

連続合成桁橋（立山橋）の載荷試験について

第 2 報

保田市兵衛・柳場重正・小堀為雄
吉田博・酒井雅夫*

Static and Dynamic Respons of the Composite Girder Bridge — Tateyama bridge —

by

Ichibee HODA, Shigemasa HASABA, TAMEO KOBORI

Hiroshi YOSHIDA and Masao SAKAI

This Tateyama bridge, crossed the Jōganji river in Toyama prefecture, was designed and constructed to act as a composite girder on the intermediate supports as well as elsewhere by canceling the tensile stress of concrete slab due to various vertical loads with the compressive prestress transferred by the lowering of the girder on the intermediate supports and tensioning of the steel bars arranged in the concrete slab near those supports.

In a previous paper, we described the measurement of the prestress transferred at the erection of this bridge.

In this paper, we report the results of measurement of static and dynamic response of the 2 and 3-span continuous composite girders in this bridge under a live load.

概 要

富山県常願寺川に架設せられた立山橋は、桁中間支点の降下および中間支点附近のコンクリートスラブ内に配置された鋼棒の緊張とによってコンクリートに圧縮応力を導入し、諸種の垂直荷重によって生ずる中間支点附近におけるコンクリートスラブの引張応力を消去して、それらの部分においても合成桁として作用するように設計、施工されたものである。

われわれは前報告において、この橋の架設時における導入応力の測定について報告したが、本文においては2径間および3径間連続合成桁について、活荷重による静的および動的応力の測定結果を報告する。

*富山県土木部技師

1. 緒 言

従来コンクリートスラブと鋼桁とからなる、いわゆるプレートガダー橋の応力計算ではコンクリートスラブの断面を無視して来たが、近年これらの2つの断面をジベルで接合してコンクリート断面を応力計算の有効断面に取り入れた合成桁橋として、経済的設計が行なわれるようになった。しかしこれを連続桁とした場合、中間支点付近では一般にはコンクリートスラブに引張応力が生ずるので、この部分のみ非合成とするか、または、この部分のコンクリートスラブにプレストレスを導入し、桁全体を合成桁として作用させるかの2つの方法が研究されている。本報告は富山県常願寺川に後者の設計法をとって設計架設された立山橋について静的および動的載荷試験を行った結果について測定値と設計値と比較検討し、この種の連続合成桁の設計施工に資せんとするものである。

なお、本橋は、全長 345.8m で、富山側から $2 \times 46\text{m}$ 、 $3 \times 46\text{m}$ そして $2 \times 46\text{m}$ の3連続合成桁と、23m の単純合成桁からなる活荷重合成桁橋で、このうち2径間および3径間連続合成桁について著者らは昭和37年度からその架設時における導入応力を測定し設計中の諸計算値と比較検討し、さらに導入応力により生ずるコンクリートスラブのクリープについて引き続き測定を行っている。その一部は前報告¹⁾で報告した。

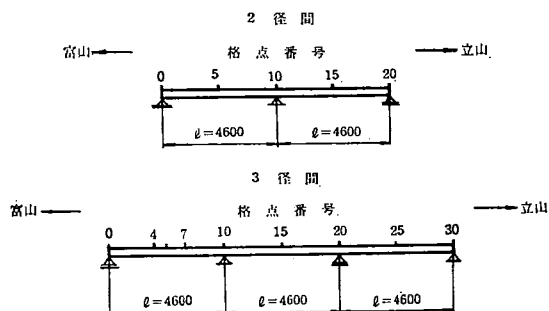
2. 載荷試験の概要

立山橋は連続活荷重合成桁であり、中間支点付近のコンクリートスラブに働く引張応力を消去して、中間支点付近においてもコンクリートスラブが合成桁として有効に働くよう支点沈下工法およびPC鋼棒によりコンクリートスラブにプレストレスを導入した特殊設計がなされている連続桁橋である。

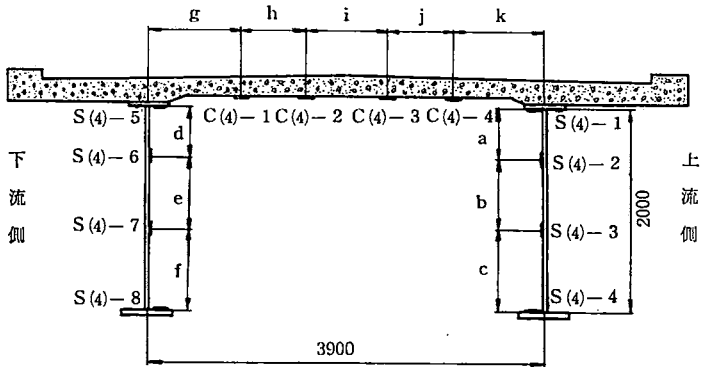
われわれは本橋架設後コンクリートスラブと鋼桁がはたして合成桁として完全に作用しているかどうか、また支点付近に導入したプレストレスが実際にどのように有効に作用しているか。さらにこのようにして設計された連続合成桁の動的性状を調べるために全径間のうち、富山側から第1および第2径間の2径間連続合成桁、および第3・第4および第5径間の3径間連続合成桁について静的載荷試験と走行荷重による動的載荷試験を行なった。2径間および3径間ともにおのおの載荷状態に対して生ずる各断面のひずみをワイヤストレーン・ゲージ（鋼桁に対し共和電業KK製KP-22、コンクリートに対して同じくKP-8）、ひずみ測定器（共和電業KK製静的SM-4J、動的DPM-8AT）およびオシログラフ（三栄測器KK製100A型）を使用して測定した。

測定断面は第1図に示すように、2径間連続合成桁では格点4、7、10、15の4断面、3径間連続合成桁では格点4、10、15の3断面でおのおの断面における測定点は第2図および第1表に示す。

載荷に使用した荷重は総重量14.750 tonの「ふそう」トラックおよび総重量15.340 tonの「いすゞ」トラックの2台を採用した。これらの荷重の諸元は第3図および第2表に示す。載荷状態は各測定断面について最大応力が生ずるように、2台を並列にして各断面上に荷重の後輪を載荷し、（ただし格点10は中間支点上であるので荷重は格点6に載荷したとき最大となる）まず、前輪を富山側に、つぎに反転して前輪を立山側に向けて各断面について2回計14回の載荷状態について測定した。



第1図 立山橋の概略図

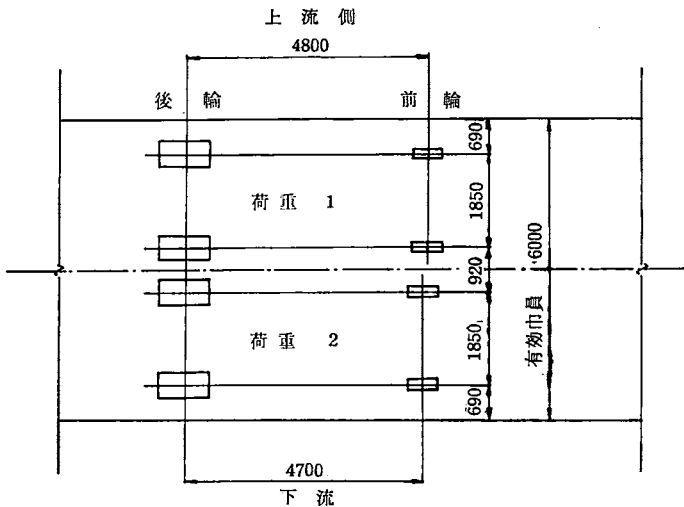


※ ゲージの番号は、SおよびCは鋼桁およびコンクリート
 スラブに接着されていることを示し、つぎの1番目の数は
 格点を、2番目の数はゲージの位置を示す

第2図 ゲージの配置図

第1表 各断面のゲージの位置

連続合成桁の種類	格点番号	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
2 径間	4	500	700	800	500	700	800	900	600	900	600	900
	7	500	1000	500	500	1000	500	875	600	950	600	875
	10	800	700	500	800	700	500	975	600	850	600	875
	15	500	700	800	500	700	800	975	600	750	600	975
3 径間	4	500	700	800	500	700	800	850	650	900	650	850
	10	500	700	800	500	700	800	900	650	800	650	900
	15	500	700	800	500	700	800	810	550	1,130	600	810



第3図 載荷荷重の配置

第2表 荷 重 の 重 量

	前輪荷重	後輪荷重	全重量	摘 要
荷重 1	2,914 kg	11,836 kg	14,750 kg	ふそうトラック
荷重 2	3,955 kg	11,385 kg	15,340 kg	いすゞトラック

つぎに動的試験は上記の総重量 15.340 ton 「いすゞ」トラックを走行速度 20km/hr で中員中央を走行させて、静的試験に用いた鋼桁の各断面に接着したワイヤストレイン・ゲージにより動ひずみを動的ひずみ測定器を通してオシログラフで記録した。

3. 静的載荷試験の結果とその検討

上記の載荷方法によって載荷した結果を前輪を立山側においた場合と富山側においた場合に別けて、おのおの2径間連続合成桁および3径間連続合成桁の各断面の最大ひずみを生ずる場合について設計値および測定値（いずれもひずみ）を示すと第3表および第4図に示すとうりとなる。図における上、下流桁における計算値の違いは第3図および第2表に示したように載荷荷重のトラックの軸距および総重量の違いによるもので、図中の実線は上流側桁、点線は下流側桁の計算値を示す。また、黒丸および白丸はそれぞれ上流側桁および下流側桁の測定値を示す。第3表にもみられるように測定値と計算値の比率はごく小さいもの、あるいはごく大きなものをのぞいて約70%~120%のうちにあり測定値と計算値とはかなり一致している。

第3表 測定値と計算値の比較

2径間連続合成桁のひずみ（前輪富山側）

	載荷格点	4		7		6		15	
		4		7		10		15	
	桁の種別	上流側	下流側	上流側	下流側	上流側	下流側	上流側	下流側
コンクリート	計算値($\times 10^{-6}$)	-13.5	-13.7	-9.7	-9.9	9.7	9.9	-13.3	-13.5
	測定値($\times 10^{-6}$)	-7	-6	-3	-3	4	5	-3	-5
	比率(%)	52	44	31	30	41	61	23	37
上フランジ	計算値($\times 10^{-6}$)	-10.6	-10.8	-7.6	-7.8	8.4	8.7	-10.5	-10.7
	測定値($\times 10^{-6}$)	-8	-13	-12	-10	1	0	-8	-9
	比率(%)	76	120	158	128	11.9	0	76	84
ウェブ(上)	計算値($\times 10^{-6}$)	17.9	18.2	12.9	13.1	-11.1	-11.4	17.7	18.0
	測定値($\times 10^{-6}$)	20	20	20	16	-1	5	20	19
	比率(%)	112	110	155	122	9	—	113	106
ウェブ(下)	計算値($\times 10^{-6}$)	57.9	58.9	53.9	54.9	-28.1	-28.9	57.1	58.1
	測定値($\times 10^{-6}$)	37	23	38	38	-16	-18	55	37
	比率(%)	64	39	71	69	57	62	96	64
下フランジ	計算値($\times 10^{-6}$)	103.5	105.3	74.4	75.8	-39.9	-41.0	102.1	103.9
	測定値($\times 10^{-6}$)	81	89	55	54	-25	-26	86	73
	比率(%)	78	85	74	71	63	63	84	70

2 経間連続合成桁のひずみ (前輪立山側)

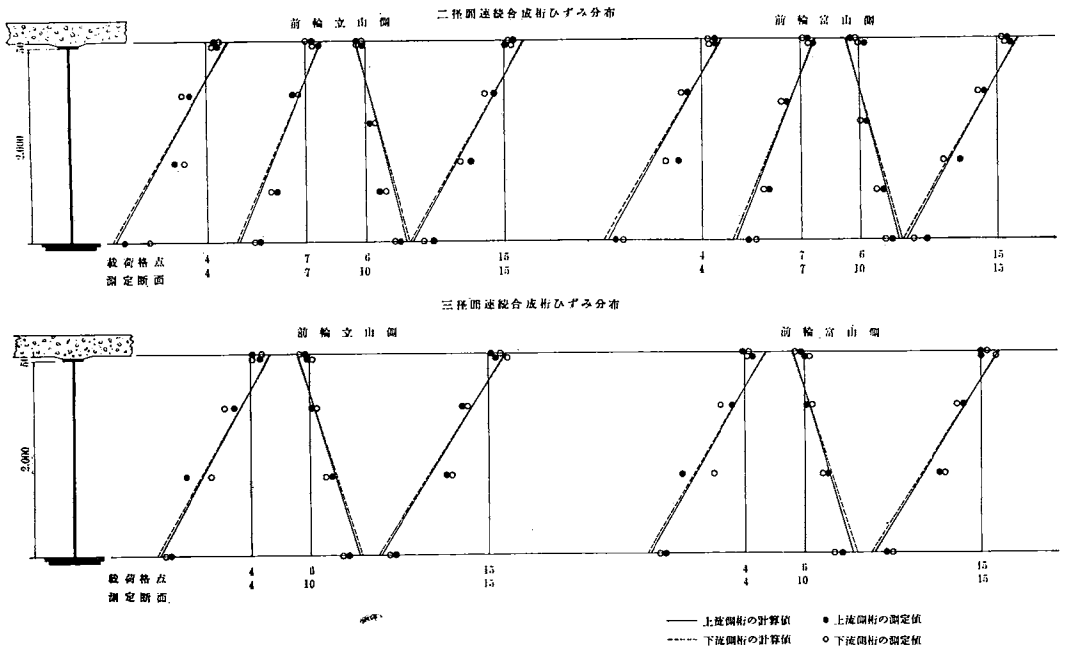
	載荷格点	4		7		6		15	
	測定格点	4		7		10		15	
	桁の種別	上流側	下流側	上流側	下流側	上流側	下流側	上流側	下流側
コンクリート	計算値($\times 10^{-6}$)	-13.6	-13.9	-9.3	-9.4	9.4	9.8	-13.4	-13.6
	測定値($\times 10^{-6}$)	-7	-8	-1	-4	4	6	-4	-7
	比率(%)	52	58	11	43	43	61	30	52
上フランジ	計算値($\times 10^{-6}$)	-10.7	-10.9	-7.4	-7.4	8.4	8.6	-10.5	-10.7
	測定値($\times 10^{-6}$)	-11	-8	-8	-13	9	8	-7	-9
	比率(%)	110	73	108	176	107	93	67	84
ウェブ(上)	計算値($\times 10^{-6}$)	18.1	18.5	12.4	12.6	-11.0	-11.2	17.8	18.1
	測定値($\times 10^{-6}$)	19	16	8	11	-9	-7	20	10
	比率(%)	95	87	65	87	82	63	112	55
ウェブ(下)	計算値($\times 10^{-6}$)	58.5	59.6	52.1	52.6	-27.8	-28.6	57.5	58.5
	測定値($\times 10^{-6}$)	34	24	30	35	-20	-17	46	34
	比率(%)	58	40	58	67	72	59	80	58
下フランジ	計算値($\times 10^{-6}$)	104.7	106.7	71.8	72.6	-39.9	-41.0	102.8	104.7
	測定値($\times 10^{-6}$)	85	59	47	48	-29	-32	81	76
	比率(%)	81	55	66	66	73	78	79	73

3 経間連続合成桁のひずみ (前輪富山側)

	載荷格点	4		6		15	
	測定格点	4		10		15	
	桁の種別	上流側	下流側	上流側	下流側	上流側	下流側
コンクリート	計算値($\times 10^{-6}$)	-17.8	-19.4	9.4	9.6	-17.4	-16.5
	測定値($\times 10^{-6}$)	2	-5	4	5	0	-5
	比率(%)	-	26	43	52	0	30
上フランジ	計算値($\times 10^{-6}$)	-15.1	-16.5	7.9	8.1	-13.1	-13.3
	測定値($\times 10^{-6}$)	-8	-4	0	-3	0	-17
	比率(%)	53	24	0	-	0	128
ウェブ(上)	計算値($\times 10^{-6}$)	11.8	12.0	-6.4	-6.6	17.9	18.2
	測定値($\times 10^{-6}$)	12	24	-3	-4	18	23
	比率(%)	102	200	37	61	101	126
ウェブ(下)	計算値($\times 10^{-6}$)	47.9	52.3	-26.5	-27.3	61.4	62.4
	測定値($\times 10^{-6}$)	64	32	-22	-24	43	40
	比率(%)	134	61	83	88	70	64
下フランジ	計算値($\times 10^{-6}$)	89.9	98.2	-49.0	-50.3	111.0	112.8
	測定値($\times 10^{-6}$)	81	84	-38	-31	91	98
	比率(%)	90	86	78	62	82	87

3 経間連続合成桁のひずみ（前輪立山側）

	載荷格点	4		6		15	
	測定格点	4		10		15	
	桁の種別	上流側	下流側	上流側	下流側	上流側	下流側
コンクリート	計算値(×10 ⁻⁶)	-18.8	-19.1	9.3	9.5	-17.4	-16.5
	測定値(×10 ⁻⁶)	-2	-6	4	4	+3	-7
	比率(%)	11	31	43	42	—	42
上フランジ	計算値(×10 ⁻⁶)	-16.0	-16.3	7.8	8.1	-13.1	-13.3
	測定値(×10 ⁻⁶)	-10	-2	3	2	-7	-19
	比率(%)	63	12	38	25	53	143
ウェーブ(上)	計算値(×10 ⁻⁶)	11.8	12.0	-6.4	-6.6	17.9	18.2
	測定値(×10 ⁻⁶)	16	26	-2	-1	26	26
	比率(%)	136	217	31	15	145	143
ウェーブ(下)	計算値(×10 ⁻⁶)	50.8	51.5	-26.5	-27.3	61.4	62.4
	測定値(×10 ⁻⁶)	65	40	-22	-20	43	42
	比率(%)	128	78	83	73	70	67
下フランジ	計算値(×10 ⁻⁶)	95.3	96.6	-49.0	-50.3	111.0	112.8
	測定値(×10 ⁻⁶)	81	83	-38	-32	95	99
	比率(%)	85	86	78	64	86	88



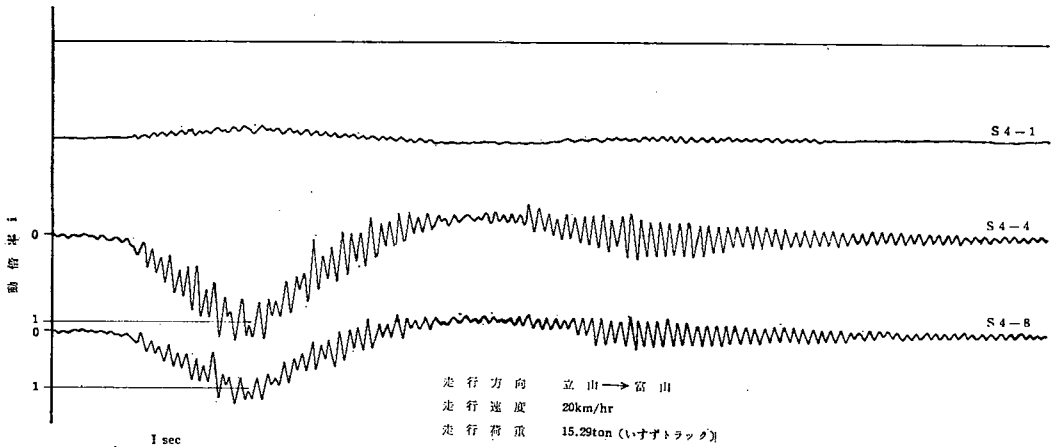
第4図 各測定断面のひずみ分布図

しかし一般に各断面ともその中立軸は計算値の場合よりもやや上にあるようで、ひずみの分布状態は第4図に見られるように鋼桁断面ではほぼ直線変化をなしているが、上フランジ下縁で、格点4, 7, 15のスパン中間断面では測定値は計算値より小さくこの付近で直線は折れた形となっている。ま

た、コンクリートスラブでは一般にスパン中間断面で、測定値は計算値より小さくなっている。さらに支点附近でのプレストレス導入の効果については、第4図の測定断面10の各場合についてみれば、いずれもスパン中間断面にみられるとは反対に鋼桁上フランジのひずみよりコンクリートスラブのひずみは大きくあらわれ計算値に近い値を示しているが、プレストレス導入によるコンクリートスラブの鋼桁との合成の効果が十分に生じていると考えられる。

4. 動的試験の結果と検討

静的載荷試験に続いて、本橋の振動性状を調べる目的で走行荷重による橋桁の動ひずみを測定した。走行荷重としては総重量 15.34 ton のいすゞトラックを採用した。走行速度は本橋前後の走行距離の関係で 20 km/hr とし、巾員中央部を等速で走行させた。測定は静的載荷試験用として鋼桁に接着したワイヤストレイン・ゲージの動ひずみを動的ひずみ計を通してオシログラフで記録した。その代表的記録を第5図に示す。なお以下のゲージ番号は第2図および第1表を参照されたい。



第5図 動的記録(格点4)

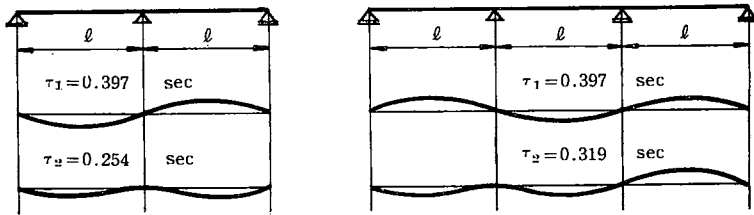
いま、各ゲージ位置における最大動ひずみと最大静ひずみとの比を動倍率として各ゲージについてとめた結果を第4表にあげる。

第4表 走行荷重による動倍率

2 径間連続合成桁				3 径間連続合成桁			
ゲージ位置	ゲージ番号	平均動倍率	摘 要	ゲージ位置	ゲージ番号	平均動倍率	摘 要
格点 4	S 4-1	1.05		格点 4	S 4-1	1.00	
	S 4-4	1.21			S 4-4	1.05	
	S 4-8	1.20			S 4-8	1.00	
格点 10	S 10-1	1.03	中央支点 上の断面	格点 10	S 10-1	1.00	中央支点 上の断面
	S 10-4	1.32			S 10-4	1.30	
	S 10-8	1.50			S 10-8	1.20	
格点 15	S 15-1	1.00		格点 15	S 15-1	1.00	
	S 15-4	1.20			S 15-4	1.11	
	S 15-8	1.29			S 15-8	1.08	

この表から2径間連続合成桁の各スパン中央断面の動倍率は1.20~1.29の間にあり設計に用いた1.208とほぼ一致する。

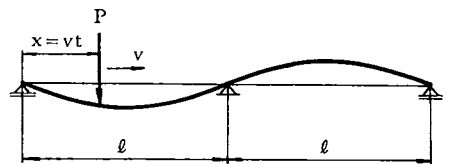
しかし支点上断面（格点10）では設計に用いた値よりかなり大きい値を示した。これは支点上に導入されたプレストレスの影響と考えられる。つぎに3径間連続合成桁では、支点上の格点10の断面で、動倍率は設計に用いた値とほぼ一致するが、スパン中央点附近では2径間と同じく動倍率は小さく、このことは3径間連続桁にあっては他のスパンの振動が相互に相殺するように作用するものと考えられる。つぎに本実験では自由振動を直接記録できなかったが、走行荷重通過後の桁の自由振動から固有振動を求めると、2径間および3径間連続合成桁とも約 $\tau_1=0.35\text{sec}$ であった。いま、コンクリートスラブと鋼桁は完全に合成されているものとして桁の断面の平均慣性モーメントとして合成桁の換算断面の慣性モーメント（ただし $n=6.3$ とする）を用いて Rayleigh の方法で振動周期を計算すると、2径間連続合成桁で第1次周期 $\tau_1=0.397\text{ sec}$ 、第2次周期 $\tau_2=0.254\text{ sec}$ 、3径間連続合成桁では第1次周期 $\tau_1=0.397\text{ sec}$ 、第2次周期 $\tau_2=0.319\text{ sec}$ を得た。これら基本固有周期を測定値と比較すると、計算値はやや大きい。このことは高欄および補剛材等による桁の剛度の増加、架設時における支点上に導入されたプレストレスによる軸方向力などの影響と考えられるが、このことについては今後さらに詳細に検討する予定である。いずれにせよ本橋は合成桁として完全に作用しているものと思われる。さらに測定記録から減衰率 β を求めると2径間連続合成桁では $\beta=0.0063$ 、3径間連続合成桁では $\beta=0.0053$ となり、一般鋼橋における値 $0.005\sim 0.03$ の下位に位し、減衰速さのおそい橋桁と考えられる。



第6図 振動モードと固有周期（計算値）

つぎに、2径間連続合成桁について、走行荷重による桁の振動を理論的に解析し、走行速度と動倍率の関係を調べ、本橋の限界走行速度について検討する。

まず、座標系を第7図の様に選び、橋桁の質量にくらべ走行荷重の質量は小さいので走行荷重の質量を無視し、単に力 P とする。さらに桁の振動は1次の振動モードによる影響にくらべて、2次以上の振動モードによる影響が非常に小さいのでこれらを省略する。このときは、桁の動たわみは時間に関する関数 q と x に関する関数 $\sin \frac{\pi x}{l}$ を用いて



第7図 走行荷重による動的たわみ

$$y_d = q \sin \frac{\pi x}{l} \tag{a}$$

桁の運動方程式は

$$\ddot{q} + \frac{\pi^4 a^2}{l^4} q = \frac{2}{m} Q \tag{b}$$

ここに、 $a^2 = EI/m$ 、 EI は桁の剛度で各断面について一定とする。 m は桁の単位長さ当りの質量、 l はスパン長、 Q は一般力であり、この場合は

$$Q = P \sin \frac{\pi vt}{l} \tag{c}$$

である。

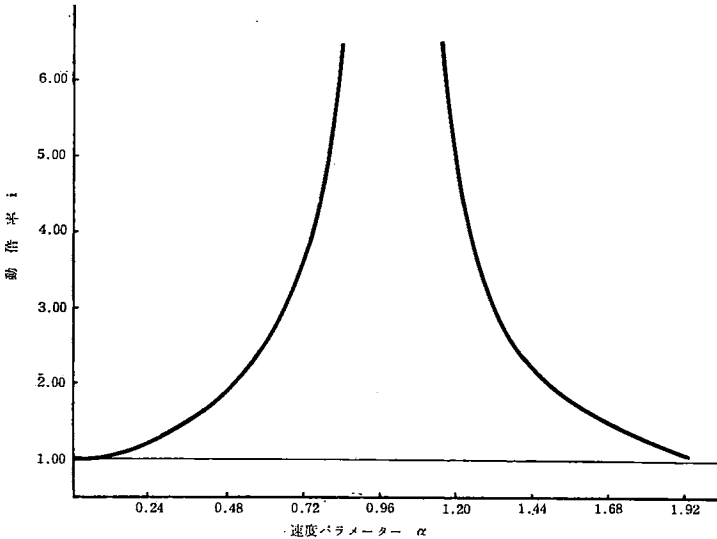
(c) 式の Q を (b) 式に入れて, (b) 式を解いて桁の動たわみ y_d を導くと, 本桁に対しては,

$$y_d = \frac{Pl^3}{\pi^4 EI} \left[\frac{\sin \frac{\pi x}{l}}{1 - \frac{v^2 l^2}{\pi^2 a^2}} \sin \frac{\pi vt}{l} - \frac{vl}{\pi a} \frac{\sin \frac{\pi x}{l}}{1 - \frac{v^2 l^2}{\pi^2 a^2}} \sin \frac{\pi at}{l} \right] \quad (d)$$

となる。さらに新たに $vl/\pi a$ を α とおいてこれを速度パラメーターとし, スパン中央点の最大静たわみとの比をとって動倍率 i とすると,

$$i = \frac{y_d}{y_s} = \left[\frac{1}{1 - \alpha^2} \sin \frac{\pi vt}{l} - \frac{1}{1 - \alpha^2} \sin \frac{\pi at}{l} \right] \quad (e)$$

となる。いま, 初期条件として $t=0$ (走行荷重が連続合成桁の左支点上を通過した瞬間を $t=0$ とする) で $y_d=0$, $\dot{y}_d=0$ として, (e) 式から速度パラメーター α と動倍率 i との関係を求めると第8図のとおりであり, 走行荷重の速度を次第に速くすると動倍率は大きくなり, $\alpha=1$ で桁は共振状態に達するが, 本橋でとられ得る最高速度パラメーターは $\alpha=0.12$ 位であるから衝撃係数は $i=0.13 \sim 0.20$ が妥当であると考えられる。



第8図 共振曲線

5. む す び

連続桁の中間支点附近のコンクリートスラブにプレストレスを導入して桁全長にわたって連続活荷重合成桁として設計架設された富山県立山橋のうち2径間および3径間連続桁について, 架設時の導入応力の測定¹⁾ について, 静的および動的載荷試験を行ったが, その結果静的載荷試験にあっては, 第4図に見られる様に測定値は設計値の70~120%のうちにあり, ほぼ一致しているが, 架設時と同じように桁断面中央部でいくらかのみだれを生じ, さらに桁上縁の応力は設計値より小さく一般には全断面において直線分布をなさないようである。また, 合成桁の中立軸は設計断面の中立軸の位置よりやや上に上る傾向にある。これらのことからコンクリートスラブは合成桁として有効に働いているものと思われる。なお, 支点附近にプレストレスを入れた結果については第4図の測定格点10の結果より明らかのように, 負の曲げモーメントに対してほぼ設計計算値に近いひずみを生じ, コンク

リートスラブは合成断面として有効に働いている。また、コンクリートスラブの有効巾を設計では主桁間隔の1/2としたが、コンクリート断面の応力分布状態から見て妥当と思われる。

さらに動的試験について基本固有周期は全断面完全合成桁として計算した値より測定値はやや小さい様である。これは本橋の特徴である中間支点附近に導入されたプレストレスなどにより桁の剛度が大きくなったためと思われる。つぎに走行荷重による衝撃率であるが今回は取付道路の関係で走行速度は20 km/hr と 30 km/hr のみについて試験を行った。その結果設計にもちいた $i=0.208$ にほぼ近い $i=1.20\sim 1.30$ を得た。一方減衰率は $\beta=0.0063\sim 0.0053$ で一般鋼橋の下位に位する。

以上のことから、本橋のように架設中に連続桁の中間支点を上げ越し、中間支点附近のコンクリートスラブにプレストレスを導入して中間支点附近のコンクリートスラブに生ずる引張応力を消去して、全橋にわたって連続合成桁とすることは有効な方法と考えられる。

この測定に当って多大のご援助をいただいた富山県土木部・川田工業株式会社ならびにご協力下さった本学、玉田晟・伊藤義男の両君に深謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 保田，榑場，小堀，吉田，酒井：連続合成桁橋の架設時における導入応力の測定について 第1報，金沢大学工学部紀要 第3巻，第1号
- 2) Friedlich Bleich：Theorie u. Berechnung der Eisernen Brücken. 1924. p 45~57.