

フィールド応力頻度測定による橋梁耐荷力について

計測技販(株) 正員 佐藤 良一
計測技販(株) 正員 後藤 公男
開発局開発土木研究所 正員 佐々木康博
開発局開発土木研究所 正員 佐藤 昌志

1. はじめに

平成5年11月に道路構造令等の一部を改正する政令が施行された。このことから、車輛等の大型化に伴い、橋、高架の道路等の設計自動車荷重は20トンから25トンに引き上げられ、既設橋梁においては、補修・補強の必要性を判断するための耐荷力あるいは耐久性の評価が課題となっている。

しかしながら、様々な構造部材が組み合わされている橋梁構造では、設計では考慮されない合成作用や荷重分配作用が生じる。また、実際の交通荷重環境では、示方書で想定している車輛の載荷状態は極めて希にしか発生しない。

そのため、既設橋のB活荷重に対する補修・補強の要否を判定するにあたっては既設橋の実際の使用状態を踏まえて、使用レベルにおける実質的な耐荷力判定が可能となる上での有効な手法として実応力測定（応力頻度測定）が提案されている¹⁾。

道内では、平成6年度よりTL-20未満で設計された既設橋梁の耐荷力判定（補修・補強の要否）を目的として、橋種構造別に橋梁の応力頻度測定（載荷試験）が行われている。

本論文は、現在までに実施された実橋応力頻度測定結果より得られた結果をとりまとめ、それ以外の既設橋の耐荷力判定に活用することを目的として報告を行うものである。

2. 対象橋梁の選定

対象橋梁は測定結果をできるだけ多数の既設橋に活用・反映させるため、耐荷力に関するキーワード（構造型式、設計荷重、予備判定結果）で表-1のように分類した。各グループの対象橋梁を表-2に示す。また、表-3に測定橋梁概要および「既設橋梁の耐荷力照査実施要領(案)」による照査結果を示す。

表-1 対象橋梁のキーワードによる分類

構造型式	設計荷重	予備判定
鋼鉄桁(多主桁)	TL-20	A
鋼鉄桁(2主桁)	TL-14	B
鋼合成桁(多主桁)	S-13	C
鋼合成桁(2主桁)		
鋼箱桁(多主桁)		
ゲルバー桁		
トラス、アーチ		

表-2 既設橋のグルーピングと対象橋梁-上段: TL-20
下段: TL-14, S-13

構造型式	予 備 判 定		
	A	B	C
鋼鉄桁(多主桁)	①橋、②橋	④橋	⑬橋
鋼鉄桁(2主桁)		⑤橋、⑥橋	
鋼合成桁(多主桁)	③橋	⑦橋、⑧橋	⑭橋、⑮橋
鋼合成桁(2主桁)			
鋼箱桁(2主桁)		⑫橋	
ゲルバー桁		⑨橋、⑩橋	⑪橋、⑫橋
トラス、アーチ(2主桁)	⑬橋、⑭橋		

The Ultimate Strength of Bridges based on the Measurements of stress frequency in the fields
by Ryoichi SATO, Kimio GOTO, Yasuhiro SASAKI and Masashi SATO

表-3 測定橋梁概要および耐荷力照査結果一覧

	①橋	②橋	③橋	④橋	⑤橋	⑥橋	⑦橋	⑧橋	⑨橋	⑩橋	⑪橋	⑫橋	⑬橋	⑭橋	⑮橋	⑯橋	⑰橋	⑱橋
架設年	S44	S45	S39	S46	S36	S42	S36	S43	S31	S37	S34	S50	S33	S39	S38	S32	S32	S31
適用示方書	S31	S39	S31	S39	S31	S31	S31	S31	S31	S31	S31	S39	S31	S31	S38	S31	S31	S14
設計活荷重	L-20	L-20	L-20	L-20	L-20	L-20	L-20	L-20	L-20	L-20	L-20	L-20	L-20	L-14	L-14	L-14	L-14	S-14
大型車交通量	2,983	625	510	5,784	1,082	748	1,802	1,435	743	1,955	674	1,277	1,667	348	793	576	776	1,031
上部形式	連続	連続	単純鋼	連続	単純	連続	単純鋼	単純鋼	ゲルマ-ゲルマ	ゲルマ-ゲルマ	連続	単純鋼	単純鋼	ゲルマ-ゲルマ	ランガートラス			
測定支間	鋼鉄桁	鋼鉄桁	合成桁	鋼鉄桁	鋼鉄桁	合成桁	合成桁	合成桁	鋼鉄桁	鋼鉄桁	鋼鉄桁	鋼鉄桁	鋼鉄桁	合成桁	合成桁	鋼鉄桁	100.00	50.00
車道有効幅員	40.20	41.68	31.30	33.00	32.92	39.60	22.60	23.70	24.00	25.40	21.50	22.40	21.40	30.00	33.15	13.00	100.00	50.00
車道有効幅員	8.0	7.0	7.0	7.0	6.5	6.0	7.0	6.5	6.0	7.3	5.5	8.0	6.0	6.0	6.0	5.5	6.0	6.0
車道幅員	6.5	6.0	6.5	6.5	6.0	5.5	6.5	5.5	5.5	6.0	5.5	6.5	6.0	5.5	5.5	3.3	5.5	5.5
舗道幅員	2.5	1.5			1.5						2.0							
主桁間隔	2.8	3.4	2.8	3.4	4.8	3.6	2.8	2.6	4.8	3.3	4.3	4.7	1.7	2.4	2.5	4.8	7.3	7.0
主桁本数	4	3	3	3	2	2	3	3	2	3	2	2	4	3	3	2	2	2
耐荷力照査結果																		
α	1.31	1.31	1.32	1.32	1.32	1.31	1.31	1.32	1.32	1.32	1.32	1.31	1.86	1.89	1.89	1.86	1.20	1.35
β	1.46	1.45	1.49	1.48	1.48	1.46	1.49	1.48	1.49	1.49	1.48	1.48	2.12	2.13	2.12	1.90	1.28	1.38
K	1.415	1.281	1.302	1.250	1.081	1.037	1.302	1.210	1.041	1.260	1.042	1.150	1.158	1.112	1.107	1.277	1.044	1.044
$S\alpha$	1.051	1.058	1.133	1.029	1.136	1.049	1.093	1.099	1.100	1.107	1.088	1.004	1.087	1.130	1.136	1.024	1.210	1.180
$S\beta$	1.130	1.131	1.104	1.109	1.109	1.128	1.063	1.069	1.070	1.077	1.058	1.061	1.057	1.100	1.109	1.015	1.210	1.150
$\alpha/S\alpha K$	0.881	0.966	0.898	1.026	1.075	1.207	0.920	0.992	1.153	0.946	1.156	1.135	1.478	1.504	1.503	1.422	0.950	1.096
$\beta/S\beta K$	0.913	0.999	1.033	1.068	1.234	1.248	1.076	1.144	1.338	1.098	1.316	1.217	1.732	1.741	1.722	1.465	1.017	1.150
照査	○	○	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
W' α	0.909	0.958	0.890	1.008	0.965	1.107	0.918	0.952	1.033	0.925	1.069	1.099	1.219	1.164	1.151	1.284	0.864	0.934
W' β	0.898	0.934	0.970	0.982	1.063	1.085	1.019	1.053	1.160	1.021	1.211	1.101	1.407	1.325	1.722	1.324	0.884	0.982
予備判定	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	C	B	C	C	C	C	A	A

3. 応力頻度測定の概要

測定は、「既設橋梁の耐荷力調査に関する実応力測定実施要領（暫定案）」²⁾に従い、静的載荷試験と応力頻度測定を行った。静的載荷試験は、あらかじめ重量の明らかな車輛等を荷重として用い桁等の応力を測るもので、床板・主桁や2次部材を含めた橋梁構造の健全度や耐荷力余裕を把握するものである。なお、静的載荷試験については既報告³⁾⁴⁾を参考にしてもらい、本文では省略する。

応力頻度測定は、一般交通供用下において活荷重により主桁等に発生する応力の繰返しを一定期間計測し、そのピーク値やふれ幅の分布として捉えようとするものである。つまり、その橋梁の交通特性や路面の凹凸による衝撃の影響、また橋梁の橋種によっては、設計上考慮しない荷重分配効果や合成効果をも含み、当該橋梁の使用レベルにおける実質的な耐荷力を判定することや安全性の評価を行うことを目的としている。

なお、この方法の特徴は通過交通に影響を与えることなく計測できることであり、載荷試験に伴う交通遮断の手続きや、そのための要因を一切必要としないことである。

以下に、1橋梁を例に挙げ、計測位置、計測システム、測定方法、測定結果の順に述べる。

(1) 計測位置

主桁の応力頻度の計測位置は、図-1に示すように曲げ応力度に関しては支間中央付近の上下フランジとし、せん断応力度については支点近傍の中立軸付近とした。

(2) 計測システム

図-2に応力頻度測定の計測システムを示す。なお、ストレーンゲージは応力頻度測点に関しては4ゲージ法(アクティブゲージ法)を採用した。これは歪み測定の精度を向上させること、ストレーンゲージの温度補償を行い誤差を減少させること等を目的とした。また、リード線は4心シールド付キャパシタケーブルを使用し、ノイズ影響の除去に努めた。

(3) 測定方法

応力頻度測定は、桁等のある測点に着目したときの車輛交通による応力波形を計測し、橋梁部材にど

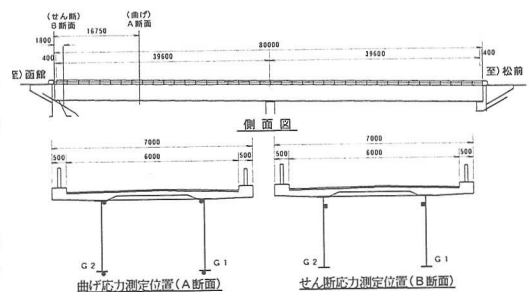


図-1 計測位置図(⑥橋)

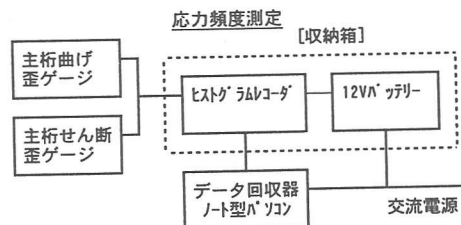


図-2 計測システム

れくらいの応力が何回加わったかを、応力の大きさ別にカウント（頻度）するものである。

ランダムな応力波形を正弦波の頻度に置き換える分析方法は種々あるが、本調査では橋梁部材の最大応力に着目しているの、ピーク法（正極大値、負極小値法）によりデータ収集を行った。また、測定期間は1日間（24時間）とし、重車輛混入率が高いと云われる月曜日または金曜日に行った。

(4)測定結果

応力頻度測定結果例として図-3に2主桁連続鋼板橋である⑥橋の応力-頻度図を示す。同図にはA断面G1, G2主桁の上、下フランジ応力-頻度およびB断面のG1, G2主桁腹板のせん断応力-頻度分布を示す。

A断面の主桁下フランジ応力頻度分布に着目すると、G2桁はG1桁に較べ頻度のピーク値付近はなだらかな分布形状を示す。また、主桁のピーク値応力はG2桁がG1桁を150kgf/cm²上回った。この原因を推察すると、応力頻度測定は8月下旬の晴天日に実施され、G2桁側が日中の直射日光を受けやすい南側に面していたため、温度変化による影響を受けたものと考えられる。

(5)耐荷力の判定

同橋の新活荷重に対する耐荷力の判定に当たっては「既設橋梁の耐荷力調査に関わる実応力測定実施要領(案)」に準拠した。判定式を下記に示す。

$$\sigma = \sigma_d + \sigma_{max} \times \alpha < \sigma_a \quad \cdots (1)$$

$$\tau = \tau_d + \tau_{max} \times \beta < \tau_a \quad \cdots (2)$$

ここで、

- σ_d ; 設計死荷重曲げ応力度
- σ_{max} ; 応力頻度測定による実測活荷重曲げ応力度の最大値
- σ_a ; 鋼材の許容曲げ応力度
- α ; B活荷重とTL-20との曲げモーメント比
- τ_d ; 設計死荷重せん断応力度
- τ_{max} ; 応力頻度測定による実測活荷重せん断応力度の最大値
- τ_a ; 鋼材の許容せん断応力度
- β ; B活荷重とTL-20とのせん断力比

表-4に上記の計算結果を示す。この結果によると、A断面の曲げ応力度は許容応力度の50%~75%、B断面のせん断応力度は42%~45%となり、同橋の主桁は新活荷重に対し実際の使用レベルでは耐荷力を有していると考えられる。

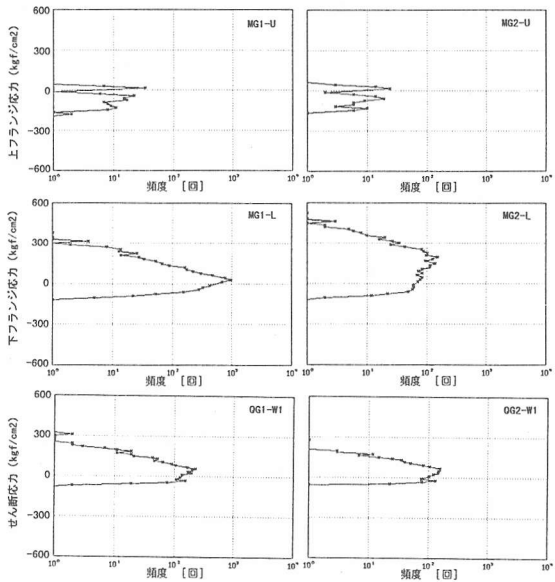


図-3 応力-頻度図 (⑥橋)

表-4 耐荷力の判定一覧 (⑥橋) 単位: kgf/cm²

着 目 点			σ_d	σ_{max}	α	σ	σ_a	σ/σ_a	判定
A断面	G 1 桁	U-Flg	-677	-180	1.32	-915	-1800	51%	0. K
		L-Flg	720	525	1.32	1215	1900	64%	0. K
	G 2 桁	U-Flg	-677	-165	1.32	-895	-1800	50%	0. K
		L-Flg	720	525	1.32	1413	1900	74%	0. K
着 目 点			τ_d	τ_{max}	β	τ	τ_a	τ/τ_a	判定
B断面	G 1 桁	Web	132	156	1.48	363	800	46%	0. K
	G 2 桁	Web	132	139	1.48	338	800	42%	0. K

4. 応力頻度測定結果および橋梁耐荷力に関する考察

1日(24時間)の応力頻度測定結果は、主桁下フランジ曲げ応力度に着目し表-5に示す。なお、同表では、式(1)の計算結果および実応力度と余裕応力度の比較 $\{\sigma_{\max}/(\sigma_d - \sigma_a)\}$ を示した。

各橋梁の構造型式毎の最大曲げ応力度 $\sigma_{\max}$ (橋梁毎の最大値)に着目すると、非合成桁である鋼鈑桁(多主桁)は300~388kg/cm²、鋼鈑桁(2主桁)が287~375kg/cm²の範囲にあり、同型式の多主桁と2主桁の差異はあまり認められない。鋼合成桁(多主桁)は350~460kg/cm²であり、多少鋼鈑桁を上回るようである。鋼箱桁は1例のみであるが250kg/cm²であり鈑桁橋を下回る。また、ゲルバ-を有する鋼鈑桁は280~333kg/cm²であり、他の鋼鈑桁より多少低い範囲にある。これは設計計算が簡易、またはリベット構造のためと推察される。

次に、架設年次毎の設計活荷重の違いによる実応力度 $\sigma_{\max}$ と許容応力度から死荷重応力度を除いた応力度 $(\sigma_a - \sigma_d)$ までの余裕を把握するため、図-4に架設年次と $\sigma_{\max}/(\sigma_a - \sigma_d)$ の関係を示す。今回の対象橋梁では、実応力度 $\sigma_{\max}$ が $(\sigma_a - \sigma_d)$ を超えている事例はない。TL-14の橋およびトラス橋上弦材で $(\sigma_a - \sigma_d)$ に近い応力度が発生している。また、同図から、TL-20およびTL-14の橋は昭和30年代後半を境に余裕応力度が増加する傾向が認められる。

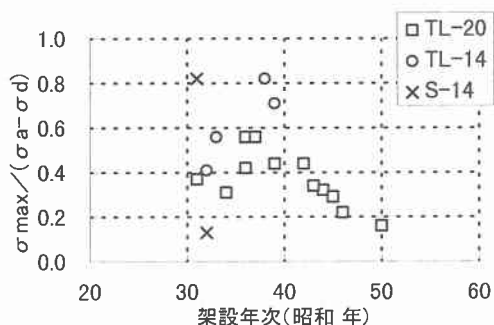


図-4 架設年次と $\sigma_{\max}/(\sigma_a - \sigma_d)$ の関係

B活荷重に対する耐荷力の判定として、式(1)による曲げ応力度と許容応力度との比 $\sigma_{\max}/\sigma_a$

は最大102%(TL-14、合成桁)、圧縮部材では104%(下路トラス橋、上弦材)であった。また、設計活荷重および構造型式により比較すると、概ね次のような傾向となる。

TL-20で設計された鋼鈑桁(多主桁)の σ/σ_a は40~70%、2主桁は70~80%、合成桁(多主桁)は70~80%、ゲルバ-を有する鋼鈑桁は50~60%(但し、歩道増設時の床板打換による影響を受けた⑩橋は60~95%)である。

TL-14で設計された鋼鈑桁(多主桁)は80~90%、合成桁(多主桁)は90~100%程度である。

S-14で設計されたトラス、アーチは測定例が少なく部材により異なるが、30~100%程度である。

5. まとめ

本文は、フィールド応力頻度測定による既設橋梁の耐荷力判定について一例を示した。

その結果、特にTL-14で設計された合成桁は新活荷重に対し余裕の少ないことが推測される。また、応力度に余裕があるとされるリベット橋においても歩道増設による床板打換橋梁などで余裕量が少ない例等があることから、注意を要するものと考えられる。

なお、今回の応力頻度測定は、部材の最大応力度に着目しておりピーク法によるデータ収集および検討を行ったものであるが、さらに詳細調査を要する橋梁等の主桁や2次部材の応力頻度測定は疲労による検討を行う必要があると考えられる。その場合は、応力の振れ幅を測定するインフロ-法等の疲労寿命予測が必要と考えられる。今後の交通量や重車輛交通量の増大に対する課題としては、この種の調査方法の確立等が必要と考えられ、機会を見だし現場実測を試みていきたいと考えている。

表-5 応力頻度測定結果(曲げ応力度)

橋 種		① 死荷重 σ_d	② 活荷重 σ_L	③ 許容応力 σ_a	③' $(\sigma_a - \sigma_d)$	④ 応力頻度 σ_{max}	④' $(\sigma_a - \sigma_d)$	⑤ α	⑥ $\alpha \times \sigma_{max}$	⑦ $\sigma = \sigma_d + \alpha \times \sigma_{max}$	⑧ σ / σ_a	⑨ σ_{max} / σ_d
①橋	G2	906	665	2,100	1,194	325	0.27	1.31	426	1,332	0.63	0.49
TL-20 A	G3	933	732	2,100	1,167	375	0.32	1.31	491	1,424	0.68	0.51
連続鋼鈑桁												
②橋	G1	907	928	2,100	1,193	300	0.25	1.31	393	1,300	0.62	0.32
TL-20 A	G2	996	861	2,100	1,104	325	0.29	1.31	426	1,422	0.68	0.38
連続鋼鈑桁	G3	975	864	2,100	1,125	275	0.24	1.31	360	1,335	0.64	0.32
③橋	G1	1,091	928	2,100	1,009	440	0.44	1.32	581	1,672	0.80	0.47
TL-20 B	G2	1,097	771	2,100	1,003	460	0.46	1.32	607	1,704	0.81	0.60
単純鋼合成桁												
④橋	G1	362	1,307	2,100	1,738	375	0.22	1.32	495	857	0.41	0.29
TL-20 B	G2	461	979	2,100	1,639	388	0.24	1.32	512	973	0.46	0.40
連続鋼鈑桁												
⑤橋	G1	639	522	1,400	761	363	0.48	1.32	479	1,118	0.80	0.70
TL-20 B	G2	729	522	1,400	671	375	0.56	1.32	495	1,224	0.87	0.72
連続鋼鈑桁												
⑥橋	G1	720	970	1,900	1,180	375	0.32	1.32	495	1,215	0.64	0.39
TL-20 B	G2	720	970	1,900	1,180	525	0.44	1.32	693	1,413	0.74	0.54
連続鋼鈑桁												
⑦橋	G1	679	567	1,400	721	300	0.42	1.31	393	1,072	0.77	0.53
TL-20 B	G2	655	522	1,400	745	238	0.32	1.31	312	967	0.69	0.46
単純鋼合成桁	G3	679	567	1,400	721	263	0.36	1.31	345	1,024	0.73	0.46
⑧橋	G1	931	832	2,100	1,169	400	0.34	1.32	528	1,459	0.69	0.48
TL-20 B	G2	881	1,050	2,100	1,219	413	0.34	1.32	545	1,426	0.68	0.39
単純鋼合成桁												
⑨橋	G1	349	670	1,400	1,051	388	0.37	1.32	512	861	0.62	0.58
TL-20 B	G2	349	670	1,400	1,051	263	0.25	1.32	347	696	0.50	0.39
ゲルハ-鋼鈑桁												
⑩橋	G1	902	571	1,400	498	280	0.56	1.32	370	1,272	0.91	0.49
TL-20 B	G2	592	867	1,400	808	180	0.22	1.32	238	830	0.59	0.21
ゲルハ-鋼鈑桁	G3	1,009	369	1,400	391	240	0.61	1.32	317	1,326	0.95	0.65
⑪橋	G1	386	845	1,300	914	285	0.31	1.32	376	762	0.59	0.34
TL-20 B	G2	386	845	1,300	914	270	0.30	1.32	356	742	0.57	0.32
ゲルハ-鋼鈑桁												
⑫橋	G1	394	664	1,942	1,548	225	0.15	1.31	295	689	0.35	0.34
TL-20 B	G2	403	712	1,949	1,546	250	0.16	1.31	328	731	0.38	0.35
連続鋼箱桁												
⑬橋	G1	688	580	1,400	712	375	0.53	1.30	488	1,176	0.84	0.45
TL-14 C	G2	709	685	1,400	691	388	0.56	1.30	504	1,213	0.87	0.40
単純鋼鈑桁												
⑭橋	G1	889	491	1,400	511	363	0.71	1.33	483	1,372	0.98	0.52
TL-14 C	G2	838	462	1,400	562	300	0.53	1.33	399	1,237	0.88	0.45
単純鋼合成桁	G3	889	491	1,400	511	275	0.54	1.33	366	1,255	0.90	0.39
⑮橋	G1	971	493	1,400	429	350	0.82	1.32	462	1,433	1.02	0.71
TL-14 C	G2	793	649	1,400	607	313	0.52	1.32	413	1,206	0.86	0.48
単純鋼合成桁												
⑯橋	G1	598	536	1,400	802	250	0.31	1.30	325	1,063	0.76	0.47
TL-14 C	G2	577	536	1,400	823	338	0.41	1.30	439	1,206	0.86	0.63
ゲルハ-鋼鈑桁												
⑰橋	補剛桁	329		1,400	1,071	113	0.11	1.20	136	465	0.33	
S-13	上弦材	-704		-1,269	-565	-75	0.13	1.24	-93	-797	0.63	
アーチ	吊材	203		1,400	1,197	113	0.09	1.24	140	343	0.25	
⑱橋	上弦材	-743	-428	-1,215	-472	-387	0.82	1.35	-522	-1,265	1.04	0.90
S-13	下弦材	992	573	1,400	408	250	0.61	1.35	338	1,330	0.95	0.44
トラス	斜材	-76	-241	-803	-727	-263	0.36	1.38	-363	-439	0.55	1.09
	垂直材	379	414	1,400	1,021	388	0.38	1.38	535	914	0.65	0.87

α : B活荷重とTL-20の曲げモーメント比(MB/ML20)
 曲げモーメント比 α は20t車走行と考えたTL-20の α

参考文献

- 1) 建設省土木研究所：既設橋梁の耐荷力照査実施要領(案), 1993
- 2) 北海道開発局：既設橋梁の耐荷力調査に関わる実応力測定実施要領（暫定案）, 1994. 6
- 3) 竹本邦仁、他：既設橋の載荷試験による耐荷力判定に関する考察、土木学会北海道支部論文集、第52号(A)、1996. 2
- 4) 谷本俊充、他：橋梁2次部材の実応力測定とその考察、土木学会北海道支部論文集、第52号(A)、1996. 2
- 5) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説, 1994. 2