

# わが国で最初の PC 橋（長生橋）の解体調査と PC 桁の載荷試験

小門前 亮一\*<sup>1</sup>・西垣 義彦\*<sup>2</sup>・竹腰 勇ノ介\*<sup>3</sup>・鳥居 和之\*<sup>4</sup>

## 1. はじめに

わが国で最初の PC 橋である長生橋はプレテンション方式のスラブ橋であり、昭和 26 年に石川県七尾市を流れる御祓（みそぎ）川に（株）ピー・エスの前身である東日本重工業七尾造船所により架設された。長生橋は今日一般に普及している PC 橋の始祖となった歴史的な橋梁である。本道路橋はこれまで大規模な補修・補強工事もなく、架設後 50 年間にわたり供用されてきたが、河川改修工事にともない撤去・架替えがなされることとなり、平成 13 年 9 月に撤去工事が完了した。前年度、同様に御祓川に架かるわが国最初のプレテンション単純 T 桁橋である泰平橋（昭和 27 年竣工）が撤去されている。

建設当時の長生橋の外観を写真 - 1 に示す。当時は現在のように桁の運搬・架設機材はまったく整備されておらず、工場製作したプレキャスト桁を荷馬車で運搬し、人力により架設が行われた。長生橋の施工状況を写真 - 2 に示す。

長生橋は七尾湾内の河口付近に位置し、海洋からの塩分の供給や河川水の干満の作用を受ける状態で供用され続け、コンクリートの耐久性の観点からは厳しい環境条件に置かれていたといえる。

本調査では、撤去後の長生橋の PC 桁を利用してコンクリートや鋼材の材料試験および桁の載荷試験を実施し、歴史ある PC 橋の耐久性について、材料的・力学的両側面から評価することを目的とした。



写真 - 1 建設当時の長生橋



写真 - 2 長生橋の施工状況

## 2. 長生橋の構造形式

長生橋は、工場製作したプレテンション方式の逆 T 形桁を敷き並べ、その上に舗装一体の場所打ちコンクリートを施工した、橋長 10 600 m、桁長 3 840 m の 3 径間単純合成床版橋である。長生橋の建設当時の現存する設計図書等は非常に少なく、実橋の寸法計測および鋼材のはつり出しにより桁の寸法形状および鋼材配置を確認するほかない状況であった。

設計計算書によると活荷重は自動車 13 t、輾圧機 17 t で設計されている。また、高欄には PC 鋼線を配置したプレキャスト部材を使用している。緊張方法については緊張装置を自主製作し、13 本の PC 鋼線を同時緊張したようである<sup>1)</sup>。実橋の調査から得た長生橋の一般図および各供試体採取位置を図 - 1 に、鋼材配置を図 - 2 に示す。主桁には PC 鋼線のみ配置されており、スターラップ等の鉄筋は配置されていなかった。横方向は主桁を貫通して、 $\phi 22$  mm の丸鋼ボルトが配置されていた。

## 3. 材料試験

主桁および間詰め部からコンクリート、主桁から PC 鋼線を採取し、それぞれについて材料の性状に関する試験を実施し、力学および物理化学的性質を調べるとともに、健全性の評価を行った。表 - 1 に材料試験項目を示す。また、コンクリートについては前年行われた泰平橋の試験結

\*<sup>1</sup> Ryoichi KOMONMAE：(株)ピーエス 土木技術部

\*<sup>2</sup> Yoshihiko NISHIGAKI：(株)ピーエス 土木技術部 次長

\*<sup>3</sup> Yunosuke TAKEGOSHI：石川県七尾土木事務所 次長

\*<sup>4</sup> Kazuyuki TORII：金沢大学 工学部 土木建設工学科 教授

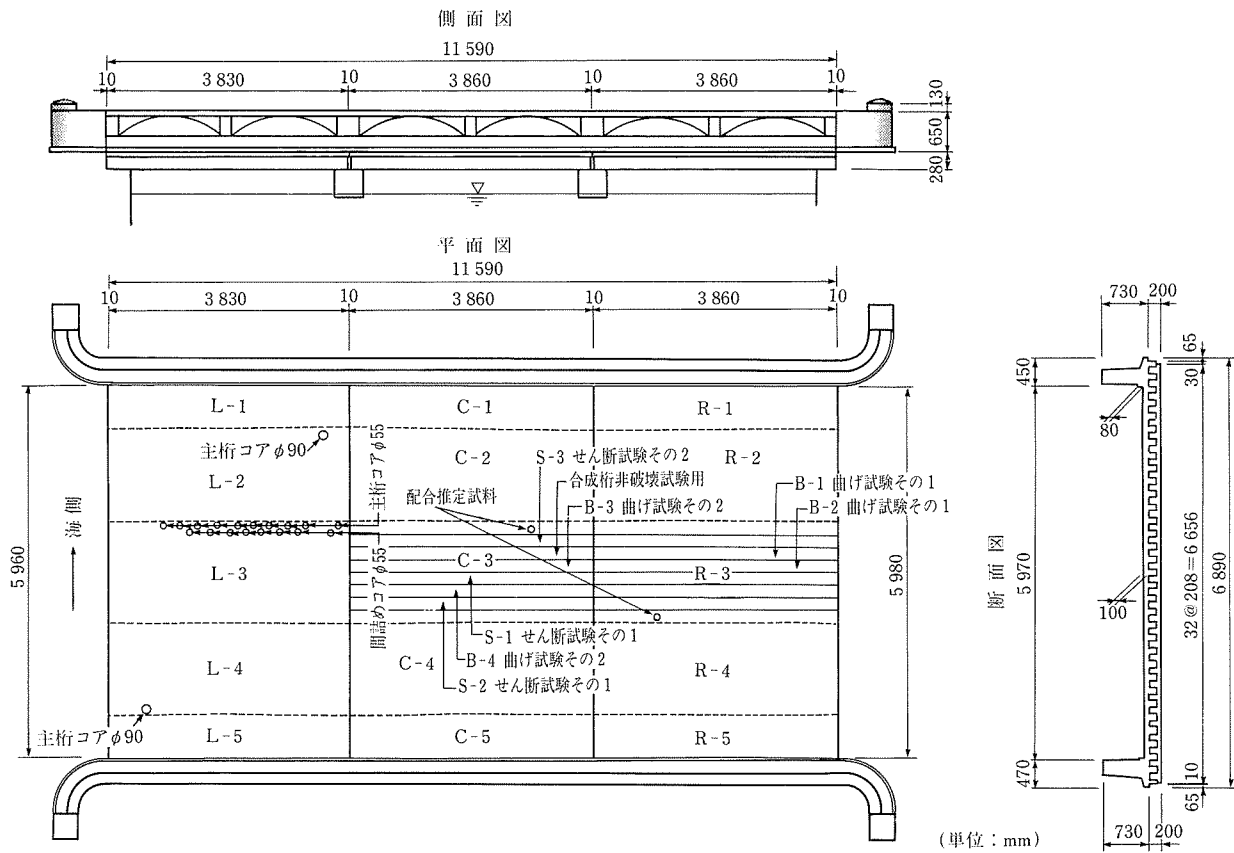


図 - 1 長生橋の一般図および供試体採取位置

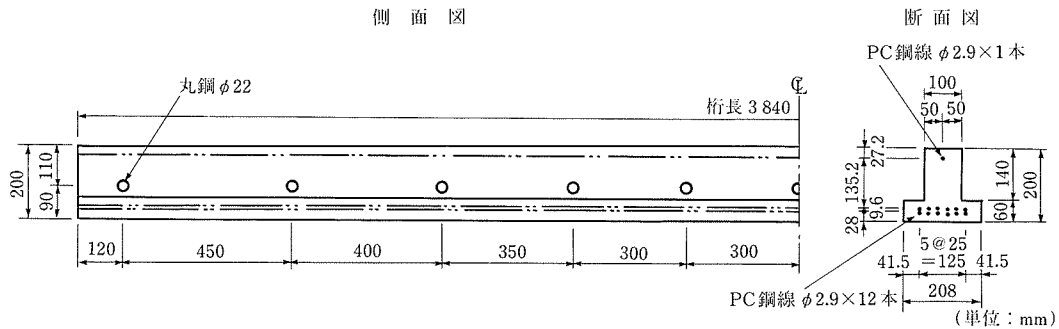


図 - 2 長生橋の PC 桁の鋼材配置図

表 - 1 材料試験項目

試験材料	試験項目	試験方法
コンクリート	強度試験	圧縮強度, 割裂引張強度, 静弾性係数, 超音波パルス
	配合推定	セメント協会法 (F-18, F-23)
	中性化深さ	フェノールフタレイン溶液噴霧法
	塩分量	電位差滴定法 (JCI SC-5)
PC 鋼線	はつり検査	
	腐食性状	
	電気化学的測定	自然電位分極抵抗
	引張強度	JIS G 3536
	リラクセーション試験	
	化学組成	

果<sup>2)</sup>も併せて示した。

### 3.1 材料試験の概要

#### (1) コンクリートの材料試験

#### a) 強度試験

主桁および間詰め部から採取したコア (φ55 × 110 mm) を用いて圧縮強度, 静弾性係数および割裂引張強度を測定し, おおのこのコンクリートの力学的性質を調べた。

#### b) 配合推定

主桁および間詰め部から採取したコンクリート塊を微粉砕し, セメント協会法<sup>3)</sup>によるコンクリートの配合推定を行った。配合推定では, 試料の寸法や採取する位置の影響を受けやすいため, コンクリート塊は桁の表面部分を含まないものとした。

#### c) 中性化深さの測定

合成桁を乾式ダイヤモンドカッターで切断し, 切断面に1%のフェノールフタレイン溶液を噴霧して赤色未発色領域を中性化領域と判断して中性化深さを測定した。

#### d) 塩分量の測定

主桁から鉛直方向に採取した貫通コアをスライスし、各深さにおいて電位差滴定法（JCI SC-5, 2N の硝酸による溶解）による全塩分量の測定を実施し、桁の深さ方向における塩分の分布を調べた。なお、測定結果の塩分含有率を塩化物イオン量に換算する際には、配合推定で得られたコンクリートの単位容積質量を用いるものとした。

(2) PC 鋼材の材料試験

a) 引張試験

主桁に使用されていた PC 鋼線を取り出して引張試験（JIS G 3536）を実施し、各種機械的性質の測定を行って現行の規格との比較を行った。また、リラクゼーション試験もあわせて実施した。

b) 成分分析

引張試験と同様の試料を用いて PC 鋼線の化学組成の分析を実施し、現行の規格との比較を行った。

3.2 材料試験の結果

(1) コンクリートの性状

a) 力学的性質

表 - 2 にコンクリートの力学的性質を示す。主桁のコンクリートは設計資料による設計基準強度 50 N/mm<sup>2</sup> に対し、試験の平均値は 63.9 N/mm<sup>2</sup> であり、十分な圧縮強度を有していた。一方、図 - 3 に示すように、圧縮強度に対する静弾性係数の値は、現在の「道路橋示方書」に対しては妥当な値となっているが、昭和 36 年制定「PC 設計施工指針」に用いられた値<sup>4)</sup>と比較すると低いといえる。しかしながら、コンクリートコアの切断面を観察したところ、良質の川砂および玉砂利が使用され、非常に密実なコンクリートであった。また、間詰め部のコンクリートについては各試

表 - 2 コンクリート力学的性質

項目	長 生 橋						泰平橋
	主桁部			間詰め部			
圧縮強度 N/mm <sup>2</sup> (平均値)	63.5	55.7	72.5	47.3	43.4	41.4	64.3
	63.9			44.0			
割裂引張強度 N/mm <sup>2</sup> (平均値)	3.42	4.53	3.71	2.49	2.76	3.46	3.80
	3.89			2.90			
静弾性係数 kN/mm <sup>2</sup> (平均値)	33.6	31.5	40.6	32.9	30.8	29.0	46.0
	35.2			30.9			

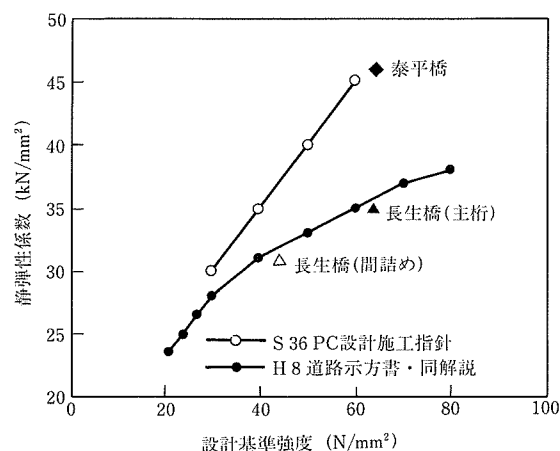


図 - 3 設計基準強度と静弾性係数との関係

験値が主桁に比べて低い結果となった。

b) 配合推定結果

表 - 3 にコンクリートの配合推定結果を示す。配合推定で得られた主桁の水セメント比の値は、設計資料の値および前述した圧縮強度試験の結果と照合して妥当なものであると判断できる。粗骨材の最大寸法は 15 mm であった。単位セメント量が多く、富配合のコンクリートであるとの結果が得られた。また、現在用いられているコンクリートと比較して単位容積質量が非常に大きいことが特徴的である。一方、間詰め部のコンクリートは主桁に比べ水セメント比が高く、粗骨材の最大寸法も 30 mm と主桁とは異なるコンクリートが使用されたことがわかる。

表 - 3 コンクリートの配合推定結果

項目	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	水セメント比 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )		
			セメント	水	骨材
長生橋	2 430	35	506	175	1 738
		32	590	186	1 654
	2 360	57	300	172	1 934
		55	302	166	1 947
泰平橋主桁	2 460	33	438	144	1 878

c) 中性化深さ

フェノールフタレイン溶液噴霧後の桁断面を写真 - 3 に示す。断面全体において赤色が呈され、中性化領域はほとんど存在しなかった。桁下部は河川水の干満の作用を受ける環境下で 50 年もの間供用され続けたにもかかわらず、コンクリートは極めて健全な状態が保たれていたと言える。また、骨材の界面に空隙が見られないことから、ブリージングがほとんどない良質なコンクリートが打ち込まれたものと推察する。



写真 - 3 桁の中性化状況

d) 塩分浸透状況

主桁の下面から鉛直方向における塩分分布を図 - 4 に示す。桁下面のコンクリート表面部における塩化物イオン濃度が高いが、塩分の最大浸透深さは 15 mm 程度と小さなものであった。PC 桁のコンクリート組織は非常に緻密であったため、内部への塩化物イオンの浸透が長期にわたって抑制されたものと考えられる。

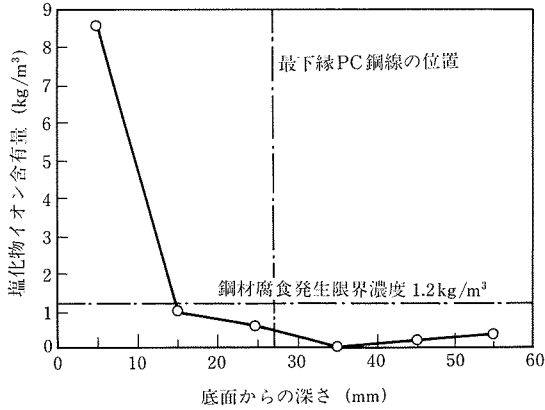


図 - 4 主桁の塩分浸透状況

(2) PC 鋼材の性状

PC 鋼線の試料をコンクリート中から採取したところ、鋼線表面部にわずかな発錆が認められたものの、孔食などの有害な腐食は存在しなかった。

a) 機械的性質

表 - 4 に主桁の PC 鋼線の引張試験および現行の JIS 規格 (単線 SWPR1A), 表 - 5 にリラクゼーション試験の結果を示す。また、図 - 5 に長生橋の PC 鋼線の荷重-伸び曲線の一例を示す。長生橋に使用されていた PC 鋼線は、現在の一般的な PC 鋼線と比較して弾性限が低くなっており、弾性係数についても若干低い値となった。したがって、長生橋に用いられた PC 鋼線は、ブルーイング処理が施されていないものと考えられる。また、破断伸び率も 2.8 % と低い値となった。10 時間後の PC 鋼線のリラクゼーション値は 1.0 % であった。現在の規格では 1 000 時間後のリラクゼーション値を規定しているが、以前は 10 時間後のリラクゼーション値として 3.0 % 以下が規格値として用いられており、それに対して低い値となっている。これは高張力状態で長期間経過していることから、すでに相当量のリラクゼーションが進行しているためと考えられる<sup>5)</sup>。

表 - 4 PC 鋼線の機械的性質および現行の規格

項目	試料 No.					平均	規格値
	1	2	3	4	5		
直径 (mm)	2.91	2.91	2.91	2.90	2.90	2.91	2.90 ± 0.03 mm
破断荷重 (kN)	14.73	14.70	14.67	14.77	14.68	14.71	12.7 kN 以上
降伏荷重 (kN)	13.40	13.50	13.40	13.80	13.43	13.51	11.3 kN 以上
ヤング係数 (kN/mm²)	190.79	191.66	192.76	195.58	195.62	193.28	(一般に 200 kN/mm²)
伸び (%)	3.0	3.0	2.5	2.5	3.0	2.8	3.5 % 以上
屈曲 (回)	8	8	8	8	8	8	6 回以上 (フレシネー規格)
絞り (%)	47.4	47.4	51.0	38.1	48.4	46.5	30 % 以上 (フレシネー規格)

表 - 5 リラクゼーション試験結果

No.	初荷重 N	荷重低下量 N	リラクゼーション値 %
6	9 040	85	0.94
7		90	1.00
8		90	1.00
平均		88.33	0.98

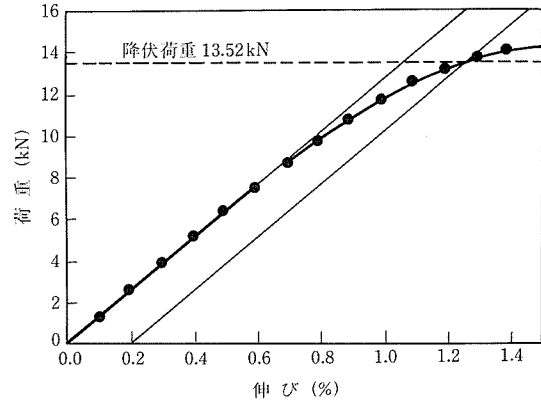


図 - 5 PC 鋼線の荷重-伸び曲線

表 - 6 PC 鋼線の化学組成 (%) および現行の規格値

元素	測定値	規格
C	0.81	0.80~0.85
Si	0.22	0.12~0.32
Mn	0.48	0.3~0.6
P	0.008	0.025 以下
S	0.015	0.025 以下
Cu	0.12	0.2 以下

b) 化学組成

表 - 6 に PC 鋼線の成分分析結果および現行の JIS 規格 (ピアノ線材 SWRS82A) を示す。化学成分はいずれも現行の規格を満足しており、成分的には現在のピアノ線材とほとんど相違ないものであった。したがって、PC 鋼線の機械的性質が現在のものと若干異なる原因は、化学組成の相違によるものではないと考えられる。

4. PC 桁の載荷試験

4.1 載荷試験の概要

長生橋の PC 桁の力学的特性を確認するために、曲げ載荷試験およびせん断載荷試験を実施し、耐力や力学的挙動の確認を行った。曲げ試験については、間詰めコンクリー

トをはつりとした逆T形の非合成桁と間詰めを残した合成桁について検討し、せん断試験では非合成桁についてせん断スパン比 ( $a/d$ ) をパラメータとした載荷試験を行い、破壊形態についても検討することとした。表 - 7 に載荷試験項目、図 - 6 に各載荷試験における桁の断面図を示す。また、載荷試験に先立ち、載荷試験と同様の載荷条件で2次元の非線形 FEM 解析を実施し、実験値との比較を行った。解析においては、材料試験で得られたコンクリートおよび PC 鋼線の諸数値を用いた。

表 - 7 載荷試験項目

項目		試験桁数 (本)	試験桁番号
曲げ載荷試験その1	非合成桁	2	B-1, B-2
曲げ載荷試験その2	合成桁	2	B-3, B-4
せん断載荷試験その1	せん断スパン比 3.0	2	S-1, S-2
せん断載荷試験その2	せん断スパン比 1.8	1	S-3

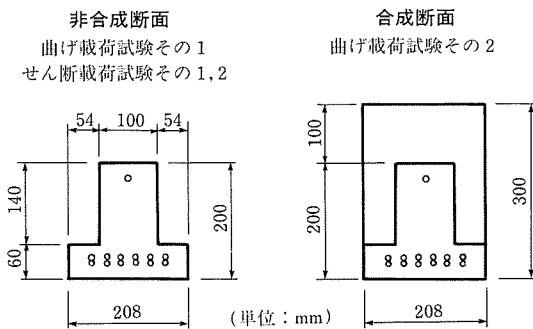


図 - 6 PC 桁の断面形状

(1) 曲げ載荷試験

曲げ載荷試験の概要を図 - 7 に示す。曲げ載荷試験における桁断面は、間詰め部を取り除いた非合成桁および間詰め部を残した合成桁とし、それぞれ載荷試験 (その1) および (その2) に使用した。載荷試験はその1, その2ともに、支間 3.500 m, 載荷点間距離 0.500 m で実施した。非合成桁の試験では、PC 鋼線の有効緊張力を確認するため、曲げひび割れ発生後いったん除荷し、ひび割れ再開荷重を把握することにより有効緊張力を推定した。すなわち、ひび割れ再開時に下縁のプレストレスが打ち消されて応力度がゼロになるものと仮定して PC 鋼線の有効緊張力を求めた。なお、ひび割れ再開荷重については、曲げひび割れ発生後いったん除荷し、ひび割れを跨ぐ形で設置したパイ型ひずみゲージを用いて計測した。

載荷順序は、非合成桁については支間中央部付近の下縁にひび割れの発生を目視により確認した後、いったん除荷

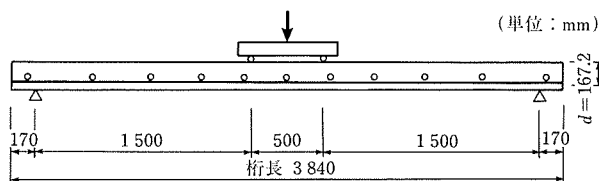


図 - 7 曲げ載荷試験の概要

し、その後ひび割れが再開するまで荷重を加え、さらに破壊まで載荷した。合成桁については破壊に至るまで荷重を単調増加させた。測定項目は、載荷重、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。

(2) せん断載荷試験

せん断載荷試験の概要を図 - 8 に示す。せん断破壊の形態について検討するため、せん断スパン比を変化させ、せん断載荷試験その1では斜め引張破壊となるように支間 2.800 m, せん断スパン比 3.0 で実施し、その2ではせん断圧縮破壊となるように支間 2.400 m, せん断スパン比 1.8 で実施した。桁の断面形状は、その1, その2ともに間詰め部を取り除いた逆T形の非合成断面とした。

載荷順序はその1, その2ともに破壊に至るまで荷重を単調増加させた。

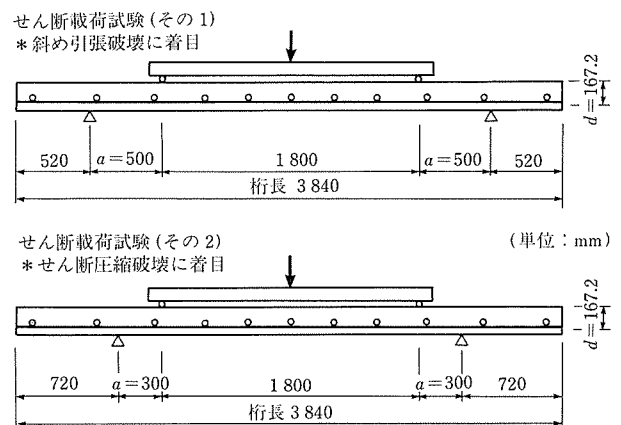


図 - 8 せん断載荷試験の概要

4.2 載荷試験の結果

(1) 曲げ載荷試験 (その1)

曲げひび割れ発生後いったん除荷し、ひび割れを跨ぐ形で設置したパイ型ひずみゲージを用いて計測した、荷重-ひび割れ幅曲線を図 - 9 に示す。荷重-ひび割れ幅曲線は 11 kN から勾配が変化し傾きが小さくなっている。したがって、載荷荷重 11 kN をひび割れ再開荷重と判断した。載荷試験における曲げひび割れ再開時の曲げ応力度の関係より、有効緊張力を計算し、PC 鋼線の有効引張応力度を推定した。その結果を表 - 8 に示す。なお、有効緊張力の計算

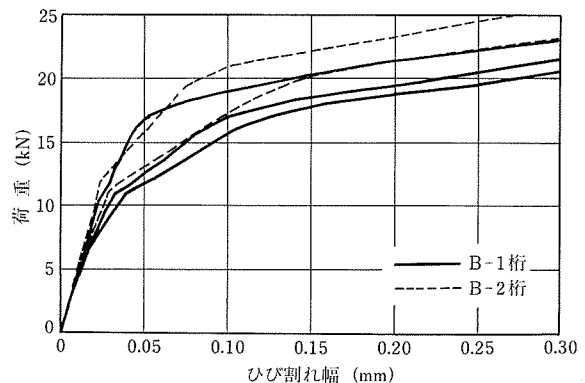


図 - 9 荷重-ひび割れ幅曲線

表 - 8 有効引張応力度の推定値

	有効引張応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	有効係数
設計試料の値	1 041	0.867
測定値	948	0.789

の際には、各 PC 鋼線の有効緊張力は均一であるものと仮定した。計算された PC 鋼線の有効引張応力度の推定値は 948 N/mm<sup>2</sup> と当時の設計資料に記されている 1 041 N/mm<sup>2</sup> を下回るものであった。

図 - 10 に載荷試験の実験値および解析値の荷重－変位曲線を示す。荷重－変位曲線は B-1, B-2 のいずれの桁も FEM 解析値と近い挙動を示し、曲げ耐力は梁理論による計算値を上回る結果となった。破壊性状は B-1, B-2 とともに破壊荷重の値から PC 鋼線が降伏していると考えられ、曲げ引張破壊であるといえる。また、この時点での上縁のコンクリートの測定ひずみは B-1 桁で  $2\,400 \times 10^{-6}$ 、B-2 桁で  $3\,200 \times 10^{-6}$  に達した。写真 - 4 および図 - 11 に桁の破壊状況を示す。桁に鉄筋が配置されていないため、塑性域においてひび割れが分散せず、特定のひび割れ部位に開口が集中する性状を示し、ひび割れ本数が少ないことが特徴的であった。また、ひび割れは横方向鉄筋用の貫通孔に向けて進展する傾向が見られた。

図 - 12 に B-1 桁における桁鉛直方向のひずみ分布を示す。ひび割れ発生までは、各荷重段階ではほぼ直線となり、

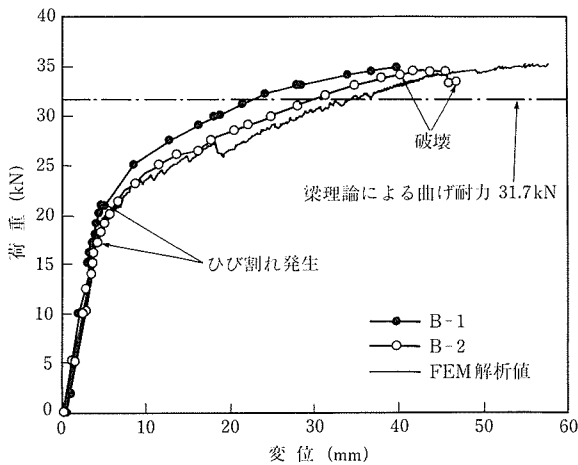


図 - 10 曲げ載荷試験 (その 1) の荷重－変位曲線

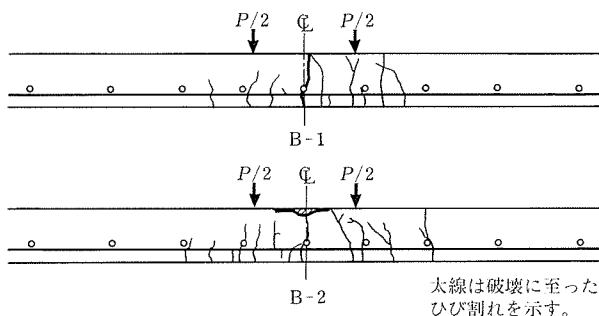


図 - 11 破壊時のひび割れ発生状況

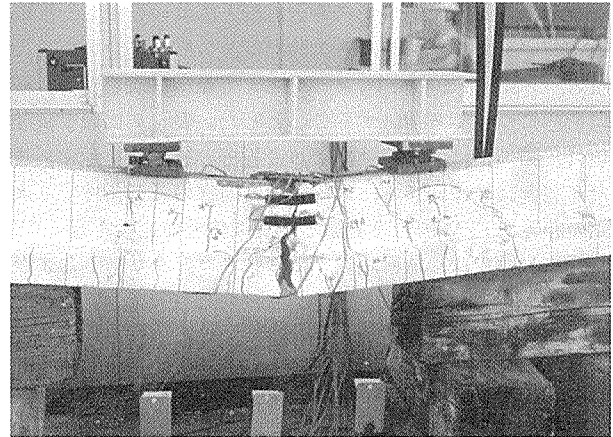


写真 - 4 PC 桁の破壊状況 (B-2 桁)

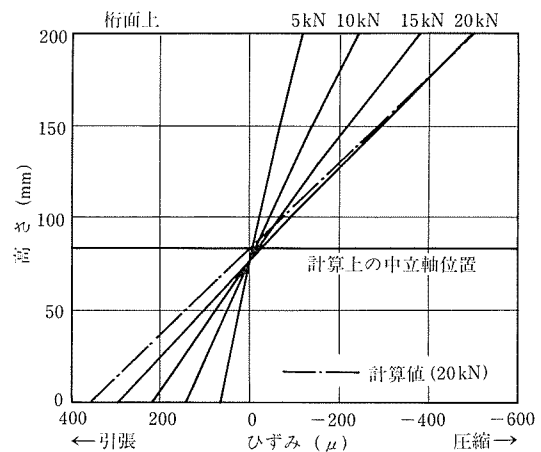


図 - 12 支間中央断面におけるひずみ分布

中立軸の位置、縁ひずみの値は計算値と比較的よく一致し、全断面有効として弾性理論により縁応力が算出できることが確認された。

(2) 曲げ載荷試験 (その 2)

図 - 13 に載荷試験の実験値および解析値の荷重－変位曲線を示す。いずれの桁もひび割れの分散が極めて悪く、ひび割れの開口幅が顕著となり、PC 鋼線の破断による曲げ引張

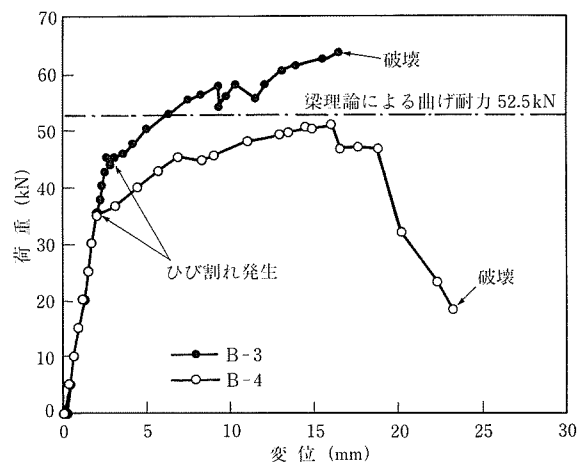


図 - 13 曲げ載荷試験 (その 2) の荷重－変位曲線

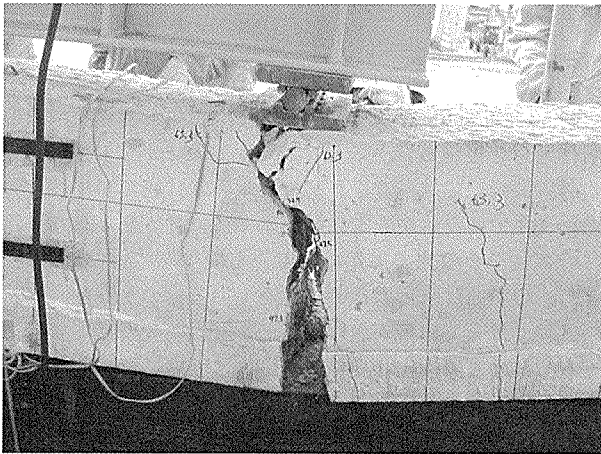


写真 - 5 PC 桁の破壊状況 (B-3 桁)



写真 - 6 PC の破壊状況 (S-2 桁)

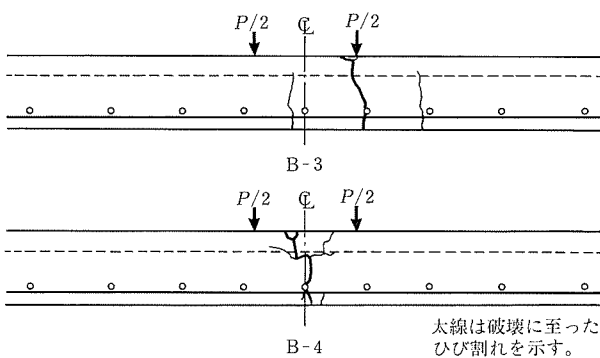


図 - 14 破壊時のひび割れ発生状況

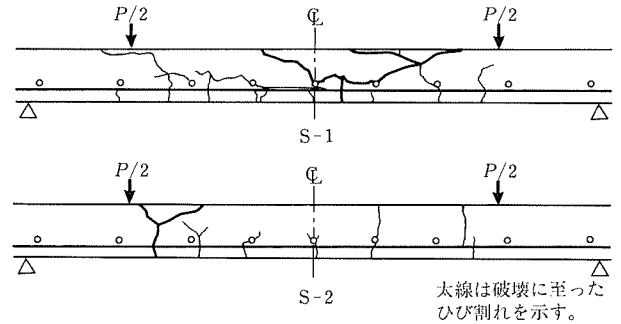


図 - 16 破壊時のひび割れ発生状況

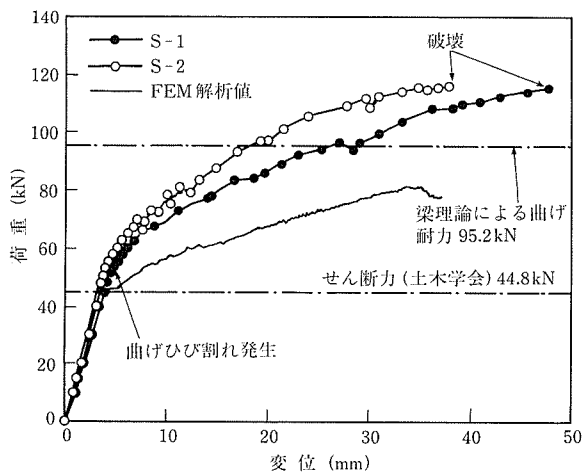


図 - 15 せん断載荷試験 (その 1) の荷重—変位曲線

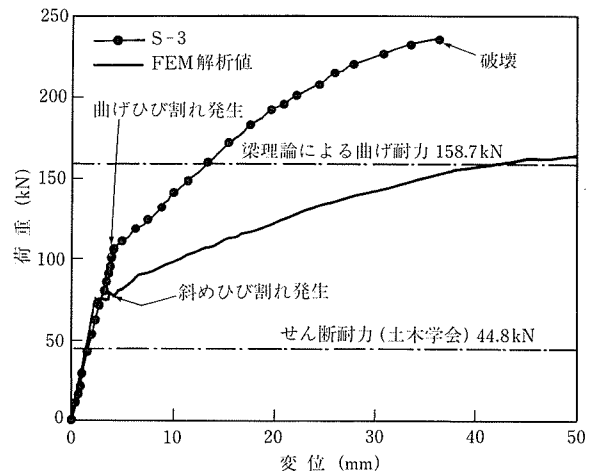


図 - 17 せん断載荷試験 (その 2) の荷重—変位曲線

破壊となった。また、載荷点付近の最大圧縮ひずみは B-3 桁では  $1.813 \times 10^{-6}$ 、B-4 桁では  $1.356 \times 10^{-6}$  であった。ひび割れ発生荷重、破壊荷重ともに B-3 桁に対して B-4 桁は大幅に下回った。B-4 桁では破壊時に下線の PC 鋼線が数本残っていたこと、事前の調査において桁のそりが B-3 に比べ少なかったことから判断して、プレストレスの不足が原因として考えられる。当時の同時緊張方法による緊張装置では試行があったと考え、くさび定着がゆるんでいたなどの理由で均一な緊張力が得られなかったものが存在したの

ではないかと推察する。写真 - 5 および図 - 14 に桁の破壊状況を示す。

(3) せん断載荷試験 (その 1)

図 - 15 に載荷試験の実験値および解析値の荷重—変位 (支間中央) 曲線を示す。破壊性状はいずれの桁も斜め引張破壊ではなく、PC 鋼材の破断による曲げ引張破壊となり、せん断スパン内に斜めひび割れは見られなかった。曲げ載荷試験と同様に、曲げひび割れ本数が非常に少なく、特定の曲げひび割れに開口が集中し、PC 鋼材の破断に至ったと考えられる。桁の破壊状況を写真 - 6、図 - 16 に示す。

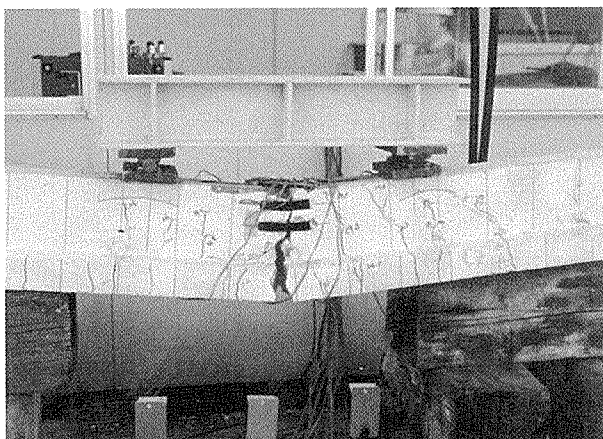


写真-7 PC 桁の破壊状況 (S-3 桁)

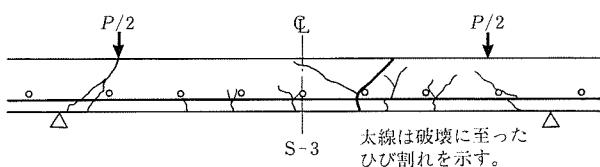


図-18 破壊時のひび割れ発生状況

(4) せん断載荷試験 (その2)

図-17 に載荷試験の実験値および解析値の荷重-変位 (支間中央) 曲線を示す。破壊性状はせん断圧縮破壊ではなく、PC 鋼材の破断による曲げ引張破壊であった。せん断圧縮破壊は斜めひび割れの発生後、ひび割れ上部のコンクリートが圧縮破壊を起こすものであるが、せん断スパン内での斜めひび割れの発生は見られたが、その後発生した等曲げ区間の曲げひび割れの分散性が悪く、他の試験と同様に載荷スパン内の特定の曲げひび割れ幅の卓越により、PC 鋼材の破断に至った。桁の破壊状況を写真-7 および図-18

に示す。

5. ま と め

約 50 年間供用された日本で最初の PC 橋である長生橋の解体調査を実施したところ、コンクリートおよび PC 鋼線の品質については、コンクリートは非常に密実で中性化の進行や塩分の浸透が非常に低い水準に抑制されており、鋼材の腐食やその他の劣化はほとんど発生していなかった。また、桁の曲げ耐荷力は計算値を上回るものとなり、せん断試験では全ての桁が曲げ破壊となり、十分なせん断耐力を有するせん断破壊しない部材であったといえる。長生橋の調査より、長期間を経た現在でもなお長生橋は健全性が保たれていることが明らかとなった。

謝 辞

本調査の実施にあたり、石川県七尾土木工事事務所から撤去桁の提供をいただきました。また、PC 鋼材の試験に関しては、住友電気工業(株)特殊線事業部 PC 部より多大なるご協力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 洞庭：PC 工事初期の思い出，土木施工増刊号，pp.231～235，1964.11
- 2) 佐藤，森，松本，鳥居：泰平橋の耐久性調査－日本で最初のプレテンション T 桁橋－，プレストレストコンクリート，Vol.43，No.2，pp.118～123，2001
- 3) セメント協会コンクリート専門委員会：硬化コンクリートの配合推定について，セメントコンクリート，No.251，pp.2～3，1968
- 4) 土木学会：プレストレストコンクリート設計施工指針，昭和 36 年度改訂，1961
- 5) 高速道路調査会：PC 鋼材の使用性に関する調査研究報告書，1986.3

【2002 年 1 月 7 日受付】



刊行物案内

# プレストレストコンクリートの歩みと 21 世紀の展望

## 第 29 回 PC 技術講習会

(平成 13 年 2 月)

頒布価格 (会 員) : 5,000 円 (送料 500 円)

(非会員) : 6,000 円 (送料 500 円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会