

II-17 側径間載荷法による Prestressed Balanced Langer 橋の実験成果について

北海道大学工学部 正負
北海道開発局 正負

今 俊三
渡辺 昇
大島 久

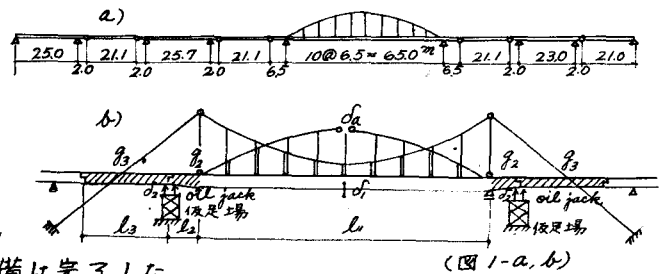
1. Prestress 工法の概要

Langer 桁橋を Balanced 形式とした場合に、架設の途中で、arch crown 部を鉤結する前に、突径間又は吊径間に何らかの surcharge を与え、主径間桁に負の曲げモーメントを導入しておいてから Langer 橋を完成する工法で、世界で初めての工法である。Prestress 導入時は、架設用 cable で主径間桁が吊られているから、一種の吊橋として prestress が導入されることが本工法の特長である。

2. 翔竜橋現場実験要領

北海道開発局設計施工の翔竜橋は、図1-a のような一般図である。

図1-b のように、仮足場上に oil jack を設置し、これによって側径間死荷重 g_2, g_3 と支持し、主径間桁は無応力状態としておく。arch crown は open になっている。これで実験準備は完了した。



仮足場上の oil jack を作動させて、 $(g_2 + g_3)$ を上げ下げしたり、或は g_3 のみを上げ下げしたりして、この時に次の事項を測定した。

- (i) 突桁端の垂直変位 d_2 (ii) 主径間桁の支間中央の垂直変位 d_1 及び $1/4$ 点の垂直変位
- (iii) arch crown 部の開閉量 d_a (iv) 主径間桁の応力分布 (v) Back stay cable の張力
- (vi) cable anchor の移動量 (これは移動が無かった)

3. 実験資料解析のための理論

(i) 桁の換算断面=次モーメント… Prestress 導入中の Langer 橋の部材変形を正しく解析するには、実際橋梁の桁の変断面形状を考慮に入れないと大きな誤差を生ずる。ここでは実際の変断面桁と同一の効果を生ずべき仮想上の定断面桁を想定し、この定断面桁の断面=次モーメントを「換算断面=次モーメント」と呼び、これを用いて解析に成功した。換算断面=次モーメントの算定公式は次のとおりである。

(ii) 単純桁の両端に等値の曲げモーメントを載荷する場合

(a) 支点撓角を等しくするような $I \dots I = l/2 \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{I_i} \dots (1)$

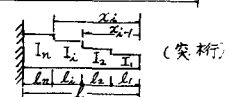
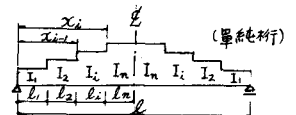
(b) 支間中央の撓みを等しくするような $I \dots I = l^2/8 \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{I_i} (x_{i-1} + \frac{l_i}{2}) \dots (2)$

(iii) 単純桁の一端に曲げモーメントを載荷する場合

(a) 載荷支点の撓角を等しくするような $I \dots I = l^2/3 \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{I_i} \{ \frac{x_i}{2} - \frac{x_{i-1}}{2} x_{i-1} + l + \frac{(x_i + x_{i-1})x_{i-1}}{l} - \frac{l_i}{2} + \frac{l_i(2x_i + x_{i-1})}{3l} \} \dots (3)$

(b) 無載荷支点の撓角を等しくするような $I \dots I = l^2/6 \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{I_i} \{ \frac{x_i}{2} + \frac{3}{2} x_{i-1} - \frac{(x_i + x_{i-1})x_{i-1}}{l} + \frac{l_i}{2} - \frac{l_i(2x_i + x_{i-1})}{3l} \} \dots (4)$

(c) 支間中央の撓みを等しくするような $I \dots I = l^2/8 \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{I_i} (x_{i-1} + \frac{l_i}{2}) \dots (5)$



(iii) 単純桁の支間中央に集中荷重を載荷する場合

(1) 支点撓角を等しくするような $I \dots I = l^2/8 \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{x_i} (x_{i+1} + \frac{l_i}{2}) \dots (6)$

(2) 支間中央の撓みを等しくするような $I \dots I = l^3/12 \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{x_i} \{ (x_i + x_{i+1})x_{i+1} + \frac{l_i(2x_i + x_{i+1})}{3} \} \dots (7)$

(iv) 単純桁の支間全体に等分布荷重を載荷する場合

(1) 支点撓角を等しくするような $I \dots I = l^2/12 \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{x_i} (\frac{2x_{i+1} + l_i}{2} - \frac{x_i^2 + x_i x_{i+1} + x_{i+1}^2}{3l}) \dots (8)$

(2) 支間中央の撓みを等しくするような I

$$I = 5l^3/92 \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{x_i} \left[\left\{ \frac{l}{2} \left(\frac{2x_{i+1} + l_i}{2} - \frac{x_i^2 + x_i x_{i+1} + x_{i+1}^2}{3l} \right) - (x_{i+1} - \frac{x_i^2}{l}) \left\{ \frac{l}{2} - (x_{i+1} + \frac{l_i}{2}) \right\} - l_i \left(\frac{l}{2} - \frac{3l x_i + l_i}{3l} \right) \left\{ \frac{l}{2} - \{ x_{i+1} + \frac{(4l - 3l_i - 8x_{i+1})l_i}{6l - 4l_i - 12x_{i+1}} \} \right\} \right] \dots (9)$$

(v) 突桁端に集中荷重を載荷する場合

(1) 突桁端撓角を等しくするような $I \dots I = l^2/2 \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{x_i} (2x_{i+1} + l_i) \dots (10)$

(2) 突桁端撓みを等しくするような $I \dots I = l^3/3 \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{x_i} (x_{i+1} x_i + \frac{l_i^2}{3}) \dots (11)$

(2) Prestress 導入中の Langer 橋の部材変形及び断面力

(i) 突桁端の垂直変位 δ_2

左突桁端の撓み影響線式は

$$\delta_2 = \left\{ -\frac{l_1 l_2}{6 \alpha l_1} x + \frac{l_2 x^3}{6 \alpha l_1 l_1} + \frac{f_s l_1}{3 \alpha l_1} (x - 2 \frac{x^2}{l_1} + \frac{x^3}{l_1^2}) (\frac{5 l_2}{8 f_s} \delta_s^*) \right\} \frac{1}{E} \dots \text{主径間}$$

$$\delta_2 = \left\{ \frac{l_1 l_2}{3 \alpha l_1} x + \frac{1}{12} (\frac{l_2 x^2}{2} - \frac{x^3}{6}) - \frac{f_s l_1}{3 \alpha l_1} x (\frac{5 l_2}{8 f_s} \delta_s^*) \right\} \frac{1}{E} \dots \text{左突径間}$$

$$\delta_2 = \left\{ \frac{l_1 l_2}{6 \alpha l_1} x - \frac{f_s l_1}{3 \alpha l_1} x (\frac{5 l_2}{8 f_s} \delta_s^*) \right\} \frac{1}{E} \dots \text{右突径間}$$

両突桁端に集中荷重 P を載荷すると

$$\delta_2 = \left(\frac{l_1 l_2}{2 \alpha l_1} + \frac{l_2^3}{3 \alpha l_1 l_2} - \frac{5 l_1 l_2^2}{12 \alpha l_1} \delta_s^* \right) \frac{P}{E} \quad \left(\frac{1}{2 \alpha l_1} = \frac{1}{3 \alpha l_1} + \frac{1}{6 \alpha l_1} \right)$$

(ii) 主径間中央の垂直変位 δ_1

主径間中央の撓み影響線式は

$$\delta_1 = \left\{ \frac{(3 l_1^2 - 4 x^2) x}{48 \alpha l_1} - \frac{25 l_2^2}{384 \alpha l_1} (x - 2 \frac{x^2}{l_1} + \frac{x^3}{l_1^2}) \delta_s^* \right\} \frac{1}{E} \dots \text{主径間}$$

$$\delta_1 = \left(-\frac{1}{16 \alpha l_1} + \frac{25}{384 \alpha l_1} \delta_s^* \right) \frac{l_2^2 x}{E} \dots \text{突径間}$$

両突桁端に集中荷重 P を載荷すると

$$\delta_1 = \left(-\frac{1}{8 \alpha l_1} + \frac{25}{192 \alpha l_1} \delta_s^* \right) \frac{l_1^2 l_2 P}{E}$$

(iii) arch crown 部の開閉量 δ_a

arch crown 部の開閉量の影響線式は

$$\delta_a = \left\{ \frac{f_s l_1^2}{3 \alpha l_1} \left(\frac{x}{l_1} - \frac{2x^2}{l_1^2} + \frac{x^3}{l_1^3} \right) (1 - \delta_s^*) + \frac{e l_1^2}{2 \alpha l_1} \left(\frac{x}{l_1} - \frac{x^2}{l_1^2} \right) \right\} \frac{1}{E} \dots \text{主径間}$$

$$\delta_a = \left\{ \frac{f_s l_1}{3 \alpha l_1} (1 - \delta_s^*) + \frac{e l_1}{2 \alpha l_1} \right\} \frac{x}{E} \dots \text{突径間}$$

両突桁端に集中荷重 P を載荷すると

$$\delta_a = \left\{ \frac{f_s l_1}{3 \alpha l_1} (1 - \delta_s^*) + \frac{e l_1}{2 \alpha l_1} \right\} \frac{2 l_2 P}{E}$$

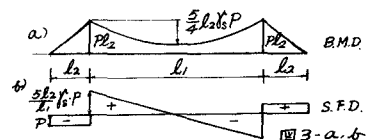
ここで、 x =支点よりの距離、 f_s =架設 cable の sag、 f_l =Langer 橋の rise、 e =Langer arch の桁取付部偏心、

δ_s^* =架設 cable による吊橋の不静定係数、 E =ヤング率、 I =断面二次モーメント、suffix 1 は主径間、suffix

2 は突径間を表し、左側の suffix は換算断面二次モーメントで使用するべき公式を意味する。

(iv) 主径間桁の曲げモーメントとせん断力

両突桁端に集中荷重 P を載荷すると、桁の曲げモーメント図及びせん断力図は 図 3-a, b のようになる。



4. 理論値と実験値との比較

実験 I: 両突桁端を 5mm だけ上げ下げした実験 ($P=2.97t$)

実験 II: 両突桁端を 76mm だけ上げ下げした実験 ($P=4.36t$)

実験 III: 吊径間鋼死荷重 (q_2) ($P=3.48t$) のみを上げ下げした実験

(1) d_2, d_1, d_a

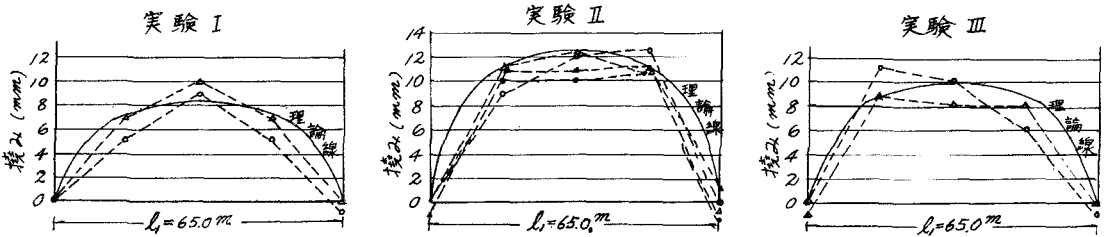
	d_2 (mm)		d_1 (mm)		d_a (mm)	
	理論値	実験値	理論値	実験値	理論値	実験値
実験 I	5.0	5.0	8.15	9.5	7.2	6.0
実験 II	7.6	7.6	12.40	11.3	10.99	10.5
実験 III	6.06	5.8	9.86	9.0	8.75	6.5

ここで、理論値の計算に用いられた換算断面二次モーメントは、次のとおりである。

(1) $I_1 = 1,250,874 \text{ cm}^4$, (2) $I_1 = 1,082,098 \text{ cm}^4$, (3) $I_1 = 1,314,357 \text{ cm}^4$, (4) $I_1 = 1,129,015 \text{ cm}^4$, (5) $I_1 = 1,082,098 \text{ cm}^4$, (6) $I_1 = 1,082,098 \text{ cm}^4$,
 (7) $I_1 = 1,048,251 \text{ cm}^4$, (8) $I_1 = 1,128,399 \text{ cm}^4$, (9) $I_1 = 1,061,349 \text{ cm}^4$, (10) $I_2 = 2,086,863 \text{ cm}^4$, (11) $I_2 = 2,280,571 \text{ cm}^4$.

又, $l_1 = 65.0 \text{ m}$, $l_2 = 6.5 \text{ m}$. $f_5 = 0.765$, $f_1 = 9.0 \text{ m}$, $f_3 = 15.0 \text{ m}$. $e = 0$ であつた。

(2) 主径間桁の撓み曲線

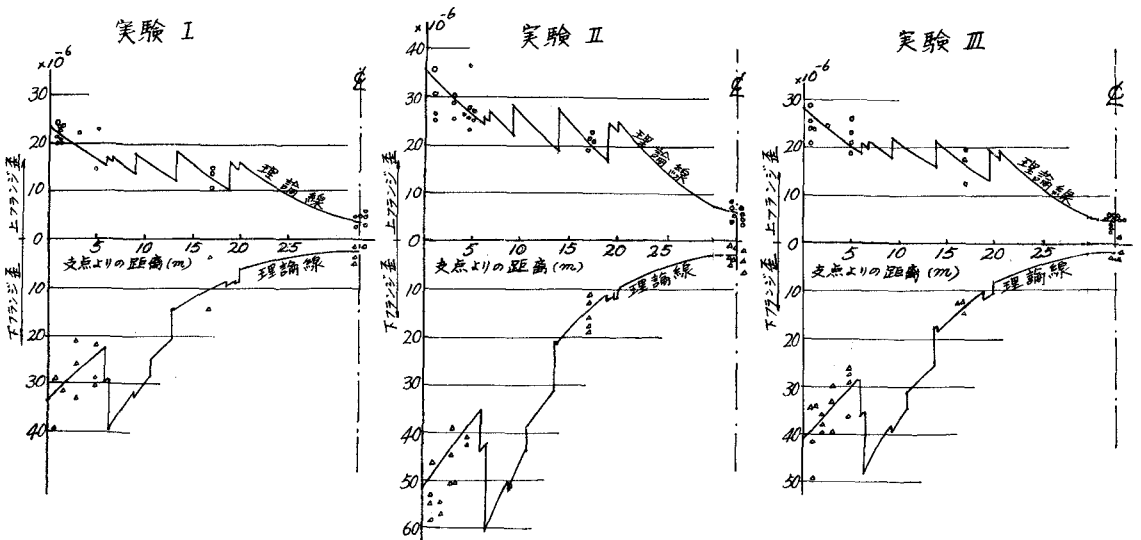


ここで、——は理論線、---○---は下流側桁実測値、---□---は上流側桁実測値、であり。

実測箇所は、各点、各点を level で測り、これらの値を直線で連結して図示した。

(3) 主径間桁の曲げ応力歪の分布

図 3-a の曲げモーメント図から、翔竜橋の実際変断面形状を考慮して、次のような理論曲線と得る。これと、実測値とを比較すれば、よく合致していることが判る。



ここで、——は理論線、○、□は、実測値である。

(注) 不静定係数 γ について

以上の理論解析においては、不静定係数 γ なるものを用いた。これは次のようなものである。すなわち、

吊橋の cable の形状及び Langer 橋の arch の形状は、夫々、 $\text{sag } f$ 及び $\text{rise } f$ をもつ二次拋物線形とする。図 4-a, b において、吊橋の cable の支間中央点及び Langer 橋の arch crown 部を仮に切断し、ここに一組の力 1 をかけたときの載荷点の水平方向の elongation 及び shortening を δ_{aa} とし、その時の補剛桁の x 点の曲げモーメントを M_a とすれば、吊橋又は Langer 橋の不静定係数 γ は

$$\gamma = \frac{\int_0^l \frac{M_a^2}{EI} dx}{\delta_{aa}} \quad \text{で表され、これは定数であり、構造物の特性を示す値である。}$$

支間 l に等布荷重 q が満載したときの曲げモーメント図、せん断力図、撓み図は、図 4-c, d, e のようになり、夫々、単純桁のもの $(1-\gamma)$ 倍になる。

非常に便利な値である。翔竜橋では、 γ_L (Langer 橋) = 0.976, γ_S (吊橋) = 0.765 であった。

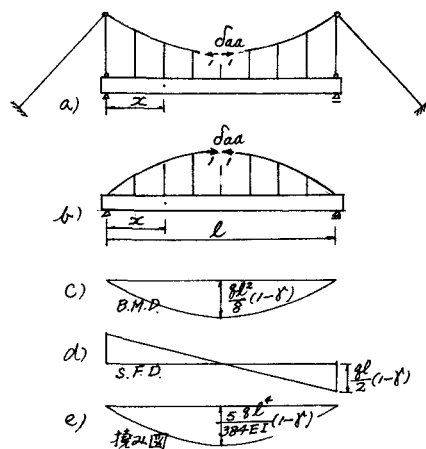


図 4-a, b, c, d, e

(あとがき)

この工法において、最も有効な prestress を得るべき側径間荷重は、片側突桁端の集中荷重に換算すると $P=42.5$ t であり、この時の最終利益量 (prestress を導入しない Langer 橋と prestress を導入した Langer 橋との差) は、1 girder 当り 1070 t-m^2 である。ここで、 $P=42.5$ t とは、cable 架設法の途中で吊橋として作用させる側径間死荷重のことであり、もしも、側径間死荷重だけで不足のときは、別に他所から surcharge (砂袋など) をもってきて載荷し、Langer 橋完成後、この surcharge を撤去すればよい。全く同一の効果を生むことになる。この理論は、ここでは省略した。

本工法の完成に当り、北海道開発局上戸部長をはじめ、岡元、馬場、音羽、大越、平岡、竹下の各技官の協力を得たことに對し深甚なる謝意を呈する次第である。なお、本研究については、文部省科学試験研究費の助成を受けた。