

猿留橋架換工事について

—— レオンハルト工法によるプレストレス、コンクリート連続桁 ——

正員 帯広開発建設部 奥 山 秀 樹

§ 1 工 事 概 要

旧橋は昭和 29 年に一部改築された延長 218.80 m、幅員 4.0 m の木造橋であつて、十勝と日高を結ぶ唯一の幹線道路である。近年交通量の漸増に反しその腐朽損傷甚だしく、ここに永久橋架換を実施するに至り、34 年 4 月着工、去る 35 年 11 月に竣工した。本橋は橋格第一種 TL 20 ton、橋長 178.89 m、幅員 6.00 m、1 径間 35.00 m の 3 径間および 2 径間の連続桁で、下部は 3.00 m の井筒基礎を有し、岩盤もしくは転石混り砂利層に達している。上部構造は桁高 1.5 m、断面は図-1 のような箱型断面で、腹部厚は径間部 40 cm、支点上で 70 cm、床版厚は上 20 cm、下 15 cm とし、横方向は箱型ラーメンとして配筋し、橋軸方向には PC ストランドを用いる Baur, Leonhardt 工法によりプレストレスするもので設計は大成建設株式会社による。



写真-1

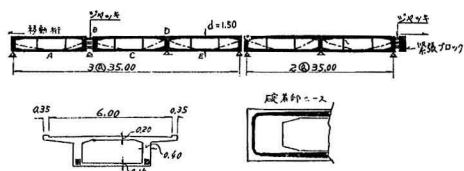


図-1 緊張略図

§ 2 設計要項とレオンハルト工法の特徴

連続桁としては側径間を中央径間より短くする方が有利であるが、全体の調和を考慮し等径間とした。PC ストランドのアンカー方法は 2 主桁の桁端にて接続している。ストレス導入は 2 径間連続桁については桁端部に設けた緊張ブロックと桁端の間にジャッキを入れ、ブロックを押し出して鋼線を緊張する。また 3 径間連続桁は橋脚上にジャッ

キを入れ、3 径間中の 1 径間を押し出してプレストレスを導入を事とした。床版は主桁の振り抵抗および主桁の分担荷重を考慮に入れ、一方向版として計算している。計算上の諸許容応力度を示せば第 1 表のとおりである。

表-1

コンクリート		PC ストランド	
曲げ圧縮	$t=0$ 180kg/cm ² $t=\infty$ 130kg/cm ²	破断強度	185kg/mm ²
軸方向圧縮	110	降伏点	155kg/mm ²
軸方向引張	15	伸び	3.5%
曲げ引張	0	弾性係数	1,950,000
支圧	80	断面積	51.6mm ²
斜引張	9	公称径	9.3 mm

本工法は緊張力の大きい構造物、特に連続桁構造を対象として考案されたものであり、その大きな特長は、1 主桁に必要な PC 鋼線を 1 本の函形断面のシースに納めてある点である。同一荷重条件で 1 緊張単位すなわち 1 シース当りの緊張力の小さい工法と、レオンハルト工法との比較例を示せば図-2 のようになり、緊張材を 1 本のシースに納めることにより断面を、11~13% 軽減でき経済的に有利である。

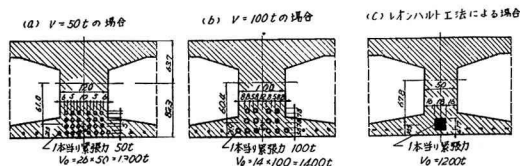


図-2 シースによる断面の比較

また施工についてはシースの配置の精度、密閉の検査、コンクリート打設など容易とすることができる。ストレス導入時の緊張材の摩擦による引張応力の減少問題についても、他工法には見られぬ方法をもつて処理し、連続桁として本工法の卓越性を発揮している。また緊張作業を数段階に分けて行なうことができ、特にコンクリート硬化に伴う温度変化、乾燥収縮によるひび割れを防ぐための早期緊張が容易であり、緊張時および緊張後におけるプレストレスのコントロールもまた簡単に行なうことができる。

§ 3 コンクリート配合

σ_{28} は 400 kg/cm^2 であるが、現場における施工強度のバラッキを 15% と見込み、配合設計は $\sigma_{28} 460 \text{ kg/cm}^2$ とした。現場付近一帯は海岸線より数軒で、急流に変わる地形から、細骨材は河口または海岸線で採取、粗骨材も河口より 2 粒径程度までが採取可能範囲となり、その量もわずかなもので角のあるものが多く、ウオーカビリティに対してかなりの影響を持ったものである。細骨材の粒度は海砂または河口砂のため粒度が集中し、いずれも 0.3 mm 以下の微粒は不足であった。従つて $5 \sim 1.2 \text{ mm}$ に集中する河口砂と $1.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ に集中する海砂を 4:6 の割合に合成し、これを用いることとした。以上再度に渡る骨材試験により、横道教授による「高強度コンクリートの配合設計について」を参考として、絶体細骨率 59% の全骨材粒度曲線を検討の結果、比較的好曲線となるので、使用セメント量 380 kg/m^3 (アサノ普通) にポゾリス No.5 を使用、 $W/C 36\%$ としてスランプ $3 \sim 5 \text{ cm}$ で試験を行ない、これにより施工した。

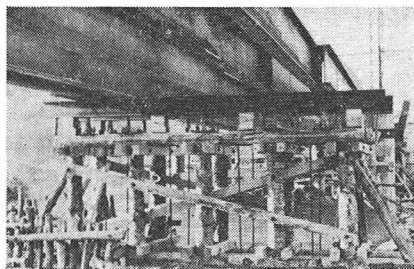


写真-2

§ 4 支保工

支保工の構造は杭打基礎を有するベースコンクリート上に、写-2 のような支保工を 1 径間に 2 箇所設け、これに高低の調整と支保工取除きが容易となるよう ジャッキ (15 ton) を 5 台据え、枕の I-Beam を乗せ、更にこの上に縦方向の I-Beam、 $600 \times 190 \times 13$ を 5 本並べて桁の型枠を製作する。特に 3 径間連続桁のうち、移動桁の支保工には、支保工上を桁が滑るように鉋仕上げをした板を橋軸方向に置き、滑り面には油脂を塗布して緊張までは釘止めしておく。この移動桁端には仮支承を設けるが、緊張終了時には桁自動がほとんど橋脚上に作用してくるので、これに対処できるように橋脚上では堅木に鉄鋸を当てて、支圧応力に十分ないようにしておく。

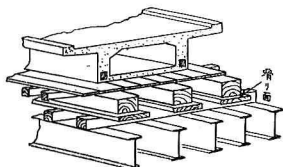


図-3 移動桁支保工

§ 5 シースの構造および PC ストランド

内枠および web 鉄筋組立後、シース固定用の支持台を、この曲げ上げに合わせて作つておき、シースの位置は横方向 $\pm 2 \text{ mm}$ 以下、高さ方向桁高の $1/200$ 以内となるよう組立てる。

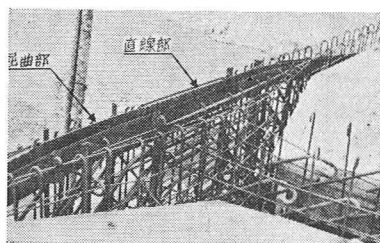


写真-3

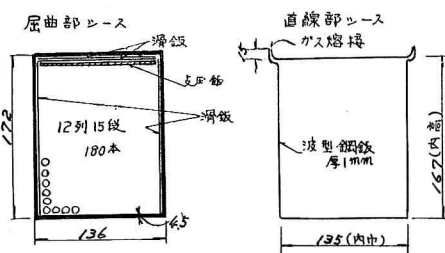


図-4 シース断面 (3 径間連続桁用)

この直線部シース厚は、 1 mm の鋼鋸に 3 mm の波型を付けた U 字型部分と、蓋より形成され、蓋はストランド布設後熔接する。屈曲部シースは厚さ 4.5 mm の鋼鋸で作られた所定半径の円弧をなし、ストランドは直線部シース内壁では、接触せぬように断面は直線部シースより小さくしてある。シースとストランドとの接触面には、パラフィン塗つた 0.5 mm の滑り鋸をシース内面に挟んで、特に支圧面には滑り鋸を 2 枚使用し、更に滑鋸により線が喰い込まぬように、厚 2.3 mm ミガキ帯鋼製の支圧鋸を入れる。これは支圧面、すなわち曲げ上げ点ではシース上面、橋脚部では下面に入ることになる。屈曲部シースの曲率半径はストランド全層の緊張力の和とシースの幅により定まり、シース幅内に分布する支圧応力は、 100 kg/cm^2 を超えないようにする。所要半径

$$r = \frac{V}{\sigma_{zul} \cdot b}$$

$V =$ 緊張力の和

$b =$ シースの幅

$\sigma_{zul} =$ 許容支圧応力

滑鋸の使用法により、摩擦係数は著しく減じ、(これを表-2 に示す) この支圧応力なるべく小さくすること ($60 \sim 80 \text{ kg/cm}^2$) は摩擦係数を小さくすることとなり、曲率半径も大きくした方がよい。桁端部付近のシースは PC ストランド旋着のため、ラッパ状の拡がり部シースを設け、

表—2 シースの構造による静摩擦係数

シースの構造	μ
(1) 黒薄鋼板よりなる屈曲部シースで摩擦低減装置のない場合	0.30~0.40
(2) 屈曲力の生ずる側に滑板 1 枚使用の場合	0.20~0.30
(3) 屈曲力の生ずる側に滑板 2 枚とその間にパラフィン層のある場合	0.12~0.20
(4) (3)の場合に更に側面滑板 1 枚を用いた場合	0.10~0.18
(5) (3)の場合に更に側面滑り板 2 枚を用いその間にパラフィン層のある場合	0.08~0.15

この拡張始点にも曲線部シースと同様の鋼板製にしてあり、ラッパ状シースは厚 1 mm の薄鋼板で 30 cm おきにアングルで補強してある。このラッパ状シースに続き、PC ストランドの碇着部を取付けるが、これは固定と可動とに分類され、後者は碇着ブロックと桁との間にジャッキを据付けて緊張力を与えるものである。本橋では 2 径間連続桁の一端にこれを用い、3 径間連続桁には固定を用いた。その形状はループ状の鋼板製で温度降下によるストランドの収縮によつてかなり強く引きつけられるので碇着の保持、骨組は十分それに耐え得るように設計されている。ループ状碇着部は 2 本のシース間隔が離れているので、中央部に直線の入った複心曲線とし、本橋では R を 1.3 m に取り、支圧応力度は 160 kg/cm^2 以下となるようにしてある。支圧力の大きさ σ_c は

$$\sigma_c = \frac{V}{rD}$$

V = 緊張力

r = ループ部の半径

D = ストランドの径

σ_c を 160 kg/cm^2 以下とするためには、ストランドの重なる層が 4 層の場合 $r=1.2 \text{ m}$ 以上が必要となる。緊張材としての PC ストランドは、ブルーイング処理を行なつた 7 本撚線で 6 本の素線を側線とし、それよりやや太い 1 本の心線を側線が螺旋状に撚り合せられたものである。その強度は表-3 に示すとおりである。PC 鋼線の現場輸送に当つては直径約 60 cm のリールに約 2,600 m 毎に巻き、布設は軸棒を通して回転させて鋼線を引き出しシース内に納め



写真—4

て行く。間隔材は一層毎に入れて行くが、材質はストランドより軟いものを用い、鋼線間は 1 mm となるように作られ、直線部では配置間隔を疎にし、屈曲部では緊張終了後ストランドの移動により所定の位置にくるようにする。ストランドの張り具合はできれば同一人が見るようにし、リール毎に右巻、左巻と交互に行なう。これは緊張前のストランドの張り具合が不对称の場合、移動桁または緊張ブロックの移動方向が左右にふれることがあるからである。

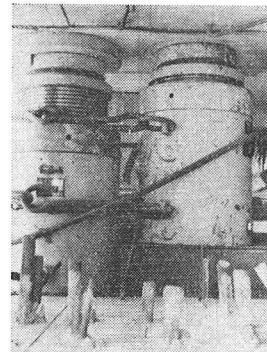
§ 6 緊張作業

緊張はコンクリートの硬化程度に応じて、2~3 回に分けて行なう。本橋では材令 3~5 目目に初期緊張を行ない、全緊張力約 2,100 ton の 23%を導入して、乾燥収縮および温度によるヒビワレの防止に対処することとした。次いで 7 目目に死荷重に対する 2 次緊張を行ない、約 60%を導入し、支保による反力の生じないように支保工を沈下させた。これは全緊張力作用時に、もし桁が支保工から離れていない場合、中間支点付近の自重曲げモーメントが完全に作用せず、支点断面下縁に設計以上の引張を生ずることとなる恐れがあるためである。最終緊張は材令 20 日で行なつた。ストランドの摩擦係により、伸びおよびジャッキ圧は変わりに下記ようになる。

$$\mu=0.20 \quad P=2,074 \text{ t} \quad \Delta l=590.2 \text{ mm}$$

$$\mu=0.15 \quad P=2,014 \text{ t} \quad \Delta l=588.3 \text{ mm}$$

$$\mu=0.10 \quad P=1,958 \text{ t} \quad \Delta l=576.2 \text{ mm}$$



写真—5

緊張作業には、各観測窓毎の鋼線移動量を測定するが、これにより移動量を摩擦係数毎に分けて計算しておけば、摩擦係数の概数をつかみ得る。本工事に使用した緊張用ジャッキは、300ton 分離式油圧ジャッキで揚程は最大 200mm である。従つてストランドの伸び量がジャッキのストロークよりも大であるため、コンクリートブロックを用いて、ジャッキをもり換える必要がある。初期緊張ではジャッキを 2 台、2 次緊張では 4 台、最終緊張では 7 台を用いた。緊張目地は図-1 のように 3 径間連続桁は 1 径間目との間に据え、一方の桁を押し出し、2 径間連続桁では、桁と緊張ブ

ロックの間に据え、緊張ブロックを押し出して緊張する。このジャッキと緊張目地コンクリート面との間にはベニヤ板をはさんでなじみを良くした。ジャッキの据付位置は非常に精度を要し、この偏心は移動桁を左右にふれを生ぜしめる原因となる。また2径間連続桁のように、端ブロックを採用する場合、上下の偏心はブロックを浮き上げたり、下げ過ぎたりするもので、当現場では下がり過ぎの状態となつた。最終緊張完了後、ジャッキをロック(安全装置)してジャッキを引上げるために必要な最小断面を残して、ベロセメントを用いて、コンクリートを打設し、強度十分にしてジャッキを取除き、この部分のコンクリートを打設した。3径間連続桁に付いては、プレストレスによるコンクリートおよびストランドの応力、摩擦係数などの測定を行なつたが、レオンハルト特有のシース構造により、直線部シースにおける摩擦損失は、ほとんど零と考えられ、損失は角変化によるものとなる。従つて角変化による摩擦係数を μ とすると

$$P_s = P_0 e^{-\mu \sum \theta} \quad \dots\dots\dots(1)$$

となつて伸び Δl は

$$\begin{aligned} \Delta l &= \int \frac{P_s}{E_s A_s} d_1 s + \int \frac{P_s}{E_c A_c} dx \\ &\doteq \sum \frac{P_0 e^{-\mu \sum \theta}}{E_s A_s} d_1 s + \sum \frac{P_0 e^{-\mu \sum \theta}}{E_c A_c} dx \end{aligned}$$

ここで $\mu \sum \theta$ は非常に小なる故、展開して近似的に第1次の項のみをとれば

$$\Delta l \doteq \sum \frac{P_0 d_1 s}{E_s A_s} (1 - \mu \sum \theta) + \sum \frac{P_0 dx}{E_c A_c} (1 - \mu \sum \theta) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$\mu=0$ の伸びを $\Delta l'$ とすると

$$\Delta l' = \sum \frac{P_0 d_1 s}{E_s A_s} + \sum \frac{P_0 dx}{E_c A_c} \quad \dots\dots\dots(3)$$

E_s, A_s および E_c, A_c は Constant であるから、(2)(3)式より

$$\begin{aligned} \Delta l' - \Delta l &= \sum \frac{P_0 d_1 s}{E_s A_s} \mu \sum \theta + \sum \frac{P_0 dx}{E_c A_c} \mu \sum \theta \\ &= \mu P_0 \left(\sum \frac{d_1 s \sum \theta}{E_s A_s} + \sum \frac{dx \sum \theta}{E_c A_c} \right) \end{aligned}$$

$$\therefore \mu = \frac{\Delta l' - \Delta l}{P_0 \left(\sum \frac{d_1 s \sum \theta}{E_s A_s} + \sum \frac{dx \sum \theta}{E_c A_c} \right)}$$

従つて計算値 $\Delta l'$ と測定値 Δl をもつて、3径間連続桁の場合を計算すると、各測点における μ は表-3 のようになり平均値は0.133である。

表-3

測点	A	B	C	D	E
$\Delta l'$	0.0460	0.2867	0.1380	0.0954	0.0455
Δl	0.0428	0.2789	0.1315	0.0895	0.0405
μ	0.187	0.085	0.105	0.113	0.177

(注：測点は図-1に示す)

又同様にストランドの歪から求めてみると

$$\begin{aligned} \epsilon_s &= \frac{P_s}{E_s A_s} = \frac{P_0 e^{-\mu \sum \theta}}{E_s A_s} = \frac{P_0 (1 - \mu \sum \theta)}{E_s A_s} \\ \therefore \mu &= \frac{P_0 - E_s A_s \epsilon_s}{P_0 \sum \theta} \end{aligned}$$

となり計算すると表-4のとおりとなる。

表-4

測点	A	B	C	D	E
ϵ_s	0.002073	—	0.001985	0.001835	0.001806
μ	0.085	—	0.255	0.293	0.258

この平均値は0.223となる。前述の平均値との差がかなりあるが、これは桁端両側の1mは計算書に従い伸びがないと考えて、算出したためかと考えられる。またB点は緊張目地であり、ジャッキ操作の影響が大きく測定結果が悪く係数を求め得なかつた。

§ 7 グラウト注入

シースは上流と下流側に2分され、片側が作業の1単位となつてゐる。シース内は注入前に水洗いして水を満たしたままグラウト注入を行なつた。使用セメントはアサノ普通セメント、これにポゾリス No.8 を0.25%用い、W/C 38%とし、グラウトミキサーは回転数毎分55回と110回の2段切換でダイヤフラム、ポンプ付きを使用した。グラウト注入の断面(ネット)は3径間連続桁で約133 cm²、2径間連続桁では約140 cm²であり、フレシネー工法などのシースに比較すると12~15倍の断面を有し、また連続桁という点からミキサー2台を使用し、シース最低部より注入した。3径間連続桁は計画に従い38%で注入を開始したが、ほとんど0.5バッチ毎に詰まりこのたびに、注入管取付部の下側にある排水管を開けては水洗いし再び注入するという状態であつた。これは注入管取付部に欠陥があり、PCストランドがフィルターのはきをしてここにセメントが詰まるものと考えられる。いずれにしてもこれでは水とグラウトのサンドイッチ状になる危険も考えられるので、W/C 55%を3バッチ53%3バッチ、更に48%、45%と順次W/Cを落として行き、最終には42%で詰つた。

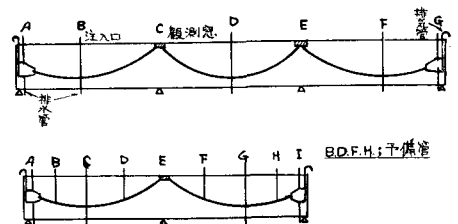


図-5 グラウト略図

ミキサー 2 台使用の方法は、初め 1 径間目中央の最低部 B に 2 台使用し、約 1/3 を注入して 2 径間と 1 径間の BD に別かれて注入をし、B のグラウトが十分 C に出てきたならば、このミキサーを 3 径間目の F に移動して注入する。こうしてシース片側を終了後約 2 時間して、リグラウトしたが各径間とも最低部 BDF からは注入できず、E を密閉して注入パイプを取付けて注入する。これにより 3 径間目中央の F より分離水を出しグラウトが出るようになった時、これを密閉して注入を続けた結果、2 径間目中央 D に分離水が出た。次に EFG を密閉して D より注入し、C に分離水を出す。その後 A および B などから注入したが、既でに 3 時間を経過し、1 径間目のリグラウトは不完全になり、グラウトが出てくるまでに至らなかつたが、注入量から見て極く少量が残つたと考えられる。以上 3 径間連続桁の片側の注入状況を述べたが、余り満足すべき結果ではなかつた。しかし後日行なつた 2 径間連続桁のグラウトは好結果が得られ、注入最初を前注入作業の結果から見て W/C 42% から始め、完全に 38% のグラウトを注入することができた。リグラウトは作業の関係から 3 時間後になり十分な注入を行ない得ぬ部分があつた。2 径間連続桁には注入管の取付部をシース幅いっぱい改造し、更にサブパイプを各径間とも片側に付き、2 カ所増設したことが結果を得た原因と考えられる。リグラウトの方法も 3 径間連続

桁とは異にし、2 台のポンプを桁端に別かれて、それぞれ AI から E に向けて注入した。このリグラウトの作業は A で注入したグラウトは B のみを開いておくと B から分離水が出てくる。これが注入グラウトと同じになつたならば A を密閉し、C のみを開いて B より注入する。このようにして最終には両側から来たグラウトは E で合流し、これより流出するという状況であつた。リグラウトはいずれも W/C 38% で行ない得た。シース内におけるグラウトの注入速度は順調に進んでも、このポンプでは約 50 cm/min 程度であり、遅過ぎる感がある。これにより、リグラウトの時期を逸する危険性が十分ある。

§ 8 結 言

以上レオンハルト工法の概略を述べたが、PC ストランドの緊張面においては、多径間連続桁に採用してその特性を発揮し得るものと思うが、まだまだ研究すべき諸問題があり、特にグラウト注入に対する機械設備は、これまでの他工法に用いてきた小断面シース用とは別にしたものを考えるべきである。更にコンクリート作業や緊張作業におけるジャッキの据付け、並びに操作などには熟練を要するものであるから作業員に付いても工事のたびに変わることは考え直すべき点であろうと思う。