

## PC 橋の改造技術に関する研究

## — その 1 : 腐食 PC 鋼材の機械的性質に関する考察 —

北野 勇一\*1・渡辺 博志\*2・鈴木 雅博\*3・徳光 卓\*4

## はじめに

本研究は、独立行政法人土木研究所と(株)プレストレスト・コンクリート建設業協会における「PC 橋の改造技術に関する共同研究委員会(平成 15～17 年度)」の活動成果をとりまとめたものである。本研究において従来の補修補強に置き換わる用語として改造技術とした理由は、PC 橋の場合にはプレストレスの変化が構造物に与える影響を勘案する必要があり、RC 橋とは異なる検討が必要になるためである。また、これまでの活動では、従来の補修補強方法に加え、劣化部の範囲推定技術の構築、はつりの適切性評価技術の構築、PC 橋改造のための設計・施工技術の構築など、広い視野での PC 構造物の耐久性向上を図ることを目的として検討してきており、これらの研究成果を次の題目にて報告する予定である。

その 1 : 腐食 PC 鋼材の機械的性質に関する考察

その 2 : 損傷 PC 部材の力学特性に関する考察

その 3 : PC 部材のはつりの適切性に関する研究

その 4 : 大断面修復の施工と耐久性に関する研究

その 5 : 大断面修復後のマクロセル腐食に関する研究

その 6 : 「PC 橋の改造マニュアル(仮称)」の概要

## 1. まえがき

わが国でプレストレストコンクリート(以下、PC)が実用化されてから半世紀が過ぎ、橋梁をはじめとする社会基盤の構築に欠かせないコア技術として確立されてきた。このような PC 技術の発展を支えてきたのは強度の高いコンクリートを安定して施工する技術とともに、優れた機械的性質を有する PC 鋼材を製造し、なおかつプレストレスを確実に導入する技術があったためといえる。

PC 鋼材の機械的性質は、PC 橋の緊張材として主に引張強度が 1700～1900 N/mm<sup>2</sup> 程度のものが利用されているように、鉄筋の数倍以上の静的強度を有するところに最大の特徴がある。また、PC 部材のじん性を損なわない範囲で伸びが確保されること、レラクセーションが小さいことおよび疲労強度があまり低下しないことなどの高張力鋼としての必要な品質を同時に有するものが使用されている。その反面、PC 鋼材は高い引張応力状態におかれるため、腐食による破断を生じやすいのも事実である。このことから、わが国の道路橋などの設計・施工にあたっては、PC 鋼材の耐

食性が十分に確保されるように、まれな外力が作用する場合を除き、ひび割れを開口させないための技術基準が確立されてきている。

一方、これまでに建設されてきた PC 橋の中には、過酷な塩害を受けて鋼材腐食が生じるばかりでなく、一部ではあるが PC 鋼材の破断という深刻な事態に至ったケースがあるのも事実である。このようなケースでは供用上の安全が確保できる範囲で必要十分な補強あるいは修復によって既設 PC 橋をできるだけ長く供用していくことが、近年、社会的に要請されてきている。また、今後、予定耐用年数を超えた PC 橋の資産価値を適正に保全していくこともふまえると、PC 鋼材などの構成材料の劣化が顕在化した PC 部材の力学特性を正しく把握できる手法を早急に確立していく必要がある。

このような背景より、本稿では、経年劣化した PC 橋の耐力を評価することを目的に PC 鋼材の機械的性質に及ぼす腐食の影響について着目し、これまでの研究成果を整理するとともに、腐食 PC 鋼材の引張強さ、0.2% 永久伸びに対する耐力(以下、0.2% 耐力)、弾性係数および破断伸びの定量化を試みた。

## 2. これまでの研究成果の整理

腐食 PC 鋼材の機械的性質に関する既往の研究成果<sup>1)～4)</sup>を整理すると、次の①～⑦の知見に集約される。

- ① 10 箇月の自然暴露により径がわずかに減少した PC 鋼線  $\phi$  5 mm の引張荷重、降伏点荷重、弾性限荷重などの静的な機械的性質の低下はわずか数%であった<sup>1)</sup>。
- ② 自然暴露および塩水噴霧により腐食させた PC 鋼線  $\phi$  2.9, 5, 7 mm では、引張強度の低下に比べ、伸びや繰返し曲げ回数など、じん性面での劣化が著しい<sup>2)</sup>。
- ③ 塩害を受けた撤去 PC 桁より採取した PC 鋼線  $\phi$  5 mm の荷重伸び曲線は、質量減少率 2% 以下において弾性限界にあまり変化がなく、最大荷重まで腐食していない PC 鋼材と同じような軌跡であった<sup>3)</sup>。
- ④ 知見 ③ において、PC 鋼線の質量減少率が 2% を超えて大きくなるにしたがい、最大荷重が低下するとともに、最大荷重時の伸びも著しく低下した<sup>3)</sup>。
- ⑤ 知見 ③、④ において、PC 鋼材の質量減少率と引張試験の最大荷重より求めた最大断面減少率は、孔食したものを除き、ある一定の相関が見られた<sup>3)</sup>。

\*1 Yuichi KITANO : プレストレスト・コンクリート建設業協会

\*2 Hiroshi WATANABE : 独立行政法人土木研究所

\*3 Masahiro SUZUKI : プレストレスト・コンクリート建設業協会

\*4 Suguru TOKUMITSU : プレストレスト・コンクリート建設業協会

⑥ 人工欠損を有する PC 鋼材の引張強度の減少率は、欠損の形状にかかわらず、既知の最大断面減少率との間におおむね 1 : 1 の相関性があった<sup>4)</sup>。

⑦ 知見 ⑥ において、破断伸びの低下率は、最大断面減少率が同一であっても、欠損の形状により大きく異なるものがあった。これは、腐食による水素脆化が PC 鋼材に生じていなくても、断面減少に伴う伸び能力の低下と孔食などの欠損形状に応じた伸びの局所化によって生じたと考えられる<sup>4)</sup>。

以下では、これらの知見から、経年劣化した PC 橋の PC 鋼材の特性を検討した結果を詳述する。

### 3. 腐食 PC 鋼材の静的強度に関する検討

#### 3.1 質量減少率が静的強度に及ぼす影響

実験的に検証された知見 ① あるいは実橋で確認された知見 ③ に示されるように、PC 鋼材の腐食がそれほど進行していない状況にあれば、静的強度の低下は明確でないことが多いようである。一方、知見 ④ に示されるように、PC 鋼材の応力ひずみ曲線に変化が見られるようになるのは質量減少率が 2 % 程度を超えるようになってからである。また、知見 ⑤ に示されるように、PC 鋼材の質量減少率と静的強度にはある程度の相関性が見出せるようである。

図 - 1 に海岸部で 34 年間供用されたポストテンション方式 PC 桁橋から採取した腐食 PC 鋼線 (SWPR1A, φ 5 mm) の引張試験データ<sup>4)</sup> を基に、質量減少率と引張強さの減少率の関係として整理した結果を示す。ここで、引用したデータは機械的性質に関するすべての測定結果が得られたものに限った。引用した質量減少率は、10 % クエン酸 2 アンモニウム溶液に試験片を浸けて 20 分間、90 °C で煮沸してから鋼材表面に付着している錆をブラシなどでこすって除錆した後、PC 鋼材を切断し約 330 mm とした鋼材の質量を 1 mg まで計量された結果が示されている。ここでは、この測定結果に基づいて式 (1) により質量減少率 (WL) を求めた。

$$WL = \frac{W_s - W_c - W_b}{W_s} \times 100 (\%) \quad (1)$$

ここで、 $W_s$  : 腐食前の質量 (g)  
ただし、公称断面積と実測長から計算で求めた。

$W_c$  : 除錆後の質量 (g)

$W_b$  : 黒皮の残っている健全な PC 鋼材の質量減少率を求めた値 = 0.974 (g/m)

また、引張強さの減少率 (TSL) を式 (2) より算定した。

$$TSL = \frac{TS_{soud} - TS_{corr}}{TS_{soud}} \times 100 (\%) \quad (2)$$

ここで、 $TS_{soud}$  : 健全な PC 鋼材の引張強さ (N/mm<sup>2</sup>)

$TS_{corr}$  : 腐食 PC 鋼材の引張強さ (N/mm<sup>2</sup>)

なお、孔食とは、一般的に孔の径より孔の深さが大きい欠損であるが、孔状にあたるものを図示することにした。また、撤去 PC 桁より採取した健全な PC 鋼材の機械的性質を表 - 1 に示す。

図 - 1 より、引張強さの減少率は質量減少率が増すとともに増加する傾向にあり、両者の比は 1 ~ 4 倍程度 (とくに、孔食が生じた場合には 2 倍程度以上) の範囲に広く分布する結果になった。ここで、引張強さは引張破断時の荷重を公称断面積で除した値として求めているが、このように両者の比が 1 にならないのは、質量減少率が平均的な断面減少率となるのに対し、引張強さの減少率は最大断面減少率を反映するためであると考えられる。また、両者の比が広く分布するのは、採取した PC 鋼材の中に孔食などの腐食が局部的に生じる場合と全面的に均一に腐食している場合があることに起因していると考えられる。

表 - 1 健全な PC 鋼材の引張試験結果<sup>4)</sup>

項目	試験結果	規格
0.2 % 耐力 (N/mm <sup>2</sup> ) *	1 620	1 420
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> ) *	1 740	1 620
弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	195	-
破断伸び (%)	7.05	4.0 以上

\* 測定された荷重を公称断面積 (19.64 mm<sup>2</sup>) で除した値とした。

\*\* 試験方法や規格は JIS G 3536 による。ただし、弾性係数は標点間 100 mm をアーム式の伸び測定器により測定した変位より算出した結果を引用した。

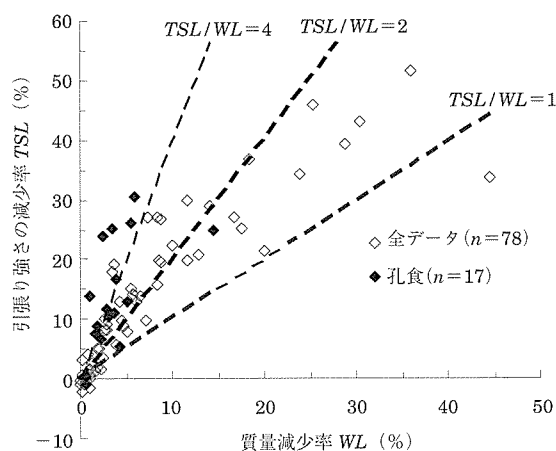


図 - 1 腐食 PC 鋼材の引張試験結果 (引張強さ)

#### 3.2 腐食状況と引張強さの減少率の関係

3.1 節に示したように、腐食 PC 鋼材の引張強さを尺度の異なる質量減少率から正確に推定するには、腐食状況の分類方法や試料の採取方法あるいは試験方法などのきめ細やかな条件を新たに定義しなければならないという課題がある。したがって、ここでは腐食状況を指標として、引張強さの減少率との関係について検討する。

表 - 2 に撤去 PC 桁より採取した PC 鋼材の腐食状況を分類した例<sup>4)</sup> を示す。ここで、この腐食状況は除錆前後の PC 鋼材の表面状態を目視観察により確認されたものであり、質量減少率の測定結果の傾向が併せて示されている。

撤去 PC 桁より採取した腐食 PC 鋼材の引張強さの減少率を腐食状況の分類ごとに統計処理を行った結果を表 - 3 に示す。これより、分類 1 と判断される腐食 PC 鋼材の引張強さの減少率は平均 0.7 % であり、健全な PC 鋼材とはほぼ同程度の引張強さを有する結果になった。一方、分類 2 ~ 4

表 - 2 腐食状況の分類

分類	腐食状況	質量減少率
1	薄錆が全面にあるが、ブラシで磨くと地鉄がでる。	1 %程度未満
2	錆が全面にあり、点状の錆が目立つ。	1 ~ 2.5 %程度
3	錆が全面にあり、ブラシで磨くと欠損が目立つ。	10 %程度未満
4	径が小さくなっている。	10 %程度以上

表 - 3 腐食 PC 鋼材の分類と引張強さの減少率の関係

分類	質量減少率 WL (%)	引張強さの減少率 TSL (%)			
		最大	最小	平均	標準偏差
1	WL < 1.0	4.2	- 2.3	0.7	1.9
2	1.0 ≤ WL < 2.5	23.8	- 1.6	5.7	6.1
3	2.5 ≤ WL < 10.0	30.5	5.5	15.1	7.1
4	10.0 ≤ WL	51.5	19.8	31.6	9.6

\* 平均と標準偏差は、標準正規分布に従うものとして算出した。

と判断される腐食 PC 鋼材ではそれぞれ平均で 5.7 %, 15.1 %, 31.6 % になっており、引張強さの低下が認められた。また、今回の撤去 PC 桁をはじめとする PC 橋では、設計荷重作用時の許容応力度として  $0.60 \sigma_{pm}$  を用いて設計されていることより、PC 鋼材にはあらかじめ引張強さの 60 % 以下の範囲で張力が導入されており、引張強さが著しく低下した分類 4 の状態は破断していると思えるのが安全側と考えられる。

以上より、分類 4 と判断される腐食 PC 鋼材は破断しているものと思われ、分類 2 と分類 3 は劣化状況に応じた PC 鋼材の引張強さを減じる必要があると考える。

### 3.3 腐食を生じた PC 鋼材の材料強度について

3.2 節に示したように、腐食 PC 鋼材の引張強さは質量減少率に応じて低下するものの、知見 ⑥ に示されるように最大断面減少率に応じて、見かけ上、変化しているようである。すなわち、PC 鋼材の引張強さは抵抗断面の減少により低下するものであり、腐食に伴う材質変化によるものではないといえる。

撤去 PC 桁より採取した腐食 PC 鋼材の引張試験結果より、質量減少率と 0.2 % 耐力および弾性係数の関係を調べた結果を図 - 2, 3 に、これらを腐食状況の分類ごとに統計処理を行った結果を表 - 4, 5 に示す。また、0.2 % 耐力の減少率と引張強さの減少率の関係を調べた結果を図 - 4 に示す。ここで、0.2 % 耐力 (YSL) および弾性減少率の減少率 (YML) は、式 (3) ~ (4) として算定した。

$$YSL = \frac{YS_{soud} - YS_{corr}}{YS_{soud}} \times 100 (\%) \quad (3)$$

ここで、 $YS_{soud}$  : 健全な PC 鋼材の 0.2 % 耐力 (N/mm<sup>2</sup>)

$YS_{corr}$  : 腐食 PC 鋼材の 0.2 % 耐力 (N/mm<sup>2</sup>)

$$YML = \frac{YM_{soud} - YM_{corr}}{YM_{soud}} \times 100 (\%) \quad (4)$$

ここで、 $YM_{soud}$  : 健全な PC 鋼材の弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)

$YM_{corr}$  : 腐食 PC 鋼材の弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)

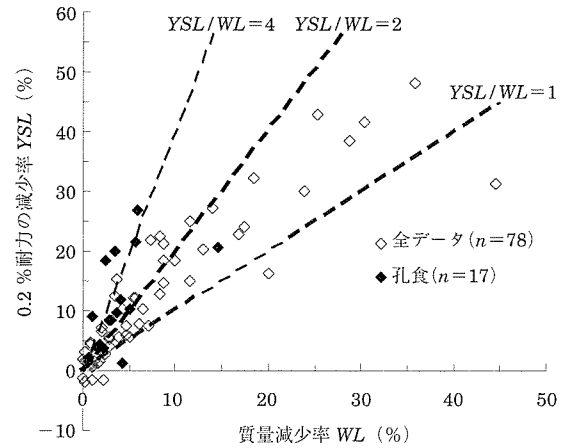


図 - 2 腐食 PC 鋼材の引張試験結果 (0.2 % 耐力)

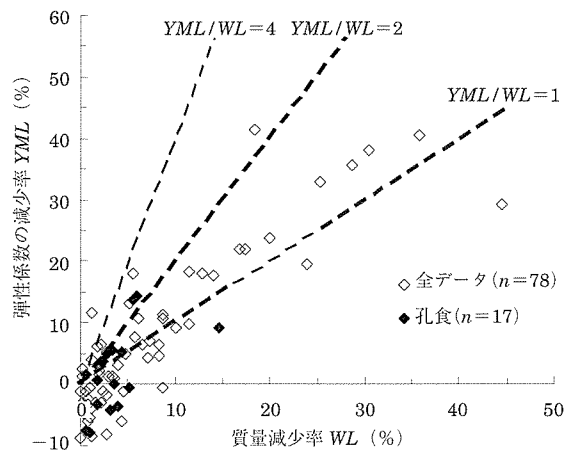


図 - 3 腐食 PC 鋼材の引張試験結果 (弾性係数)

表 - 4 腐食 PC 鋼材の分類と 0.2 % 耐力の減少率の関係

分類	質量減少率 WL (%)	0.2 % 耐力の減少率 YSL (%)			
		最大	最小	平均	標準偏差
1	WL < 1.0	4.6	- 1.9	1.6	1.7
2	1.0 ≤ WL < 2.5	18.5	- 1.7	3.9	4.8
3	2.5 ≤ WL < 10.0	26.9	1.1	11.8	6.4
4	10.0 ≤ WL	48.0	14.9	28.4	10.1

\* 平均と標準偏差は、標準正規分布に従うものとして算出した。

表 - 5 腐食 PC 鋼材の分類と弾性係数の減少率の関係

分類	質量減少率 WL (%)	弾性係数の減少率 YML (%)			
		最大	最小	平均	標準偏差
1	WL < 1.0	2.5	- 8.7	- 3.1	3.6
2	1.0 ≤ WL < 2.5	11.7	- 8.3	0.6	5.4
3	2.5 ≤ WL < 10.0	18.0	- 8.3	4.3	6.3
4	10.0 ≤ WL	41.3	9.0	24.2	10.9

\* 平均と標準偏差は、標準正規分布に従うものとして算出した。

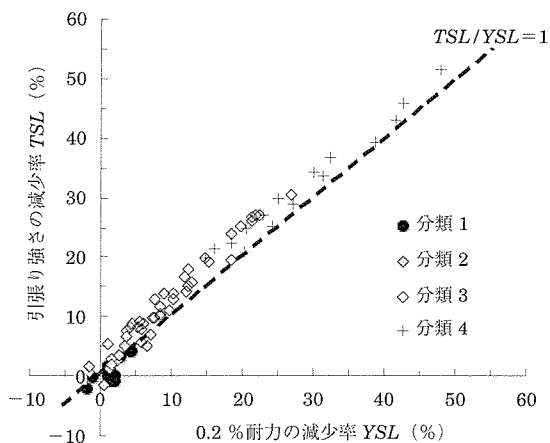


図 - 4 0.2%耐力の減少率と引張強さの減少率の関係

これらより、0.2%耐力については、3.2節に示した引張強さの傾向とおおむね一致する結果になった。とくに、0.2%耐力の減少率と引張強さの減少率の関係は図-4に示されるように、両者の比は1:1よりやや大きくなるものの腐食状況の違いによる影響はさほどを受けていないことが分かる。

一方、弾性係数については、孔食が生じたものは質量減少率との比で2倍以上となるものが少なく(図-3)、また、表-5中の弾性係数の減少率の平均値は引張強さ(表-3)や0.2%耐力(表-4)と比べ、分類1~3で大きく低下する結果になった。この理由は、ひずみの測定方法として、標点間距離を100mmとした平均ひずみであり局所的なひずみの増加が反映されないためであり、弾性係数が変化しているものではないと考えられる。

以上より、腐食PC鋼材の静的強度に関しては、引張強さに加え、0.2%耐力も同様な傾向を示しているといえ、腐食を生じたPC鋼材の材料強度は、腐食による最大断面減少率を考慮すれば、おおむね変化しないと推察される。また、表-3~5に示されるようにいずれも標準偏差が平均値に対し大きくなっていった。実際の構造物の調査においては、この結果からすると、腐食したPC鋼材を有するPC部材の耐荷性能を評価する場合、質量減少量に応じた強度の低減とともに、腐食の不均一性に起因すると考えられるばらつきを、材料係数などによって考慮することが望ましいと考えられる。

#### 4. 腐食PC鋼材の破断伸びに関する検討

##### 4.1 質量減少率が破断伸びに及ぼす影響

知見②に示されるように、腐食PC鋼材の質量減少率がわずかであっても破断伸びは著しく低下することが多いようである。この理由は、腐食反応による水素脆化や応力腐食などによる影響については定かでないが、知見⑦によれば、断面欠損部の応力集中などの影響が支配的となっているものと考えられる。

図-5に撤去PC桁から採取した腐食PC鋼材の破断伸びについて測定されたデータを引用し、質量減少率との関係として整理した結果を示す。図には、破断伸びの規格値、

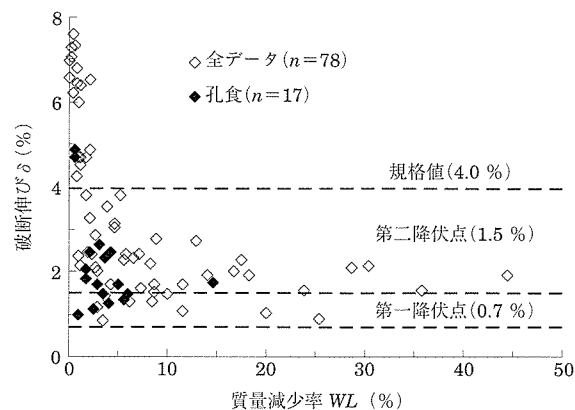


図 - 5 腐食PC鋼材の引張試験結果(破断伸び)

第一降伏点および第二降伏点を併せて示した。これより、これまでに確認されている知見に加え、質量減少率が1%を超える付近から破断伸びが規格値以下となり、わずか数%で降伏点以下で破断に至る場合もあることが分かる。このように、腐食PC鋼材の破断伸びが著しく低下することは、PC部材の破壊時に急激な脆性破壊を引き起こすことが強く懸念される。したがって、設計において想定するPC鋼材の機械的特性は、3章で示したように既往データの平均値を考慮するのではなく、できるだけ安全側となるように材料特性値を定める必要がある。

##### 4.2 腐食状況と破断伸びの関係

ここでは、3章同様に腐食状況を指標として腐食PC鋼材の破断伸びとの関係について検討する。

腐食状況の分類ごとに破断伸びの全データに対して統計処理を行った結果を表-6に示す。ここで、表に示した破断伸びの最小値と2番目に小さい値とは、分類1と分類2で大きく乖離していた。これを考慮すると、破断伸びは分類1で規格値、分類2で第二降伏点、分類3で第一降伏点を上回る結果になった。

以上より、分類1については健全なPC鋼材の範疇であり、分類2と分類3はそれぞれ破断伸びが規格値を大きく下回っていることに留意しなければならない。また、分類4については、すでに述べてきたように破断しているものと見なすのがよいと考えられる。

表 - 6 腐食PC鋼材の分類と破断伸びの関係

分類	質量減少率 WL (%)	破断伸び (%)			
		最大	最小	平均	標準偏差
1	WL < 1.0	7.60	2.37 (4.25)	5.94	1.47
2	1.0 ≤ WL < 2.5	6.51	0.98 (1.83)	3.38	1.73
3	2.5 ≤ WL < 10.0	3.80	0.80 (1.17)	2.06	0.73
4	10.0 ≤ WL	2.71	0.92 (1.02)	1.76	0.48

\* 平均と標準偏差は、標準正規分布に従うものとして算出した。

\*\* 括弧内は、2番目に小さいデータを示した。

4.3 応力ひずみ曲線と限界ひずみについて

腐食 PC 鋼材の応力ひずみ曲線は、知見 ④ に示されるように、腐食が進行して材料劣化が顕在化すると健全な PC 鋼材とは異なる軌跡となる。しかしながら、引張強さや 0.2 % 耐力に関しては 3.3 節に示したように、最大断面減少率を考慮すれば、腐食を生じた PC 鋼材の材料強度が変化しないとみなせることから、応力ひずみ曲線の軌跡自体は不変であり、破断に至る限界ひずみが増加するものとしてよいと考えられる。

以上より、腐食 PC 鋼材の応力ひずみ曲線と限界ひずみについて整理した結果を図-6 に示す。

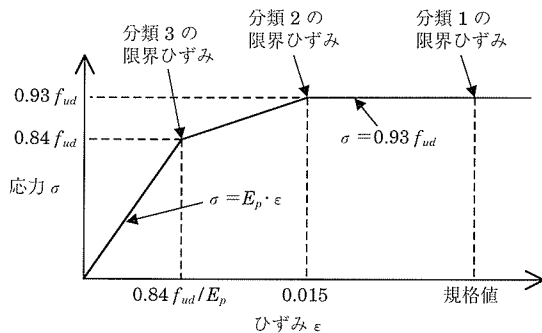


図-6 腐食 PC 鋼材の応力ひずみ曲線と限界ひずみ (PC 鋼線、PC 鋼より線の場合)

5. 結 論

本研究では、経年劣化した PC 橋において、腐食 PC 鋼材の機械的性質に関する検討を行った結果、次の結論が得られた。

- (1) 腐食 PC 鋼材の質量減少率は、質量減少率を測定した区間の腐食に伴う平均的な断面減少率を示す指標であるため、質量減少率と引張強さの減少率の相関性を求めるとおよそその傾向は認められるものの、少なからずばらつきが認められる結果となる。実構造物においてすべての PC 鋼材について正確に最大断面減少率を求めることは必ずしも合理的であるとはいえず、現時点では、撤去 PC 桁より採取した PC 鋼材の腐食状況と機械的性質の関係を調べた結果を基に、材料劣化を評価するのがよいと考えられる。また、質量減少率と引張強さの間に認められるばらつきについては、実構造物の調査方法や PC 鋼材の腐食状況に応じて、適切な材料係数を導入するなどの方策が必要になると考えられる。
- (2) PC 鋼材の腐食状況より機械的性質の劣化状況を判断すると、鋼材表面をブラシで磨くと地鉄がでる場合は健全な PC 鋼材とはほぼ同程度の機械的性質を有するが、点状の錆や欠損が目立つ場合には材料劣化が顕在化し、鋼材径が小さくなるまで腐食が進行して

いる場合には PC 鋼材がすでに破断している可能性がある。

- (3) 腐食 PC 鋼材の静的強度は、質量減少率に応じて低下するものの、もっとも腐食している部位の断面減少率の平均値を考慮すれば、引張強さ、0.2 % 耐力の特性値はおおむね変化しない。また、弾性係数については断面減少率を考慮すると、見かけ上、大きくなる結果となったが、これはひずみの測定方法の影響であると考えられる。したがって、腐食 PC 鋼材の材料劣化は、抵抗断面の減少により低下するものであり、腐食に伴う材質変化によるものではないと考えられる。
- (4) 腐食 PC 鋼材の破断伸びは、静的強度に比べて劣化が著しく、除錆後の鋼材表面に点状の錆が目立つ場合で第二降伏点、欠損が目立つ場合で第一降伏点にまで低下することがある。したがって、腐食 PC 鋼材を有する PC 橋では、じん性の低下を考慮して PC 部材の力学特性を評価する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 富田勝信, 渡辺信一: 曝露腐食による PC 鋼材の疲れ強さの低下, プレストレストコンクリート, Vol.6, No.4, pp.50-54, 1964
- 2) 倉内実: PC 鋼材の腐食, コンクリート工学, Vol.25, No.7, pp.23-36, 1987
- 3) 木村哲士, 河野広隆, 田中良樹: 塩害により腐食した PC 鋼線の腐食性状と機械的性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.559-564, 2001
- 4) 土木研究所: 塩害を受けた PC 橋の耐荷力評価に関する研究 (Ⅲ) 一塩害により損傷を受けた PC 鋼材の機械的性質一, 土木研究所資料, 第 3810 号, 2001.3

PC 橋の改造技術に関する共同研究委員会 名簿

独立行政法人土木研究所	
	渡辺 博志
	久田 真 (現, 東北大学大学院)
(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会	
委員長	藤田 学 (三井住友建設 (株))
副委員長	手塚 正道 (オリエンタル建設 (株))
	竹中 秀樹 ((株)安部日鋼工業)
	中村 雅之 (オリエンタル建設 (株))
	北野 勇一 (川田建設 (株))
	中田 順憲 (極東工業 (株))
	伊藤 良二 (昭和コンクリート工業 (株))
	濱田 譲 (ドーピー建設工業 (株))
	北山 良 ((株)日本ピーエス)
	鈴木 雅博 ((株)ピーエス三菱)
	中村 定明 (ピーシー橋梁 (株))
	徳光 卓 ((株)富士ピー・エス)
	谷口 秀明 (三井住友建設 (株))

【2007年7月31日受付】