

## 報告 日本最初のPC橋—長生橋の耐久性調査

西垣 義彦<sup>\*1</sup>・小門前 亮一<sup>\*2</sup>・奥田 由法<sup>\*3</sup>・鳥居 和之<sup>\*4</sup>

**要旨**：日本最初のPC橋である長生橋（七尾市：昭和26年竣工）が河川改修に伴い、撤去された。その撤去桁を用い、PC創生期のコンクリートやPC鋼材の材料試験および桁載荷試験を実施し、材料的・力学的側面から耐久性について調査した。その結果、建設後50年を経た長生橋は、中性化の進行や塩分浸透もなく、耐荷力も計算値を上回るものであり、健全性が明らかとなった。

**キーワード**：耐久性，材料試験，載荷試験

### 1. はじめに

昭和26年に石川県七尾市を流れる御祓川に我が国で最初のPC橋である長生橋が架けられた(写真-1)。長生橋はプレテンション方式のスラブ橋であり、今日一般に普及しているPC橋の始祖となった歴史的意義のある橋梁である。本橋は、七尾湾内の河口付近に位置し、海風や桁下面が干満の作用による浸水の受ける厳しい環境条件の中で50年間にわたり供用されてきた。このほど河川改修工事に伴い、撤去・架け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。

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。

### 2. 構造概要<sup>1)</sup>

長生橋は、逆T形の桁をプレテンション方式で工場製作し、その桁を1径間に32本、合計96本を敷き並べ、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10.600m、桁長3.840mの3径間単純合成床版橋である。長生橋に関する現存の設計図書等が少ないため、実橋



写真-1 建設当時の長生橋

の寸法計測や鋼材のはつり出しにより桁の寸法形状、鋼材配置を確認した。実橋の調査から得た長生橋の一般図および鋼材配置図を図-1および図-2に示す。主桁にはスターラップ等の鉄筋は配置されておらず、PC鋼線のみ配置されていた。横方向鋼材としては、主桁を貫通してφ22mmの丸鋼ボルトが配置されていた。

設計計算書によると活荷重は自動車13t、転圧機17tで設計されている。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。なお、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た。

\*1 (株)ピー・エス 土木技術部 次長 (正会員)

\*2 (株)ピー・エス 土木技術部

\*3 (株)ピー・エス 北陸支店工務部 部長 (正会員)

\*4 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 工博 (正会員)

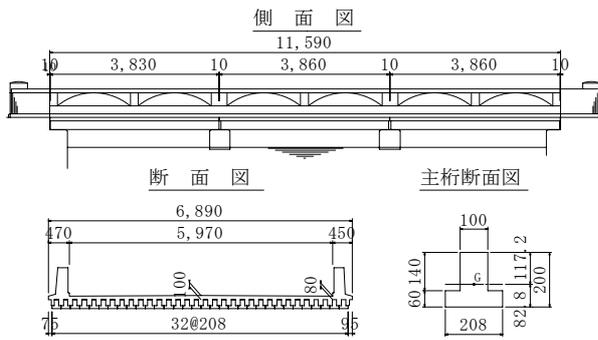


図-1 一般図

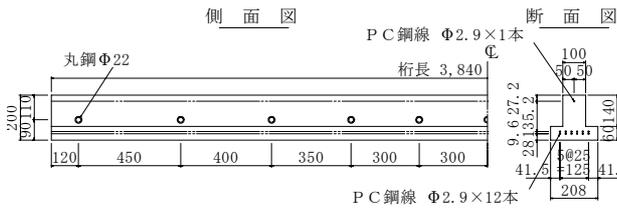


図-2 PC桁の鋼材配置図

### 3. 材料試験

主桁および間詰め部からコンクリートコアを採取し、圧縮強度、静弾性係数等の測定を行うとともに、コンクリート断面の中性化や塩分浸透状況について調べた。また、主桁からPC鋼線を採取し、引張強度、化学組織等の試験を行った。表-1に材料試験項目を示す。

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<br>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              | フェノールメチン溶液噴霧法               |
|        | 塩分量                | 電位差滴定法 (JCI SC-5)           |
|        | 内部組織の観察            | 細孔径分布、蛍光顕微鏡観察<br>走査型電子顕微鏡観察 |
| 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                  |
|        | リラクゼーション試験<br>化学組成 |                             |

### 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。試験結果の値はコンクリートコア3体の平均値とした。主桁のコンクリートは設計資料による設計基準強度  $50 \text{ N/mm}^2$  に対し、試験の平均値は  $63.9 \text{ N/mm}^2$  であり、十分な圧縮強度を有していた。一方、図

値は、過去の設計計算に用いられた値<sup>2)</sup>に比べ低い値となった。この原因として、走査型電子顕微鏡による内部組織の観察において確認された、 $100 \mu\text{m}$ を超える気泡が比較的多く存在したことが考えられる。また、間詰め部のコンクリートについては各試験値が主桁に比べて低い結果となった。

表-2 コンクリートの力学的性質

| 項目     | 主桁部                    | 間詰め部                   |
|--------|------------------------|------------------------|
| 圧縮強度   | $63.9 \text{ N/mm}^2$  | $44.0 \text{ N/mm}^2$  |
| 割裂引張強度 | $3.89 \text{ N/mm}^2$  | $2.90 \text{ N/mm}^2$  |
| 静弾性係数  | $35.2 \text{ kN/mm}^2$ | $30.9 \text{ kN/mm}^2$ |

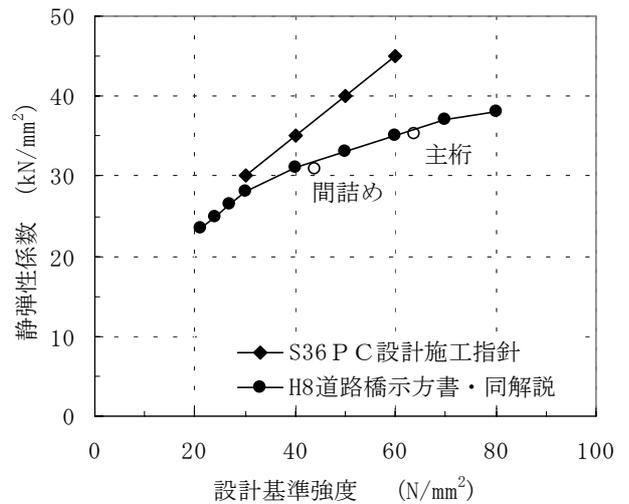


図-3 設計基準強度と静弾性係数との関係

#### b) 配合推定

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  $15\text{mm}$  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いう結果が得られた。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  $30\text{mm}$  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

| 試料      | 単位容積質量<br>( $\text{kg/m}^3$ ) | 水セメント比<br>(%) | 単位量 ( $\text{kg/m}^3$ ) |     |      |
|---------|-------------------------------|---------------|-------------------------|-----|------|
|         |                               |               | セメント                    | 水   | 骨材   |
| 主桁 C-3  | 2430                          | 35            | 506                     | 175 | 1738 |
| 主桁 R-3  |                               | 32            | 590                     | 186 | 1654 |
| 間詰め C-3 | 2360                          | 57            | 300                     | 172 | 1934 |
| 間詰め R-3 |                               | 55            | 302                     | 166 | 1947 |

### c) 中性化深さおよび塩分浸透状況

合成桁断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧した結果、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。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、P C鋼材の存在する箇所では塩分はほとんど含まれていなかった。以上の結果から、50年の供用期間を経た長生橋のコンクリートは、極めて健全な状態が保たれていたといえる。

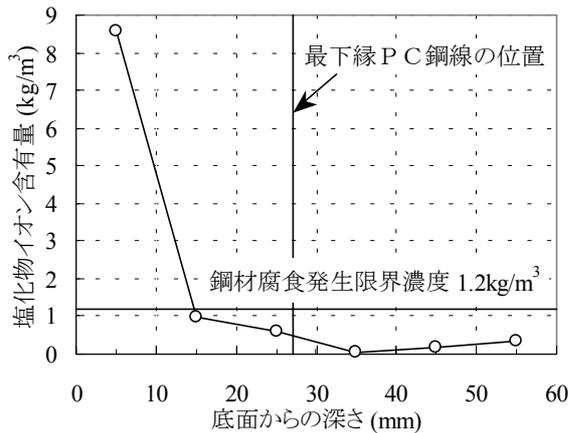


図-4 主桁の塩分浸透状況

### (2) P C鋼材の性状

P C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

主桁のP C鋼線の引張試験、リラクセーション試験の結果(5本の平均値)および現行のJIS規格(単線SWPR1A)を表-4に示す。また、図-5に長生橋のP C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P C鋼線は、現在の一般的なP C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P C鋼線は、ブルーイング処理が施されていないものであると考えられる。また、破断伸び率も2.8%と低い値となった。10時間後のP C鋼線のリラクセーション値は0.98%であった。現在の規格では1000時間後のリラクセーション値を規定しているが、以前は10時間後のリラクセーションとして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セーションが進行しているためと考えられる<sup>3)</sup>。

#### b) 化学組成

表-5にP C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、P C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く、前述したブルーイング処理の施されていないことにあると考えられる。

表-4 P C鋼線の機械的性質と現行の規格値

| 項目        | 試験結果                     | 現行規格値                       |
|-----------|--------------------------|-----------------------------|
| 直径        | 2.91mm                   | 2.90±0.03mm                 |
| 破断荷重      | 14.71kN                  | 12.7kN以上                    |
| 降伏荷重      | 13.52kN                  | 11.3kN以上                    |
| ヤング係数     | 193.14kN/mm <sup>2</sup> | (一般に200kN/mm <sup>2</sup> ) |
| 伸び        | 2.80%                    | 3.5%以上                      |
| 屈曲        | 8回                       | 6回以上(フジネ規格)                 |
| 絞り        | 46.50%                   | 30%以上(フジネ規格)                |
| リラクセーション値 | 1.0%                     | 3.0%以下*                     |

\*ここでは、10時間後のリラクセーション値を規定した1988年JIS G-3536の規格を示す。

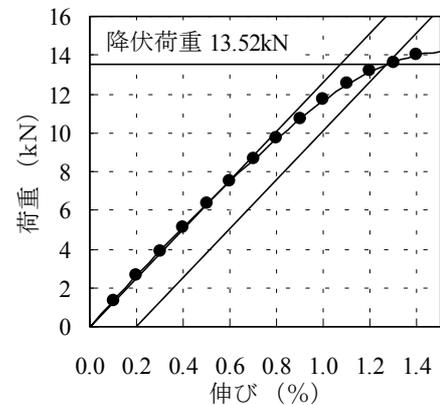


図-5 P C鋼線の荷重-伸び曲線

表-5 P C鋼線の化学組成(%)と現行の規格値

| 元素 | 測定値   | 規格値       |
|----|-------|-----------|
| 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     |

## 4. P C桁の載荷試験

### 4.1 載荷試験の概要

長生橋のP C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、せん断試験ではせん断スパン比(a/d)をパラメータとし、破壊形態についても検討することとした。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。表-6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、材料試験

で得られたコンクリートおよびP C 鋼線の諸数値を用い、載荷試験と同様の載荷条件で2次元の非線形FEM解析(解析ソフト:ATENA)を実施し、実験値との比較を行った。

表-6 載荷試験項目

| 項目         |         | 桁本数 | 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 | a/d=3.0 | 2   | S-1,S-2 |
| せん断載荷試験その2 | a/d=1.8 | 1   | S-3     |

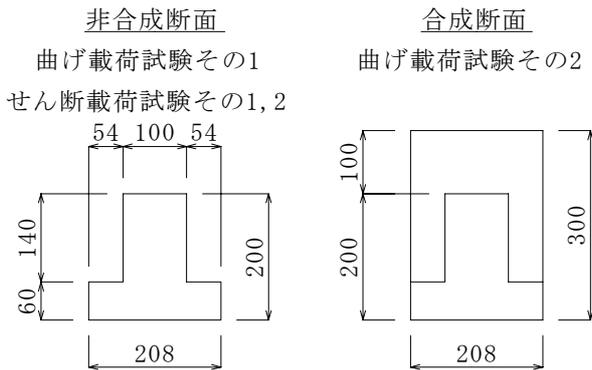


図-6 P C 桁の断面形状

(1) 曲げ載荷試験

曲げ載荷試験の概要を図-7に示す。載荷試験はその1, その2ともに、支間3.500m, 載荷点間距離0.500mで実施した。非合成桁の試験では、P C 鋼線の有効緊張力を確認するため、曲げひび割れ発生後一旦除荷し、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P C 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、パイ型ひずみゲージを用いて計測した。

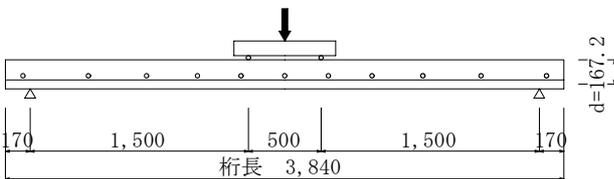


図-7 曲げ載荷試験の概要

(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では斜引張破壊となるように支間2.800m, 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2.400m, せん断スパン比1.8で実施した。

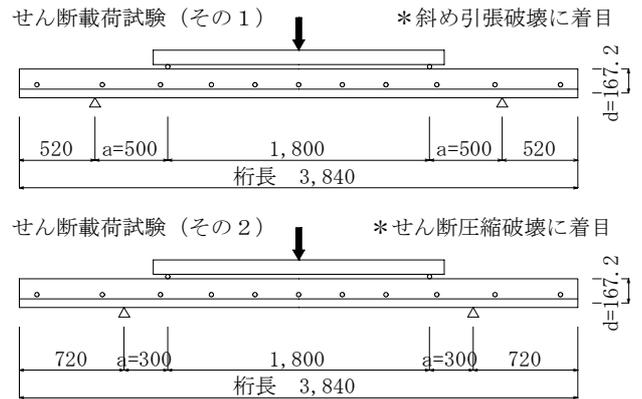


図-8 せん断載荷試験の概要

4.2 載荷試験の結果

(1) 曲げ載荷試験(その1)

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、P C 鋼線の有効引張応力度を推定した。その結果を表-7に示す。ひび割れ再開荷重は約11kNであり、そのときの底縁応力度を0N/mm<sup>2</sup>として、残存緊張応力度を948N/mm<sup>2</sup>と推定した。これは当時の設計資料に記されている1041N/mm<sup>2</sup>を下回るものであった。

図-9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桁, B-2桁ともに破壊荷重の値からP C 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2400×10<sup>-6</sup>, B-2桁で3200×10<sup>-6</sup>に達した。図-10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-11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、各荷重段階でほぼ直線となり、中立軸の位置、縁ひずみの値は計算値(P=20kN)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。

表-7 有効引張応力度の推定値

|        | 有効引張応力度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 有効係数  |
|--------|---------------------------------|-------|
| 設計資料の値 | 1041                            | 0.867 |
| 測定値    | 948                             | 0.789 |

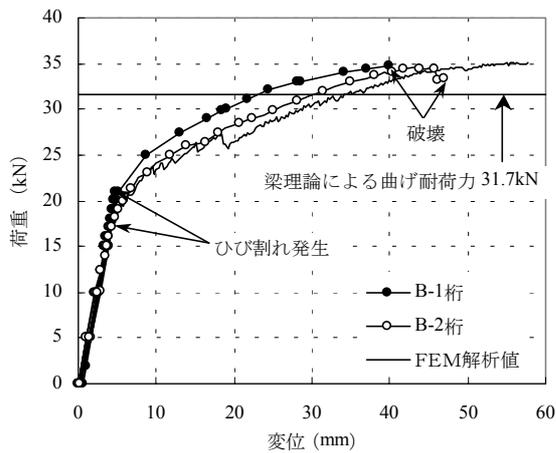


図-9 曲げ載荷試験(その1)の荷重-変位曲線

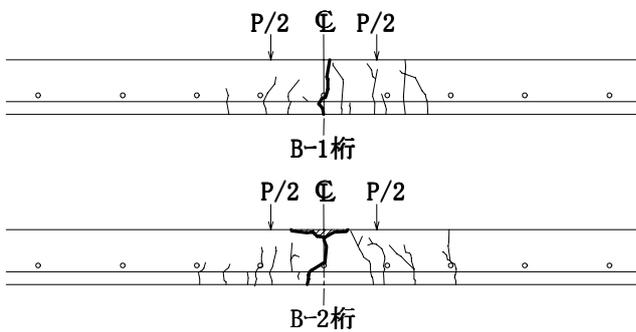


図-10 破壊時のひび割れ発生状況

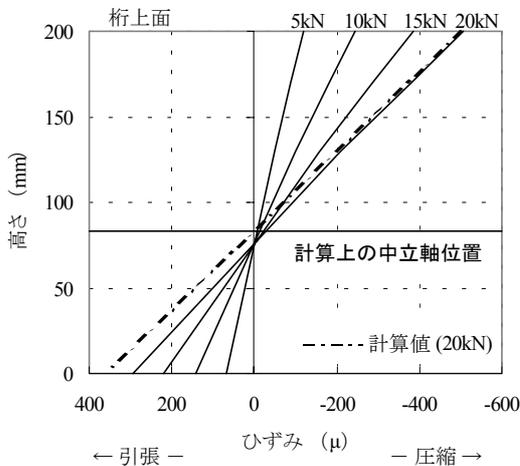


図-11 支間中央断面におけるひずみ分布

## (2) 曲げ載荷試験(その2)

図-12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、P C鋼線の破断による曲げ引張破壊となった。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桁では破壊時に下縁のP C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桁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。図-13に桁の破壊状況を示す。

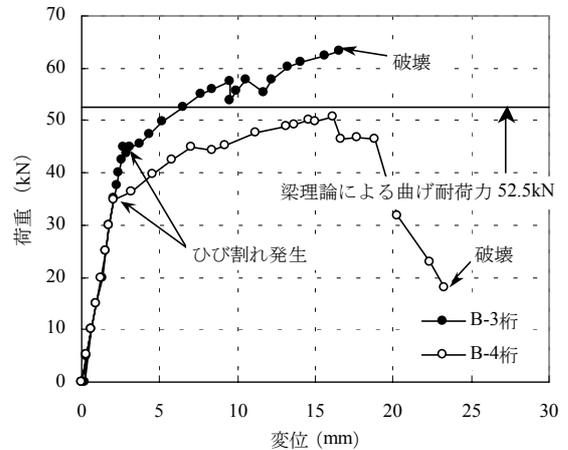


図-12 曲げ載荷試験(その2)の荷重-変位曲線

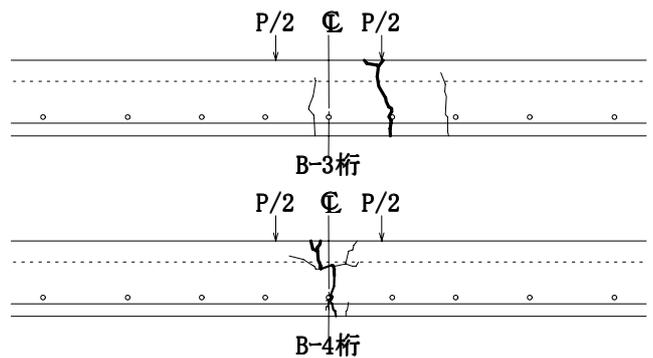


図-13 破壊時のひび割れ発生状況

## (3) せん断載荷試験(その1)

図-14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引張破壊ではなく、等曲げ区間に発生した特定の曲げひび割れに開口が集中することにより、P C鋼材の破断に至る曲げ引張破壊であり、せん断スパン内に斜めひび割れは確認されなかった。桁の破壊状況を図-15に示す。なお、非線形FEM解析では、実験値との整合した結果は得られなかった。

## (4) せん断載荷試験(その2)

図-16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、P C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は圧縮破壊を起こすものである。せん断スパン内での斜めひび割れの発生は確認されたが、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、最終的

には他の試験と同様に荷重スパン内の特定の曲げひび割れ幅の卓越により、P C鋼材の破断に至った。桁の破壊状況を図-17に示す。非線形FEM解析ではせん断荷重試験（その1）と同様に実験値との整合した結果は得られなかった。

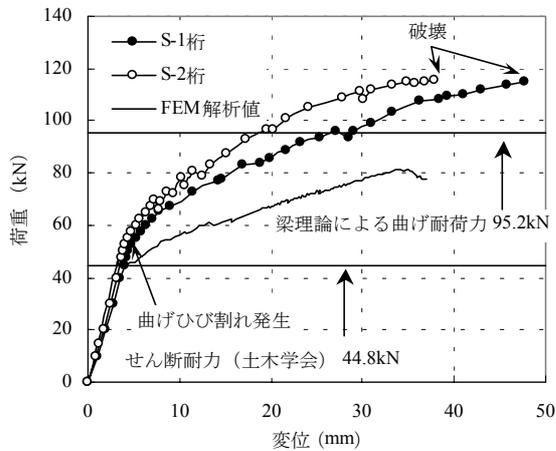


図-14 せん断荷重試験（その1）の荷重-変位曲線

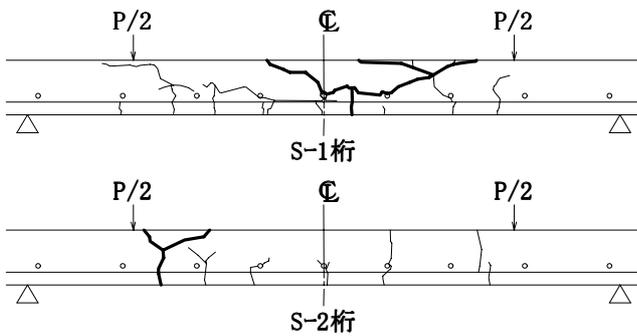


図-15 破壊時のひび割れ発生状況

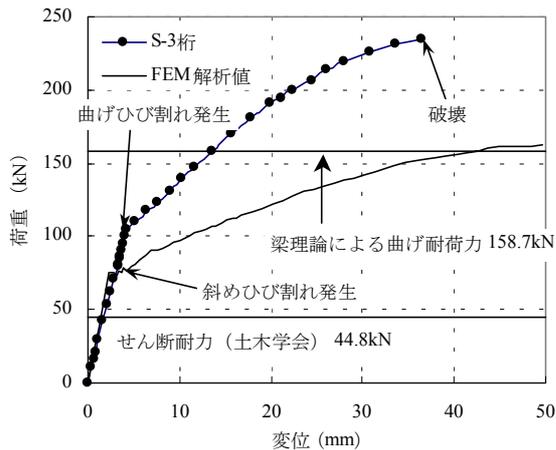


図-16 せん断荷重試験（その2）の荷重-変位曲線

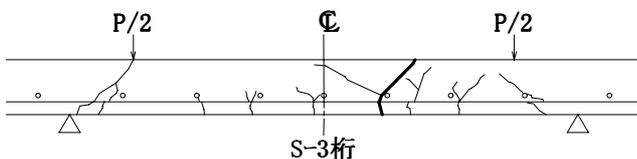


図-17 破壊時のひび割れ発生状況

## 5. まとめ

日本で最初のP C橋である長生橋の解体調査により、50年間供用された現在でもなお長生橋が十分な健全性が保たれていることが明らかとなった。

材料試験および荷重試験結果をまとめると以下のとおりである。

- ①長生橋には、主桁部に水セメント比33%の高強度コンクリートが、間詰め部には水セメント比55%と異なるコンクリートが使用されていた。骨材には良質な川砂および玉砂利が使用され、入念な締硬めにより密実なコンクリートが製造されていた。
- ②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、P C鋼線には腐食がほとんど発生しておらず、長生橋の桁は健全性が保たれていた。
- ③桁の曲げ耐力は梁理論による計算値を上回り、十分な耐力を有していた。
- ④桁のせん断荷重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していた。

本調査では、荷重試験の非線形FEM解析を2次元モデルを用いて実施したが、今後の課題として、特にせん断耐力に関しては断面形状の影響も考えられることから、今後3次元モデルを用いた非線形FEM解析を行う予定である。

## 謝辞

本調査の実施にあたり、石川県七尾土木工務所から撤去桁の提供をいただきました。また、P C鋼材の試験に関しては、住友電工(株)特殊線事業部P C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 謙：P C工事初期の思い出，土木施工増刊号，pp231～235，1964.11
- 2) 土木学会：プレレストコンクリート設計施工指針，昭和36年度改訂，1961
- 3) 高速道路調査会：P C鋼材の使用性に関する調査研究報告書，1986.3