

(技術資料)

橋梁・建築向けプレストレストコンクリート用高性能 PC 緊張材「アフターボンド[®]PC鋼材」

AFTER-BOND Prestressing Steel for High Performance Prestressing Tendons in Bridges and Other Structures



大西睦彦*
Mutsuhiko Onishi



平田誠一郎*
Seiichiro Hirata



山家芳大*
Yoshihiro Yamaga

AFTER-BOND prestressing steel was developed for non-grouting post-tensioning tendons. Each tendon is composed of a single strand coated with cold setting resin (still not yet hardened) and covered with a deformed plastic sheath. The resin hardening time can be controlled and bonded members can be obtained after a certain period of time. Characteristics and development of this steel are described in this paper.

まえがき = プレストレストコンクリート構造は、コンクリート部材に配置された PC 鋼材に緊張力を導入することにより、その反力としてコンクリートにあらかじめ圧縮応力を与えるものである。引張強度が圧縮強度の 1/10 程度というコンクリートの欠点が改善され、圧縮にも引張にも強い部材が得られるため、橋梁の主桁、床版及び建築の梁などの、曲げを受けるコンクリート部材に広く用いられている。

ポストテンション方式の PC 構造物の一般的な施工手順は図 1 (a) に示すようであり、PC 鋼材を緊張したあとに PC 鋼材とコンクリート部材とを一体化し、かつ PC 鋼材を腐食から保護する目的で、シース管の空隙部にセメントグラウトが注入される。この工程は熟練と厳重な施工管理を必要とするが、施工品質を確認する効果的な検査方法が実用化されていないため、必ずしも前記の目的を達成するのに十分な施工が行われていない可能性が懸念される。実際、国内外でグラウト不良に起因する部分的な不具合発生が報告されている。

アフターボンド PC 鋼材は、このような問題点をかかえるグラウト注入工程を不要にした製品であり、この製品を用いる場合の施工手順を、従来の方法と対比して、図 1 (b) に示す。本稿では、当社が世界に先駆けて開発し、性能と実績が評価され、2002 年改訂の土木学会コンクリート標準示方書¹⁾及び日本道路協会道路橋示方書²⁾に「プレグラウト工法」及び「プレグラウト PC 鋼材」という一般名称で記載されたアフターボンド PC 鋼材の諸特性と施工例について述べる。

1. アフターボンド PC 鋼材の概要

アフターボンド PC 鋼材は、図 2 に示すように PC 鋼

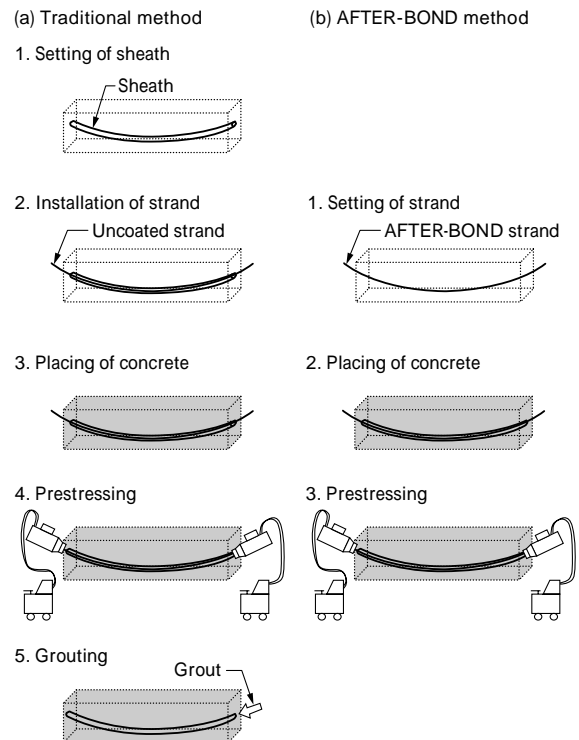


図 1 ポストテンション工事施工手順の比較
Fig. 1 Comparison of post-tensioning procedure

材の表面に未硬化の樹脂を塗布し、その外側に高密度ポリエチレンシースを押し出し被覆して外面及び内面とも形状を凹凸に成型した、シース一体のポストテンション用緊張材である。樹脂には未硬化期間が長い特殊な樹脂を使用しており、現場における使用環境や施工条件に応じた適切な樹脂を選定することで、緊張力導入までは未硬化の状態を維持し、その後時間の経過とともに硬化する。

*神鋼鋼線工業(株) 鋼線事業部 鋼線技術部

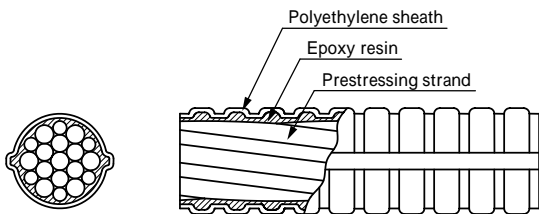


図2 アフターボンドPC鋼より線
Fig. 2 AFTER-BOND prestressing strand

2. 樹脂の諸特性

2.1 樹脂タイプと未硬化状態保持性能

橋梁の主桁のように高強度で体積の大きいコンクリートは、打設直後からセメントと水の反応熱のために発熱し、翌日に80～90℃のピーク温度に達して、2～3週間かけて常温に戻る。一方、PC鋼材への緊張力導入は、一般にコンクリート打設から7日程度経過して強度が発現したあとであり、施工条件によっては、打設から1～2カ月後に行われる場合もある。アフターボンドPC鋼材を橋梁の主桁に適用するためには、これほどの高温にさらされながら、1～2カ月程度は確実に未硬化状態を保持する特殊な樹脂を開発する必要があった。

現在使用している樹脂は、未硬化期間が非常に長い常温硬化性のエポキシ樹脂であり、硬化抑止・解除メカニズムの違いにより、熱硬化型と湿気硬化型に大別される。熱硬化型樹脂はこのメカニズムが温度の影響を受けやすく、湿気硬化型は相対的に温度の影響を受けにくい。

ここでは未硬化状態保持性能を「緊張可能日数」で表し、現在製造されている各タイプ樹脂の温度と緊張可能日数の関係を図3に示す。この図によると、湿気硬化型は60℃の場合90日、100℃では10日間の緊張可能日数を有し、ほとんどの場合この樹脂が適用可能である。熱硬化型は、常温(N)・暑中(M)・高温(H)・超高温(UH)の4タイプがあり、適用可能な温度は90℃以下である。

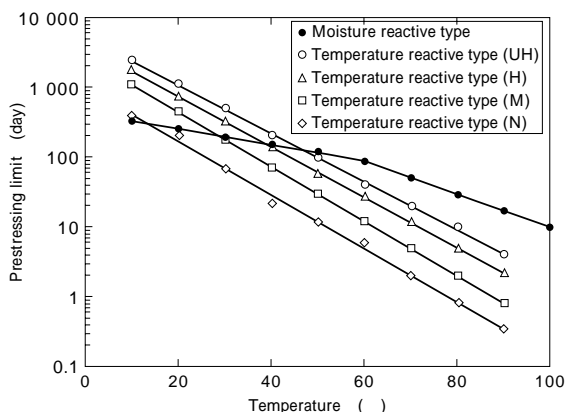


図3 樹脂の温度と緊張可能日数の関係
Fig. 3 Relations between temperature and prestressing limit of resin

2.2 硬化特性

アフターボンドPC鋼材を用いた場合、施工直後はアンボンド状態で、1～2年で付着のある部材に変化し、所定の構造性能に達する。アンボンド状態では曲げ破壊

耐力が付着のある部材の70～85%程度と考えられ、橋梁及び建築物の寿命からみるとごく短期間であるが、破壊に対する安全側の余裕が少ない期間が存在する。この期間はなるべく短い方が望ましいので、緊張力を導入したあとは、一転してなるべく早く硬化することが望まれる。このような観点から樹脂の硬化特性を表すのに、製造日を基点とする「付着強度発現日数」が用いられる。ここで付着強度発現日数とは、道路橋示方書における異形鉄筋のコンクリートに対する許容付着応力度がコンクリート強度40N/mm²の場合2.0N/mm²であることから、付着強度がその1.25倍に相当する2.5N/mm²に達するまでの日数と定義する。

アフターボンド樹脂の付着強度発現日数は、湿気硬化型では9カ月～1年4カ月、熱硬化型では6カ月～2年程度で、温暖な地域ではこの範囲内で日数が少なく、寒冷地では多くなる。同じ地域でも、夏期を中心に施工される場合は日数が少なく、冬期が中心の場合は多くなる。また熱硬化型では、常温、暑中、高温、超高温の各タイプ順に日数が多くなる。

樹脂が完全に硬化するまでの所要日数は、付着強度発現日数の約1.5倍である。完全に硬化した樹脂の強度特性は、表1に示すとおりである。

表1 硬化樹脂の諸特性
Table 1 Properties of hardened epoxy resin

Strength in shear by tension loading (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Compressive strength (N/mm ²)	Surface hardness (HSD)
13.3	31.0	92.8	84.3

3. アフターボンドPC鋼材の特性

3.1 付着強度

樹脂が硬化したアフターボンドPC鋼材が従来のグラウト工法と同等の力学的性能を有することを確認する試験項目のひとつに、コンクリートとの付着強度試験がある。鉄筋とコンクリートとの付着強度を評価するのに、立方体のコンクリートに鉄筋を埋込んで試験機で引抜く「引抜試験」が用いられており、ここではこの方法に準じて、グラウト工法とアフターボンドPC鋼材の付着強度の相違を評価した。

グラウト工法におけるセメントグラウトは注入後7日程度で硬化するが、アフターボンド樹脂は硬化するまで一般に1～2年かかる。このため、橋梁の主桁または床版に適用した場合、硬化が完了する前に供用が開始されることがあり、このような場合、樹脂は硬化途上で活荷重の影響を受ける。そこで、アフターボンドPC鋼材の供試材は、静置して無負荷で樹脂を硬化させたものと、疲労試験機で繰返し荷重をかけながら硬化させたものの2種類を用意し、硬化途上に受けた活荷重が硬化後の付着強度に及ぼす影響についても調査した。PC鋼材の活荷重による引張応力変動振幅は、道路橋の主桁または床版の場合一般に10MPa程度と考えられるが、この試験では活荷重の影響を強調して再現するため、繰返し荷重の振幅をこの約10倍に相当する98MPaとした。また短期間

で試験体を用意するため、樹脂は熱硬化型とし、無負荷及び繰返し荷重を与える供試材とも 温度を約 60 に加熱して促進硬化させた。

付着強度試験用試験体の仕様を表 2 に、結果を表 3 に示す。この結果から 樹脂が硬化したアフターボンド PC 鋼材は、グラウト工法と同等のコンクリートとの付着強度を有し、また樹脂が硬化途中で活荷重の影響を受けても、硬化後の付着強度に影響しないことが明らかになった。

表 2 付着強度試験体

Table 2 Specimens of pull-out test

Identification	Specimens	Resin curing temp.	Cycle stress during resin curing
GR-F	Uncoated strand 21.8 + Corrugate sheath + Cement grout	-	-
AB-F	AFTER-BOND 21.8	60	-
AB-C			Min. stress : 1 086MPa Amplitude : 98MPa Cycle : 4.2Hz

表 3 付着強度試験結果

Table 3 Results of pull-out test

Identification	Average bond strength (N/mm ²)
GR-F	4.1
AB-F	4.5
AB-C	4.3

3.2 硬化確認試験

アフターボンド PC 鋼材は、コンクリート中に埋設され緊張力が導入されるため、実際の使用状態で樹脂の硬化を確認するのは容易ではない。樹脂の電気抵抗の変化から硬化を判定する方法も提案されているが、実用面でやや問題がある。当社では図 4 に示す比較的簡便な試験方法を考案し、後述の工事⁶⁾で採用されて良好な結果が得られた。この方法は、鋼製キャップ側からコンクリートの非破壊検査に用いられるシュミットハンマで打撃を与え、樹脂が未硬化であれば衝撃はゴムキャップまで到達し低い反発度しか得られないが、硬化後には衝撃は PC 鋼材で跳ね返り、高い反発度が得られることを利用したもので、施工から 1 年 3 カ月後に硬化が確認された³⁾。

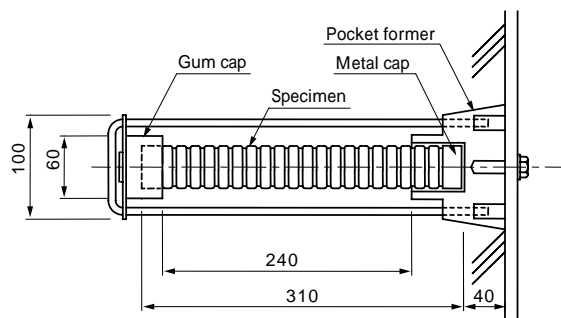


図 4 硬化確認供試体

Fig. 4 Specimen for hardening confirmation

4. 施工例と発展経過

アフターボンド PC 鋼材が初めて新設橋梁に採用されたのは、1992 年の山陽自動車道（福山西～河内間）木門田川橋であり⁴⁾、橋長 296m の PC 箱桁橋の床版横締めケーブルとして採用された。1995 年の北海道縦貫自動車道（長万部～虻田間）ホロナイ川橋では、初めて「鋼少主桁 PC 床版橋」という構造形式が採用され、PC 床版の横締めにあつターボンド PC 鋼材が採用された⁵⁾。この工事は、その後この形式とアフターボンド PC 鋼材との組み合わせが全国的に広まる先駆けとなった。1997 年 9 月に改訂された日本道路公団の設計基準書で、PC 橋及び鋼少主桁 PC 床版橋の横締めは、「プレグラウト PC 鋼材」を標準とすることが明記された。

1999 年 7 月に施工された北関東自動車道広瀬川橋工事駒形高架橋では PC 中空床版橋の橋軸方向主ケーブルに実験工事としてアフターボンド PC 鋼材が採用され、順調に竣工した⁶⁾。2000 年 4 月からスタートした第二東名高速道路敷地高架橋では、初めて PC 中空床版橋の橋軸方向主ケーブルにあつターボンド PC 鋼材が本格的に採用された⁷⁾。2001 年 10 月に財団法人高速道路技術センターから発行された「PC 橋の耐久性向上に関する設計・施工マニュアル」に、内ケーブル方式ポストテンション緊張材はプレグラウト PC 鋼材を用いることを原則とすることが明記された。現在工事中の第二東名・名神高速道路を初め多くの橋梁に全面的に採用され、順調に工事が進んでいる⁸⁾。

むすび=アフターボンド PC 鋼材を用いた場合、前述のように施工直後のある期間は、付着のある部材と比較して曲げ破壊耐力が 15～30%低いと考えられる。このことは例えば、設計荷重満載状態で破壊に対して 2 倍の安全度を有する設計の場合、この期間は安全度が 1.4～1.7 程度であることを意味する。この安全度不足は、鉄筋を追加して補うことができるが、樹脂を短期間で硬化させることができるようになれば、より合理的な設計が可能であり、アフターボンド PC 鋼材にとっての今後の課題である。

参考文献

- 1) 社土木学会：コンクリート標準示方書【施工編】(2002)，p.190.
- 2) 社日本道路橋会：道路橋示方書・同解説 コンクリート橋編 (2002) p.336.
- 3) 財団法人高速道路技術センター：PC 橋の耐久性向上に関する設計・施工マニュアル (2001) 資料編 8, p.9.
- 4) 園田歳文ほか：橋梁，Vol.30, No.4 (1994) p.39.
- 5) 高橋昭一：プレストレストコンクリート，Vol.40, No.2 (1998) p.45.
- 6) 大塚行輝ほか：プレストレストコンクリート，Vol.42, No.3, (2000) p.52.
- 7) 篠原貴ほか：第 10 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，(2000) p.753.
- 8) 本間淳史ほか：橋梁と基礎，Vol.36, No.10 (2002) p.2.