

# 軽量コンクリート合成げた橋の現場実験\*

千葉 静 男\*\* ・ 橋 善 雄\*\*\*  
 中 井 博\*\*\*\* ・ 矢 幡 健\*\*\*\*\*

## 1. ま え が き

最近、人工軽量骨材の研究・開発とともに、これを橋梁にも応用することが促進され、すでに非合成げた橋の床版として使用されてきている。しかし、軽量コンクリートを、より効果的に利用するには、合成げた橋の床版として活用の方が合理的で、しかも一層経済性が期待できることはいうまでもない。

このような観点から、軽量コンクリートを使用した合成げた橋の種々の力学的特性を調べるため、模型げたによる実験<sup>1)2)</sup>が数多く行なわれた結果、軽量コンクリート合成げたは従来の普通コンクリート合成げたに比し決して劣るものではなく、十分に使用に耐えることが確認されている。

これらの資料を基礎として、軽量コンクリート合成げた橋が阪神高速道路路公団によって建設中の大阪府道池田線内に架設されることになった。軽量コンクリート合成げた橋は、わが国最初に建設されたものであり、この試みは注目すべきものである。

しかし、実橋の設計資料となった模型げたのデメンションは小さなものであったため、実際のげた橋の静力学的特性や動力学的挙動まで推定できなかった不十分な点を補足する必要があった。そこで、現場実験を行なって本橋の安全性を確認することにした。なお、本橋の隣接スパンに比較のため、スパン・幅員を同一にした普通コンクリート合成げた橋が併行して建設されることになったので、両者の力学的特性を常に対比させて本文中で報告する次第である。

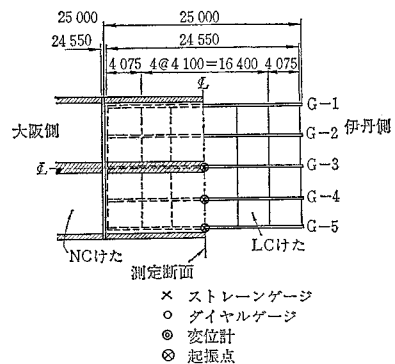
## 2. 設計・施工の概要

### (1) 設 計

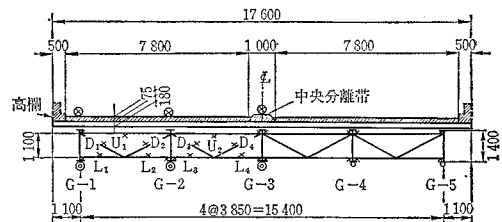
図-1に軽量コンクリート合成げた橋(LCげた)の一般構造図を示す。普通コンクリート合成げた橋(NCげた)も同様に支間 24.55 m、幅員 17.60 m で主げた数 5本の並列I型合成げた橋である。鋼材は SM 50, SM 41, SS 41 の 3種を使用した。LC げたのコンクリート床版には、人工軽量細粗骨材として大阪セメント製ライオンナイトを使用した。橋格は 1等橋で、設計計算はレオンハルトの方法により格子げたとして行なわれた。LC

図-1 一般構造図

#### (1) 平面図



#### (2) 断面図



注) 斜線部分の(高欄, 中央分離帯, 舗装)は、実験終了後施工した。

\* 土木学会第 22 回年次学術講演会で発表, 昭和 42 年 5 月  
 \*\* 正会員 阪神高速道路公団設計課長  
 \*\*\* 正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部  
 \*\*\*\* 正会員 工修 大阪市立大学講師 工学部  
 \*\*\*\*\* 正会員 高田機工株式会社

表-1 設計基準

項目	軽量コンクリート合 成けた (LC げた)	普通コンクリート合 成けた (NC げた)
1) コンクリートの圧縮強度 および許容圧縮応力度	$\sigma_{28}=280 \text{ kg/cm}^2$ $\sigma_{ca}=80 \text{ kg/cm}^2$	$\sigma_{28}=280 \text{ kg/cm}^2$ $\sigma_{ca}=80 \text{ kg/cm}^2$
2) 鋼材と版のコンクリート とのヤング係数比	$n=12$	$n=7$
3) 床版を設計する場合のヤ ング係数比	$n=15$	$n=15$
4) 床版コンクリートの単位 体積重量 (鉄筋を含む)	1.8 t/m <sup>3</sup>	2.5 t/m <sup>3</sup>
5) クリーブ係数	$\varphi_1=2.0$	$\varphi_1=2.0$
6) 最終収縮度	$\varepsilon_s=20 \times 10^{-5}$ $\varphi_2=4.0$	$\varepsilon_s=18 \times 10^{-5}$ $\varphi_2=4.0$
7) 版のコンクリートと鋼材 との温度差	$\pm 10^\circ\text{C}$	$\pm 10^\circ\text{C}$
8) スタッッド シェルの許容 せん断力	$Q_a=55 d^2 \sqrt{0.8 \sigma_{ca}}$ $H/d \geq 5.5$ $Q_a=10 dH \sqrt{0.8 \sigma_{ca}}$ $H/d < 5.5$	$Q_a=55 d^2 \sqrt{\sigma_{ca}}$ $H/d \geq 5.5$ $Q_a=10 dH \sqrt{\sigma_{ca}}$ $H/d < 5.5$

げたの設計基準を NC げたと対比させて示すと表-1  
のとおりである。

表-2~3 に本橋の主な断面定数の全長にわたる平均  
値を示す。

なお、LC げたと NC げたの鋼重を比較したものを  
表-4 に示す。LC げた橋の支間が短く、また隣接する  
NC げた橋とけた高を合せたため、LC げた橋の鋼重の  
軽減は本橋の場合あまりいじめるしくはなかった。

(2) 施 工

軽量コンクリートは、生コンクリートとして大阪セメ  
ント千島工場より搬入した。現場でのスランプは 7 cm  
であった。締め固めには振動数 10 000 rpm のパイプ  
レーターを使用し、フィニッシャーで表面仕上げを行な

表-2 鋼げた断面

け た	上フラン ジ (cm <sup>2</sup> )	下フラン ジ (cm <sup>2</sup> )	ウェブ (cm <sup>2</sup> )	$F_s$ (cm <sup>2</sup> )	$I_s$ (cm <sup>2</sup> )
LC G-1~5	19.95	93.51	1 400×9=126.0	249.46	7.477×10 <sup>6</sup>
NC G-1, 2	29.77	108.0	1 400×9=126.0	263.76	7.858×10 <sup>6</sup>
NC G-3~5	32.58	106.7	1 400×9=126.0	265.24	9.125×10 <sup>6</sup>

表-3 主げたの断面 2次モーメント (cm<sup>4</sup>)

け た	G-1, 5	G-2~4	全橋断面
LC (n=12)	2.421×10 <sup>6</sup>	2.551×10 <sup>6</sup>	12.517×10 <sup>6</sup>
NC (n=7)	2.973×10 <sup>6</sup>	3.073×10 <sup>6</sup>	15.192×10 <sup>6</sup>

表-5 コンクリートの配合表

コンクリート の種 類	粗骨材の最大 寸法 (mm)	スランプ (cm)	空 気 量 (%)	W (kg)	C (kg)	W/C (%)	S/A (%)	S (kg)	G (kg)	分散材 (kg)
LC	15	5~7	5~7	156	370	42	41	547	572	(PZ No 8) 925
NC	25	7~9	3~5	142	316	45	37	702	1 207	(PZ No 5) 1580

表-6 コンクリートの強度試験結果

コンクリート の種 類	$\sigma_{35}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$n=E_s/E_c$
LC	331	1.71×10 <sup>6</sup>	12.3
NC	302	2.47×10 <sup>6</sup>	8.5

た。養生は、ビニールシートで表面を約1週間おっ  
た。コンクリートの配合を表-5 に示す。

なお、現場で養生した材令5週間目のコンクリート標  
準供試体について行なった材料試験結果を表-6 に示  
す。

3. 実験概要

実験は、LC げた橋の種々な力学的特性を知ると同時  
に、NC げた橋の力学特性とを常に比較するため、同一  
条件のもとで同じ実験を両橋について行なった。実験項  
目を大別すると静的実験と動的实验に分かれ、静的実験  
では死荷重による鋼げたのたわみとひずみの測定、およ  
びタイヤ ローラーを載荷したときの合成けた各部のた  
わみとひずみを測定することにした。一方、動的实验で  
は、今回取付道路未完成のため、起振機による振動実験  
とタイヤ ローラー落下時の応答を求めることに止めた。

以上の実験のほか、夏期におけるけた各部の温度分  
布を測定する予定である。したがって、本文では静的、  
動的实验結果のみを報告する。なお、ゲージ取付位置は  
図-1 に示したとおりである。

4. 静的実験結果とその考察

(1) 死荷重による応力、たわみ

コンクリート打込みによる鋼げたの応力、およびたわ  
みの測定結果を表-7, 8 に示す。

この実験では、床版コンクリートのみの死荷重による  
応力とたわみを測定することにしたため、いろいろ不確  
実な要素が実測値に含まれないので、表-7, 8 に見られ  
るように実測値は計算値とよく一致する良好な結果が得  
られている。

表-4 鋼重の比較

LC げた	NC げた
39.6 t (90 kg/m <sup>2</sup> )	41.5 t (94 kg/m <sup>2</sup> )

表-7 死荷重による応力 (kg/cm<sup>2</sup>)

測定位置	LC げた			NC げた		
	実測値	計算値	実/計	実測値	計算値	実/計
上フランジ	-910	-987	0.92	-1 050	-1 254	0.84
下フランジ	455	511	0.89	605	621	0.97

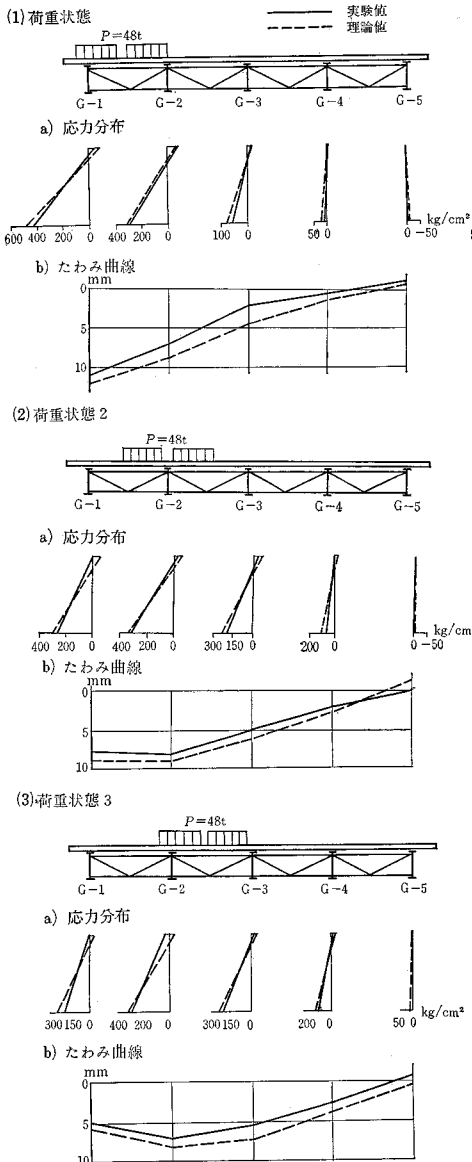
表-8 死荷重によるたわみ (mm)

測定値	LC げた			NC げた		
	計算値	実/計	実測値	計算値	実/計	
26	32.5	0.80	32	39.8	0.80	

さて、鋼げた下フランジの実測応力値を LC げたと NC げたについて比較してみると、両者の比は約 0.81

であった。すなわち、表-2 に示したように、LC げたの鋼げた断面が NC げたより小さいにもかかわらず、死荷重応力度は LC げたの方が NC げたより約 19% も小さい。これは、軽量コンクリートの単位体積重量  $\gamma$  が普通コンクリートに比しいちじるしく小さいためである。ちなみに、表-7, 8 の計算値は、鉄筋を除外して  $\gamma_{LC}=1.7 \text{ t/m}^3$ ,  $\gamma_{NC}=2.4 \text{ t/m}^3$  と仮定して求めたものである。そこで、つぎにたわみの実測値から軽量コンクリートと普通コンクリートの単位体積重量を逆算してみれば、両者の比は 0.7 となった。したがって、 $\gamma_{NC}=2.4 \text{ t/m}^3$  とみなせば、 $\gamma_{LC}=1.7 \text{ t/m}^3$  の仮定が妥当なことがわかる。

図-3 LC げた橋の応力分布, たわみ曲線



(2) タイヤ ローラーによる 静的載荷実験結果とその考察

図-2 に示すタイヤローラー(前輪4.9 t, 後輪7.1 t, 計 12.0 t) 4 台 1 組を各主げたにできるだけ大きい応力やたわみが

図-2 タイヤ ローラー平面図

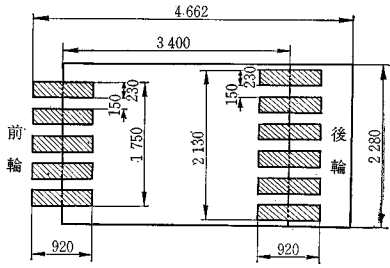
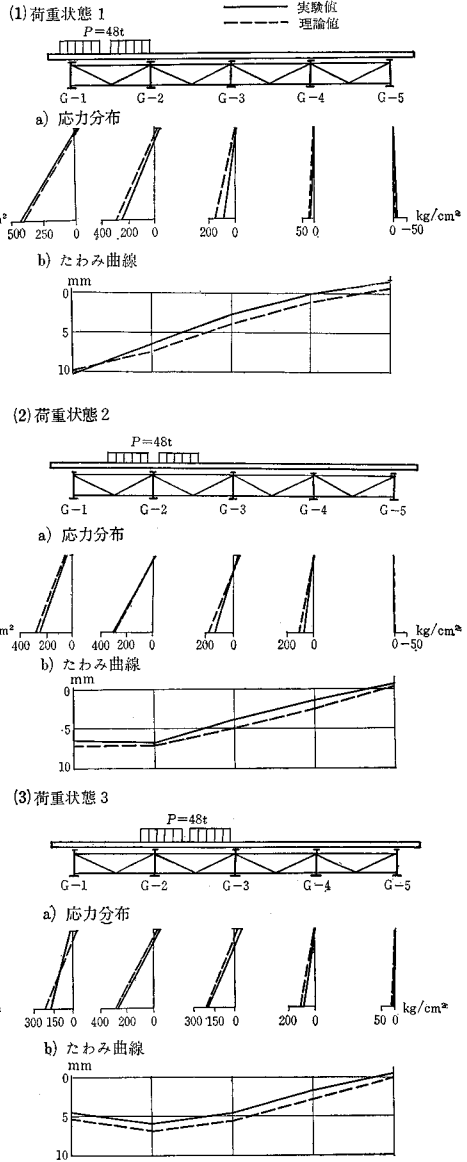


図-4 NC げた橋の応力分布, たわみ曲線



生じるようにけた中央の横断方向に3種類の荷重状態で載荷した。主げたの応力分布図とたわみ曲線を 図-3~4 に示す。

図-3, 4 中に示した応力とたわみの計算値は Guyon-Massonnet の方法で求めたものである。この方法で荷重分配の計算は、本橋では対傾構が使用されているので、トラスのたわみから換算した曲げ剛度を持つ横げたを想定して行なった<sup>3)</sup>。

まず、各荷重状態に対する主げたの応力分布図より、LC げた, NC げたともに実測値は計算値といずれも良好な一致を示していることがわかる。したがって、平面構造としての設計が妥当なことがわかる。そこで、LC げたと NC げたの鋼げた下フランジの応力値を比較したものを表-9 に示す。実測値, 計算値ともに LC げたの応力値が NC げたより大きく、両者の実測値の比は 1.08~1.16, つまり合成後の応力度は死荷重に対するものとは逆に LC げたの方が NC げたより 8~16% 大きい。これは LC けた橋の場合  $n=12$  で、一方 NC けた橋の場合  $n=7$  なので LC けた橋の合成げたとしての断面値が NC げたより小さいため当然のことである。ちなみに、死荷重応力と活荷重応力との合計を実測値から推定してみれば、両橋の値はほぼ等しい値になり、十分有効な設計が行なわれていることが確認できた。本橋では死荷重応力度は小さかったが、死荷重応力度の比率

が大きい長大橋に軽量コンクリートを使用すれば、一層有利な設計が行なえることはいままでもない。なお、コンクリート床版にもモールドゲージを埋込み、ひずみの測定を行なった。測定値は小さくばらつきも多かったが、LC げた, NC げたとも橋軸方向には最大約 15 kg/cm<sup>2</sup> の圧縮応力が生じ、また橋軸直角方向には最大約 20 kg/cm<sup>2</sup> 程度の引張を生じるにすぎず、合成げたとしての設計が妥当であることが確認できた。

つぎに、たわみ曲線を観察すれば、応力分布図と同様実測値は計算値とよく一致している。表-10 に、たわみの最大値を比較したものを示す。この表から、LC げたのたわみの実測値は 9~20% だけ NC げたより大きいことがわかる。しかしながら、LC 床版を有するものを非合成げたとして設計するより合成げたとして設計する方がたわみをいちじるしく小さくすることができるので有利である。また、本来合成げたはたわみについても有利な構造であるので、軽量コンクリートのヤング係数が低いという欠点が、合成げた構造とすることによっていちじるしく改善できるのである。

最後に、本橋の対傾構各部の応力分布を調べたものを表-11 に示す。ここに、実測値は 2 次応力の影響がないよう細心の注意を払って測定したものである。一方、対傾構の厳密な応力解析を行なうには、床版の荷重分配作用も未知で、この部分の構造も複雑であるので困難だった。それで、簡単のため以下のようにして応力計算を行なった。まず、Guyon-Massonnet の方法により横げたとしての曲げモーメントを求め、しかる後に対傾構が鋼部材のみより構成された単純トラスと仮定し、このモーメントをトラス格点に作用させた。そして、上弦材と下弦材は曲げに抵抗し、斜材は格点に作用する曲げモーメントの差から生じるせん断力に抵抗するものとして部材応力を算定したものである。本実験の載荷状態は橋軸直角方向にかなりの拡がりを持つため、集中荷重が載荷した場合に生じる顕著な荷重分配作用は認められなかったが、実験結果について若干の考察を行なえば以下のようなものである。まず、上弦材の実測応力は計算値よりかなり小さい。上弦材は、コンクリート床版に近いのでこれによる拘束が大きいと思われる。一方、下弦材の

表-9 タイヤ ローラー載荷による応力 (kg/cm<sup>2</sup>)

荷重状態	Case-1			Case-2			Case-2		
	G-1			G-2			G-2		
	実測値	計算値	実/計	実測値	計算値	実/計	実測値	計算値	実/計
LC	445	466	0.95	331	338	0.98	310	325	0.95
NC	411	387	1.06	290	286	1.01	266	275	0.97
$\sigma_{LC}/\sigma_{NC}$	1.08	1.20	—	1.14	1.18	—	1.16	1.18	—

表-10 タイヤ ローラー載荷によるたわみ (mm)

荷重状態	Case-1			Case-2			Case-2		
	G-1			G-2			G-2		
	実測値	計算値	実/計	実測値	計算値	実/計	実測値	計算値	実/計
LC	11.03	12.07	0.91	8.19	8.77	0.93	6.95	8.44	0.82
NC	10.13	9.86	1.03	6.83	6.98	0.98	6.07	6.93	0.88
$\delta_{LC}/\delta_{NC}$	1.09	1.22	—	1.20	1.25	—	1.14	1.05	—

表-11 対傾構の応力 (kg/cm<sup>2</sup>)

荷重状態	部材	Case-1			Case-2			Case-2		
		実測値	計算値	実/計(平均)	実測値	計算値	実/計(平均)	実測値	計算値	実/計(平均)
LC	$U_1 \sim U_2$	-25~60	-35~-154	—	20~30	-139~-180	—	5~60	-129~-269	—
	$L_1 \sim L_2$	-105~20	-108~108	—	20~210	0~290	0.72	15~220	0~293	0.74
	$D_1 \sim D_2$	-115~120	-123~123	0.97	-180~195	-136~136	1.08	-70~185	-190~190	0.86
NC	$U_1 \sim U_2$	-30~35	-41~-143	—	20~25	-179~-197	—	0~40	-130~-269	—
	$L_1 \sim L_2$	-105~10	-101~114	—	70~185	0~290	0.70	5~185	0~335	0.58
	$D_1 \sim D_2$	-95~90	-123~123	0.79	-135~165	-165~165	0.98	-65~205	-191~191	0.84

実測値は計算値の 60~70% でコンクリート床版が横断面方向の曲げに対し多少抵抗することを示している。しかし、コンクリート床版はせん断力に対し抵抗しないので、このせん断力はすべて斜材が受け持つことになる。そのため、斜材の実測値はほぼ計算値と一致した応力状態にあることがわかる。なお、斜材と下弦材の実測応力値について、LC げたと NC げたを比較してみれば、LC げたは NC げたより 10~20% 大きい値であった。以上の実験結果より、上述の方法は計算が簡単なので、対傾構の概算設計に役立つものとする。

### 5. 動的実験結果とその考察

今回は、取付道路未完成のため自動車が走行する場合の動的応答まで実験できなかったが、固有振動数、振動モード、減衰性などの基本的な動的特性を理論と実験によってかなり明確にできたので報告する。

ところで、本橋のようにスパンに比し幅員が広い平面構造物では、従来主に 1) 格子桁構造<sup>4)</sup>、または 2) 直交異方性版理論<sup>5),6)</sup>によって振動解析が行われてきており、いずれの理論によっても棒としての曲げ振動では不十分なことが指摘されている。しかしながら、1) の方法では横げた本数が増せば不静定次数も増大し、振動数方程式の内容がぼう大となり実用的でない。したがって、横げた本数が多いときには、けた橋を直交異方性版とみなして 2) の方法で取り扱うほうが解析容易である。ただし、この方法には理論的にも不明確な仮定（たとえば、 $\kappa = H/\sqrt{D_x D_y}$  値）があるように思われ、また数値計算はかなりの手数を要するものである。

そこで、本文では文献 4)~6) の解析結果を参照して、計算が簡単で、しかも実際の現象ともよく一致する近似解法を誘導したので、その結果を紹介する。

#### (1) 合成格子げた橋の動的解析

この方法は Guyon-Massonnet の理論流に主げた、横げたを全幅・全長にわたってならし、格子げた橋を連続体つまり直交異方性版に変換する。そして、振動モードの仮定のもとにエネルギー法を使用して格子げた橋の運動方程式を誘導しようとするものである。

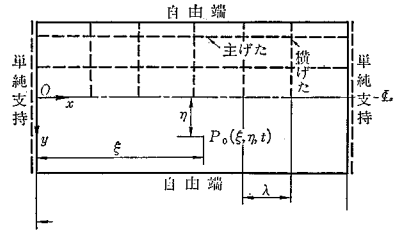
まず、図-5 に示すように座標系を定める。そして、断面定数をつぎのような記号で表わすことにする。

$$\left. \begin{aligned} r_s &: \text{鋼材の単位体積重量} \\ A_x &: \text{橋軸直角方向の断面積} \\ A_y &: \text{橋軸方向の断面積 (いずれも鋼換算)} \\ D_x &= E_s I_y / a, \quad D_y = (E_s I_Q + E_c \bar{I}_Q) / \lambda, \\ 2 H_{x,y} &= G_s J_x / a + G_s J_Q / \lambda \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

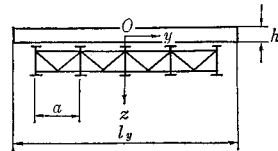
ここに、

図-5 座標系

(1) 平面図



(2) 断面図



$E$ : ヤング係数,  $G$ : せん断弾性係数 (Suffix  $s$  は鋼,  $c$  はコンクリートに関するものを示す),  $I_y$ : 主げた 1 本の断面 2 次モーメント,  $I_Q$ : 横げたとしての換算断面 2 次モーメント,  $\bar{I}_Q$ : 横げたに協力するコンクリート床版の断面 2 次モーメント,  $J_x$ : 主げた 1 本のねじり抵抗,  $J_Q$ : 横げたとしてのねじり抵抗,  $l_x$ : スパン,  $l_y$ : 幅員,  $a$ : 主げた間隔,  $\lambda$ : 横げた間隔。

したがって、断面力（曲げモーメント、ねじりモーメント）はつぎのように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} M_x(x, y, t) &= -E_s I_y \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \\ M_y(x, y, t) &= -(E_s I_Q + E_c \bar{I}_Q) \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{T_x}(x, y, t) &= -G_s J_x \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}, \\ M_{T_y}(x, y, t) &= -G_s J_Q \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

ここに、 $t$  は時間を意味するもので、たわみ  $w(x, y, t)$  はつぎのような形に置くものとする。

$$\left. \begin{aligned} w(x, y, t) &= \sum_{m=1,2,3,\dots} \sum_{n=1,2,3,\dots} w_{m,n}(x, y, t), \\ w_{m,n}(x, y, t) &= \varphi_{m,n}(t) X_m(x) Y_n(y) \end{aligned} \right\} (4)$$

さて、 $X_m(x)$ ,  $Y_n(y)$  は振動モードを決定する座標関数で、図-5 の直交異方性版に対する境界条件を満足するようつぎの形を採用することにする<sup>7)</sup>。

$$X_m = \sin\{(m\pi x)/l_x\}, \quad m=1, 2, 3, \dots (5)$$

$$Y_1 = 1, \quad Y_2 = 2y/l_y$$

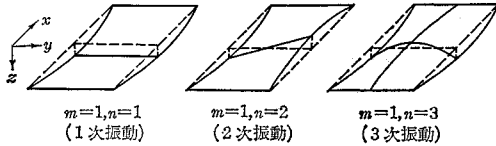
$$\left. \begin{aligned} Y_n &= (\cos k_n y - \alpha_n \cosh k_n y) / (1 - \alpha_n), \quad n=3, 5, \dots \\ &= (\sin k_n y + \alpha_n \sinh k_n y) / \left( \sin \frac{k_n}{2} + \alpha_n \sinh \frac{k_n}{2} \right), \\ & \quad n=4, 6, \dots \end{aligned} \right\} \dots (6)$$

ここに、固有値  $k_n = k_n l_y$  および  $\alpha_n$  (計算式は省略) の

表-12  $\epsilon_n, \alpha_n$  値

$n$	$\epsilon_n$	$\alpha_n$
3	4.730	$1.329 \times 10^{-1}$
4	7.853	$-2.786 \times 10^{-2}$
5	10.996	$-5.746 \times 10^{-3}$
6	14.137	$1.203 \times 10^{-3}$

図-6 振動パターン



値は表-12のように決める。 $m=1, n=1, 2, 3$ に対する振動パターンを例示すれば図-6のようになる。

つぎに、式(4)の時間関数  $\varphi_{m,n}$  をつぎの Lagrange の運動方程式から求めよう。

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T_{m,n}}{\partial \dot{\varphi}_{m,n}} \right) + \frac{\partial F_{m,n}}{\partial \varphi_{m,n}} + \frac{\partial V_{m,n}}{\partial \varphi_{m,n}} = Q_{m,n}, \quad (\dot{\varphi} = d/dt) \quad (6)$$

ここに、 $g$  を重力加速度とすれば運動エネルギー  $T_{m,n}$  は、

$$T_{m,n} = \frac{r_s}{2g} \int_0^{l_x} \int_{-l_y/2}^{l_y/2} \int_0^h (\dot{w}_{m,n})^2 dx dy dz \quad (7)$$

また、ひずみエネルギー  $V_{m,n}$  は

$$V_{m,n} = \frac{1}{2} \int_0^{l_x} \int_{-l_y/2}^{l_y/2} \left\{ D_x \left( \frac{\partial^2 w_{m,n}}{\partial x^2} \right)^2 + D_y \left( \frac{\partial^2 w_{m,n}}{\partial y^2} \right)^2 + 2H \left( \frac{\partial^2 w_{m,n}}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\} dx dy \quad (8)$$

しかし、文献9)によれば直交異方性版としてのひずみエネルギーは上式のほかにつぎのものを加えるべきことを示している。

$$V_{m,n} = \frac{1}{2} \int_0^{l_x} \int_{-l_y/2}^{l_y/2} 2D_\mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} dx dy \quad (8)'$$

ただし、 $2D_\mu = \nu_y D_x + \nu_x D_y$  .....(9)

$\nu$ : ポアソン比 (Suffix  $x, y$  はそれぞれの方向におけるものを示す)

そして、第  $(m, n)$  次振動の減衰係数を  $C_{m,n}$  とする粘性減衰として振動減衰を考慮することにすれば

$$F_{m,n} = C_{m,n} T_{m,n} \quad (10)$$

最後に、図-5に示した集中力  $P_0(\xi, \eta, t)$  による一般力法は、

$$Q_{m,n} = P_0(t) X_m(\xi) Y_n(\eta) \quad (11)$$

したがって、簡単な例として移動しない集中的な周期力  $P_0 \sin \omega t$  が作用するときの、任意点のたわみ  $w(x, y, t)$  の定常解は、

$$w(x, y, t) = \sum_{m=1,2,3 \dots} \sum_{n=1,2,3 \dots} \frac{P_0}{M_n} \cdot X_m(\xi) X_m(x) Y_n(\eta) Y_n(y) \frac{\sin(\omega t - \theta_{m,n})}{\sqrt{(\rho_{m,n}^2 - \omega^2)^2 + C_{m,n}^2 \omega^3}} \quad (12)$$

ここに、 $\rho_{m,n}$  は自由振動数 (rad/sec) を表わすもので固有振動数  $f_{m,n}$  (cycle/sec) との関係は、

$$f_{m,n} = \rho_{m,n} / 2\pi = \sqrt{K_{m,n} / M_n} / 2\pi \quad (13)$$

また、式(12)中の  $\theta_{m,n}$  は位相角で

$$\theta_{m,n} = \tan^{-1} \{ C_{m,n} \omega / (\rho_{m,n}^2 - \omega^2) \} \quad (14)$$

ところで、式(13)中の  $M_n$  は直交異方性版の第  $n$  次振動時の有効質量を意味し、 $K_{m,n}$  は第  $(m, n)$  次振動時のばね定数に相当するものである。これらの算定公式を表-13に示す。そして、式(12)で  $\omega=0$  とおけば、静的たわみやさらに式(2)、(3)より断面力を求めることもできる。すなわち、

$$w(x, y) = \sum_{m=1,2,3 \dots} \sum_{n=1,2,3 \dots} \frac{P_0}{K_{m,n}} \cdot X_m(\xi) X_m(x) Y_n(\eta) Y_n(y) \quad (15)$$

ただし、表-13中の  $\psi_n, \chi_n, \zeta_n$  値は表-14に示すようにとる。

表-13  $M_n, K_{m,n}$  の算定公式

$n$	$M_n$	$K_{m,n}$
1	$\frac{r_s A_x}{2g} l_x$	$\frac{D_x l_x^2}{2} \left( \frac{m\pi}{l_x} \right)^4$
2	$\frac{r_s A_y}{6g} l_y^3$	$\frac{l_x}{6} \left( \frac{m\pi}{l_x} \right)^2 l_x \left\{ D_x l_y^2 \left( \frac{m\pi}{l_x} \right)^2 + 24 D_{xy} \right\}$
$\geq 3$	$\frac{r_s A_y}{4g} \cdot \frac{l_y}{\epsilon_n} \psi_n$	$\frac{l_x}{4} \left[ \left\{ D_x \left( \frac{m\pi}{l_x} \right)^4 + D_y \left( \frac{\epsilon_n}{l_y} \right)^4 \right\} \frac{l_y}{\epsilon_n} \psi_n + 2 \left( \frac{m\pi}{l_x} \right)^2 \frac{\epsilon_n}{l_y} (H \chi_n + D_\mu \zeta_n) \right]$

表-14  $\psi_n, \chi_n, \zeta_n$  値

$n$	$\psi_n$	$\chi_n$	$\zeta_n$
3	6.403	8.841	3.519
4	3.296	4.933	2.933
5	10.857	12.833	8.909
6	7.073	8.074	6.074

## (2) 実験結果とその考察

### a) 固有振動数・振動モード

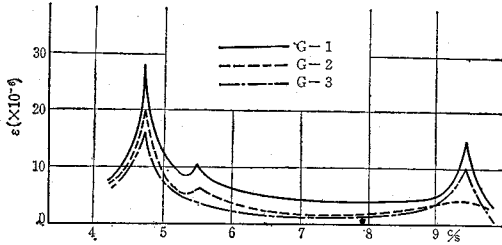
起振機によってけたを振動させたときの、ひずみについての共振曲線を図-7に示す。また、これらの図より得た固有振動数の実測値と、上述の理論より求めた計算値(断面定数は表-15に示す)とを比較したものを表-16に示す。図-8は変位記録の共振点から横断面方向の観測モードを求めたものと、計算値とを示す。

固有振動数の実測値は、計算値と非常によく一致し、またそのときの振動モードも良好な結果が得られている。したがって、理論上の仮定が妥当なものと思われる。この実験では1~3次振動が得られたが、個々について考察すれば以下のようなものである。

まず、1次振動は全橋断面が一体となって上下方向に振動する曲げ振動で、理論的には表-13に示したように曲げ剛性  $E_s I_y$  だけが関係する棒としての曲げ振動と

図-7 共振曲線 (ひずみ  $\epsilon$ )

(1) LC げた



(2) NC げた

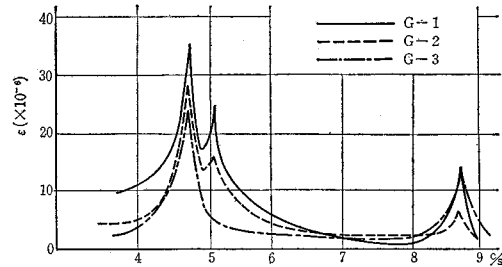


表-15 断面値

けた	$A_x$ ( $\text{cm}^2$ )	$A_y$ ( $\text{cm}^2$ )	$D_x$ ( $\text{kg}\cdot\text{cm}$ )	$D_y$ ( $\text{kg}\cdot\text{cm}$ )	$H$ ( $\text{kg}\cdot\text{cm}$ )	$D_g^*$ ( $\text{kg}\cdot\text{cm}$ )
LC	$9.606 \times 10^3$	$1.013 \times 10^4$	$1.494 \times 10^{10}$	$1.061 \times 10^9$	$1.458 \times 10^8$	$1.333 \times 10^9$
NC	$1.286 \times 10^4$	$1.407 \times 10^4$	$1.813 \times 10^{10}$	$1.127 \times 10^9$	$2.498 \times 10^8$	$1.605 \times 10^9$

\*  $D_g^* \nu_x = \nu_y = 1/6$  として計算した。

表-16 固有振動数 (cycle/sec)

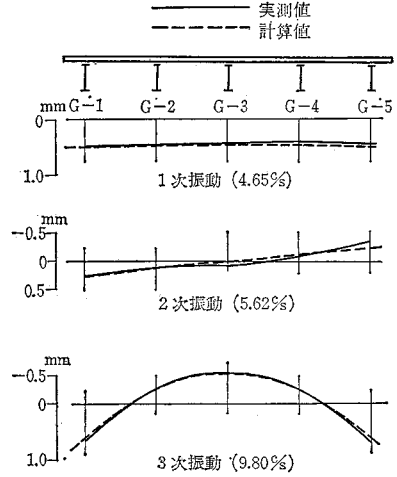
けた	振動モード	1st mode	2nd mode	3rd mode
		$m=1, n=1$	$m=1, n=2$	$m=1, n=3$
LC	実測値	4.66~4.75	5.50~5.81	9.74~9.80
	計算値	4.82	5.67	9.49
	計/実	1.01~1.03	0.98~1.03	0.98~0.97
NC	実測値	4.46~4.63	5.00~5.05	8.77
	計算値	4.59	5.35	8.66
	計/実	0.99~1.03	1.06~1.07	0.99

同じである。つぎに、2次振動は全橋断面が一体となって回転するねじり型の振動である。比較のため、棒としてのねじり振動<sup>9)</sup>とみなし、固有振動数を算定してみれば LC に対し 7.85 c/s, NC に対し 7.30 c/s となり、実測値とかなり差異があった。したがって、本橋は直交異方性版として動的解析をするほうが適切であると思われる。最後に、3次振動は耳げたと中げたの変位が異符号で図-8の3次振動モードとなる版としての特徴が実験によっても明確にわかり興味深い。そして、固有振動数はあらゆる断面定数が関係し、棒の曲げ振動とはいちじるしく相違する。

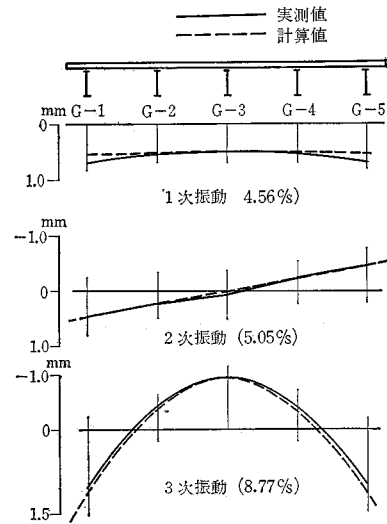
ところで、以上のように固有振動数の実測値が理論値

図-8 横断面方向の振動モード

(1) LC げた



(2) NC げた



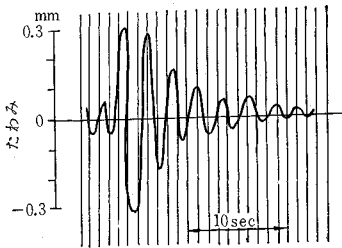
とよく一致することは、実際のけた橋の断面定数がほぼ計算値に近いことを示しているのである。したがって、固有振動数を調べることににより、けたの剛性が判定できるという1種の非破壊検査としての重要な意義を持つのである。

b) 減衰特性

図-9はタイヤローラー1台の前輪をG-2けた上で高さ9cmのステップ台より落下させたときの変位の記録を示したものである。このグラフでは、1次振動のみが顕著で他の高次振動は観察されないで、落下後の振動が自由振動であるとみなして、1次振動についての減衰特性<sup>10)</sup>を調べてみれば図-10を得た。図-10より振動は粘性減衰することがわかる。したがって、対数減衰率を求めてみれば表-17に示すようLCけたの対数減

図-9 タイヤ ローラー落下時の応答

(1) LC けた



(2) NC けた

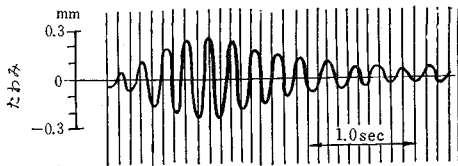
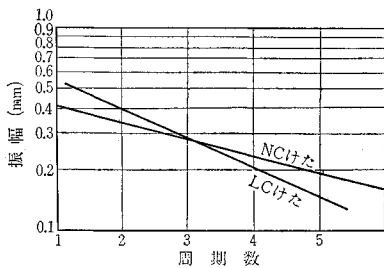


図-10 減衰特性



衰率のほうが NC けたより大きいという結果を得た。

ところで、減衰性状のはっきりした性格はまだ理論的に

把握されていないけれども、対数減衰率  $d$  と断面定数とはつぎの関係があるといわれている<sup>11)</sup>。

$$d = K \sqrt{1/(m^3 \cdot E_s I_y)} \dots\dots\dots (16)$$

ここに、 $K$  はスパンなどによって決まるある比例定数で、この値と曲げ剛性  $E_s I_y$  値は LC けた、NC けたほぼ等しいので、けたの単位長さあたりの質量  $m = r_s A_x / g$  が小さいほど、対数減衰率は大きくなるのである。したがって、本橋では LC けたの対数減衰率が NC けたより大きくなったものと考えられる。

なお、本橋の対数減衰率を過去に行なわれた実験結果<sup>11)</sup>と比較すれば、LC けた、NC けたいずれも従来のものよりやや大き目の値であった。しかし、対数減衰率は場合によって異なるので、今後もこの種の橋梁について実験を行ないデータを集積することが望ましい。

e) 強制振幅、動倍率

共振曲線から、1 次振動共振時における加振けたの強制振幅をひずみおよび変位について、LC けたと NC け

たの比をとって比較したものを表-18 に示す。この結果より、LC けたの強制振幅は、NC けたより約 20~30% 小さいことがわかる。

表-18 強制振幅の比較

測定けた	G-1	G-3
測定量		
$\epsilon_{LC}/\epsilon_{NC}$	0.78	0.65
$w_{LC}/w_{NC}$	0.75	0.74

いま、1 次振動共振点における LC けたと NC けたの強制振幅比を理論的に求めてみれば、つぎのようである。

$$w_{LC}/w_{NC} = A_{x,LC}/A_{x,NC} \cdot 4_{LC}/4_{NC} \dots\dots\dots (17)$$

ここで、断面積  $A_x$  と実測した対数減衰率  $d$  を上式に代入してみれば、強制振幅比は 0.81 となる。したがって、LC けたのほうが NC けたより動的たわみは約 20% 小さく、たとえ共振状態が起こるようなことがあっても、LC けたは NC けたより大きい振動が発生しないことを意味する。

表-19 動倍率 (D.A.F)

けた	$w_d$ (mm)	$w_{st}$ (mm)	D.A.F = $(w_{st} + w_d)/w_{st}$
LC	0.32	0.84	1.38
NC	0.28	0.76	1.37

つぎに、図-9 の結果から動倍率 (Dynamical Amplification Factor) を求めたものを表-19 に示す。この結果から、LC けた、NC けたの動倍率は同程度であることがわかる。以上に示したように動的荷重に対して、LC けたは NC けたと同様に合成格子けた橋としての十分な安全性を持つことがわかった。今回は取付道路未完成のため自動車の走行した場合の動的レスポンスまで求め得なかったが、一般に自動車の固有振動数<sup>12)</sup>は 2~5 c/s といわれており<sup>12)</sup>、本橋に関しては 2 次、3 次振動は誘発される可能性は少ないものと思われる。また、道路橋の衝撃係数に関する最近の研究によれば、橋梁の動的応答は一般の交通流、すなわちランダムな荷重群に対する応答より統計学的に求めなければならないことが指摘され研究<sup>13)</sup>されてきているが、格子けた橋については以上に述べた基礎的事項がそれを解析するに当り役立つものと思われる。

6. 結 論

わが国で最初に試みられた軽量コンクリート使用の合成けた橋と、これと同一支間・幅員を有する普通コンクリート使用の合成けた橋の二つの実橋につき現場実験を行ない比較検討した結果、軽量コンクリート合成けた橋は静力学的にも動力的にも普通コンクリート合成けた橋に比し、何ら劣ることなく十分使用に耐えるものであることが確認された。

本橋では、スパン 24.55 m という短いものであった



が、軽量コンクリートは長大橋においてその特徴が大きく生かされるので、今後の本格的使用が期待される次第である。

なお、この研究を遂行するに当たり京都大学工学部小柳 治氏、阪神高速道路公団田井戸米好氏、および当時大阪市立大学大学院学生長崎光男君のご協力を得たことを付記し、ここに感謝の意を表するものである。

### 参 考 文 献

- 1) 成岡・若林・川崎：軽量 コンクリート 合成桁の実験的研究，土木学会誌，51-9，p. 33
- 2) 橋・千葉・田井戸・長崎：軽量コンクリートを用いた合成桁の実験，土木学会誌，51-11，p. 43
- 3) 渡辺 昇：格子桁の理論と計算，技報堂
- 4) 平井一男：結合法による格子構造の動的解析，土木学会論文集，第 101 号，p. 25
- 5) M. Naruoka and H. Yonezawa : A Study on the Period of the Free Lateral Vibration of the Beam by

the Theory of Orthotropic Rectangular Plates, Ingenieur Archiv, Band XXVI, 1958, p. 20

- 6) 平井一男：移動荷重を受ける 相対 2 辺単純支持，他の 2 辺自由なる 直交異方性版の振動性状について，土木学会論文集，第 92 号，p. 1
- 7) チモシェンコ・谷下・渡辺共訳：工業振動学
- 8) Timoshenko and Winowsky-Krieger : Theory of Plates and Shells, 2nd Ed., 1959
- 9) S. Komatsu and H. Nakai : Study on Free Vibration of Curved Girder Bridges, Trans. of J.S.C.E., No. 136, 1966, p. 35
- 10) 高田・大久保：現場における応力の測定，山海堂
- 11) 伊藤・片山：構造物の振動減衰，土木学会論文集，第 117 号
- 12) C.M. Harris and C.E. Crede : Shock and Vibration Handbook, Vol. 3, 1961, 45
- 13) 山田善一：土木構造物の不規則振動と強度，実用荷重に対する強度講習会テキスト，土木学会関西支部，昭 41.12 (1967.5.30・受付)

# 新しい軟弱地盤処理工法

日本道路公団理事 藤森謙一・日本道路公団理事 内田襄編著・B 5 判 / 460 頁 上製 定価 3,400 円 230 円

- 現場ですぐ役立つ軟弱地盤処理工法の設計と施工
- 新しい軟弱地盤処理工法を初めて体系づけた技術書
- 薬液注入工法ほか新しい地盤改良工法の紹介

### ●本書の特色

本書を研究することによって

1. 各種軟弱地盤処理工法の選定が可能
2. 各種軟弱地盤処理工法の設計と施工が可能
3. 特殊な軟弱地盤処理工法の施工法がわかる

### ■ 主要目次

第1章 軟弱地盤の調査	工法	(2) 高揚程ウエルポイント	4.1.4 アクリル系
第2章 軟弱地盤処理工法の計画	(3) ジェット式サンドドレイン	3.4.2 バキュームデンプウエルおよびジューメンズウエル	4.1.5 クロムグリーン系
第1節 軟弱地盤と構造物との関係	3.2.2 ベーパードレイン	第3節 振動等を利用した締め固め圧入工法	4.1.6 真空グラウト工法
第2節 設計	3.3.1 サンドコンパクションバイル工法(パーカッション式)	第5節 電気化学的処理工法	第2節 石灰工法
第3節 各工法の効果および工法の選定	3.3.2 サンドコンパクションバイル工法(振動式)	第6節 置換工法	第3節 加熱安定工法
第3章 軟弱地盤処理工法	3.3.3 バイアプロフローテーション工法	3.6.2 掘削置換工法	第5章 軟弱地盤処理工法の実施例
第1節 載荷重工法	3.3.4 十字バイアプロ工法	3.6.3 すべり置換工法	第1節 国道30号線庄内跨線橋工事
3.1.1 載荷重工法	第4節 排水工法	3.6.4 燻炭置換工法	第2節 大田地区
3.1.2 真空工法	3.4.1 ウエルポイント	第7節 超軟弱地盤の表層処理工法	第3節 八郎湾
第2節 脱水土法	(1) ウエルポイント	第4章 その他の地盤の改良工法	第4節 泥炭地
3.2.1 サンドドレイン		第1節 薬液注入工法	第5節 名古屋港高潮防波堤
(1) サンドドレイン工法		4.1.1 L.W(不安定水ガラス)工法	第6節 東海道新幹線
(2) オランダ式サンドドレイン		4.1.2 ハイドロロック工法	第7節 公団住宅
		4.1.3 ケミセクト工法	第6章 軟弱地盤処理用機械

## 新しい仮設工事の設計と施工

八島忠編著 B 5 版 530 頁 上製  
図版・写真版 800 個以上 定価 3,600 円 送料 150 円

## 新しい基礎工法の設計

八島忠・中島武編 B 5 版 421 頁 上製  
図版・写真版 450 個以上 定価 2,600 円 送料 130 円

## 新しい土留工法

藤森謙一・内田襄編 B 5 版 440 頁 上製  
図版・写真版 560 個以上 定価 3,400 円 送料 200 円

## 近代図書株式会社

東京都千代田区九段北1の6の7  
電話 (263)3871・3872 (261)5818・5819 振替 東京23801番