

PC鋼より線とグラウトとの付着特性に関する研究

神鋼鋼線工業 (株) 正会員 ○細居 清剛

住友電工スチールワイヤー (株) 市来 隆志

大阪大学大学院 正会員 中塚 佑

1. はじめに

部材変形の把握はこれからのPC構造の性能設計に不可欠であると考えられる。しかし、現状ではPC部材の変形を明確に把握することは出来ておらず、従って設計限界変形時あるいは保証限界変形時における部材耐力を評価することもできていない。その大きな理由の一つに、PC部材の変形に大きく影響して設計上の不可欠な基礎知見である、PC鋼より線とグラウトとの付着特性がほとんどわかっていないことが挙げられる。

本研究ではPC部材の性能設計に必要なPC鋼より線の付着強度を測定するための試験方法を再検討し、実際の部材に近い状態を簡便に再現できる試験方法を提案した。また、試験結果から付着機構を明確化し、付着特性のモデル化を試みた。

2. 付着強度試験方法の再検討

2.1 従来の試験方法

従来のPC鋼より線の付着強度試験方法を図-1に示す。この試験方法の場合、グラウトに形成されたより線の溝に沿って、PC鋼より線は自由に回転しながら抜け出てくる。しかし一般構造物においては、PC鋼より線は回転が拘束された状態にあるため、より線全体が一様に回転しながら抜け出す事は無い。従って、より線の抜出しに伴ってより線のよりが戻ろうとし、さらに捻りピッチが伸びようとする事によって、より線の外層線とグラウトに形成された溝との間に発生する側圧力が抜出し荷重に影響を与えたと考えられる。一方、従来の試験方法では、このより線の戻り量が余長部に分散されるため、余長部の長さが長いほど、よりが戻ろうとする力は弱まる。すなわち、この試験方法では引抜き荷重は余長部の長さに影響を受けることが予想される。そこで、本研究では余長部の長さを要因とした付着強度試験を行った。

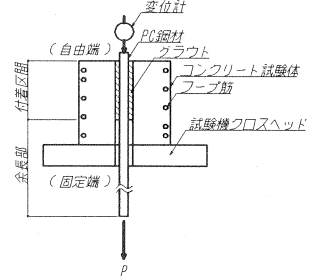


図-1 従来の試験方法

コンクリート試験体寸法を $200 \times 200 \times 200\text{mm}$ とし、その他の条件は

JCIの引抜き試験方法(案)に準拠するものとした。鋼材はPC鋼より線15.2mmを使用し、余長部の長さは45mm(記号:S)および735mm(記号:L)の2水準、付着区間は200mm、付着応力度を算出する際の付着面積は鋼材の公称径 $\phi 15.2 \times \pi \times 200 = 9550\text{mm}^2$ とした。試験結果を図-2に、付着機構を図-3に示す。

試験の結果、付着応力の初期ピーク値、および最大付着応力共に、余長部長さ45mmの方が大きくなった。これは余長部が短い場合、

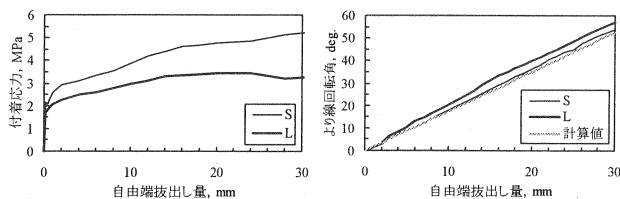


図-2 従来の試験方法で余長部長さを変えた場合の付着応力および自由端回転角

余長部が長い場合 余長部が短い場合

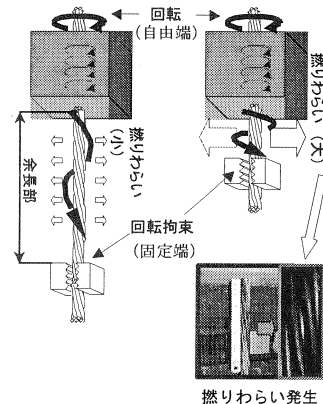


図-3 従来の試験方法で余長部長さを変えた場合の付着機構

より線の戻り量が十分に吸収されず、「撚りわらい」が生じてしまい、より線とグラウト材との接触面での腹圧が急激に大きくなったためであると考えられる。また、いずれの試験体も自由端の PC 鋼より線の回転がほぼ撚りピッチを基にした計算どおりの回転を示した。

以上の結果より、従来の試験方法では余長部長さが付着応力に影響してしまうこと、およびより線が自由に回転してしまうことから、付着特性を正しく評価することは出来ないことがわかった。

2.2 提案試験方法

本研究では、実際の部材における条件、すなわち、より線の抜け出しに伴う回転拘束とそれに起因する撚りわらいにおよぼす初期緊張力の影響を考慮でき、かつ比較的簡便に実施できる付着試験方法を提案した。試験装置を図-4に、試験の手順を以下に示す。

- 1) シースを配置したコンクリート試験体に PC 鋼より線を挿入する。
- 2) PC 鋼より線を試験フレームに緊張・定着する。
- 3) 試験装置全体を立てた状態で、シースにグラウトを注入する。
- 4) グラウト強度が目標値に達するまで、立てた状態で養生する。
- 5) センターホールジャッキ、PC 鋼棒、載荷板を用いてコンクリート試験体を移動させる。

試験には、PC 鋼より線 15.2mm を使用し、要因は、グラウト強度、初期緊張力の有無とした。より線の抜け出し量は、試験体端面より 50mm 離れた位置で、より線に固定した変位計を用いて、試験体端面との相対変位として測定した。付着応力の算出は従来の試験方法と同様とした。

試験の結果を図-5, 6, 7 に示す。全体としては従来の試験方法と同様に、付着応力は初期ピーク値を迎えた後、一旦低下し、再び増加していく付着挙動を示すが、初期緊張力の違いにより τ が異なった値を示した。これは緊張力により、撚りピッチが変わるためであると思われる。また、グラウト強度が高くなるにつれ、概ね付着応力も大きくなっている。試験後のグラウト部の状況を写真-1 に示す。グラウトにはより線によって形成された溝が残存しており、供試体の両側でのより線回転角がほぼ同じであることから、異径鋼棒のようにグラウトの溝を破壊しながら抜け出すのではなく、緊張力を与えた状態でも、線自身がねじれながら抜け出してくることが確認できた。また、回転角が計算値よりも小さくなっていることから従来の試験方法とは異なり、緊張力による回転拘束の影響が十分反映されていることがわかる。

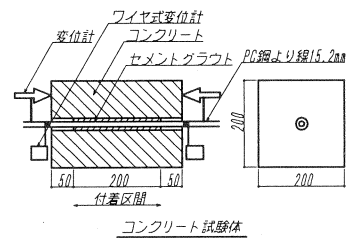
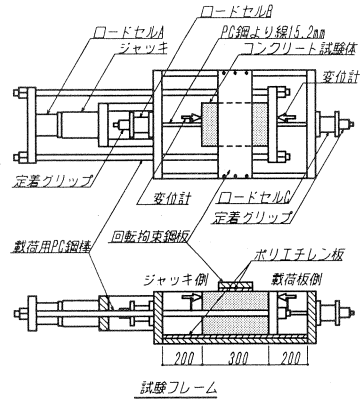


図-4 試験装置

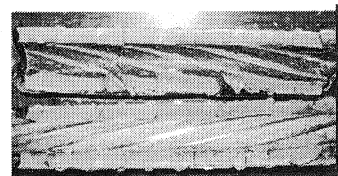


写真-1 試験後のグラウト

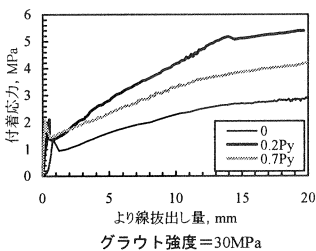


図-5 初期緊張力別による付着応力と抜け出し量の関係

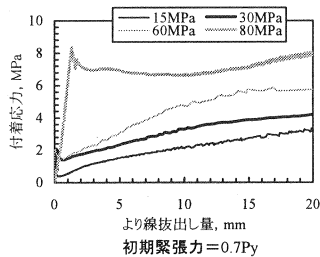


図-6 グラウト強度別による付着応力と抜け出し量の関係

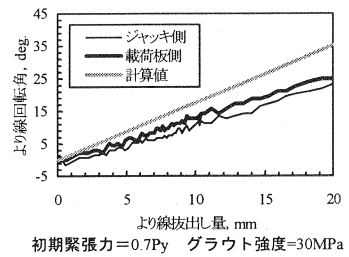


図-7 より線回転角とより線抜け出し量の関係

3. 付着特性のモデル化

3.1 正負交番繰返し試験

付着特性のモデル化を行うため、提案試験方法と同様の試験装置、条件にて正負交番繰返し载荷を行った。

供試体は最も一般的な条件を想定し、グラウト強度 $\sigma_g = 30\text{MPa}$ 、初期緊張力 $= 0.7P_y$ (155.4kN) とした。

試験装置を図-8に示す。コンクリート供試体両側にセンターホールジャッキを配置し、コンクリート供試体を繰返し正負方向に移動させた。抜き出し量はフレームに取り付けた変位計にてコンクリート供試体両側の変位を測定した。試験結果を図-9に示すが、繰返し付着応力 τ - 抜き出し量 S 関係には次のような特徴がみられた。

①付着応力 τ は単調载荷時と同様に、より線の抜け出しがほとんど起きていない状態で初期ピークを迎えた後、一旦低下し、増加した。②荷重を除荷し、逆方向に载荷した時にはピークは出現しなかった。③その後の繰返し载荷に対し、約 1MPa の Y 軸切片をもつ、ほぼ同一の鼓型状の τ - S 関係を示した。

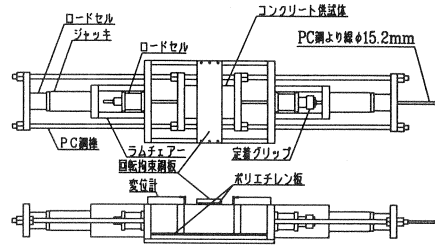


図-8 試験装置

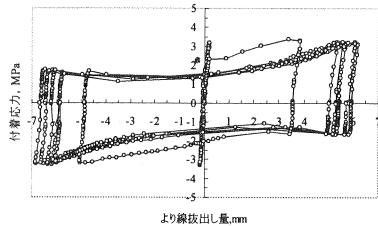


図-9 正負交番载荷時 τ - S 関係

3.2 付着機構の分類

以上の試験結果から、PC 鋼より線の付着機構 (モード) として、図-10 に示す 5 種類を考えた。

(a) と (b) は、より線とグラウトの界面に関する粘着力である。(a) は初期粘着強度に関する付着で、その破壊によって抜け出しが生じる。(b) は (a) が破壊された後も存在する降伏粘着力である。(c) はより線の外層素線間溝部に入り込んだグラウトが破壊される現象に関する付着である (写真1参照)。(d) はより線の抜け出しに伴うべき回転が拘束されるために発生するトルクに起因するより線-グラウト間の摩擦力である。(e) は (d) の作用により、より線がグラウト内で「燃りわらい」「燃り絞り」を起こすことによって、よりピッチやより線径が変化するために生じる腹圧の増加による摩擦力である。

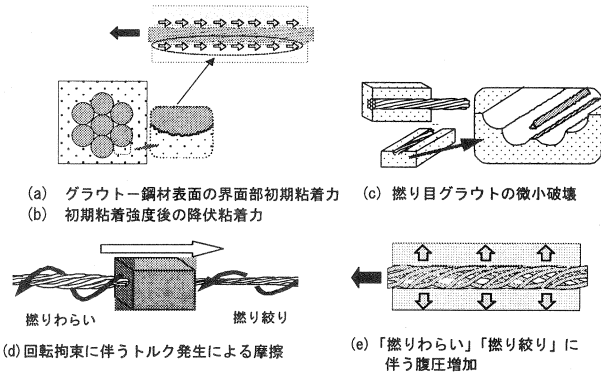


図-10 付着機構イメージ図

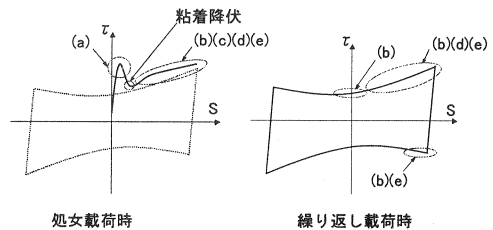


図-11 τ - S 関係

処女载荷時および繰返し载荷時の τ - S 関係を図-11 に示す。処女载荷時の初期ピーク値 (初期粘着強度) は、逆方向载荷時には出現しないことから、一度失うと回復しない抵抗力と考えられる。初期ピーク後、より線表面の粘着力は一気に降伏粘着力まで低下するが、同時に、より線は抜け出し始めるため、処女すべり領域ではモード (c) による付着応力の増加、ならびに (d) および (e) モードによる付着応力増加が起こる。しかし、繰返し载荷時には (c) モードの付着は破壊によって消滅するため、 τ - S 関係は処女载荷時のそれより小さく、また、モード (d)、(e) のみに関係するので、ほとんど同

じ τ - S 関係を示すと推測される。また、繰返し载荷時に Y 軸上の同じ点を通ることは、降伏粘着力は繰り返しの影響を受けないと考えられる。

3.3 繰り返し τ - S 関係のモデル

3.2 項の考察から、図-12 のような繰返し载荷時の PC 鋼より線の τ - S モデルが考えられる。すなわち、第 1 象限ではモード(b)の降伏粘着力を Y 軸切片にして、より線が抜け出すことに起因するモード(d)および(e)の作用による τ の増加が見られる。除荷によって第 4 象限に至ると、第 1 象限で生じた撚りわらい、撚り絞りが解除される方向になるためモード(d)は付着応力に関係せず、モード(e)の解除による τ 減少のみが生じる。しかし、第 3 象限に入ると、第 1 象限とは逆方向の撚りわらい、撚り絞りが生じるため、第 1 象限と同様の τ - S 関係となる図-12 のような鼓型モデルが考えられる。

なお、(b)の降伏付着力は図-6の結果からも推測されるように、より線の種類・形状、グラウトの材料特性に、モード(d)、(e)による付着特性は、より線の種類・形状、初期緊張力などに依存すると予想される。しかし、従来の試験法はその評価に課題があると同時に、主に(a)のデータ採取に止まっているため、今後、提案付着強度試験方法などによって、(b)~(e)モードに関係する試験データを蓄積していくことが必要である。

4. まとめ

本研究から得られた主な結果を以下に示す。

- 1) より線の付着応力-抜け出し機構は、硬化グラウトに形成されたより線のピッチに従って、より線自身が回転することによって生ずるものである。したがって、撚りわらい(撚り絞り)と直接関係する試験時余長部長さや、緊張力を考慮していない従来の PC 鋼より線の付着強度試験方法では、より線の回転拘束状況が実際の部材とは異なるため、付着強度を正當に評価できないことを明らかにした。
- 2) 初期緊張力を導入し、実際の部材により近い状態を再現できる、簡便な試験方法を提案した。
- 3) 提案試験方法および交番繰り返し载荷試験結果により、PC 鋼より線の付着機構(付着モード)を明確化した。
- 4) 各種付着モードに基づく繰り返しモデル τ - S 関係を提案した。

なお本研究は、「グラウト-PC 鋼材の付着特性に関する研究会」(研究会構成：大阪大学大学院 中塚助教授、明石工業高等専門学校 田坂教授、オリエンタル建設(株)、ドーピー建設工業(株)、(株)ピーエス三菱、高周波熱練(株)、神鋼鋼線工業(株)、住友電工スチールワイヤー(株))の活動の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) 小林和夫：コンクリート構造学、森北出版、1994
- 2) 足立将人、高津比呂人、西山峰広：PC 鋼より線とグラウト材間の付着特性のモデル化(その 1 実験概要)、日本建築学会大会学術講演概要集、pp1009-1010、2000.9
- 3) 足立将人、高津比呂人、西山峰広：PC 鋼より線とグラウト材間の付着特性のモデル化(その 2 付着モデルの提案)、日本建築学会大会学術講演概要集、pp1011-1012、2000.9
- 4) 細居清剛、市来隆志、中塚侑：グラウト-PC 鋼材の付着強度試験方法に関する検討、コンクリート工学年次論文集、第 24 巻、第 2 号、pp.811-816、2002.6
- 5) 細居清剛、市来隆志、中塚侑：グラウト-PC 鋼材の付着強度試験方法に関する検討、土木学会年次学術講演会講演概要集、第 56 巻、2002.9
- 6) Takashi Ichiki, Kiyotaka Hosoi, Tadashi Nakatsuka: Fundamental Study on Bond Property between Grout and Prestressing Steels, Proc. of The fib Symposium, 2002.10

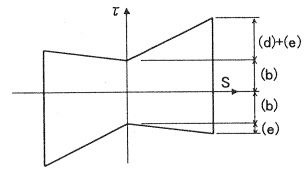


図-12 PC 鋼より線の τ - S モデル