

論文・報告

斜角 35° を有する曲線箱桁橋の形状管理

～設計・製作・架設の全ステップを一貫管理～

Elevation Control for Simple Steel Curved Bridge with 35-degree Skewed Support

大城 泰樹 *1
OSHIRO Taiki佐藤 和樹 *2
SATO Kazuki田坂 裕一 *3
TASAKA Hiroichi石川 一成 *4
ISHIKAWA Kazunari佐久間 啓蔵 *5
SAKUMA Keizo吉田 賢二 *6
YOSHIDA Kenji

荒瀬橋は、高知県の県道窪川船戸線に位置し、四十十町琴平町と津野町船戸を結ぶ主要な幹線道路に架かる橋梁である。橋梁形式は、斜角 35° を有する橋長 109.8m の鋼単純非合成曲線箱桁橋である。斜角の非常に鋭角な斜橋であり、製作時や架設時における主桁の鉛直変位差に伴う回転変位の形状管理において高い精度管理が求められる。本稿では、部材軸回りおよび部材軸直角回りの主桁の回転変位を考慮した製作を行い、施工ステップごとの主桁の形状管理に細心の注意をはらい、施工を行った結果について述べるものである。

キーワード：斜橋、斜角、回転変位、回転キャンバー、形状管理

1. はじめに

本橋は、斜角 35°、曲線半径 60m の平面線形を有し、負反力対策として支点部に横梁構造のアウトリガーを用いた箱桁橋である。そのため、支点部の回転挙動が複雑であり、製作キャンバーおよび現場の施工ステップごとの形状管理には細心の注意を図る必要がある。

本稿は、構造解析により算出した橋軸方向および橋軸直角方向の回転変位に対するキャンバー（以下、回転キャンバー）を製作に反映することで、架設現場において想定通りの施工を実施できたかを検証するものである。

本橋の工事完了後の全景を写真 1 に示す。S2 側は斜角 35° であり、非常に鋭角な平面形状であることがわかる。



写真 1 橋梁全景

2. 橋梁概要

本橋の工事概要を下記に、構造一般図を図 1 に示す。	
工事名	県道窪川船戸線社会資本整備総合交付金（荒瀬橋）工事
工事場所	高知県高岡郡中土佐町大野見久万秋
発注者	高知県須崎土木事務所
道路規格	第 3 種第 3 級
施工会社	川田工業・北村商事特定建設共同企業体
形式	鋼単純非合成曲線箱桁橋
橋長	83.100m
支間長	80.050m
総幅員	10.000m ～ 11.000m
桁高	2 800mm ～ 2 200mm
平面曲線	R=∞ ～ A=50 ～ R=60m ～ A=50
斜角	S1 側 60°、S2 側 35°
床版	鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版）
負反力対策	S2 上の G2 主桁支点部にアウトリガーを採用
架設工法	トラッククレーンベント工法

3. 製作反映する回転キャンバーの解析モデル

斜角と曲線を有する橋梁では、斜角の影響により各主桁の鉛直変位差によるねじり変形と、曲線に伴うねじり変形による桁倒れが発生する。そのため、ねじり変形と桁倒れの挙動を考慮し、ねじりによる回転角を設定し

*1 川田工業㈱橋梁事業部工事統括部大阪工部大阪工課 主任
*2 川田工業㈱橋梁事業部工事統括部大阪工部大阪工課 工事長
*3 川田工業㈱橋梁事業部技術統括部大阪技術部四国技術課 係長

*4 川田工業㈱生産統括部生産技術部橋梁技術課 係長
*5 川田工業㈱生産統括部生産技術部橋梁技術課
*6 川田工業㈱橋梁事業部技術統括部大阪技術部四国技術課 課長

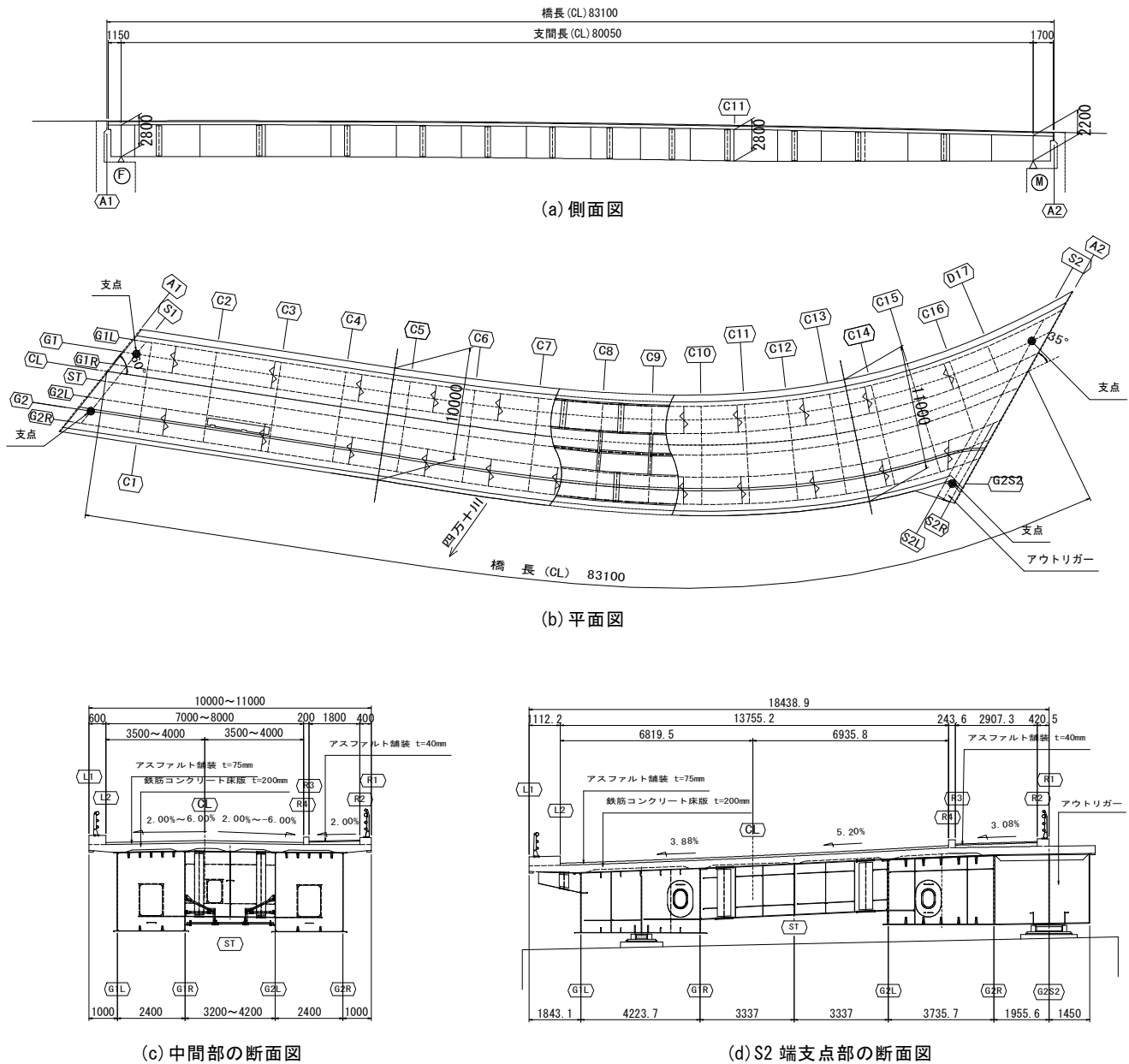


図1 構造一般図

て主桁に回転キャンバーを付与した製作を行う必要がある。本橋の回転キャンバーの設定¹⁾を行うにあたり、解析モデルの考え方について以下に述べる。

(1) 橋梁全体の解析モデル

斜角と曲線を有する橋梁において、格点ごとの部材軸回りの回転変位とその回転方向を把握するには、部材軸座標系での解析結果が必要となる。したがって、回転変位を正確に把握するために、図2に示すような主桁軸線上の格点位置から法線方向に主桁の両腹板まで張り出した剛な梁要素を組み合わせた解析モデルとした。

(2) アウトリガー支点部の解析モデル

S2 支承線上の G2 主桁側支点部は、図1(d)に示すように主桁腹板 G2R より 1955.6mm 離れたアウトリガー

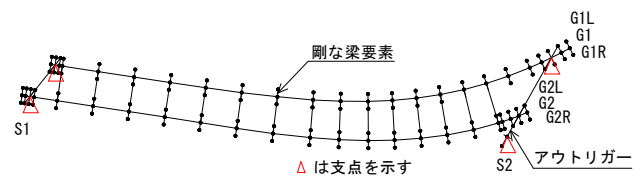
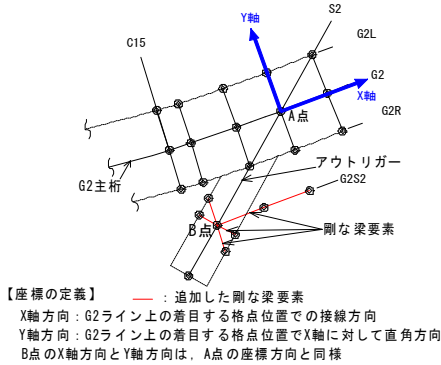


図2 本橋の解析モデル

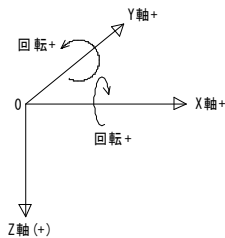
の直下に配置している。そのため、G2 主桁軸線と S2 支承線の交点 (A 点) において、回転方向および回転角が一致することを確認することを目的に、図3に示す解析モデルを作成した。A 点における G2 主桁の接線方向を X 軸、A 点において G2 主桁線と直交する軸線を Y 軸と

し、それぞれ剛な梁要素を追加する。また、アウトリガー支点 (B点) より X 軸に平行な部材、およびB点でこの部材と直交する部材は剛梁要素として追加する。

構造解析で得られる設計値、仮組立時および現場施工時における部材軸回り、部材軸直角回りの回転キャンバーの回転方向の符号図を図 4 に示す。

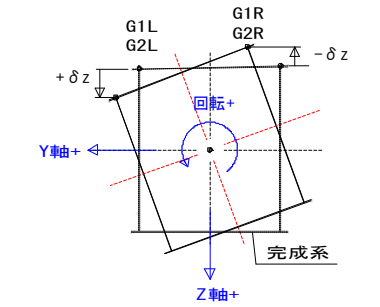


(a) 解析モデルの平面図



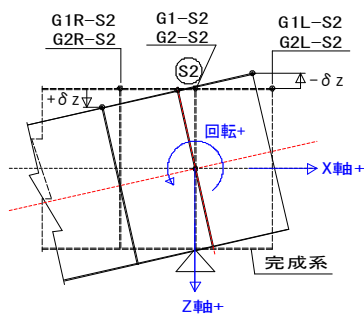
(b) 鉛直変位と回転変位の方向の定義

図 3 アウトリガーの解析モデルおよび回転角



ここで、 δz は変位、またはキャンバー値を示す。

(a) 部材軸回りの場合



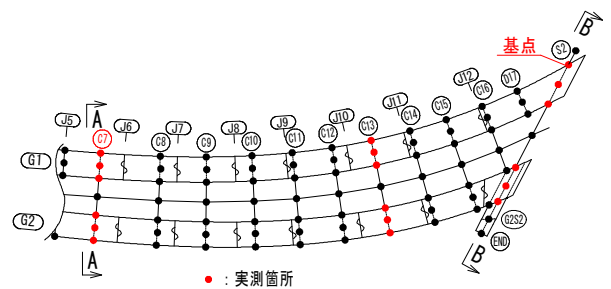
ここで、 δz は変位、またはキャンバー値を示す。

(b) 部材軸直角回りの場合

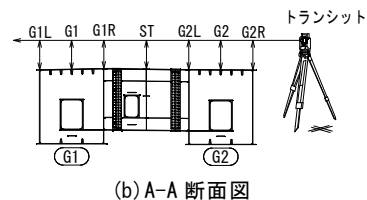
図 4 回転キャンバーの符号図

4. 仮組立時の形状管理

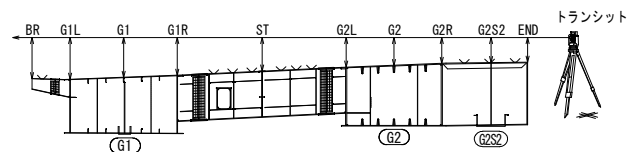
完成時において、主桁の腹板が鉛直となるように、製作工場では主桁の倒れる方向に対して逆方向にねじりを与えて製作している。仮組立時の主桁上面標高の実測箇所は図 5 に示すとおりであり、S2 支点上の G1 主桁の腹板 G1L を基点として、格点位置における主桁上面標高の差を実測した。主桁の鉛直キャンバーは主桁軸線での標高差とし、主桁の部材軸回りの回転キャンバーは、主桁の両側腹板位置の標高差としている。一方、主桁端部の桁倒れに着目した主桁の部材軸直角回りの回転キャンバーは主桁軸線上において、支点位置とその隣の格点位置との標高差から算出した。設計値と実測値を比較した結果を表 1、表 2、表 3 に示す。製作キャンバーと仮組立時の実測値の差は許容値内であり、設定した製作キャンバーとおりに主桁を製作することができた。J5-S2 間の主桁の仮組立状況および実測状況を写真 2 と写真 3 に示す。



(a) 平面図



(b) A-A 断面図



(c) B-B 断面図

図 5 仮組立時における主桁上面標高の実測箇所

表 1 仮組立時における主桁軸線位置の鉛直キャンバー

(単位: mm)

実測箇所	G7	G13	S2	
G1	設計値①	-370	-220	0
	実測値②	-372	-222	-1
	許容値	-375~-360	-225~-210	-5~+10
	差(②-①)	-2	-2	-1
G2	設計値①	-407	-183	+1
	実測値②	-411	-185	0
	許容値	-412~-397	-188~-173	-4~+11
	差(②-①)	-4	-2	-1

表 2 仮組立時における部材軸回りの回転キャンパー

実測箇所		(単位: mm)		
		C7	C13	S2
G1L	設計値①	+8	-7	-15
	実測値②	+6	-6	-14
	許容値	+3~+18	-12~+3	-20~-5
	差(②-①)	-2	+1	+1
G1R	設計値①	-8	+7	+15
	実測値②	-6	+6	+12
	許容値	-13~+2	+2~+17	+10~+25
	差(②-①)	+2	-1	-3
G2L	設計値①	+8	-7	-15
	実測値②	+7	-6	-13
	許容値	+3~+18	-12~+3	-20~-5
	差(②-①)	-1	+1	+2
G2R	設計値①	-8	+7	+15
	実測値②	-7	+6	+12
	許容値	-13~+2	+2~+17	+10~+25
	差(②-①)	+1	-1	-3

表 3 仮組立時における部材軸直角回りの回転キャンパー

実測箇所		(単位: mm)			
		S2	実測箇所	S2	
G1L	設計値①	+20	G2L	設計値①	+21
	実測値②	+20		実測値②	+22
	許容値	+15~+30		許容値	+16~+30
	差(②-①)	0		差(②-①)	+1
G1R	設計値①	-19	G2R	設計値①	-19
	実測値②	-19		実測値②	-21
	許容値	-24~-9		許容値	-24~-9
	差(②-①)	0		差(②-①)	-2

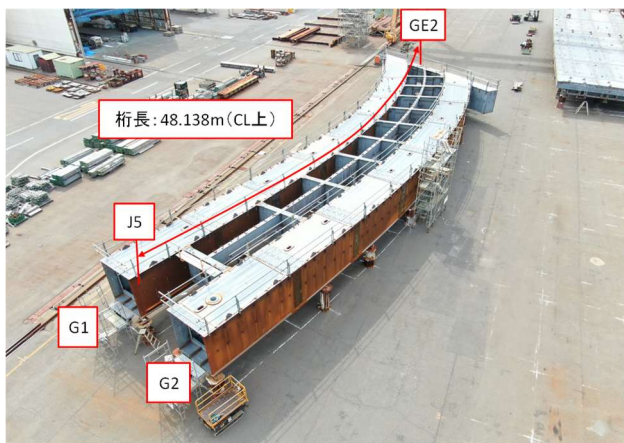


写真 2 J5-S2 間の仮組立状況



写真 3 J5-S2 間の主桁上面標高の実測状況

5. 架設工法と施工ステップごとの形状管理

(1) 架設工法

本橋の架設工法は、図 6 に示すトラッククレーンベント工法であり、支間中央部のブロックは最後に落とし込み閉合する。よって、ベント上で先行架設した主桁をジャッキアップし仕口角度を落とし込みするブロックと一致させてから連結を行い、ジャッキダウンを行うことで曲げモーメントを導入した。

(2) 主桁の形状管理

架設現場で標高を実測するステップを、表 4 に示す。STEP1, STEP2 では主桁上面標高を、STEP3 では床版上面標高を実測し、設計値と実測値の比較を行った。

(a) STEP1: ベント支持

製作工場での仮組立時と架設現場でのベント支持状態における、鉛直キャンパーおよび回転キャンパーの設計値と実測値を比較した結果を表 5, 表 6, 表 7 に示す。また、鉛直キャンパーおよび回転キャンパーの実測箇所を図 5(a) に示す。各表より、架設現場にて、概ね仮組立時の主桁形状を再現できたことを確認した。

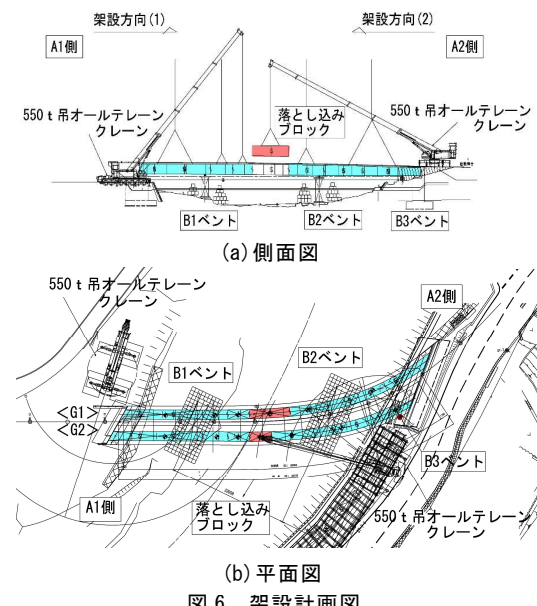


図 6 架設計画図

表 4 実測ステップ

実測ステップ	施工状況
STEP1	ベント支持時
STEP2	ベント撤去完了時(鋼桁架設完了時)
STEP3	床版打設完了時

表 5 ベント支持の G1, G2 主桁の鉛直キャンパー

実測箇所		(単位: mm)			
		ステップ	C7	C13	S2
G1	設計値	-	-370	-221	0
	実測値①	仮組立時	-372	-222	-1
	実測値②	架設時	-366	-224	+3
	許容値	-	-375~-360	-226~-211	-5~+10
	差(②-①)	-	+6	-2	+4
G2	設計値	-	-407	-183	+1
	実測値①	仮組立時	-411	-185	0
	実測値②	架設時	-405	-186	+5
	許容値	-	-412~-397	-188~-173	-4~+11
	差(②-①)	-	+6	-1	+5

表 6 主桁の部材軸回りの回転キャンパー

実測箇所		ステップ	C7	C13	S2
G1L	設計値	-	+8	-7	-15
	実測値①	仮組立時	+6	-6	-14
	実測値②	架設時	+9	-7	-16
	許容値	-	+3~+18	-12~+3	-20~-5
	差(②-①)	-	+3	-1	-2
G1R	設計値	-	-8	+7	+15
	実測値①	仮組立時	-6	+6	+12
	実測値②	架設時	-9	+7	+16
	許容値	-	-13~+2	+2~+17	+10~+25
	差(②-①)	-	-3	+1	+4
G2L	設計値	-	+8	-7	-15
	実測値①	仮組立時	+7	-6	-13
	実測値②	架設時	+7	-7	-14
	許容値	-	+3~+18	-12~+3	-20~-5
	差(②-①)	-	0	-1	-1
G2R	設計値	-	-8	+7	+15
	実測値①	仮組立時	-7	+6	+12
	実測値②	架設時	-7	+7	+10
	許容値	-	-13~+2	+2~+17	+10~+25
	差(②-①)	-	0	+1	-2

表 7 主桁の部材軸直角回りの回転キャンパー

実測箇所		ステップ	S2	実測箇所		ステップ	S2
G1L	設計値	-	+20	G2L	設計値	-	+21
	実測値①	仮組立時	+20		実測値①	仮組立時	+22
	実測値②	架設時	+17		実測値②	架設時	+18
	許容値	-	+15~+30		許容値	-	+16~+31
	差(②-①)	-	-3		差(②-①)	-	-4
G1R	設計値	-	-19	G2R	設計値	-	-19
	実測値①	仮組立時	-19		実測値①	仮組立時	-21
	実測値②	架設時	-16		実測値②	架設時	-17
	許容値	-	-24~-9		許容値	-	-24~-9
	差(②-①)	-	+3		差(②-①)	-	+4

表 8 ベント撤去時の G1, G2 主桁の鉛直変位

実測箇所		C7	C13	S2
G1	設計値①	+155	+91	0
	実測値②	+162	+95	+1
	許容値	+123~+187	+59~+123	-32~+32
	差(②-①)	+7	+4	+1
	設計値①	+172	+76	-1
G2	実測値②	+180	+85	+2
	許容値	+139~+205	+43~+109	-34~+32
	差(②-①)	+8	+9	+3

(b)STEP2 : ベント撤去完了時

鋼重と検査路の自重によるベント支点反力を解放した状態における主桁軸線位置の鉛直変位、および回転変形による主桁腹板位置の鉛直変位の実測結果を表 8, 表 9 に示す。

支間中央の鉛直変位は、設計値と実測値で 8mm の差があるが、設計値 172mm に対して 5%以下の誤差であるため、設計値と同程度の挙動を示していると判断できる。回転変形による鉛直変位は、設計値と実測値の誤差が概ね 3mm 程度であるため、設定した回転キャンパーが正しいことを確認できた。

(c)STEP3 : 床版打設完了時

床版打設完了後の主桁軸線位置の鉛直変位と、回転変形による主桁腹板位置の鉛直変位の設計値と実測値を比較した結果を表 10, 表 11 に示す。鉛直変位について、設計値と実測値の誤差は、格点 C7-C13 間の C13 横桁位

表 9 ベント撤去時の回転変形による鉛直変位

(a) 部材軸回りの場合

実測箇所		C7	C13	S2
G1L	設計値①	-3	+3	+6
	実測値②	-5	+1	+7
	許容値	-35~+29	-29~+35	-26~+38
	差(②-①)	-2	-2	+1
	設計値①	+3	-2	-6
G1R	実測値②	+4	-2	-8
	許容値	-29~+35	-34~+30	-38~+26
	差(②-①)	+1	0	-2
	設計値①	-4	+3	+6
	実測値②	-3	+2	+7
G2L	許容値	-37~+29	-30~+36	-27~+39
	差(②-①)	+1	-1	+1
	設計値①	+3	-2	-6
	実測値②	+4	-2	-6
	許容値	-30~+36	-35~+31	-39~+27
G2R	差(②-①)	+1	0	0

(b) 部材軸直角回りの場合

実測箇所		S2	実測箇所		S2
G1L	設計値①	-8	G2L	設計値①	-9
	実測値②	-8		実測値②	-12
	許容値	-40~+24		許容値	-42~+24
	差(②-①)	0		差(②-①)	-3
	設計値①	+8		G2R	設計値①
実測値②	+8	実測値②	+11		
許容値	-24~+40	許容値	-25~+41		
差(②-①)	0	差(②-①)	+3		

表 10 床版打設後の G1, G2 主桁の鉛直変位

実測箇所		C7	C13	S2
G1	設計値①	+145	+87	0
	実測値②	+133	+68	-3
	許容値	+125~+165	+67~+107	-20~+20
	差(②-①)	-12	-19	-3
	設計値①	+159	+71	-1
G2	実測値②	+141	+55	-11
	許容値	+139~+179	+51~+91	-21~+19
	差(②-①)	-18	-16	-10

表 11 床版打設後の回転変形による鉛直変位

(a) 部材軸回りの場合

実測箇所		C7	C13	S2
G1L	設計値①	-3	+4	+6
	実測値②	-1	+4	-5
	許容値	-23~+17	-16~+24	-14~+26
	差(②-①)	+2	0	-11
	設計値①	+3	-4	-6
G1R	実測値②	+2	-4	+5
	許容値	-17~+23	-24~+16	-26~+14
	差(②-①)	-1	0	+11
	設計値①	-2	+3	+6
	実測値②	-2	+1	0
G2L	許容値	-22~+18	+17~+23	-14~+26
	差(②-①)	0	-2	-6
	設計値①	+2	-3	-6
	実測値②	+2	-2	0
	許容値	-18~+22	-23~+17	-26~+24
G2R	差(②-①)	0	+1	+6

(b) 部材軸直角回りの場合

実測箇所		S2	実測箇所		S2
G1L	設計値①	-8	G2L	設計値①	-8
	実測値②	0		実測値②	+2
	許容値	-28~+12		許容値	-28~+12
	差(②-①)	+8		差(②-①)	+10
	設計値①	+8		G2R	設計値①
実測値②	0	実測値②	-2		
許容値	-12~+28	許容値	-12~+28		
差(②-①)	-8	差(②-①)	-10		

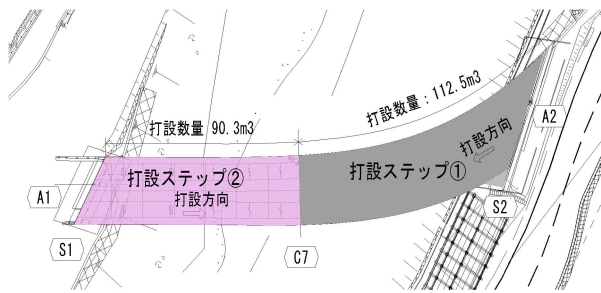


図 7 床版打設順序

表 12 先行打設した床版との合成を考慮した鉛直変位

(単位: mm)

		C7	C13	S2
G1	解析値	+135	+80	0
	実測値	+133	+68	-3
	差(実測値-解析値)	-2	-12	-3
G2	解析値	+148	+66	0
	実測値	+141	+55	-11
	差(実測値-解析値)	-7	-11	-11

ここで、設計値：合成桁として解析した結果
 実測値：STEP3の床版打設完了時

置の G1 では 19mm, G2 では 16mm であり, それぞれの設計値 87mm, 71mm に対して 22%および 24%の誤差であった。設計値と比較して, 実測値のほうが床版打設時の鉛直変位が小さい傾向であった。この要因について, 以下に確認する。

図 7 に示すように S2 支点部の負反力対策として, 格点 C7-S2 間を先行打設・養生後, 残りの格点 S1-C7 間を打設する 2 ステップの打設計画で床版施工を行った。本橋は非合成桁であるが, 先行打設した床版と主桁との合成作用が寄与したものと考えられる。表 12 に示すように, 先行打設した床版と主桁を合成桁として構造解析を行い, 上述した設計値と実測値の比較と同様に, 解析値と実測値を比較した。その誤差は, 格点 C13 横桁位置の G1 では 12mm, G2 では 11mm に減少した。よって, 先行打設部のコンクリートの合成作用により, コンクリート打設による変位が低減したものと確認できた。

6. 各施工ステップの鉛直変位の集計

G1, G2 主桁の S2 支点上に着目し, 表 4 に示す施工ステップの主桁の鉛直変位, および回転変形による主桁腹板位置の鉛直変位を表 13 に示す。設計値, 実測値およびその差について, 各施工ステップと各施工ステップの合計で整理を行った。実測を行っていない橋面工施工完了時を除く, 各施工ステップの合計において設計値と実測値を比較し, その差は G1 主桁で -6mm~+5mm 程度, G2 主桁で -4mm~0mm 程度であった。この残キャンバーに, 設計時の橋面工施工完了時の鉛直変位を考慮すると, その差は G1 主桁で -1mm~+2mm 程度, G2 主桁で 0mm~+3mm 程度であり, 許容値±5mm 以内であったこと

表 13 各施工ステップの鉛直変位の集計

(単位: mm)

施工ステップ		G1L	G1	G1R	G2L	G2	G2R
仮組立時	設計時キャンバー	+5	0	-4	+6	+1	-4
	仮組立時キャンバー	+6	-1	-7	+9	0	-9
	差(仮組立時-設計時)	+1	-1	-3	+3	-1	-5
STEP1	設計時キャンバー	+5	0	-4	+6	+1	-4
	架設時キャンバー	+1	+2	0	+4	+7	-7
	差(架設時-設計時)	-4	+2	+4	-2	+6	-3
STEP2	鉛直変位(設計時)	-2	0	+2	-3	-1	+2
	鉛直変位(架設時)	-1	+1	0	-5	+2	+5
	差(架設時-設計時)	+1	+1	-2	-2	+3	+3
STEP3	鉛直変位(設計時)	-2	0	+2	-2	-1	+2
	鉛直変位(架設時)	-5	-3	+5	+2	-11	-2
	差(架設時-設計時)	-3	-3	+3	+4	-10	-4
各STEPの合計	残キャンバー(設計時)	+1	0	0	+1	-1	0
	残キャンバー(架設時)	-5	0	+5	+1	-2	-4
	差(架設時-設計時)①	-6	0	+5	0	-1	-4
橋面工施工完了時	鉛直変位(設計時)②	-4	0	+4	+3	-1	-3
	差(②-①)	+2	0	-1	+3	0	+1

を確認できた。

以上の結果より, 構造解析により算出した橋軸方向および橋軸直角方向の回転変位に対する回転キャンバーを製作に反映し, 設計, 製作から架設に至る各施工ステップまでを一貫管理することで, 想定通りの施工を実施できた。

7. おわりに

荒瀬橋上部工事の施工が2023年の7月31日に無事竣工することができた。これまで斜角と曲線を有し, 各施工ステップの主桁の形状管理を要する橋梁において, 実測値を検証した事例が少ない。本工事において死荷重の回転変形による鉛直変位の計測管理を行い, その結果について報告することができた。今後, 同様な橋梁での参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) 石川一成, 平井隆嗣, 佐久間啓蔵, 佐藤和樹, 大城泰樹, 田坂裕一, 斜角 35° を有する鋼単純非合成曲線箱桁 橋 ~久万秋 2 号橋の設計・製作・施工~, 川田技報, Vol.42, pp.22-27, 2023.1.