

PC 鋼材の破断に伴う鋼材周界面挙動の分析と耐荷機構への影響評価

東京工業大学 千々和伸浩*

PC 鋼材	破断	付着
プレストレスロス	再定着	相互作用

研究の目的

PC 構造は構造的合理性の高い構造形式であり、コンクリート構造の標準的な構造形式として広く用いられている。ただこの高い合理性ゆえに、PC 構造の核となる PC 鋼材が破断すると構造性能が急激に低下する危険性をはらんでいる。PC 鋼材はシース管内に納めて配置されており、外観からの腐食発生の感知が極めて困難であるため、インフラの経年劣化によって構造物崩壊のリスクが潜在的に生じている可能性がある。この問題克服のためには PC 鋼材の腐食破断によって、部材内にどのような変状が生じるのか、そしてその時に耐荷性能がどのように変化するかを把握し、点検ポイントを重点化してリスクを把握できるようにする必要がある。

PC 鋼材破断の影響に関しては、これまでも幾例かの検討が行われており、PC 鋼材破断時の影響が少しずつ解明されてきているが、まだ不明確な点も多く引き続き知見を集積し、構造化していく必要がある。本研究では構造化のキーポイントである、「PC 鋼材の破断によって、シース管内外でどのような変化が起き、部材としての耐荷機構にどのような影響を与えるのか」という点を明らかにし、既往の研究で得られた知見と統合することで、既存インフラの維持管理の合理化し、安全で安心な次世代社会の構築に寄与することを目指して検討を実施した。

研究の内容

1. ゴム棒を用いた模擬実験による PC 鋼材破断時の付着・すべり挙動の分析

PC 鋼材破断後の残存プレストレス分布と付着特性を正確に評価するため、まずシース管内で PC 鋼材がどのように破断しているのかを分析する必要がある。そこでシース管内と緊張材、グラウトを模擬した試験体で、破断時の現象を直接観察できるよう実験を行い、破断時にシース管で何が起きているのかを直接分析する実験を行った。この実験では PC 鋼材をゴム棒、グラウトを寒天、シース管を塩ビ管に置き換えて模擬実験を行い、破断時の挙動をハイスピードカメラで撮影し、その画像上でゴム棒上の特徴点の動きを追跡することで分析を行った。

分析結果から切断によってゴムが縮むと同時に断面が広がり、最終的に破断面近傍が楔のような形となってグラウト中に固定される様子が確認された。グラウトがな

い状況でゴム棒が破断すると長手方向で一律に緊張力引張力が解放されるが、グラウトがある場合は、切断面が縮むにつれてポアソン変形によって断面が拡大するため、徐々に付着が回復し、一定距離離れた個所で導入緊張力が回復する。

PC より線を模擬した実験からは、一部の素線が破断しても、その素線と接触している周囲の素線やグラウトが滑りを抑制することで滑りが抑制されることが確認された。全素線が破断すると素線間での滑り抑制効果が失われるため、一気に大きな滑りが生じることも分かった。

2. PC より線破断時に生じる素線間相互作用に関する解析的検討

PC 鋼材が腐食等によって破断した場合、プレストレスコンクリート構造物の構造性能は著しく変化してしまう。しかしながら PC 鋼材は部材の内部に配置されるため、実構造物のみならず、実験においてもその破断挙動を直接観測することは難しい。本研究では、FEM 解析を用いてシース管内の 7 本 PC 鋼より線とグラウトを精緻にモデル化し、部材内での緊張状態を模擬した状態から各素線が破断した際に、各素線の応力状態がどのように変化し、コンクリートの緊張する力がどのように変化するかを分析した。

7 本の素線を同時破断させた場合、中央素線のロス区間が外周部の素線よりも大きくなる結果が得られた。中央素線はグラウトと接しておらず、破断に伴うすべりに対する抵抗が小さく、その他の素線に比べてロス区間が大きくなったものと考えられる。

外周部の素線 3 本を同時に破断させた場合の付着ロス区間は 25.5φ となった。このとき素線が降伏しない完全弾性体と仮定すると付着ロス区間は 28.7φ となった。いずれの場合にも破断面付近で破断していない周囲の素線の応力増加がみられた。これは破断した鋼材との接触を通じて、未破断の素線が破断した素線のすべりを抑制しており、その反力として応力負荷が増加したためである。また降伏の有無によって素線破断後の周囲の素線の応力負荷に違いが生じており、降伏がある場合にはロス区間がわずかに大きくなっていた。

撓りのない鋼棒モデルで 7 本同時破断した場合は撓りがある場合と異なり、破断した素線の応力が大きく低下

する結果となった。素線が燃られていることで、絡み合いながら素線が滑り、隣接する素線が受ける抵抗が大きかったためだと考えられる。

3. 2軸拘束応力下におけるPC鋼材の滑り挙動の再現

3.1 鋼材破断モデルの構築とパラメータの同定

PC鋼材のような高強度材料の引張破断時の挙動を予測するため、Johnson-Cook(JC)材料モデルおよびJC破壊モデルによって表現する上で必要になる各種定数の決定法についての検討を行った。本研究では鋼材挙動をJC材料モデルによって載荷開始から応力ピークまでの挙動を再現し、ポストピーク挙動の再現にJC破壊モデルを用いることによって破断までの挙動を表現することとした。特に今回対象としているPC鋼材の破断では、破断時に鋼材やシース管内外で動的に応力場が生じるため、そのことを見越した速度依存性も考慮する必要がある。

本検討では準静的および動的の一軸引張試験を行い、その結果に基づいてその定数を決定する方法を提案した。この提案手法によって決定された各種定数を用いた有限要素解析によって実験で得られたひずみ分布を再現し、その結果と画像相関法によって得られた実測値を比較したところ、異なるひずみ速度下での応答を精緻に再現できることを確認した。

3.2 モルタル中に埋設された丸棒の側圧と引抜き速度を考慮した付着-すべり挙動の実験と数値解析による検討

材料の化学的付着や鋼材とコンクリート間での摩擦の影響を考慮した、グラウトモルタル中における丸鋼の付着応力-すべり構成モデルを提案した。この構成モデルの構築のため、2軸拘束下における高速引抜き試験を行った。得られた実験結果に基づき、グラウト材の特性や引抜き速度、鋼材径、側圧の大きさといった影響も考慮する形でモデル化手法の構築を行った。先行研究におけるコンクリートからの鋼材引抜き実験を、本提案モデルに基づいた有限要素解析によって再現・比較したところ、提案モデルが十分な精度を有していることが確認できた。

4. PC鋼材破断時の周辺鋼材への応力転嫁に関する評価

PC部材では、複数のPC鋼材が配置されるが、一部のPC鋼材で破断が生じると、その素線が縮むと同時に断面が拡幅して再付着することによって、PC鋼材間での応力転嫁が起り、連鎖的に破断が生じる懸念がある。そこで、破断したPC鋼材から周囲の素線への応力転嫁がどの程度生じるのかを数値解析によって検討した。

解析ではコンクリートと緊張材の剛性による影響を検討した。その結果、コンクリートの剛性が低く、緊張材

の剛性が高いほど緊張ロス区間が長くなる傾向が見られた。一方、応力転嫁量についてはコンクリートと緊張材の剛性の変化による明確な傾向は観察されず、両者のバランスによって決定されるものとみられる。初期緊張力の大きさが破断後の応力転嫁量に与える影響も分析した。その結果、緊張応力による付着ロス区間の変化は少なかったが、転嫁される応力は初期導入応力に比例する傾向があることが分かった。

5 鋼材に沿ったひび割れが付着に与える影響の評価

PC鋼材の緊張時、偏心が生じたりして軸方向にひび割れが生じた場合、鋼材と周囲のコンクリートとの間での一体性が損なわれ、プレストレスが局所的に消失する恐れがある。このようなひび割れが生じた際に、どの程度まで一体性が低下するかを、鉄板によって平面的な亀裂を導入した試験体を用いた引抜き試験によって評価することとした。

実験結果から、人工亀裂の本数が増加しても付着強度の低下は小さいことが示された。ただし鉄筋外周に亀裂が節周辺にある場合、付着強度が大きく低下することが明らかになった。鉄筋が引抜かれる際、節は周囲のコンクリートを押し広げるが、そこに亀裂があるとひび割れの開口が促進されるためである。またひび割れの本数よりもひび割れが鉄筋のどの方向にあるかによって、付着強度への影響が変化することが分かった。亀裂が節周辺にあると、その部分が開口の起点となり、周囲のコンクリートの支圧強度が低下すると考えられる。また付着応力は、亀裂先端から表面までの距離に影響を与えることも確認された。亀裂先端周囲では、亀裂が開口拘束力の弱い方向に向かって延伸するため、コンクリートの厚さが最も薄い方向へ形成されて開口する。

今後の予定

本検討ではPC鋼材の破断によって生じるプレストレスに着目し、その発生範囲や影響について実験と解析を用いて分析することを試みた。一部の構造試験については現在実施中の状況ではあるが、PC破断という動的な現象を数値解析で再現し、その影響を評価するための基礎知見は概ね獲得出来たと考えている。今後は実施中の実験を取りまとめるとともに、一連の結果を整理・体系化し、既設PC部材における鋼材破断時の残存構造的評価精度を高めるとともに、特殊なグラウトや緊張材が用いられた場合の破断の影響についても対応できるように知見を拡張していく必要があると考えている。