

鋼橋架設工事における形状と残留架設能力

横河工事(株)

高岡司郎

〃

日産順三郎

〃

○ 広田和彦

〃

石倉善弘

1. まえがき

鋼橋の架設工事において完成形状はしばしば計画形状と異なった状態で完成される場合が多く、この計画形状と完成形状間の誤差の原因として、○設計誤差、○製作誤差、○組立誤差、○仮組架設時の日照による誤差等が考えられている。本文ではこれらのうち、○組立誤差、○仮組架設時の日照による誤差を取りあげ、これによって発生するキャンバー誤差と残留能力について述べる。組立誤差の原因としては、現場継手部の穴のズレによる誤差、現場溶接ひずみによる誤差等が考えられるが、本文では「現場継手部の穴のズレによる誤差」のみに着目する。

現場継手部の穴のズレは、組立時の形状保持のため打込むドリフトピン径とスプラインの穴径との差、およびドリフトピン径、穴径自体の誤差により生ずる。穴がズレて組立てられた場合には、橋桁の伸縮、あるいはソリという形で表われてくるが、橋桁の伸縮についてはその量太小さくほとんど問題にならない。問題となるのは、ケタにソリが発生することであり、たとえば上フランジの穴のズレが正、下フランジの穴のズレが負（あるいは上フランジ負、下フランジ正）となり、継手部で折れて組立てられる状態がそれである。なお継手部における桁の折角の最大値 θ は次式で示される。

$$\theta = 4 \times \Delta / h_w \quad (1)$$

$$\Delta = (D_1 - D_2) + \Delta_1 + \Delta_2 \quad (2)$$

$$h_w = \text{ウェブ高}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} D_1 : \text{穴の呼び径} \\ D_2 : \text{ピン呼び径} \\ \Delta_1 : \text{穴の誤差} \\ \Delta_2 : \text{ピンの誤差} \end{array} \right.$$

仮組架設時の日照による誤差は、架設はもちろん仮組も屋外で行うのが一般であり、太陽光線の直射を受けている桁は、上フランジが伸び、下フランジが縮む状態がキャンバーに合わせ、仮組し穴くりされ、架設地床ではそのまま穴合せして組立てるために発生する誤差である。このように工場では中に、規定キャンバーに組立てられた桁は、組立て誤差が全くないものとしても、すでに誤差が入っており、夜間あるいは床版打設後は上下フランジの温度差がなくなり、上フランジが縮み、下フランジが伸びようとする。その結果単支間のプレートガーダーでは逆キャンバー（下ソリ）になったり、不静定構造では形状が狂い、かつ残留能力が発生する。

以上のことから「穴のズレによる誤差」「日照による誤差」にフイとした計算式を作り、プレートガーダー4橋（単径間 2・3・4径間連続桁）アーチ系橋梁2橋（ランガー・ローゼ）の実橋諸元を使って数値計算をしてみよう。

2. 它のズレによる形状と残留架設応力の計算式

単径間桁の継手部折角による形状は図-1で表わされるが、この時の変位量 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ は図-2に示すごとく単径間桁に $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ なる荷重を載荷した梁のモーメント m_1, m_2, m_3 と等しい。

一方連続桁の継手部折角による形状および残留応力は次の方法で計算する。

まず連続桁の中間支点を解放して両端支点のみで支持した状態の梁(図-3)を静定基本系とする。この静定基本系に継手部折角を加えた場合の各支点位置での変位 $\delta_{01} \sim \delta_{0n}$ を単径間と同じ方法で求める。同じく静定基本系の i 点に $P=1$ なる荷重を載荷した場合の j 点のたわみを δ_{ij} とし $i=1 \sim n, j=1 \sim n$ のすべてについて計算する。連続桁の継手部折角による支点反力の増減を $R_0, R_1 \sim R_n, R_{n+1}$ とすれば δ と R の関係は次式で表される。

$$\delta_{0j} = R_0 \delta_{0j} + \dots + R_n \delta_{nj} \quad (3)$$

式-3をすべての支点位置についてまとめると

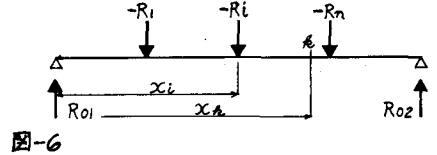
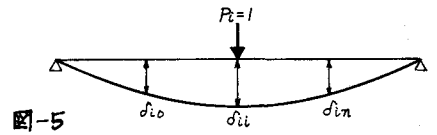
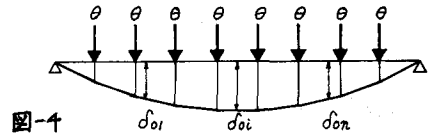
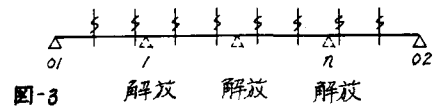
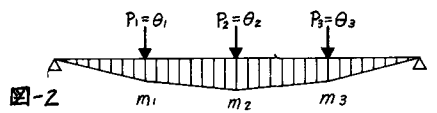
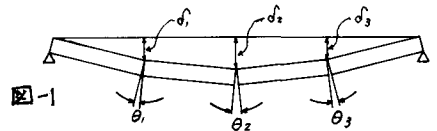
$$\begin{vmatrix} R_0 \\ - \\ R_n \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \delta_{01} & - & \delta_{0n} \\ - & - & - \\ \delta_{n1} & - & \delta_{nn} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \delta_{01} \\ - \\ \delta_{0n} \end{vmatrix} \quad (4)$$

となり、上式より $R_1 \sim R_n$ を求める。次に R_0, R_{n+1} は静定基本系に $-R_1 \sim -R_n$ を載荷した時の両端支点反力である。(図-6参照)

次に $R_1 \sim R_n$ を使って連続桁の任意点(点 k)の変形および残留曲げモーメントを次式で求める。

$$\delta_k = \delta_{0k} - (R_1 \delta_{1k} + \dots + R_n \delta_{nk}) \quad (5)$$

$$M_k = R_0 x_k + \sum_{i=1}^{(n-1)} R_i (x_k - x_i) \quad (6)$$



3. 日照による形状と架設残留応力の計算式

太陽光線の直射を受けている桁のソリ量の計算は次のように計算する。まず上フランジ両端を側方より固定した桁が太陽光線の直射を受け、上フランジだけが Δt °C だけ温度上昇した場合、上フ

ランジは伸びることが出来ず、内部応力が発生し、その結果両端の支持点に内部応力とつりあった反力 (Nt) を生ずる。この時部材内部でのひずみがないため桁はなんら変形を起さない。もし両端の支持点を解放すれば上フランジの応力が、ウェブ・下フランジに導入され、全断面の合計応力が零になるまで桁は変形する。この変形は温度が一様な桁の上フランジを張力 Nt で引張った状態での変形と一致し、また内部応力は、図-9に示す応力分布と等えられる。よって上フランジのみが $\Delta t^{\circ}\text{C}$ だけ温度上昇した桁の変形は、図-8より次式で示されるモーメント荷重 (Mt) を受けた桁の変形を求めればよい。

$$Mt = Nt \times y_0$$

$$= \sigma_t \times (A_F \times y_0) \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_t : \text{みかけの温度応力} (= E \cdot \alpha \cdot \Delta t) \\ A_F : \text{上フランジ断面積} \\ y_0 : \text{図中の上フランジまでの距離} \end{array} \right.$$

次に、太陽光線直射下で仮組、架設された桁が、夜間、曇天時、あるいは床版打設後どのような形状と残留応力になるかを、次の方法で求める。

まず、単径間桁の形状は図-10に示すごとく各構成断面にみあった曲げモーメント荷重を載荷した単径間桁のためであり、残留応力は零となる。(この場合、曲げモーメントは梁の下側が引張りになるよう載荷する。)

一連続桁の形状および残留応力は、前項の継手部折角の場合と同じ方法で求める。まず連続桁の中間支持点を解放して両端支持点のみで支持した状態の梁(図-11)を静定基本系とする。その静定基本系に各構成断面にみあった曲げモーメント荷重を載荷した場合の各支持点位置での変位 $\delta_{01} \sim \delta_{0n}$ を単径間桁と同じ方法で求める。

同じく静定基本系、しまた $P=1$ なる荷重を載荷した場合の δ_{ij} と $1 \leq i \leq n$, $j=1 \sim n$ のすべてについて計算する。以下、支持反力 R 、連続桁の形状 δ 、連続桁の残留応力 M は式-4, 5, 6を使って求める。

4. 実橋における数値計算

プレートガーダー4橋(単径間および2～4径間連続)、アーチ型橋梁2橋(ランガー、ローゼ)について、次のズレ量は $\Delta = 0.25 \text{ mm}$ (式-2参照)で継手部折角は下開き、日照時の上フラン

図-7

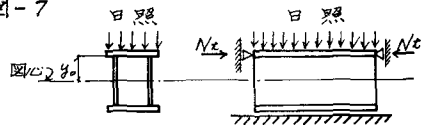


図-8

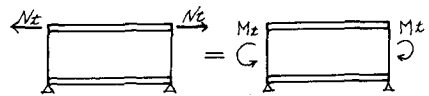


図-9

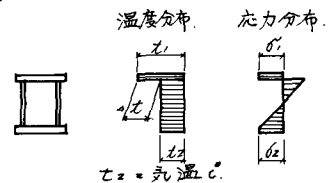


図-10

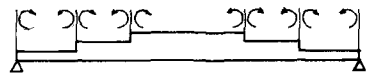


図-11

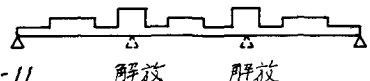
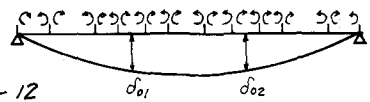


図-12



		主桁構成断面 (X mm)	計算諸元 I: 断面2次モーメント M _t : 4t=10° Cに於けるモーメント	
プレート ガーダー	2 径間連続			
	3 径間連続			
	4 径間連続			
アーチ 型式橋梁	ラン ガー		アーチ構成断面 	
	ロー ゼ			
基本系 のため	単 径 間		2 径間連続桁	
	主桁仮定断面		たわみ図 	

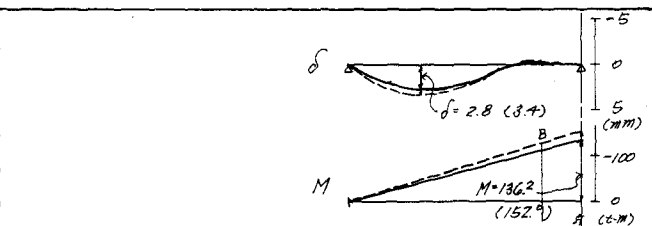
残留応力

$M = t \cdot m \cdot \sigma$ 上段 = 57 ラジ
 $N = t \cdot (kg/cm^2)$ 下段 = 77 ラジ

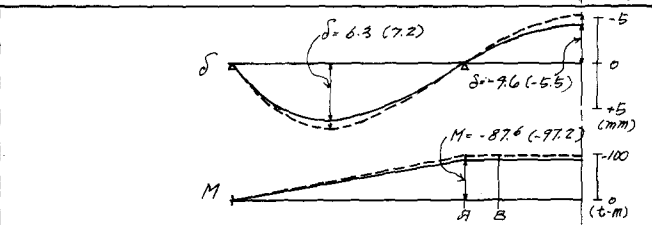
たわみ図 : モーメント図

実線: 応力のズレによる誤差 ($\Delta = 0.25 mm$)
 破線: 日照による誤差 ($\Delta t = 10^\circ C$)

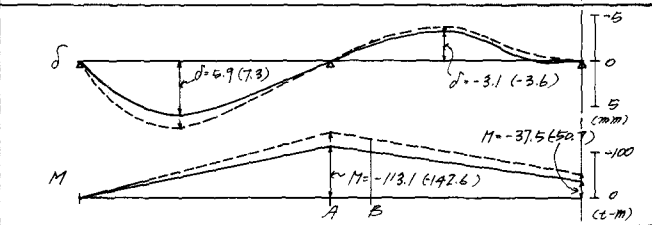
	A 断面		B 断面	
	M	σ	M	σ
I	-136.2	77	-112.9	152
		-75		-172
II	-152.0	86	-126.0	170
		-89		-192



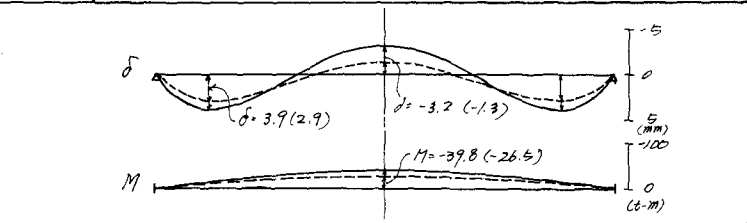
	A 断面		B 断面	
	M	σ	M	σ
I	-87.6	62	-87.6	118
		-55		-133
II	-97.2	69	-97.2	131
		-62		-148



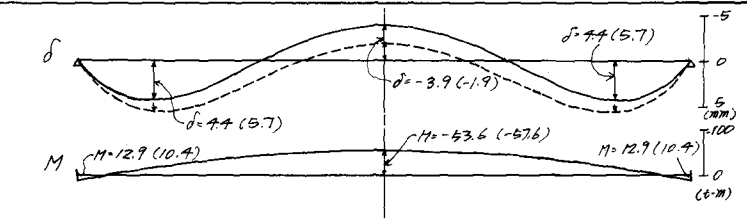
	A 断面		B 断面	
	M	σ	M	σ
I	-113.1	65	-100.7	139
		-62		-139
II	-142.6	82	-127.6	176
		-78		-176



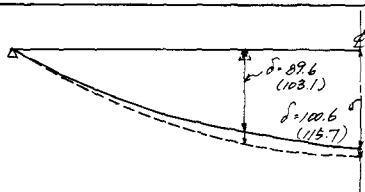
	補剛桁		
	M	N	σ
I	-39.8	2.7	27
			-156
II	-26.5	1.8	14
			-103



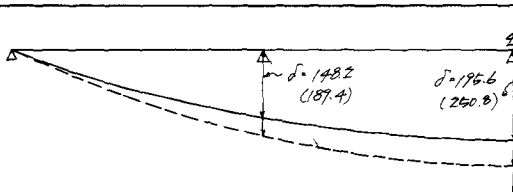
	補剛桁		
	M	N	σ
I	-53.6	-5.5	113
			-97
II	-57.6	5.8	121
			-104



3 径間連続桁



4 径間連続桁



ジ上昇温度は $\Delta\theta = +10^\circ\text{C}$ (式-7参照) とし、穴のズレによる誤差 (I) 日照による誤差 (II) の数値計算結果を前頁に示す。プレートガーダーの2径間連続桁は、3主桁箱桁橋、コンクリート床版 車道幅員 14 ~ 16 m であり、リブを省略した断面で計算した。また単径間のプレートガーダーは2径間連続桁の最小断面を計算断面とした。ランガー橋、ローゼ橋は補剛桁、アーチとそれぞれの最大断面をとり形状、残留応力、および残留応力度を求めた。

数値計算結果をみると、不静定構造橋梁の形状変化は単径間プレートガーダーに比べてほとんど問題にはならないくらいに小さい。しかし、形状変化が拘束された分だけ桁内部に残留応力が発生し、たとえば日照による誤差についてみると連続桁で最大 5.5 t/cm^2 (2径間A点) ローゼ橋で最大 5.8 t/cm^2 を示し、これによる応力度はそれぞれ 86 kg/cm^2 、 121 kg/cm^2 となる。また連続桁の最大応力度は2径間B点で 192 kg/cm^2 と非常に大きい。

日照による誤差の静定基本系のためには、2径間連続桁で 53 mm の径間連続桁で 106 mm の径間連続桁で 254 mm と大きく、いかえればそれに相当する不平等下を起した桁の応力状態に等しいといえる。

5. 考察

不静定構造の穴のズレによる誤差について、今回の数値計算はすべての誤差が同じ方向に表れた場合の計算をしたが、架設時に注意して継手部の穴を合わせ、充分な数のドリフトピンを用いて形状係数につめればその狂いを小さくすることが出来、余り問題にならない。

次に日照による誤差について述べる。

過去の実態から考えても、単径間プレートガーダーのキャンバーは計画値よりも下りぎみになる傾向があり、このため架設では製作キャンバーより $10 \sim 20 \text{ mm}$ 程度上げ越しぎみにして計画キャンバーに合致させている場合が多い。このことは日照による誤差が影響しているものと思われる。しかし単径間プレートガーダーの場合は、応力上問題はないので、床版のハンチを調整することで、ましたる不都合を生じていない。

しかし不静定橋梁では残留応力がつきまとい、問題が残される。いままで不静定構造の橋梁 (連続桁、ランガー・ローゼ) について単径間プレートガーダーと同じく、日照による誤差の影響にあまり注意がはらわれていないように思われるが、前項の結果をみると、充分な検討が必要であらう。今回の数値計算は上フランジの温度差を、 $\Delta\theta = +10^\circ\text{C}$ として計算したが、真夏の太陽光線の直射を受けている桁の温度差は $\Delta\theta = +30^\circ\text{C}$ 近くになることと考えると、その残留応力度は温度変化による許容応力度割増 15% をはるかに越えたものになることが充分に予想される。そして主桁が床版によって覆われる連続桁・ランガー、およびローゼについてみるとこの残留応力は床版コンクリート打設後は、永久に導入される応力である。

しかしこの残留応力の大きさは、仮組・仮設時の天候・四季によっても変わり、極端な場合は、ぜんぜん導入されないこともあるため、問題が複雑である。

6. 結 び

以上、設計誤差、製作誤差以外の原因で、架設完了時に表われる形状と残留応力について述べてきたが、その対策について次の様に考える。

まず、単径間プレートガーダーについては、考察でも述べたとおり床版ハンク量で路面を修正すれば計画どおりの完成路面が得られ、かつ残留応力は残らない。

しかし、不静定橋梁においては、架設時に形状と残留応力を適当な方法で除去するか、あるいはあらかじめ設計時に残留応力を考慮した断面にしておかなければならない。

架設時に処理出来る方法について述べると、まず、応力的には閉合という工程を加えることにより解決出来る。図-13に示すごく片持式架設を前提として設計した径間連続桁では、中央径間の中心まで片持架設した後、夜間・測定データに従ってスプライスの穴あけをおこなひ、閉合させる。しかし、この方法でおこなう場合、もし日照の影響を受けておこなう場合板組された桁は側径間で下方にそり、中央径間で上方へ曲がり上った形状となり、形状的にも、また閉合継手部の構造についても問題がある。この中央径間の形状については図-15に示すごく閉合桁を設けることにより、側径間の下りは別としても中央径間の形状および継手部の形状は改善される。

また片持式架設の設計がなされていない径間連続桁についても図-16に示すごく、中央径間の鋼重によるモーメントの零点附近に閉合継手を設け、夜間の測定結果によってスプライスの穴あけをおこなえば、同じく残留応力の問題は解決する。同じことが2径間連続桁についてもいえる。(図-17参照)

また、形状の誤差については、ステージング上での組立時に単径間プレートガーダーと同様に片越しぎみのキャンバーで組立てれば形状の改善が出来る。(図-19参照) 片持式架設部については上フランジが伸び、下フランジが縮む傾向で組立てれば日照による伸びをかなり相殺出来る。

図-13

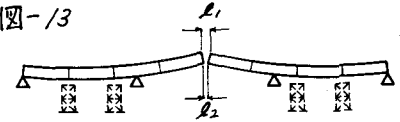


図-14

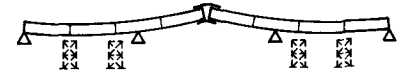


図-15



図-16

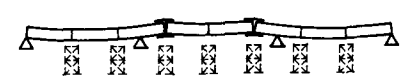


図-17

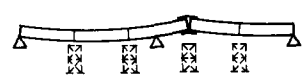


図-18

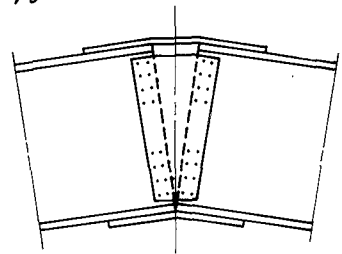


図-19-1

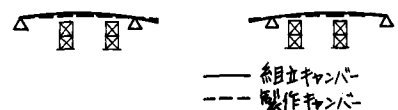
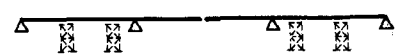


図-19-2



しかし、ランガ橋・ローゼ橋については、実際に適当な改善方法がなく、また連続橋について基礎等の条件で前記の方法がとれない場合は、設計の段階で充分に検討し、必要があれば日照を考慮した断面にしておかなければならない。その場合は形状を犠牲にすることを考えなければならぬ。

いずれにしても、断面形状に対する問題は、それが必要とされる場合は出来上り形状に含ませるハニヤ量を決め床版コンクリートを打設すべきである。この場合、ハニヤ量の増減によるチャンバーの変化について検討を忘れてはならない。

最後に、鋼橋の施工において特に考慮しなければならない点について述べると、設計では架設工法・架設時期、仮組の状態等を検討し、その施工条件について設計書に明記し、工場仮組では天候、気温、析出部の温度等を測定し、これらの記録を架設に必ず反映させなければならない。

したがって架設では、設計時に定められた施工条件と工場仮組より与えられた諸記録を含めて検討し、施工しなければならないが、ただ、架設の基本となる条件はあらかじめ工場仮組において設定された継手応力を忠実に再現させることであるから、ドリフトセンによる形状保持を基本とし、継手応力の関係をふまえて渡すべきではない。