車大型化に対応し、平成5年度の道路法一部改正により道路橋設計の自動車荷重が、従来の20tfから25tfへと移行した。岩手県内の大部分の既設橋が20tf対応であり、何らかの対策を講ずる必要がある。このような社会的背景から、既設橋の実橋載荷試験による耐荷力評価及び実態把握を目的として、社団法人岩手県土木技術センターが主催した平成10年度共同研究¹⁾の中の、静的載荷試験に基づく静的耐荷力算定の方法についての考察である。本報告は、耐荷力の推定に際して温度等によって生じる初期応力を考慮しないという制約条件はあるものの、理論値(曲げモーメント)と実測値(ひずみ)の関係に着目した新しい静的耐荷力算定法を提案するものである。また、静的載荷試験により得られた実応力度と理論値との相違がどの程度なのかを確認するとともに、その原因の一つとして可動支承の水平反力の影響を取り上げ検討したので報告したい。

2. 静的載荷試験

実橋載荷試験として、静的載荷試験を実施した。静的載荷試験とは、実橋に対して予め計量された車輛を載荷し、ひずみ及び変位量を計測するものである。静的載荷試験の載荷荷重は、本来、設計計算と同様な日活荷重を橋面上に乗せるのが望ましいが、現地で5.50m×10.00mの範囲に10kN/m²の等分布荷重を再現することは困難である。そこで本試験は、自動車荷重の変更を考慮して、採石を積載し総重量を20tfにした車輛と、それ以外に5tf相当の鋼板を上載せして25tfとした車輛を1台ずつ用意し載荷重とし、重量や位置を変化させた試験ケース(正徳橋7ケース、有根橋10ケース)で主桁に直接貼ったストレインゲージでひずみを、支間中央にセットした変位計でたわみを測定した。対象橋

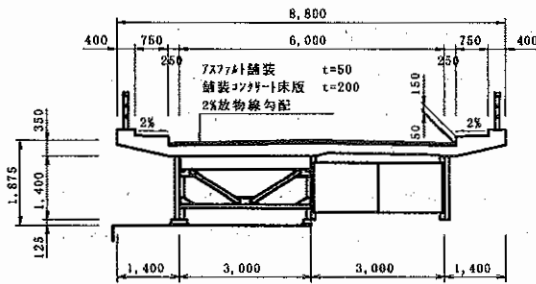
* 岩手大学 工学部建設環境工学科 (〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5)

** 国際航業(株) 東北事業本部 道路・構造部 (〒983-0852 仙台市宮城野区榴岡 5-1-23)

*** 東亜技研(株) (〒020-0834 盛岡市永井 15 地割 66-7)

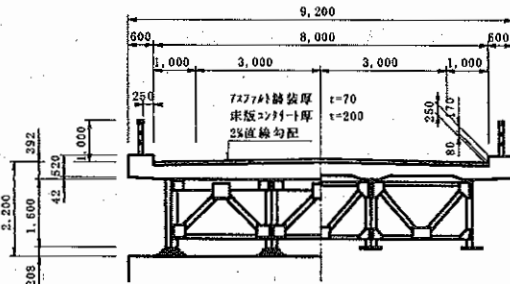
**** (社)岩手県土木技術センター (〒020-0834 盛岡市永井 17-20-20)

梁の選定基準として、外観目視で床版、主桁等に損傷のない岩手県内の橋梁とし、既設橋で最も多い鋼単純桁形式の2橋をサンプルとして選定した。試験対象橋梁の諸言を図-1, 2 に示す。なお、両橋とも支承のタイプは、鋼の線支承である。図-3 に有根橋の測定器具の設置位置を示す。静ひずみ測定器は、TDS-303 (東京測器研究所(株)) を使用した。ひずみゲージと変位計を設置する主桁は、図-3 に示すように盛岡側右側の中桁 (G3) 及び耳桁 (G4) とする。ひずみゲージの取り付け位置は、応力度最大となる支間中央断面の位置で上フランジ2箇所、下フランジ2箇所、ウェブ3箇所の総計7箇所とする。盛岡側支間 1/4 の位置で下フランジ2箇所とする。また、変位計は、支間中央の位置の下フランジに設置した。設置位置図は省略するが、正徳橋についても有根橋と同様に設置した。



橋 長 : 52.00m
支 間 : 2@25.35m
形 式 : 鋼2径間単純合成桁橋
幅 員 : 8.00m (=0.75m+6.50m+0.75m)
活荷重 : 一等橋 (TL-20)
竣 工 : 昭和45年

図-1 正徳橋の諸言



橋 長 : 60.00m
支 間 : 2@29.25m
形 式 : 鋼2径間単純合成桁橋
幅 員 : 8.00m (=1.00m+6.00m+1.00m)
活荷重 : 一等橋 (TL-20)
竣 工 : 昭和55年

図-2 有根橋の諸言

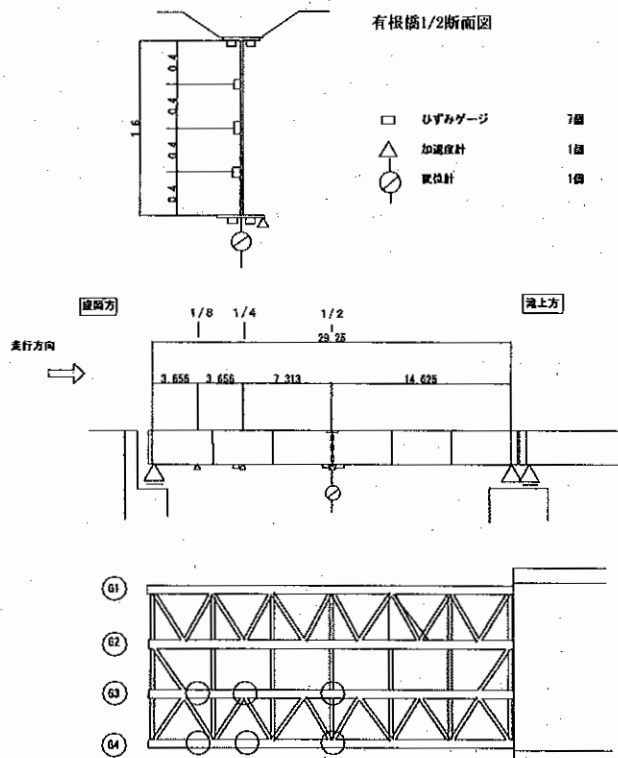


図-3 有根橋測定器具の設置位置図 (単位 : m)

有根橋の橋軸方向の載荷方法として、20tf車あるいは25tf車のトラックを1台載荷する場合（ケース1～4）、図-4(1)に示すようにトラック後輪の中心が支間中央にくるように載荷した。また、20tf車と25tf車を同時に直列載荷する場合（ケース5，6）は、図-4(2)に示すようにトラックの後側を突合わせるような形式で載荷した。20tf車と25tf車を幅員方向に並列載荷する場合（ケース7～10）は、後輪の中心を支間中央に載せる場合と支間1/4に載せる場合の2ケース行った。正徳橋についても有根橋と同様に実施した。

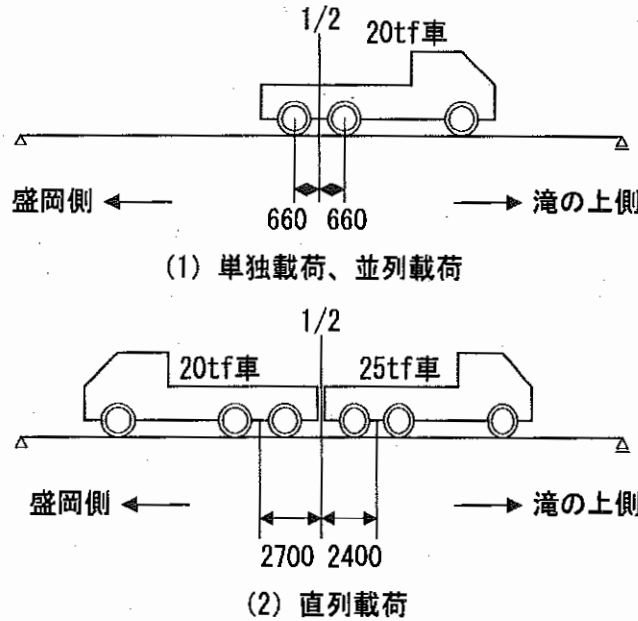


図-4 有根橋の橋軸方向のトラック車の載荷位置

橋軸直角方向の載荷方法は、中桁や耳桁に最大応力が発生するようにトラックを載荷した。図-5に2橋に対するトラックの載荷位置を示す。また、試験車輛の軸重計測結果を表-1に示す。

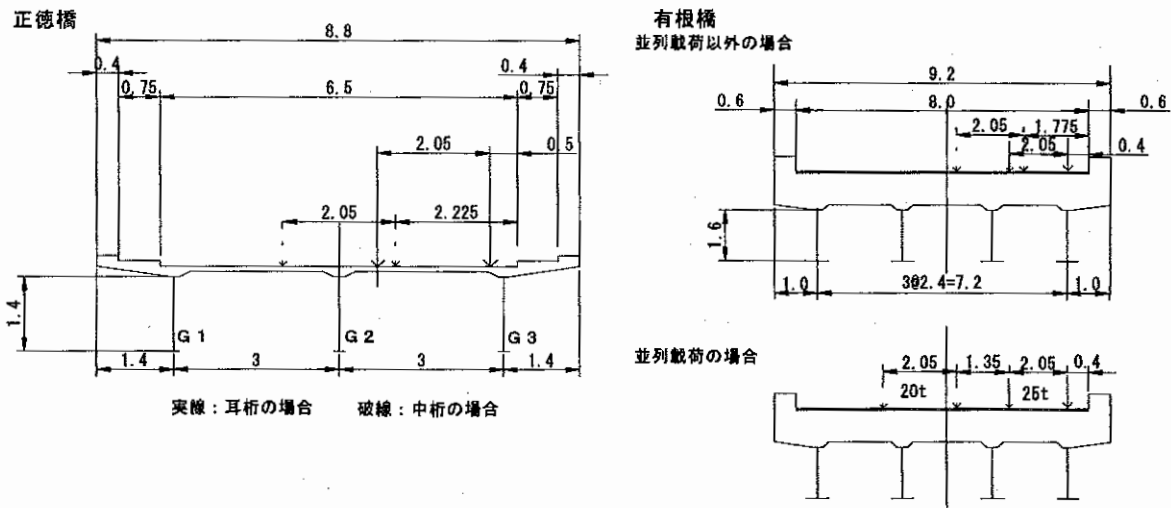


図-5 正徳橋と有根橋の橋軸直角方向のトラック車の載荷位置 (単位：m)

表-1 試験車両の1輪当たりの重量

	前輪 (tf)	後輪 (tf)
20tf車	2.660	7.340
25tf車	3.535	8.965

以上をふまえ、表-2に正徳橋と有根橋の載荷試験の荷重ケースを示す。

表-2 載荷試験の荷重ケース

ケース	正徳橋			有限橋		
	載荷重	載荷位置 (橋軸方向)	載荷位置 (橋軸直角方向)	載荷重	載荷位置 (橋軸方向)	載荷位置 (橋軸直角方向)
1	20tf+25tf	2台直列	耳桁	20tf	単独	耳桁
2	20tf	単独	耳桁	25tf	単独	耳桁
3	25tf	単独	耳桁	20tf	単独	中桁
4	20tf	単独	中桁	25tf	単独	中桁
5	25tf	単独	中桁	20tf+25tf	2台直列	耳桁
6	20tf+25tf	2台直列	中桁	20tf+25tf	2台直列	中桁
7	20tf+25tf	2台直列	耳桁	20tf+25tf	並列 中央スパン	中桁
8	—	—	—	20tf+25tf	並列 1/4スパン	中桁
9	—	—	—	20tf+25tf	並列 中央スパン	耳桁
10	—	—	—	20tf+25tf	並列 1/4スパン	耳桁

3. B活荷重による発生ひずみの推定法

計算値と実測値を比較するため、事前に採石を積載した状態で車両の軸重を測定しておき、それらの結果(表-1)を用いて各試験ケース(表-2)をモデル化し、耳桁と中桁の計測点における曲げモーメント、たわみ、ひずみを格子桁理論により算出した。その際、合成桁におけるコンクリートが硬化した後に作用する死荷重及び活荷重による曲げモーメント算定は、鋼桁と床版コンクリートの合成作用を考慮して求めるが、床版コンクリート断面をヤング係数比で鋼桁の断面二次モーメントに換算しているため、設計上の仮定が含まれる。しかしヤング係数比の差違が、曲げモーメント算定に大きく影響しないため、格子桁理論で得られた曲げモーメントは理論値として扱う。なお、両橋のヤング係数比は同じ値(n=7)を用いている。単純梁に荷重が作用した場合、ひずみ(ε)及び曲げモーメント(M)の関係は、式(1)ようになる。

$$\varepsilon = M \cdot y / E \cdot I \cdot \dots \cdot (1)$$

ここで、E: 鋼桁のヤング係数, I: 断面二次モーメント, y: 図心からの距離。

合成桁の場合、式(1)の鋼材とコンクリートの合成断面二次モーメントと合成断面の図心からの距離はヤング係数比の値等により変化する。そこで y/EI を曲げモーメントとひずみの比例定数としグラフを作成する。すなわち、表-2に示す各試験ケースにおける中桁、耳桁の計測点に生ずる実測ひずみを、

その計測断面に生ずる曲げモーメント（理論値）上にプロットし最小二乗法により直線近似した。図-6, 7 はそれぞれ有根橋と正徳橋の曲げモーメントとひずみのグラフである。表-3 に、それぞれの橋の曲げモーメントとひずみの関係式を示す。これらの関係式より、B活荷重が作用するときの主桁の曲げモーメントが計算されると、そのときに生ずる実ひずみを簡単に推定することができる。

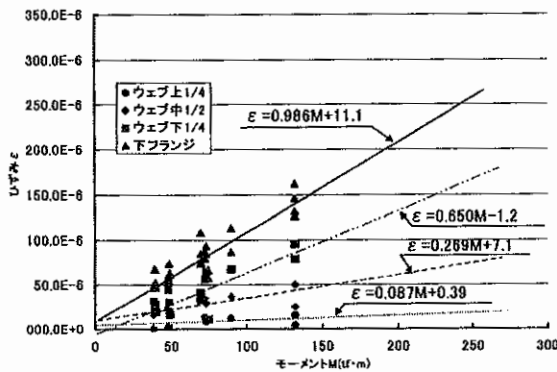


図-6 有根橋の曲げモーメントとひずみの関係

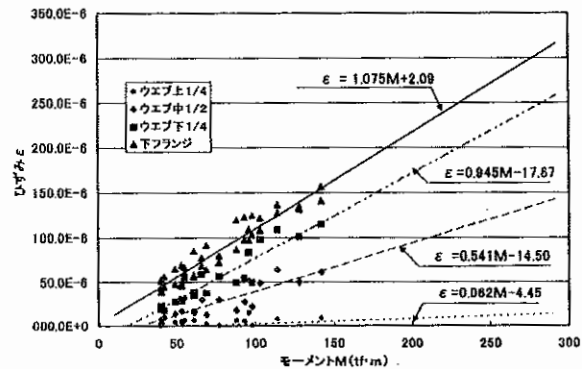


図-7 正徳橋の曲げモーメントとひずみの関係

表-3 正徳橋と有根橋の曲げモーメントとひずみの関係式

		正徳橋		有根橋	
		関係式	相関係数	関係式	相関係数
ウェブ	上1/4	$\epsilon = 0.087M + 0.39$	0.651	$\epsilon = 0.062M - 4.45$	0.199
	中1/2	$\epsilon = 0.269M + 7.1$	0.814	$\epsilon = 0.541M - 14.50$	0.859
	下1/4	$\epsilon = 0.650M - 1.2$	0.854	$\epsilon = 0.945M - 17.67$	0.923
下フランジ		$\epsilon = 0.986M + 11.1$	0.936	$\epsilon = 1.075M + 2.09$	0.951

4. 静的耐荷力算定法

本論文での耐荷力の評価法は、曲げモーメントと計測で直接得られるひずみの関係だけに着目した。鋼材許容値から死荷重による応力度を差し引いた余裕量と、活荷重による発生応力度の割合を基本耐荷率とし式(2)で表す。式中活荷重による衝撃係数の影響は、B活荷重を考えているため σ_1 の計算過程で考慮されている。式(2)の値が1より大きい小さいかにより判断する。ここで合成後の死荷重、活荷重によって生ずるひずみ (ϵ_{vd} , ϵ_{vl}) は、表-3 に示す曲げモーメント-ひずみの関係式から求める。すなわちB活荷重による主桁に作用する曲げモーメントをこれらの式に代入することで、B活荷重時に発生する応力度が求まり、式(2)より基本耐荷率が計算できる。2橋について下フランジ応力から基本耐荷率を計算した結果は、表-4 に示すとおりである。なお、耐荷率が1以上になったが、式(2)が温度等による初期応力を考慮してないことや活荷重が動的に載荷された場合の検討が行われていないため、現段階ではB活荷重に対して耐荷力があると結論することはできない。なお、本耐荷力算定法は合成桁ばかりでなく非合成桁に対しても適用可能と思われる。

$$\text{基本耐荷率} = (\sigma_a - \sigma_d) / \sigma_1 \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 σ_a : 鋼桁の許容応力度、正徳橋:1900kgf/cm²(SM490材)、有根橋:2100kgf/cm²(SM490Y材)

σ_1 : 合成後の活荷重によって生じる応力度 $\sigma_1 = E \cdot \epsilon_{vl}$

ϵ_{vl} : 活荷重が作用したことにより合成桁に発生するひずみ (表-3 を使用)

σ_d : 死荷重による応力度

$$\sigma_d = \sigma_{sd} + \sigma_{vd} = M_{sd} \cdot y / I + E \cdot \epsilon_{vd}$$

σ_{sd} , σ_{vd} : 合成前及び合成後の死荷重による応力度

ϵ_{vd} : 合成後死荷重によるひずみ (表-3 を使用)

表-4 基本耐荷率の結果 (単位: kgf/cm²)

	正徳橋				有根橋			
	σ_a	σ_d	σ_l	基本耐荷率	σ_a	σ_d	σ_l	基本耐荷率
耳桁	1,900	1,238	536	1.24	2,100	1,067	628	1.64
中桁	1,900	1,218	477	1.43	2,100	1,042	519	2.04

5. 実測値と計算値の比較

ひずみの計算値は、発生曲げモーメントを床版コンクリートのヤング係数比を仮定しての合成断面係数とヤング係数で除した値であり、曲げモーメントと一次の比例関係である。計算ひずみと実測ひずみ値の比を計測位置ごとにまとめ、相加平均したのが表-5である。圧縮と引張が各ケースで反転する結果となっている上フランジの値と、圆心近くでひずみ自体が小さく僅かな値の誤差も比率に影響するウェブ上縁近くの値 (ウェブ上 1/4) はデータとしての信頼性に劣る。それ以外の表-5 の着色部分の値を見ると下フランジで正徳橋が平均 65%、有根橋が平均 66%となり格子桁理論による計算値はかなり安全側の結果となった。これらの原因としては、計算上過小評価ないしは、無視している部材の相乗効果によるものと考えられる。また、支承による変形拘束の影響も大きいものと考えられる。また主桁のひずみ分布は、圧縮側に近づくにしたがいがり比率が小さくなる傾向を示す。その傾向は耳桁より中桁の方が顕著である。その理由としては、主桁の圧縮側は床版との合成作用の影響により変形しにくくなっていることが考えられる。変位については、比較結果は省略するが、結果のみを述べるとスパン中央のたわみの計算値に対する実測値の比率は、正徳橋で平均 71%、有根橋で平均 72%となり安全側の値となった。

表-5 ひずみの計算値と実測値の比率

		正徳橋		有根橋	
		耳桁	中桁	耳桁	中桁
上フランジ		0.75	-0.42	0.48	1.13
ウェブ	上1/4	0.23	0.51	0.05	0.18
	中1/2	0.46	0.12	0.62	0.32
	下1/4	0.56	0.37	0.71	0.46
下フランジ		0.63	0.67	0.63	0.69

比率=実測値/計算値

6. 静的載荷試験結果を用いた支承水平反力の推定法

ここでは前述したひずみの実測値と計算値の違いに着目し、その原因の1つとして可動支承による変形拘束の影響を考えた。本研究の既設合成鋼桁橋の静的載荷試験の中に高精度傾斜計によるたわみ角の測定があり、その測定値の最大値が支点から 1/4~1/6 点に生じており、たわみ曲線は反曲していることがわかった。これは桁のたわみによる下フランジの伸びが可動支承の摩擦抵抗に拘束されて軸方向に水平反力が働き負の曲げモーメントが発生したためと考えられる。そこで、この水平反力をひずみとたわみの測定値から推定してたわみ角の検証を行い、支承反力の影響について考察することと

した。使用する測定値は正徳橋の中桁載荷（ケース4，5）の測定値を使用することにした。ひずみとたわみの測定値を表-6に、たわみ角測定値を表-7に示す。

表-6 正徳橋中桁載荷時の測定値

載荷重 トラック	ひずみ ($\times 10^{-6}$)		たわみ (mm)		備 考
	耳桁 (G_1)	中桁 (G_2)	耳桁 (G_1)	中桁 (G_2)	
20tf	47.5	49.5	1.958	2.302	・測点位置は1/2点である ・ひずみは下フランジ2箇所の平均である。
25tf	57.0	62.0	2.520	2.986	

表-7 正徳橋たわみ角測定値（高精度傾斜計）中桁載荷 20tf 単位：マイクロラジアン

位置（支点より）	1.15m	4.65m	6.65m	9.65m	12.66m
耳桁 (G_1)	120.4	171.1	168.8	112.2	14.5
中桁 (G_2)	145.8	180.8	179.6	127.4	45.0

次に支承の水平反力の推定法について提案する。桁の中央にMの曲げモーメント及び支承に反力が作用しているときのひずみ、たわみは次式で表される。

$$\varepsilon = aMy/EI - Xy^2/EI \dots \dots (3)$$

$$\delta = aMI^2/m_1EI\beta - Xyl^2/m_2EI\beta \dots \dots (4)$$

ここで、 ε ：ひずみ、 δ ：たわみ、 a ：曲げモーメントの分配係数、 M ：単純梁としたときのトラックによる桁中央の曲げモーメント、 y ：桁下縁から中立軸までの距離、 EI ：曲げ剛性、 l ：支間長、 X ：水平反力、 m_1 、 m_2 ：弾性荷重の形状による係数でダンブトラックの場合には $m_1 \approx 11.2$ 、等分布 $m_2 = 8$ 。なお、三角形の場合は 12、放物線の場合は 9.6 である。 β ：桁の平均 EI 値と中央断面の EI 値の比で $\beta \approx 0.93$ 。

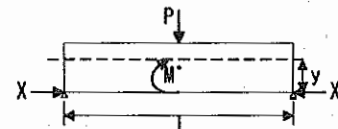


図-8 力の作用図

20tfトラックが中桁に載荷する場合を考える。仮定として3主桁の EI 値は同値とする。 $M=111.63tf \cdot m$ 、 $l=25.35m$ 、 $y=1.199m$ ($E_s/E_c=14.686$ とした時の I の y 値、 $EI=657.504tf \cdot m^2$ と仮定)

式(3)と式(4)に EI を乗じ a_1 、 a_2 、 X_1 、 X_2 、 EI を未知数とする5元連立方程式を立て数値を代入すると、連立方程式の係数は表-8 のようになる。ただし、 a_1 、 a_2 は G_1 桁、 G_2 桁の曲げモーメントの分配係数、 X_1 、 X_2 は G_1 桁、 G_2 桁に作用する水平反力を表す。

表-8 連立方程式の係数表

a_1	a_2	X_1	X_2	EI	=定数項	備 考
133.87	0	-1.438	0	-0.0000475	=0	耳桁ひずみ
6887.71	0	-103.576	0	-0.001958	=0	耳桁たわみ
0	133.87	0	-1.438	-0.0000495	=0	中桁ひずみ
0	6887.71	0	-103.576	-0.002302	=0	中桁たわみ
2.00	1.00	0	0	0	=1.00	荷重分配係数

上式を解くと、 $a_1=0.3492$ 、 $a_2=0.3015$ 、 $X_1=10.765tf$ 、 $X_2=5.438tf$ 、 $EI=657506tf \cdot m^2$ (EI の仮定値と一致) となる。 EI の仮定値と一致しない場合は、一致するまで繰り返し計算を行うことになる。従って可動支承の摩擦係数 f は、可動支承の鉛直反力を $R=116.58tf$ (死荷重の反力 $107.77tf$ 、載荷重 $8.81tf$) とすると、

$$\text{耳桁可動支承 } f_1 = X_1 / (a_1 \cdot R) = 10.765 / (0.3492 \times 116.58) = 0.264$$

$$\text{中桁可動支承 } f_2 = X_2 / (a_2 \cdot R) = 5.438 / (0.3015 \times 116.58) = 0.155$$

また、25tfトラックを載荷した場合についてfを計算すると耳桁で0.383、中桁で0.290であった。

水平反力の推定式から得た諸元を基に弾性荷重法によりたわみ角を計算し、測定値との比較を行った結果を表-9に示す。対象桁は正徳橋の耳桁である。荷重は20tf中桁載荷の場合である。計算値の方が大きめ出ているが、傾向としてはよく合っているものと思われる。なお、今回の支承水平反力の推定法では、摩擦抵抗が存在するという仮定のもとで反力を算出したが、摩擦抵抗が切れた場合についての考察も必要と思われる。また、摩擦抵抗に対する温度の影響（温度依存性）を検討するためには長期間の測定が必要である。合わせて今後の検討課題としたい。

表-9 たわみ角の計算結果 単位：マイクロラジアン

位置(支点からの距離)	0m	1.15m	4.65m	6.65m	9.65m	12.66m
① 載荷重によるたわみ角	438.4	433.4	362.7	299.5	178.4	16.0
② 支承の水平反力によるたわみ角	-312.5	-274.3	-164.5	-118.2	-58.7	-0.3
③ 計算値 ①+②	125.9	159.1	198.2	181.3	119.7	15.7
④ 測定値	—	120.4	171.1	168.8	112.2	14.5

7. まとめ

静的載荷試験に基づく既設鋼桁橋の新しい静的耐荷力算定法を提案した。B活荷重に対する実橋の耐荷力は、鋼材の許容応力から死荷重応力度を差し引いた余裕量とB活荷重による発生応力度の割合を求め、これを耐荷率として評価した。B活荷重による発生応力度は曲げモーメント（理論値）とひずみ（実測値）の関係式を最小二乗法で直線近似することにより推定した。本論文で提案する静的載荷試験によるB活荷重載荷時の発生応力度の推定法は、20tf及び25tfトラックを、中桁や外桁に単独に載荷したりあるいは2台を同時に直列及び並列に載荷する等して得られる橋中央点の実ひずみの値を統計処理するだけで求めることが出来る極めて簡単な方法であり実用性に富んでいる。また、今回行った静的載荷試験の実測値（ひずみ、たわみ）は計算値より小さく出ており、その原因の1つを可動支承の摩擦抵抗によるものと推察した。本研究では、この摩擦抵抗による支承の水平反力をひずみとたわみの測定値から逆解析により求める方法を提案した。得られた水平反力を用いて、桁のたわみ角を計算した結果、実測値とほぼ一致した。今後の実験では、可動支承上の桁のひずみや移動量を直接測定することにより、支承の摩擦抵抗について検討していきたい。

厳しい経済情勢のもと既設の社会資本の更新はより難しくなることが予想されるため、現有の橋を補修、補強しながら、いかに長く有効に利用していくべきかが課題となっている。岩手県内においても昭和55年前後に、多数の橋梁が建設されている。これは近い将来、一斉に補修、補強の必要性が生じることを意味する。このため、県内の橋梁の特性を整理し、その耐荷力を評価することが重要である。今回行った載荷試験の結果は貴重なデータであり、本論文で提案した耐荷力算定法は有効な手法であると考えられる。

今回の静的載荷実験では、既設鋼桁橋の鋼桁部を中心に計測を行ったが、実橋で最も弱点となるのは床版であり、橋の耐荷力評価という観点からはコンクリート床版、鋼桁とコンクリートの連結力（スラブアンカーや付着力）等への実験的な研究が必要と思われる。

本試験は、社団法人岩手県土木技術センターの共同研究の一環として平成10年に実施されたものである。センターの保健一会長を始め共同研究員各位及び日本大学五郎丸英博助教授には大変お世話になりました。ここに記して感謝の意を称します。

【参考文献】

- 1) 社団法人岩手県土木技術センター：道路橋設計荷重の変更による既設橋梁上部構に及ぼす影響，第1回共同研究報告書，1999，6