

人為的に切削したPC鋼より線の力学的性質

高知工業高等専門学校 正会員 博（工） ○近藤 拓也
 高知工業高等専門学校 正会員 博（工） 横井 克則
 徳山工業高等専門学校 博（工） 海田 辰将
 神鋼鋼線工業（株） 正会員 細居 清剛

Abstract : To consider the mechanical properties of the corroded PC strands, tensile testing of the PC strands cut artificially was performed. This result was compared with a tensile testing result of the PC steel bars performed under the same conditions. As a result of tensile test, we found PC steel bar occurred ductile fracture and PC strands occurred brittle fracture. And it fractured in the plastic region due to the slight cross-section decreased by tensile test of corroded PC strands. But it fractured with brittleness by the PC strands cut artificially. It'll be necessary to consider this cause from now on.

Key words : PC strands, artificially cutting, ductility, brittleness

1. はじめに

沿岸部や凍結防止剤散布箇所など、腐食環境下で供用されているコンクリート構造物は、場合によってはコンクリート内部に配置された鋼材が腐食することが知られている。これら鋼材が腐食したコンクリート構造物については適切な管理を行う必要があるが、鋼材が腐食した場合は、鋼材の残存性能を把握することが重要となる。鋼材が鉄筋の場合、腐食鉄筋の残存直径を測定することにより、構造物の残存性能を評価できることが、各種研究事例により明らかとなっている¹⁾。PC構造物の場合、PC鋼材がPC鋼線や鋼棒であれば、鉄筋と同様に残存直径を測定して鋼材の残存性能を明らかにすることができる²⁾。しかし、PC鋼材がPC鋼より線の場合、腐食による局所的な直径減少がPC鋼材の力学的性質に与える影響については不明確な点が多い。またPC鋼より線はPC鋼棒や鉄筋等と異なり、複数の素線の集合体であるため、その挙動を一般化することは難しい。

しかし、構造物の維持管理を行う上で、現行の維持管理の指標である土木学会制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕³⁾に記載されているように、健全性が疑わしい構造物については現状把握を行う必要があるため、腐食PC鋼より線の性能評価を適切に行う必要がある。

筆者らは腐食PC鋼より線の力学的性質を調べるために、PC鋼より線へ塩水噴霧した後に引張試験を行い、力学的性質について検討を行った⁴⁾。質量減少率ベースで整理を行った結果、PC鋼棒と比較し最大荷重の低下傾向はほぼ同一であったが、みかけの弾性係数はPC鋼棒と比較し低くなる傾向を示した。弾性係数の低下は構造性能に影響を与えるため、腐食PC鋼より線の力学的性質を把握することは重要である。

そのため、腐食PC鋼より線の力学的性質を明らかとするための基礎的検討として、PC鋼より線に人為的に切削を行った後に引張試験を行い、その力学的性質について検討を行った。

2. 試験方法

2.1 試験パラメータ

本論文における試験パラメータは、PC鋼材の種類および切削時の断面減少量とする。

PC鋼材の種類については、PC鋼棒とPC鋼より線の2種類とし、PC鋼材の種類による力学的性質の違い

について検討することを目的とする。断面減少量は、局所的な直径減少量の変化によるPC鋼材の力学的性質の把握を目的とする。断面減少量は0.25mm, 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm, 2.0mmの5種類とし、供試体中央に1箇所のみ切削を行った。PC鋼より線については、図-1に示すように、側線の1本のみを切削した。

2.2 供試体作成方法

使用したPC鋼より線はSWPR7BL, PC鋼棒はB種1号SBPR13mm930/1080とした。PC鋼より線の外径は12.7mmであり、両者ともほぼ同一直径となることを考慮した。

切削したPC鋼材の側面方向からの模式図を図-2に示す。切削深さに対して、PC鋼材表面の切削長さは2倍となるように切削した。

切削による熱の影響を極力避けるため、切削は超硬エンドミルを使用して行った。

2.3 引張試験方法

PC鋼棒については、JIS Z 2241に基づき、L=1,200mm供試体を用いて引張試験を行った。つかみ間隔は1,000mmとした。供試体本数は各要因1体ずつとした。PC鋼より線については、JIS G 3536に基づきL=1,300mm供試体を用いてPC鋼より線の引張試験を実施した。つかみ間隔は1,000mmとした。なお、PC鋼棒、PC鋼より線ともに切削を行っていない供試体についても比較用に引張試験を行ったが、すべて荷重増加中につかみ部分で破断したため、今回のデータからは削除したことを付記する。

引張試験は、万能試験機（最大荷重300kN）で実施した。荷重および変位については、試験機備え付けの装置（感量0.1kN, 0.01mm）で測定した。

2.4 測定項目および評価方法

(1) 荷重-変位関係

試験機備え付けの装置を用いて、荷重-変位関係を測定し、試験評価を行った。なお変位については、つかみ部の移動量を読み取ったため、数値についてはつかみ部のすべりなども含めた数値となっている。また、PC鋼棒、PC鋼より線ともに引張試験初期において大きなすべりが生じているため、JIS G 3536に基づき補正を行った。

弾性領域における荷重-変位関係の傾きを剛性として扱った。また、引張試験における最大荷重を最大荷重とした。破断時変位とつかみ間隔の比の百分率を破断伸びとした。

(2) 破断性状

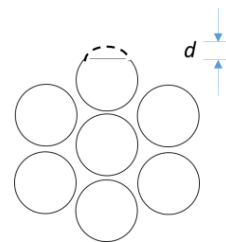


図-1 PC鋼より線の切削状況模式図
(断面図, d:断面減少量)

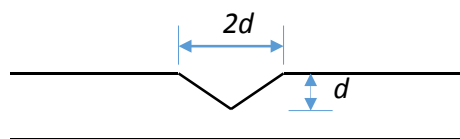


図-2 供試体の切削状況模式図
(側面方向より見る, d:断面減少量)

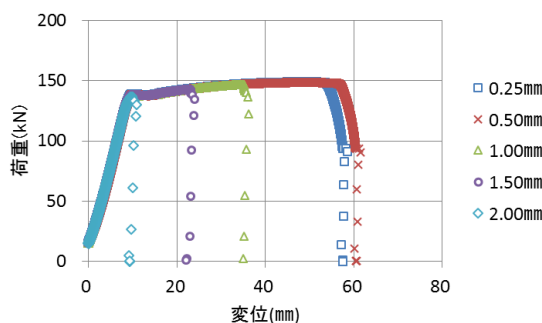


図-3 荷重-変位関係 (PC鋼棒)

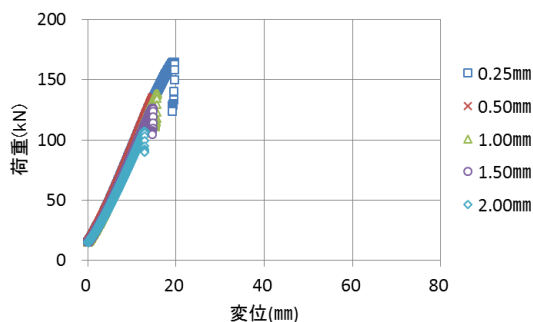


図-4 荷重-変位関係 (PC鋼より線)

引張試験終了後のPC鋼材およびPC鋼より線の破断面を観察した。

3. 試験結果

3.1 荷重-変位関係

PC鋼棒の荷重-変位関係を図-3に示す。断面減少量2.0mmでは、弾性限界付近で破断している状況が確認できる。それより断面減少量が少ないケースでは、塑性領域で破断している状況が確認できる。弾性領域における荷重-変位関係は、断面減少量による差異は確認できないが、断面減少量が多いほど破断時変位が小さくなる傾向を示した。このような傾向は、鉄筋が腐食した場合とほぼ同様である¹⁾。

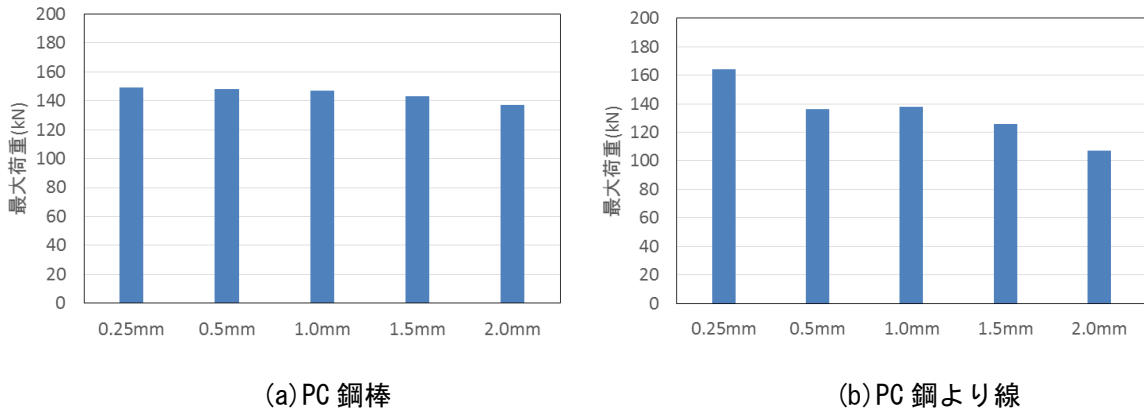


図-5 断面減少量と最大荷重の比較

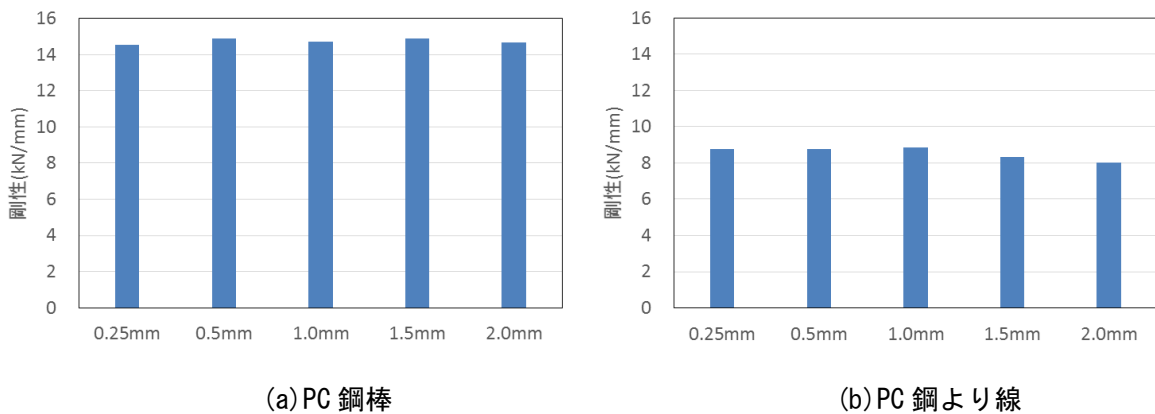


図-6 断面減少量と剛性の比較

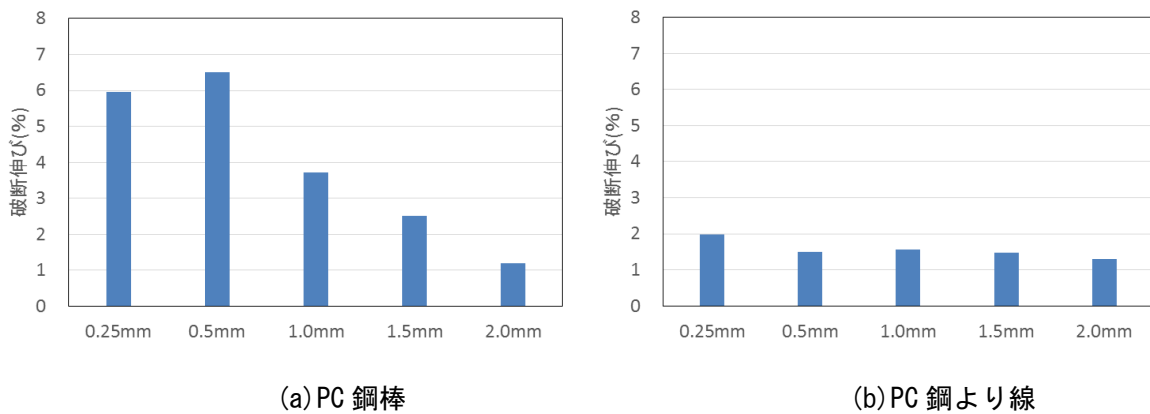


図-7 断面減少量と破断伸びの比較

PC鋼より線の荷重-変位関係を図-4に示す。PC鋼棒の場合と異なり、試験を行ったいずれの断面減少量の場合でも、弾性範囲内で荷重低下しており、この点で切削を行った素線が破断したことを確認した。弾性領域における荷重-変位関係については、わずかではあるが断面減少量の増加とともに剛性が小さくなる傾向が確認できる。また、断面減少量の増加とともに、破断時変位が小さくなる傾向を示した。この傾向も、塩水噴霧により腐食させたPC鋼より線の引張試験を行った場合とほぼ同様である⁴⁾。

一連の引張試験において得られた、PC鋼棒およびPC鋼より線の最大荷重、剛性、および破断伸びと断面減少量の関係について図-5~7に示す。

最大荷重については、PC鋼棒では断面減少量が増加してもほとんど変化が確認できないのに対して、PC鋼より線は断面減少量の増加とともに低下する傾向が確認できる。これは、PC鋼棒が塑性域で破断したため最大荷重の変化が大きく変化しないのに対して、PC鋼より線では弾性範囲内で破断していると考えられるため、断面減少量の増加とともに最大荷重が低下したものと考えられる。

剛性については、PC鋼棒では断面減少量が増加しても変化がほとんど確認できなかった。このことより、塑性域で破断するPC鋼棒については、局所的な断面減少量の大小が剛性に与える影響は小さいものと考えられる。また、PC鋼より線については、断面減少量の増加とともに剛性がわずかに低下する傾向が示された。

破断伸びについては、PC鋼棒では断面減少量の増加とともに破断伸びが低下する状況が確認できる。これは腐食鉄筋とほぼ同じ傾向であり¹⁾、塑性域で破断する程度の断面減少を有した鋼材に対して引張試験を行った場合、破断伸びに大きな影響を示すことを確認できる結果であると言える。一方でPC鋼より線については、断面減少量が増加しても破断伸びに大きな変化は確認できなかった。これは、断面減少量0.25mmで既に弾性域における破断が生じたと考えられるため、破断伸びの減少は比較的小さくなったものと考えられる。

3.2 破断性状

ここでは、引張試験終了後における供試体破断面の破断性状について述べる。PC鋼棒およびPC鋼より線の破断状況例を図-8に示す。PC鋼棒は、延性破壊を示すカップアンドコーン型の破断であることが確認できる。本試験範囲において、PC鋼棒の破断性状はすべて図-8(a)に示すような延性破壊を示した。

PC鋼より線については、7本ある素線のうち切削を行った1本の素線において、切削面を起点とした鋭利な破断が確認できる。本試験範囲内においては、断面減少量にかかわらず、PC鋼より線の破断性状は図-8(b)に示すような鋭利な破断性状であった。



(a) PC 鋼棒 (断面減少量 0.25mm)

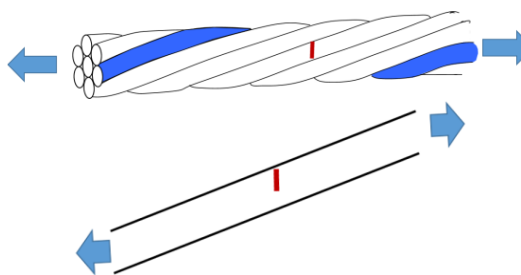


(b) PC 鋼より線 (断面減少量 1.0mm)

図-8 引張試験終了後の破断状況の例



(a) 断面欠損した PC 鋼棒



(b) 断面欠損した PC 鋼より線

(上：全体図，

下：1 素線を取り出した拡大図)

図-9 引張試験時の応力状態模式図

今回の切削作業は、図-9(a)に示すように引張面に垂直になるように実施したため、PC鋼棒については切削した面における鋼材残存箇所には応力集中は発生するものの、ほぼ引張の垂直応力が発生する状況になったため、延性破壊が生じたものと考えられる。一方で、PC鋼より線については、軸方向に対して切削面が垂直となるように切削を行っているものの、切削を行った素線1本を取り出してみると、図-9(b)に示すように切削面における鋼材残存箇所には垂直応力の他にせん断力も作用するものと考えられる。そのため、図-8に示すような破断性状の違いが発生したのと考えられる。

この切削したPC鋼棒とPC鋼より線の応力状態の違いが、図-3および図-4に示す荷重-変位関係につながったものと考えられる。腐食PC鋼より線の引張試験においても、今回のように鋭利な破断性状を示した例が示されており⁴⁾、孔食ピットが起点となりこのような鋭利な破断性状を示したのと考えられる。しかし同論文において、すべての腐食PC鋼より線で引張試験を行った場合において鋭利な破断面を示したわけではなく、延性破面を示したものもあるため、その理由についてはさらなる検討を必要とする。

このように、PC鋼より線については局所的にわずかな断面欠損が生じた場合でも、素線に作用する複雑な応力状態が原因で脆性的な破壊を起こす可能性が考えられる。そのため、腐食などによる局所的な断面欠損については、注意が必要であると考えられる。

4. 腐食PC鋼より線との比較

3章では、PC鋼材に人為的に切削を行い、PC鋼材の断面減少量と力学的性質の関係について述べてきた。今回の検討は、実構造物における構造性能評価に役立てることを目的としているため、腐食PC鋼より線の力学的性質と関連付ける必要がある。そのためここでは、本研究で得られた結果と、既往の研究で示される結果との関連性について述べる。

筆者の既往の研究で得られた腐食PC鋼より線の引張試験結果⁴⁾と、今回的人為的に切削を行ったPC鋼より線の引張試験で得られた最大荷重と破断伸びの関係について、重ね合わせてプロットしたものを図-10に示す。既往の研究は塩水噴霧データを用いているが、最大荷重は最大直径減少量に支配され、破断伸びは複数の直径減少による影響はあるもののオーダーは小さいと考えられるため、同一図中での比較を実施した。既往の研究では、腐食による断面欠損量を質量減少率で示しているが、最大荷重と破断伸びの関係は、図中に記入した①と②の2直線で近似できるものと考えられる。図中①で示され

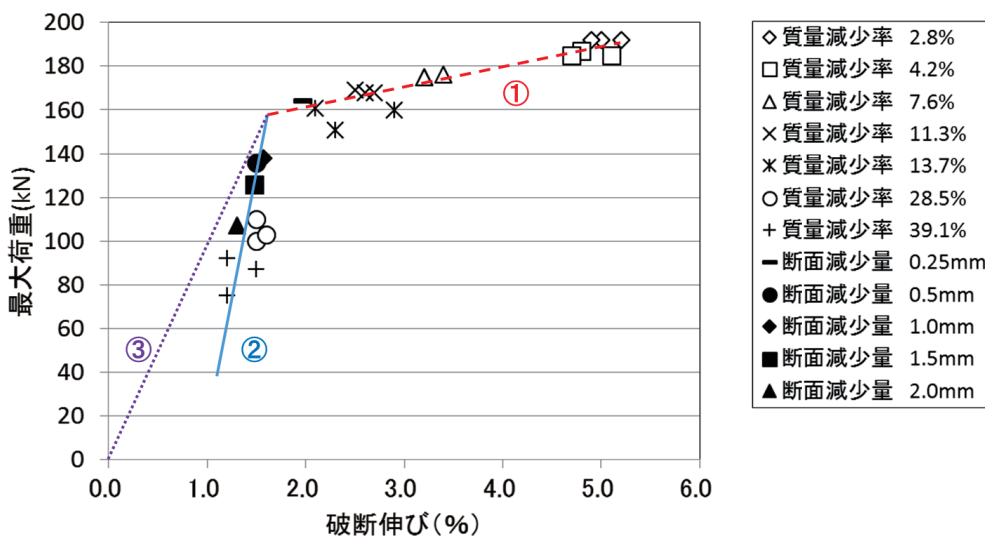


図-10 PC鋼より線の最大荷重と破断伸びの関係
(図中、質量減少率表記しているデータは文献4)より引用)

る近似直線は塑性域において破断するものと考えられる。弾性域で破断したPC鋼より線の近似直線は、通常③の関係を示すと考えられるが、今回の試験におけるPC鋼より線の破断伸びは、つかみ部分の変位から算定している。そのため、本来の引張試験で得られる剛性より小さい値が得られるものと考えられる。そのため、弾性域で破断する近似直線は、図中②の挙動を示したと考えられる。

今回実施した試験結果は、腐食PC鋼より線の引張試験と重ね合わせると腐食が大きく進行した場合に相当するが、最大荷重と破断伸びの関係が腐食PC鋼より線の近似直線内に収まるため、腐食PC鋼より線の挙動と関連性があるものと考えられる。ただし、本試験における断面減少量0.25mmは1素線における直径(約3.5mm)率で示すと10%以下であり、大きくない断面減少量であるが脆性的な破断が生じている。腐食PC鋼より線の事例として引用した既往の研究では、塩水噴霧を行ったため孔食も発達していると考えられるが、PC鋼より線表面において一様な断面減少も生じていたと考えられることから、塩水噴霧初期の段階では、脆性的な破断が生じるような卓越した局所的な断面減少が生じていなかった可能性が考えられる。そのため、腐食PC鋼より線の力学的性質については、このような観点からのさらなる検討が必要であると考えられる。

5. おわりに

腐食PC鋼より線の力学的性質の把握を目的として、人為的に切削を行ったPC鋼より線の引張試験を行った。その結果を下記に記す。

- 1) ほぼ同一直径のPC鋼棒とPC鋼より線に同一の断面減少を与えて引張試験を行った。断面減少量が2.0mm以内の範囲では、PC鋼棒は断面減少量の増加とともに破断伸びの低下が著しかったものの、最大荷重や剛性の低下は確認できなかった。一方で、PC鋼より線については、断面減少量の増加とともに最大荷重が低下する傾向が確認できた。
- 2) 引張試験終了後に、PC鋼材の破断面の確認を行った。PC鋼棒については、いずれの断面減少量においても、延性破壊を示す破面であった。一方、PC鋼より線については、いずれの断面減少量においても、脆性破壊を示す破面であった。
- 3) 今回実施したPC鋼より線の引張試験と、過去に報告された腐食PC鋼より線の引張試験と比較を行った。最大荷重-破断伸びの関係をプロットした場合、その関係を同一近似直線で示すことができるため、その挙動には相関性があることが確認できた。一方で、腐食PC鋼より線と比較すると、今回実施した試験の最大荷重-破断伸びの関係は、断面減少量が比較的小さい場合でも腐食が進行したPC鋼より線の挙動に似た結果を示すため、この原因についてはさらなる検討が必要であると考えられる。

【謝辞】

PC鋼材への加工については、高知工業高等専門学校 竹内修氏に協力をいただいた。

【参考文献】

- 1) 荒巻智, 垣尾徹, 谷村幸裕, 宮川豊章: 鉄道高架橋から採取した中性化と塩化物イオンにより腐食した鉄筋の強度性状, 土木学会論文集E, Vol. 62, No. 4, pp. 777-789, 2006. 11
- 2) 田中良樹, 河野広隆, 渡辺博志, 木村哲士: ポストテンションPC桁の塩害劣化と耐荷力, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 3, pp. 781-786, 2000. 7
- 3) 土木学会コンクリート委員会: 2012年度制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕, 2012
- 4) 近藤拓也, 荒巻智, 西井学, 村田一郎, 宮川豊章: 腐食PC鋼より線の力学的性質と外観変状について, 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, 第12巻, pp. 81-88, 2012. 11