

斜張橋形式の五所川原市水道橋工事報告

久保田幸男*
清水 功雄**

1. まえがき

五所川原市水道橋は、青森県五所川原市が同市元町浄水場拡張工事の一環として、岩木川からの取水のために計画された水管橋である。

本橋の型式は、逆三角形断面パイプトラス形式の斜張橋で比較的目新しい構造形式である。完成写真をグラビアに載せたが、ハープ型のケーブルとスレンダーな主構（主構高さ/支間=1/30）により斜張橋特有の構成美を持つ橋梁である。

また、景観上の配慮から現場継手を塔、主構ともすべて溶接構造とした。

本文では、支間長に対し主構の剛性が比較的弱く、しかも軽量な構造物における斜張橋ケーブルの設計と現場張力管理を中心に、全部材を溶接構造とすることによる変形状と現場施工について報告するものである。

2. 工事概要

発注者	青森県五所川原市
工事名	第4次拡張元町浄水場取水施設工事(上部工)
工事場所	五所川原市大字石漁住町地内
構造形式	3径間連続逆三角トラス形式斜張橋
橋種	水管橋 送水管φ400mm×1条
橋長支間	橋長 171.0m (40.0m+91.0m+40.0m)
主塔	逆Y形×2基 高さ28.35m
ケーブル形式	ファン形 ロックドコイルロープφ42mm

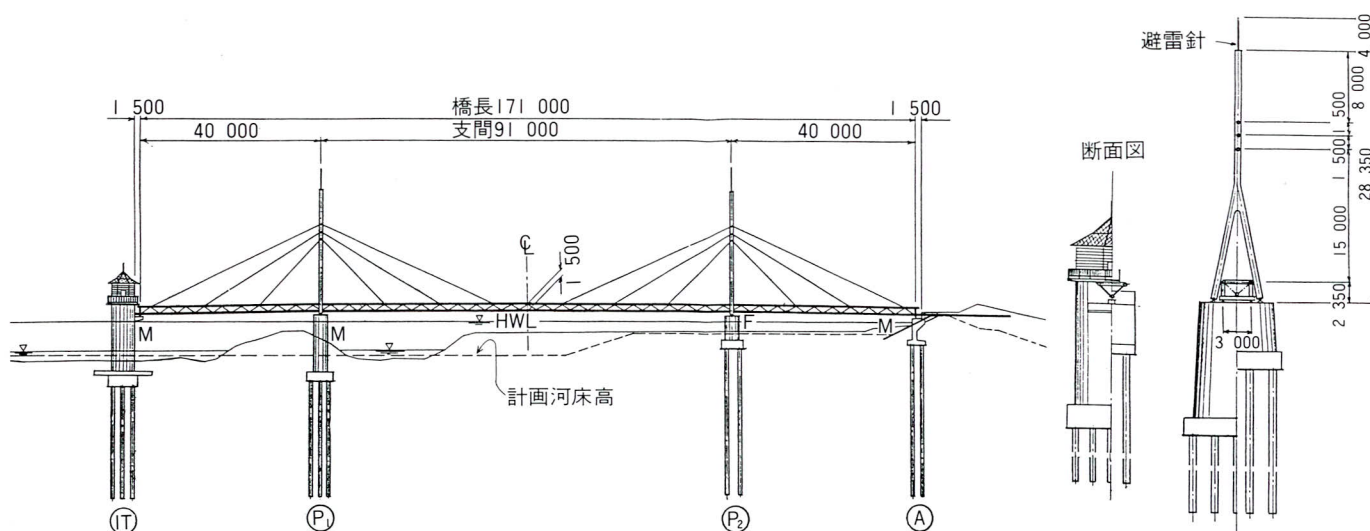


図-1. 五所川原市水道橋一般図

* 技術本部設計第2課課長代理

** 技術本部技術開発部付課長

3. 構造の概要

(1) 概説

五所川原市水道橋は、岩木川に築造される取水塔から揚水した河水を、右岸の元町浄水場に送水するために計画された水管橋である。本橋の上流150mに平行して、五所川原大橋の架設が計画されている。水管橋のスパン割りは、この五所川原大橋のスパン割りにある程度制約を受け、更に、完成後の景観とユニークさを重視して、**図-1**の一般図に示す様な、水管橋としては斬新な斜張橋形式の水道橋が計画された。

取水塔の塔屋についても、五所川原市上水道創設時に造られた飯詰浄水場のシンボリックな上屋を模して、平面形を八角形とし、二重屋根の外観としている。

古い形の取水塔と新しい形式の水管橋が一体となり、周囲の環境と調和のとれた構造美をほこり、また、水道事業のアピールをはかっている。

(2) 主桁

主桁断面は、**図-2**に示す様に上弦材 $\phi 400\text{mm} \times 2$ 条、下弦材を送水管 $\phi 400\text{mm} \times 1$ 条とする逆三角形断面の三径間連続トラスである。逆三角形の三面がトラス組みされた立体トラスとなるので、面外荷重によるせん断力に対して、全ての斜材が抵抗する合理的な骨組構造である。

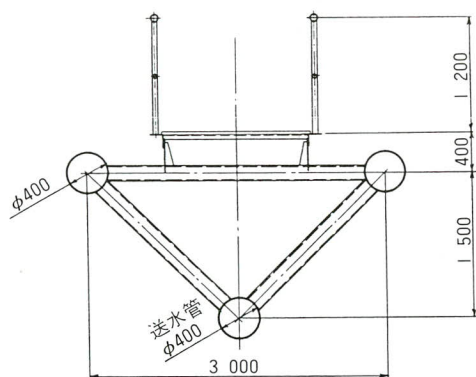


図-2. 主桁断面図

全ての部材に鋼管を用いた全溶接のトラス構造であり、全体で15ブロックから成る。1ブロックの長さは、約12mである。製作を容易にするために、各々のブロックは水平に製作し、キャンバーはポリゴン折線で行った。完成時に、縦断勾配を観察したが、異和観は全く感じられなかった。

ブロック同志の現場接合は全て現場溶接であり、送水

管の第一層の溶接には、TIG溶接を採用した。これについては現場施工の項で後述する。

景観的に、側面から見て出来るだけスレンダーな感じを強調するために、トラス高さは極力低くおさえ、1.5mとしている。

(3) 塔

塔は鋼製箱形断面の逆Y形である。主桁トラスの振り剛性が比較的大きいことと、ケーブルの線をすっきり見せるために、ケーブルは一面吊りとしている。そこで、塔は単柱部を強調させた逆Y形としている。

即ち、上段ケーブルの上に飾り柱を8m延長し、塔頂一本柱がそそり立ち、更に、高さ4mの避雷針を設置している。この避雷針も景観的に良いアクセントになっていると思われる。

本橋は美観には十分留意し、色彩の選定もパースの作成に始まり、色彩コンサルタントへの相談等により決定した。主桁トラスは淡いブルー、塔は象牙色に色分けし、さらに、塔柱の二又の内側は主桁トラスと同色にしている。塔柱ブロックの現場継手にも現場溶接を採用した。

(4) ケーブル

ケーブルの配置は、景観的に美しいと共に、力学的にも合理的なファン形の一面三段吊りを採用している。水管橋の鉛直荷重は、鋼重、水重、および雪荷重の死荷重が支配的であるが、いずれも荷重としては小さい。そこ

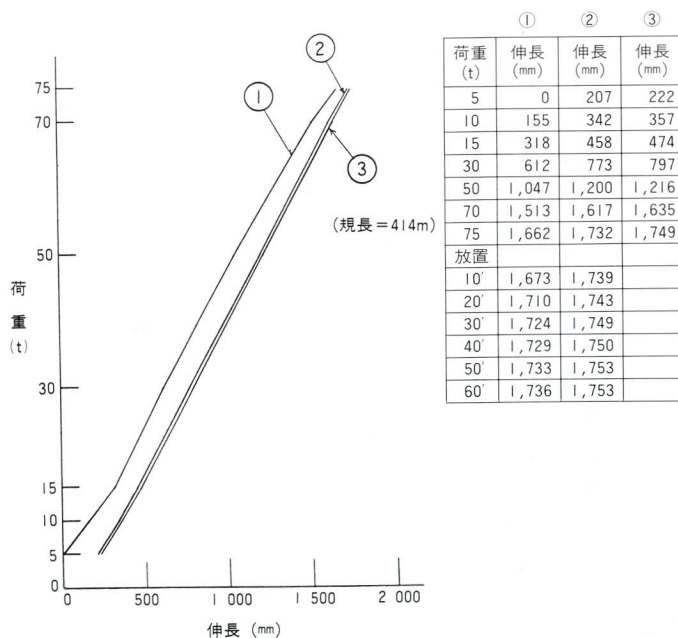


図-3. プリテンション成績結果

でケーブルとしては、素線が亜鉛メッキされ、特別な防蝕が不要であるロックドコイルロープを使用した。いずれのケーブルもC形の42φとし、全体で12本使用している。

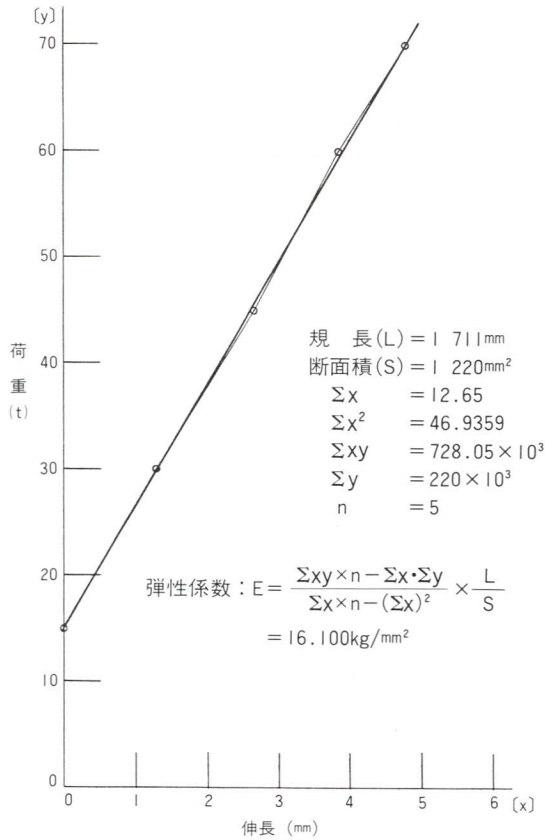


図-4. 弾性係数測定結果

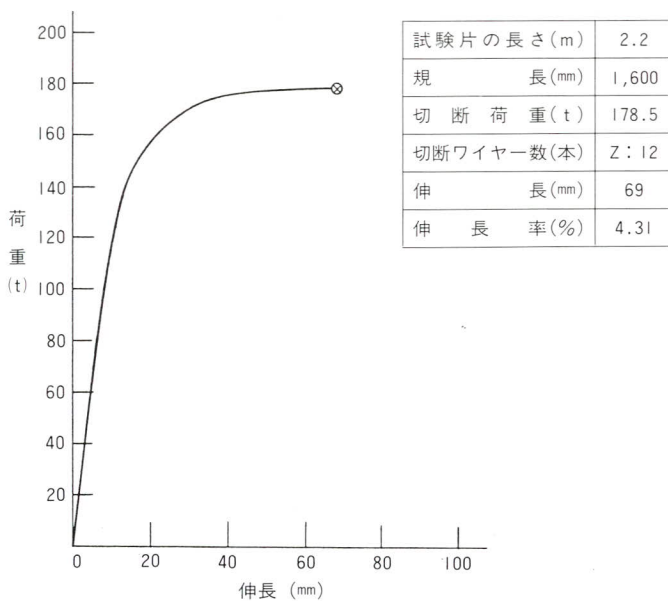


図-5. ワイヤロープ切断試験結果

る。

各ケーブルとも弾性係数を高め、また、ケーブルのねじれを安定させるために、プリテンション加工を行った。図-3にプリテンション成績結果を示す。また、設計々算に使用したケーブルの弾性係数は $1.6 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ であるが、この確認のために弾性係数の測定を行った(図-4)。更に、ケーブルの切断試験を行った(図-5)。これらの結果は、いずれも満足できるものであった。

斜張橋においては、ケーブルの製作長さは厳密に管理されなければならない。表-1に各ケーブルのソケット前面間の長さの設計長と製作長を示すが、いずれも+5mm以内の誤差に収まっており、前もってシムプレートによる誤差調整を考慮する必要は無いものと判断した。

表-1. ロープ完成品条長記録表 (20TONマーキング荷重下)

ロープ No.	(mm) 設計長	(mm) 完成度	(mm) 誤差	ロープ No.	(mm) 設計長	(mm) 完成長	(mm) 誤差
1-1	43,127	43,131.5	+4.5	1-2	43,127	43,131.0	+4.0
2-1	31,760	31,763.5	+3.5	2-2	31,760	31,763.5	+3.5
3-1	21,192	21,193.0	+1.0	3-2	21,192	21,193.0	+1.0
4-1	20,896	20,896.0	0	4-2	20,896	20,897.0	+1.0
5-1	31,364	31,365.0	+1.0	5-2	31,364	31,365.5	+1.5
6-1	42,582	42,586.0	+4.0	6-2	42,582	42,587.0	+5.0

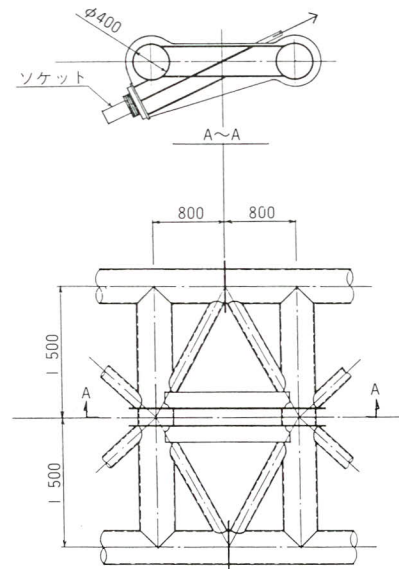


図-6. 主桁側ケーブル定着構造

(5) ケーブル定着部の構造

主桁トラスは全てパイプ構造であるので、主桁側のケーブル定着構造はパイプを主体に構成している。図-6および写真-1、2に見る如く、両側の上弦材の間に2

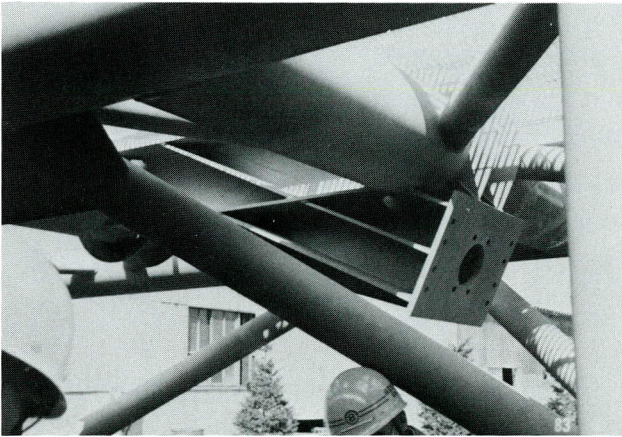


写真-1. 主桁側ケーブル定着部（側面）

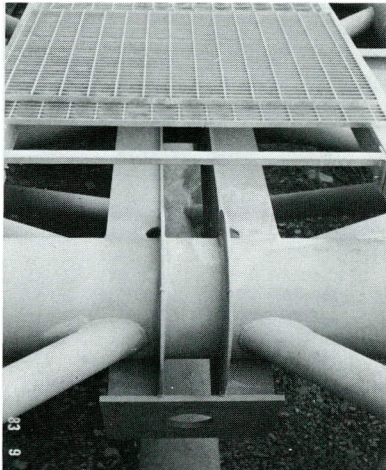


写真-2. 主桁側ケーブル定着部（正面）

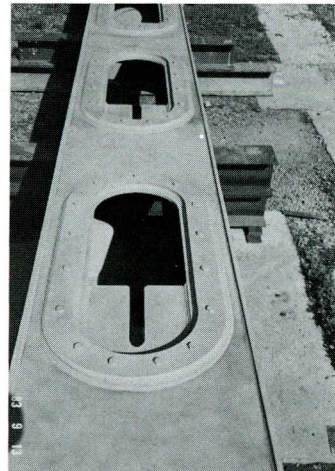


写真-3. 塔側ケーブル定着部（外面）

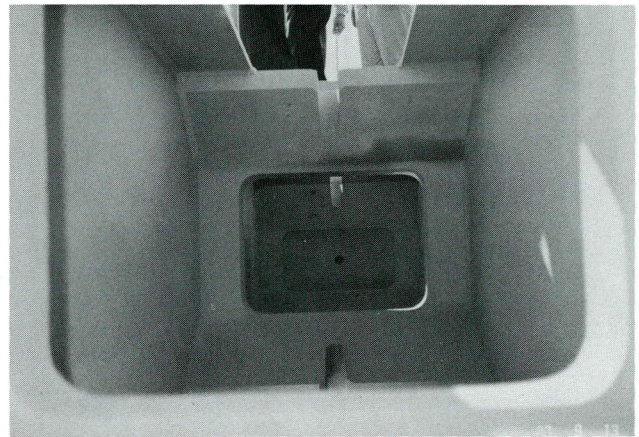


写真-4. 塔側ケーブル定着部（内面）

本の横パイプを渡し、これに縦ビームを取り付ける。この縦ビームにケーブルソケットを定着する構造としている。また、定着部は開放形として、極大雨水がたまらぬ構造としている。

一方、塔側のケーブル定着構造は、塔柱の大きさが、700mm×800mmの比較的小さい断面であるので、ダイ

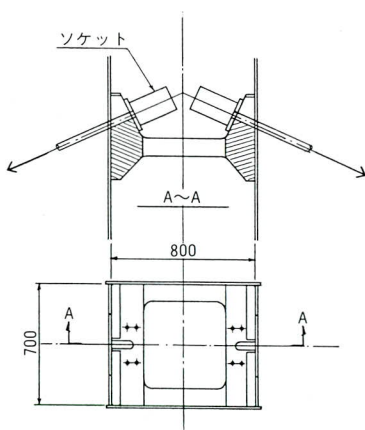


図-7. 塔側ケーブル定着構造

ヤフラムを兼ねた鋳鋼の定着ブロックを塔内に収めている。そのため、塔柱の製作時に、組み立てと同時に溶接して取り付けられた(図-7、および写真-3、4)。

(6) 耐風性について

一般に、主桁がトラス形式の場合、固有の振り振動数が鉛直曲げ振動数の2倍程度以上あれば、開床構造のトラスでは限定振動、跳躍振動、曲げ振りフラッターは、現われないと考えられる。ちなみに、本橋の固有振動数を計算すると、振動数比は低次のモードで $f_{\phi}/f_b = 2.1 > 2.0$ である。さらに、曲げ振りフラッター風速(V_F)をSelbergの近似式より求めると、 $V_F = 95\text{m/sec}$ となり、現地の風速として、問題のない値を示している。

鋼管三角トラスの斜張橋に対する風洞実験の報告は、皆無と思われる。ただ、並列鋼管の斜張形式である、仁保川水管橋¹⁾の耐風実験が報告されている。

仁保川水管橋の例によると、たわみ剛度が1/350程度の柔構造でも、構造減衰が $\delta = 0.02$ 程度あれば、振幅は

ほとんど問題とならないことが確認されている。

本橋の逆三角トラス主桁は、たわみ剛度も大きく、構造減衰も並列鋼管の仁保川水管橋より大きく、耐風性については有利と判断した。風洞実験による耐風性の検証は、製作工程の兼ね合い等もあり、断念せざるを得なかった。

なお、斜材、横構等の単一鋼管部材の外径は、カルマンうずによる加励振動を防ぐために必要十分な寸法としている。

4. 現場施工

(1) 架設

主桁の架設は、トラッククレーンベント工法とし、流水部は取水塔の建設用浅橋を利用して施工した。主構組立に当っては、逆三角トラスであることに加えて、各ブロックは溶接用仮拘束材の治具で連結されているだけなので、上下弦材を同時に支持する架台を設置することで安定と溶接仕口精度を確保した(写真-5)。

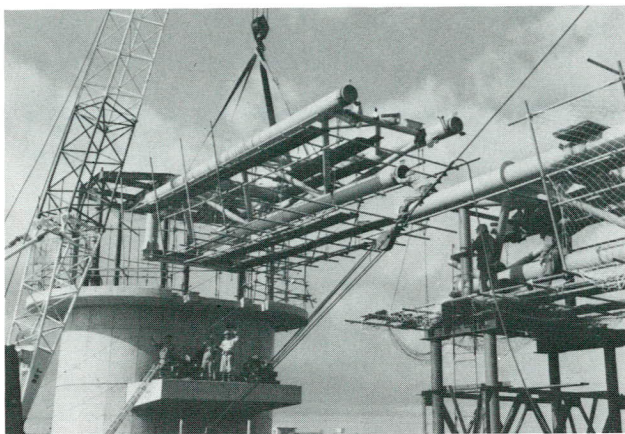


写真-5. 主構の架設

塔の架設では、現場で地組立し溶接完了した塔全体を一括吊上げにより所定位置にセットした。吊上げに当っては写真-6のように、4mの避雷針とケーブル定着部より上部の上塗完了部分を除き、塔中段に吊点を設けることで、塔を鉛直と約15°の角度を保持したまま、支承にセットした。15°の角度は塔下のピボット沓の許容回転量を考慮した値である。セットのあと、ケーブル引込み用金具を用いて控索を張り、組立を完了した。

主構のキャンバー形状は、支保工上に架設した時点では現場継手部で折ったR=10000mのポリゴン折線と

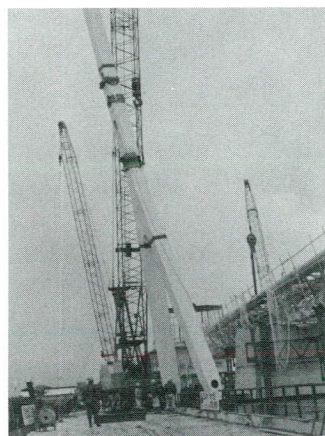


写真-6. 塔の架設

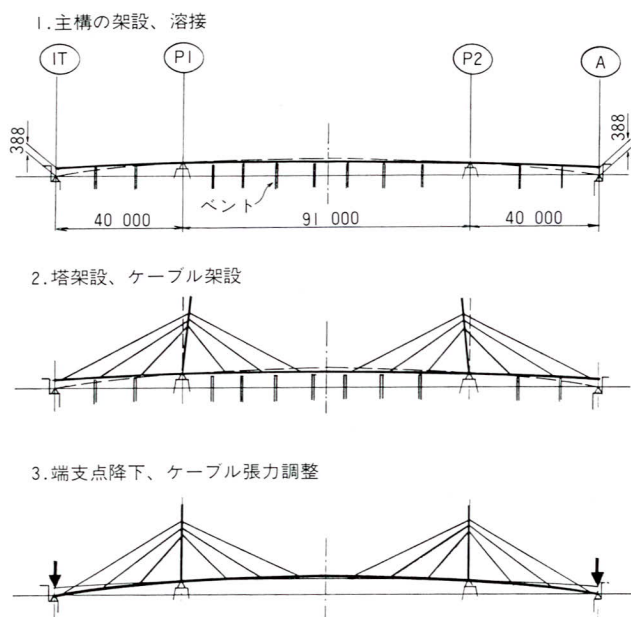


図-8. 架設順序とキャンバー形状

なっている。この状態で現場溶接し、ケーブル定着部に所定のシムプレートを挿入したあと、両端支点を引き下げる方法でケーブル張力の導入を計ることで、所定のキャンバー形状を得た。本橋のような自重の少ない構造物におけるケーブル軸力の導入方法としては、管理のしやすい方法である。架設手順とキャンバー形状を図-8に示す。

(2) 現場溶接

送水管は、管径 $\phi 400\text{mm}$ 、管厚 $t=12.7\text{mm}$ 、材質STPY41で、トラスの構造体の一部となっており、片面からの完全溶け込み溶接が要求される。さらに、溶接ビードと熱影響部の防錆のため鋼管の裏面に厚さ2mmのステンレス板の内張を施し、内面アルゴンガスシール

ドのTIG溶接を採用した。溶接作業は、主構を全長にわたって架設し、キャンバーおよび芯の通りを調整したあとの作業となるので、送水管の全長172mにわたり、片押しでシールド用治具にガスを安定供給することで、良好な溶接結果を得た。溶接条件は、電流130A～160A、電圧35V～40V、パス数5、開先ギャップ2.0mm～6.0mm、気温10℃以上である（図-9）。

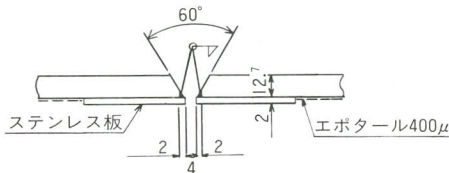


図-9. 送水管開先形状 (WSP 010-74による)

溶接順序は、溶接による拘束応力を少なくするため、拘束治具を仮付状態で切断し、上弦材（φ400mm・STK41・裏当て付）→下弦材（送水管）→斜材（φ165mm・STK41）とした。

溶接による主構の橋軸方向収縮量を見ると、 P_1 （可動）～ P_2 （固定）間で-30mmとなり、溶接施工試験により予測した結果より30%程大きい値となった。これは、拘束材を開放したことと、斜材、横構材の収縮等が重なった結果と考えられる。この誤差量約10mmについては、ケーブル張力調整用シムプレートの増減により処理することで解決した。本橋のように、全溶接桁を斜吊構造とする場合は、溶接縮み量の予測と施工順序との関連を十分検討する必要がある。

(3) ケーブル張力の管理

1) 概論

斜張橋の架設管理としては、以下の2点が基本となる。

- ① 形状的管理：桁のキャンバー、塔の鉛直度等の形状寸法の管理を行なう。
- ② 力学的管理：ケーブル張力に着目し、張力を極力、設計値に近づける様に調整を行なう。

桁の形状は各種要因により左右される。即ち、計算誤差、製作誤差、架設誤差、現場溶接による縮みの予測誤差、およびケーブル張力の誤差等により影響を受ける。

このため、桁の形状とケーブル張力の両者を完全に、設計値に調整することは極めて困難である。斜張橋の応力状態は、主にケーブル張力に負う所が大きいので、

ケーブル張力の管理（②力学的管理）を第一義に考え、桁のキャンバー（①形状的管理）の誤差は、実用上問題のない範囲で許容するものと考えた。

2) ケーブル張力の測定方法

現場におけるケーブル張力の測定には様々な方法があり、それぞれ特色がある。これらのうち、一般的な方法として、次の様なものがある。

- ① ケーブルのサグから張力を算出する方法。
- ② ケーブルの固有振動数から張力を算出する方法
- ③ ロードセル、またはストレインゲージで張力を測定する方法。
- ④ 直接、ジャッキの油圧メーターから張力を読み取る方法。

本橋の場合の張力測定方法としては、ケーブル本数が全部で12本と少ないので、最も簡便で、経済的な油圧ジャッキのメーターから直接、ケーブル張力を読み取ることとした。ただし、ケーブルの張力導入に使用するセンターホールジャッキは、前もって試験機によるキャリブレーションを行った検定済みのジャッキを使用した。

3) ケーブル張力の調整

ケーブル張力の調整作業は、主桁の端支点をジャッキダウンし、ケーブルにプレストレスを導入した後、調整用のシムプレート厚を増減することにより行った。図-10、および写真-7にケーブル張力調整装置を示す。

前もって、シムプレートの調整の量とケーブル張力の変化量との関係式を求めておく。

シムプレートの調整量を[X]、ケーブル張力の変化量を[Y]とすれば、[X]と[Y]は次式の関係にある。

$$[A] \cdot [X] = [Y]$$

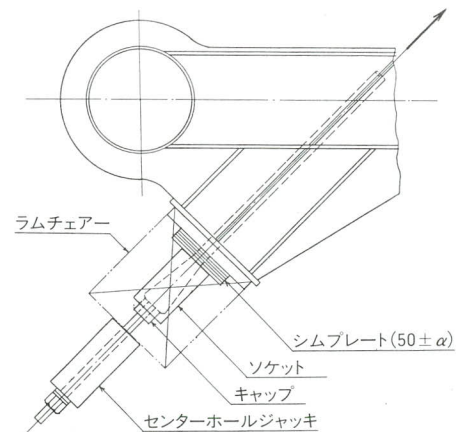


図-10. ケーブル張力調整装置

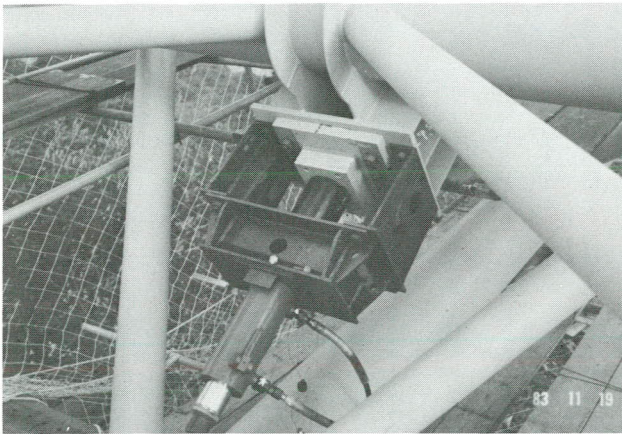


写真-7. ジャッキによるケーブル張力調整

ここで、 $[A]$ はケーブル長を単位長さ調整した時の、各ケーブルの張力の変化量を表わす係数行列である。

ケーブル張力の設計値と測定値の差が、ケーブルの長さの誤差のみに起因するのであれば、上式を解いて $[X] = [A]^{-1} \cdot [Y]$ として、シムプレートの調整量 $[X]$ は簡単に求められる。しかし、実際には種々の原因によって生ずるケーブルの張力差をケーブルの長さの調整のみで解決しようとする計算になり、無理がある。ちなみに、上式でシム調整量を算出すると、非現実的で過大なシム調整量が計算結果として算出されてしまう。

このシム調整量の決定方法としては、「最適化手法による張力調整シム量の計算」として、文献²⁾にくわしく報告されている。

本橋の場合は、ケーブル本数が少ないため、最適化手法による計算をする程では無く、係数行列 $[A]$ の算出のみを行ない、あるケーブルを調整した際の他のケーブルへの張力変動を把握しておくことに留めた。

実際の現場では、油圧ジャッキのメーターによるケーブル張力の測定と、シムプレートの出し入れによる張力調整を全ケーブルについて、2～3度往復にすると収束してしまっ

た。ちなみに、P1側のケーブルの調整結果を、表-2に示

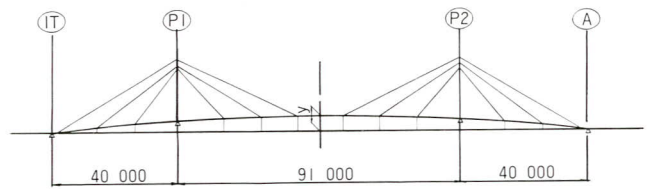
表-2. ケーブル張力の調整結果 (P1側)

ロープNo.	設計張力 (t)	調整張力 (t)	差 (t)	(mm) シムプレート厚
1-1	29.7	29.8	+0.1	69.0
2-1	27.3	27.5	+0.2	74.5
3-1	12.0	12.1	-0.1	52.3
4-1	7.4	7.2	-0.2	34.5
5-1	25.4	25.0	-0.4	60.0
6-1	34.4	34.0	-0.4	54.5

す。なお、調整用のシムプレートは、3種類の板厚 (2.3、4.5、10.0mm) を用意しておいたので、この組み合わせにより、調整量の自由度は大きかった。

ケーブル張力調整と共に、桁のキャンバー測定を行った。その結果、図-11に示すような、なめらかな誤差であったので、シム調整作業は終了とした。また調整完了時の塔の倒れ量の測定結果を図-12に示す。地組立時の溶接変形の一部が残っていると考えられるが、良好な結果と判断した。

また、写真-8に調整完了時の全景を示す。



測点	IT	2	3	4	P1	6	7	8	Q	10	11	12	P2	14	15	16	A
計画値	0	34	244	436	650	856	1002	1089	1105	1089	1002	856	650	436	242	35	0
誤差	0	-3	+7	+2	+3	+12	+23	+23	+25	+22	+17	+17	+1	-5	-1	0	0

図-11. 完成時のキャンパー値 (y) (mm)

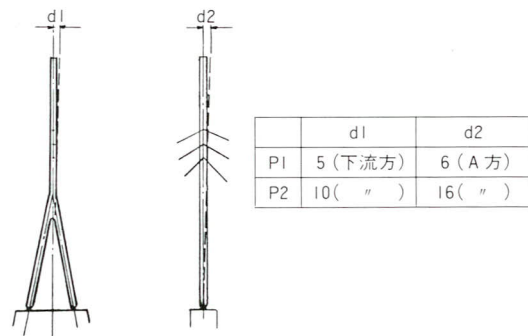


図-12. 完成時の塔の倒れ量 (mm)

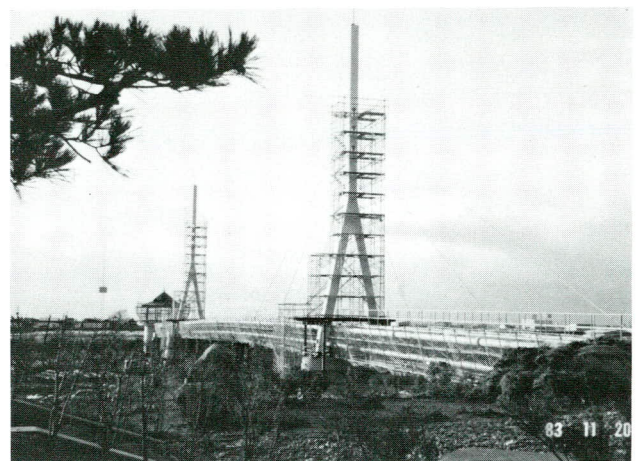


写真-8. 調整完了時の全景

5. あとがき

全溶接のパイプ構造と斜張橋形式の組合せによる構造は、その景観上のバランスの良さと鋼重の軽減の両面から、水管橋あるいは歩道橋などに今後多く採用されると考える。

本文では、現場施工と現場でのケーブルの張力管理について報告した。本橋のように、荷重が小さく、剛性の小さな構造物については、前記のように、風による振動、ケーブル張力の調整手順、さらに溶接変形に対する調整方法などに、道路橋などとは別の意味でむずかしさがあることが解る。

以上述べたように、キャンバーおよびケーブル張力管理の両面から、良好な調整結果を得ることができた。

終りに、本橋の施工に当って、五所川原市役所、および本工事の元請である(株)銭高組の関係者のみなさんには大変お世話になりました。誌上を借りて深謝するしだいです。

<参考文献>

- 1) 伊藤ほか：仁保川水管橋（並列鋼管斜張橋）の設計および耐風実験について、土木学会年次大会講演集；I-368（昭56）
- 2) 松村ほか：斜張橋のケーブル張力計測と張力調整、橋梁と基礎、1979-8