

36年間供用されたPC桁の性状について

清水 洋一*1・八幡 泰市*2・狩野 誠一郎*3・須田 勤*4

1. まえがき

新潟県の新潟市と黒埼町を隔てる信濃川に架かる「帝石橋」(写真-1)は、昭和32年に施工されたポストテンション方式のPC単純T桁橋で、海岸線より約3km内陸部に位置した橋長271.74m、桁長20.86m13連の一般的な橋梁である。昭和39年の新潟地震では、新潟市内の橋としては唯一無傷で残り、新潟復興の生命線として極めて重要な役割を果たした。しかし、幅員が6.5mと狭く、増大する交通需要には耐えられず、河川改修事業と合併施工された「平成大橋」の供用により撤去されることとなり、供用開始から36年の歴史を閉じることとなった。今回、撤去に伴い実橋からPC桁1本を取り出し、主桁の耐力および耐久性について調査する機会を得たので、その結果を報告する。

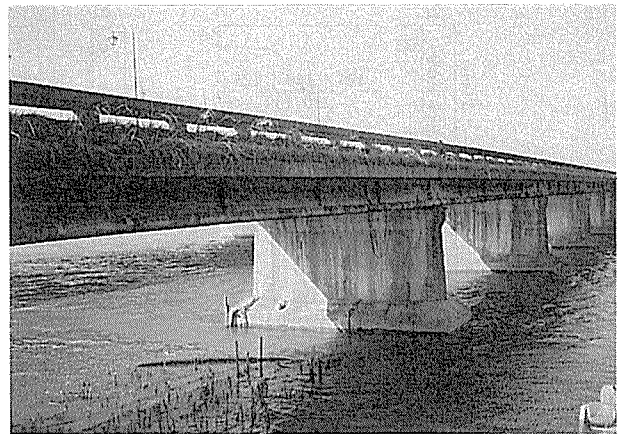


写真-1 撤去前の帝石橋全景

2. 調査したPC桁の概要

2.1 試験桁の形状

本橋梁は、橋長271.74m、桁長20.86m13連の5主桁の橋梁であり、桁の構造形式はポストテンション方式の単純T桁橋である。試験桁として採用する桁は、最

もアバットよりの5主桁のうち、中央の中桁とした。

図-1に橋梁の横断面、図-2に主桁の形状寸法を示す。

2.2 設計条件

本橋の設計条件を以下に示す。

- ・橋梁名：帝石橋(ていせきばし)
- ・構造種別：プレストレストコンクリート道路橋
- ・構造形式：ポストテンション方式単純T桁橋

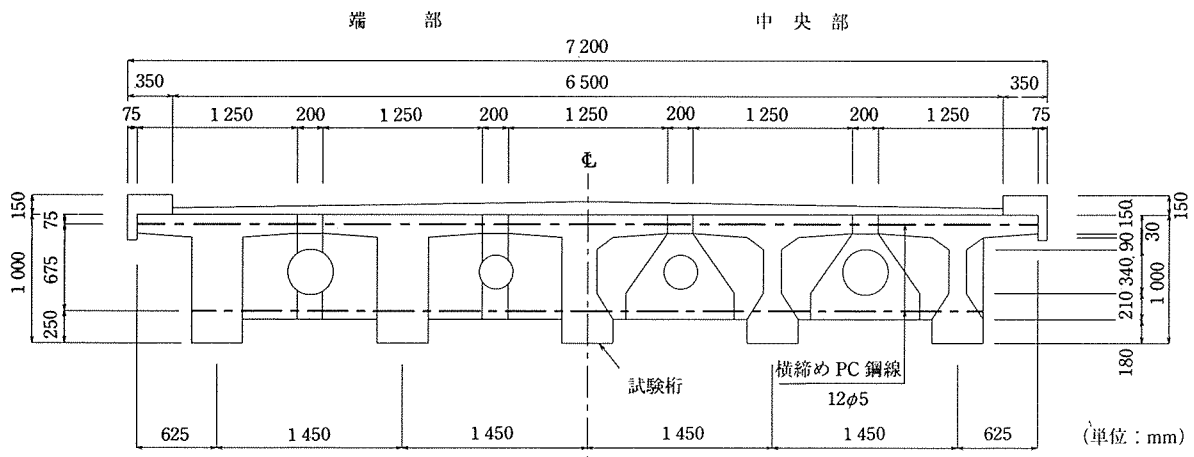


図-1 橋梁の横断面

*1 Youichi SHIMIZU : 新潟県 土木部道路建設課
 *2 Taiichi YAHATA : 新潟県 新潟土木事務所道路課
 *3 Seiichiro KANO : オリエンタル建設(株) 技術研究所
 *4 Tsutomu SUDA : オリエンタル建設(株) 東京支店工務部

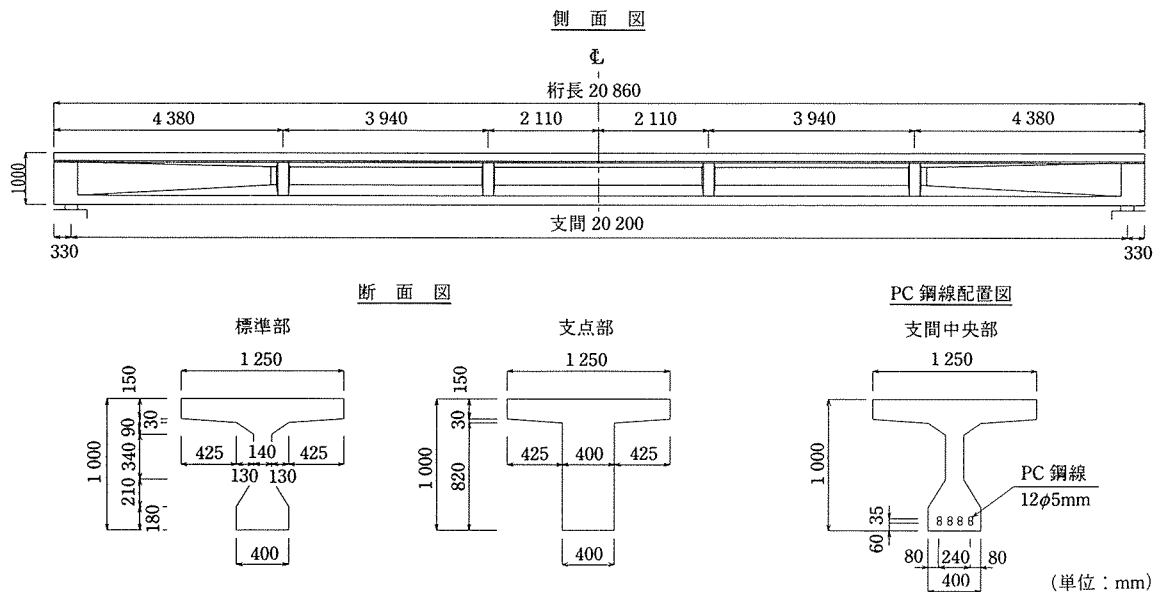


図-2 主桁の形状寸法

- ・橋 長：271.74 m
- ・桁 長：20.86 m (13 連)
- ・支 間：20.2 m
- ・有効幅員：6.5 m
- ・活 荷 重：TL-14
- ・衝撃係数： $i=10/(25+L)=0.221$ (L ：支間)
- ・角 度：90°00'00"
- ・主桁本数：5 主桁
- ・PC 鋼線：12φ5 mm (フレシネー工法)

3. 試験の種類および概要

本試験においては、36 年間供用された PC 桁の耐力および耐久性を調べるために、静的な曲げ載荷試験を行

い、力学的特性、有効プレストレス力、および破壊耐力等を確認するとともに、コンクリートおよび PC 鋼線の材料試験を行い、経年変化を受けた材料の品質、劣化状況等を調査するもので、以下に示す試験を実施した。

3.1 試験桁の外観調査および形状寸法の測定

曲げ載荷試験に先立ち、試験桁の外観状況を目視により調査し、ひび割れ、錆汁等の異常の有無を確認した。また、桁長および桁断面の形状寸法をスケールを用いて測定し、設計寸法との比較を行った。

3.2 試験桁の曲げ載荷試験

曲げ載荷試験は、支間 20.2 m、曲げ支間 2 m の単純支持の対称二点載荷とし、100 tf の油圧ジャッキ (ストローク 600 mm) により配力ビームを介して支間中央に

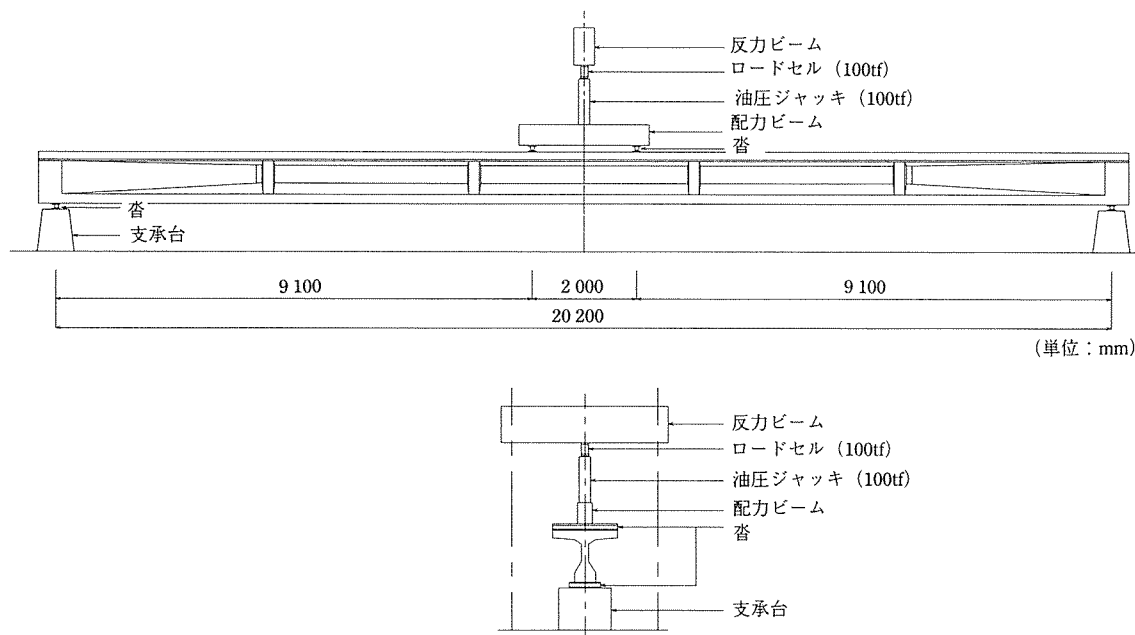


図-3 載荷試験の概要

載荷し、ロードセル(100 tf用)により荷重を管理した。

載荷順序は、支間中央部付近の桁下縁に目視によるひび割れの発生を確認した後、一旦除荷し、その後再びそのひび割れが開口するまで荷重を加え、さらに、桁が破壊するまで荷重を加えた。測定項目は、載荷荷重、桁のたわみ、コンクリート表面のひずみ、ひび割れ等である。図-3に載荷試験の概要を示す。

3.3 コンクリートの材料試験

曲げ載荷試験終了後の試験桁のウェブ部分から、ひび割れを避けてコアドリルにより橋軸直角方向に直径100mm、長さ140mmのコンクリートコア供試体8本を採取し、圧縮強度、引張強度、静弾性係数、ポアソン比、中性化深さ、配合推定、および塩分含有量等の各測定を行った。

3.4 PC鋼線の材料試験

曲げ載荷試験終了後の桁より主ケーブルを採取し、グラウトの充填状況の調査を行った後、PC鋼線を採取し、表面の発錆状況等の外観調査を行い、さらに、機械的性質を調べるための引張試験を行った。主ケーブルの採取位置は桁端より約4.5~6.5mの位置のウェブおよび下フランジ部である。

3.5 グラウトの充填状況の調査

曲げ載荷試験終了後の試験桁より主ケーブルを採取し、シースの表面状況、シース内のPC鋼線の配置状況、グラウトの充填状況等について、目視により調査を行った。

以上、本調査試験における試験項目および試験方法の概要の一覧を表-1に示す。

表-1 調査試験項目および試験方法一覧

試験項目	試験方法	
桁の外観調査	目視による	
桁の形状寸法	スケールによる	
桁の曲げ載荷試験	対称二点載荷(単純支持)	
コンクリート	・圧縮強度	JIS A 1108による
	・引張強度	JIS A 1113による
	・弾性係数	ASTM C 469に準拠
	・ポアソン比	ASTM C 469に準拠
	・中性化深さ	フェノールフタレイン法
	・配合推定	セメント協会コンクリート専門委員会法
・塩分含有量	日本コンクリート工学協会法(電位差滴定法)	
PC鋼線	・外観	目視による
	・機械的性質	JIS Z 2241による
グラウトの充填状況	目視による	

4. 試験結果および考察

4.1 試験桁の外観調査および形状寸法

載荷試験に先立ち、試験桁の外観状況を目視により調査した結果、桁表面の状態は、36年間の供用にもかかわらず滑らかであり、ひび割れや鉄筋の発錆等の変状も見られず、比較的良好であった。これは、試験桁が中桁であり、直接風雨にさらされていないことにもよるものと思われる。

また、桁長および桁断面の形状寸法をスケールを用いて測定した結果を表-2に示す。実測寸法と設計寸法との差は、桁長で、-20mm~+9mm、桁高で-8~-1mm、上フランジ厚で-4~+5mm、上フランジ幅で-5~+2mm、ウェブ幅で-3~+2mm、下フランジ幅では+5~+10mmの範囲であった。寸法に関しては比較的良好に施工されたものと思われる。

表-2 試験桁の形状寸法の測定結果

測定部位	設計寸法(mm)	実測寸法(mm)	
		範囲	平均
桁長	20 860	20 840~20 869	20 859
桁高	1 000	992~999	996
上フランジ厚	150	146~155	151
上フランジ幅	1 250	1 245~1 252	1 249
ウェブ幅	140	137~142	139
下フランジ幅	400	405~410	408

(測定断面は支間中央、両支点、および支間1/4点)

4.2 試験桁の曲げ載荷試験

(1) 試験の経過

載荷試験は、桁下縁にひび割れが発生するまで荷重を上げていき、20 tfで支間中央および載荷断面近傍の下フランジ部(側面)に目視で確認できるひび割れが発生した後一旦荷重を0に戻した。この時の桁の支間中央の残留たわみは約0.5mmで、ほとんど載荷前の状態ま



写真-2 桁の破壊状況

◇調査報告◇

で回復した。この後再び載荷したところ、21 tf 以後荷重の増加につれて新たなひび割れが多数発生し、荷重約 30 tf でひび割れは上フランジまで達した。その後約 55 tf で載荷中、載荷位置の上フランジ部のコンクリートの圧縮破壊で最終破壊となった。PC 鋼線の破断は見られなかった。なお、最終たわみは、載荷途中で変位計を取り外したため正確には確認できなかったが、約 500 mm ほどであった。写真-2 に桁の破壊状況を示す。

(2) ひび割れ発生荷重および破壊荷重

ひび割れ発生荷重および破壊荷重の結果一覧を表-3 に示す。

表-3 ひび割れ発生荷重および破壊荷重一覧

ひび割れ発生荷重 (tf)			破壊荷重 (tf)		
実測値 (目視)	計算値	実測値 計算値	実測値	計算値	実測値 計算値
20	21.4	0.93	55.96	47.2	1.19

載荷点におけるひび割れ発生荷重の計算値は、弾性計算により断面下縁の応力がコンクリートの引張強度とプレストレスの合計を超える荷重とした。なお、コンクリートの引張強度は、桁から採取したコンクリートコア供試体の割裂引張強度 (36 kgf/cm²) を用いた。

破壊荷重の計算値は、桁上縁のコンクリートの圧縮ひずみが終局ひずみ (0.0035) に達した時の値とした。なお、計算に際しては、コンクリートの圧縮強度、PC 鋼線の弾性係数および配置位置等は材料試験で得られた実測値を用いた。

破壊荷重の実測値は計算値を約 20% 上回り、PC 桁として十分な耐力を示した。

(3) 有効プレストレス力

PC 桁の有効プレストレス力を推定するため、桁下縁にひび割れを発生させた後除荷し、再び載荷してひび割れが開口し始める荷重、すなわち、有効プレストレス力による下縁応力が打ち消されて 0 となるために必要な載荷荷重を測定した。表-4 にひび割れ再開荷重および PC 鋼線の有効引張応力度の結果を示す。

ひび割れ再開荷重より推定される PC 鋼線の有効引張応力度は 72 kgf/mm² であるが、当時の設計計算書が不明であるので、設計値と照合することはできない。参考として、現行の設計方法で設計した場合の値を示すと、有効引張応力度は 84 kgf/mm² となり、推定値はやや低めの値となる。

表-4 ひび割れ再開荷重および PC 鋼線の有効引張応力度

ひび割れ再開荷重 (tf)		有効引張応力度 (kgf/mm ²)	
実測値 (目視)	計算値	実測値	計算値
10	15	72	84

(4) 支間中央のたわみ

桁の支間中央における荷重-たわみ曲線を図-4 に示す。図に示すように、ひび割れが発生した荷重 20 tf までのたわみは、ほぼ弾性体に近い挙動を示したが、ひび割れ発生後は急激にたわみも増加しており、ひび割れ発生によって剛性が大きく低下することがわかる。しかし、ひび割れ発生後に、一旦除荷したときの残留たわみが約 0.5 mm で、ほとんど載荷前の状態まで回復していることから、PC 桁としての機能は十分に保持しているものと思われる。

図には計算値も併せて示すが、おおよそ実測値の動きをとらえている。なお、計算値の算出に際し、コンクリートの弾性係数は、桁から採取したコンクリートコア供試体の静弾性係数試験によって得られた値 (3.1×10⁵ kgf/cm²) を用いた。

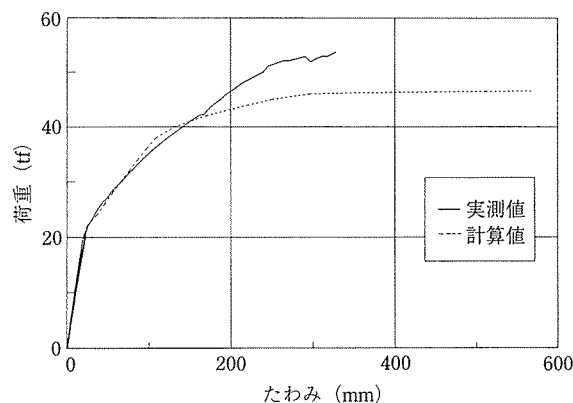


図-4 荷重-たわみ曲線 (支間中央)

(5) 支間中央におけるコンクリート表面のひずみ分布

図-5 に桁の支間中央断面におけるコンクリート表面のひずみ分布を示す。ひび割れ発生までは、各荷重段階ともほぼ直線を示すが、荷重 20 tf になると、支間中央

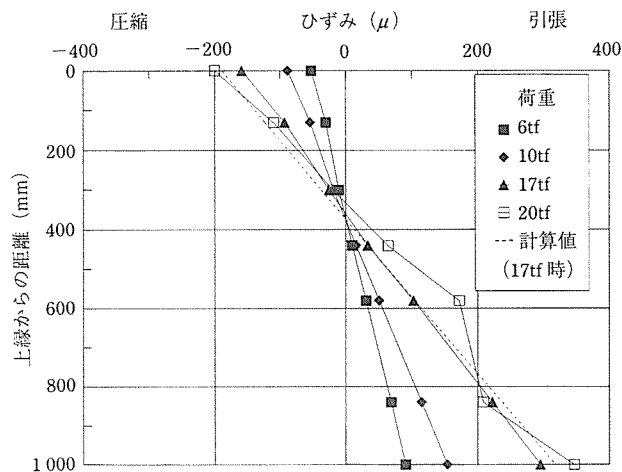


図-5 支間中央断面のひずみ分布

付近の下縁にひび割れが発生したため、支間中央断面におけるひずみ分布は、コンクリートの引張部において直線でなくなり、したがって、中立軸の位置も若干上方へ移動している。

図中の計算値は荷重 17 tf 時における弾性理論による計算結果で、コンクリートの弾性係数を $3.1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ として計算した値である。実測値と比較的良好一致しており、また、中立軸の位置も良く一致しており、全断面有効に作用しているものと思われる。

4.3 コンクリートの材料試験

(1) 圧縮強度, 引張強度, 弾性係数およびポアソン比

コンクリートコア供試体の圧縮強度, 引張強度, 弾性係数, およびポアソン比の測定結果を表-5 に示す。圧縮強度は, 供試体の高さが直径の 2 倍より小さいので補正係数を乗じて求めた。その結果, 3 体の平均は 537 kgf/cm^2 であり, 設計基準強度 400 kgf/cm^2 に対して十分な圧縮強度が確認された。

表-5 コンクリートの圧縮強度, 引張強度, 弾性係数, およびポアソン比 (3 体の平均)

圧縮強度 (kgf/cm ²)	537
引張強度 (kgf/cm ²)	36.2
静弾性係数 (kgf/cm ²)	3.09×10^5
ポアソン比	0.169

引張強度は $24 \sim 49 \text{ kgf/cm}^2$ の間でばらつきを生じたが, 平均すると 36.2 kgf/cm^2 となった。一般にコンクリートの引張強度は圧縮強度の $1/10 \sim 1/13$ であり, 平均値と比較するとやや低めの値を示したが, 高強度になるとその比は小さくなることを考えるとほぼ妥当な結果であると思われる。

弾性係数は $2.59 \times 10^5 \sim 3.43 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ の間でばらつきを生じ, 平均値は $3.09 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ で, 圧縮強度に対してやや小さい値を示した。なお, 桁の曲げ載荷試験時において, ひび割れが発生するまでの支間中央におけるたわみの実測値と載荷荷重との関係から求めた弾性係数は約 $3.7 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ となる。

ポアソン比も 3 体の間でばらつきを生じたが, 平均すると 0.169 と通常用いられているコンクリートの値とほぼ同じであった。

(2) 中性化深さ

コンクリートの中性化深さの測定には, 引張強度試験終了後の割裂供試体の割裂面を測定面として使用し, 「フェノールフタレイン法」により, コンクリート表面(両端面)からの中性化深さを測定した。測定結果を表-6 に示す。

表より, 山側では一部最大 3 mm を示したが, 3 体の

表-6 コンクリートの中性化深さ (3 体の平均)

測定面	測定値 (mm)			推定値 (mm) C	中性化速度の比 A/C
	最大	最小	平均値 A		
海側	8	0	3.9	1.1	3.5
山側	3	0	0.4		0.4

平均が 0.4 mm で, ほとんど中性化の影響を受けていないのに対し, 一方, 海側においては, 最大 8 mm を示し, 平均でも 3.9 mm で, 山側の約 10 倍の速さで中性化が進んでいる。また, コンクリートの中性化深さを求める中性化速度式のうち, 広く用いられている「岸谷式¹⁾」により, 大気中において 36 年経過したコンクリートの標準中性化深さの推定値を求めると, 表-6 に示すように, 1.1 mm となり, 山側で中性化が推定値の半分弱の速度で進行しているのに対し, 海側では推定値の 3.5 倍とかなり速い速度で中性化が進行しているのがわかる。

(3) 配合推定

試験桁のウェブ部分より採取したコア供試体を用いて, 桁に用いられたコンクリートの配合を「セメント協会コンクリート専門委員会法」により推定を行った結果を表-7 に示す。

表-7 コンクリートの配合推定

単位容積重量 (kg/m ³)		吸水率 (%)	単位量 (kg/m ³)			水セメント比 (%)
表乾	絶乾		セメント	水	骨材	
2 435	2 338	4.2	326	128	1 978	39.3

施工当時のコンクリートの配合, 使用された材料の品質も不明であるが, 配合推定より得られた単位セメント量, 単位水量ともに, 一般の PC 用コンクリートに比べるとやや少な目と思われる。しかし, 吸水率が比較的小さいこと, 強度試験等の結果と併せて推察すると, スランプの小さい, 比較的硬練りの密実なコンクリートが使用されたものと思われる。

(4) 塩分含有量

試験桁のウェブ部分より採取した直径 100 mm, 長さ 140 mm のコア供試体を長さ方向にスライスした 9 個の試料について, コンクリート中に含まれる塩分含有量の測定を「日本コンクリート工学協会法 (電位差滴定法)」により行った。

ウェブ部分における橋軸直角方向の塩化物イオン重量の分布を表すと図-6 のようになる。なお, 塩分含有量は各試料より分取したサンプル量の重量パーセントを示す。

図より, コンクリート中の塩分含有量は桁の表面付近が多く, 内部では少なくなっている。主桁の海側面と山

◇調査報告◇

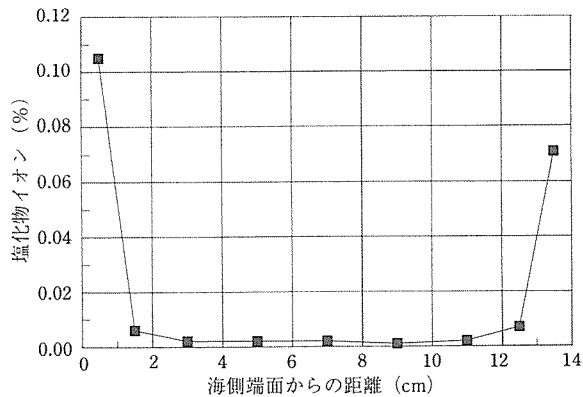


図-6 コンクリート中の塩化物イオンの分布

側面を比較すると、海側面の塩分量がやや多くなっているが、本橋は海岸線より約 3 km 上流部に位置しており、飛来塩分の影響はほとんどないと考えられたが、測定結果を見る限りでは、塩分の影響を多少なりとも受けていたことが考えられる。しかし、かぶり厚さの実測値、鋼材等の表面の発錆状況から判断すると、これら測定された塩分の量が、シースおよび鋼材等に与える影響は非常に少ないものと思われる。

4.4 PC 鋼線の材料試験

(1) 外観状況

PC 鋼線の表面状況を目視により観察した結果は、グラウトに包まれている PC 鋼線には錆は生じていないが、PC 鋼線同士が接している部分、シースと接している部分の PC 鋼線の表面には幅 2~3 mm の錆が長さ方向に生じていた。しかし、錆の層はかなり薄く、大きなピンホールはなかった。

(2) 機械的性質

PC 鋼線の引張試験による機械的性質を表-8 に示す。引張強度および降伏強度はすべての試験片について規格値を上回っていた。伸びにおいては試験片の半数が規格値に達せず、少し低くなっていた。これは局部的な表面の錆による小さなピットが影響した可能性があるが、使用上問題になる低下ではないと考えられる。また、引張試験後の破断部近傍には、大きな腐食や損傷等

表-8 PC 鋼線の機械的性質 (6本の平均)

項目	試験値	規格値 ^{*1}
直径 (mm)	5.07	
降伏強度 (kgf/mm ²) ^{*2}	153	140 以上
引張強度 (kgf/mm ²)	167	165 以上
弾性係数 (kgf/mm ²)	20 300	
伸び (%) ^{*3}	4.2	4.5 以上
絞り (%)	38	

*1 昭和 30 年土木学会制定プレストレストコンクリート設計施工指針

*2 降伏強度は残留ひずみが 0.2% の強度とする。

*3 伸びの測定長は 100 mm とする。

の異常は見られなかった。

4.5 グラウトの充填状況

採取した主ケーブルは曲げ上げ配置のため、シース内の PC 鋼線はシース上部に集中して配置されていた。したがって、シース上部の PC 鋼線とシースが接する部分においてグラウトが十分に充填されていない箇所が一部あったほかは、採取したケーブル共ほぼ全長にわたり十分に充填されていた。

また、シースはストレートシースを使用しており、その接続部で一部錆が見られたが、全体的にはシース内外面共に錆はほとんど見られなかった。写真-3 に採取したケーブルのグラウトの充填状況を示す。



写真-3 グラウトの充填状況

5. ま と め

昭和 32 年に施工された PC 桁について、耐力および耐久性を調べるため、主桁の曲げ載荷試験およびコンクリートと PC 鋼線の材料試験を実施した。その結果、有効プレストレス力は若干低い値を示したものの、桁の曲げ耐力は計算値を上回り、PC 桁としての力学的な挙動も確認することができた。また、コンクリートおよび PC 鋼線の品質についても、コンクリートの中酸化および塩害等によって引き起こされる耐久性あるいは安全性の低下に直接結びつくような劣化は見られず、36 年間の供用にもかかわらず、今なお健全な状態を保っていたことが明らかとなった。

最後に、本試験の実施に当たり、長岡技術科学大学建設系、丸山久一教授から御指導をいただきましたことを付記するとともに、御協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 岸谷, 西澤他編: コンクリート構造物の耐久性シリーズ 中酸化, 技報堂出版

【1995 年 10 月 11 日受付】