

ノンブリーディング・超低粘性型 PC グラウトの開発とその物性

呉 承寧^{*1}・林 浩志^{*2}・綿貫 輝彦^{*3}・大熊 晃^{*4}

1. はじめに

プレストレストコンクリートのポストテンション部材においては、緊張された PC 鋼材を腐食から保護すると同時に、PC 鋼材とコンクリートの一体化を図るために、ダクト内の PC 鋼材とシースとの隙間には PC グラウトを充填する必要がある。

PC グラウトの充填性を向上するために、近年、高性能減水剤や増粘剤などの混和材料を用いたノンブリーディング・高粘性型または低粘性型の PC グラウトが開発された。しかしながら、これらの PC グラウトを用いても、PC 鋼材とシースとの間の空隙が小さなダクトや、長い連続ケーブル等に注入する場合、PC グラウト施工が非常に困難となることがある。これらの問題を解決するために、ノンブリーディング・超低粘性型 PC グラウトを開発した。本文では、高粘性型、低粘性型および超低粘性型の PC グラウト粘性範囲は、JP 漏斗の流下時間で、それぞれ 14 秒以上、4 秒～14 秒未満、および 4 秒以下とする。

2. 超低粘性型 PC グラウトの開発コンセプト

従来のノンブリーディング・PC グラウトは、通常増粘剤を使用してブリーディングを阻止しているため、粘性の高い PC グラウトになっている。そのため、注入条件によっては PC グラウト充填時の圧力が高くなったり、時間の経過に伴って粘性が増大するなどの施工性に関わる問題が生じることがある。確実な PC グラウト施工を行うためには、ダクトの空隙や長さなどの注入条件によらず、「誰でも、どこでも、いつでもダクトに PC グラウトを確実に注入することができる」ことが重要であり、「水のように粘性の低い PC グラウトであれば注入条件によらず確実な充填が可能ではないか」という着想から、超低粘性 PC グラウトの

開発を行った。

さらに、もうひとつの大きな着目点は、誰でも、どこでも、いつでも高品質の PC グラウトが製造できるために、粉体材料をプレミックス化することである。従来のノンブリーディング・PC グラウトは、セメントに対して PC グラウト混和剤を所定量添加し、さらに PC グラウト温度に応じた練混ぜ水を加えて製造されるが、PC グラウト温度やセメントの銘柄により流動性（粘性）が大きく変化することがあるため、PC グラウトの製造管理は必ずしも容易な作業ではなかった。PC グラウトの粉体部分をプレミックス化することにより、現場では水を計量して練混ぜするだけで所要の品質の PC グラウトが製造できる。また、プレミックス化した粉体材料については、あらかじめ製造工場でこの粉体材料を用いた PC グラウトが所要の品質を満たすかどうかを確認することで、施工現場で PC グラウトの品質不良が生じるおそれを解消することができる。

以上のような製品コンセプトを実現するためにさまざまな材料を選択し、開発したのがノンブリーディング・超低粘性型 PC グラウトである。

3. 超低粘性型 PC グラウトの材料設計

水のような超低粘性とノンブリーディングを両立させるために、超低粘性型 PC グラウトにはポルトランドセメントのほかにシリカ質混和材と粉末高性能減水剤が配合されている。超低粘性型 PC グラウトでは分離抵抗性を確保するために水粉体比を 35% 以下に設定しているが、シリカ質混和材と粉末高性能減水剤の組合せにより、このような低い水粉体比でも粘性が低くかつ分離抵抗性が高い PC グラウトを実現している。使用している粉末高性能減水剤は、セメント系プレミックス製品用に新規に開発されたものであり、セメントおよびシリカ質混和材に対する分散性能が

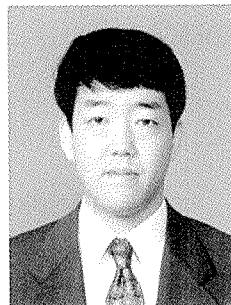
^{*1} Chengning WUオリエンタル建設(株)
技術研究所主任研究員^{*2} Hiroshi HAYASHI太平洋セメント(株)
中央研究所主任研究員^{*3} Teruhiko WATANUKI太平洋マテリアル(株)
開発研究所主任研究員^{*4} Akira OHKUMAオリエンタル建設(株)
技術研究所研究員

表 - 1 超低粘性型 PC グラウト材（粉体）の化学成分

化学成分 (%)									
Ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ⁻
2.2	32.2	2.7	2.8	57.3	0.81	2.1	0.22	0.33	0.009

表 - 2 超低粘性型 PC グラウトの標準配（調）合例および品質例

使用温度範囲 5~35°C	標準配（調）合例			品質例 ^(注)				
	超低粘性型 PC グラウト材	練混ぜ水		JP 漏斗 流下時間 (秒)	ブリーディング率 (%)		膨張率 (%) 20 時間後	塩化物 イオン量 (kg/m ³)
		単位量 (kg/m ³)	水粉体比 (%)		3 時間後	20 時間後		
		1 550	31	480	2.8 ~ 4.0	0	0	0.056

非常に高く、しかも分散性能の温度依存性が小さいという優れた性能がある。そのため、PC グラウトの水粉体比が高い場合でも高い流動性が得られ、さらには PC グラウト温度によらず、ほぼ一定の水量で所要の流動性を確保することが可能である。また、超低粘性型 PC グラウトはシリカ質混和材の配合ならびに低水粉体比の効果により、遮塩性能が従来のノンブリーディング・PC グラウトに比べて高めで高く、PC 鋼材を腐食から保護する上で優れた特性を有している。

超低粘性型 PC グラウトにはこれらの材料のほかに無収縮性を確保するための特殊混和剤などが配合されており、高い流動性（超低粘性）と分離抵抗性（ノンブリーディング）に加え無収縮性にも優れた PC グラウトである。表 - 1 に超低粘性型 PC グラウト（プレミックス粉体）の化学成分を示す。

超低粘性型 PC グラウトは、粉体材料がプレミックスされているため、現場では所定水量と練り混ぜるだけで、安定した品質の PC グラウトが製造できる。表 - 2 に超低粘性 PC グラウトの標準配（調）合例と品質例を示す。

4. 超低粘性型 PC グラウトの特性

超低粘性型 PC グラウトの性能を確認するために、その流動性、施工性、ブリーディング、凝結、収縮、強度、塩化物イオン浸透抵抗性および収縮ひび割れ発生の可能性などの特性を測定し、従来のノンブリーディング・PC グラウトとの比較検討を行った。

4.1 試験の概要

（1）試験用材料

本試験に用いた超低粘性型 PC グラウトは上記のプレミックス超低粘性型 PC グラウト材により製造された。また、比較のために、従来のノンブリーディング・高粘性型 PC グラウトおよび低粘性型 PC グラウトを使用した。各種の PC グラウトはメーカーの標準配合を参考し、表 - 3 に示す配合にした。PC グラウトの製造は、公称容量 150 リットル、回転速度 1 000 rpm のグラウトミキサを使い、練混ぜ量を 100 リットルとし、以下の手順で行った。

練りはじめ

4 分間練り

水 → → → → → 粉体の投入 → → → → → 排出

表 - 3 試験用 PC グラウトの配合

種類	水粉体比 (%)	水 (kg)	グラウト 混和剤 (kg)	粉体 (kg)
超低粘性	31	31	0	100 (プレミックス超低粘性型 PC グラウト材)
高粘性	45	45	1.0 (高粘性型)	100 (普通ポルトランドセメント)
低粘性	45	45	1.0 (低粘性型)	100 (普通ポルトランドセメント)

（2）測定項目

- ① 流動性試験：コンクリート標準示方書「PC グラウトの流動性試験方法（JSCE-F531-1999）」に準拠。
- ② ブリーディング率および膨張率試験：コンクリート標準示方書「PC グラウトのブリーディング率および膨張率試験方法（ポリエチレン袋方法）（JSCE-F532-1999）」に準拠。
- ③ 加圧ブリーディング率試験：" Schupack Pressure Bleed Test " に準拠⁽¹⁾。
- ④ 凝結時間試験：JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準拠。
- ⑤ 圧縮強度試験：コンクリート標準示方書「PC グラウトの圧縮強度試験方法（JSCE-G531-1999）」に準拠。
- ⑥ 割裂引張強度試験：JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験」に準拠。
- ⑦ 鉄筋付着強度試験：JSCE-G 503「引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法」に準拠。
- ⑧ 自己収縮応力試験：JCI 自己収縮委員会報告書「コンクリートの自己収縮応力試験方法（案）」に準拠。
- ⑨ 急速塩化物イオン浸透性試験：ASTM C1202-94「急速塩化物透過性試験方法」に準拠。直径 10 cm、厚さ 5 cm の PC グラウト供試体を材齢 91 日まで封緘養生し、供試体の両端に 30V 電圧を 6 時間印加する。

4.2 試験の結果

（1）流動性

1) 流動性およびその経時変化

超低粘性型 PC グラウトは、図 - 1 に示すように、従来の高粘性型 PC グラウトまたは低粘性型 PC グラウトに比べ、JP 漏斗の流下時間が短く、流動性が高い。さらに、同図より超低粘性型 PC グラウトは高粘性型 PC グラウトおよび低

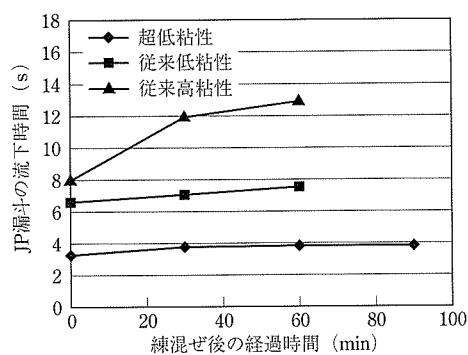


図-1 PC グラウトの流動性とその経時変化

粘性型 PC グラウトに比べ、流動性の経時変化が小さく、可使時間が 1 時間以上と長い。

2) 流動性と温度との関係

超低粘性型 PC グラウトの流動性に及ぼす温度の影響を調べるために、練混ぜ前の使用材料の温度と試験中の環境温度を 5, 20, 30, および 40°C に調整し、超低粘性型 PC グラウトの流動性を測定した。図-2 に示すように、環境温度が 5°C から 40°C まで変化しても、超低粘性型 PC グラウトの流動性には大きな変化がなく、流動性の温度依存性は低いことが確認された。したがって、施工時期などにより、環境温度や材料温度が変化しても、安定したフレッシュ性状が得られる。

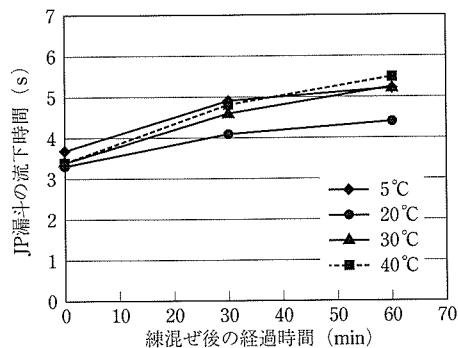


図-2 超低粘性型 PC グラウトの流動性と環境温度との関係

3) 流動性と水粉体比との関係

PC グラウトの注入工事では、セメントおよび練混ぜ水の計量誤差などにより、PC グラウトの流動性が変化する場合がある。そのため、PC グラウトの完全充填を実現するためには、流動性に対する計量誤差の影響が少ない PC グラウトが望ましい。

超低粘性型 PC グラウトの流動性とその水粉体比との関係を図-3 に示す。図に示すように、水粉体比が 28% から 32% まで変化しても、JP 漏斗の流下時間の差はわずか 1 秒内外にとどまり、超低粘性型 PC グラウトの流動性は大きく変化しない。

この結果より、超低粘性型 PC グラウトは、製造現場での練混ぜ水の計量誤差による流動性の変動が比較的に少ないと考えられる。いいかえれば、超低粘性型 PC グラウト

を製造する時、流動性のコントロールは比較的に容易である。

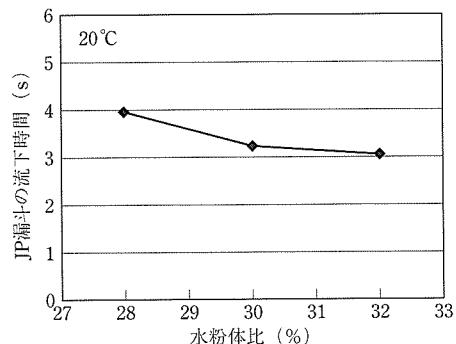


図-3 超低粘性型 PC グラウトの流動性と水粉体比との関係

4) 流動性と練混ぜ時間との関係

図-4 に超低粘性型 PC グラウトの流動性と練混ぜ時間との関係を示す。超低粘性型 PC グラウトの JP 漏斗流下時間は練混ぜ時間が長くなるにつれて短くなるが、練混ぜ時間が 4 分間以上となると変化が少なくなる。よって、流動性の安定した超低粘性型 PC グラウトを製造するためには、4 分間の練混ぜが必要である。

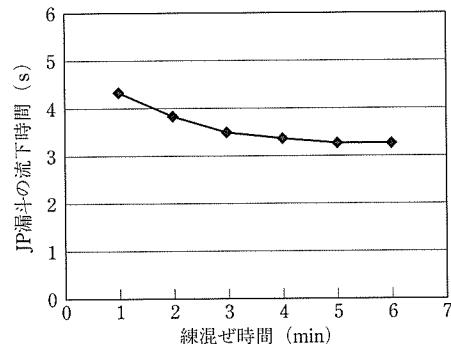


図-4 超低粘性型 PC グラウトの流動性と練混ぜ時間との関係

5) 流動性と練混ぜ量との関係

超低粘性型 PC グラウトの流動性に及ぼす練混ぜ量の影響を調べるために、公称容量 150 リットルグラウトミキサを用い、1 バッチの練混ぜ量を公称容量の 50%, 67% および 100% として、超低粘性型 PC グラウトを製造した。

図-5 に各練混ぜ量における JP 漏斗流下時間の測定結果を示す。超低粘性型 PC グラウトでは、練混ぜ量が公称容量の 50% 以上であれば、1 バッチの練混ぜ量が異なる場合でも、JP 漏斗流下時間はほぼ同等となり流動性への影響は少ない。

6) 流動性とミキサの回転速度との関係

超低粘性型 PC グラウトの流動性に及ぼすグラウトミキサの回転速度の影響を調べるために、グラウトミキサの回転速度をそれぞれ 600, 800 および 1 000 rpm に設定して、練混ぜ時間を 4 分間とし、超低粘性型 PC グラウトを製造

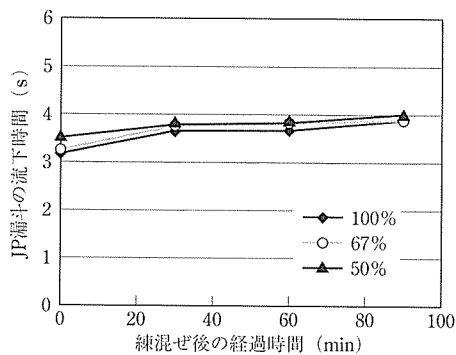


図-5 超低粘性型 PC グラウトの流動性と練混ぜ量との関係

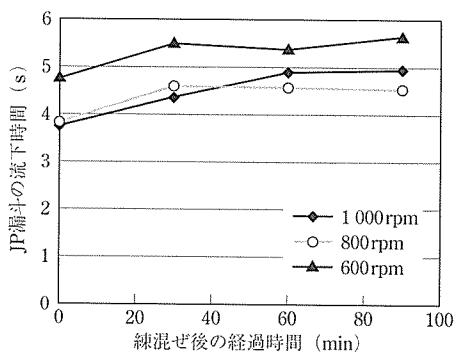


図-6 超低粘性型 PC グラウトの流動性とミキサの回転速度との関係

した。

図-6に各回転速度で製造された超低粘性型PCグラウトのJP漏斗流下時間を示す。ミキサの回転速度が高いほど製造された超低粘性型PCグラウトの流動性は高くなる傾向があり、回転速度が800 rpm以上のミキサを用いれば、所定の流動性が得られる。

7) 各種の漏斗の流動時間の関係

PCグラウトの流動性の測定においてはJP漏斗が標準的に用いられる。しかしながら、粘性の低いPCグラウトの場合、状況によってはJA漏斗を使用することがある。図-7に示すように、超低粘性型PCグラウトのJP漏斗流下時間とJA漏斗の流下時間には直線的に高い相関がある。

(2) ブリーディング率

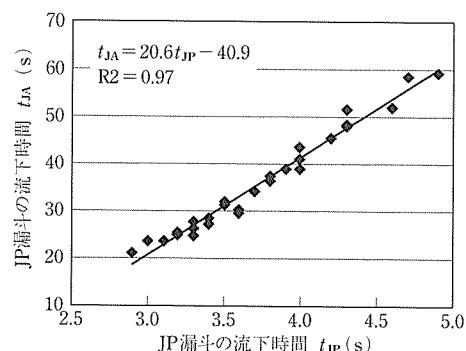


図-7 超低粘性型 PC グラウトの JP 漏斗と JA 漏斗の流下時間の関係

土木学会のコンクリート標準示方書の「PCグラウトのブリーディング率および膨張率試験方法(ポリエチレン袋方法)」に準拠して測定された超低粘性型PCグラウトのブリーディング率は、材齢3時間後と材齢24時間後とともに0%である。

さらに、圧力を受ける場合の超低粘性型PCグラウトのブリーディング抵抗性を調べるために、0.22 MPaの圧力で、超低粘性型PCグラウトと従来のノンブリーディング・高粘性型PCグラウトおよび低粘性型PCグラウトの加圧ブリーディング率を測定した。図-8に示すように、超低粘性型PCグラウトの加圧ブリーディング率は従来のノンブリーディング・高粘性型PCグラウトと低粘性型PCグラウトの中間のレベルである。

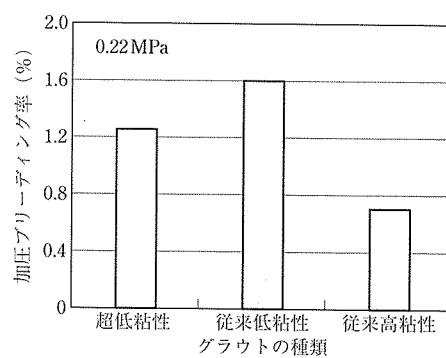


図-8 PC グラウトの加圧ブリーディング率

(3) 凝結時間

超低粘性型PCグラウトの凝結時間は環境温度が高いほど短くなり、この傾向は従来のノンブリーディング・低粘性型PCグラウトと同様である。また、いずれの環境温度においても超低粘性型PCグラウトの凝結時間は従来の低粘性型PCグラウトに比べ短い。

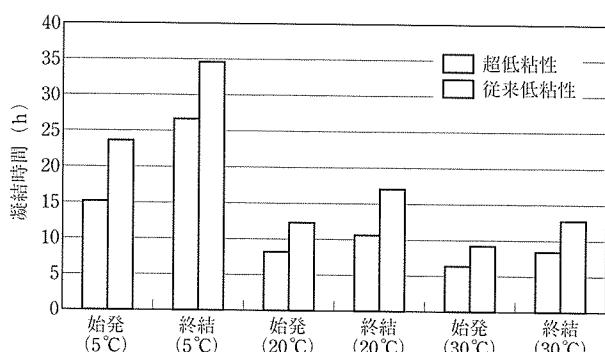


図-9 各環境温度における PC グラウトの凝結時間

(4) 膨張率

非膨張タイプのPCグラウトの膨張率規定値については、土木学会の2002年版「コンクリート標準示方書 施工編」にはとくに規定されていない。図-10に示すように、超低粘性型PCグラウトの膨張率は材齢7日で0%，材齢28日で-0.08%であり、高い無収縮性を有している。

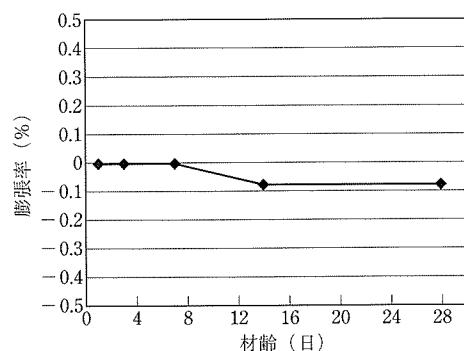


図-10 超低粘性型 PC グラウトの膨張率

(5) 圧縮強度

20 °C の温度で養生した超低粘性型 PC グラウトの圧縮強度を図-11に示す。超低粘性型 PC グラウトの圧縮強度はテストピースの養生方法によって異なる。超低粘性 PC グラウトの圧縮強度は水中養生の場合がもっとも高く、長期間にわたり増加する。

一方、封緘養生した場合は水中養生したものに比べ、圧縮強度が低下する傾向があり、とくに長期材齢では強度がほとんど増加しなくなる。しかしながら、封緘養生した場合でも材齢 28 日における圧縮強度は 70 N/mm² 以上と高く、土木学会の最小規定値 30 N/mm² を大幅に上回っている。

また、超低粘性型 PC グラウトの圧縮強度はテストピースの養生温度にも影響を受ける。図-12に封緘養生した場合の超低粘性型 PC グラウトの圧縮強度に及ぼす養生温度

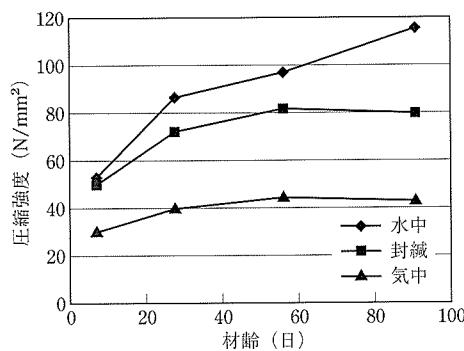


図-11 超低粘性型 PC グラウトの圧縮強度に及ぼす養生方法の影響

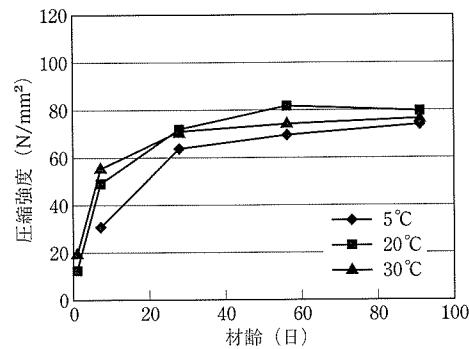


図-12 超低粘性型 PC グラウトの圧縮強度に及ぼす養生温度の影響

の影響を示す。

30 °C の温度で養生された超低粘性型 PC グラウトは 20 °C で養生した場合に比べ、初期材齢における圧縮強度は高くなるが、材齢 28 日以後の長期強度は低くなる。また、5 °C の低温で養生した場合、初期材齢の圧縮強度は比較的低いが、材齢 28 日以後の長期強度は 20 °C または 30 °C で養生したものとほぼ同等となる。

(6) 鉄筋との付着強度

PC グラウトと PC 鋼材との付着強度は PC 部材のコンクリートと PC 鋼材との一体性を確保するうえで、重要な性能である。しかし、PC グラウトと PC 鋼材との付着強度試験において正式な方法がないため、ここで、PC グラウトと鉄筋との付着強度試験によって、各種の PC グラウトの付着強度を比較する。その結果、図-13 に示すように、超低粘性型 PC グラウトと鉄筋との付着強度は 13.5 N/mm² と従来の高粘性型 PC グラウトに比べて約 35 % 高くなっている、優れた付着特性が確認された。

(7) 塩化物イオン浸透抵抗性

PC グラウトは外部からの塩化物イオンの浸透に対する最後の防護壁であるため、PC グラウトの塩化物イオン浸透抵抗性（遮塩性能）は PC 鋼材の腐食防止を図るうえできわめて重要な性能である。図-14 に硬化した PC グラウトの急速塩化物イオン通過性試験の結果を示す。超低粘性型 PC グラウトの通過電荷量は従来の高粘性型 PC グラウトに比べてきわめて小さく、高い遮塩性を有することが明らかとなつた¹⁾。

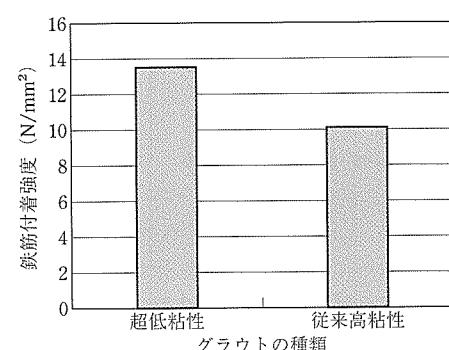


図-13 PC グラウトと鉄筋との付着強度

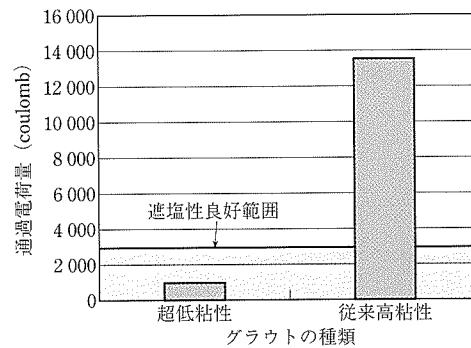


図-14 硬化した PC グラウトの塩化物イオン浸透抵抗性

(8) 収縮ひび割れに対する抵抗性

PC グラウトに自己収縮が生じると PC 鋼材に拘束され、PC グラウトに引張応力が発生する。この自己収縮応力が PC グラウトの引張強度を超えると PC グラウトにひび割れが発生し、外部からの塩化物や、水分および酸素の浸入に対する抵抗性が低下する場合がある。

超低粘性型 PC グラウトおよび従来の高粘性型 PC グラウトに発生した自己収縮による引張応力を図-15に示す。超低粘性型 PC グラウトに発生した引張応力は、材齢につれて緩やかに増加するが、材齢 70 日以後は収束に向かう。

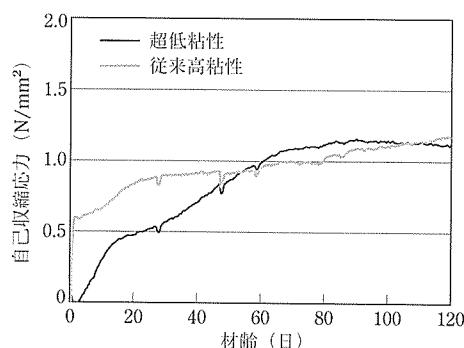


図-15 PC グラウトの自己収縮により発生する引張応力

一方、超低粘性型 PC グラウトと対照的に、従来の高粘性型 PC グラウトに発生した引張応力は、材齢 1 日までに急激に 0.5 N/mm² まで達し、その後は緩やかに増加を続ける。

自己収縮によって発生する最大引張応力は超低粘性型 PC グラウトおよび従来の高粘性型 PC グラウトともに約 1.1 N/mm² である。しかし、実際のダクトに配置される PC 鋼材量が多いため、PC グラウトに自己収縮による発生する引張応力はこの試験値より大きいと考えられる。

また、図-16に示すように、超低粘性型 PC グラウトの引張強度は材齢 1 日で 2 N/mm²、材齢 3 日以後では約 3 N/mm² である。

超低粘性型 PC グラウトの引張強度はいずれの材齢においても自己収縮により発生する引張応力を上回っており、

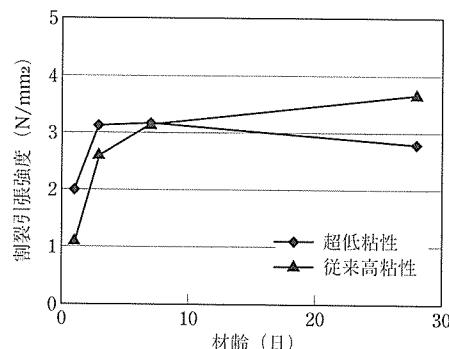


図-16 PC グラウトの割裂引張強度

超低粘性型 PC グラウトに自己収縮によるひび割れが発生する可能性は低いと考えられる。

5. あとがき

超低粘性型 PC グラウトは高い充填性に加え遮塩性能にも優れていることから、PC 構造物の耐久性向上に大きく寄与するものと考える。また、超低粘性型 PC グラウトは、厳選された原材料を工場でプレミックスした材料であり、工場出荷前には所定の性能が確実に得られることを確認したうえで出荷されるため、現場では所定水量で練り混ぜるだけで、常時安定した性能を発揮することができる。しかしながら、超低粘性型 PC グラウトは決してオールマイティな PC グラウトではなく、下り勾配では PC グラウトが先走りして、エアーポケットが形成される可能性もあるため、適確な位置に排気孔を設けるなどの注意も必要である。

また、開発コンセプトを実現するために、結果的には従来品と比べて高価な材料となってしまったことも事実である。しかし、超低粘性型 PC グラウトは、誰がどこでいつも、要求性能を満足できる結果が得られ、施工性が改善されることから、コストアップに見合う結果が得られるものと確信している。

参考文献

- 1) Post-Tensioning Institute, Specification for Grouting of Post-tensioned Structures, First Edition, pp.26-30, 2001

【2002年12月10日受付】