橋梁たわみの簡易照査方法に関する一考察

岐阜大学　正会員　木下　幸治
株式会社 TTES　正会員　○比山　義郎，石塚　敬之

１．はじめに

地方から顕在化してきた人口減少の現実の中、地方インフラの維持管理が問題になってきている。中小橋梁の性能指標として、筆者らは直感的に理解がしやすいたわみに注目してきた(参考文献[1)2)])。近年、加速度計、映像処理技術、数値処理などの技術の発達に伴い精度の高い活荷重たわみの算出が可能になってきた。活荷重たわみの計測値を使用限界値で簡易に照査する方法について検討する。

２．たわみの許容値

平成29年道路橋示方書において耐荷力性能としてのたわみ制限の記載はない。鋼橋に限っては使用限界を想定した**図 1** に示すような許容値が示されている。橋梁の設計時には、T 荷重もしくは L 荷重(A/B 活荷重)でたわみの照査が行われているものの、計測時の状況は載荷車両の単一載荷である。たわみの許容値を参照するうえで、荷重条件が異なる。そこで、たわみは支間中央の曲げモーメントに比例すると仮定することで、載荷車両載荷時と設計活荷重載荷時との曲げモーメントの比率を算出し、たわみ許容値を照査することを考えた。

１）　　載荷車両

本稿では、たわみ計測試験に利用する車両の総重量を 80kN と仮定する。軸間距離は車両により様々であるが、ここでは 80kN の集中荷重と仮定する。各支間長・幅員あたりに発生する橋軸直角方向の全幅当たり及び単位幅当たりの最大曲げモーメント M_{80} を**表 1** に示す。載荷車両の数は幅員に関わらず 1 台である。

２）設計活荷重

①T 荷重

T 荷重は橋軸方向に 1 組、橋軸直角方向に組数は制限が無いとして支間中央に載荷する。単位幅当たりの最大曲げモーメント M_{TL} を**表 2** に示す。幅員方向には 2.75m 毎に組数が増加している。

橋の形式 ＼ 桁の形式			単純桁及び連続桁	ゲルバー桁の片持部
鋼桁形式	コンクリート系床版を有する鋼桁	$L \leqq 10$	$L/2{,}000$	$L/1{,}200$
		$10 < L \leqq 40$	$\dfrac{L}{20{,}000/L}$	$\dfrac{L}{12{,}000/L}$
		$40 < L$	$L/500$	$L/300$
	その他の床版を有する鋼桁		$L/500$	$L/300$

図 1　鋼橋のたわみの許容値

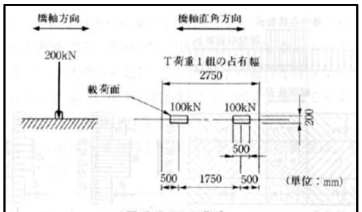

図-2.2.1　T 荷重

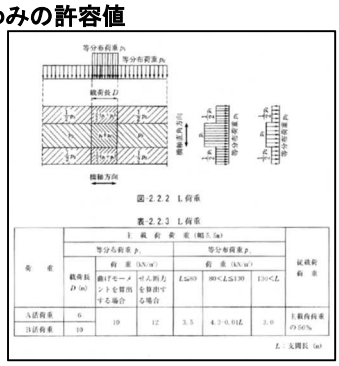

図-2.2.2　L 荷重

表-2.2.3　L 荷重

図 2　設計活荷重

表 1　載荷車両(80kN)による発生最大曲げモーメント(M_{80})

		支間 (m)												
		6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	22.0	24.0	26.0	28.0	30.0
有効幅員 B (m)	3.0	120	160	200	240	280	320	360	400	440	480	520	560	600
	M/m	40.0	53.3	66.7	80.0	93.3	106.7	120.0	133.3	146.7	160.0	173.3	186.7	200.0
	4.0	120	160	200	240	280	320	360	400	440	480	520	560	600
	M/m	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0	130.0	140.0	150.0
	5.0	120	160	200	240	280	320	360	400	440	480	520	560	600
	M/m	24.0	32.0	40.0	48.0	56.0	64.0	72.0	80.0	88.0	96.0	104.0	112.0	120
	6.0	120	160	200	240	280	320	360	400	440	480	520	560	600
	M/m	20.0	26.7	33.3	40.0	46.7	53.3	60.0	66.7	73.3	80.0	86.7	93.3	100.0
	7.0	120	160	200	240	280	320	360	400	440	480	520	560	600
	M/m	17.1	22.9	28.6	34.3	40.0	45.7	51.4	57.1	62.9	68.6	74.3	80.0	85.7
	8.0	120	160	200	240	280	320	360	400	440	480	520	560	600
	M/m	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0	70.0	75.0
	9.0	120	160	200	240	280	320	360	400	440	480	520	560	600
	M/m	13.3	17.8	22.2	26.7	31.1	35.6	40.0	44.4	48.9	53.3	57.8	62.2	66.7
	10.0	120	160	200	240	280	320	360	400	440	480	520	560	600
	M/m	12.0	16.0	20.0	24.0	28.0	32.0	36.0	40.0	44.0	48.0	52.0	56.0	60.0

表 2　T 荷重による発生最大曲げモーメント(M_{TL})

		支間 (m)												
		6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	22.0	24.0	26.0	28.0	30.0
有効幅員 B (m)	3.0	300	400	500	600	700	800	900	1,000	1,100	1,200	1,300	1,400	1,500
	M/m	100.0	133.3	166.7	200.0	233.3	266.7	300.0	333.3	366.7	400.0	433.3	466.7	500.0
	4.0	300	400	500	600	700	800	900	1,000	1,100	1,200	1,300	1,400	1,500
	M/m	75.0	100.0	125.0	150.0	175.0	200.0	225.0	250.0	275.0	300.0	325.0	350.0	375.0
	5.0	300	400	500	600	700	800	900	1,000	1,100	1,200	1,300	1,400	1,500
	M/m	60.0	80.0	100.0	120.0	140.0	160.0	180.0	200.0	220.0	240.0	260.0	280.0	300
	6.0	600	800	1,000	1,200	1,400	1,600	1,800	2,000	2,200	2,400	2,600	2,800	3,000
	M/m	100.0	133.3	166.7	200.0	233.3	266.7	300.0	333.3	366.7	400.0	433.3	466.7	500.0
	7.0	600	800	1,000	1,200	1,400	1,600	1,800	2,000	2,200	2,400	2,600	2,800	3,000
	M/m	85.7	114.3	142.9	171.4	200.0	228.6	257.1	285.7	314.3	342.9	371.4	400.0	428.6
	8.0	600	800	1,000	1,200	1,400	1,600	1,800	2,000	2,200	2,400	2,600	2,800	3,000
	M/m	75.0	100.0	125.0	150.0	175.0	200.0	225.0	250.0	275.0	300.0	325.0	350.0	375.0
	9.0	750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000	3,250	3,500	3,750
	M/m	83.3	111.1	138.9	166.7	194.4	222.2	250.0	277.8	305.6	333.3	361.1	388.9	416.7
	10.0	750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000	3,250	3,500	3,750
	M/m	75.0	100.0	125.0	150.0	175.0	200.0	225.0	250.0	275.0	300.0	325.0	350.0	375.0

表 3　A 活荷重による発生最大曲げモーメント(M_{AL})

		支間 (m)												
		6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	22.0	24.0	26.0	28.0	30.0
有効幅員 B (m)	3.0	182	309	446	594	752	921	1,100	1,290	1,490	1,701	1,922	2,154	2,396
	M/m	60.8	103.0	148.8	198.0	250.8	307.0	366.8	430.0	496.8	567.0	640.8	718.0	798.8
	4.0	243	412	595	792	1,003	1,228	1,467	1,720	1,987	2,268	2,563	2,872	3,195
	M/m	60.8	103.0	148.8	198.0	250.8	307.0	366.8	430.0	496.8	567.0	640.8	718.0	798.8
	5.0	304	515	744	990	1,254	1,535	1,834	2,150	2,484	2,835	3,204	3,590	3,994
	M/m	60.8	103.0	148.8	198.0	250.8	307.0	366.8	430.0	496.8	567.0	640.8	718.0	799
	6.0	349	592	855	1,139	1,442	1,765	2,109	2,473	2,856	3,260	3,684	4,129	4,593
	M/m	58.2	98.7	142.6	189.8	240.3	294.2	351.5	412.1	476.1	543.4	614.1	688.1	765.5
	7.0	380	644	930	1,238	1,567	1,919	2,292	2,688	3,105	3,544	4,005	4,488	4,992
	M/m	54.2	92.0	132.8	176.8	223.9	274.1	327.5	383.9	443.5	506.3	572.1	641.1	713.2
	8.0	410	695	1,004	1,337	1,693	2,072	2,476	2,903	3,353	3,827	4,325	4,847	5,392
	M/m	51.3	86.9	125.5	167.1	211.6	259.0	309.4	362.8	419.1	478.4	540.6	605.8	673.9
	9.0	440	747	1,078	1,436	1,818	2,226	2,659	3,118	3,601	4,111	4,645	5,206	5,791
	M/m	48.9	83.0	119.8	159.5	202.0	247.3	295.4	346.4	400.2	456.8	516.2	578.4	643.4
	10.0	471	798	1,153	1,535	1,943	2,379	2,842	3,333	3,850	4,394	4,966	5,565	6,190
	M/m	47.7	81.0	117.1	156.0	197.8	242.5	290.0	340.4	393.6	449.7	508.6	570.4	635.1

表 4　設計活荷重載荷時の最大曲げモーメント(赤字は M_{TL}>M_{AL})

		支間 (m)												
		6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	22.0	24.0	26.0	28.0	30.0
有効幅員 B (m)	3.0	300	400	500	600	752	921	1,100	1,290	1,490	1,701	1,922	2,154	2,396
	M/m	100	133	167	200	251	307	367	430	497	567	641	718	799
	4.0	300	412	595	792	1,003	1,228	1,467	1,720	1,987	2,268	2,563	2,872	3,195
	M/m	75	103	149	198	251	307	367	430	497	567	641	718	799
	5.0	304	515	744	990	1,254	1,535	1,834	2,150	2,484	2,835	3,204	3,590	3,994
	M/m	61	103	149	198	251	307	367	430	497	567	641	718	799
	6.0	600	800	1,000	1,200	1,442	1,765	2,109	2,473	2,856	3,260	3,684	4,129	4,593
	M/m	100	133	167	200	240	294	351	412	476	543	614	688	765
	7.0	600	800	1,000	1,238	1,567	1,919	2,292	2,688	3,105	3,544	4,005	4,488	4,992
	M/m	86	114	143	177	224	274	327	384	444	506	572	641	713
	8.0	600	800	1,004	1,337	1,693	2,072	2,476	2,903	3,353	3,827	4,325	4,847	5,392
	M/m	75	100	126	167	212	259	309	363	419	478	541	606	674
	9.0	750	1,000	1,250	1,500	1,818	2,226	2,659	3,118	3,601	4,111	4,645	5,206	5,791
	M/m	83	111	139	167	202	247	295	346	400	457	516	578	643
	10.0	750	1,000	1,250	1,535	1,943	2,379	2,842	3,333	3,850	4,394	4,966	5,565	6,190
	M/m	75	100	125	156	198	242	290	340	394	450	509	570	635

キーワード　たわみ，絶対評価，トリアージ，許容値
連絡先　　〒153-0051　東京都目黒区上目黒 3-30-8　(株)ＴＴＥＳ　TEL:03-5724-4011

© Japan Society of Civil Engineers

②A 活荷重
中小橋梁を想定して A 活荷重を載荷する。最大曲げモーメント M_{AL} を**表 3** に示す。
③設計活荷重
上記計算の①②計算結果で、設計活荷重載荷時の最大曲げモーメント M_L を**表 4** に示す。支間長が短い場合には T 荷重が有効であることがわかる。
3）補正したたわみ許容値
載荷車両による曲げモーメントと設計活荷重載荷時の最大曲げモーメントの比(M_{80}/M_L)を用いて、たわみ許容値を補正した値が**表 5** である。

3．たわみ許容値の照査

地方自治体の管理する鋼橋の活荷重たわみを計測した結果について、提案する許容値を参照にして照査を試行した。たわみの計測に当たっては、作業者非依存で簡易にたわみの計測が可能な TTES 社の Integral AC(旧 TWM システム)を活用した。簡易に効率的なたわみ計測の実現のため、橋面上に計器を設置したうえで 80kN の載荷車両を通過させて、たわみ計測を行った。計器は支間中央部の両側に設置しており、載荷車両の通過位置に応じた最大のたわみを計測している。

たわみ計測した結果を、対象とした 9 つの鋼橋 A~I について諸元等と合わせて**表 6** に示す。支間長は 15～20m 程度、幅員は 3.5m～8.4m と同程度の橋梁であるが、幅員には幅がある橋梁群である。それぞれに支間長から算出される使用限界上のたわみ許容値、および提案手法による補正したたわみの許容値を示す。

道路橋示方書の許容値に対し、支間長・幅員の影響によるものの補正許容値は 1/3～1/8 程度である。補正許容値は、実測値と同じオーダーであった。

実測値(δ)と許容値(δa)の比率を**図 3** に示す。橋梁 C においては補正たわみ比では 1 を超えることが確認された。計測時においても作業員から「揺れる」との報告を受けており、現場感覚が反映される結果であった。なお、本補正は安全側の簡易照査であり、詳細な検討を行ったところ、許容値以下になることが確認された。しかしながら、維持管理の優先順位が高い橋梁であることに違いはない。

また、例示したたわみ比は、1 に近いほど優先順位が高くなる指標である。橋梁 G,H を比較すると、補正前後においてたわみ比が逆転していた。支間長は同じ 19m であり、幅員の違いが設計活荷重の大きさに影響した結果と考えられる。

表 5 補正たわみ許容値(80kN 載荷車両の場合)

		支間 (m)												
		6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
有効幅員 B (m)	3.0	1.20	1.60	2.00	2.88	3.85	4.45	5.30	6.20	7.15	8.13	9.14	10.19	11.27
	3.5	1.20	1.60	1.92	2.49	3.13	3.81	4.54	5.32	6.12	6.97	7.84	8.74	9.66
	4.0	1.20	1.55	1.68	2.18	2.74	3.34	3.98	4.65	5.36	6.10	6.86	7.64	8.45
	4.5	1.20	1.38	1.49	1.94	2.43	2.96	3.53	4.13	4.76	5.42	6.10	6.79	7.51
	5.0	1.19	1.24	1.34	1.75	2.19	2.67	3.18	3.72	4.29	4.88	5.49	6.11	6.76
	5.5	0.60	0.80	1.00	1.44	1.96	2.43	2.89	3.38	3.90	4.43	4.99	5.56	6.15
	6.0	0.60	0.80	1.00	1.44	1.90	2.32	2.77	3.24	3.73	4.24	4.77	5.32	5.88
	6.5	0.60	0.80	1.00	1.44	1.82	2.22	2.65	3.10	3.57	4.06	4.57	5.10	5.63
	7.0	0.60	0.80	1.00	1.40	1.75	2.13	2.54	2.98	3.43	3.90	4.39	4.89	5.41
	7.5	0.60	0.80	1.00	1.34	1.68	2.05	2.45	2.86	3.30	3.75	4.22	4.70	5.20
	8.0	0.60	0.80	1.00	1.29	1.62	1.98	2.36	2.76	3.18	3.61	4.06	4.53	5.01
	8.5	0.48	0.64	0.80	1.15	1.56	1.91	2.27	2.66	3.06	3.48	3.92	4.37	4.83
	9.0	0.48	0.64	0.80	1.15	1.51	1.84	2.19	2.57	2.96	3.36	3.78	4.22	4.66
	9.5	0.48	0.64	0.80	1.15	1.46	1.78	2.12	2.48	2.86	3.25	3.66	4.08	4.51
	10.0	0.48	0.64	0.80	1.13	1.41	1.72	2.05	2.40	2.77	3.15	3.54	3.95	4.36

表 6 橋梁諸元と実測値

No.	支間長 (m)	総幅員 (m)	道示たわみ許容値(mm)	道示たわみ補正許容値(mm)	80kN実測値 (mm)
鋼橋A	16.2	8.4	13.12	1.96	0.73
鋼橋B	19.2	5.0	18.43	3.50	1.42
鋼橋C	17.4	6.0	15.14	2.63	2.71
鋼橋D	17.4	4.0	15.14	3.78	1.80
鋼橋E	19.0	5.0	18.05	3.45	0.70
鋼橋F	19.0	6.3	18.05	2.95	1.28
鋼橋G	16.9	5.9	14.28	2.54	1.02
鋼橋H	18.5	3.5	17.11	4.73	1.58
鋼橋I	15.5	4.0	12.01	3.18	1.01

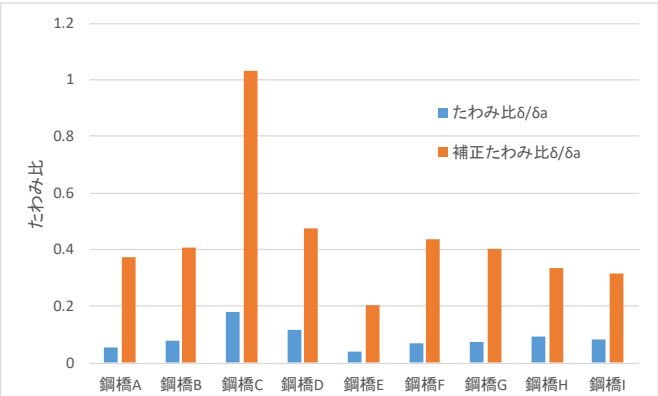

図 3 たわみ比の評価

4．まとめおよび今後の展望

橋梁の幅員を考慮したたわみの許容値の目安を提案することができた。たわみ計測の結果を簡易に評価することができる可能性が広がった。道路橋示方書に示されたたわみの許容値を参考に、鋼橋の維持管理対応の優先順位付けにたわみを活用できれば幸いである。

筆者らは本稿に示す絶対評価の他に、**図 4** に示す相対評価による優先順位付けにも積極的である。橋梁毎のたわみ相対評価時に、幅員方向の剛性を考慮することが困難であったが、今回の評価手法を元に、評価軸を定めていくことを目指す。

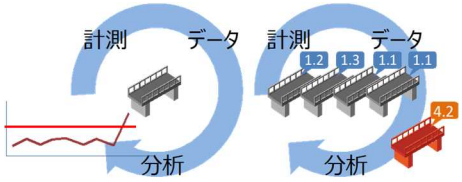

図 4 絶対評価と相対評価

参 考 文 献

1) Infra Studio: http://infra-studio.com/
2) 梅川ら:"車両通行に伴う加速度データを用いた橋梁の変位モニタリングに関する検討", 第 72 回土木学会年次学術講演会
3) 比山ら:"TWM システムを用いた橋梁のたわみ計測"土木学会西武支部沖縄会,第7回技術研究発表会,2018.

© Japan Society of Civil Engineers