

論文 高流動コンクリートの薄肉高強度 PC 工場製品への適用

長井健雄*¹, 小島利広*², 松下博通*³, 三浦 尚*⁴

要旨: 薄肉高強度 PC 工場製品を縦打ち方式で、効率良く生産するには、低コストの高流動コンクリートが要求される。本研究は早強セメントに石灰石粉（ブレン値 7310 cm²/g）を15~20%添加し、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤と天然多糖類ポリマー溶液を用いた高強度・高流動コンクリートを開発し、室内試験や実機プラントでの製造試験により密に配筋された薄肉 PC 部材への適用性を調べたものである。

キーワード: 高流動コンクリート、高強度 PC 工場製品、石灰石粉、増粘剤溶液

1. まえがき

近年、高流動コンクリートが各種コンクリート構造物の施工に実用化されつつある。コンクリート工場製品についても、省力化、騒音の軽減、作業環境の改善や生産効率の向上などの要請から、高流動コンクリートの導入が急務となっている。高強度プレストレストコンクリート（PC）工場製品を対象とした高流動コンクリート（プレストレス導入時 350 kgf/cm²以上、設計基準強度 700 kgf/cm²以上のもの）としては、筆者らは既に、早強セメントとシリカフェーム（5%添加）の粉体を用い、メラミン系高性能減水剤と増粘剤溶液（天然多糖類ポリマー溶液）を添加した併用系高流動コンクリートを開発し、室内試験や実機プラント製造試験により、現行の製造設備および製造工程で十分実用可能であることを確認している〔1〕。しかし、実用化に向けて、シリカフェームの使用および高性能減水剤の使用量増に伴うコストアップの低減、表面気泡の低減対策などにさらに検討する必要があると思われる。

本研究は、シリカフェームの代わりに石灰石粉（ブレン値 7310 cm²/g）を添加した高強度・高流動コンクリートの開発を目標に、高性能（AE）減水剤および練り混ぜ方法について調べ、さらに、実機プラントでの製造試験により、密に配筋された薄肉 PC 部材への充填性等を確認した。また、板状バイブレーターによる表面気泡の低減効果も合わせて検討した。

2. 試験概要

2.1 室内試験

(1) 使用材料および試験要因

試験に用いた材料の品質を表-1に示す。また、表-2に示す試験要因でフレッシュ性状および圧縮強度に及ぼす影響を調べた。

(2) 高流動コンクリートの練り混ぜ方法

コンクリートの練り混ぜには100リットルパン型強制練りミキサーを用いた。練り混ぜ方法は下記の2方法で比較検討した。

*1 (株)ピー・エス技術研究所主任研究員、工修 (正会員)

*2 三菱マテリアル(株)セメント開発センター主任研究員

*3 九州共立大学教授 工学部土木工学教室、工博 (正会員)

*4 東北大学教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)

- (一括練り) C + SF + S + G (空練り30秒) → + W等 (本練り120秒)
 (モルタル先練り) C + SF (またはLS) + S (空練り10秒) → + W等 (モルタル練り90秒) → + G (本練り90秒)

表-1 使用材料の品質

種類	記号	特性・主成分
セメント	C	早強ポルトランドセメント (比重: 3.14)
混和材	SF	非顆粒状シリカフェーム (比重: 2.44)
	LS	石灰石粉 (比重: 2.73、ブレン値7310 cm ² /g)
細骨材	S	川砂 (比重: 2.73、吸水率: 2.85%、F.M.=2.89)
粗骨材	G	碎石 (比重: 3.03、吸水率: 0.45%、F.M.=6.45 粗骨材最大寸法: 15mm)
高性能AE減水剤	Ad	メラミン系、ポリカルボン酸系
増粘剤		天然多糖類ポリマー溶液

表-2 試験要因

要因	試験範囲
練り混ぜ方法	一括練り、モルタル先練り
細骨材率	45%~57%
石灰石粉添加量	0~100 kg/m ³
単位セメント量	460~550 kg/m ³
増粘剤使用量	0~200 g/m ³

(3) 養生方法

供試体は、現状PC工場における養生条件に合わせて、蒸気養生 (前置き3時間、最高温度60°C×3時間) を行い、脱型後は気中養生とした。また標準水中養生も同時に行った。

(4) フレッシュ性状の評

価試験方法

流動性の評価はスランプフロ

試験で、材料分離抵抗性は最終フロー時間および目視観察で検討した。

2. 2 実機プラント製造試験

(1) 製造試験に用いた薄肉PC部材の形状、寸法

製造試験に用いた薄肉PC部材の形状、寸法は図-1に示す2種類 (最小部材厚4.5mmと6.0mm) で、PC鋼材および鉄筋が密に配置されている。

(2) 製造方法

実機プラントにおける製造試験は、基本的には、工場現有設備や製造工程によって実施した。ただし、増粘剤溶液および高性能AE減水剤 (消泡剤併用) は別計量し、ミキサー投入口から手投入した。練り混ぜはモルタル先練り方法で行い、練り混ぜ時間は室内配合試験と同様、190秒とした。高流動コンクリートは転倒バケツ付き運搬車で搬入して、直接バケツから流し込みを行った。なお、打ち込みは現行の平打ち方式ではなく、製造ラインの有効活用や製品の増産を目的として以前から試みている縦打ち方式を採用した。また、気泡低減対策として、板状パイプレーター (12000VPM、板状部の寸法: 幅120mm×長さ1220mm) の効果も調べた。

(3) コンクリートの品質管理および製品の品質調査

コンクリートの品質管理としては、プラントでの練り混ぜ直後および打ち込み地点において、フレッシュ性状のばらつきを簡単に評価できるスランプフロ試験および空気量の測定を行った。また、打ち込み地点で採取した供試体で圧縮強度を調べた。製品に関しては、表面気泡の発生状況を調べ、製品の切断面における粗骨材分布から高流動コンクリートの材料分離の程度を調べた。

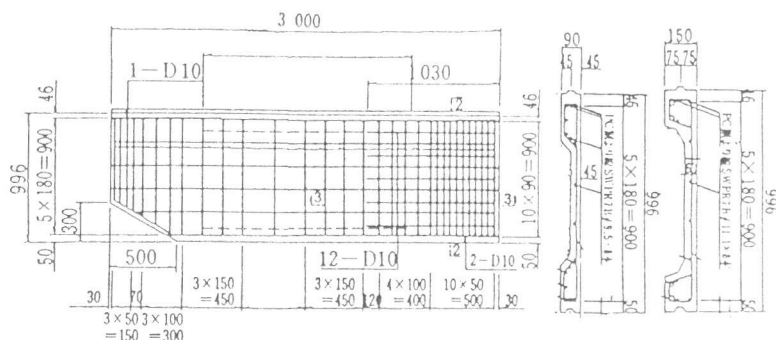


図-1 製造試験に用いた薄肉PC部材の形状・寸法

3. 室内試験の結果および考察

3. 1フレッシュ性状におよぼす各種要因の影響

(1) コンクリートの練り混ぜ方法

シリカフェームを5%添加した配合において、同一スランプフローとするための高性能AE減水剤の使用量は、一括練り方法で3.0%であったが、モルタル先練り方法で2.3%となり、圧縮強度もやや増大した。この結果から、その後の石灰石粉を用いた配合では、すべてモルタル先練り方法で行った。

(2) 細骨材率

シリカフェームを用いた配合では、細骨材率 (s/a) とスランプフローの関係は図-2に示す通りで、高性能(AE)減水剤の種類により、目標フロー(600±50mm)に対する適切な s/a の範囲が変わって来る。これはポリカルボン酸系のもを用いたモルタルの粘性がメラミン系のそれよりも小さいことに起因すると考えられる。石灰石粉を用いた配合では、図-3のように、実験に用いた s/a の範囲(50~55%)では、所要のフレッシュ性状を満足した。この場合、高性能AE減水剤使用量は粉体量 ($C+Ls$) に対する%とした。

(3) 石灰石粉添加量

セメントに石灰石粉を10~20%添加したモルタルのレオロジー特性を調べた予備試験では、塑性粘度は増大するが、降伏値は大きな変化はなかった。このことは坂田らの試験結果[2]でも確認されている。図-4は石灰石粉添加量とスランプフローとの関係の一例である。粉体量 ($C+Ls$) を一定とした場合、石灰石粉添加量を変えてもスランプフローはほぼ一定である。またセメント量を一定とした場合石灰石粉の添加によりスランプフローが増大する。平ら[3]のブレン値 $5220 \text{ cm}^2/\text{g}$ の石灰石粉を用いた研究でも同様な結果が報告されている。これは、($C+Ls$) 一定の場合には、石灰石粉の添加量を増やしても、単位粗骨材量はほとんど変わらないに対して、セメント量一定で石灰石粉を増やす場合、単位粗骨材量は減少するためと考えられる。

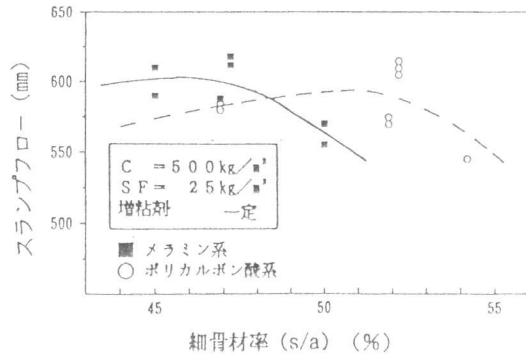


図-2 細骨材率 (s/a) とスランプフローの関係

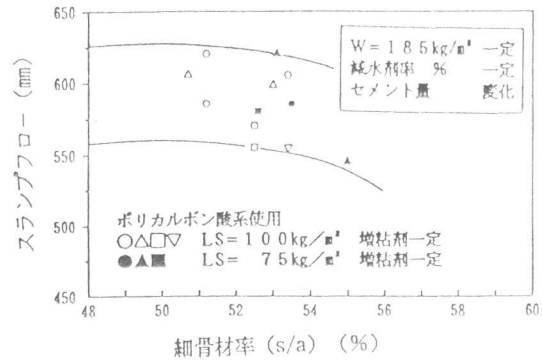


図-3 細骨材率 (s/a) とスランプフローの関係

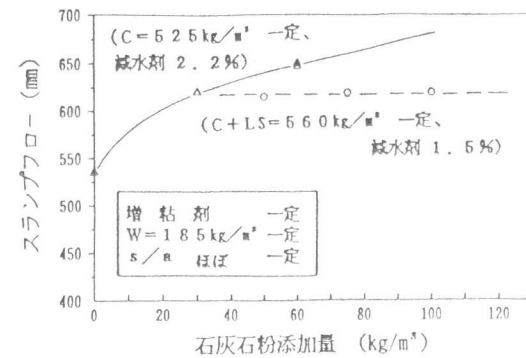


図-4 石灰石粉添加量とスランプフローの関係

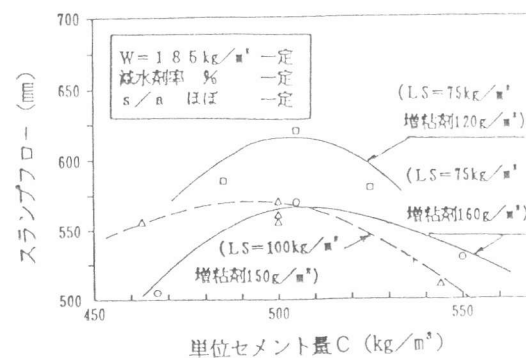


図-5 単位セメント量とスランプフローの関係

(4) 単位セメント量

図-5に単位セメント量とスランプフローの関係を示す。いずれの場合も、セメント量がほぼ 500 kg/m^3 で最大スランプフローを示している。前項の図-4と異なり、粉体量が多くなると流動性は再び低下している。これはセメント量の増加に伴い W/C が低下し、その影響が顕著となったためであろう。このため、セメント量が多くなると、所要のスランプフローを得るために高性能AE減水剤の使用量を増やす必要がある。

(5) 増粘剤使用量

粉体量 ($C+Ls$) を一定とした場合、増粘剤使用量とスランプフローの関係の一例を図-6に示す。目標スランプフロー ($600 \pm 50 \text{ mm}$) に対して、増粘剤使用量は 150 g/m^3 程度となる。もちろん、この数値は、高性能減水剤の種類、使用量や細骨材率によって異なると考えられる。

(6) 増粘剤溶液に関する検討

筆者らは以前から、増粘剤として天然多糖類ポリマーを使用しているが、その添加手法として、アルカリ溶液 (NaOH 水溶液) に一旦溶解させた後に添加する方法 (溶液添加手法) を開発し、その有効性 (少量添加、安定な性状、自動計量可能など) を確認している [1]。図-7に増粘剤溶液濃度と溶液の塑性粘度との関係を示す。現在工場で使われている混和剤の計量設備で自動計量が可能な増粘剤溶液濃度は $1.5 \sim 2.0\%$ 程度と考えられる。

また、増粘剤溶液の保存期間とセメントペーストのレオロジー特性との関係を図-8に示す。これより、24週間保存しても、レオロジー特性 (塑性粘度、降伏値) は急激な変化はなく、品質性能の低下はないと考えられる。なお、4週まで保存した増粘剤溶液によるコンクリートの結果では、スランプフローや材料分離抵抗性にはほとんど変動がないことも確認している。

3. 2 硬化コンクリートの圧縮強度

(1) 石灰石粉添加の効果

石灰石粉添加量とコンクリート圧縮強度との関係の一例を図-9に示す。図より、石灰石粉の添

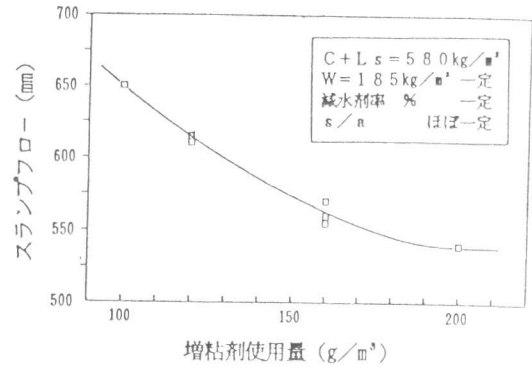


図-6 増粘剤使用量とスランプフローの関係

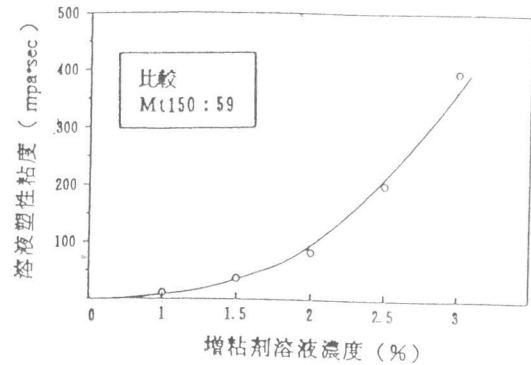


図-7 増粘剤溶液濃度と溶液塑性粘度の関係

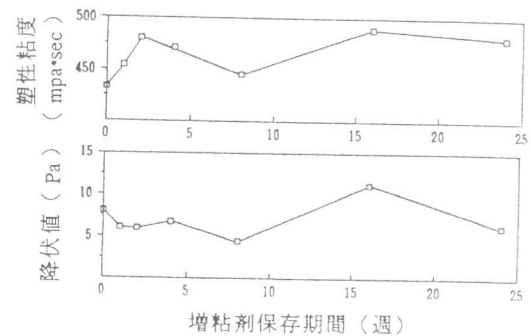


図-8 増粘剤溶液保存期間とセメントペーストのレオロジー特性との関係

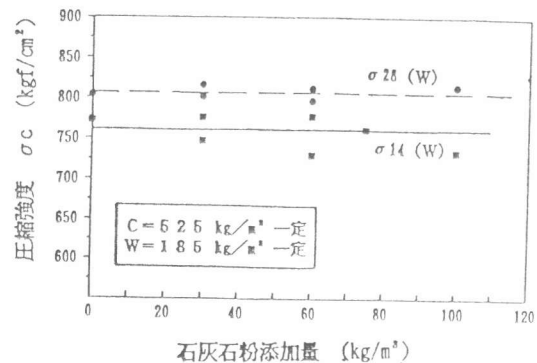


図-9 石灰石粉添加量と圧縮強度の関係

加は、ほとんど圧縮強度には影響を及ぼさないことが分かる。しかし平ら〔3〕の低単位セメント量 ($C = 300 \sim 380 \text{ kg/m}^3$)、高水セメント比 ($W/C = 46 \sim 58\%$) での結果によれば、石灰石粉添加量の増加に伴い、圧縮強度は高くなる傾向にあることが報告されている。筆者らの結果からは、高強度コンクリートでは、不活性な石灰石粉によるフィラー効果よりも、セメント量の効果が支配的であると考えられる。

(2) C/Wと圧縮強度との関係

石灰石粉の添加量を 75 kg/m^3 とした場合の C/W と圧縮強度との関係を図-10に示す。両者の関係はほぼ直線関係にあり、高流動コンクリートの場合でも水セメント比法則が成り立っている。なお、石灰石粉の添加量を 100 kg/m^3 とした場合でも同様な傾向を示した。

以上の室内試験結果から、石灰石粉を添加した高強度・高流動コンクリートとして、表-3に示す配合Aと配合Bの2配合が得られた。配合Aは比較的サラサラ状態で、配合Bは配合Aに比べて多少粘性が高い状態である。配合Bについては、今後検討予定であるポンプ注入用に適する配合と考えられる。

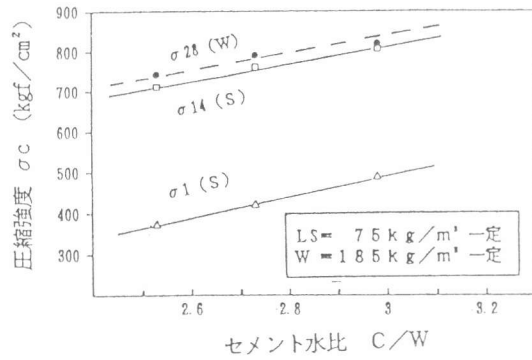


図-10 セメント水比と圧縮強度の関係

表-3 基本配合

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)					増粘剤 (g/m³)	高性能AE減水剤	区分
			C	LS	W	S	G			
A	37.0	52.5	500	100	185	789	866	150	(C+LS)x1.5%	流し込み用
B	36.6	55.0	505	75	185	838	830	160	(C+LS)x1.6%	ポンプ圧送用

(注) 空気量は $2 \pm 1\%$ とし、消泡剤を併用した。

4. 実機プラント製造試験結果および考察

(1) コンクリートのフレッシュ性状

実機プラントで配合Aと配合Bの高流動コンクリートをモルタル先練り方法で製造した。細骨材の表面水率を3.8%として水量補正を行い、 0.5 m^3 の現場配合とした。スランプフローは練り混ぜ直後では、それぞれ560mmと565mmであったが、打ち込み地点ではそれぞれ、630mmと675mmと増大した。しかし、目視観察ではコンクリートの状態が良好で、骨材の分離は認められなかった。また、空気量は打ち込み地点で、それぞれ1.9%と1.6%であった。

(2) 打ち込み

配合Aと配合Bの高流動コンクリートはそれぞれ、最小部材厚45mmと60mmの縦打ち用型枠へ打ち込みを行った。配合Aによる最小部材厚45mm試験体への打ち込みは、天端部の長手方向に3ヶ所設けた投入口から流し込み、コンクリートがほぼ型枠天端まで上昇してから板状バイブレーターを用いて、順次4ヶ所で30秒間ずつ微振動を加えた。配合Bの場合、コンクリートの打ち込み方法の検討のため、投入口の内もっとも端の1ヶ所のみから片押しで流し込みながら、板状バイブレーターを用いて順次3ヶ所で2分間ずつ微振動を加えた。なお板状バイブレーターの微振動による騒音は、現在工場で行われている型枠バイブレーターより、はるかに小さかった。

(3) 製品の品質調査結果

配合Aによる製品の外観を写真-1に示す。その結果、最小部材厚45mmの部位でも充填性は良好で、豆板、ジャンカ等の欠陥は見あたらなかった。製品表面の気泡発生状況は、板状バイブレーターの効果により、平らな裏面は良好な仕上がりがであったが、凹部のある表面の下ハンチ部には現行PC製品と同様に多少気泡が残った。配合Bによる製品の場合、投入口より2mまでの区間は完全に充填され、残り1m程度の区間もほぼ充填されていたが、この区間では若干小さなジャンカが認められた。これは、板状バイブレーターを用いた打込みで、型枠長3mの割りに打込み速度が早くなりすぎ、空気を巻き込んだためである。なお、表面気泡の発生状況は配合Aの場合とほぼ同様な結果であった。また、両薄肉部材の鉛直方向の切断面における粗骨材の分布を調べた結果、粗骨材は均等に分布しており、材料分離はほとんど認められなかった。

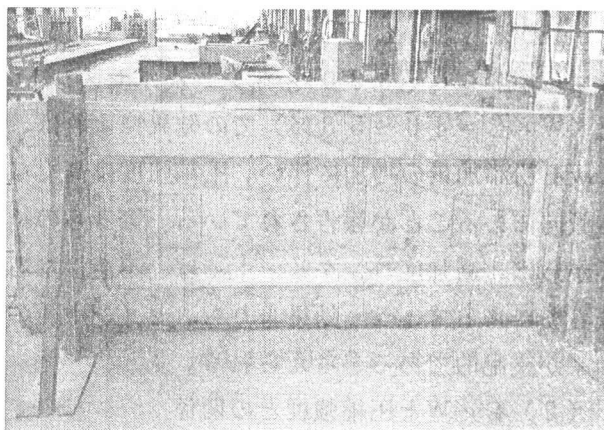


写真-1 試験製造した薄肉PC部材の外観

5. まとめ

本研究は密に配筋された薄肉PC部材を対象に開発した高強度・高流動コンクリートについて実機プラント製造試験で、その品質や充填性、施工性を確認したものである。使用した材料の範囲では、次のことが言える。

- (1) 高流動コンクリートにおける細骨材率の適切な範囲は、使用する高性能減水剤の種類や混和材の種類に依存する。
- (2) 石灰石粉を添加した場合、粉体量の増大につれて、流動性が向上し、高性能減水剤使用量が少なく、コストアップの低減がはかれる。
- (3) 石灰石粉を用いた高流動コンクリートには、 C/W と圧縮強度の直線関係がほぼ成り立つ。高強度コンクリートの場合、石灰石粉は圧縮強度に寄与しない。
- (4) 増粘剤溶液の有効性、長期保存による品質安定性が確認された。
- (5) 板状バイブレーターによる微振動は、表面気泡の低減に効果がある。

現行の製造設備と製造工程で、石灰石粉を添加した高流動コンクリートを用いて高強度薄肉PC部材を製造することは十分可能である。今後実用化に向けて、さらに、硬化コンクリートの耐久性その他物性、季節による品質の変動、運搬、打込み設備の改善、コンシステンシー管理手法の確立、適用可能な構造部材や製造法の追求などの検討を行う予定である。

〔1〕長井健雄ほか：超流動コンクリートの高強度製品への適用性に関する研究、JCI第2回超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集、pp.115~122,1994.5

〔2〕坂田昇ほか：高流動コンクリートの充填性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集Vol.12、No.1、pp.301~306,1990.6

〔3〕平弘毅ほか：石灰石微粉末を用いた高流動コンクリートに関する適用研究（その1基礎的性質）、日本建築学会大会学術講演概要集（東海）、pp.561~562,1994.9