

# 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—

佐藤 健一\*1・森 拓也\*2・松本 一昭\*3・鳥居 和之\*4

### 1. はじめに

わが国で最初のPC橋は、プレテンション方式スラブ橋の長生橋であり、昭和26年に石川県七尾市を流れる御祓川に架設された。その翌年、昭和27年に本調査の対象である泰平橋が長生橋の約50 m上流に建設された。泰平橋は、日本で最初のプレテンション方式T桁橋であり、現在のJIS規格プレテンションT桁の始祖となった歴史的な橋梁である。本道路橋は48年間にわたり供用されてきたが、河川改修工事に伴い撤去・架替えがなされることとなり、平成12年7月に撤去工事が完了した。

建設当時の泰平橋の外観を写真-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馬車で運搬し、河川の兩岸に設置した丸太製やぐらと滑車を用いて、人力で架設が行われていた。

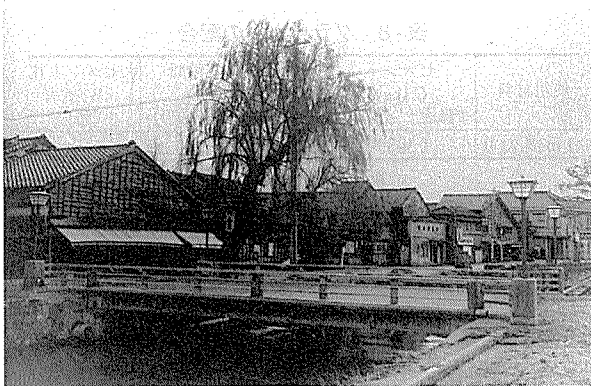


写真-1 建設当時の泰平橋

泰平橋は、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言える。

本調査は、撤去後の泰平橋の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、材料および力学的性状の両側面から評価することを目的とする。

### 2. 泰平橋について

泰平橋は、17主桁から構成される橋長10.550 m、桁長

10.500 mの単純桁橋である。同じ河川に架設された長生橋が3径間であるのに対し、泰平橋は、1径間で御祓川を渡っており、支間長は、長生橋から約3倍に飛躍したことになる。泰平橋の建設当時の設計図書等は、現在ほとんど残っておらず、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。

実橋調査および鋼材のはつり出しから得た泰平橋の一般図および配筋図を図-1および図-2に示す。主桁の支点部

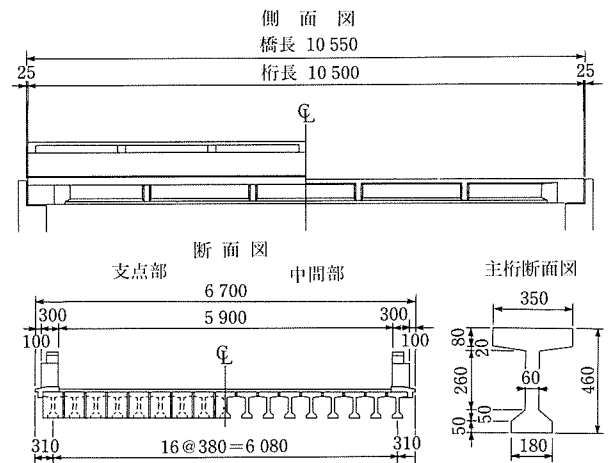


図-1 一般図

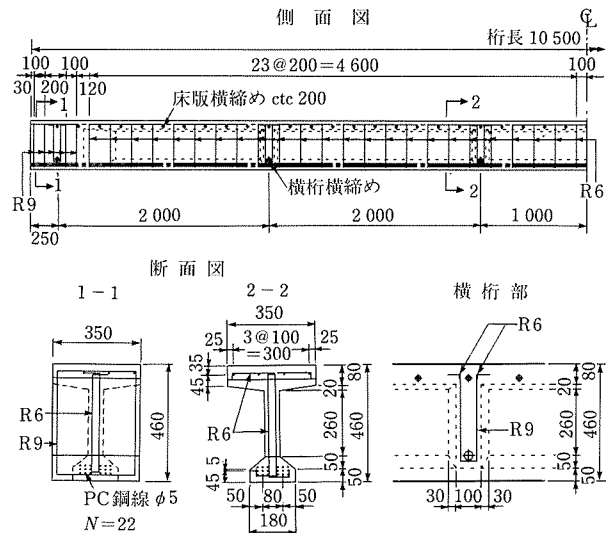


図-2 主桁配筋図

\*1 Ken-ichi SATO：(株)ピー・エス 開発技術第一部  
 \*2 Takuya MORI：(株)ピー・エス 土木技術部 主任研究員  
 \*3 Kazuaki MATSUMOTO：(株)ピー・エス 北陸支店 工務部 次長  
 \*4 Kazuyuki TORII：金沢大学 工学部 土木建設工学科 教授

は、拡幅されて矩形断面に変化し、中間横桁は、主桁と一体で製作されていた。泰平橋に使用されていた鋼材を表-1に示す<sup>1)</sup>。床版横締めは、主桁と同様のPC鋼線が2本1組で使用されており、アンカースリーブとくさびを用いて定着されていたが、支圧板は介さずに上フランジのコンクリート表面に直接アンカースリーブが設置されていた。一方、横桁横締めボルトは、支圧板を介してナット締めされていた。

表-1 使用鋼材一覧

使用箇所	鋼材の種類
主桁PC鋼材	φ 5 mm
床版横締め	φ 5 mm×2本
横桁横締め	ボルト φ 22 mm
支点部スターラップ	φ 6 mm
中間部スターラップ	φ 9 mm + φ 6 mm

### 3. 各種材料の試験

桁からコンクリート、PC鋼線、鉄筋の試料を採取し、それぞれについて材料の性状に関する試験を実施し、力学的および化学的性質を調べるとともに、健全性の評価を行った。

#### 3.1 材料試験の概要

##### (1) コンクリートの材料試験

###### ① 強度試験

桁から採取したコア (φ 50×100 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、コンクリートの力学的性質を調べた。

###### ② 配合推定

桁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>2)</sup>によるコンクリートの配合推定を行った。

###### ③ 中性化深さの測定

桁を乾式ダイヤモンドカッターで切断し、切断面に1%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。

###### ④ 塩分量の測定

桁のウェブ部から水平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による全塩分量の測定を実施し、ウェブの厚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重量を用いるものとした。

##### (2) PC鋼材の材料試験

###### ① 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を実施し、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、リラクセーション試験も併せて実施した。リラクセーション試験では、0.2%永久伸びに対する荷重の80%に相当する荷重を初荷重とし、つかみ間隔を一定に保ったまま10時間後の荷重減少率を測定した

###### ② 成分分析

引張試験と同一の試料を用いて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) 鉄筋の材料試験

###### ① 引張試験

中間部スターラップに使用されていた鉄筋 (φ 6 mm丸鋼) を用いて引張試験を実施して機械的性質の測定を行い、現行の規格との比較を行った。

###### ② 成分分析

引張試験と同一の試料を用いて鉄筋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

##### ① 力学的性質

表-2にコンクリートの力学的性質を示す。泰平橋建設当時のPC部材のコンクリートは、設計基準強度50 N/mm<sup>2</sup>とされており、ゼロランプの超硬練りプレーンコンクリートを入念に締め固めて施工を行っていたようである。当時のコンクリートには、良質の玉砂利が使用されており、現在の「道路橋示方書」と比べると、圧縮強度に対する静弾性係数の値が非常に大きくなっているが、図-3に示すように、過去の設計計算に用いられていた値<sup>3)</sup>と比較するとほぼ妥当なものであった。

表-2 コンクリートの力学的性質

圧縮強度	64.3 N/mm <sup>2</sup>
割裂引張強度	3.8 N/mm <sup>2</sup>
静弾性係数	46.0 kN/mm <sup>2</sup>

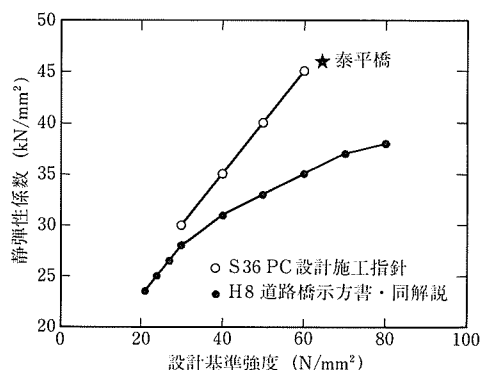


図-3 設計基準強度と静弾性係数との関係

##### ② 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水セメント比の値は、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。単位セメント量が大きく、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重量が非常に大きいことが特徴的である。

表-3 コンクリートの配合推定結果

単位容積重量 (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
2 460	33	438	144	1 878

③ 中性化深さ

フェノールフタレイン溶液噴霧後の桁断面（海側耳桁）を写真-2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年近く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。



写真-2 桁の中性化状況

④ 塩分浸透状況

海側耳桁のウェブ部における塩分分布を図-4に示す。海側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ものの、浸透深さは2 cm程度と小さなものであった。泰平橋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抑制され、表面部に多量の塩分が蓄積されたものと考えられる。なお、純かぶり12 mmの位置にあるスターラップには、発錆はまったく認められなかった。

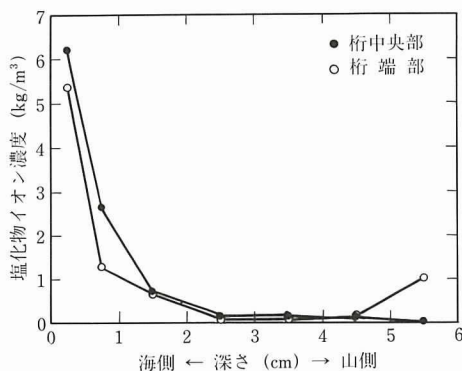


図-4 海側耳桁の塩分分布

(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、鋼線表面部に僅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。泰平橋の製作当時には、コンクリートとの付着力を高めるため、意図的にPC鋼線表面の錆付けがされており、コンクリートへの有害物質の侵入により発生したものではないと考えられる。

① 機械的性質

主桁のPC鋼線の引張試験、リラクゼーション試験の結果（6本の平均値）および現行のJIS規格（単線SWPR1AN）を表-4に示す。また、図-5に泰平橋のPC鋼線および現在の低リラクゼーション鋼材の荷重-伸び曲線の一例を示す。泰平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範囲が小さく、早期に降伏ひずみに到達している。この結果、降伏荷重、降伏荷重/引張荷重の比およびヤング係数が若干小さい値となった。また、10時間後のPC鋼線のリラクゼーション値は3.33%であった。現在の規格では1000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いた。泰平橋の鋼線は長期にわたって使用されたにもかかわらず、これを上回る結果となった。また、鋼材メーカーの資料によれば、現在、通常用いられている鋼線では10時間で1%程度のリラクゼーション値であることから、泰平橋のPC鋼線は、現在のものより大きなリラクゼーション値を有していると言える。

現在のPC鋼材の製作過程においては、弾性領域を大きくすることおよびリラクゼーション率を低減することを目的としてブルーイング処理が施されているが、今回の実験結

表-4 PC鋼線の機械的性質および現行の規格

項目	試験結果	現行の規格
直径	5.02 mm	5.00±0.05 mm
破断荷重 (応力)	33.17 kN (1 677 N/mm <sup>2</sup> )	31.9 kN以上
降伏荷重 (応力)	26.42 kN (1 336 N/mm <sup>2</sup> )	27.9 kN以上
降伏荷重/引張荷重	0.796	(一般に0.9前後)
ヤング係数	194.67 kN/mm <sup>2</sup>	(一般に200 kN/mm <sup>2</sup> )
伸び	4.17%	4.0%以上
屈曲	6回	6回以上 (フレシネー規格)
絞り	46.76%	30%以上 (フレシネー規格)
リラクゼーション値	3.33% (10時間後)	3.0%以下*

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

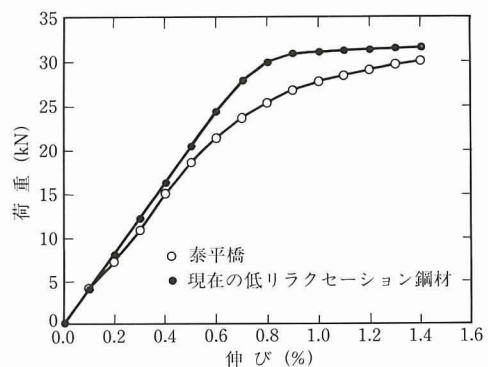


図-5 PC鋼線の荷重-伸び曲線

果から、泰平橋の製作当時にはブルーイング処理がなされていなかった可能性が高い。

② 化学組成

表-5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SWRS 82 A）を示す。化学成分は、いずれも現行の規格を満足しており、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、前述したように、PC鋼線の機械的性質が現在のものと若干異なる原因は、化学組成によるものではないことが分かる。

表-5 PC鋼線の化学組成および現行の規格

元素	試験結果 (%)	現行の規格 (%)
C	0.84	0.80~0.85
Si	0.17	0.12~0.32
Mn	0.44	0.3~0.6
P	0.010	0.025以下
S	0.010	0.025以下
Cu	0.14	0.2以下

(3) 鉄筋の性状

① 機械的性質

スターラップに使用されていた鉄筋（φ6 mm丸鋼）の引張試験の結果および現行のJIS規格（SR 235）を表-6に示す。試験結果は、試料のばらつきが大きく、当時の鉄筋は、材質的な均一性が十分には確保されていなかったものと推察される。引張試験の結果から推定すると、使用されていた鉄筋は、現行のSR 235相当品であったものと考えられる。

② 化学組成

表-7に鉄筋の成分分析結果および現行のJIS規格（SR235）

表-6 鉄筋の機械的性質および現行の規格

項目	試験結果			現行の規格 (SR 235)
	No.1	No.2	No.3	
直径 (mm)	6.70	6.76	6.53	6.0±0.4 mm
降伏点応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	315*	306*	245*	235以上
引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	598	628	389	380~520
ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	196.9	170.0	122.5	200 (一般)
伸び (%)	26.3	23.0	34.0	20以上

\*0.2%永久伸びに対する応力度

表-7 鉄筋の化学組成および現行の規格

元素	試験結果 (%)			現行の規格 (SR 235) (%)
	No.1	No.2	No.3	
C	1.00	0.88	0.08	—
Si	0.24	0.34	0.31	—
Mn	0.45	0.26	0.53	—
P	0.021	0.017	0.024	0.05以下
S	0.021	0.015	0.029	0.05以下
Cu	0.09	0.12	0.44	—
Ni	0.04	0.05	0.08	—
Cr	1.31	1.11	0.10	—
Mo	0.00	0.00	0.01	—
Al	0.005	0.018	0.009	—
Sn	0.007	0.013	0.047	—
V	0.004	0.004	0.000	—
N	0.0144	0.0110	0.0093	—
C+Mn/6	1.075	0.923	0.168	—

を示す。鋼材の強度およびじん性に悪影響を及ぼす元素であるリンやイオウについては、すべての試料において規格値を満足していたが、その他の規格がない元素については、比較的ばらつきが大きなものとなっている。とくに、強度特性に最も寄与する炭素量のばらつきが顕著であり、炭素の含有率が極めて低いNo.3では、前述した引張強度および降伏強度がほかの試料と比較してかなり低いものとなった。また、降伏点応力度と等価炭素量 (C+Mn/6) とはほぼ比例関係にある。

4. 桁の載荷試験

4.1 載荷試験の概要

泰平橋の桁に使用されていた各材料の性質および健全性が確認された。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。また、載荷試験に先立ち、載荷試験と同様の載荷条件で非線形FEM解析を実施し、実験値との比較を行うものとした。解析において、コンクリートや鋼材の力学的特性は、材料試験で得られた諸数値を用いている。

(1) 曲げ載荷試験

曲げ載荷試験の概要を図-6に示す。曲げ載荷試験は、支間10.000 m、載荷点間距離1.500 mで実施した。PC鋼線の有効引張力が不明であったため、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引張力を推定した。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鋼線の有効引張力を求めた。ひび割れ再開荷重確認後は載荷ピッチを10 kNとし、計算上の曲げ耐力の荷重の8割程度以降は10 mmピッチの変位制御とした。

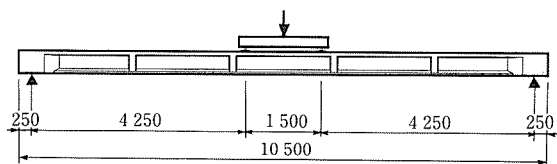


図-6 曲げ載荷試験の概要図

(2) せん断載荷試験

せん断載荷試験の概要を図-7に示す。せん断載荷試験は支間6.000 m、せん断スパン比2.3で実施した。この載荷条件では、計算上の曲げ破壊相当荷重が443 kNであるのに対し、せん断破壊相当荷重は162 kNであり、確実にせん断破壊するような載荷位置を選定した。載荷ピッチは10 kNとし、破壊に至るまで荷重を単調増加させた。

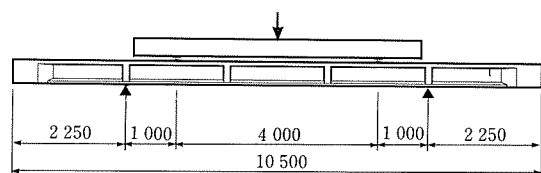


図-7 せん断載荷試験の概要図

4.2 載荷試験の結果

(1) 桁の曲げ挙動

曲げ載荷試験時にPC鋼線の有効引張力を推定し、有効プレストレスを計算したところ、表-8に示す結果が得られた。なお、有効引張力の計算の際には、各PC鋼線の有効引張力は、均一であるものと仮定した。計算されたPC鋼線の有効引張力の推定値は、降伏点の49%程度であり、現在の設計値と比較して小さな値となった。導入引張力が明確でないため、プレストレス力の減少量を正確に評価することはできないが、ブルーイング処理されていない鋼線を使用したことによって、現在一般的に用いられている鋼線より、リラクセーション値が大きく、経時的なプレストレス力の減少量が大きくなっているものと予想される。

図-8に曲げ載荷試験の実験値および弾塑性FEM解析値の荷重-変位曲線を示す。荷重-変位曲線は、解析値と近い挙動を示し、曲げ耐力は、梁理論による計算上の曲げ耐力(94.6kN)を上回る結果となった。PC鋼線の破断により最終的な破壊に至ったが、この時点での上縁のコンクリートの測定ひずみは、 $2,600 \times 10^{-6}$ に到達していた。写真-3に曲げ載荷試験における桁の破壊状況を示す。

図-9に桁鉛直方向のひずみ分布を示す。ひび割れ発生前においては、ひずみの分布は直線状になり、中立軸の位置、上縁および下縁におけるひずみの値は計算値とおおむね一致した。

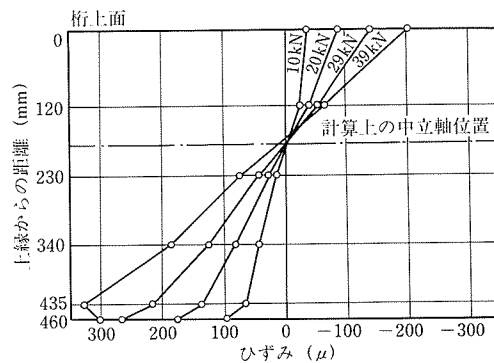


図-9 桁鉛直方向のひずみ分布

置、上縁および下縁におけるひずみの値は計算値とおおむね一致した。

桁の材料的な劣化がなく、力学的にも健全性が保たれていたため、50年近く供用されてきた現在においても、泰平橋の桁は、作用曲げモーメントに対して、平面保持が成立することが確認された。

(2) 桁のせん断挙動

図-10にせん断載荷試験における荷重-変位(支間中央)曲線を示す。最終的なせん断耐力は、土木学会式<sup>4)</sup>による計算値の2.4倍に達した。PC桁のせん断耐力に対しては、一般に土木学会式はかなり安全側になっていると言われるが、本実験においても同様の結果となった。これはプレストレスによるコンクリートが負担するせん断力の向上

表-8 有効プレストレスの推定値

PC鋼線の有効引張応力度	660 N/mm <sup>2</sup> (0.49 $\sigma_{py}$ )	
有効プレストレス	上縁	-0.9 N/mm <sup>2</sup>
	下縁	12.9 N/mm <sup>2</sup>

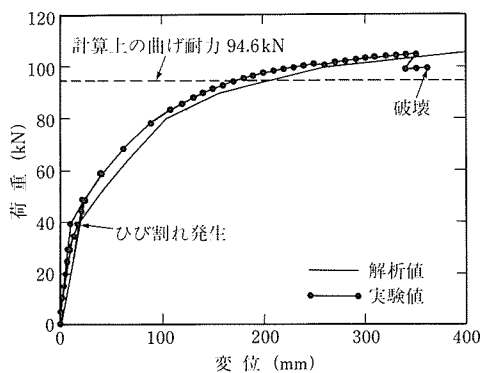


図-8 曲げ載荷試験の荷重-変位曲線

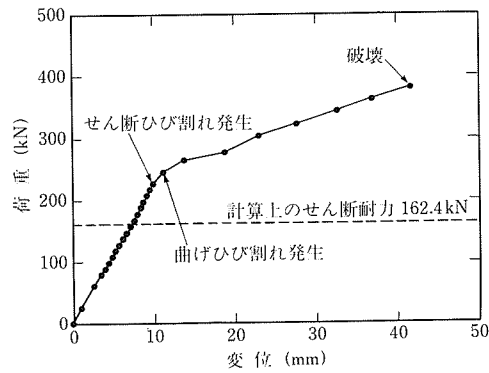


図-10 せん断載荷試験の荷重-変位曲線

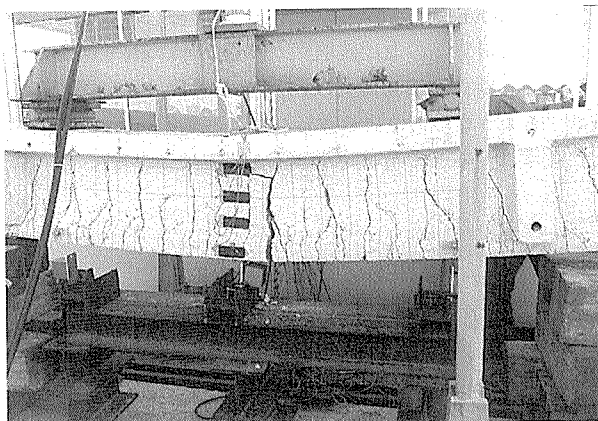


写真-3 曲げ載荷試験における桁の破壊状況



写真-4 せん断載荷試験における桁の破壊状況

や、せん断破壊面の角度が小さくなることなどが影響しているものと考えられる。桁の破壊の進行は、支点から荷重点へ向かう斜めひび割れが発生した後、等曲げモーメント区間に曲げひび割れが発生し、最終的な破壊は、斜めひび割れ位置での桁の破断となった。桁の破壊面では、スターラップも破断しており、コンクリートの付着強度が高いものであったことがうかがえる。写真-4にせん断載荷試験における破壊状況を示す。

## 5. ま と め

約50年間供用された日本で最初のプレテンションT桁橋である泰平橋の耐久性調査を実施したところ、桁に使用されていたコンクリートは、非常に密実であり、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いた。この結果、鋼材の腐食やその他の劣化は、まったく発生しておらず、桁の耐荷力も計算値を十分満足するものとなり、長期間を経た現在でもなお泰平橋は、健全性が保たれていることが明らかとなった。

近年、コンクリートの耐久性が深刻な社会問題となっている。本調査の結果から、材料の選択と施工を適切に行う

ことにより高耐久性を有するコンクリート構造物を建設できることが改めて示されたものと言える。構造物の劣化の有無にかかわらず、過去に建設された歴史ある構造物から技術者が学ぶべきことは多々あるであろう。

## 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、鉄筋の試験に関しては、(株)神戸製鋼所線材条鋼商品技術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) 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
- 3) 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
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編，平成8年制定

【2000年12月21日受付】