

斜吊工法を用いた長大アーチ橋の安全施工管理システムの開発

トピー工業(株) 林 健治*
トピー工業(株) ○大倉 誠**
トピー工業(株) 福田雄重**

by Kenji HAYASHI , Makoto OKURA , and Katsusige FUKUDA

最近、斜吊工法を用いたアーチ橋の倒壊事故が相次いで発生している。そのため、橋梁業界では、同工法を用いたアーチ橋の架設時における安全施工管理が検討課題となり、その在り方が重要な問題となっている。そこで、斜吊工法を用いたアーチ橋の架設時における安全管理を徹底する観点から、自動計測システムを主体とした安全施工管理システムを開発した。また、設計上、十分な安全性を確保するために、架設構造系に斜吊ケーブルなどの仮設構造物も含めた構造系に対して、フェールセーフ設計を適用した。さらに、3次元形状計測システムを活用してより合理的な形状管理を実施した。本論文は、以上の安全施工管理システム、フェールセーフ設計及び形状管理の概要を述べるものである。また、実橋への適用結果を通して、安全施工管理システムとフェールセーフ設計の妥当性を明らかにするとともに、架設時の安全性を保証するには、安全施工管理システムの適用が不可欠であることを明記する。

【キーワード】アーチ橋、安全施工管理、斜吊工法、フェールセーフ設計

1. はじめに

アーチ橋は、一般に、景観性から都市のランドマークとして、また、山岳地方などの急峻な地形を考慮して架設される場合が多い。最近、アーチ橋の倒壊事故¹⁾が相次いで発生しており、架設時における安全管理の在り方が重要な問題となっている。特に長支間のアーチリブの架設工法として多用されている斜吊工法を用いたアーチ橋の場合が顕著であることから、橋梁業界では、同工法の安全性に対する適切な対応が強く望まれている。

本論文では、広島県山県郡加計町において建設が進められている温井ダムを跨ぐ、国内最長のアーチ橋温井大橋(仮称)の架設を取り上げる(写真-1参照)。同橋は架橋地点の制約からケーブル架設工法の一つである斜吊工法を採用した。そのため、安全管理を徹底する観点から、新たに安全施工管理システムを開発し、同橋への適用を試みた。また、架設構造系に斜吊ケーブルのような仮設構造物も含め



写真-1 アーチリブの架設状況

* 技術研究所 第一研究部 0532-25-5354
** 鉄構事業部 工 事 部 0532-25-7197

た系に対して、万一、事故が発生しても致命的な崩壊には至らないように設計上の工夫（フェールセーフ設計）を行った。

本論文は、上記の安全施工管理システムの概要とフェールセーフ設計の概略を述べるものであり、実橋への適用結果についても併記する。

2. 工事概要

島根県江津市を起点とする一般国道186号線は広島県山県郡加計町と戸河内町、佐伯郡佐伯町を経て大竹市に至る幹線道路である。建設省中国地方建設局温井ダム工事事務所では、加計町内にアーチ式ダムとしては国内第2位の規模となる温井ダムの建設を進めている。ダム完成後、加計地区における国道186号線の一部区間がダム湖に水没するため、温井大橋はダム湖を横断する橋として計画された。

本橋のアーチ支間は、図-1に示すように230mであり、完成後は上路式ブレスドリブアーチ橋としては国内最大級となる。架橋地点は、現国道と滝山川（太田川の支流）のV字渓谷（約100m）に位置する。このため、架設工法には、ケーブルクレーン・タイバック式斜吊工法を採用した。本橋の諸元を表-1に示す。

後述の安全施工管理システムは、斜吊設備を含め

表-1 温井大橋の諸元

路線名	一般国道186号
施工箇所	広島県山県郡加計町大字加計字大枋木、戸河内町字西榎ノ平山
道路規格	第3種第3級
橋格	一等級 TL-30
橋長	369.0m
支間	52.5+243.0+36.75+36.75 (アーチ支間230.0m)
設計速度	V=40km/h
設計震度	KH=0.15
形式	上路式ブレスドリブアーチ橋
鋼重合計	1,835ton

た架設構造系の倒壊を防止し、管理作業の安全性を確保する観点から開発されたものであり、本システムの活用のみで架設工事における作業員の安全を保障するものではない。本工事では、高所作業を容易にし、アーチリブの架設工事における作業員の安全を確保することを狙いとしてワイヤーブリッジの他にPCT（Pretensioned Cable Trussの略称）足場を用いた。

架設時の形状管理は、新規に開発した3次元形状計測システム²⁾と安全施工管理システムを併用して行った。すなわち、キャンパー・通りと斜吊ケーブルの張力が管理許容値内に収まることを確認しながら、管理・調整作業を実施した。また、閉合部材の形状計測も上記のシステムにより実施した。

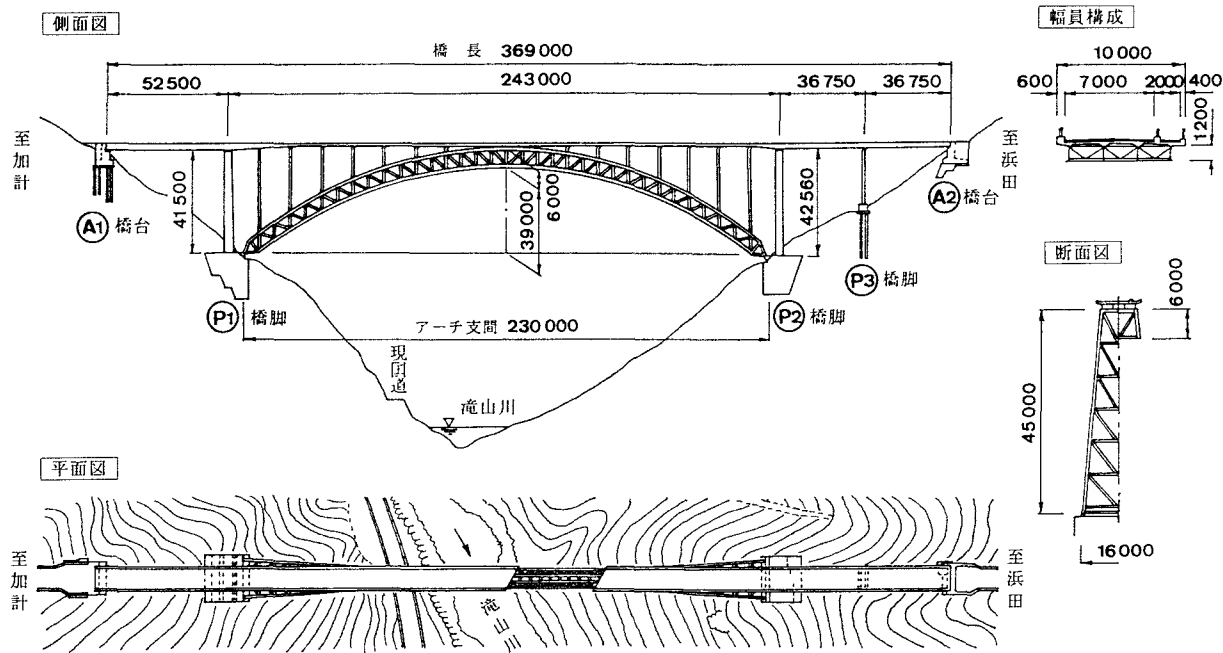


図-1 上路式アーチ橋温井大橋（仮称）の一般図

3. 安全施工管理システム

平成5年7月、アーチ橋の架設工事において橋桁等の倒壊災害が相次いで発生したことを契機として労働省労働基準局より橋梁業界に対して、架設工事における安全の確保のため、「アーチ橋の架設工事における橋桁等の倒壊防止に関する安全総点検」の実施等を徹底させるようにとの要請があった。その内容を要約すると、次のとおりである。

- (1) 作業計画に基づく適切な工事の実施
- (2) 構造物の支持条件、荷重条件の確認
- (3) 構造物修正時の強度、安定性の確認
- (4) 架設用設備の適切な使用と保守点検
- (5) 足場、型枠等の仮設機材の保守点検
- (6) 適切な控えの設置、補強材の取付け
- (7) 作業主任者の選任とその職務の履行

上記の項目は、通常、管理責任者が現場の状態を確認し、目視により点検しているが、項目(4)の架設用設備のワイヤーロープやワイヤークリップの点検については、高所作業を必要とする場合が比較的多く、また、足場を確保することが困難な場合も多いため、常時点検することは容易でない。

平成4年12月、尾道市街に隣接する山陽自動車道竜泉寺橋(橋長156m、アーチ支間90mの逆ローゼアーチ橋であり、架設工法にはアーチ径間両側に斜吊

鉄塔を設置して斜吊ケーブルを用いてアーチ部材を架設するケーブル斜吊工法が採用された)のアーチリブの一部が落下した事故の原因も項目(4)に関連するバックワイヤーのクリップの弛み¹⁾であることから、クリップの点検は重要であることは言うまでもないが、点検の方法については検討する必要がある。同橋の事故調査委員会がまとめたワイヤークリップのチェック項目は以下のとおりである。

- (1) ロープ径とクリップ径の整合性の照査
- (2) クリップの清浄度の照査
- (3) クリップの取付組数・取付間隔の適合照査
- (4) 所定の締付けトルクの導入
- (5) クリップの向きの確認
- (6) ずれマークのマーキング
- (7) ずれの有無の点検・確認

以上から明らかなように、アーチ橋の倒壊事故の原因となるワイヤークリップのずれ(弛み)量等を自動計測し、危険性を知らせることができれば、安全施工管理上、非常に有益である。

橋梁業界では、従来、架設工事の進捗に関わる施工管理については最近の情報化の波を受け、いわゆる情報化施工³⁾を実施したケースが数多く見られるが、安全性を主体としたシステムの開発は少ない。特に、斜吊工法を用いた鋼アーチ橋の架設工事に限定すると、ほとんど例がない。

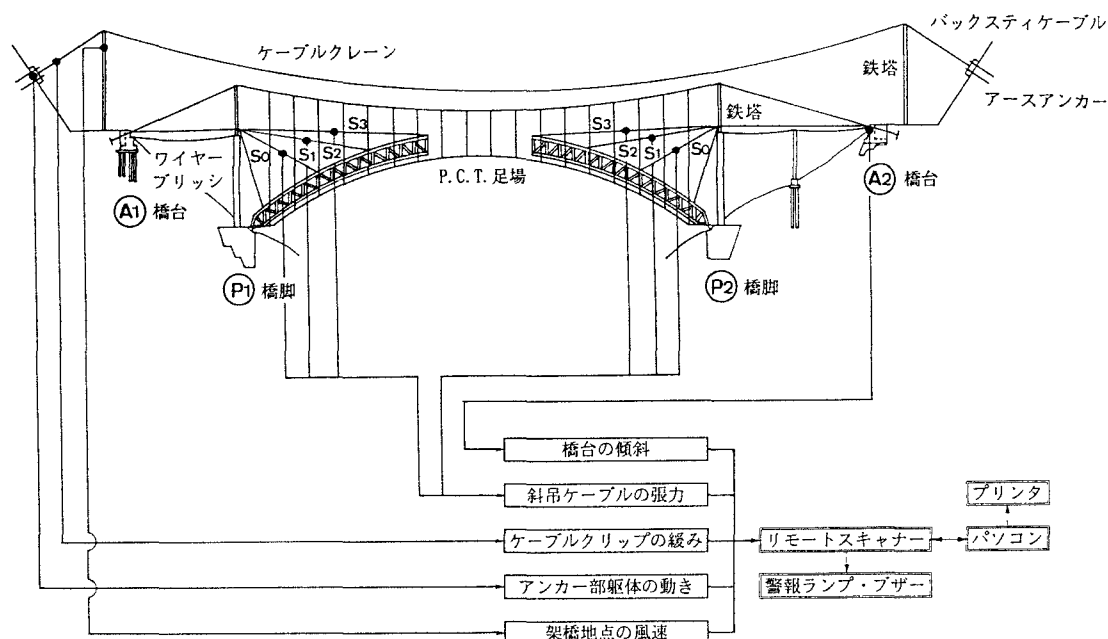


図-2 安全施工管理システムの構成

表-2 計測項目、計測機器及び管理許容値

計測項目	計測機器	管理許容値	備 考
斜吊ケーブルの張力	ロードセル	設計張力の30%	張力管理の目安
ケーブルクリップの弛み	継目計	± 5 mm	クレーン等安全規則
アンカー躯体の動き	継目計	5 mm (管理値)	管理の目安
架橋地点の風速	3 杯風速計	10分間平均風速10m/s	労働安全衛生規則他
橋台の傾斜	傾斜計	± 5 秒	基礎の安定性
外気温、橋体温度	熱電対	参考値	形状管理

そこで、著者らは、セーフティ・アセスメントの観点から、作業の安全性に重点を置いた安全施工管理システムを開発した。本システムは、仮設構造物を含めた架設構造系の倒壊を防止する上で必要となる因子を常時自動計測するものであり、作業員に対して工事の状態が危険であるか否かの情報を与える。その概要を図-2に示す。本システムは、後述のフェールセーフ設計と関連付けることにより、より有意義なものとなる。

アーチ橋の架設工法として斜吊工法を採用した場合、各架設段階において安全性を確保するには、斜吊ケーブルの緊張状態、橋脚の傾斜の模様、アースアンカーの緊張状態、固定しているケーブルクリップの弛緩の状態や架橋地点の風速、外気温及び橋体温度などを常時観測する必要がある。そこで、表-2に示す計測機器をA1、A2橋台近くの作業小屋に設置したデータロガー（リモートスキャナー）に接続して、A1側に設置した1台のパソコンにより制御した（A1、A2側のデータロガーはRS-422Aケーブルで繋いだ）。

各計測機器は、予め製作された治具により所定の部位に設置された。斜吊ケーブルの張力をロードセルにより測定するために製作された治具の一例を図-3に示す。

本システムは、表-2の計測項目の経時変化（各項目を1～5分単位で計測し、CRT上に表示する

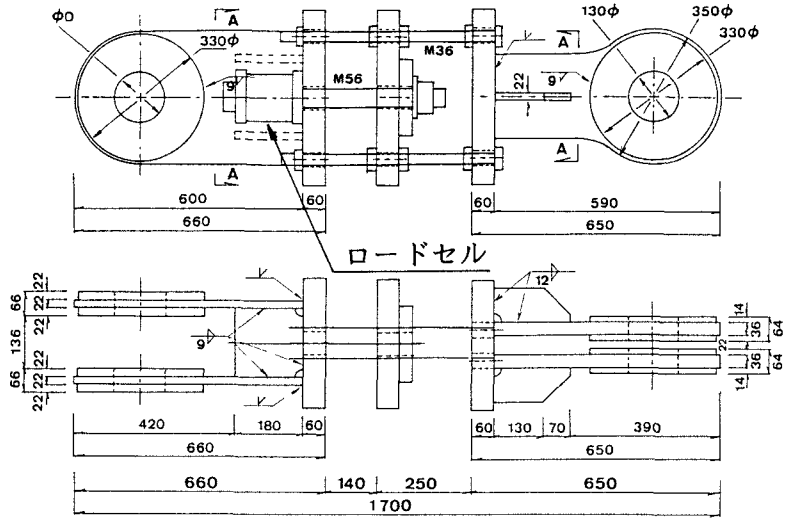


図-3 斜吊ケーブルの張力測定用治具

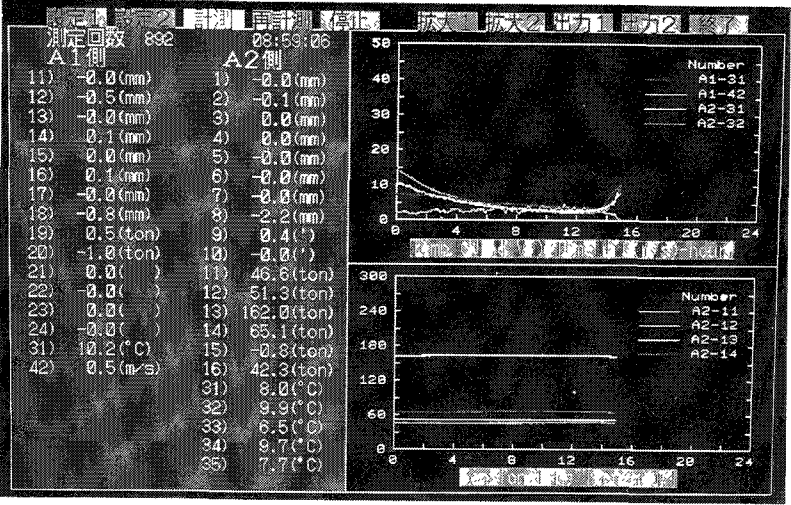


写真-2 計測・制御画面の一例

とともに、風速についてはモニタにデジタル表示した)をパソコンによる計測システムにより集中管理し、各項目の値が管理許容値を越えた場合、警報を発し、危険な状態を回避するように注意を促すものである（写真-2に計測画面の一例を示す。ここで写真の右上に外気温と風速、右下に斜吊ケーブルの張力の経時変化を示し、左半分に各計測時間におけ

るA1、A2側の全測定値を表示している)。

表-2の計測項目は、文献1)の種々の事故例(前述の竜泉寺橋の場合も含む)を分析し、最も危険であると考えられる要因を網羅したものであり、各管理許容値は以下のようにして設定した。

ケーブル張力は、一般のケーブル構造物の精度管理における許容誤差が5~15%程度であることを考慮して、許容誤差を30%とした。クリップの弛みは、前述の竜泉寺橋の事故調査委員会の調査結果を下に5mmとした。これは、クリップの滑り耐荷力実験の結果によれば、クリップの締付け力が十分でも、作用荷重が大きくなると、数mm程度のずれが発生し、耐荷力の2/3程度の力で3mm程度のずれが発生することから、算定したものである。

アンカー定着部は、6本のアースアンカーより固定され、定着部をケーブルクレーンのワイヤーが引っ張る構造となっている。また、アースアンカー部はグラウト定着部と自由部から構成され、PC鋼線が用いられている。自由部の伸びがある程度大きくなれば、定着盤とコンクリート躯体との間に変位を生じ、最大荷重が作用した場合の変位量は15mmとなる。アンカー躯体の動きは、管理の目安として5mmとした。

架橋地点の風速については、労働安全衛生規則に準じた。橋台の傾斜は、予め計測したデータを下に温度応力に起因する変動量(±5mm)を基準とした。

つぎに、本工事の架設ステップを図-4に示す。ここで、斜吊ケーブルの張力調整は、ステップ2から5までであり、この作業工程の間を主体に計測と制御を行った。なお、本システムと施工管理システムの一部である3次元形状計測システム²⁾(後述の光波経緯儀を主体とした可搬型のシステム)を併用することによって、より高い安全性を保障すること

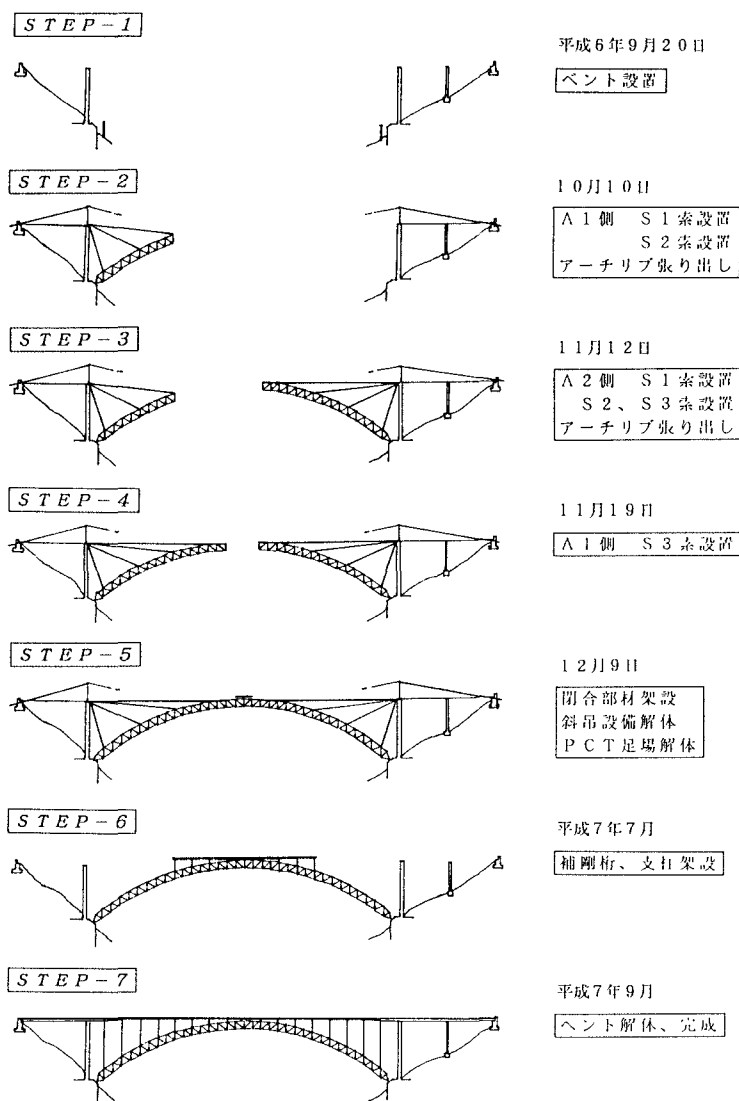


図-4 架設ステップ

ができる。

4. フェールセーフ設計

上記の安全施工管理システムを活用して、事故を未然に防ぐことは重要であるが、事故が発生しないように配慮することも重要である。航空機の設計で使用されているフェールセーフの概念を斜吊ケーブルを含めた架設構造系に適用し、系の一部が機能を果たさなくなっても系全体が危険な状態にならないように設計段階から工夫することによってより抜本的な安全施工管理を実施することができる。

すなわち、フェールセーフ設計を実施していない場合、系の一部が危険な状態になると、系全体の状

態が推定できないため、系全体も危険な状態と判断せざるを得ないことになり、不合理である。一方、フェールセーフ設計を実施した場合、たとえ系の一部が危険な状態になっても、系全体が危険な状態となることはないことを保障するので、管理技術者や作業者は、万一の場合にも安心して作業を行うことができ、安全性を高めることができる。

また、フェールセーフ設計では、ケーブル張力の単位量の変化に伴う各部材の断面力、格点変位等の変化（影響係数）を算出するので、後述の形状管理を行う上での基礎資料となる。

通常、橋梁の架設にあたっては、架設中の本体構造物とともに架設構造物の安全性の照査など各種の計算（許容応力度設計がその基本となる）が必要となる⁴⁾。荷重については鉛直荷重、風荷重、地震の影響等の荷重の組合せを架橋地点の条件、施工時期、施工期間の長短等を考慮して適宜選択する。また、許容応力度については、関連示方書に従い、割増し係数を乗じた値を用いる。本橋では、断面力や変形に関して鉛直荷重と風荷重による影響が顕著であったため、本論文では、これらの荷重について検討した結果を述べる。なお、風荷重は、台風期を含む長期間で大規模な架設工事であることから、設計風速（10分間平均）を42.6m/sとして算出した。

架設用ワイヤロープは図-2のA1側S1斜吊ケーブルに56φ 6×SeS(37)IWRCB種、A2側S1斜吊ケーブルに50φ 6×SeS(37)IWRCB種、S2斜吊ケーブルに50φ 6×Fi(29)IWRCB種、S3斜吊ケーブルに56φ 6×Fi(29)IWRCB種を使用した。切断荷重は、何れも50φで173tonf、56φで217tonfである。弾性係数は

表-3 切断前後の斜吊ケーブルの張力

斜吊ケーブル	耐力 (tonf)	切断前 (tonf)	実測値 (tonf)	誤差 (%)	切断後 (tonf)
S1	346	39.4	36.6	-7.1	64.0(77.0)
S2	692	88.5	105.3	19.0	158.6(180.4)
S3	868	197.7	209.7	6.1	284.0(0.0)

注：()内の数値は下流側の値を示す。

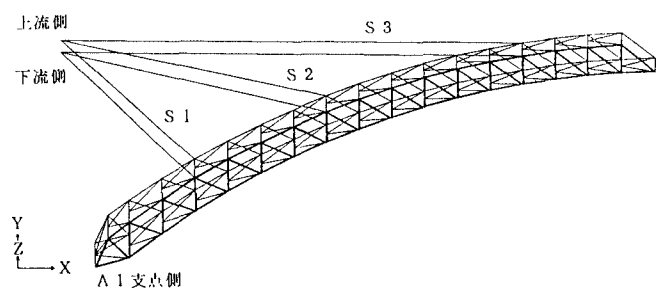


図-5 架設構造系の骨組解析モデル

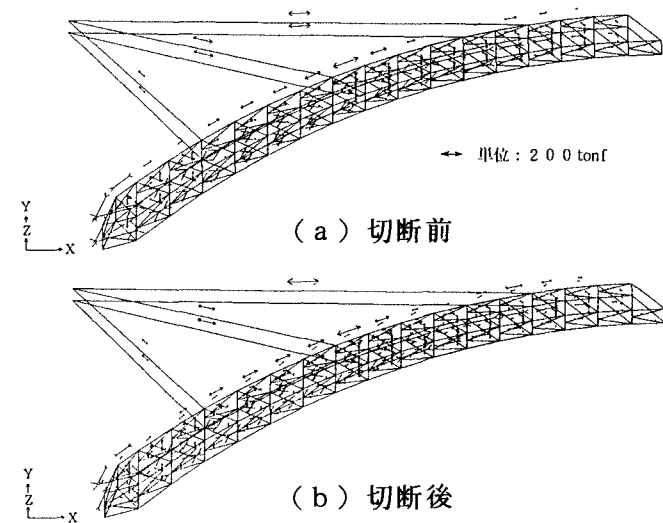


図-6 切断前後のケーブル張力等軸力の変化

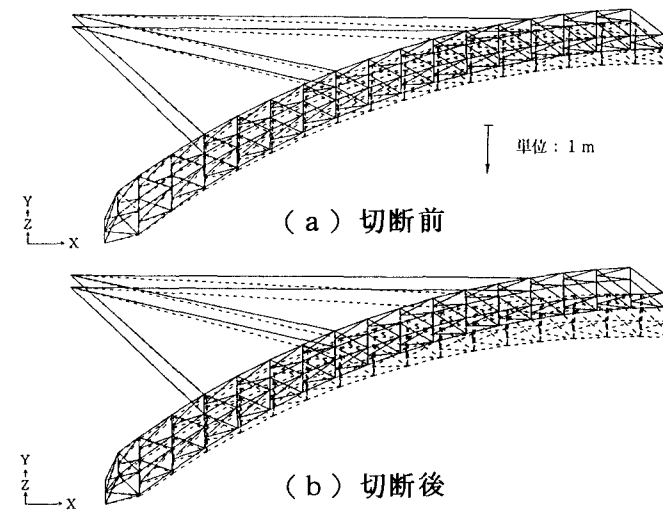


図-7 切断前後の変形状

表-4 切断前後の変位量

着目点	鉛直方向		横方向 風荷重
	切断前 (mm)	切断後 (mm)	
上流側	342	880	174
下流側	342	948	174

予め引張試験を実施して求めた。ワイヤーロープの許容値は、切断荷重を安全率で除した値⁴⁾が用いられ、常に先端の1段のみが効いているとして計算する場合の安全率は2である。また、ワイヤークリップは、ケーブルに対応したものをを用いた（クリップの安全率も2である）。なお、斜吊ケーブルS1、S2、S3はそれぞれ滑車を1個、2個、2個介して張力が伝達される機構となっているので、実際の耐力は切断荷重をそれぞれ2倍、4倍、4倍した値となる。

図-5は、アーチリブ閉合前の状態を骨組によりモデル化したもの（作業上、最も注意を要する架設ステップ）であり、A1あるいはA2橋台側のアーチリブのスケルトン（骨格図）を表している。3次元骨組構造解析により、鉛直荷重について斜吊ケーブルが全数有効に働くものと仮定して張力を算出した結果と、S3下流側のケーブルが切断した状態を仮定して求めた結果を整理し、上流側の値を記したものが表-3である（切断後については、下流側の値を（）内に示している）。ここで、後者では、切断したケーブルに作用していた軸力をアーチリブとの定着点に逆向きに作用させ、衝撃係数0.4（一般に、ケーブルに作用する荷重に関して、衝撃係数⁴⁾を0.2とする例が示されているが、ケーブル切断時の衝撃的な力に対して衝撃係数をどのように取り扱うかは記述されていない。そこで、安全側の評価を行うものとして0.4とした）を考慮した場合の解析結果から値を算出している。

同表にはA2上流側の実測値も示しているが、切断前の解析結果と実測値がよく対応し、解析結果の妥当性が検証された。したがって、同解析により切断後の状態を推定しても差し支えないものと判断される。なお、許容応力度設計では、前述のように先端のS3ケーブルのみが有効に働くものと仮定し、張力が算出される。本例では解析の結果、305.2tonfとなったことを付記する。

図-6は、解析により得られた切断前後の軸力の変化を示す。S3上流側の張力はS3下流側ケーブルの切断後、44%ほど増大（表-3参照）し、大きな変化が見られる。しかし、計算上の余裕度（＝耐力／設計張力）は、切断後も3を越えているので、万一、斜吊ケーブルが一本切断しても、耐荷力の観

点からは問題ない。また、風荷重に関しても同様の解析を実施したが、張力の変化はほとんど見られず、耐荷力について実用上問題ないことが判明した。

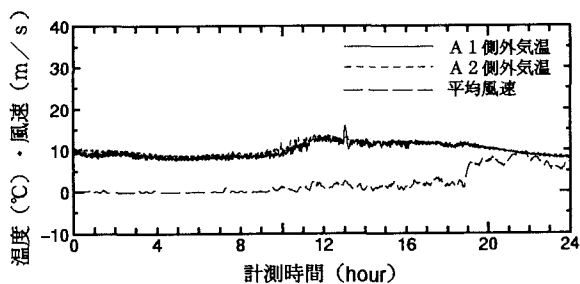
なお、S3下流側のケーブルが切れた場合、アーチリブは大きくねじれ、このねじれの影響により部材力が許容値を超えることも予想されたので、アーチリブの上・下弦材、斜材、鉛直材、上横構、下横構及び対傾構について断面照査を行ったが、許容値を超える部材は見られなかった。

つぎに、切断前後の変形状態を調べた。図-7と表-4（アーチリブ先端の上フランジ側の変位）にその結果を示す。変形については、切断前後で上流側と下流側においてそれぞれ538mm、606mmの変位差を生じ、作業面からは重大な影響を及ぼすことが明らかである。したがって、万一、1本のケーブルが切断しても構造系が崩壊するまでには至らないが、大きな変位を生じるので、作業の安全性については注意を要する。なお、表-3に風荷重により発生した横方向の変位も併記しているが、鉛直方向の荷重に比べてその影響は小さい。

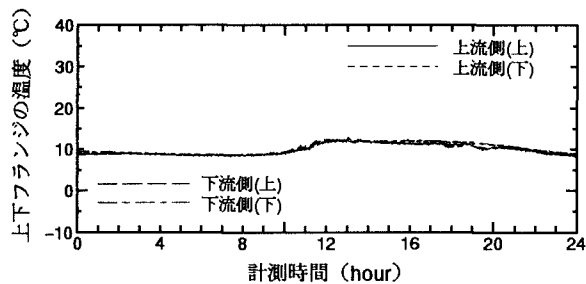
5. システムの適用結果

本システムを適用し、各計測項目についてその経時変化を調べた結果の一例を図-8に示す。（a）は外気温と平均風速、（b）は橋体温度（上下フランジ）、（c）はA1側アースアンカー躯体部の変形、（d）はアンカーケーブルのクリップの弛み、（e）はA2上流側S1、S2、S3ケーブルの張力、（f）は橋台の傾斜の値を示す。

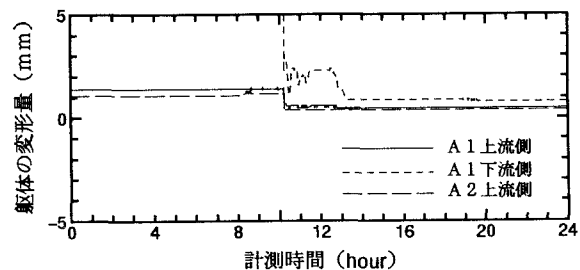
各計測項目の値が表-2の管理許容値（作業上の安全性を確保するために設けられたものである）を超えた場合には、警報を発するように設定したが、平均風速については台風接近時を含め、アーチリブ閉合までに許容値を超えたのは2回である。また、閉合直前（12月9日）、ケーブルクレーンにより部材を移動させている最中にA1下流側のアースアンカーの一部の変位が5mmを超え、10mm近くあるものが見られたが、移動を完了すると、元の状態に戻ったので、アンカーの調整を行わず、様態を観測することとして計測を継続した（許容最大変位量は15mmであるので、10mm程の変位は特に問題ではない。



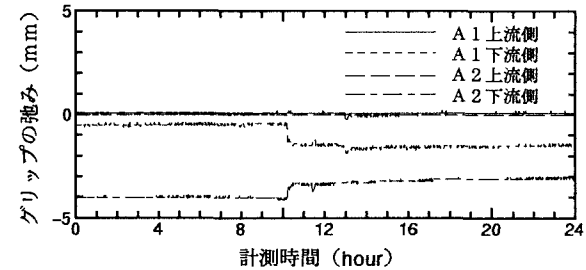
(a) 外気温・平均風速の経時変化



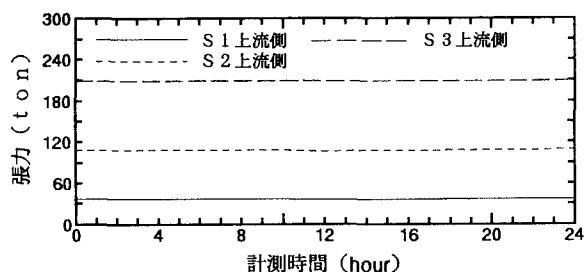
(b) 橋体温度の経時変化



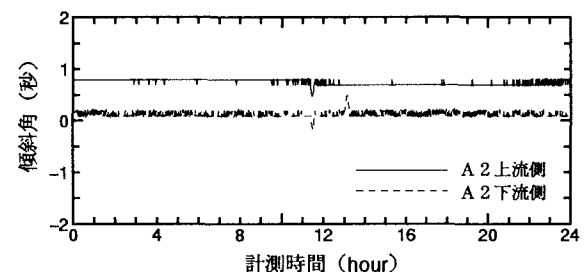
(c) アースアンカー躯体部の動き



(d) クリップの弛みの経時変化

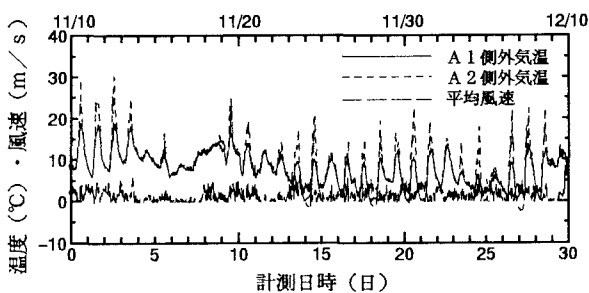


(e) ケーブル張力の経時変化

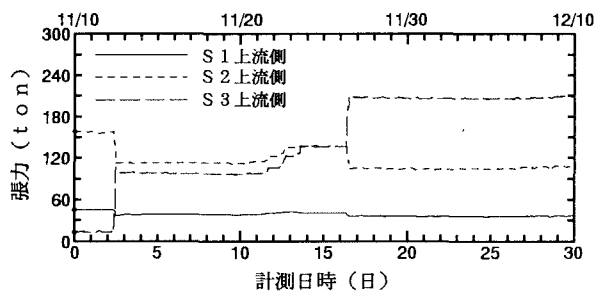


(f) A2 橋台の傾斜

図－8 各計測値の経時変化（1日単位）



(a) 外気温・平均風速の経時変化



(b) ケーブル張力の経時変化

図－9 各計測値の経時変化（1ヶ月単位）

しかし、一個所だけ大きな変位を生じていたので、荷重が偏載していたとも考えられる。そこで、その部分を注意深く観測しながら作業を進めた。

図－9に各計測値の経時変化を1ヶ月単位で整理した結果の一部（外気温、風速、ケーブル張力）を

示す。なお、表－3のケーブル張力の実測値は、図－9（b）および図－8（e）から得られたものである。

その他の部位の変位やクリップの弛みも、鉛直荷重が最大となる閉合前が最も大きいので、閉合前に

クリップなどの状態を再度調べ、必要に応じて増締め等の調整を行った。なお、斜吊ケーブルについては、調整時の張力を実時間で把握できるので、張力管理や形状管理の面からも有益な情報を得ることができた。

6. 形状管理

長大アーチ橋の3次元的な形状を把握する道具として、現状では、精密型トータルステーションが最も有効である。今回、本システムとは別に開発した橋梁の3次元形状計測システム²⁾（図-10にシステムの構成・概要を示す）を用いてアーチリブのキャンバーや通りの精度確認を行った。同システムの特徴、効果及び測定要領については、文献2)に詳細に記されているので、ここでは省略する。

測定点の全てを一度に視準することはできなかったため、機械点移動を行い、数カ所所で測定されたデータを結合して所要の値を求めた。その結果を図-11に示す。ここで、測定位置は、アーチの支承のピン中心点、補剛桁を支持する支柱の既知点などである。キャンバー誤差については、通常の許容値 $\pm [25 + (L - 40)]$ （単位mm、L：支間長）の1/2を管理目標値とした。通り誤差についても、キャンバーと同程度とした。

キャンバー誤差は上流側で $-43\text{mm} \sim 53\text{mm}$ 、下流側で $-71\text{mm} \sim 49\text{mm}$ 、通り誤差は上流側で $-51\text{mm} \sim 80\text{mm}$ 、下流側で $-91\text{mm} \sim 26\text{mm}$ といずれも管理値 $\pm 107\text{mm}$ 内にあり、所要の精度を満足する。但し、アーチクラウン周辺の閉合部材において一部角折れが生じており、調整を必要とする。

斜吊ケーブルの張力誤差は、表-3のとおりであるから、斜吊工法を用いたアーチ橋の形状管理としては、比較的精度よく実施することができ、設計で想定した状態にほぼ近いものと推察される。

7. おわりに

本研究を通して、従来、現場作業員や管理技術者

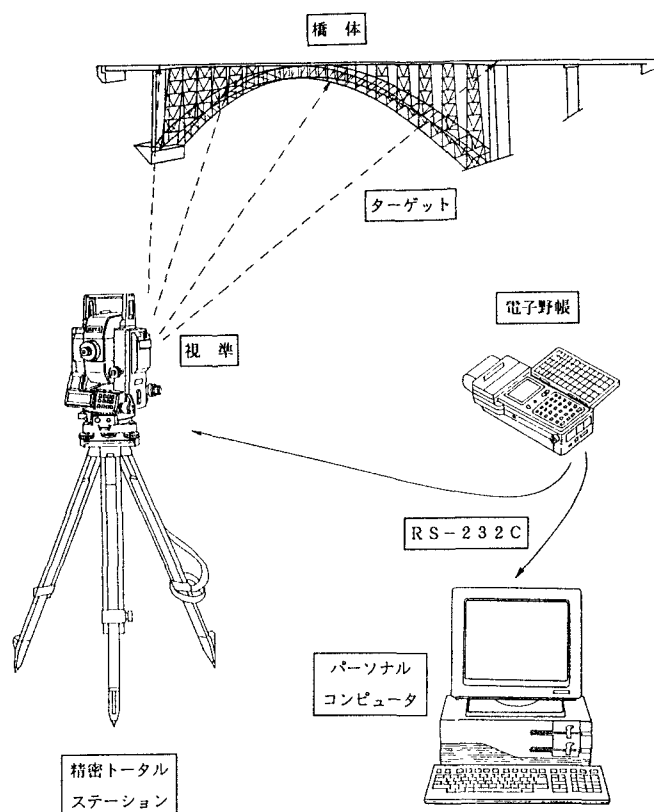


図-10 3次元形状計測システムの構成

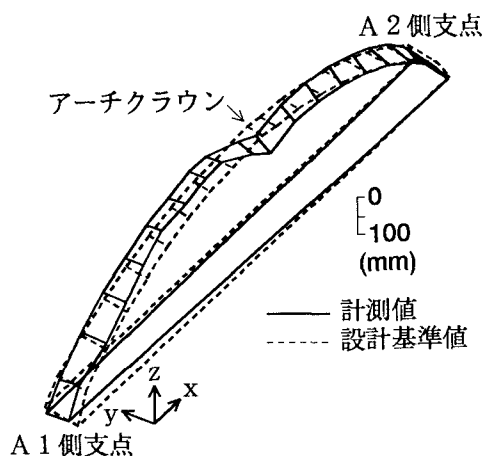


図-11 測定結果（設計値との比較）

の技能や勘に依存する面が多かった安全施工管理をコンピュータ応用の自動計測システムを用いることにより、数値的に把握できるようになり、より信頼度の高い安全施工管理を実施することができた。また、平成6年12月9日にはアーチリブの閉合を無事完了し、安全施工管理システムの必要性や有用性が強く認識された。

平成7年7月現在、本橋の他に伊豆大島で架設中

の斜吊工法を用いた鋼アーチ橋に本システムを適用し、安全性を確保するとともに、システムの信頼性の向上を目指している。

最後に、本研究に対してご指導・ご助言を賜りました建設省中国地方建設局温井ダム工事事務所の方々と、計測に際してご支援頂いた愛測エンジニアリング(有)に感謝の意を表します。

参考文献

- 1)九州橋梁・構造工学研究会：橋梁架設工法の安全性について
KABSE、pp. 1～20、1994
- 2)林ほか：鋼橋の3次元計測に関する基礎的研究、橋梁と基礎
93-7、pp. 19～25、1993
- 3)田村ほか：ニールセン橋相模川橋の架設精度管理、トピー鉄
構技報、No. 11、pp. 42～50、1995
- 4)日本道路協会：鋼道路橋施工便覧、丸善、pp. 165～177、1985

S a f e t y C o n s t r u c t i o n M a n a g e m e n t f o r a L o n g - s p a n A r c h B r i d g e e r e c t e d b y m e a n s o f t h e C a b l e E r e c t i o n M e t h o d

Recently, the accidents of collapse in arch bridges under construction have been occurred one after another. In result, the safety construction management/control as it ought to be, becomes one of the most important problems for an arch bridge during erection. From the above point of view, we developed a new safety control system for an arch bridge erected by means of the cable erection method, and tried to apply the fail safe design to one of an arch bridge in place of the allowable stress design. In this paper, we give an outline of this system and design, and describe the results of its application to the design and construction of a long-span arch bridge. In addition, it is mentioned the results of 3-dimensional measurements for the arch-rib configurations.