

鋼橋の架設工事における 安全管理システム

小櫻義隆¹・細矢知秀²

¹正会員 工博 横河ブリッジ 技術本部 (〒273千葉県船橋市山野町27番地)

²正会員 工修 横河ブリッジ 技術本部 (〒273千葉県船橋市山野町27番地)

危険作業の多い土木工事では、厳重な安全対策を行っているにも拘わらず、依然として事故が跡を絶たない。このことは鋼橋の架設工事でも同じことが言える。そこで著者らは、CCDカメラやレーザ等の計測装置と警報装置をリンクさせて現場作業を随時監視するシステムを構築した。そして、それを鋼アーチ橋の旋回架設工事に適用した結果、架設作業の安全管理が精度良く簡単に行えることが判明した。本稿では、このシステムの内容と今回の工事で得られた成果について紹介する。

Key Words: steel bridge, erection, CCD camera, laser, position sensor, safety control system

1. まえがき

平成6年における全産業の労働災害の発生件数は、文献1)によると休業4日以上死傷者数が176,047人、死亡者数が2,301人であった。このうち建設業については、死傷者数が49,788人(全産業の28.3%で最も多い)、死亡者数が942人(全産業の40.0%を占める)と、極めて危険な業種であることが分かる。建設業の中でも橋梁の分野においては、比較的災害の少ない職種(土木工事における死亡者の中で約5%を占める)と考えられているが、依然としてアーチ桁を倒壊させるなど小規模の事故が発生している。このような状況の中で、安全管理の重要性は従来になく高まってきていると言える。

そこで、著者等は先に開発した鋼橋の仮組立の自動検査システムであるCATS(Computed Assembling Test System)^{2)~5)}の計測技術を工事現場で活用し、安全管理を徹底させる手法を研究開発している。今回はその一環として鋼アーチ橋の旋回架設工事を対象に安全管理を行うシステムを開発した。これはCCD(Charge Coupled Device:電荷結合素子)カメラやレーザ等の計測装置を用いて仮設機材の倒壊等を自動的に監視し、異常が確認されたら直ちに警報装置により作業を中断させるシステムである。本稿では、このシステムの内容を紹介する

と共に、本工事で得られた成果について述べる。

2. 工事概要

この工事は、高速道路と交差する鉄道橋(形式はバスケットハンドル式ニールセンローゼ桁橋であり、以下これを単にアーチ橋と呼ぶ)の架設工事である。本工事では、架設時の安全確保と道路交通を妨げる期間を最小限に食い止めるために、高速道路沿いにアーチ橋を一旦組み立てた後、これを一晩の全面通行止めの間に旋回させて架設する“旋回架設工法”が採用された(写真-1, 2参照)。今回は、この旋回作業の安全管理のために本システムを導入した。

なお、本橋の規模は以下の通りである。

- ・橋 長: 138.6m
- ・支 間: 136.5m
- ・幅 員: 15.0m(補剛桁中心間隔)
- ・アーチライズ: 23.0m
- ・鋼 重: 1510 t

3. システムの概要

現場作業の安全を確認する場合は、重大事故を引

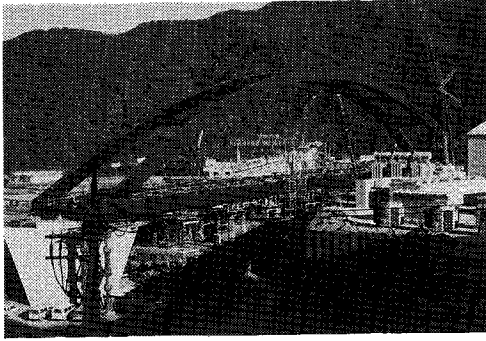


写真-1 旋回前の状態

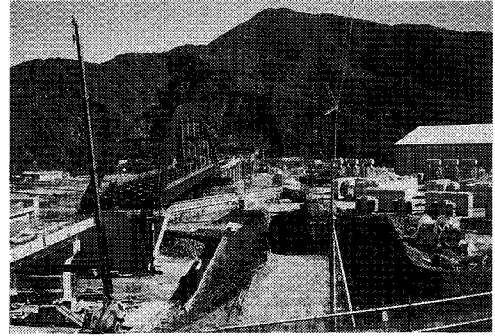


写真-2 旋回後の状態

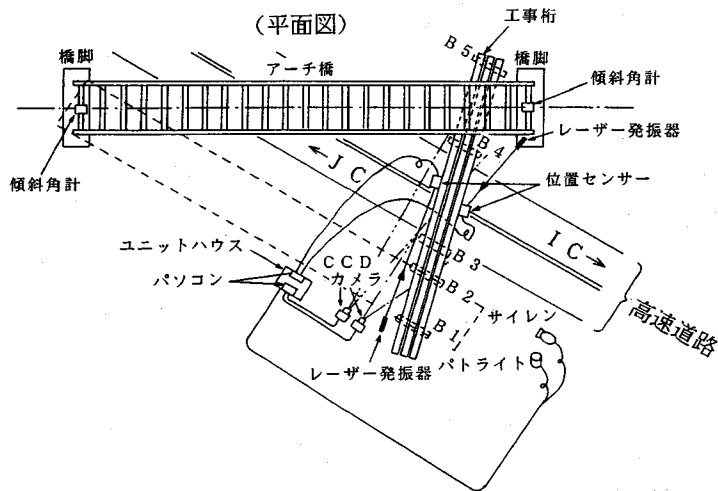


図-1 橋梁架設作業監視システム

き起こしそうな危険箇所からチェックするのがポイントである。この架設工事においては、アーチ橋の支点反力やケーブル張力管理（これらは本システムの計測範囲外であるので割愛する）以外に、図-1のように、工事桁（アーチ橋の旋回台車を支持する桁）のたわみ・ベントの転倒・アーチ橋のねじれ回転の3項目の管理を行えば万全であると考えた。したがって、今回は上記の3つの各管理項目のうち代表的な計測項目を

- ①工事桁中央部の変位計測
- ②B3・B4ベントの変位計測
- ③補剛桁端のねじれ回転計測

に絞り、これらが同時に計測できるようなシステムを作った。また、本システムでは、計測した結果により異常が確認された場合には、図-1のようにサイレンとパトライトを用いて危険であることを直ちに作業者に知らせるシステム（警報システム）も組み込んだ。

4. 計測技術

ここでは、前章で述べた3項目の計測技術について紹介する。

(1) 工事桁中央部の変位計測

a) 計測方法

工事桁中央部の変位計測では、図-2に示すように、最大変位（最大応力）が生じて桁全体の挙動が把握しやすいB3とB4の中央部について、工事桁軸直角方向の鉛直変位（ δ_v ）と水平変位（ δ_H ）を同時計測することにした。ここでは、図-3の位置センサーとレーザー発振器をペアとした変位計測装置²⁾（この装置は、位置センサーによってレーザースポットの重心座標が読み取れるもの）を2セット用意し、工事桁の両外桁にそれぞれ取り付けた。

本計測装置の計測インターバルは、アーチ橋の旋回距離1m毎（図-2(a)のように鋼巻尺のメモリ

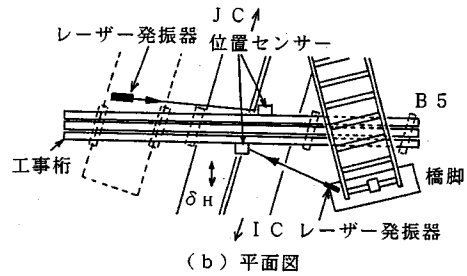
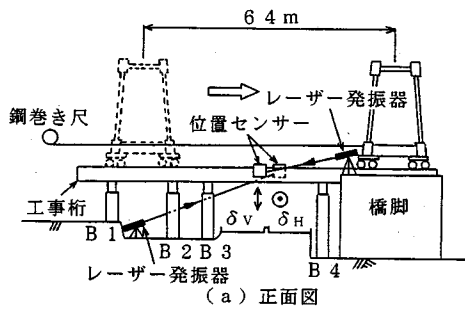


図-2 工事桁の変位計測

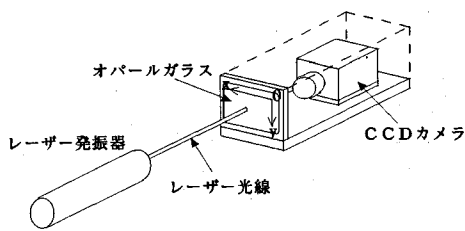


図-3 位置センサーの構造

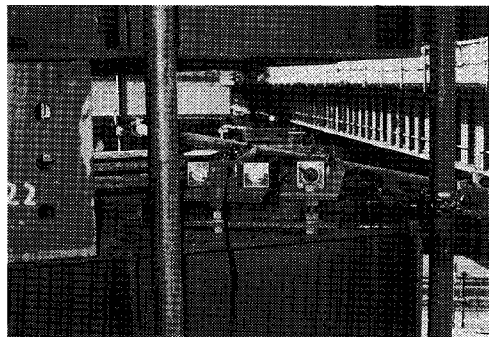


写真-3 レーザー発振器のセット状況

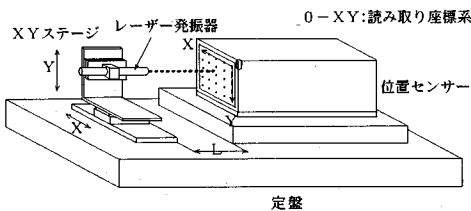


図-4 位置センサーの検定装置

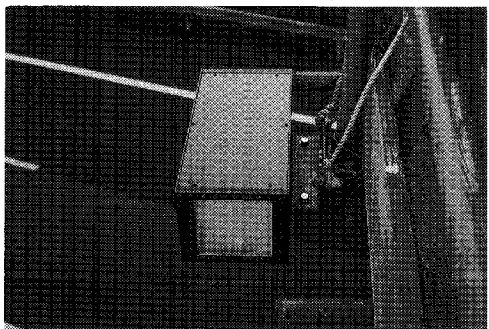


写真-4 位置センサーの取り付け状況

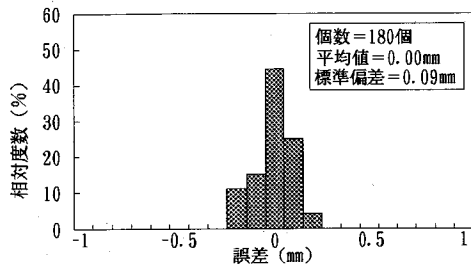
を読むことによって移動距離を把握した)とし、計測結果はパソコンの画面上にリアルタイムで表示することにした。

写真-3及び写真-4は本計測装置1セットの設置状況である。レーザー発振器は写真-3の中央手前の堅固な支持台(H形鋼)にセットした。一方、位置センサーは写真-4に示すように、工事桁中央部の上フランジ側に取り付けた。

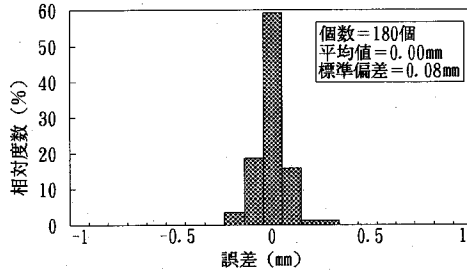
b) 位置センサーのキャリブレーション

工事桁の鉛直方向の最大たわみは、工事桁の抵抗曲げモーメントから試算すると104mmになるので、これを管理基準値とした。この範囲を計測するため、今回は計測範囲140mm×140mmの位置センサーを2台新たに製作し、図-4のキャリブレーション装置によってそれらを調整した。

本キャリブレーションでは、図-4において、XYステージと位置センサーまでの距離を $L=200\text{mm}$ とし、レーザー発振器をXYステージ(位置決め精度： $\pm 0.01\text{mm}$ 、移動有効範囲： $XY=100\text{mm}\times 100\text{mm}$)によって $100\text{mm}\times 100\text{mm}$ の範囲を格子状(縦横20mm間隔で合計36箇所)に移動させ、その場合に位置センサーの測定面(読み取り座標系)上に照射された各々のレーザースポット重心をCCDカメラ(分解能： 512×512 画素)で読み込ませた。ここで、レーザースポット重心の読み取り座標を取得する際の画像処理では、当該スポットを含む正方形の範囲の原画像をコントラストストレッチによって補正した後、



(a) J C側位置センサーの計測誤差



(b) I C側位置センサーの計測誤差

図-5 位置センサーの計測精度

その補正データを基に重心計算を行って読み取り精度を向上させた。このようにして、最終的にはCCDカメラの受像面上のカメラ座標値と位置センサーの読み取り座標値の関係をカメラレンズの収差をも考慮して明らかにした。

なお、上述のキャリブレーション法に関する解説は文献2)に詳述している。

c) 計測精度

今回は、本計測装置の計測精度を確認するため、図-4のLを現場の使用状況に合わせてL=30mとし、位置センサーもXYステージも水準器を用いて水平にセットした(水平度は20秒以下とした)後、XYステージを100mm×100mmの範囲で任意に移動させた。このようにして計測精度は、XYステージの移動座標値と位置センサーで計測したレーザースポット重心の読み取り座標値の差によって計測誤差を確認することにした。図-5はその結果である。これにより、本計測装置は±0.3mm以下の精度で読み取りが可能であることが分かった。

(2) B3・B4ベントの変位計測

a) 計測方法

ベントの変位計測では、図-6のように、工事桁直下の支持台が不安定になる可能性が高いので、この不等沈下や横滑りを監視することにした。また、監視したのはB3とB4ベントである。これらの2

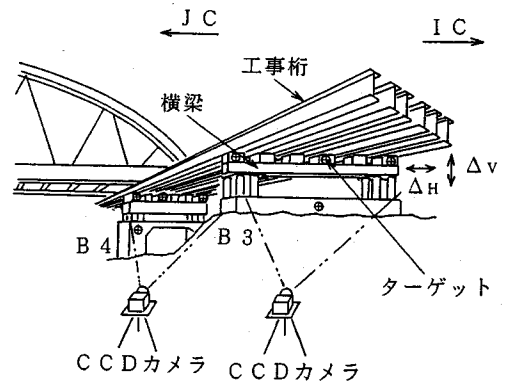


図-6 ベントの変位計測

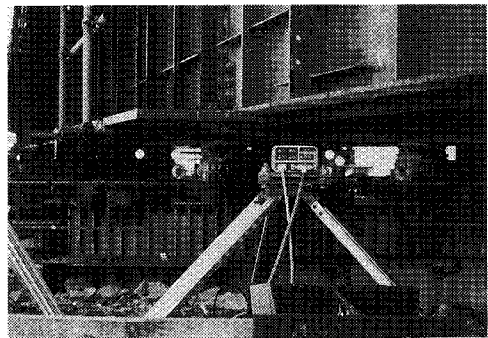


写真-5 CCDカメラのセット状況

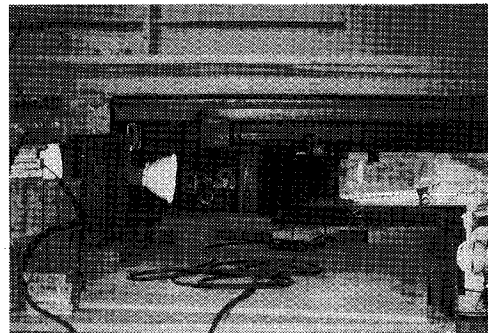


写真-6 ターゲットの設置状況

つのベントの監視を選んだ理由は、この間に高速道路があるため、監視を厳しくする必要があったからである。

具体的には、図-6に示すようにB3・B4ベントの工事桁直下の支持台に照明付きのターゲットを3個ずつセットし、これらのターゲット重心の鉛直変位(Δv)と水平変位(ΔH)を2台のCCDカメラ(分解能:1280×1024画素)を用いてそれぞれ計測した。この場合、ターゲット重心の座標取得の際

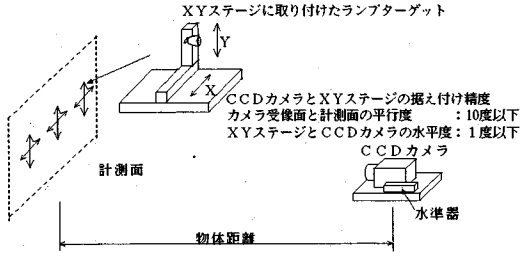


図-7 CCDカメラの解像度決定法

の画像処理は、前述と全く同じ処理ルーチンを採用した。また、各イベントでは堅固なフーチング基礎に1個のターゲットをセットし、これを不動点としてCCDカメラの計測時の姿勢を補正した。

なお、本計測装置による計測インターバルは、前述の計測と同様にアーチ橋の旋回距離1m毎とし、計測結果はパソコンの画面上にリアルタイムで表示することにした。

写真-5は本計測装置の設置状況であり、CCDカメラは三脚上に設置した。またターゲットは**写真-6**に示すように白熱ランプとし、これを工事桁下部の支持台にセットした。

b) CCDカメラのキャリブレーション

図-6に示す各イベントの3個のターゲット(監視点)のうち、変位が最大になると予想される箇所は、横梁の最大たわみが発生する横梁中央部の監視点である。そのたわみは、横梁の抵抗曲げモーメントから試算すると21mmが最大になるので、これを管理基準値にした。したがって、この範囲を測定するには、架設誤差を考慮して、計測精度は±1mmの誤差で十分であると考えた。

今回は、この目標計測精度を確認するため、2台のCCDカメラを現場へ持ち出す前に、当社工場の空き地を利用してキャリブレーションすることにした。

図-7はそのキャリブレーション装置である。ここでは、XYステージ(前述と同じもの)に取り付けたターゲットを現地とほぼ同じ3ヵ所の位置にセットし、各位置でターゲットを水平と鉛直方向にそれぞれ移動させ、その移動量(既知量)をカメラで読み取ることによってCCDカメラの読み取り分解能を決定した。また、今回は物体距離が現場の状況で若干変更になる可能性があったので、計画当初の物体距離とその前後の位置(例えばB3イベント用のCCDカメラでは23m, 25m, 27mの3ケースの物体距離)においてキャリブレーションを行った。

図-8はB3イベント用のCCDカメラ(焦点距離: 28mm)とB4イベント用のCCDカメラ(焦点距離

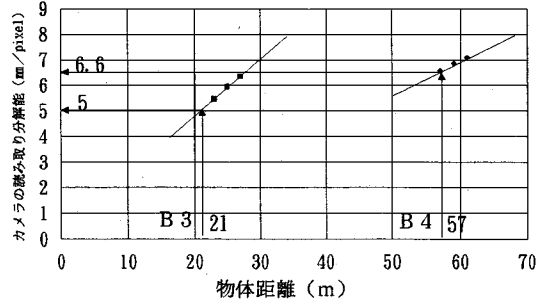
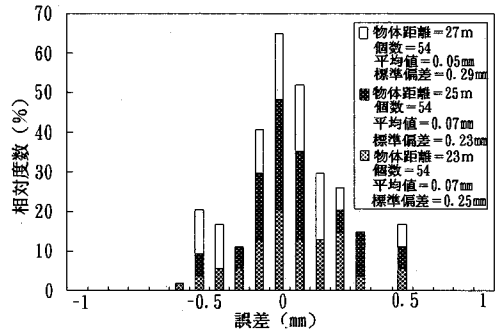
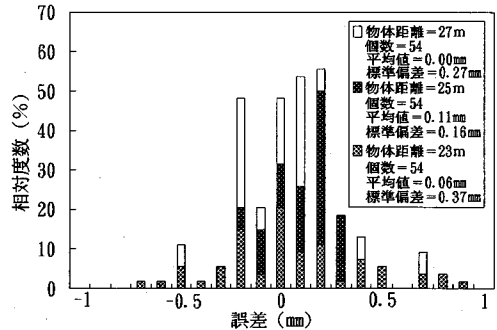


図-8 物体距離とCCDカメラの読み取り分解能の関係



(a) B3イベント監視用CCDカメラ



(b) B4イベント監視用CCDカメラ

図-9 本計測装置の計測誤差

: 60mm)のキャリブレーション結果である。この結果においては、CCDカメラの読み取り分解能は物体距離にほぼ比例することが分かっているので、2台のCCDカメラに対して、それぞれ3ケースのキャリブレーションデータを回帰直線で近似させた。したがって、現場で物体距離を実測すれば、この回帰直線によって正確なCCDカメラの読み取り分解能が分る。参考のため、図-8には今回実際の現場でCCDカメラを据え付けて得た分解能を示した(B3イベント側: 5.0mm/pixel, B4イベント側: 6.6mm/pixel)。

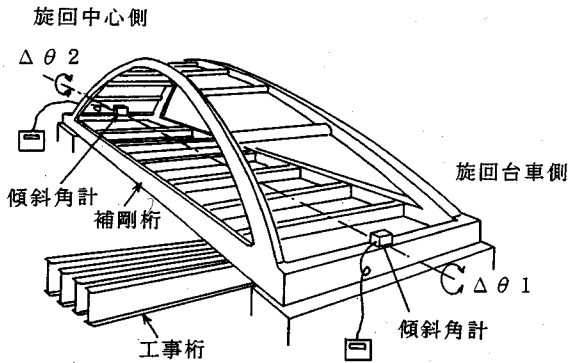


図-10 補剛桁のねじれ回転計測



写真-7 傾斜角計の設置状況

c) 計測精度

本計測装置の計測精度は、前述のキャリブレーションを行った位置（3ケースの焦点距離の位置）において、XYステージを21mmの範囲で任意に動かし、この移動座標値とCCDカメラの読み取り座標値を比較することで確認した。図-9はその結果である。これによると、本計測装置の計測誤差は±1mm以内であり、目標精度を達成している。

(3) 補剛桁端のねじれ回転計測

a) 計測法

旋回中のアーチ橋を支える補剛桁端の支持点では、ベントの不等沈下や工事桁の極端なたわみ等によって異常反力が生じる可能性がある。したがって、今回は、この異常反力の有無を確認するため、図-10のように旋回中心側と旋回台車側の両補剛桁端のねじり回転計測を行うことにした。本計測においては傾斜角計を2台採用した。

また、計測インターバルは、前述の2種類の計測と同様にアーチ橋の旋回距離1mピッチとし、計測担当者がデジタル表示器の計測値を随時読み取ることとした。

写真-7は傾斜角計を補剛桁端の横桁の上フランジ上に傾斜角計を設置した状況で、橋軸直角方向から写したものである。

b) 計測精度

2台の傾斜角計は、使用直前にメーカーにキャリブレーションを依頼し、総合試験成績表を作成して貰った。その検定結果によると、2台とも最小読み取り精度7秒、計測範囲±1度という仕様が確認できた。

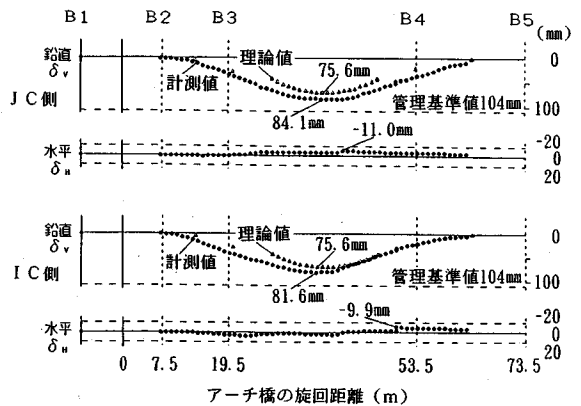


図-11 工事桁中央部の変位計測結果

5. 計測結果

(1) 工事桁中央部の変位計測

図-11はJ C側とI C側の工事桁中央部の変位計測結果である。この図には、アーチ橋の旋回距離に対応させて鉛直変位(δ_v)と水平変位(δ_H)の計測値を黒丸でプロットした。また、工事桁の管理基準値は破線で示した。さらに、鉛直変位については、理論値(三角印)を示し、これと計測値が比較できるようにした。

以上の計測結果により、次のことが分かる。すなわち、鉛直変位(δ_v)の計測値は理論値よりもプラス傾向を示した。その量は最大変位と比較すると、J C側で11%であり、またI C側で8%であった。したがって、工事桁は予想した通りの挙動を示したといえる。また、水平変位(δ_H)の計測値についてはJ C側で-11.0mm、I C側で-9.9mmが最も大きな変位であった。したがって、これらは工事桁の横倒れ座屈に対する管理基準値(±20mm)以内であり、十分安全であった。

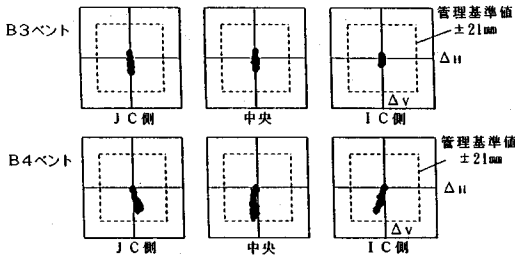


図-12 ベントの変位計測
(計測時のディスプレイ上の監視画面)

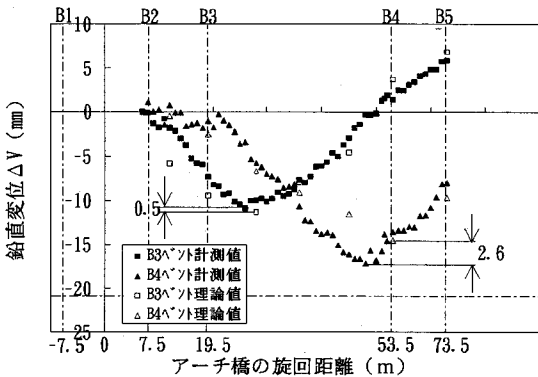


図-13 ベント中央の鉛直変位計測

(2) B3・B4ベントの変位計測

図-12はB3とB4のベントの変位計測結果である。ここで、縦軸は鉛直方向の変位(Δv)であり、横軸は水平方向の変位(ΔH)である。また破線は管理基準値を示す。この場合、水平変位ΔHがB4ベントで若干生じているが、その値は±10mm以内である。一方、鉛直変位Δvは管理基準値(±21mm)の範囲以内である。

図-13は、図-12の鉛直変位の挙動を詳しく調べるため、ベント中央の計測値と理論値を前の工事桁中央部の変位計測結果(図-11参照)と同様のスタイルで表示した結果である。計測値と理論値の最大値の差は、B3ベントで0.5mm、B4ベントで2.6mmなので、良く対応していることが分かる。

(3) 補剛桁端のねじり回転計測

図-14は、補剛桁端のねじり回転計測結果である。これによると、旋回中心側のねじり回転角Δθ2は極めて小さく、安定した動きを示した。

一方、旋回台車側のねじり回転角Δθ1は理論値よりもプラス側に偏った。これは前述の工事桁中央部の変位計測結果(図-11参照)により、工事桁の鉛直変位が理論値よりも約10%大きくなった(アーチ

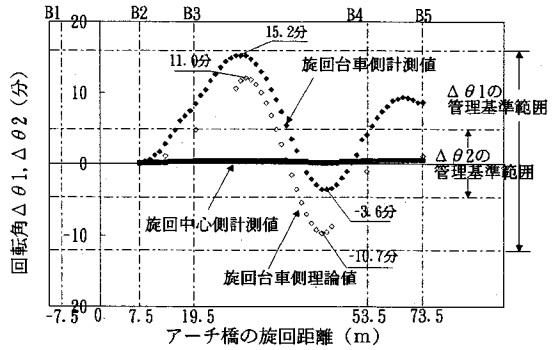


図-14 補剛桁端のねじり回転計測結果

橋の旋回距離が19.5~53.5mの間)ので、ねじり回転角Δθ1もプラス傾向を示したといえる。

また、Δθ1の最終の計測値はゼロ付近に戻るべきところが、+10分程度倒れたままの状態になった。これについては、アーチ橋の旋回初期の段階ではB5ベントは無負荷状態であり、かつB5ベントの柱の長さは約19mと他のベント柱よりも4倍程度長かったので、B5ベントが載荷状態になるとナジミが生じたものと考えられる。そのため、B5ベントの沈下量が著しく大きくなり、旋回後半のΔθ1はプラス傾向に倒れたままの状態になったものと推察される。

6. まとめ

今回は、鋼アーチ橋の旋回架設工事において、安全管理システムによって工事桁中央部の変位・ベントの変位・補剛桁端のねじり回転量の3項目の計測を行い、作業の安全性を確認した。その結果、架設作業の安全管理が数値的に、精度良く、しかも簡単に行えることが明らかになったと同時に、作業は無事完了した。したがって、今後はこうしたシステムを活用することにより安全管理の体制がこれまで以上に強化され、また、多数の熟練者も不要になることと思われる。

なお、本システムでは、計測原理や計測装置の基本構成は全く問題ないが、最初の計測装置の設置作業に多くの労力と時間が必要であった。この課題に対して、今後は計測装置のワイヤレス化や制御の完全自動化を目指してシステムを改良していく予定である。

最後に、本システムのような安全に関するシステムはローコストで、しかも手軽に使えるものでなければ普及しないと思われる。したがってこのことを

肝に銘じてシステムを開発し、人身事故の無い安全な職場環境を作ることが極めて重要であるとする。

参考文献

- 1) 安全衛生年鑑平成7年度版, 中央労働災害防止協会, pp.172, 1995年12月.
- 2) 小櫻義隆, 鳥居邦夫, 高田孝次: CCDカメラを利用した平面形状の計測システムとその応用, 土木学会論文集, No. 435/VI-15, pp. 89~94, 1991年9月.
- 3) 小櫻義隆, 鳥居邦夫, 高田孝次: CCDカメラを利用した鋼橋部材の画像計測, O plus E, No. 157, pp.110~

115, 1992年12月.

- 4) 一般土木工法・技術審査証明報告書 CATS(プレートガーダー橋の仮組立形状シミュレーションシステム)国土開発技術研究センター, 1992年10月.
- 5) Y.Kozakura, K.Takada and K.Torii: Inspection system of shop assembly configuration on steel arch bridge members, *Proc. of the sixth international conference on computing in civil and building engineering*, pp.1565 ~ 1572, July, 1995.

(1996.3.4受付)

SAFETY CONTROL SYSTEM FOR THE ERECTION OF STEEL BRIDGES

Yoshitaka KOZAKURA and Tomohide HOSOYA

Despite taking many precautions, there are still many accidents at construction sites. Unfortunately, this is also true for the erection sites of steel bridges. As a result, the authors have developed a new Safety Control System, which safeguards the work being carried out by using CCD Cameras and Lasers. The system is also linked to an alarm device, consisting of a siren and a warning light, which can be set off if dangerous behavior is observed. The system was successfully applied to the Transferral Erection of a steel arch bridge, resulting in the safe control of the operation. This paper describes the concepts of the Safety Control System and the results of applying the system to the Transferral Operation.