

# 独立行政法人土木研究所への出向を終えて

竹内 祐樹\*

独立行政法人土木研究所が有している制度の中に交流研究員制度がある。交流研究員は土木技術に関する指導を受け、得られた研究成果の普及ならびに土木技術水準の向上を図ることが望まれている。本制度を利用して、社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会を代表して、平成19年4月から21年3月までの2年間、独立行政法人土木研究所に出向した。本稿では交流研究員制度と交流研究員期間に携わった研究課題について紹介する。また、それらの研究課題の中から既設PC構造物の維持管理手法に着目して、PC橋のグラウト充てんの確認方法に関する研究、既設コンクリート道路橋の健全性評価に関する研究で得られた成果の一部を報告する。

キーワード：交流研究員、既設PC構造物、グラウト充てん度、塩害、腐食鋼材、耐荷性能

## 1. はじめに

独立行政法人土木研究所（以下、土木研究所）が有している制度の中に交流研究員制度がある。筆者は、本制度を利用して、社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会（以下、PC建協）を代表して、平成19年4月から21年3月までの2年間、土木研究所に出向した。

交流研究員制度とは、国内の道路管理者、大学、民間企業（ゼネコン、セメントメーカー、コンサルタント、PCメーカー）など土木分野に幅広く所属する技術者を受け入れる制度であり、PC建協からも過去に7名の交流研究員を輩出した。受入期間は最短6箇月から最長2年であり、筆者が出向していた2年間では全体で40名ほどの交流研究員が在籍していた。交流研究員は土木研究所での研究活動を通じて土木技術に関する指導を受け、得られた研究成果の普及ならびに土木技術水準の向上を図ることが望まれている。また、他の研究機関などとの連携により土木技術に関する調査、試験、研究および開発を実施し、双方の業務の質の向上に資することを目的としている。

本稿では、筆者が土木研究所への出向期間中に実施した研究課題の一部について報告する。

## 2. 土木研究所および研究課題の概要

### 2.1 土木研究所の紹介

土木研究所は、大正10年に内務省土木局に道路材料試験所が発足したことに始まり、国の研究機関、そして独立行政法人として80年の歴史を有する。その間、今日に至るまで、構造物の建設に関わる技術基準の策定、技術開発、災害対策の司令塔として欠かせない存在となった。

わが国の土木構造物は、昭和30～40年代（1955～74年）の高度成長期に大量に建設されてきた。そのため、建設後50年を経過した構造物が今後飛躍的に増加することが確実である。すでに、道路橋では、鋼部材の疲労、コンク

リート部材の塩害、ASRといった耐荷性能に重大な影響を与える劣化事例も増加している。このように、日本の土木構造物は、厳しい交通需要や自然環境にさらされてきただけでなく、老朽化が始まっており、構造物の健全性を評価し、維持管理する技術の確立を急ぐ必要がある。

このような背景をふまえ、土木研究所は平成20年4月に研究組織を改組および発展させ、新設橋梁の設計施工、維持管理技術の高度化、長寿命化、これらに伴うトータルコストの縮減、災害時復旧の更なる迅速化をはじめとする橋梁を中心とした構造物の安全管理のための構造技術に関わる総合研究機関を確立することを目的とし、構造物メンテナンス研究センターを設立した。構造物メンテナンス研究センターでは、おもに、橋梁のメンテナンスに関すること、土木構造物の地震被害の防止および軽減に関すること、橋梁の上下部構造およびその他コンクリート構造に関する技術開発・研究が行われていた。なお、組織改訂前は土木研究所旧構造物マネジメント技術チーム（現、基礎材料チーム）に、組織改定後は土木研究所構造物メンテナンスセンターにそれぞれ1年所属した。

### 2.2 土木研究所の研究課題

筆者が交流研究員として出向していた期間に土木研究所で検討されていた研究課題のうち、PC構造物ととくに関連するものを表-1に示す。維持管理技術、補修技術、調査および診断技術に関する研究が盛んに検討されていることが確認できる。一方、道路橋示方書の改訂を想定し、コンクリート橋の部分係数設計法に関する検討も行われていた。

### 2.3 出向中に携わった研究課題

表-1に示す研究課題のうち、平成19年度は、①塩害を受けるコンクリート構造物の脱塩による補修方法に関する研究、②コンクリート橋の部分係数設計法に関する研究、③PC橋のグラウト充てんの確認方法に関する研究、に携わった。平成20年度は、①②③に加えて、④既設コンクリート道路橋の健全性評価に関する研究に携わった。

\* Yuuki TAKEUCHI：(株)安部日鋼工業 東京支店 技術工務部 技術課 課長補佐

表 - 1 PC 構造物に関連する研究課題の一例

研究期間	研究課題名
H17 ~ 19 ①	塩害を受けるコンクリート構造物の脱塩による補修方法に関する研究
H18 ~ 20 ②	コンクリート橋の部分係数設計法に関する研究
H19 ~ 21 ③	PC 橋のグラウト充てんの確認方法に関する研究
H19 ~ 21	アルカリ骨材反応により損傷が生じた構造物の補修方法に関する研究
H19 ~ 21	コンクリート床版の補強設計法に関する研究
H20 ~ 23	道路橋における目視困難な重要構造部位を対象とした点検技術に関する研究
H20 ~ 22	非破壊・微破壊試験によるコンクリートの耐久性評価に関する研究
H20 ~ 24 ④	既設コンクリート道路橋の健全性評価に関する研究

同時に、PRC 橋の性能照査に関する共同研究委員会（国土技術政策総合研究所，土木研究所，PC 建協）および改造技術に関する共同研究委員会（土木研究所，PC 建協）にも参加した。前者については，土木研究所内で行った PRC 部材の曲げびひ割れ性状に関する研究成果を提示し，意見交換を行った。後者については，今後発刊予定である「塩害による損傷を受けた PC 構造物を断面修復によって補修する場合の手引き」（断面修復マニュアル）の作成に参加し，現在も継続中である。

2.4 本稿の研究紹介

「2.1 土木研究所の紹介」でも述べたように，昨今，老朽化したコンクリート道路橋の健全性の評価手法に注目が集まっており，PC 建協としても既設 PC 構造物を適切に維持管理していくことが重要であると強く認識している。そこで，本稿では，出向中に行った ① ~ ④ の課題の中から既設 PC 構造物の維持管理評価に着目して，③ PC 橋のグラウト充てんの確認方法に関する研究，④ 既設コンクリート道路橋の健全性評価に関する研究，で得られた成果の概要の一部を報告する。

3. 研究報告

3.1 PC 橋のグラウト充てんの確認方法に関する研究

3.1.1 研究目的

PC 橋のグラウトは，部材コンクリートと PC 鋼材の一体化を確保し，PC 鋼材を腐食から守るため，シース内に密実に充てんする必要がある。シース内にグラウトの未充てん部が残されている場合には，PC 鋼材の腐食，破断，突出につながるおそれがあるため，PC 橋の耐荷性能の低下だけでなく第三者被害を引き起こす可能性もある。とくに PC 鋼棒は PC 鋼より線に比べて破断時の突出の可能性が高いとされており，既設 PC 橋を安全に供用していくためには，グラウトの充てん度を適切に検査し，必要に応じてグラウトを再注入する方法を確立することが重要である。本稿では，以下の ①・② の項目について紹介する。

- ① グラウト充てん度を確認するための非破壊検査手法の適用精度
- ② 未充てん部へのグラウト再注入工法の適用性

3.1.2 PC グラウトの充てん度評価と再注入に関する基礎的研究<sup>1)</sup>

(1) 実験概要

本研究では，既設 PC 橋に使用されている PC 鋼棒を対象としてグラウトの充てん度を確認するための非破壊検査手法の精度とグラウトの未充てん部への再注入工法の適用性について検討した。非破壊検査手法としては，従来から検討が行われ，実施工での採用例のある衝撃弾性波法と X 線透過法に着目し，グラウト充てん度の異なる梁供試体を用いて適用精度を検証した。また，未充てん部へのグラウト再注入を行い，再注入工法の適用性についても併せて検証した。

衝撃弾性波法による検査方法の概要を図 - 1 に示す。測定は，PC 鋼棒を直径 15 mm の鋼玉で軸方向に直接打撃し，両端部の定着板に設置した 140 kHz 共振型の AE センサーを用いて弾性波の入出力波形を記録して行った。出力波は入力波と比較して伝播距離が長く，減衰して波形の振幅が小さくなると考えられたため，増幅器を用いて利得を 20 dB (10 倍) とした波形を取得した。増幅器と波形収録装置は約 20 m の BNC ケーブルを用いて接続した。入出力波形の記録は，波形収録装置により測定開始から 120 ms 経過時まで 0.01 ms に 1 点の間隔で計 12 001 点について行った。ここでは，入力波の振幅の立ち上がり時に閾値を設け，入力波の振幅が閾値を超える前の 6 ms (記録時間の 5%)，超えた後の 114 ms (記録時間の 95%) の波形を記録した。

本実験では鋼玉を手動で打撃して弾性波を入力したため，測定を 5 回ずつ行うことにより結果のばらつきの有無を確認した。また，測定者が異なることで測定誤差が生じる可能性があるため，本実験では 2 名の測定者 (技術者 A, B) による測定を行った。なお，X 線透過法による検査方法とグラウト再注入の方法については，従来から比較の実績が多い方法を用いた。

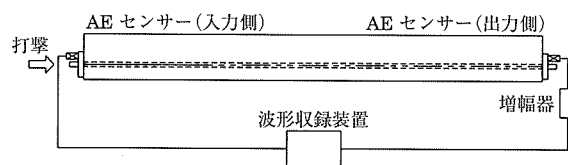


図 - 1 衝撃弾性波法による検査方法の概要

(2) 実験結果

グラウト充てん度が異なる場合の弾性波伝播速度を図 - 2 に示す。弾性波伝播速度は，伝播距離 (PC 鋼棒長 10 m) を伝播時間 (入力波の立ち上がりから出力波の立ち上がりまでの時間) で除して求めた。衝撃弾性波法による検査では，弾性波伝播速度を評価指標とすることでグラウト充てん度を推定できた。また，測定者の違いが結果に与えた影響はほとんどなかった。なお，図には示していないが，プレストレス導入量とシース内の空隙への水の浸入が弾性波伝播速度に及ぼす影響は小さく，これらの要因が誤判定を招く可能性は低いと考えられた。ただし，弾性波の伝播特性は検査対象となる PC 鋼棒の長さにも影響を受けるため，

弾性波伝播速度に着目してグラウト充てん度を推定する際には、計測間隔に留意するとともに、複数の PC 鋼棒の測定結果を相対比較する必要があると考えられる。

グラウトの未充てん部への再注入が弾性波伝播速度に及ぼす影響を把握するため、再注入後の弾性波伝播速度を測定した結果を図 - 3 に示す。再注入後の弾性波伝播速度は、いずれの場合においても当初からグラウトを完全に充てんしていた PC 鋼棒と同程度となった。すなわち、未充てん

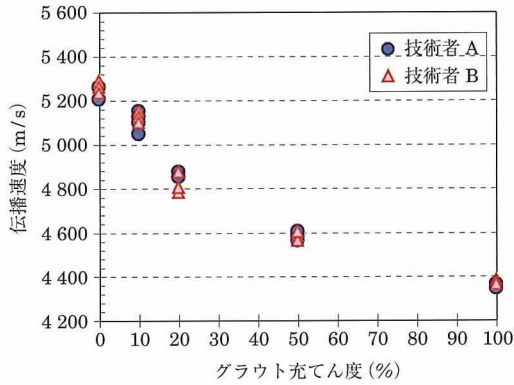


図 - 2 グラウト充てん度と弾性波伝播速度

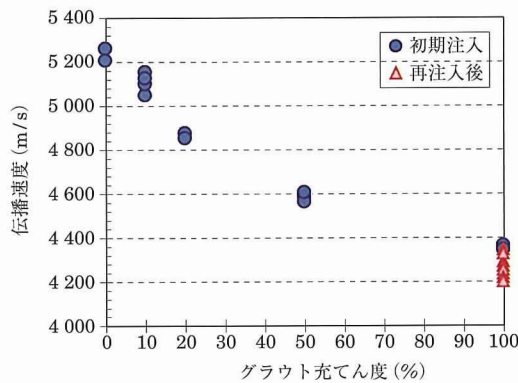


図 - 3 グラウト再注入後の弾性波伝播速度

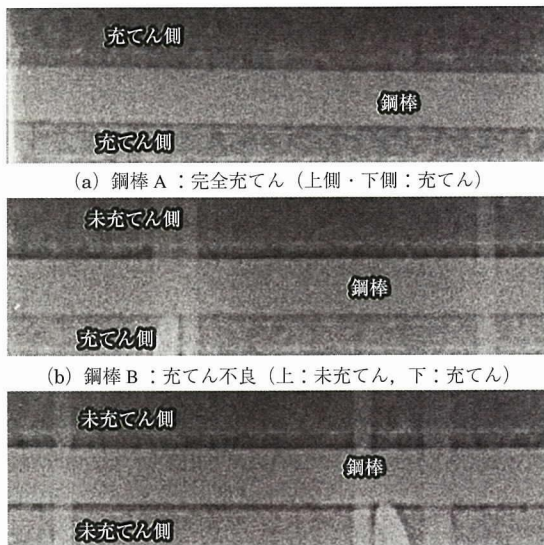


写真 - 1 X線透過法による撮影結果

部への再注入が適切に実施されたか否かを確認する際にも、弾性波伝播速度は有効な評価指標となり得ると考えられる。

X線透過法による撮影結果を写真 - 1 に示す。シース内では白い影になっている部分が充てん部であり、黒い影になっている部分が未充てん部である。図に示すように、X線透過法による検査では、グラウトの充てん部と未充てん部を視覚的に正確に把握できることを確認した。

再注入後のグラウト充てん状況を写真 - 2 に示す。再注入工法を適用した後の PC 鋼棒をシースごと解体した結果、本実験で製作した再注入グラウトの十分な再充てん性を有していたことを確認した。



写真 - 2 再注入後のグラウト充てん状況

### 3.2 既設コンクリート道路橋の健全性評価に関する研究

#### 3.2.1 研究目的

わが国の道路橋は今後急速に高齢化していくこととなるが、この中には塩害や ASR などの作用を受けてすでに劣化が顕在化したコンクリート道路橋も多くみられる。これらを効率的に維持管理していくためには供用可能性や補修・補強の要否について耐荷性能に基づいた合理的な判断を下す必要があるが、既設コンクリート道路橋の耐荷性能評価手法は確立されておらず早急な対応が必要とされている。とくに、塩害はコンクリート構造物の劣化事例の中でも、構造物の安全性や第三者被害等への影響が非常に大きいと考えられている (写真 - 3)。したがって、研究課題が設立された初年度は、塩害の影響を受けた場合の既設道路橋の耐荷性能の評価手法について検証した。本稿では、以下の



写真 - 3 塩害により劣化した PC 橋の事例



①・②の研究成果の概要の一部を報告する。

- ① 腐食 PC 鋼材の力学特性の把握
- ② 腐食 PC 梁部材のせん断耐荷特性の把握

### 3.2.2 腐食 PC 鋼材の力学特性<sup>2)</sup>

#### (1) 実験概要

塩害により鋼材腐食の生じた PC 橋の耐荷性能を適切に評価するためには、腐食した PC 鋼材の力学特性を正確に把握しておくことが重要である。これまでも塩害を受けて撤去された PC 橋から採取した PC 鋼材を用いた試験が行われてきたが<sup>3)</sup>、腐食による PC 鋼材の 3 次元的な断面欠損の分布や繰返し荷重が作用する場合の力学特性について検討した事例は必ずしも多くない。そこで、塩害を受けて撤去された PC 橋から採取した PC 鋼材の 3 次元的な断面形状の計測と引張試験および疲労試験を実施し、腐食した PC 鋼材の力学特性について検討した。

試験片には、日本海沿岸で 34 年間の供用後に撤去されたポストテンション方式 PC 単純 T 桁橋から採取した PC 鋼線 (SWPR1  $\phi$  5 mm) を用いた。いずれの試験片も、試験前に JCI-SC1 に準拠して質量減少率を測定し、各試験片において目視でもっとも断面欠損が進んでいると思われる位置の断面径を事前にノギスで測定した。

引張試験は、質量減少率 0 ~ 40 % の PC 鋼線 27 本を用いて行った。試験片は長さ 330 mm とし、JIS Z 2241 に準拠して荷重とアーム式の伸び測定器に取り付けたレーザー変位形により試験片中央 100 mm の区間の伸びを測定した (図 - 4 (a))。また、3D スキャナを用いて PC 鋼線の断面形状を 3 次元的に計測し、防錆後の断面形状の分布を把握した。

一方、疲労試験は、健全な PC 鋼線 10 本 (目視で腐食が確認されなかったもの) と腐食した PC 鋼線 14 本 (質量減少率 5 % 程度の腐食が生じていたもの) を用いて行った。試験片は長さ 400 mm とし、試験片のつかみ位置での破断を避けるため鋼製とナイロン製の定着具を用いた (図 - 4 (b))。荷重条件は、応力の下限値を PC 鋼線の引張強度の約 0.6 倍 (= 960 N/mm<sup>2</sup>)、応力振幅を 200 ~ 500 N/mm<sup>2</sup> (健全な PC 鋼線の公称断面積換算)、荷重速度を 10 kHz とした。試験片が破断するまで荷重することを基本としたが、一定

の荷回数で破断に至らなかった試験片については疲労限として荷重を停止した。

なお、ここで示す試験データは、腐食の有無にかかわらず、いずれも同一の撤去 PC 橋から採取した試験片を用いて行った試験から得られたものである。

#### (2) 実験結果

既往の実験結果<sup>3)</sup>と今回の引張試験を行った結果を図 - 5、6 に示す。引張強度は腐食による断面の欠損状態を 3D スキャナにより精密に計測することで適切に評価することができたが、PC 鋼材の伸び性能は腐食の程度が軽微なものであっても大幅に低下した。このことから、鋼材腐食の生じた PC 橋の耐荷性能を評価する際には、PC 鋼材の強度の低

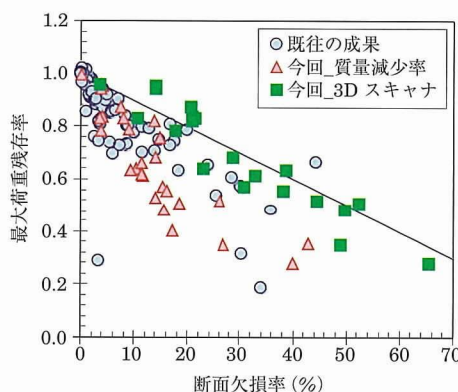


図 - 5 最大荷重残存率

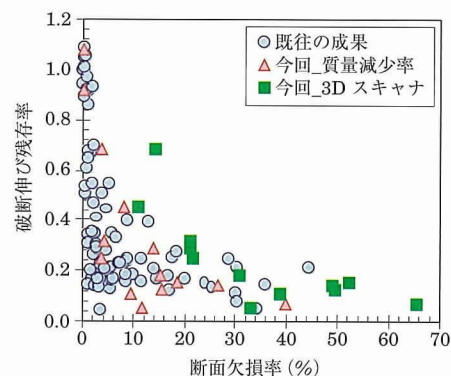
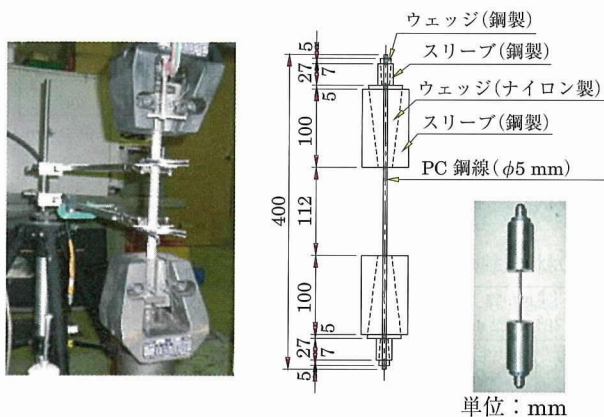


図 - 6 破断伸び残存率



(a) 引張試験伸び計測例

(b) 疲労試験定着具

図 - 4 腐食 PC 鋼材の試験方法の概略

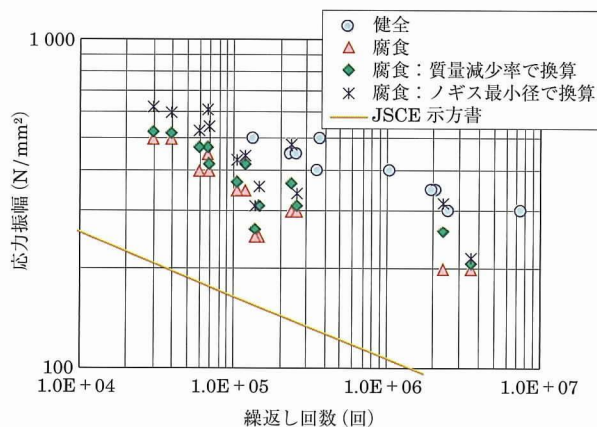


図 - 7 健全・腐食 PC 鋼線の S-N 線図

下だけでなく伸び性能の低下にも注意する必要があると考えられる。

疲労試験で得られた S-N 線図を図 - 7 に示す。腐食した鋼材の疲労強度は健全な PC 鋼材よりも低下したが、その低下の程度は実際の PC 橋で生じる応力振幅からすると軽微であった。なお、質量減少率約 5% の腐食であれば、土木学会式<sup>4)</sup>による健全 PC 鋼線の疲労強度の計算値は実験値よりも小さくなる傾向にあった。

現在の道路橋示方書では、PC 橋の設計時に PC 鋼材の疲労の照査を直接的に行っていない。これは、PC 橋では設計荷重作用時にひび割れの発生を許容しておらず、PC 鋼材に生じる応力振幅が小さいと考えられているためである。ひとつの試算によると<sup>5)</sup>、旧建設省の標準設計とほぼ同形状のポストテンション方式 PC 単純 T 桁橋（支間 30 m）で活荷重作用時に PC 鋼材に生じる最大引張応力の増加量は約 30 N/mm<sup>2</sup> である。図 - 7 の試験結果をふまえると、PC 鋼材に質量減少率換算で約 5% の腐食が生じているような場合においても、この程度の応力振幅の繰返し荷重では疲労による PC 鋼材の破断が深刻な問題となる可能性は低いと考えられる。

3.2.3 腐食 PC 梁部材のせん断耐荷特性<sup>6)</sup>

(1) 実験概要

鋼材腐食の生じた PC 梁部材の破壊抵抗曲げモーメントについては、撤去 PC 桁の荷重試験<sup>7)~9)</sup>により PC 鋼材の残存率を用いておおむね推定できることが明らかにされている。ところが、鋼材腐食の生じた PC 梁部材のせん断耐荷特性については、これまで検討が行われていなかった。そこで、電食により人工的に鋼材腐食を生じさせた PC 梁供試体を製作し、鋼材腐食の生じた PC 梁部材のせん断耐荷特性について検討した。

図 - 8 に PC 梁供試体の形状、表 - 2 にコンクリートと鋼材の材料試験結果を示す。プレストレスはプレテンション方式により導入した。なお、荷重試験直前の有効プレストレスによる断面下縁の応力度は、No.1 供試体のひずみゲージの計測値を用いて算定したところ、4.4 N/mm<sup>2</sup> であった。No.2 供試体では、材齢 23 日から鋼材の質量減少率の目標値を 20% として電食により腐食を促進させた。通電範囲は、荷重点から支点までの両側のせん断スパン内の PC 鋼より線（図 - 8 の B を除く 5 本）とせん断補強鉄筋（図 - 8 の S2 ~ S6 の 5 本）を対象とした。

(2) 実験結果

鋼材腐食の生じた PC 梁部材のせん断実験を行った結果、腐食供試体では終局時にせん断ひび割れより下側の側面と下面のかぶりコンクリートがすべてはく落した（写真 - 4）。各供試体の作用せん断力と中央たわみの関係を図 - 9 に示す。腐食させた No.2 供試体の作用せん断力の最大値は、健全な No.1 供試体の約 8 割に留まった。PC 鋼より線とせん断補強鉄筋の腐食により、せん断耐力が低下したことを明

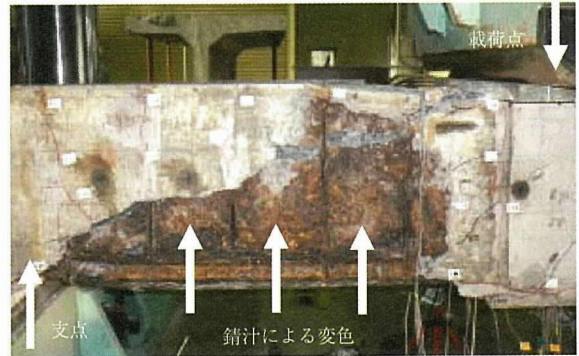


写真 - 4 終局時の腐食供試体

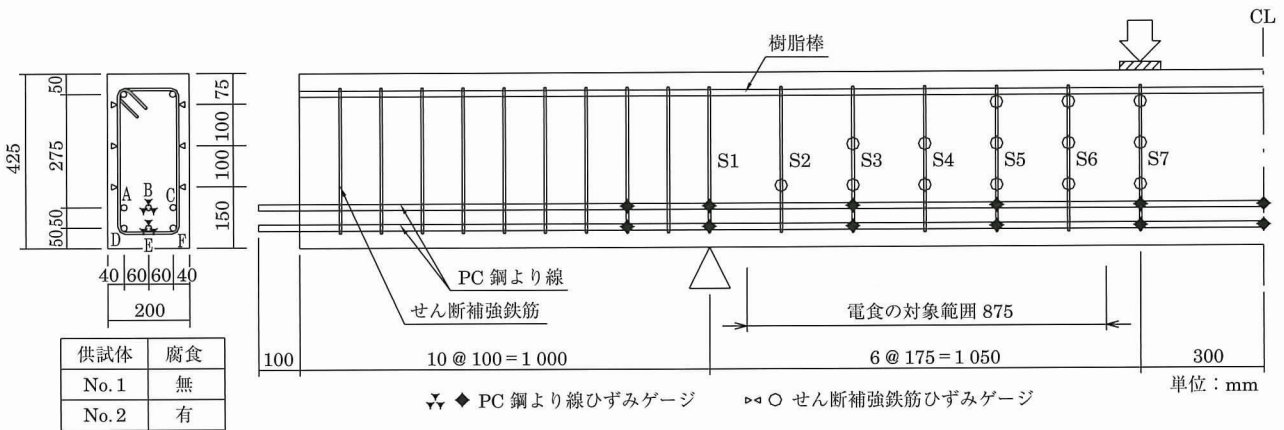


図 - 8 供試体の形状

表 - 2 コンクリートと鋼材の材料試験結果

供試体	コンクリート			PC 鋼より線 SWPR7BL-15.2 mm		せん断補強鉄筋 SD295A-D6	
	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
No.1	58.0	31.2	3.6	1 774	215	355	193
No.2	58.7	30.5	3.8				

※コンクリートは荷重試験当日の試験結果

※早強ポルトランドセメント，スランブ：11 cm，空気量：4.4%，最大粗骨材寸法：20 mm



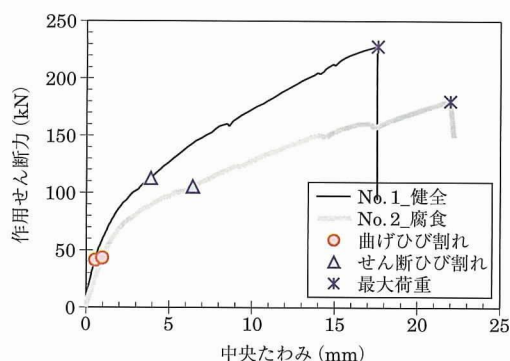


図-9 作用せん断力と中央たわみの関係

確に確認できる。また、載荷開始から作用せん断力 50 kN 程度までの範囲では両供試体の剛性の差はわずかであったが、その後は No.2 供試体のたわみが大幅に増加した。この要因として、No.2 供試体ではプレテンション方式でプレストレスを導入していたため、PC 鋼より線の付着が低下したせん断スパン内のプレストレスが減少したこと、電食後の腐食ひび割れの発生とかぶりコンクリートのはく落により実質的な供試体断面が小さくなっていったなどが考えられる。

また、せん断耐力の低下要因としては、かぶりコンクリートのはく落によるコンクリート負担分のせん断耐力の低下、せん断補強鉄筋の腐食によるせん断補強鉄筋負担分のせん断耐力の低下、PC 鋼より線の腐食と腐食ひび割れの発生によるプレストレスの減少に伴うせん断耐力の低下、さらには、せん断補強鉄筋の腐食とコンクリートストラットの傾斜角度の変化によるアーチ機構負担分のせん断耐力の低下などが考えられた。なお、鋼材腐食が生じた場合の PC 梁部材のせん断耐力の低下メカニズムについては現在も検討を行っているところである。

#### 4. おわりに

土木研究所に出向する以前の筆者の業務は、PC 構造物の新設構造物を対象とした構造解析が中心であった。このため、交流研究員として担当した既設 PC 構造物の維持管理に関連する研究課題は未知の分野であり、土木技術者として貴重な経験を得ることができたと感じている。たとえば、ここで報告した PC 橋のグラウト充てんの確認方法に関する研究では、自ら弾性波の入力を行って実験結果を整理することにより、弾性波伝播速度を評価指標とすることでグラウト充てん度の推定が可能となることを身をもって体験することができた。これは、筆者が所属しているような民間企業では容易には実施することができない実験であったため、大変貴重な経験をさせていただいた。

また、冒頭でも述べたように「塩害による損傷を受けた PC 構造物を断面修復によって補修する場合の手引き」(断面修復マニュアル)が近々発刊される予定である。残念な

がら本マニュアルには掲載することができなかったが、本稿で報告した「腐食 PC 鋼材の力学特性を検証する際の 3D スキャナの利用」・「腐食 PC 鋼材の疲労特性」・「腐食 PC 梁部材のせん断耐荷特性」、についても出向中に検証させていただくことができた。

このように、既設 PC 構造物を適切に維持管理していくために必要となる技術は日々着実に進歩している。これらの研究を 2 年間という短い期間ではあったが、民間企業の職員としてではなく、土木研究所の一員としてこれらの研究に携わることができたことは、筆者にとって非常に有意義なものであったと痛感している。また、研究を進めるうえで、他分野の交流研究員の方々と日常的に意見交換し、幅広い視野から既設 PC 構造物の現象を捉えることができた。今後は、既設 PC 構造物を今まで以上に効果的かつ効率的に維持管理していけるような技術が要求される。土木研究所で習得した知識・人脈を今後の業務に生かして、安心して利用できる社会資本としての PC 構造物を提供していきたい。

なお、土木研究所への出向期間中、研究を進めるにあたり、渡辺博志 首席研究員、木村嘉富 首席研究員ならびに構造物メンテナンス研究センターの皆様、基礎材料チーム(旧構造物マネジメント技術チーム)の皆様にはいろいろとご指導ご鞭撻をいただきました。また、PC 建協ならびに関係各社の皆様にも全面的にご支援いただきました。紙面を拝借しまして、ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 竹内祐樹・中村英佑・渡辺博志・木村嘉富：PC グラウトの充填度評価と再注入に関する基礎的研究，第 18 回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集
- 2) 竹内祐樹・中村英佑・村越 潤・木村嘉富：塩害の影響を受けた PC 桁から採取した腐食 PC 鋼材の力学特性に関する検討，土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集
- 3) 国土交通省土木研究所：塩害を受けた PC 橋の耐力評価に関する研究(Ⅲ)―塩害により損傷を受けた PC 鋼材の機械的性質―，土木研究所資料第 3810 号，2001
- 4) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]，2008
- 5) プレストレスト・コンクリート建設業協会：やさしい PC 橋の設計，2002
- 6) 中村英佑・竹内祐樹・青山 尚・村越 潤・木村嘉富：鋼材腐食の生じた PC はり部材のせん断耐荷機構に関する研究，第 9 回コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集
- 7) 国土交通省土木研究所：塩害を受けた PC 橋の耐力評価に関する研究(Ⅰ)―プレテンション PC 桁の載荷試験―，土木研究所資料第 3808 号，2001
- 8) 国土交通省土木研究所：塩害を受けた PC 橋の耐力評価に関する研究(Ⅱ)―旧暮坪陸橋の載荷試験―，土木研究所資料第 3809 号，2001
- 9) 国土交通省土木研究所：塩害を受けた PC 橋の耐力評価に関する研究(Ⅳ)―旧芦川橋の載荷試験―，土木研究所資料第 3816 号，2001

【2009 年 8 月 3 日受付】