

論文 セメントの種類が吹付けコンクリートの品質に及ぼす影響

中島裕^{*1}・小川洋二^{*2}・杉山彰徳^{*3}

要旨:セメントの種類の違いが吹付けコンクリートの急結性およびポンプ圧送性に与える影響を、モルタルおよびペーストを用いて調べた。セメントには、普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を用いた。その結果、①早強ポルトランドセメントは最も急結性に優れている、②高炉セメントB種は粘性が最も低くポンプ圧送に有利である、ことが明らかになった。その作用機構を考察した結果、普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種の急結性・粘性の違いは、セメントの初期水和速度の違いにともなう結合水量の差により説明できることが分かった。

キーワード:吹付けコンクリート、早強セメント、高炉セメントB種、急結性、粘性

1. はじめに

従来、NATM工法では吹付けコンクリートに普通ポルトランドセメントが用いられており、他のセメントが使用された例はほとんどない。しかし、近年、トンネルの大断面化に伴い、吹付けコンクリートの高性能化が望まれるようになり、早強ポルトランドセメントや高炉セメントB種を用いた吹付けコンクリートが開発されている^{1) 2)}。一方、コンクリートの配合要因であるセメントの種類や水セメント比(W/C)、および混和剤が、吹付けコンクリートの性状におよぼす影響は十分に明らかになっていない。そこで本報告では、吹付けコンクリートの品質として、急結性およびポンプ圧送性に着目し、セメントの種類の違いなどが及ぼす影響を、モルタルおよびペーストを用いて調べた。また、セメントの種類の影響について、その作用機構を考察した。

2. 使用材料および実験方法

2.1 使用材料

実験に使用した材料を表-1に示す。

セメントには、普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、高炉セメントB種の3種類を用いた。

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 早強ポルトランドセメント 高炉セメントB種
急結剤	セメント鉱物系急結剤 (粉末、高強度用)
細骨材	JIS標準砂
混和剤	吹付けコンクリート用減水剤 (主成分：ポリグリコールエステル誘導体)

2.2 実験方法

ホバートミキサを用いてモルタルおよびペーストを練り混ぜ、以下の(1)~(3)を測定した。モルタルおよびペーストの配合を表-2に示す。

なお、参考文献(1)~(2)の吹付けコンクリートの配合に合わせて、モルタルのS/Cは1.10~1.30、

*1 太平洋セメント(株) 東京支店 工修(正会員)

*2 太平洋セメント(株) 研究本部 佐倉研究所 工博(正会員)

*3 太平洋セメント(株) 研究本部 佐倉研究所 工修

モルタルおよびペーストのW/Cは30.0~37.5%の範囲とした。

表-2 配合

モルタル	W/C	30.0~37.5%
	S/C	1.10, 1.20, 1.30
	急結剤	C×5%
ペースト	W/C	30%, 33%, 36%

(1) 急結性

表-2の配合でモルタルを練り混ぜ、注水30分後に急結剤を添加し、ホバートミキサを用いて中速で15秒間練り混ぜ、プロクター貫入抵抗値を測定した。実際の吹付けコンクリートでは、ベースコンクリートの混練からポンプ圧送までの間に30分~1時間程度の練置き時間がある。従って、本実験においても、モルタルへの急結剤の添加は注水30分後とした。

(2) 粘性

吹付けコンクリートのポンプ圧送性は、粘性に大きく影響され、粘性と相関が高いロート流下時間が短いほどポンプ圧送性が良いことが報告されている²⁾。本報告でも、ポンプ圧送性の指標の1つとして粘性を取り上げ、ペーストのロート流下時間により評価を行った。

本報告では、表-2の配合でペーストを練混ぜ、注水30分後に、J14ロートを用いてペーストの流下量が500cm³となる時間を測定した。

なお、上記のペーストは、JIS R 5201セメントの物理試験方法に準じてペーストフローを測定し、フローコンを取り去ったのち落下運動を与えず測定したフロー値(0打フロー)が300±10mmとなるよう混和剤添加量を調整した。

また、吹付けコンクリートでは、ベースコンクリートのみをポンプ圧送し、吹付け直前に急結剤を添加している。従って、ここでも、ペーストには急結剤を添加せずに、ロート流下時間

の測定を行った。

(3) 結合水量

表-2の配合でペーストを練り混ぜ、注水30分後にアセトンを用いて水和を停止し、アスピレーターを用いて恒量となるまで(16時間)乾燥した後、熱重量測定装置(TG)を用いて、質量減少量を測定した。また、同様の手法を用いて未水和セメントの質量減少量を測定し、水和停止試料と未水和セメントの質量減少の差より結合水量を求めた。

なお、上記の結合水量は、炭酸カルシウムの分解による影響を除くため、500℃までの質量減少量から求めた。

3. 結果

3.1 配合が急結性に及ぼす影響

(1) 水セメント比(W/C)が急結性に及ぼす影響

図-1に、高炉セメントB種を用いた場合の、W/Cとプロクター貫入抵抗値の関係を示す。なお、ここでは、S/Cは1.30一定、減水剤添加率はC×0.8%一定とした。

図より、W/Cが小さいほど貫入抵抗値の増加速度は大きくなっている。これは、普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメントを用いた

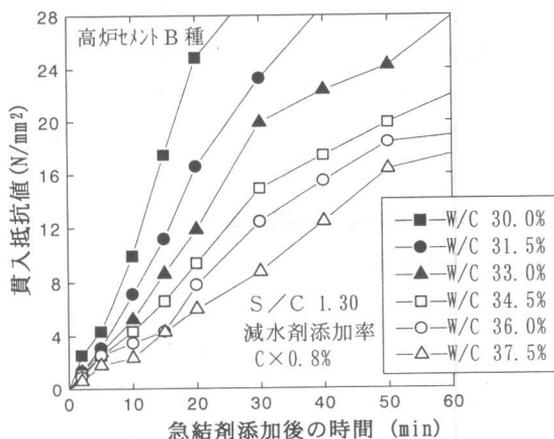


図-1 W/Cと急結性との関係

場合も同様であった。

図-2に、急結剤添加2分後の貫入抵抗値の値と、60分後までの貫入抵抗値の増加速度との相関を示す。なお、貫入抵抗値の増加速度は、以下の式(1)を用いて求めた。

$$\begin{aligned} & \text{貫入抵抗値の増加速度} \\ & = \text{各時間での貫入抵抗値} / \text{時間} \quad (1) \end{aligned}$$

急結剤添加2分後の貫入抵抗値と60分後までの貫入抵抗値の増加速度との間には相関があり、2分後の貫入抵抗値が大きいほど増加速度は大きい。従って、以降では、急結性の評価として、急結剤添加2分後の貫入抵抗値に着目した。なお、以下では、急結剤添加2分後の貫入抵抗値を、2分貫入値と称する。

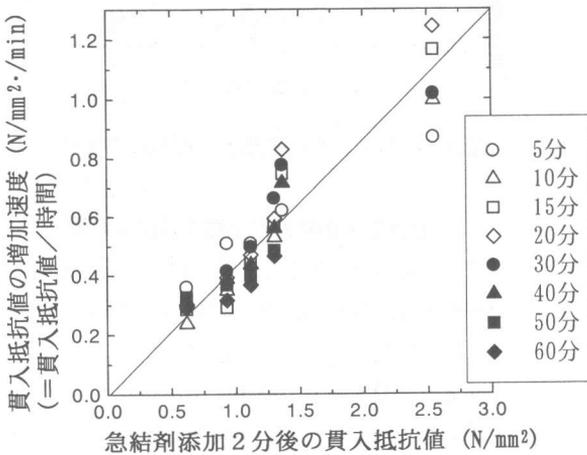


図-2 急結剤添加2分後の貫入抵抗値と60分後までの貫入抵抗値の増加速度との関係

図-3に、W/Cと2分貫入値の関係を示す。

図より、急結性はW/Cに影響されており、ほぼ線形的な関係があることが明らかになった。

(2) S/C (添加した急結剤の単位量) が急結性に及ぼす影響

上記(1)では、S/Cを一定とし、W/Cを変化させているため、単位容積あたりの急結剤量(単位量)はそれぞれ異なっている。図-1に示した範囲では、W/Cが30.0%と37.5%の配合間で差異が最も

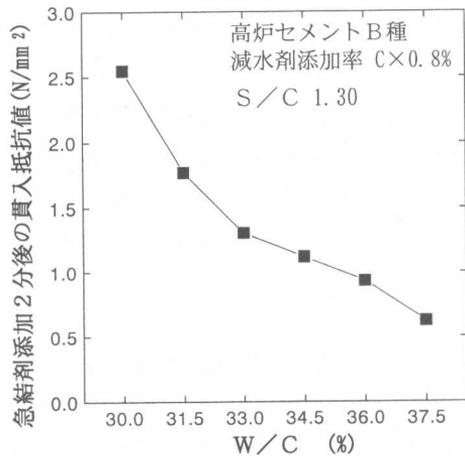


図-3 W/Cが急結性に及ぼす影響

大きく、質量比で6.3%異なる。従って、単位急結剤添加量の差が急結性状に与えた影響を考慮しなければならない。

そこで、本実験では、W/Cを33%一定とし、急結剤添加率をC×5%一定とし、S/Cを1.10~1.30の範囲で変化させることにより急結剤の単位量を変化させ、単位急結剤量の違いが急結性に及ぼす影響を確認した。なお、S/Cを1.10から1.30に変化させることで、急結剤の単位量は、質量比で6.5%の差異が生じる。

図-4に、高炉セメントB種を用いた場合の、S/Cと2分貫入値の関係を示す。なお、

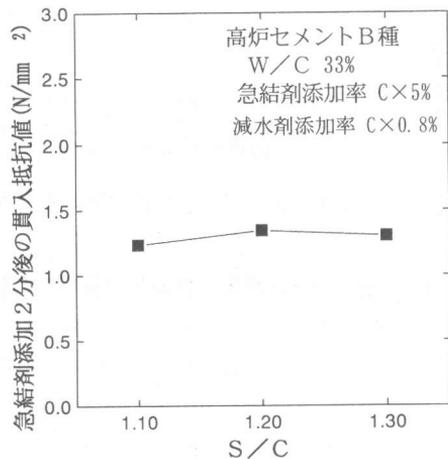


図-4 S/Cが急結性に及ぼす影響

ここでは、減水剤添加率は $C \times 0.8\%$ 一定とした。

図より、 S/C が変化し、急結剤の単位量が変わっても、急結剤添加率と W/C が変化しなければ、急結性は大きくは変化しないことが明らかとなった。従って、(1)における急結性の違いは、急結剤単位量ではなく、 W/C の影響が大きいことが明らかとなった。

(3) 減水剤が急結性に及ぼす影響

図-5に、高炉セメントB種を用いた場合の、減水剤添加率と2分貫入値の関係を示す。なお、ここでは、 W/C は 33% 一定、 S/C は 1.30 一定とした。

本実験で使用した減水剤の添加率と2分貫入値の間に相関は無く、急結性は減水剤添加率には影響されないことが分った。

以上より、吹付けコンクリートの急結性には、減水剤よりも W/C の影響が大きいことが明らかとなった。

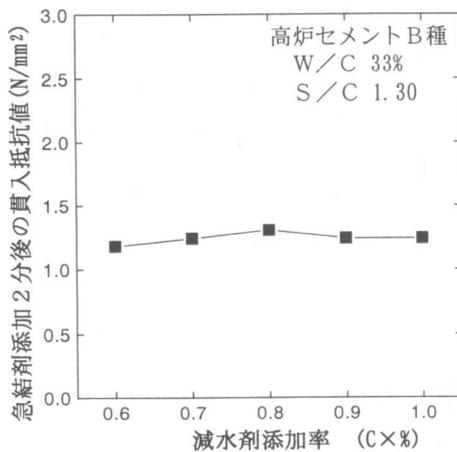


図-5 減水剤添加率が急結性に及ぼす影響

3.2 セメントの種類が急結性に及ぼす影響

図-6に、モルタルの W/C と急結性の関係を示す。なお、前項をふまえて、混和剤の添加率は $C \times 0.8\%$ 一定、 S/C は 1.30 一定で比較した。

図より、セメントの種類にかかわらず、 W/C が大きくなるほど2分貫入値は小さくなり、急結性

が低下していることが確認された。

また、 W/C が同じでも、2分貫入値はセメントの種類により変化した。早強ポルトランドセメントは、同一 W/C の場合の2分貫入値が他のセメントよりも大きく、早強ポルトランドセメントが最も急結性が良いことが分った。

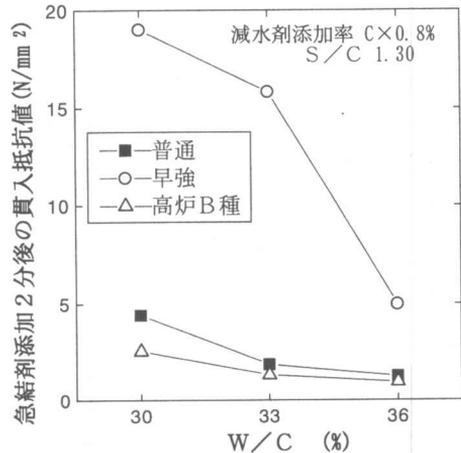


図-6 セメントの種類と急結性との関係

3.3 セメントの種類が粘性に及ぼす影響

図-7に、ペーストの W/C とロート流下時間の関係を示す。なお、前項と同様に、 S/C は 1.30 一定で比較した。

図より、セメントの種類にかかわらず、 W/C が大きくなるほどロート流下時間は短くなり、粘性

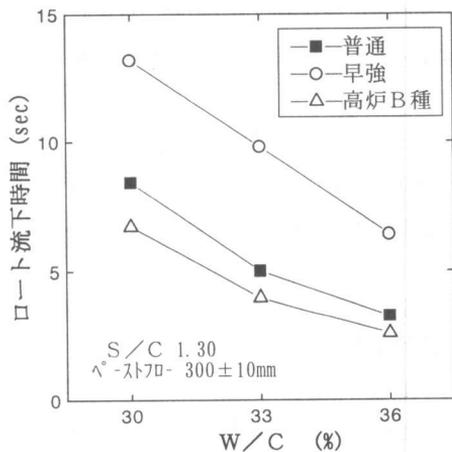


図-7 セメントの種類と粘性との関係

が低下していることが確認された。

また、W/C が同じでも、ロート流下時間はセメント種類により変化した。高炉セメントB種は、同一フロー、同一W/Cの場合のロート流下時間が他のセメントよりも短かく、高炉セメントB種が最も粘性が低いことが分った。

4. 考察

上記より、急結性・粘性はW/Cの影響が大きいことが確認されたので、そのメカニズムについて以下に考察する。

まず、実際の吹付けコンクリートでは、ベースコンクリートの混練からポンプ圧送までの間に30分～1時間程度の練置き時間があり、その間に生じたセメントの初期水和は、自由水/粉体比を変化させ、急結性・粘性に影響を及ぼしているものと推測される(図-8)。この時生じた初期水和は、セメントの種類(普通, 早強, 高炉)により大きく異なるものと考えられる。

そこで、セメントの初期水和による自由水/粉体比の変化と、急結性・粘性との関係を調べた。以降では、自由水/粉体比をW/Pと称する。

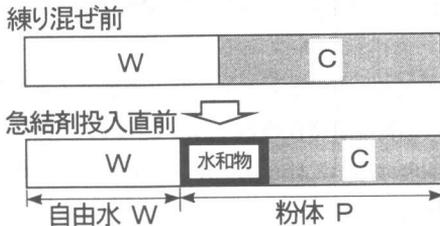


図-8 自由水/粉体比の変化

4.1 結合水量の測定

ここでは、注水30分後の結合水量の測定結果を用い、以下の式(2)を用いてW/Pを求めた。

$$W/P = (W - \text{結合水}) / (C + \text{結合水}) \quad (2)$$

表-3に、結合水量の測定結果とW/Pの計算値を示す。結合水量はセメントの種類によって大きく異なり、同一W/Cでも、W/Pの値に1～3%の違いを生ずることが分った。

表-3 結合水量とW/P

セメント	結合水 (C×%)	W/P		
		W/C30%	W/C33%	W/C36%
普通	1.6%	27.9%	30.9%	33.8%
早強	2.8%	26.5%	29.4%	32.3%
高炉B種	0.6%	29.2%	32.2%	35.2%

4.2 急結性に関する考察

図-9に、W/Pと2分貫入値の関係を示す。図より、同一W/Pの場合の2分貫入値は、早強ポルトランドセメントが最も大きく、普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種の2分貫入値はほぼ等しい。

普通ポルトランドセメントは、高炉セメントB種より水和初期における結合水量が大きいため、同一W/Cでも、急結剤添加直前のW/Pは高炉セメントB種よりも小さくなり、高い急結性を示す。つまり、予めセメントの種類による結合水量の違いを考慮し、急結剤添加直前のモルタルのW/Pを同じとすれば、普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種の急結性は等しくなるものと考えられる。

以上のように、普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種の急結性の違いは、初期水和の違いに起因するW/Pの変化により説明可能であった。

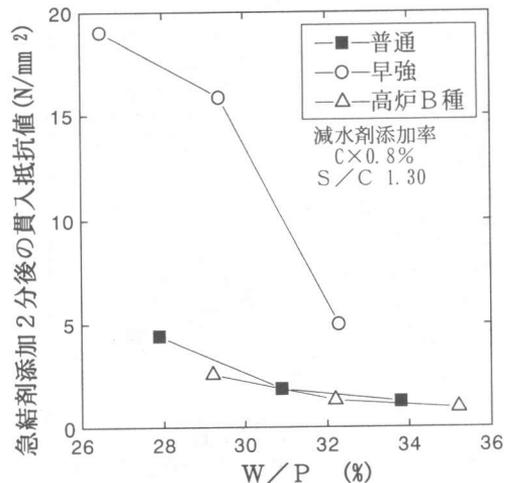


図-9 W/Pと急結性との関係

それに対し、早強ポルトランドセメントは、これだけでは説明できず、急結剤添加後の水和物生成速度に違いを及ぼすセメントの鉱物組成の影響などを検討する必要があると考えられる。

4.3 粘性に関する考察

図-10に、W/Pとロート流下時間の関係を示す。図より、同一W/Pの場合のロート流下時間は、早強ポルトランドセメントが最も長く、普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種のロート流下時間はほぼ等しい。

普通ポルトランドセメントは、高炉セメントB種より水和初期における結合水量が大きいため、同一W/Cでも、急結剤添加直前のW/Pは高炉セメントB種よりも小さくなり、高い粘性を示す。つまり、予めセメントの種類による結合水量の違いを考慮し、急結剤添加直前のモルタルのW/Pを同じとすれば、普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種の粘性（ロート流下時間）は等しくなるものと考えられる。

以上のように、普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種の粘性の違いは、初期水和の違いに起因するW/Pの変化により説明可能であった。それに対し、早強ポルトランドセメントは、これだけでは説明できず、セメントの粉末度や粒度分布などの要因を考慮する必要があると考えられる。

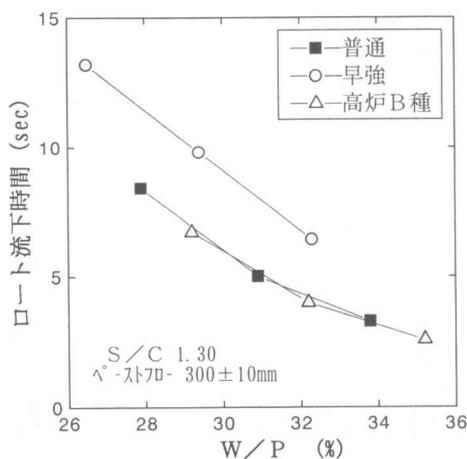


図-10 W/Pと粘性との関係

以上のように、普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種の急結性・粘性の違いは、初期水和に伴うW/Pの変化により説明可能であった。それに対し、早強ポルトランドセメントの場合、同じW/Pであっても、急結性・粘性は共に普通ポルトランドセメントや高炉セメントB種よりも大きく、他の要因を考慮する必要があると考えられる。

5. 結論

配合およびセメントの種類の違いが吹付けコンクリートの品質（急結性およびポンプ圧送性）に及ぼす影響を、モルタルおよびペーストを用いて調べた結果、以下の事柄が明らかとなった。

- ①ポリグリコールエステル誘導体を主成分とする混和剤は、急結性に影響しない。
- ②水セメント比 (W/C) は急結性に影響し、W/Cが大きくなるにつれて急結性は低下する。
- ③セメントの種類により急結性は異なり、早強ポルトランドセメントは急結性が大きい。
- ④水セメント比 (W/C) は粘性に影響し、同一フローでも、W/Cが大きくなるにつれて粘性は低下する。
- ⑤セメントの種類により同一フローでも粘性が異なり、高炉セメントB種は粘性が小さく、ポンプ圧送に有利である。
- ⑥普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種の粘性・急結性の相違は、セメントの初期水和速度の違いに伴う水粉体比の変化により説明できる。

参考文献

- 1) 小川洋二, 結城渡, 山本盛男: 高強度・低リバウンド吹付けコンクリート用粉体急結剤の開発, 土木学会第54回年次学術講演会概要集, V-485, pp. 970-971, 1999. 9
- 2) 杉山彰徳, 綾田隆史, 竹内良: 高強度吹付けコンクリートへの高流動コンクリートの適用(その3), 土木学会第54回年次学術講演会概要集, V-481, pp. 962-963, 1999. 9