

外ケーブル併用によるラーメン橋の設計と施工 ——東北横断自動車道 天ヶ瀬橋——

有村 慎一郎*1・水上 善晴*2・佐藤 善悦*3・鈴木 眞之*4・加藤 学*5

1. はじめに

天ヶ瀬橋は、東北横断自動車道（東和～秋田線）の建設工事に伴う諸資・機材等の搬入路として、岩手県和賀郡湯田町に位置する錦秋湖を横断架設される橋長 342 m のプレストレストコンクリート（以下 PC と略記）道路橋である。構造形式は、PC 3径間連続ラーメン橋と PC 3径間連続合成桁橋より成り（図-1, 2 に位置図および全体一般図を示す）、このうち PC 3径間連続ラーメン橋（橋長 231 m）に、我が国の長大道路橋において、初めて外ケーブルを本設として採用した点に大きな特徴がある。

PC ケーブルをコンクリート部材の外側に配置した、いわゆる外ケーブルの歴史は意外と古く、1950 年代に

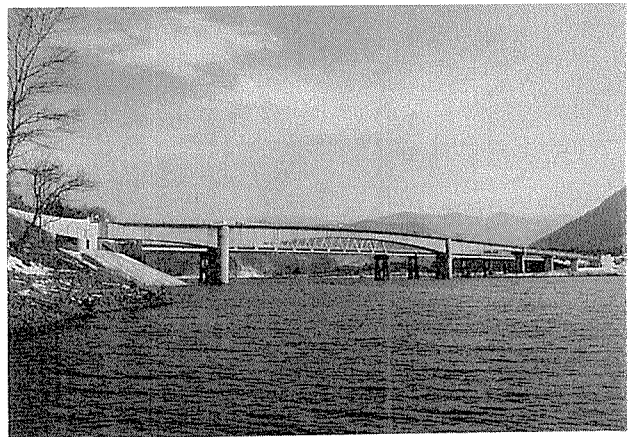


写真-1 全景写真

ヨーロッパにおいて多数の外ケーブル方式による PC 橋が建設されたが、PC 鋼材を腐食から守る防錆の技術の未熟さにより、補修に多額な費用を払うこととなり、次第に内ケーブルが主流となっていった。しかし最近では PC 鋼材の防錆技術の向上や太ケーブルの開発並びに PC 橋のプレキャスト化と連動した形で外ケーブル方式の PC 橋が見直されてきている。

このような技術動向のなか、本格的に外ケーブルを採用した天ヶ瀬橋の設計と施工についてここに報告する（写真-1 に全景写真を示す）。

2. 橋梁概要

2.1 工事概要

工事名：天ヶ瀬工事事用道路橋（PC 上部工）工事

施工場所：岩手県和賀郡湯田町大石地内～岩手県和賀郡湯田町耳取地内

発注者：日本道路公団 仙台建設局

工期：平成 2 年 6 月～平成 4 月 9 月

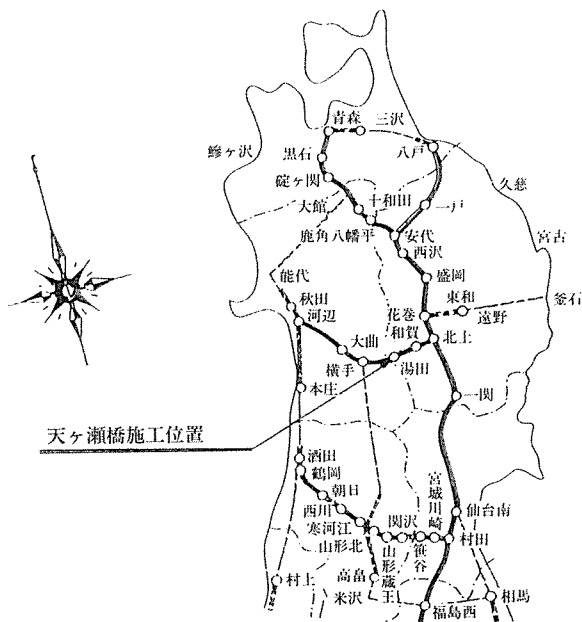


図-1 位置図

*1 Sinitiro ARIMURA：日本道路公団 仙台建設局北上工事事務所工事長

*2 Yosiharu MIZUKAMI：日本道路公団 仙台建設局構造技術課

*3 Zenetu SATO：(株)銭高組 天ヶ瀬橋作業所所長

*4 Masayuki SUZUKI：(株)銭高組 土木本部 PC 部技術課

*5 Manabu KATO：(株)銭高組 名古屋支店土木部

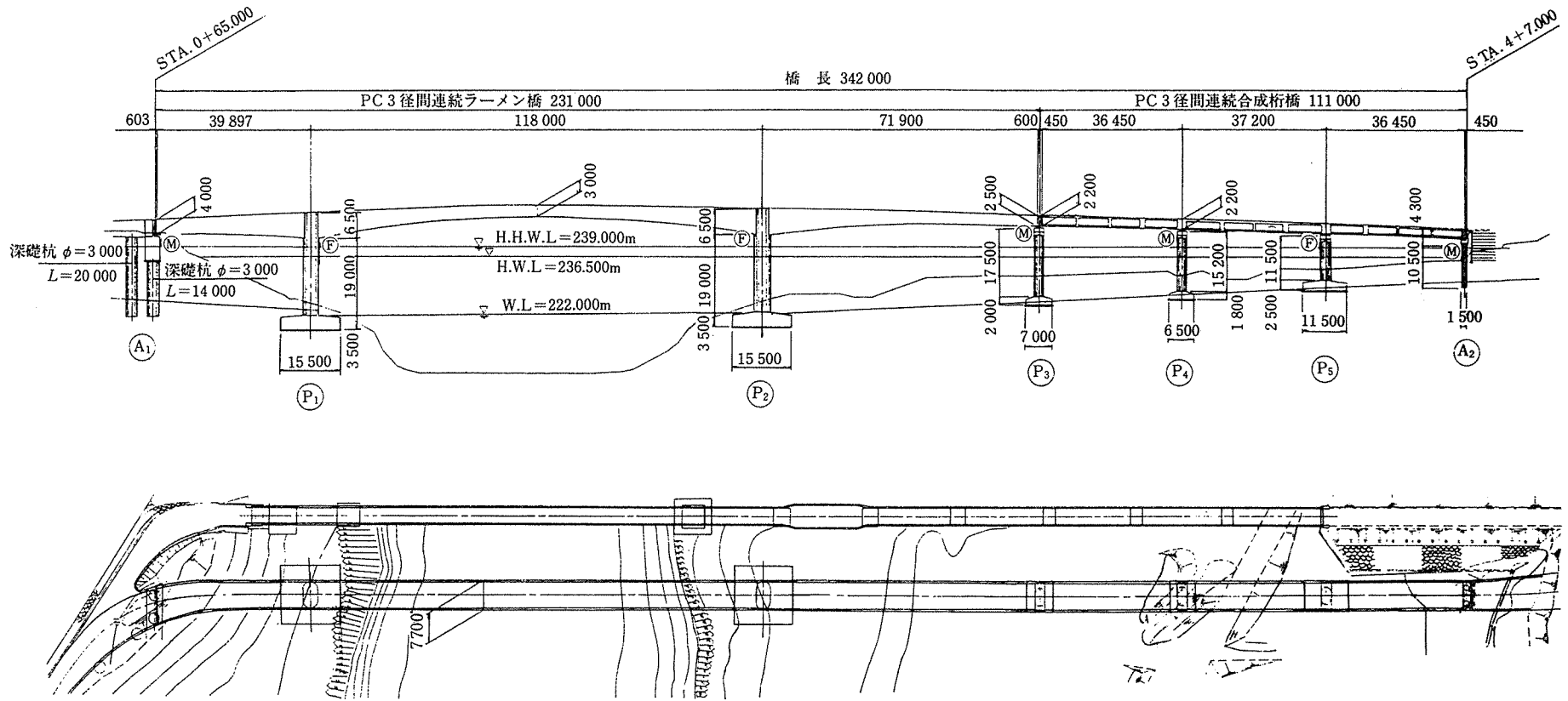


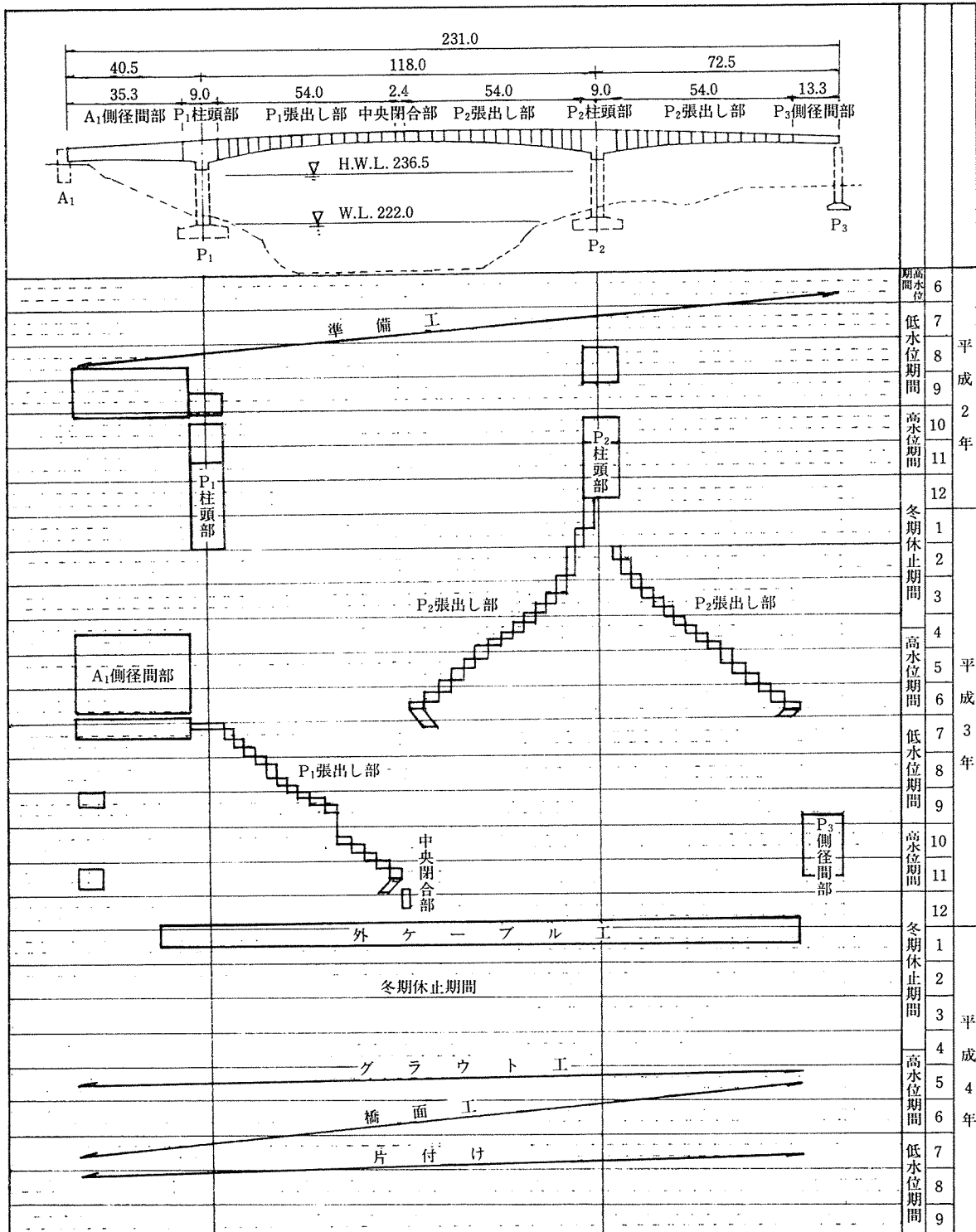
図-2 全体一般図

◇工事報告◇

表-1 主要工事数量 (PC 3径間連続ラーメン橋)

項目	単位	種別	上部工	下部工	小計	合計
コンクリート	m ³	$\sigma_{ck}=160 \text{ kgf/cm}^2$	115	-	115	2 363
		$\sigma_{ck}=240 \text{ kgf/cm}^2$	101	2	103	
		$\sigma_{ck}=400 \text{ kgf/cm}^2$	2 145	-	2 145	
鉄筋	tf	SD 345	189	39	228	228
PC 鋼材	tf	SBPR 930/1180 ϕ 32 mm	106	-	106	128
		SBPR 930/1180 ϕ 26 mm	16	-	16	
		SWPR 7 A 12 T 12.4	6	-	6	

表-2 工事工程表



2.2 橋梁諸元

橋 種：プレストレストコンクリート道路橋
 構造形式：PC 3 径間連続ラーメン橋
 および PC 3 径間連続合成桁橋
 道路規格：第3種4級 ($V=30$ km/h)
 橋 格：1等橋
 橋 長：342.000 m (231.000 m+111.000 m)
 支 間：(39.897 m+118.000 m+71.900 m)
 +(36.450 m+37.200 m+36.450 m)
 有効幅員：8.367 m~6.500 m
 平面線形： $R=30$ m, $A=30\sim R=\infty$
 勾 配：縦断 $i=4.0\%$ ~ 2.7%
 横断 $i=6.0\%$ ~ 2.0%
 施工方法：ディビダーク式カンティレバー工法
 (PC 3 径間連続ラーメン箱桁橋)

主要工事数量：表-1 に示す (同上)

工事工程表：表-2 に示す (同上)

3. 設 計

3.1 設計概要

本橋は、先にも述べたように構造形式は、PC 3 径間連続ラーメン箱桁橋で中間支点上で桁高 6.500 m、中央径間中央で 3.000 m、 A_1 端支点上で 4.000 m、および P_3 端支点上で 2.500 m となっており、その間を 2 次曲線で変化させた変断面となっている。図-3 に主要断面の主桁断面形状を示す。

本橋は図-13 の施工順序図に示すように、施工が進むに従って構造系が逐次変化 (静定構造系、1 次不静定構造系) し、完成系 (5 次不静定構造系) に至るため、断面力はコンクリートのクリープ・乾燥収縮の影響を受けて、時間の経過とともに変化する。この断面力の変化の影響については設計計算に十分反映させている。

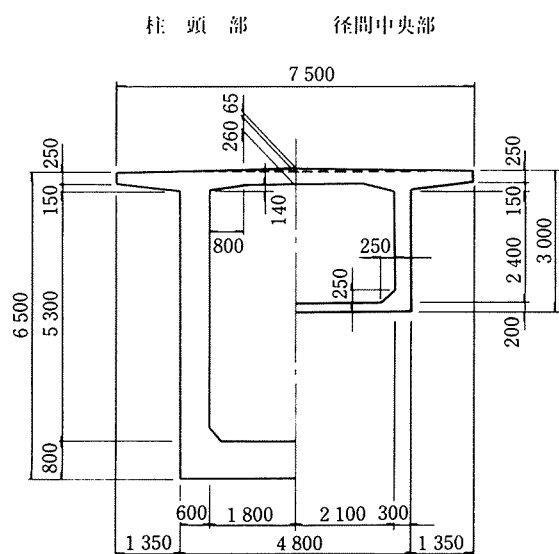


図-3 主桁断面形状図

3.2 設計条件

活 荷 重：TL-20
 温 度 変 化： $\pm 10^\circ\text{C}$
 温 度 差：上床版 $+5^\circ\text{C}$
 設 計 震 度：水平震度；橋軸方向 $k_h=0.23$
 直角方向 $k_h=0.23$
 鉛直震度； $k_v=0.0$
 クリープ係数：有効プレストレス算出用 $\phi=1.95$
 主桁設計時用 $\phi=1.70$
 床版設計時用 $\phi=2.60$
 乾燥収縮度：有効プレストレス算出用 $\epsilon_s=18 \times 10^{-5}$
 主桁設計時用 (主桁) $\epsilon_s=17 \times 10^{-5}$
 (橋脚) $\epsilon_s=16 \times 10^{-5}$
 床版設計時用 $\epsilon_s=20 \times 10^{-5}$

3.3 主桁主方向の設計

(1) 外ケーブル方式の採用

本橋が採用した外ケーブル方式とは、PC 鋼材をコンクリート断面の外側に配置してプレストレスを導入する方式であり、PC 鋼材をコンクリート断面内に配置する従来の内ケーブル (インナーケーブル) 方式と対比して区別され、PC 鋼材は定着部と中間のケーブル支持点でのみ保持される。

外ケーブル方式の特徴を下記に列挙するとともに図-4 に外ケーブル配置の概念図を示す。

- ① PC 鋼材をコンクリート断面内に配置しなくて良いため、部材を比較的薄くでき、重量が軽減できる。
- ② 部材内にシースが無いため、鉄筋や型枠の組立、コンクリートの打設等が容易であり、省力化が図れる。
- ③ PC 鋼材の取替えやプレストレスによる桁の補強などが比較的容易にでき、維持管理の作業が改善される。
- ④ PC 鋼材の摩擦による応力損失はケーブル支持点の変曲部についてのみ考慮すれば良く、さらに変曲部の摩擦を軽減することにより応力損失を小さくすることができる。

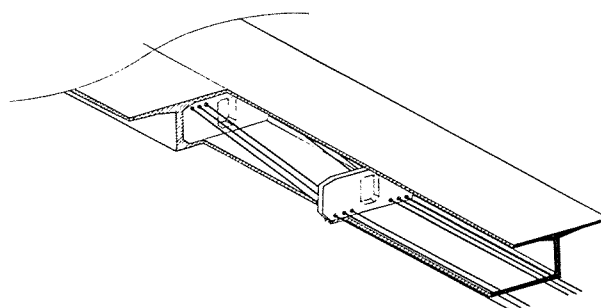


図-4 外ケーブル配置概念図

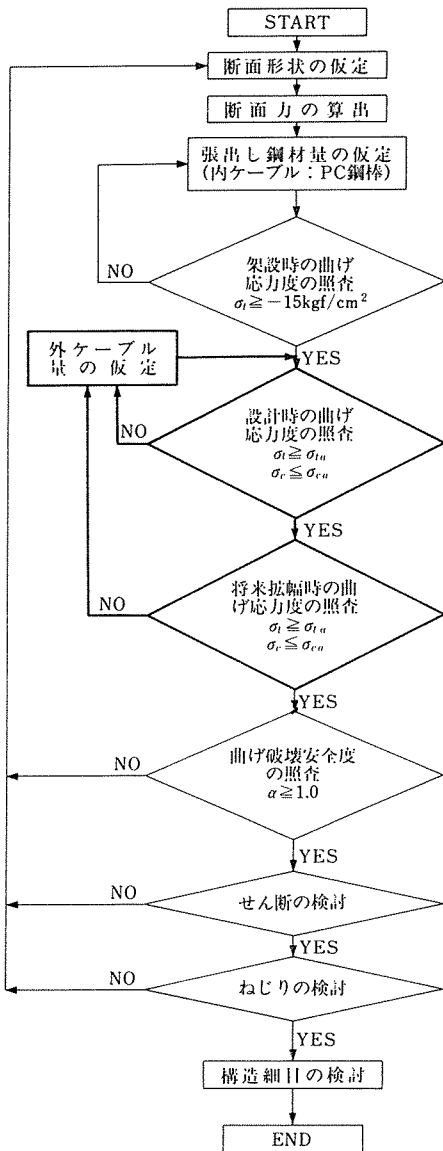


図-5 主桁の設計フローチャート

(2) 外ケーブル量の決定方針

本橋の主桁の設計フローチャートを図-5に示す。外ケーブル量の決定に際しては、本橋が外ケーブルと内ケーブルの併用橋である特徴を生かし、まず第1に施工時に着目して、張出し施工時における主桁の曲げ応力度 $\sigma_{ta} = -15 \text{ kgf/cm}^2$ を内ケーブル量 (PC 鋼棒 SBPR 930/1180 $\phi 32$) 決定の目標値とし、次に完成系の荷重 (橋面荷重, 活荷重, 温度荷重など) に対して各々許容値を満足するように外ケーブル量 (PC 鋼より線 SWPR 7 A 12 T 12.4) を決定した。

この結果、外ケーブルの量は各設計断面の PC 鋼材量に対し中間支点 (柱頭部) では約 7%, 径間中央では約 20% (導入緊張力換算) となった。図-6に外ケーブルの配置図を示す。また、本橋の場合、将来の交通量の増加に対応した歩道拡幅計画に対しても外ケーブルで対処可能なように、定着体およびシース孔をあらかじめ設置することとした。

(3) 解析モデル

解析モデルとしては、各設計断面の断面図心位置を結ぶ線を軸線とするラーメンモデルとし、柱頭部には剛域を考慮するとともにフーチング天端を完全固定とするモデルとした。図-7に解析モデルを示す。

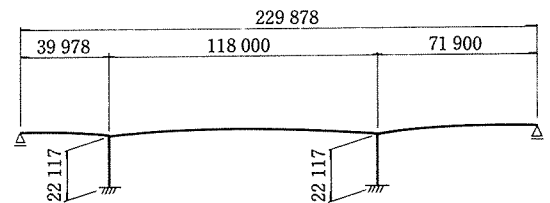


図-7 解析モデル

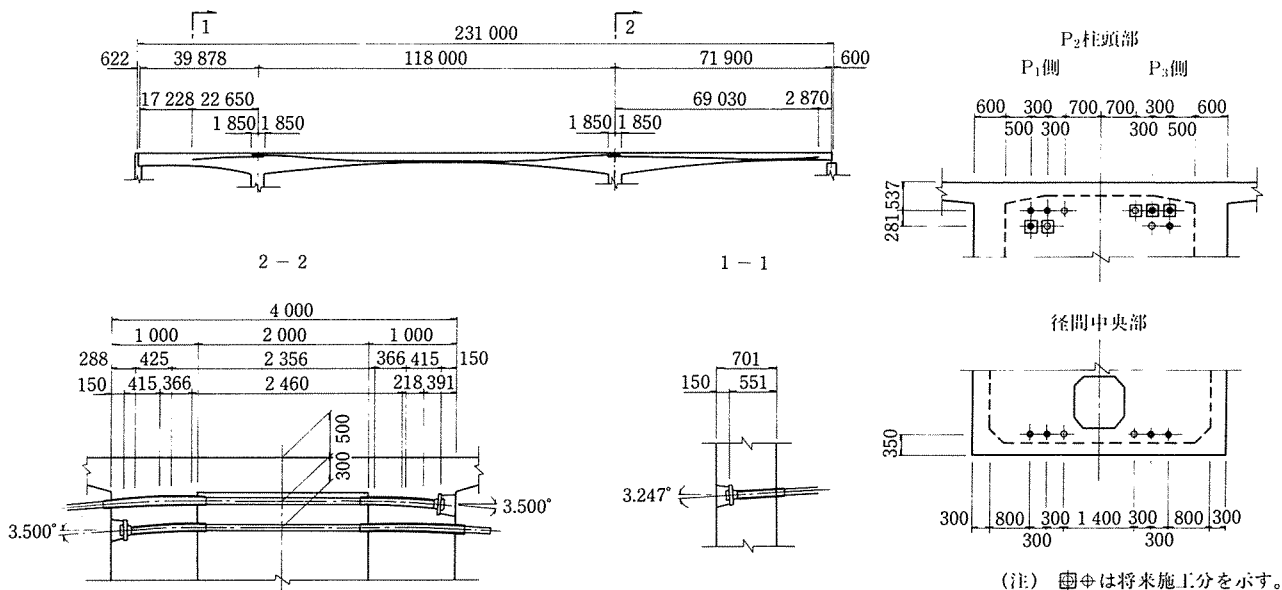


図-6 外ケーブル配置図

(4) 曲げ応力度の検討

図-8, 図-9 に設計荷重時における主桁の曲げ応力度を示す。図から明らかなように、いずれの設計荷重状態においても主桁の曲げ応力度は許容値以内であり、主桁の安全性は確保されている。

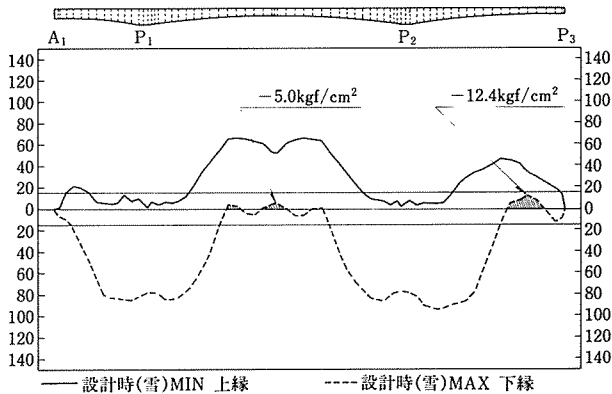


図-8 設計時(活荷重)

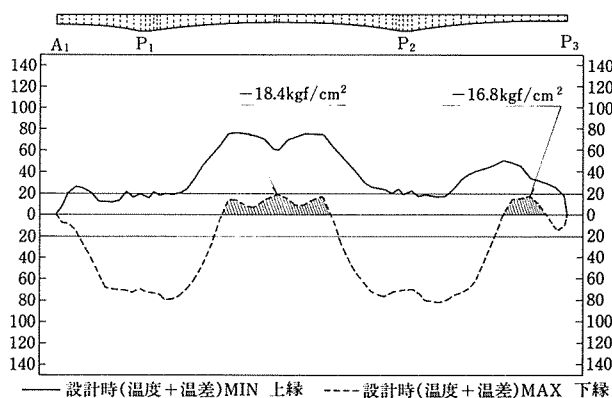


図-9 設計時(活荷重+温度)

(5) 曲げ破壊安全度の検討

外ケーブルはコンクリートとの付着がなく、定着部のみでコンクリートと一体化されているため、部材の各断面で鋼材のひずみとコンクリートのひずみは一致せず、平面保持の関係が成立しないため、理論的に最大曲げモーメントが生じる断面のPC鋼材の応力がPC鋼材の全長にわたって生じ、内ケーブルに比し終局耐力は一般に小さくなる。

本橋では、これらのことを総合的に判断し、部材断面の耐力については、コンクリート、鉄筋、内ケーブル(PC鋼棒)より求め、外ケーブルについては、外力として取り扱い、破壊モーメントから差し引く方針とした。

(6) 外ケーブルの振動制御について

外ケーブル方式を採用する場合の問題点の一つにPCケーブルの振動が挙げられる。一般的にはケーブルの固定点間距離は10m程度以下が好ましいと言われているが、これは載荷荷重による主桁の振動がケーブルの共振

現象を誘導し、定着部や偏向ブロック部で不測の付加応力を発生させ、ひいてはケーブルの耐久性に悪影響を及ぼすためであると思われるが、現状では決定的な算定基準はない。

本橋における外ケーブルの振動に対する検討に際しては、まず橋梁全体の固有周期と、ある支持間(P₂-P₃)の外ケーブルの固有周期を比較することにより主桁とケーブルの共振の可能性を探った。

固有値解析によれば橋梁全体の固有周期は $T=0.628$ sec (1次モード)であった。また、ケーブルの振動周期をケーブル自体の慣性力を無視した次式にて求めると $T_n=0.331$ secとなる。

$$T_n = \frac{2L}{n} \times \sqrt{\frac{m}{F}}$$

上式中、

L : ケーブル固定間の距離 (35.505 m)

n : 考慮する振動次数 (1, 2, ……)

m : ケーブルの単位長さ当りの質量
(0.0023 tf sec²/m²)

F : ケーブルの緊張力 (105 tf)

いま、横桁間を自由長とした場合、ケーブルの振動周期と橋梁全体の固有周期は一致しないものの、自動車荷重の衝撃周期とケーブルの振動周期が一致し、ケーブルが共振することが危惧されるため、ケーブルの振動周期を主桁の固有周期の約1/10以下まで抑えるにはケーブルの固定点間隔をどの程度にすればよいのかなどの検討を行った(例えば、固定点間距離 $L=7.0$ mの場合 $T_n=0.066$ secとなる)。

最終的には、自動車荷重によるケーブルの振動に対する影響は少ないものと判断し、横桁間を支持することは取り止めた。図-10に主桁のモード図を示す。

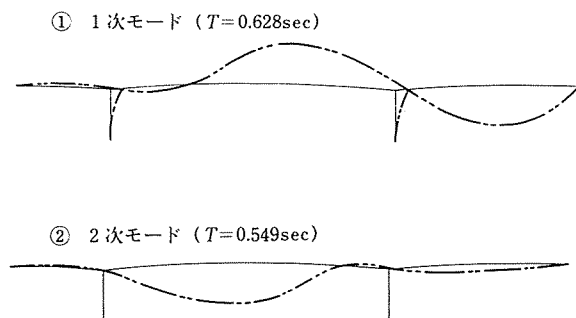


図-10 主桁のモード図

3.4 主桁横方向の設計

主桁横方向の設計は、上床版はPC部材、ウェブおよび下床版についてはRC部材とし、ボックスラーメン構造として解析した。また、本橋の場合将来の計画として拡幅計画があることからこの将来荷重に対しても許容

◇工事報告◇

値を満足するよう検討を加えた。

結果的には張出し床版上縁において 0.3 kgf/cm^2 の引張応力を許容した。

なお、上床版の横締め鋼棒 (SBPR 930/1180 $\phi 26$) の配置ピッチは、 A_1 側端部付近で拡幅するため $30 \text{ cm} \sim 35 \text{ cm}$ となったが、その他の標準部においては 50 cm であった。

3.5 その他の検討

(1) 外ケーブル偏向部の検討

本橋の場合、中間横桁を偏向ブロックとして採用しているため、外ケーブルの腹圧力による引張力や割裂力が横桁に作用することとなる。この作用力に対し図-11に示すらせん鉄筋等を配置して対処した。

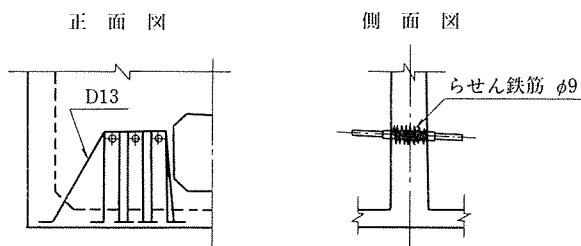
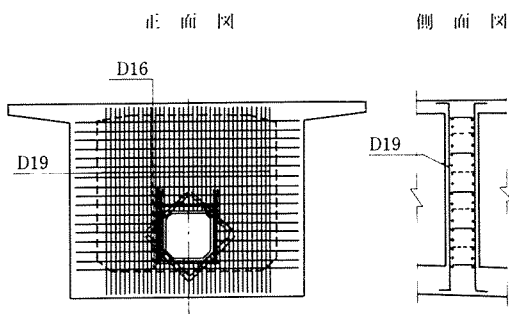


図-11 偏向部配筋図

(2) 外ケーブル定着部の検討

外ケーブルは、 A_1 側で厚さ $t=70 \text{ cm}$ の中間横桁に定着される構造であるため、押抜きせん断に対する安全性の照査はもちろんのこと、準固定スラブとして横桁を解析し鉄筋にて対処した。 P_3 側では緊張スペースの確保のため下床版突起で定着する構造とし、ずれせん断やコーベルとしての検討を実施し、安全性を確保した。図-12に定着部の配筋図を示す。

① A_1-P_1 間外ケーブル定着部



② P_2-P_3 間外ケーブル定着部

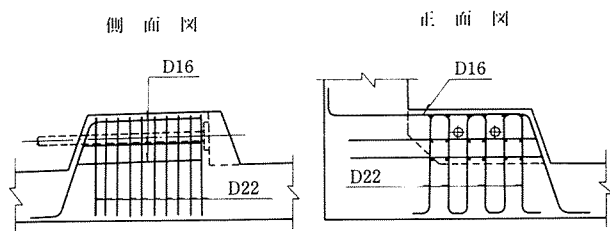


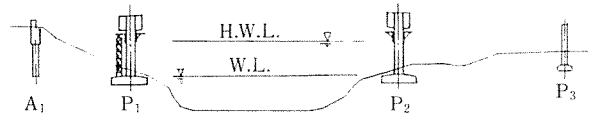
図-12 定着部配筋図

4. 施 工

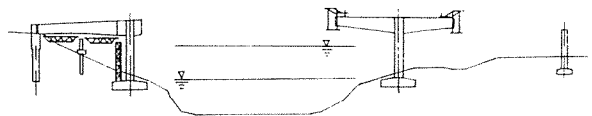
4.1 施工概要

本橋の施工順序を図-13に示す。柱頭部の施工は、鋼製ブラケット支保工（一部支柱式支保工）を用い、橋軸

① P_1, P_2 柱頭部施工



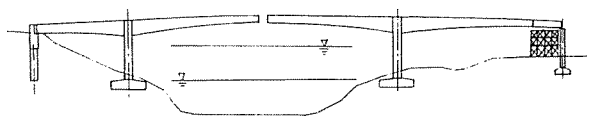
② $A_1 \sim P_1$ 間側径間支保工施工 P_2 側張出し架設



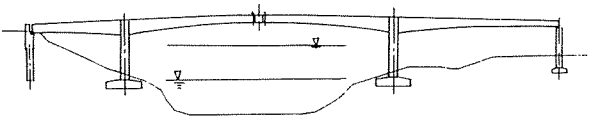
③ P_1 側張出し架設 (A_1 側カウンターウェイト施工)



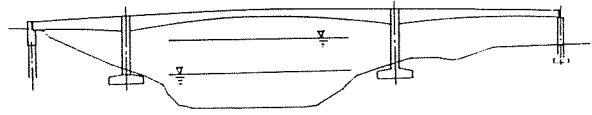
④ A_2 側径間支保工施工



⑤ 中央径間連続部吊支保工施工 (構造系完成)



⑥ 外ケーブル施工 (主桁完成直後)



⑦ 橋面工施工 (施工完了)

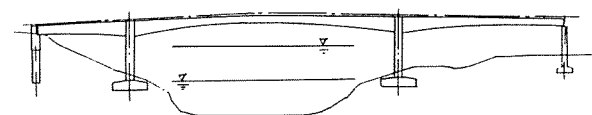


図-13 施工順序図

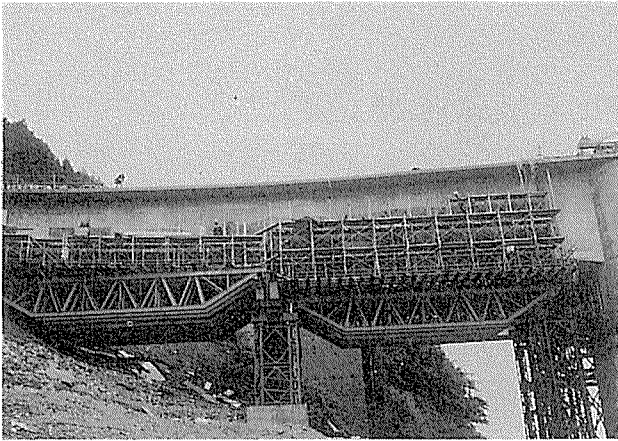


写真-2 特殊支保工

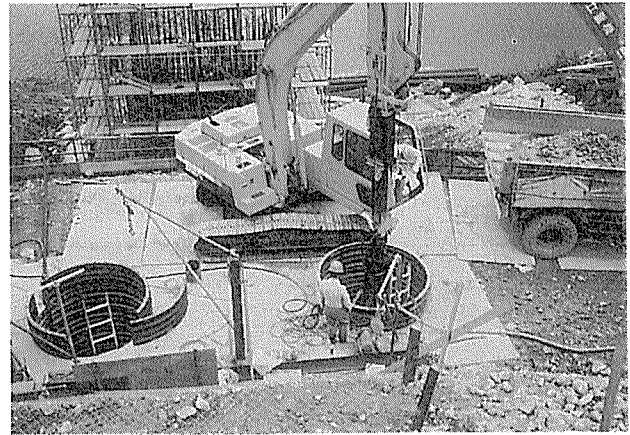


写真-3 深礎杭

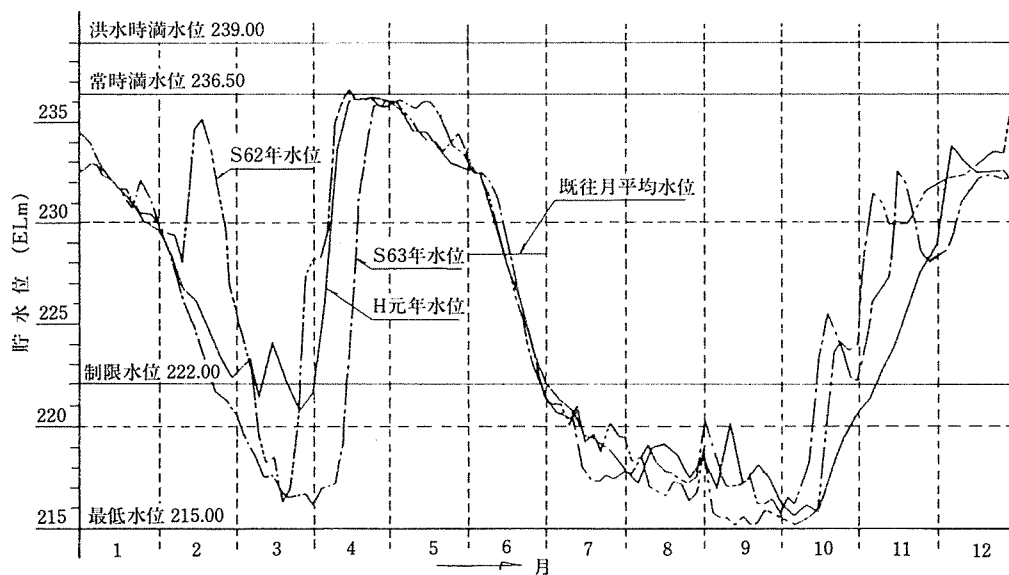


図-14 湯田ダム年間貯水位曲線図

方向に長さ 9.0 m、桁高さ 6.5 m の柱頭部コンクリートを 2 回に分けて打設した。P₂ 橋脚からの張出し架設は、柱頭部施工後中型ワーゲンを使用し、1 ブロック長 3.0 m～4.0 m とし、左右 15 ブロックずつ交互に張出し施工した。また、A₁～P₁ 間の側径間部は、スパンのほぼ中央に支柱を設置し、トラス形式の特殊支保工により施工した（写真-2 参照）。支柱基礎は、深礎杭（φ 2.0 m×2 本）による杭基礎とした（写真-3 参照）。さらに P₂ 橋脚で使用したワーゲン 1 基を P₁ 橋脚へ転用し、1 ブロック長 3.0 m～4.0 m とした 15 ブロックを中央径間側へ張出し施工した。中央径間側へ張出し架設を行い、P₂ 橋脚と同じく 1 ブロック長 3.0 m～4.0 m とし 15 ブロック施工した。P₃ 側側径間部は全支保工施工とし、さらに P₁～P₂ 間の中央連結部は、ワーゲン撤去後、吊支保工により施工した。

本橋の特徴として外ケーブルを本設として採用していることはすでに述べたが、その他の特徴として橋梁の支間割りが挙げられる（図-2 参照）。これは湯田ダムの貯

水量に関係しており、制限水位時における下部工（橋脚）の施工可能範囲により決定されている（図-14 参照）。このため本橋は、A₁ 側径間端部付近の張出し床版側および箱桁内にカウンターウェイトを有する構造となっており、P₁ 橋脚からの張出し架設に伴って A₁ 橋台に負反力が発生しないように順次施工する方法を採用した。

4.2 冬期における施工

本橋の架設される湯田町は、奥羽山脈の東側に位置し、春～秋にかけては内陸性気候区に属しているが、冬期間の気象はむしろ日本海側気候区に近く、積雪は秋田県側よりも多く、横手市が 10 年平均値で 126 cm に対し、湯田町は 183 cm を記録している（図-15 参照）。このような厳しい自然環境の下ではあったが、ワーゲンの冬期養生設備を改良することにより（図-16 参照）、当初予定していた 12 月～4 月中旬までの冬期休止期間を変更し、P₂ 橋脚からの張出し架設を行うことで工程短縮を可能とし、工事最盛期における作業員を半減し必

◇工事報告◇

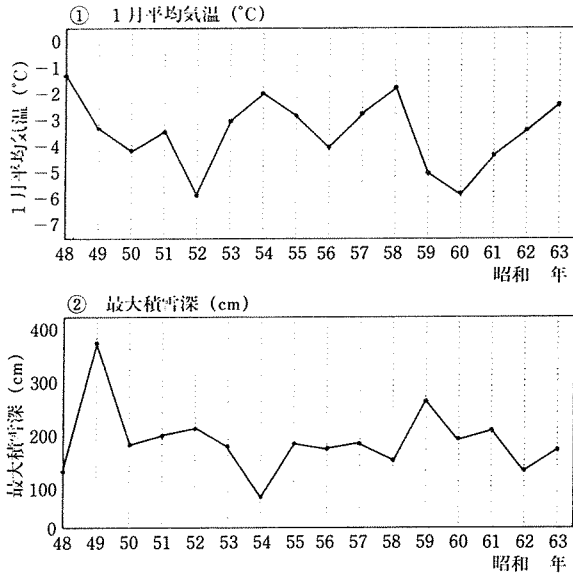


図-15 湯田町気象グラフ

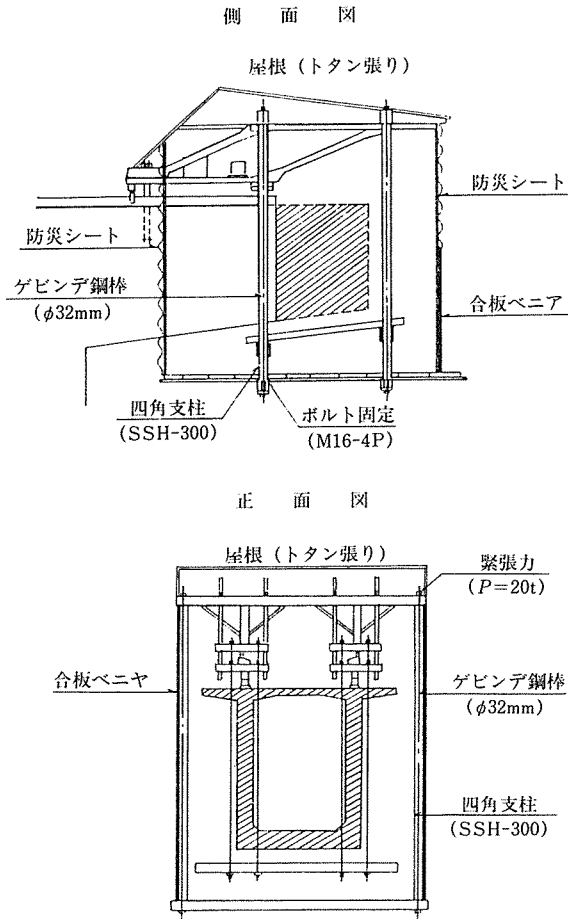


図-16 冬期養生ワーゲン図

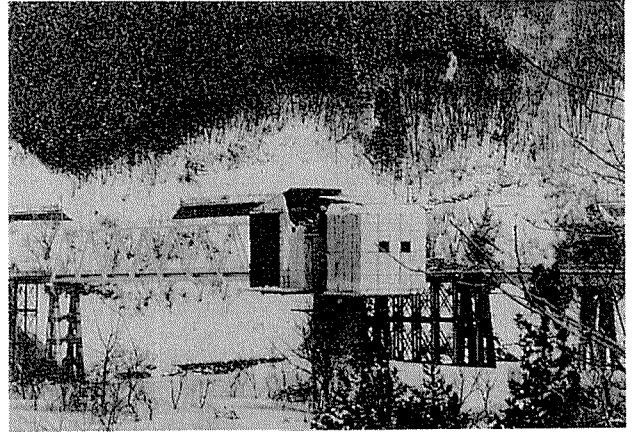


写真-4

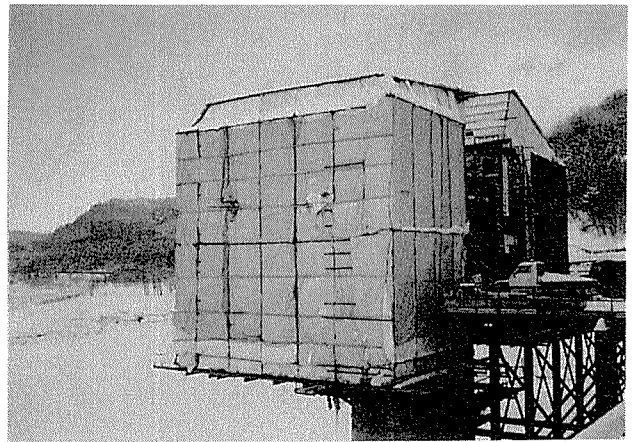


写真-5

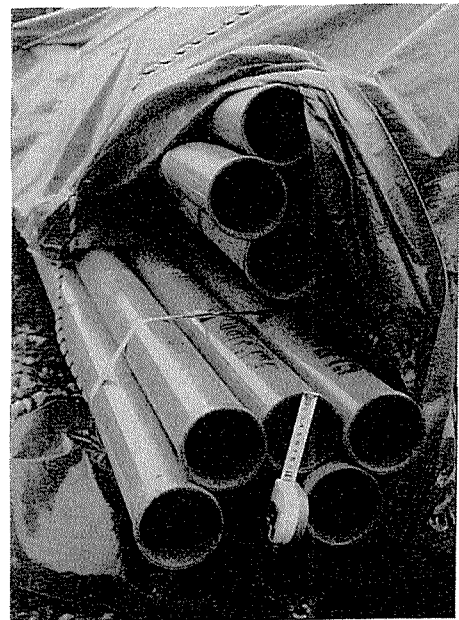


写真-6・外ケーブル保護管

要作業員を均等化するなどの成果をあげた (写真-4, 5 参照)。

4.3 外ケーブルの施工

(1) 外ケーブルの保護管 (シース) の選定

外ケーブル保護管は、施工実績によれば高密度ポリエ

チレン管 (PE 管) や鋼管等が一般的のようである。

本橋における外ケーブル保護管の選定にあたっては、実績を踏まえ、さらに文献等を調査するとともに、耐久性等の性能面や施工性の検討を重ねた結果、薄肉の軽量鋼管 (長さ=6.0 m, 外径=89.1 mm) を採用することと

した（写真-6 参照）。鋼管を6 m ごとにジョイントすることにより、保護管にあらためて伸縮装置を設置せずともプレストレス導入による弾性短縮等の移動量をカバーすることができた。

（2）外ケーブルの配置

外ケーブルの定着部や偏向部（横桁）には、ケーブルの線形形状を保持するために、あらかじめ加工した鋼管（外径=89.1 mm）を埋め込むこととした（写真-7～10

参照）。

PC 鋼より線は、ケーブルの最大長が 122 m と非常に長いため、施工性を考慮して、プッシングマシン（推力：375 kgf）により保護管に挿入した（写真-11 参照）。なお、外ケーブル保護管は、6 m ピッチでチェーンで吊り下げて仮固定した（写真-12～13 参照）。

（3）外ケーブルの緊張

外ケーブル長が長いため、PC 鋼より線（SWPR 7 A

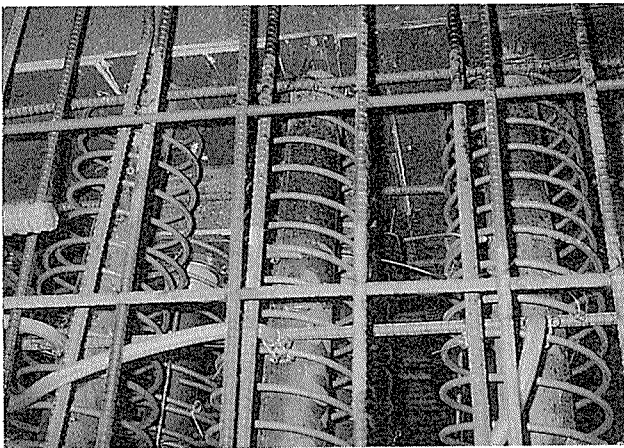


写真-7 加工した鋼管の埋込み

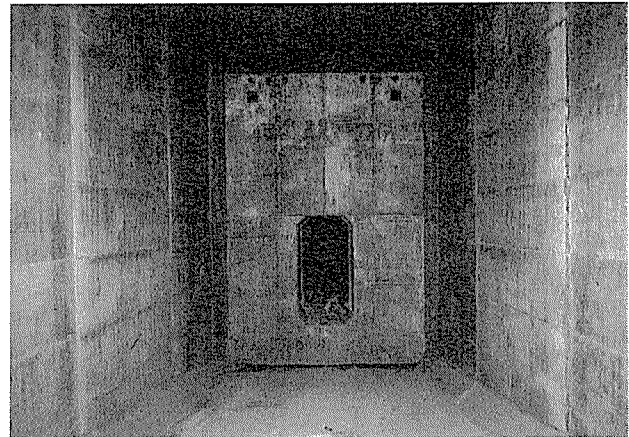


写真-10 加工した鋼管の埋込み

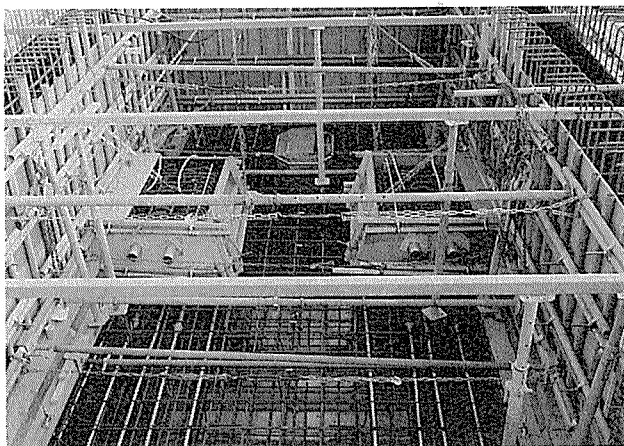


写真-8 加工した鋼管の埋込み

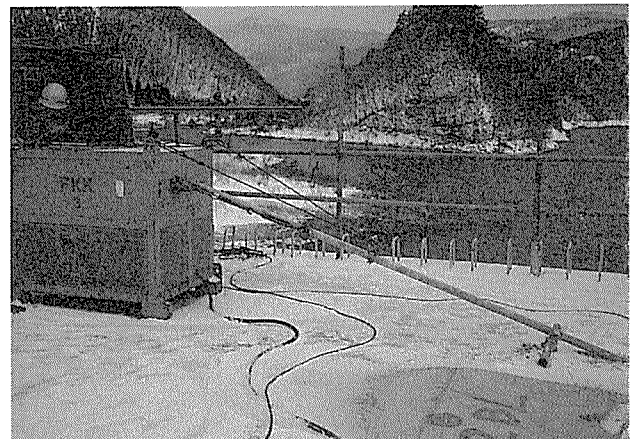


写真-11 プッシングマシンによる PC 鋼より線の保護管への挿入

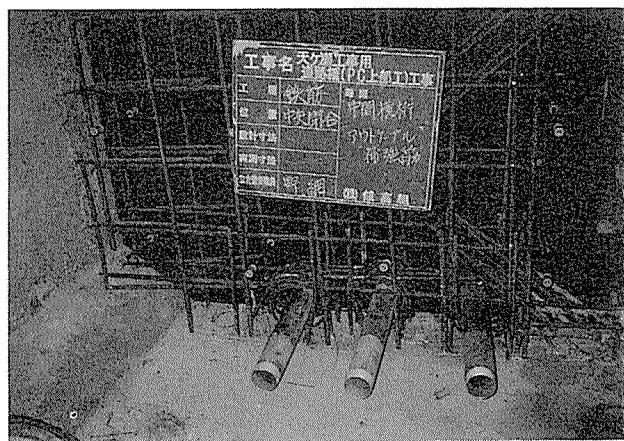


写真-9 加工した鋼管の埋込み



写真-12 外ケーブル保護管の仮固定

◇工事報告◇

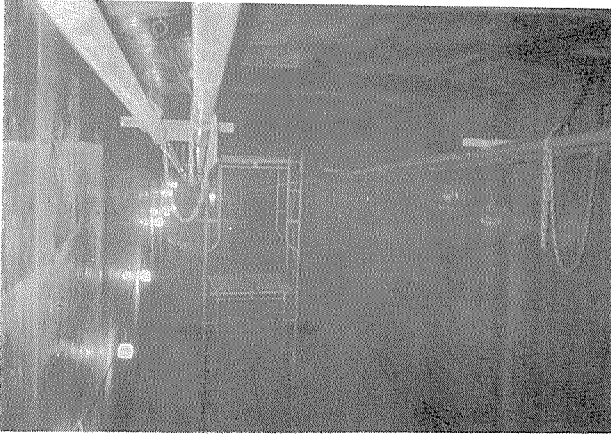


写真-13 外ケーブル保護管の仮固定

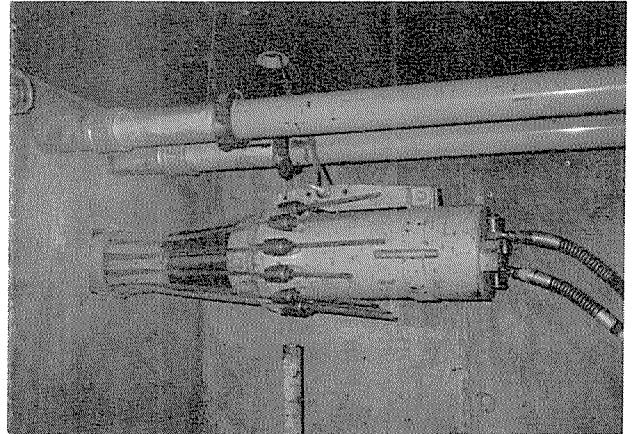


写真-15 緊張状況

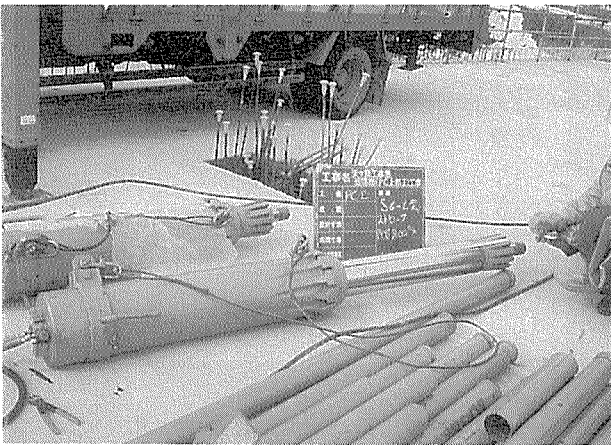


写真-14 S6-L型緊張ジャッキ

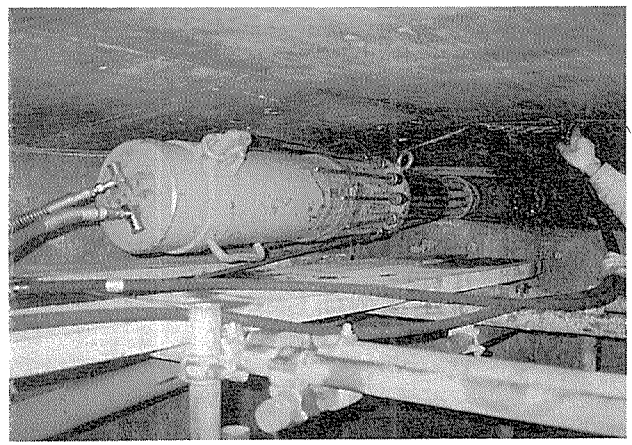


写真-16 緊張状況

12 T 12.4) の緊張作業には一般的に使用されている S 6-R 型緊張ジャッキ (ストローク : $\Delta=300$ mm) ではストロークが不足することから、S 6-L 型緊張ジャッキ (ストローク : $\Delta=800$ mm, 写真-14 参照) に変更した。その結果、スムーズに緊張作業を行うことができた。写真-15~16 に緊張状況写真を示す。

5. おわりに

我が国の長大道路橋において、初めて外ケーブルを採用した天ヶ瀬橋の設計および施工について報告した。

本橋は、昨年 (平成 3 年) 12 月に中央連結および外ケーブルの緊張を終了し、冬期休止期間を経て今春 5 月にはグラウト工も終了した。現在、地覆や高欄をはじめ 9 月上旬の竣工に向けて急ピッチで鋭意施工中である。

本橋のように、将来の付加荷重を想定して橋梁を計画する場合や、プレキャストブロック工法との併用の場合など、外ケーブル方式の採用は大いに有効な手段であると思われる。今後、国内において外ケーブルを用いた橋

梁が計画・施工される場合に本報告書が多少なりとも参考になれば幸いである。

最後に、本橋の設計・施工にあたり、熱心な御指導・御助言を頂いた関係各位に対し、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 日野虎彦・長江進著 : 天ヶ瀬橋の設計, プレストレストコンクリート Vol. 32, No 5, Sept. 1990
- 2) SEEE 協会 : アウトサイドケーブル方式の PC 橋に関する調査報告書, 昭和 62 年 3 月
- 3) (社) プレストレスト・コンクリート建設業協会 : PC 橋の新しい構造事例に関する研究報告書, 平成 2 年 9 月
- 4) 有村, 佐藤, 鈴木, 加藤著 : 天ヶ瀬橋の設計および施工について - (社) プレストレスト・コンクリート技術協会 : 第 2 回シンポジウム論文集, 平成 3 年 11 月
- 5) (社) プレストレスト・コンクリート技術協会 : PC 技術の役割と発展 - 第 20 回 PC 技術講演会, 平成 4 年 2 月

【1992 年 5 月 30 日受付】