

I-20 接触式高力ボルト支圧接合法の研究

— 桁の移動量に及ぼすボルト孔のクリアランスの影響について —

北海道大学工学部 正 員 渡 辺 昇
 北海道大学工学部 正 員 佐 藤 浩 一
 北海道大学工学部 学生員 高 橋 渡
 北海道大学工学部 及 川 昭 夫

1. まえがき

現在、鋼橋の継手部の接合には高力ボルト摩擦接合が用いられているが、最近になつて、その欠陥が目立つてきている。特に、遅れ破壊によるボルトの欠落は大きな問題の一つである。これに代るものとして著者らは接触式高力ボルト支圧接合法を開発し、研究成果の一部を既に発表している。^{1), 2), 3), 4)}

本接合法は活荷重が載荷される前、即ち、支点を回転中心として上げ越した橋桁が自重により回転沈降し、橋桁全体が水平になつた時点(以降、回転沈降水平時という)で、出来るだけ多くボルトとボルト孔(母材孔とスプライス孔とがある)が接触(以降、メタルタッチという)しているのが望ましい。

一般に、ボルト孔径とボルト軸径には差(以降、クリアランス c という)があり、このクリアランスと上げ越し量との関係は文献(3)で示されているような簡易計算法により求められる。しかしながら、上げ越した橋桁を一度に回転沈降させた時、橋桁の中立軸より下方では、特に、下フランジではメタルタッチしていない。今度、著者らは回転水平時に出来るだけ多くメタルタッチさせる工法を開発した。

本研究の目的はこの開発した工法の妥当性を理論的に解明することである。本工法は回転沈降を一度にさせるのではなく、二度に分けてさせるのが特長であり、回転沈降水平時に橋桁は鉛直方向に沈降すると同時に水平方向にも移動する。従つて、これら両方向の移動量とクリアランスとの相互関係を明確にすると同時に、また、回転沈降時の母材孔とスプライス孔の位置とクリアランスとの相互関係を明確にすることである。

2. 理論解析

本論文では図-1のようなスパン中央で接合する場合を考える。また、継手部の左側半分についてのみ考える。水平時の母材孔の座標中心(以降、座標という)を (x_i, y_j) とする。次に、支点を中心にして、 $(\beta + \gamma)$ の角度だけ上げ越す。その時の母材孔の座標とスプライス孔の座標を一致させる。その関係は図-2 のようになる。第一回転沈降(以降、第一沈降という)で β だけもどした時ある個所がメタルタッチする。その点を中心にして γ だけ時計まわりに回転させながら第二回転沈降(以降、第二沈降という)させると、上げ越し前の状態となり、母材孔は縦横とも一直線に並ぶ、即ち、 y 軸と x 軸と平行になる。図-2 より、 X, Y, u, v は次式により求まる。このうち $u_{ij\beta}, v_{ij\beta}$ が第一沈降である。

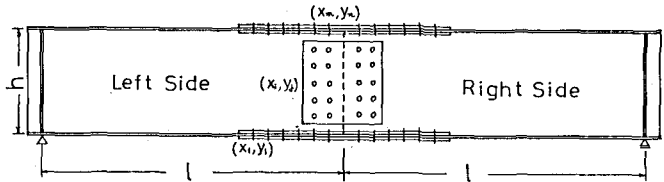


図-1

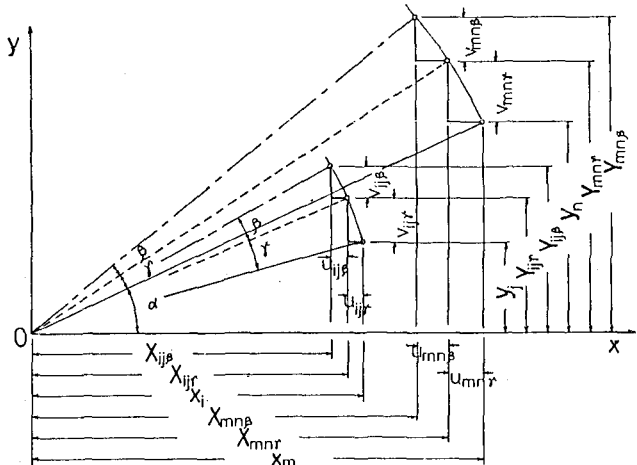


図-2 座標中心と u_{ij}, v_{ij} との関係

$$\begin{Bmatrix} X_{ij\gamma} \\ Y_{ij\gamma} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma \\ \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_i \\ y_j \end{Bmatrix} \dots (1) \quad \begin{Bmatrix} X_{ij\beta} \\ Y_{ij\beta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta+\gamma) & -\sin(\beta+\gamma) \\ \sin(\beta+\gamma) & \cos(\beta+\gamma) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_i \\ y_j \end{Bmatrix} \dots (2)$$

$$\begin{Bmatrix} u_{ij\gamma} \\ v_{ij\gamma} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_i - X_{ij\gamma} \\ y_j - Y_{ij\gamma} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \cos \gamma & \sin \gamma \\ \sin \gamma & \cos \gamma - 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_i \\ y_j \end{Bmatrix} \dots (3)$$

$$\begin{Bmatrix} u_{ij\beta} \\ v_{ij\beta} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X_{ij\gamma} - X_{ij\beta} \\ Y_{ij\gamma} - Y_{ij\beta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma - \cos(\beta+\gamma) & \sin(\beta+\gamma) - \sin \gamma \\ \sin(\beta+\gamma) - \sin \gamma & \cos(\beta+\gamma) - \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_i \\ y_j \end{Bmatrix} \dots (4)$$

次に、座標 $(X_{mn\gamma}, Y_{mn\gamma})$ を中心にして γ だけ時計まわりに回転させた時の母材孔の座標中心は次式で求まる。それを座標 $(X_{ij\gamma}, Y_{ij\gamma})$ で表示すれば

$$\begin{Bmatrix} X_{ij\gamma} \\ Y_{ij\gamma} \end{Bmatrix}_{\text{回}} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma \\ -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_{ij\gamma} - X_{mn\gamma} \\ Y_{ij\gamma} - Y_{mn\gamma} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} X_{mn\gamma} \\ Y_{mn\gamma} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_i - u_{mn\gamma} \\ y_j + v_{mn\gamma} \end{Bmatrix} \dots (5)$$

式(5)の意味は回転後の各座標に $u_{mn\gamma}, -v_{mn\gamma}$ を加えれば、座標 (x_i, y_j) となることである。これが第二沈降である。具体的には、第一と第二沈降を組合せれば、橋桁は鉛直方向に $v_{mn\beta} + v_{mn\gamma}$ 沈降し、右側支点が $2u_{mn\gamma}$ だけ水平方向に移動することである。まだ、 β と γ は未知である。これらの角度を求めるためには座標を求め、両孔の中心間隔を求めて、その最大値をクリアランスに等しいとおけばよい。第二沈降時の母材孔の座標は $(X_{ij\gamma}, Y_{ij\gamma})$ から (x_i, y_j) に移動している。一方、スプライス孔の座標は x 方向に $u_{mn\gamma}$ だけ移動し、 y 方向に $(v_{mn\gamma} + \Delta_\gamma)$ だけ沈降している。この Δ_γ は C との関係で求まる。従つて、スプライス孔の座標は $(X_{ij\beta} + u_{mn\gamma}, Y_{ij\beta} - v_{mn\gamma} - \Delta_\gamma)$ となる。両孔の中心間隔の平方は次式で求まる。

$$\begin{aligned} e_{ij}^2 &= (x_i - X_{ij\beta} - u_{mn\gamma})^2 + (y_j - Y_{ij\beta} + v_{mn\gamma} + \Delta_\gamma)^2 \\ &= (u_{ij\beta} + u_{ij\gamma} - u_{mn\gamma})^2 + (v_{mn\gamma} + \Delta_\gamma - v_{ij\beta} - v_{ij\gamma})^2 \dots (6) \end{aligned}$$

式(6)を少し吟味してみる。後述するが、式(6)は第一沈降を包含している。また、上下フランジの場合にはスプライス板は母材と一緒に沈降するから第二項目を零とすればよい。第一項目の括弧の中の絶対値の最大を C とおけば、次の二本の式を得る。即ち、 $i=m, j=n$ の時と $i=1, j=1$ の時である。

$$C = u_{mn\beta} = x_m \{\cos \gamma - \cos(\beta+\gamma)\} + y_n \{\sin(\beta+\gamma) - \sin \gamma\} \dots (7)$$

$$\begin{aligned} C &= u_{mn\gamma} - u_{11\beta} - u_{11\gamma} = x_m \{1 - \cos \gamma\} + y_n \sin \gamma \\ &\quad - x_1 \{1 - \cos(\beta+\gamma)\} \dots (8) \end{aligned}$$

式(7), 式(8)より、 β と γ が求まる。また、式(7)を用いれば、式(6)の第一項目は次式のようになる。

$$u_{ij\beta} + u_{ij\gamma} - u_{mn\gamma} = C - \{(u_{mn\beta} + u_{mn\gamma}) - (u_{ij\beta} + u_{ij\gamma})\} \dots (9)$$

ウェブに関しては、スプライス板と母材の沈降量は等しくない。諸式の検討の結果、式(6)において $i=m, j=n-1$ の時にメタルタッチしている。従つて、 Δ_γ は次式で求まる。

$$\text{ここで、} \Delta_\gamma = -v_{mn\gamma} + (v_{m,n-1,\beta} + v_{m,n-1,\gamma}) \pm a \dots (10) \quad (11)$$

$$a = \sqrt{2C \{ (u_{mn\beta} - u_{m,n-1,\beta}) + (u_{mn\gamma} - u_{m,n-1,\gamma}) \} - \{ (u_{mn\beta} - u_{m,n-1,\beta}) + (u_{mn\gamma} - u_{m,n-1,\gamma}) \}^2}$$

$$\begin{aligned} \text{式(6)は } e_{ij}^2 &= \left[C - \{(u_{mn\beta} - u_{ij\beta}) + (u_{mn\gamma} - u_{ij\gamma})\} \right]^2 \\ &\quad + k \left[(v_{m,n-1,\beta} - v_{ij\beta}) + (v_{m,n-1,\gamma} - v_{ij\gamma}) - a \right]^2 \dots (12) \end{aligned}$$

となる。この式(12)が両孔の中心間隔を求める一般式であり、上下フランジの場合は $k=0$ とし、ウェブの場合は $k=1$ とすればよい。なお、式(12)において、 γ の含まれている項を零とすれば、第一沈降の時の e_{ij} を求める式となる。式(11)を別の形で表示することも出来るが省略する。桁の鉛直方向の移動量(δ_v)と水平方向の移動量(δ_h)は前述のとおりであるが、式で表示すれば、次式のようになる。

$$\delta_v = v_{mn\beta} + v_{mn\gamma} = x_m \sin(\beta + \gamma) - y_n \{1 - \cos(\beta + \gamma)\} \div 2C \frac{x_m}{y_n} \dots (13)$$

$$\delta_h = 2u_{mn\gamma} = 2\{x_m(1 - \cos \gamma) + y_n \sin \gamma\} \div 2C \dots (14)$$

3. 数値計算例と考察

図-1 において、 $l=2000$ mm, $h=450$ mm, $C=1.3$ mm, $m=6$, $n=7$, ボルト孔間隔=75 mm, ウェブの孔は片側2列とした。

$\delta_v=11.52$ mm (11.56 mm), $\delta_h=2.65$ mm (2.60 mm) である。括弧内の値は式(13), 式(14)の簡易計算法による値である。 δ_h の値が $2C$ より大きいのは、第一沈降で母材孔がスプライス孔の右側に移動し、第二沈降で桁の中立軸より下方が逆方向(左方向)に移動するためである。

Table-1 $u_{ij\beta}$

Upper Flange						
1.2954	1.2963	1.2972	1.2982	1.2991	1.3000	
(mm)				Web	1.0865	1.0874
					0.8740	0.8749
					0.6614	0.6623
					0.4488	0.4498
					0.2363	0.2372
0.0200	0.0209	0.0219	0.0228	0.0237	0.0246	
Lower Flange						

Table-4 $u_{ij\beta} + u_{ij\gamma} - u_{mn\gamma}$

Upper Flange						
1.2938	1.2950	1.2963	1.2975	1.2988	1.3000	
(mm)				Web	0.8665	0.8677
					0.4342	0.4354
					0.0019	0.0031
					-0.4304	-0.4292
					-0.8627	-0.8615
-1.3000	-1.2988	-1.2975	-1.2963	-1.2950	-1.2938	
Lower Flange						

Table-2 $v_{ij\beta}$

Upper Flange						
4.6000	4.8125	5.0251	5.2376	5.4502	5.6628	
(mm)				Web	5.4511	5.6637
					5.4520	5.6646
					5.4530	5.6655
					5.4539	5.6665
					5.4548	5.6674
4.6055	4.8181	5.0306	5.2432	5.4557	5.6683	
Lower Flange						

Table-5

Upper Flange						
1.1947	0.7624	0.3301	-0.1022	-0.5345	-0.9668	
$v_{mny} + \Delta_y$ $-v_{ij\beta} - v_{ijy}$ (mm)				Web	-0.5357	-0.9680
					-0.5370	-0.9693
					-0.5382	-0.9705
					-0.5995	-0.9718
					-0.5407	-0.9730
1.1872	0.7549	0.3226	-0.1097	-0.5420	-0.9743	
Lower Flange						

Table-3 e_{ij} of First Down

Upper Flange						
1.2954	1.2963	1.2972	1.2982	1.2991	1.3000	
(mm)				Web	1.1960	1.3000
					1.0072	1.1288
					0.8301	0.9741
					0.6738	0.8448
					0.5562	0.7543
0.0200	0.0209	0.0219	0.0228	0.0237	0.0246	
Lower Flange						

Table-6 e_{ij} of Second Down

Upper Flange						
1.2938	1.2950	1.2963	1.2975	1.2988	1.3000	
(mm)				Web	1.0187	1.3000
					0.6905	1.0626
					0.5382	0.9705
					0.6901	1.0623
					1.0182	1.2996
1.3000	1.2988	1.2975	1.2963	1.2950	1.2938	
Lower Flange						

表一1 は $u_{ij\beta}$ を示したものである。値が正とは母材孔がスプライス孔の右側にあることを意味しており、中立軸より下方ではその位置関係が逆になつていなければならず、このために第二沈降させるのである。また、 x より y に大きく依存していることもわかる。このことは 表一7 から明らかである。式(4)から最大になるのは x が大きく、 y が大きい時であることもわかる。

表一2 は $v_{ij\beta}$ を示したものである。この値は y より x に大きく依存していることがわかる。このことは 表一7 から明らかである。また、式(4)から最大になるのは x が大きく、 y が小さい時であることもわかる。

表一3 は第一沈降時の母材孔とスプライス孔との中心間隔(e_{ij})を示したものである。 $e_{67}=e_{66}=1.3\text{ mm}$ であり、上フランジとウエブ箇所でメタルタッチしているのがわかる。他はタッチしていない。しかしながら、上フランジに関しては実用上メタルタッチしているとしてよい。

表一4 は $u_{ij\beta}+u_{ij\gamma}-u_{mny}$ を示したものである。値が正とは母材孔がスプライス孔の右側にあることを意味しており、負とはその逆である。中立軸より下方では全て負となつており、表一1 と比較して、孔同士の位置関係が改善されたことを意味している。

表一5 は $v_{m,n-1,\beta}+v_{m,n-1,\gamma}-v_{ij\beta}-v_{ij\gamma}-a$ を示したものである。値が正とは母材孔がスプライス孔より上方にあることを示しており、負とはその逆である。

表一6 は 第二沈降時の母材孔とスプライス孔との中心間隔(e_{ij})を示したものである。表一3 と比較して、中立軸より下方での孔同士の位置関係が改善され、上下フランジは実用上全部メタルタッチしているとしてよい。

表一7 はこの計算例で得られた角度に関連した値を表にしたものである。 l, h, C により β と γ の値は変化するが、本接合法で用いる β と γ は非常に小さい値であるので、諸式の特性を検討する時に参考になるので表示したものである。例えば、 $\sin \beta \doteq \beta$, $\cos \beta \doteq 1$, などすぐにわかる。これらを利用すれば、式(13),式(14)の簡易計算法が有効であることがわかる。

4. あとがき

本研究で得られた事項は次のとおりである。

- (1) 架設完了後出来るだけ多くメタルタッチさせるための工法を理論的に解明した。
- (2) 本工法は二段階に分けて回転沈降させるものである。第一回転沈降では母材は鉛直、水平方向に移動するが、右側支点は水平方向に移動しない。第二回転沈降では母材は鉛直、水平方向に移動し、かつ、右側支点も水平方向に移動する。
- (3) 上記の移動量を理論的に求め、かつ、簡易計算法を確立した。
- (4) 二段階回転沈降時の母材孔とスプライス孔の座標中心位置を理論的に明確に求めた。
- (5) 座標を用いて、孔同士の中心間隔を理論的に明確に求めた。その場合、フランジとウエブのスプライス板の移動量が異なるが、一本の式(12)で表示可能となつた。また、第一回転沈降は第二回転沈降の特別の場合であることが判明した。
- (6) 孔同士の水平よりの傾きも容易に求めることが出来る(表一4 , 表一5 を利用して)。

参 考 文 献

- 1) 高瀬,武藤,渡辺：高力ボルト支圧接合法の実験的研究(その一) 第15回日本道路会議論文集。
- 2) 渡辺,佐藤,林川,及川,三ツ木,高橋：高力ボルト支圧接合に関する研究 土木学会北海道支部論文報告集,第40号。
- 3) 渡辺,佐藤,林川,及川：高力ボルト支圧接合法の研究 北海道大学工学部研究報告,第118号。
- 4) 三ツ木,渡辺,高橋：接触式高力ボルト支圧接合に関する実験的研究 土木学会第39回年次学術講演会。
- 5) 北海道における鋼道路橋設計及び施工指針(昭和58年度版)。

Table-7 β and γ

β	Radian	0.002834179
	° ' "	0° 09' 45"
γ	Radian	0.002929799
	° ' "	0° 10' 04"
$\beta+\gamma$	Radian	0.005763978
	° ' "	0° 19' 49"
$\cos \beta$		0.999995984
$\cos \gamma$		0.999995708
$\cos (\beta+\gamma)$		0.999983388
$\cos \gamma-\cos (\beta+\gamma)$		0.000012320
$1-\cos \gamma$		0.000004292
$1-\cos (\beta+\gamma)$		0.000016612
$\sin \beta$		0.002834175
$\sin \gamma$		0.002929795
$\sin (\beta+\gamma)$		0.005763946
$\sin (\beta+\gamma)-\sin \gamma$		0.002834151