

札幌南九条橋（仮称）の設計施工について

Yu Da Saka
湯 田 坂 益 利*

1. まえがき

札幌市内を流れる豊平川に架設されている豊平橋の上流 850 m に計画された南九条橋（仮称）は、豊平橋の老朽化と市内の交通量の激増に対処する上で重要な役割が期待される。昭和 36 年 4 月、札幌市役所より上部構造の設計が PC 業者に依頼され、特別審査委員会の検討の結果、バウルレオンハルト工法による一箱形断面 PC 連続橋が採用になった。

上部工事は 2 カ年にわたる継続工事で、下部構造の竣工をまって昭和 37 年 5 月に着工、右岸水車町寄りの 1 連は同年 11 月に完成した。冬期を避けて昭和 38 年 12 月竣工の予定である。

豊平川に最大の洪水量 (1 200 t/sec) をもたらした 9 号台風の猛威にもかかわらず、無事 1 連の施工を終了したので、ここに本橋の設計施工の概要を報告する。

2. 上部構造の設計

(1) 構造概要

本橋は 45.2 m の 3 径間連続桁 2 連よりなる、橋長 283.8 m のプレストレスト コンクリート 一等道路橋である。橋幅 18.8 m、桁高 1.9 m で一箱形断面をなし、床版底版ともリブを設け、さらに斜角 81°52' の斜橋になっている。プレストレッシングは、バウルレオンハルト工法およびレオバ工法、さらに一部に鋼棒を使用している。

主桁方向の最終緊張力は 5 600 t で、バウルレオンハルトケーブルを 2 本配し、その定着法には扇状定着法を採用する。1 本のケーブルに 3/8 in ワイヤーストランド (φ 3 mm 7 本より) 20×22 層=440 本を使用する。

橋台上に突桁した可動定着ブロックと橋体の間にジャッキをそう入して、片端より緊張し、さらに緊張時の摩擦損失を補足するために固定定着端径間にレオバ S-33 (φ 8 mm @ 8 本) 40 本を底版に配置し、1 650 t 緊張す

図-1

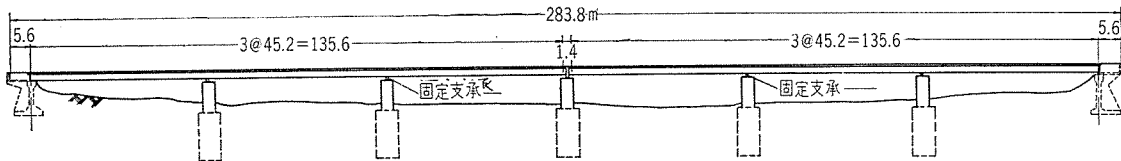


図-2 径間断面図

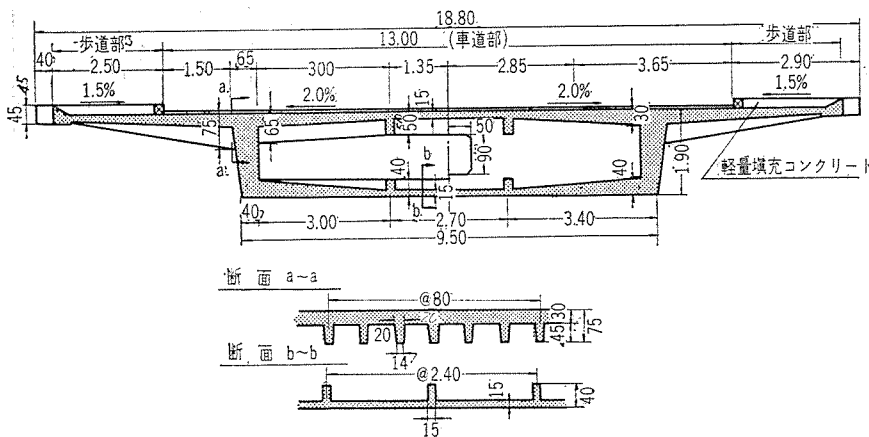
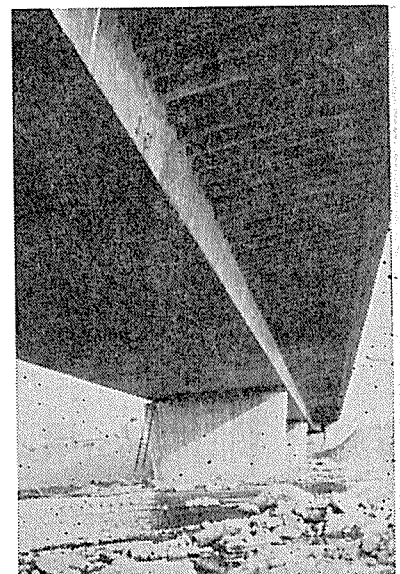


写真-1 第 1 連目の全景



* 大成建設 K.K. 土木部設計課

る。横方向のプレストレスングにはレオバ S-24 (φ 5 mm @ 12 本) を, 80 cm 間隔に床版に設けたリブに 1 本ずつ配置する。レオバ S-24 には, だ円シースを用いるので, 偏心を大きくとることができる。底版には φ 16 mm P C 鋼棒を, 2.4 m 間隔に設けたリブに 1 本ずつ配置する。主桁の鉛直方向には, 破壊安全の検討の結果, 斜引張応力度に対して φ 22 mm P C 鋼棒を部分的に配置する。本橋のおもな特徴を列挙すると,

- (a) 集中式ケーブル配置によって 5 600 t の緊張力を橋長 135.6 m の片側より導入する。
- (b) 定着力 2 800 t の扇状定着法を用いる。
- (c) 橋幅 18.8 m で一箱形断面桁である。
- (d) 床版および底版はリブつき構造である。等である。

2. 設計条件

橋長および支間 : 5.6+3 @ 45.2+1.4+3 @ 45.2+5.6
= 283.8 m

幅員 : 車道 13.0 m 歩道 2×2.50 m

斜角 : 81°-52'

活荷重 : TL-20

衝撃係数 : $i = \frac{10}{25+l}$

雪荷重 : 100 kg/m²

震度 : 垂直震度 0.10 水平震度 0.20

材料強度および許容応力度 :

コンクリート :

材令 28 日の圧縮強度 $\sigma_{28} = 400 \text{ kg/cm}^2$

許容曲げ圧縮応力度 緊張直後 $\sigma_{cat} = 170 \text{ kg/cm}^2$

設計荷重作用時 $\sigma_{ca} = 130 \text{ kg/cm}^2$

許容曲げ引張応力度 緊張直後 $\sigma_{cat}' = -15 \text{ kg/cm}^2$

設計荷重作用時 $\sigma_{ca}' = -15 \text{ kg/cm}^2$

全死荷重+1/2 最大活荷重作用時にコンクリートに引張応力度を生じない。

扇状定着部分のコンクリートは $\sigma_{28} = 500 \text{ kg/cm}^2$ とする。

P C 鋼材

	引張強度 (kg/mm ²)	降伏点 応力度 (kg/mm ²)	導入後許 容応力度 (kg/mm ²)	設計荷重時 許容応力度 (kg/mm ²)
レオンハルトケ ーブル 3/8 in φ 3.05 mm 7 本よ り	185	150	128	111
レオバ S-24 φ 5 mm	165	145	116	99
レオバ S-33 φ 8 mm	158	138	101*	95
φ 22 mm	125	110	83	75

* ループ加工損失 8.5% を見る

3. 活荷重の主桁分配

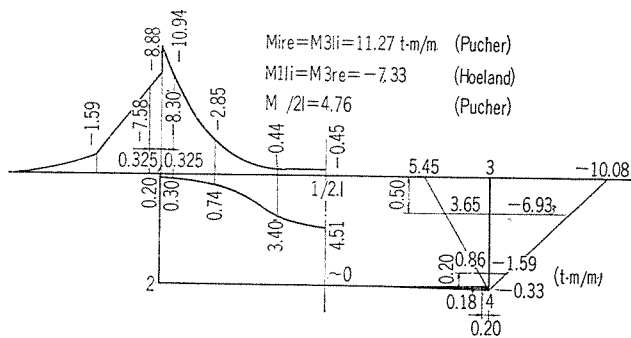
箱断面桁ではねじれ剛性が非常に大きく偏心荷重の主

桁への分配を有利にしている。この分配を求めるのに, 偏心荷重を, 主桁に均等に分担される成分と, 断面にねじれとして作用する成分とに分けて考える。支承上に設けられた十分剛な横桁によって, ねじれにより, 支承上に生ずるそりが拘束されると考えられるので, この場合径間断面の下縁に生ずる主桁方向の応力度を求め, 均等に分担された成分によって生ずる径間断面下縁の曲げ応力度と合成して一主桁の荷重分配を求めた。本橋の主桁分配は, スパン 45.2 m の単純桁として中央断面について計算した(横道英雄: コンクリート橋 参照)。そり中心と曲げ中心の差を考えに入れて, 一主桁あたりの影響面積を求めると 5.0 となり, 鋼道路橋設計示方書による値の 86% になる。

4. 断面解析

横方向には床版および底版のリブをすべて有効と考えこれらの部材および主桁を曲げ部材とするラーメンとして解析した。箱断面内においては T 荷重に対して主桁方向の有効幅を 7.0 m とした。片持床版上の T 荷重は車輪の接地長より 45° に拡がって支承線である主桁上に均等に分布するものと考え, この端モーメントが箱断面内に伝達するものとし, ラーメン解析にあたっては床版および床版の変断面を考えに入れたが連続桁でもあるので主桁の弾性沈下の影響は無視した。Hoeland および Pucher の影響面を用いて等方向性板として T 荷重による完全固定支持の場合の曲げモーメントを求め, これをラーメンとして分配修正すると, 主桁方向に有効幅を考えた場合の解析値に非常に近い値が求められる。T 荷重によって床版の主桁方向に生ずる曲げ応力度は影響面を用いてポアソン比を 1/6 として求めた値に, 3 径間連続桁として床版に生ずる最も不利な曲げ応力度を合成して検討した。最大圧縮応力度 160 kg/cm², 最大引張応力度は -4 kg/cm² である。横方向に生ずる設計荷重作用時の最大引張応力度は -15 kg/cm² である。

図-3 T 20 荷重による断面曲げモーメント



4. P C ケーブルの配置

DIN 1078 の不静定構造物のフランジの有効幅の規定

図-4 PC ケーブルの配置

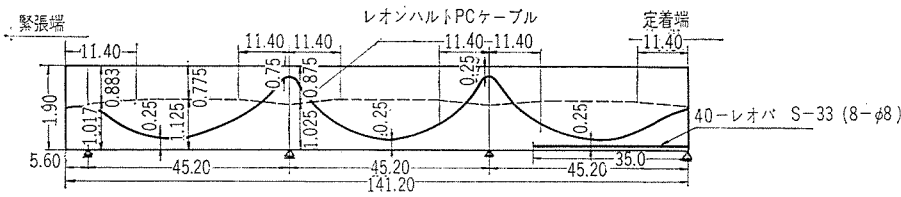
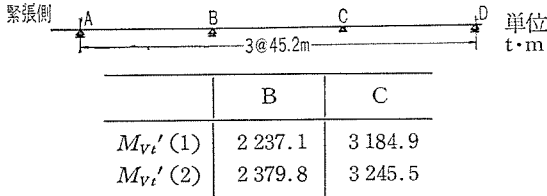


図-5



$M_{V_i}'(1)$: プレストレス 導入時端径間および 内部支承上断面で等しい最小緊張力を理論的に与えるプレストレスによる不静定モーメントの値

$M_{V_i}'(2)$: 実際に配置された PC ケーブルによって緊張時生ずるプレストレスによる不静定モーメントの値

によって持送り部分の有効幅を求め、箱断面内はすべて有効であると仮定して変断面連続桁として曲げモーメントを求めた。端径間に生ずる最大曲げモーメント、内部支承上に生ずる最小曲げモーメントとおのおのの断面要素から、PC ケーブルの偏心量を最大にしたとき、各主要断面に、必要な最小緊張力を求め、さらに PC ケーブルの配置によって生ずる不静定モーメントの値を調整することで、これらの最小緊張力を等しくすることができる。これらの操作によって最小の緊張力を橋長にわたって導入することができるが、さらに内部支承付近に生ずるせん断力に十分抵抗できるように PC ケーブルの傾きを考えて配置を定めた。

6. 主桁方向の緊張

1 連 135.6 m を両端より緊張するのが摩擦損失の点より望ましいが中央の橋脚上に連続桁の端支承が位置するために、可動定着ブロックの下に支承がくる。したがって仮支承を一時設けて緊張をしなければならないうえに最終緊張力が 6 000 t 近くになるので作業が煩雑になる。これらの点から橋台側より緊張力を導入した。バウルレオンハルトケーブルの摩擦による損失については DIN 4227 の規定により $\mu = 0.15$, $\beta = 0.2^\circ/\text{m}$ と仮定したが、わが国で施工された橋の測定結果が $\mu = 0.12 \sim 0.14$, $\beta = 0^\circ/\text{m}$ であるので、十分安全であると考え、計画緊張力はジャッキ

位置において 5 600 t で 500 t ジャッキ (揚程 220 mm) を 1 ケーブルあたり 6 台、全断面に 12 台配置し 1 台のポンプ (4 l/min) で連動する。

バウルレオンハルト ケーブル

の移動量の計画値は、

83.9 cm (ケーブルの伸び量) + 2.7 cm (コンクリートの弾性縮み) + 3.5 cm (ケーブルの遊び)

で 90.1 cm となるので 5 回に分け、盛りかえブロックで一時的に緊張力を保ちながら、内部支点の上縁に設けた観測窓および緊張目地でケーブルの移動量を測定し、ケーブルの摩擦による応力の損失を推定して、最終緊張力を補正する。定着端径間の主要断面ではバウルレオンハルトケーブルによる緊張力が、摩擦によって 21% 損失するので、レオバ S-33 ($\phi 8 \text{ mm}$ @ 8 本) 40 本を底版に配置して、第 4 回目の 4 000 t 緊張後、1 650 t を導入する。レオバ S-33 の摩擦による損失は、S-24 と同様に DIN 4227 の規定により $\mu = 0.22$, $\beta = 1.5^\circ/\text{m}$ とする。

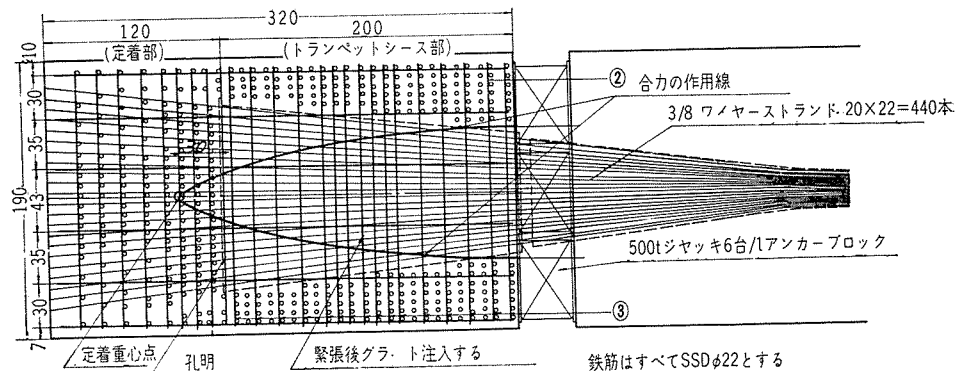
7. 扇状定着法によるアンカー ブロック

3/8 in ワイヤーストランド ($\phi 3 \text{ mm}$ 7 本より) 440 本よりなるレオンハルトケーブルの端部を扇状に拡げて長さ 1.20 m をコンクリートの中に埋込んで、コンクリートとの付着せん断力および摩擦力によって定着する。

“レオンハルトの扇状定着法の実験と研究”, “設計荷重 1 000 t の当社の実物大実験” および “神奈川県小淵橋の扇状定着” 等の資料をもとに十分検討を行ない、以下の仮定をする。

- a) ワイヤーストランドの定着重心点は孔明飯より 30 cm コンクリートに埋込められた点にあると考える。
- b) ワイヤーストランドを埋込んだ部分では定着力はその重心点より鉛直水平方向に拡がってコンクリート

図-6 緊張側扇状定着ブロックの緊張方向断面



中を伝達するが、コンクリートはこの伝達にあたってアーチ構造を形成し、平均傾斜角が55°になると考える。

c) 緊張後グラウト注入される トランペット シース部分に生ずる定着力の作用線は、その重心点とジャッキの支圧点を二次曲線で結んだ形になる。

これらの仮定にもとづいて、アンカー ブロック 内に生ずる割裂力に対して、P C 鋼棒 (φ 22 mm) および鉄筋 (SSD 49) で補強する。コンクリートは $\sigma_{28}=500 \text{ kg/cm}^2$ を用い鉄筋が錯綜するので粗骨材の最大寸法を 20 mm にし、バイブレーター用のスペースを設けた。

緊張側のジャッキ支圧面付近の橋体はプレストレスの拡散によって生ずる横方向の引張力に対して床版および底版に配筋した。定着側のアンカー ブロック 付近についても同様に考えた。

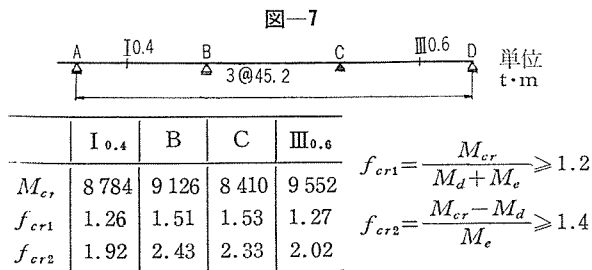
8. その他の検討

(1) 主桁方向設計荷重時の曲げ応力度

内部支点断面の、上縁に生ずる最大引張応力度 -11 kg/cm^2 に対しては、コンクリート断面の受持つ引張力だけ配筋する。さらに引張部のコンクリートにひびわれが生じたと考えると下縁の圧縮応力度は 15 kg/cm^2 増して 99 kg/cm^2 となるが許容値以下である。

(2) ひびわれ安全率

主要断面について、北海道大学 横道教授 の方法によって、ひびわれ曲げモーメントを求めて検討した。



(3) 破壊曲げモーメント

主要断面について DIN 4227 にしたがって、 $\sigma_{28}=400 \text{ kg/cm}^2$ の 2/3 を有効と考え、破壊時のワイヤーストランドの総ひずみを 1.05% に限定して、降伏点ひずみ以内で破壊時の抵抗曲げモーメントを求め、さらに P C 指針によって検討を加えた。

	単位 t·m			
	I 0.4	B	C	III 0.6
$1.75 M_{d+l} + M_{V_e}'$	11 579	12 123	11 759	12 345
M_{Br}	12 201	12 289	12 289	12 779

M_{V_e}' : 設計荷重作用時のプレストレスによる不静定モーメント

(4) 破壊荷重作用時の斜引張応力度

$1.75 S_{d+lmax,min} + S_{pe}$ に対応する $1.75 M_{d+lmax,min} + M_{pe}$ の合成によって生ずる斜引張応力度 $\sigma_{lmax,min}$

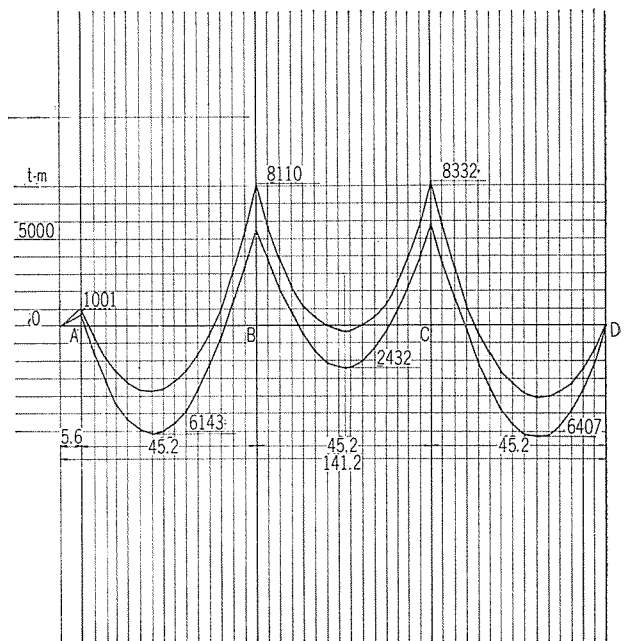
の値が $\sigma_{28}=400 \text{ kg/cm}^2$ のコンクリートのせん断力による許容値 20 kg/cm^2 以下になるよう、部分的に P C 鋼棒 (φ 22 mm SBPC 120) を一主桁あたり 20 cm 間隔に配置して、鉛直方向に設計荷重作用時 $20 \sim 26 \text{ kg/cm}^2$ の圧縮応力度をあたえる。

破壊荷重の作用時横方向の変形によって P C 鋼棒に加わる引張応力度を加算しても、降伏点応力度以下であるので、主桁方向の斜引張応力度に十分有効である。

(5) ねじれせん断応力度

各横桁はその分担区間に生ずるねじれモーメントに対して曲げ部材として設計してあるが、さらに横桁を無視してスパン 45.2 m の単純桁として最大単純ねじれせん断応力度を求めると、スパン中央で 7.5 kg/cm^2 支点で 4.5 kg/cm^2 となる。この荷重状態における曲げモーメントおよびせん断力と合成して、斜引張応力度を求めるとおのおのフル プレストッシングの場合の許容値 12 kg/cm^2 以下になる。本橋においては 1.75 倍の最大ねじれモーメントに対して配筋した。

図-8 主桁方向曲げモーメント (単位 t·m)



(6) シューの反力

本橋の場合、活荷重による最大 1 シュー反力は対称満載荷時に比較して、偏心载荷した方がねじれモーメントの影響によって端支承で約 50%、内部支承で 38% 大きくなった。

3. 施 工

(1) 支 保 工

本橋は現場打ちで施工するので、できるだけ出水の時期を避けてコンクリート打設を行なうことにしたが万一を考慮して支保工の施工計画をたてた。第 1 連目は右岸

水車町側の第1径間はビティ足場とし、他の2径間は木製支柱を4.2~5.5m間隔に建て、その上に600m桁高のI桁9連、桁高300mmのI桁2連を渡してはりとした。たわみを少なくするためにI桁を2径間連続構造として用い、内部支点では基礎ぐいを石わくで保護し、端支点でI桁を補助的につないだ。

石わくは昭和28年以來の出水量の記録にもとづいて高さを決め、わくの中には $\phi 0.24, 13.6\text{m}$ を基礎ぐいとして建て上面はコンクリートで固めた。第1連目コンクリート打設時に台風9号の豪雨による大出水があったが幸いに耐え得た。

支保工上げ越し量の調整、プレストレス導入後の支保工下げ等の目的でI桁と支柱天端の間に25~15tジャーナルジャッキを数多く配置した。支保工組立て後、底板、側面の型わくを組み底板および桁部の配筋を行なってシースを配置する。型わくは木製とし厚さ21mmの松板を使用した。

(2) シース配置と鋼線布設

レオンハルトシースの断面は約 $36 \times 36\text{cm}$ あり、これを両桁部に1本ずつ配置する。シースは構造上、直線部、屈曲部、拡がり部およびラップ状シースより成り、これらを強固な支持台で所定の位置を保つ。鋼線は所要の長さに切断してシースに落としこみ、一層ごと(20本)に間隔材を配置して鋼線間げきを1mmに保って整然と収まるようにする。屈曲部シースのところでは摩擦損失を軽減するための滑り板および支圧板等を配置する。鋼線布設終了後にシースに蓋をする。

第3径間部では緊張時の摩擦損失に対してレオバS33シース40本を配置した。レオバシースはあらかじめ作業場で組立てたものを運搬配置する。レオバSタイプの定着部は鋼線に波つけしコンクリートに埋込んで定着する。

(3) コンクリート

コンクリートは札幌生コンクリートKK製のものを使用した。配合設計にあたっては北大横道教授指導のもとに数回の配合試験を行ない表-1に示す配合とした。使用セメントは富士ポルトランドセメント、粗骨材は定着部用には北伸産砕石、主桁用には北陽産砕石、細骨材には社台産海砂を使用し、分散剤にはマジノン100を使用した。

使用した。

1連あたりのコンクリート全量は約 1550m^3 あり、これを約20日にわたり、桁両端定着部 → 緊張側桁端 → 第1~第3径間部底版および腹部 → 床版 → 橋脚上横桁部の順序に打設した。コンクリートに関する試験結果の一部を図示する。

材令28日のコンクリートの弾性係数は $\sigma_{28} 400\text{kg/cm}^2$ コンクリートに対し 317t/cm^2 、 $\sigma_{28} 500\text{kg/cm}^2$ に対し 342t/cm^2 であった。 $\sigma_{28} 400\text{kg/cm}^2$ コンクリートの水中養生供試体についての変動係数は材令7日で5.34%、材令28日で3.98% ($n=12$ 個あたり)であった。強度試験のほかには凍結融解試験も行なった。

図-9 圧縮強度と材令の関係

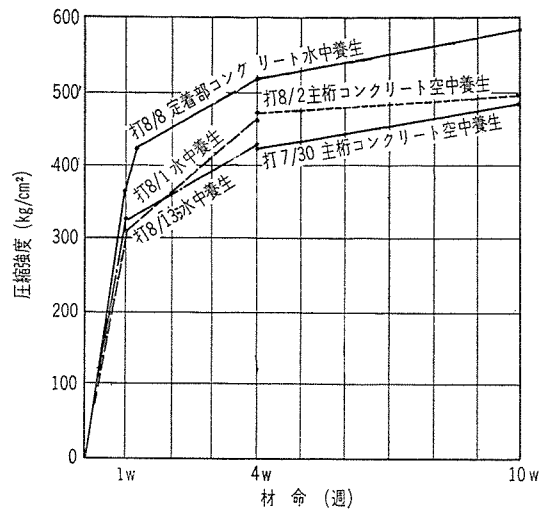


図-10 凍結融解試験結果

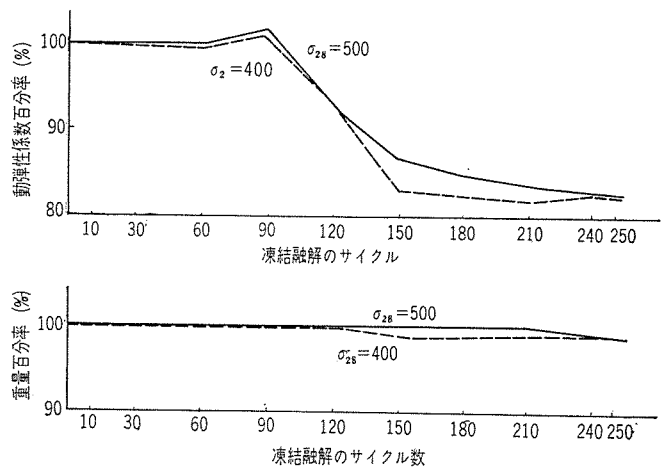
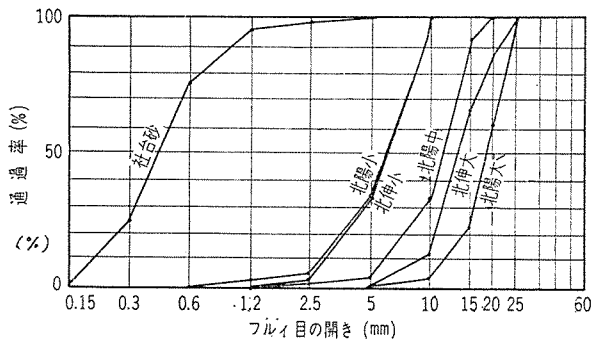


表-1 コンクリート配合表

粗骨材最大粒径 (mm)	スランブ範囲 (cm)	空気量範囲 (%)	単水量 (kg)	単位セメント量 (kg/m³)	水セメント比 (%)	絶対粗骨材率 (%)	単位細骨材量 (kg/m³)	単位粗骨材量			単位分散剤量 (kg/m³)	備考
								大碎石	中碎石	小碎石		
20	6±2	3±1	175	515	34	36	636	543	—	541	1030	定着ブロック用 $\sigma_{28} 500\text{kg/cm}^2$
25	6±2	3±1	170	425	40	34	631	445	448	215	850	主桁本体用 $\sigma_{28} 400\text{kg/cm}^2$

図-11 骨材粒度曲線



産地別	比重	粗粒率
北伸大碎石	2.69	7.00
北伸小碎石	2.68	5.67
社台砂	2.79	1.99
北陽大碎石	2.53	2.34
北陽中碎石	2.55	6.64
北陽小碎石	2.45	5.63

図-12 混合骨材粒度曲線

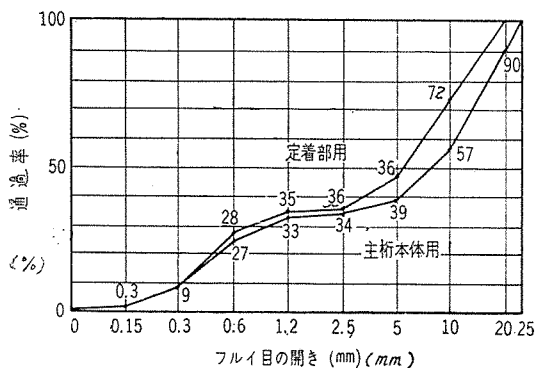
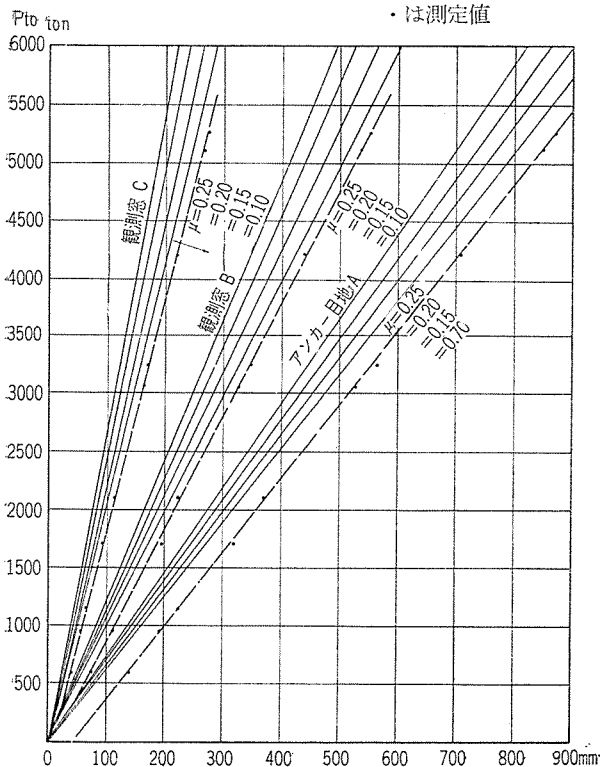


図-13 鋼線の荷重-伸び曲線



(4) 緊張

主桁方向の緊張については 2.(6) にあげた。第 1 連目での鋼線のび-緊張力曲線を図示する。

横締め用として配置したレオバ S24 シースは、主桁方向の緊張前より緊張を行ない、緊張力 3600 t 導入前に完了するようにした。レオバ S-33 による補助緊張は主桁緊張力 4000 t 導入時に行なった。垂直方向に配置した鋼棒は上記緊張の合間を見て行なった。

(1) 注入その他

緊張が終了してからジャッキをすえた緊張目地の空間をコンクリートで継いで一体とし、各シースにセメントミルクの注入を行なう。セメントミルクの配合は w/c 40% 前後とし、ポゾリス No. 8, アルミ粉末 0.003% を混合した。

以上で 1 連のプレストレス導入の工程が終了するが、そのほか橋面の防水、照明工、歩道縁石工、歩道軽量コンクリート打設、伸縮継手の取付け等を行ない、2 連目完成を待って車道の舗装、高欄の取付け等を行なって竣工する。

4. 測定

(1) 計画概要

本橋は橋幅 18.8 m の一箱型断面構造で 1 本のシースあたり 2800 t の緊張力を持つ集中配置工法によりプレストレスを導入し、また床版はリブつき構造であるなど多くの点で特色をもつ構造なので第 1 連目の施工にあたって諸種の測定を行なった。測定項目を大別すると、

- (a) 橋軸方向の主桁のひずみ度測定
- (b) 定着部のひずみ度測定
- (c) 横締め時、主桁横断面のひずみ度測定
- (d) 鋼線のひずみ度測定
- (e) コンクリートの硬化温度の測定
- (f) その他緊張時のそり、支保工沈下量等の測定等である。ゲージとしては、カールソン型ひずみ計、モールドゲージ、ワイヤーゲージ、コンタクトメータ

写真-2 桁端の緊張ブロックとジャッキ

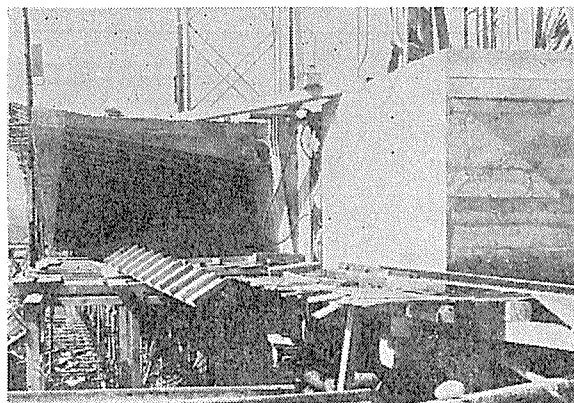
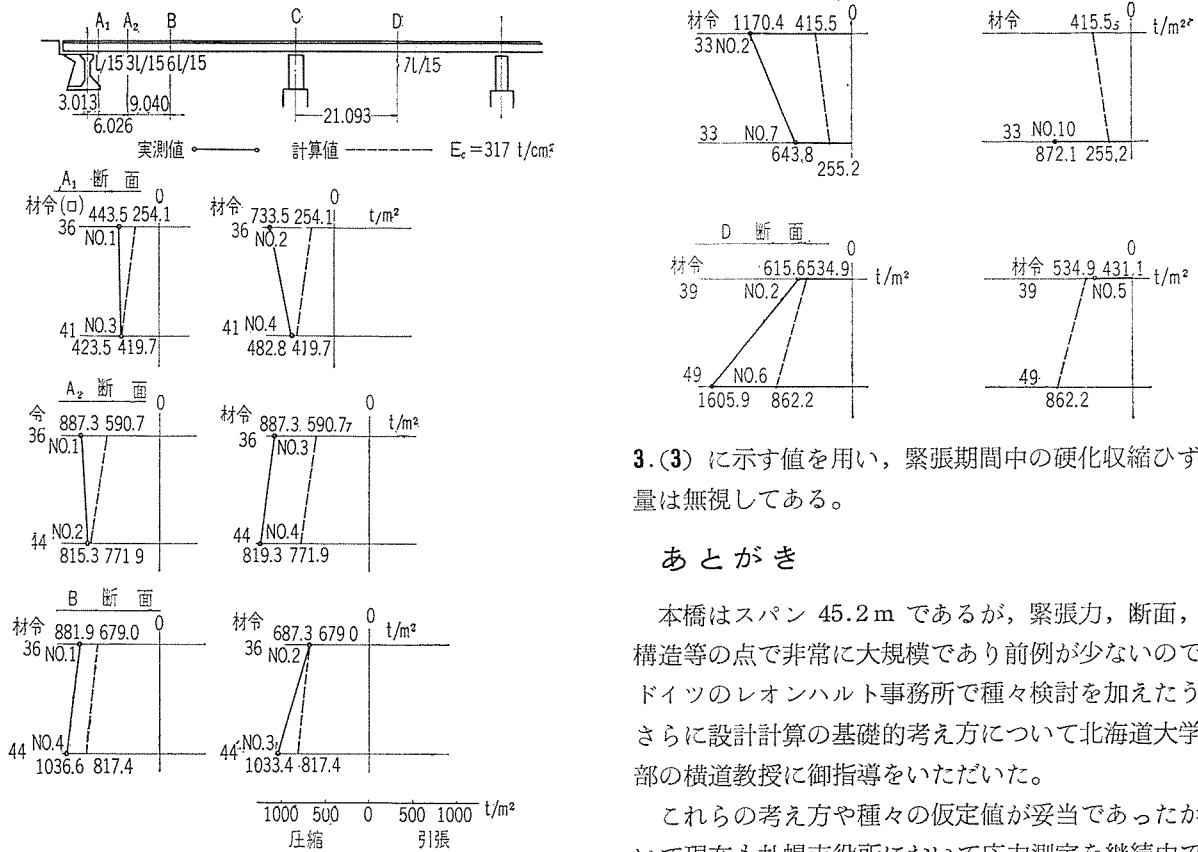


図-14 桁部の導入応力 (死荷重ふくむ)



3.(3) に示す値を用い、緊張期間中の硬化収縮ひずみの量は無視してある。

あとがき

本橋はスパン 45.2 m であるが、緊張力、断面、定着構造等の点で非常に大規模であり前例が少ないので、西ドイツのレオンハルト事務所で種々検討を加えたうえ、さらに設計計算の基礎的考え方について北海道大学工学部の横道教授に御指導をいただいた。

これらの考え方や種々の仮定値が妥当であったかについて現在も札幌市役所において応力測定を継続中であり今までの結果については整理を急いでいる。工事期間中御指導をいただいた横道研究室、札幌市役所および北海道開発局の方々に厚く謝意を表する次第である。

1963. 2. 22・受付

一、ダイヤル ゲージ等を使用した。

(2) 橋軸方向のひずみ測定結果

紙面の都合上、主桁腹部の導入応力の実測値と計算値の比較だけを図示する。実測値に対しての弾性係数は

第 3 回年次学術講演会講演概要集の頒布について

去る 2 月 11 日、東京都生命保険協会講堂において、本協会主催、建築・土木両学会後援による第 3 回年次学術講演会が開かれ、非常な成果をおさめました。当日準備した講演概要集を御聴講いただけなかった方々のため、多少の余部を頒布いたしますから至急お申込み願います。

- 内 容：講演総数 19 編の講演概要の紹介 (本文 ページ参照)
- 体 裁：オフセット印刷 B 5 判 48 ページ 頒 価：200 円 (〒 20 円)
- 申 込 要 領：頒価に送料をつけて協会事務局 (東京都中央区銀座東 2-1・銀鹿ビル・振替東京 62774) へ申込むこと。

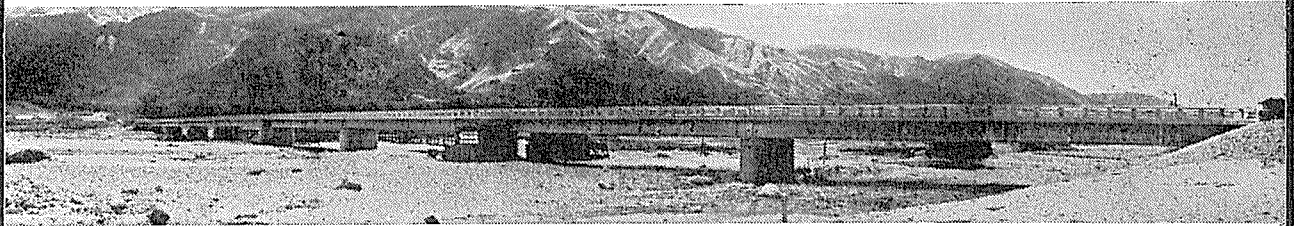
「PC 設計施工資料」欄の御利用について

会員各位の御便宜をはかるため協会誌巻末に「PC 設計施工資料」欄を新設し、好評を博しております。より多くのデータを効果的に紹介したいので会社、団体の御利用をお待ちしています。なお、本欄についての御問い合わせは事務局に御願いたします。

1. 対 象：PC 関係の材料、工法、機器
2. 内容・体裁：製品、工法等の特徴、性能、規格、使用法、等を一件あたり会誌 2 ページ分にまとめて掲載する用紙は厚紙を用い切離して利用しうるようにする。
3. 内容の検討：提供先において十分検討されたものを編集委員会でチェックし内容の客観性を確保する。



武田橋(山梨県)



L=337.0 m W=4.5~5.5 m TL=20 t

ピーエスコンクリート設計施工並に製作 日本ピー・エス・コンクリート株式会社

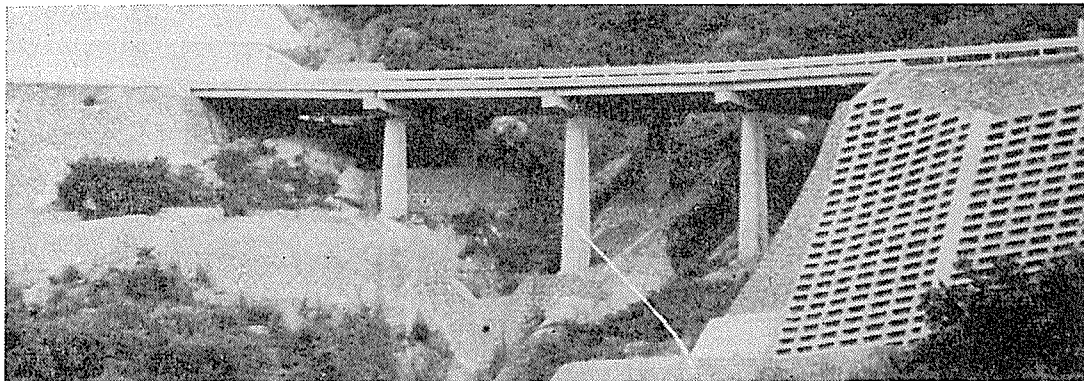
顧問 加賀山之雄 顧問 稲浦鹿蔵 取締役社長 有馬義夫

東京営業所 東京都千代田区大手町1丁目4番地 (大手町ビル3階362号室)
 電話東京 201-8651 (代)

大阪営業所 大阪市北区堂島上2丁目39番地 (毎日産業ビル別館5階)
 電話大阪 361-7797

名古屋営業所 名古屋市中村区広井町2丁目54番地 (交通ビル5階52号室)
 電話名古屋 54-6536

福岡営業所 福岡市天神町3番地の1 (福岡三和ビル6階)
 電話福岡 74-9426



箱根ハイパス方式PC構造物

プレストレスト コンクリート製品の製造と建設工事の設計施工



日本鋼弦コンクリート株式会社

取締役社長 仙波 隆

本社 東京都中央区銀座東1丁目3番地 電話 (561) 0842~3
 9301~4(交換)

営業所 滋賀(Tel 甲西147) 天竜(Tel 磐田 2330) 松本(0263-3-0143)

工場 多摩工場 (Tel 04236-2681~3) 滋賀工場・天竜工場・松本工場