

論文

[1026] 初期強度を有する高流動コンクリートの開発

小泉恵介\*1・田澤栄一\*2・川本秀夫\*3・河合研至\*4

1. はじめに

NATM工法による水路トンネルの覆工においては、地山の安定を図るための一次覆工とトンネル表面の粗度改善を目的とした二次覆工を実施するのが一般的である。しかし二次覆工に要求されるのは本来表面部分の平滑さのみであるにもかかわらず、コンクリート打設の施工性から相当量の二次覆工厚を必要とし、力学的・経済的に不合理さを呈している。そのため、一次覆工と二次覆工を兼ね備えた施工法の開発が望まれている。

その一工法として、現在、二次覆工に用いられるセントル移動式工法ならびにプレキャストライニング工法の応用が考えられる。すなわち、岩盤掘削後に型枠を挿入し、地山と型枠の間にコンクリートを流し込むことによって覆工を行う工法である。この工法においてはコンクリートの性能として、締固めを行うことなく地山と型枠の間にコンクリートが充填されること、地山を支持し、なおかつ覆工速度に見合った自立強度が発現していくことが要求される。

そこで本研究では、上記の工法の実用性を検討する第一段階として、極初期に強度を有し、さらに高流動なコンクリートの開発について検討を行った。なお本研究では、極初期に必要な強度として材齢10時間における圧縮強度の目標値を10kgf/cm<sup>2</sup>に設定した。

2. 実験概要

2.1 使用材料と基準配合

極初期強度を発現させるための材料（以下、初期硬化促進材と称す）として、本実験では急硬性セメント鉱物混和材ならびにシリカフェームを使用した。また、流動性を確保する目的から普通ポルトランドセメントの一部をフライアッシュで置換したセメントを主に使用し、一部普通ポルトランドセメントまたは早強ポルトランドセメントを用いた場合について検討を行った。なお、実験で使用した材料ならびに主な特性を表1に示す。

表1 使用材料と主な特性

材料の種類	材料の特性	記号
セメント	普通ポルトランドセメント (比重3.16、比表面積3270cm <sup>2</sup> /g)	N
	早強ポルトランドセメント (比重3.14、比表面積4250cm <sup>2</sup> /g)	H
混和材	フライアッシュ (比重2.27、比表面積3850cm <sup>2</sup> /g)	FA
細骨材	風化花崗岩系山砂 (比重2.57、吸水率1.99%)	—
粗骨材	石英粗面岩 (最大寸法20mm、比重2.67、吸水率0.31%)	—
高性能AE減水剤	ポリアルキルスルホン酸系の複合物 (固形分濃度50%)	Sp1
	特殊高分子スルホン酸塩 (固形分濃度23%)	Sp2
高性能減水剤	ナフタリンスルホン酸塩 (固形分濃度42%)	WR1
分離低減剤	多糖類ポリマー	SC1
	アクリル系	SC2
	メチルセルロースエーテル系	SC3
初期硬化促進材	急硬性セメント混和材 (比重2.90)	Ac
	シリカフェーム (比重2.16、平均粒径0.142μm)	SF

\*1 広島大学大学院 工学研究科構造工学専攻、(正会員)  
 \*2 広島大学教授 工学部第4類(建設系)、工博(正会員)  
 \*3 中国電力(株) 土木部水力計画担当  
 \*4 広島大学助手 工学部第4類(建設系)、工博(正会員)

コンクリートの配合は $W=190\text{kg/m}^3$ 、 $W/C=40\%$ 、 $s/a=45\%$ とし、スランプフロー60~65cm、ならびに高流動コンクリートの分離抵抗性評価方法として松岡ら[1]の提案しているU型充填試験装置における充填高さが30cm以上となるよう、分離低減剤ならびに高性能(AE)減水剤の使用量を調整して決定した[2]。

## 2. 2 実験方法

### (1) 凝結試験

練り上がったコンクリートを5mmふるいでふるい、モルタルを採取しASTM C403「貫入抵抗によるコンクリートの凝結時間試験方法」に準じて試験を行った。

### (2) 加圧ブリージング試験

図1に示す加圧ブリージング試験装置により、ピストン圧に相当する圧力(35kgf/cm<sup>2</sup>)で脱水量と時間の関係を求めることによりポンプ圧送性に関する検討を行った。

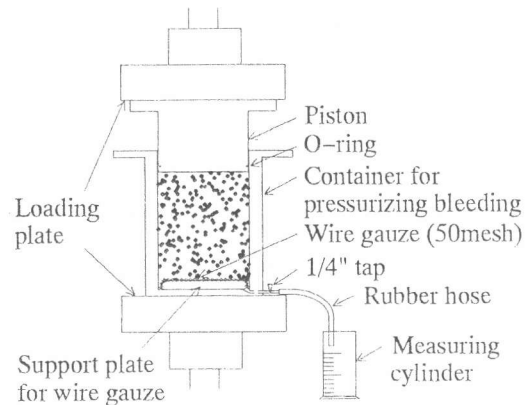


図-1 加圧ブリージング試験装置

### (3) 圧縮強度試験

φ10×20cm円柱供試体を使用し、材齢10時間、3日、28日における圧縮強度を測定した。ただし、10時間脱型が不可能なものは最初の試験材齢を1日とした。また、試験材齢が3日、28日の供試体については材齢1日で脱型後、20℃で水中養生した。

## 3. 実験結果および考察

### 3. 1 結合材料の選定

図-2に結合材料の種類を変化させたコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。ただし、使用した分離低減剤ならびに高性能AE減水剤は、それぞれSc3、Sp1であり、フライアッシュセメントにおけるFA置換率は16%、Ac添加率、SF添加率は、それぞれ20%、10%である。早強ポルトランドセメントを使用した場合、またフライアッシュセメントにSFを添加した場合には、いずれも材齢10時間において脱型不可能であった。すなわち、図に示されるように材齢1日以降といった初期での強度促進効果は期待できるものの、材齢10時間といった極初期での強度の発現性にはこれらの結合材料の組合せが有効でないことがわかった。これに対し、初期硬化促進材Acを用いた場合には、セメントとして普通ポルトランドセメントまたはフライアッシュセメントのいずれを使用した場合も材齢10時間における圧縮強度が目標値を上回る高い強度になっている。これらのことから、材齢10時間で目標とする圧縮強度10kgf/cm<sup>2</sup>を得るため

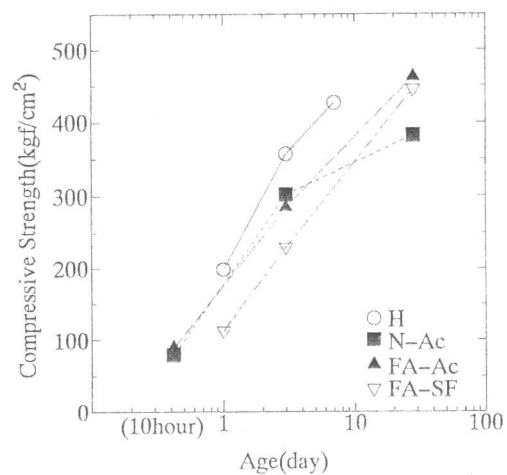


図-2 結合材料の種類異なるコンクリートの圧縮強度

には初期硬化促進材としてA cの使用が必要であることが明らかとなった。

さらに、図-2中のN-A cとF A-A cの組合せについて実施した凝結試験結果より、普通ポルトランドセメントを使用した場合に比較して、フライアッシュセメントを使用した場合の方が1時間強早く終結を迎え、しかも流動性においては練混ぜ後90分以内におけるスランプロスがほとんど見られなかったことから[2]、結合材料の組合せとしてフライアッシュセメントおよび初期硬化促進材A cを選定し以降の実験を実施した。

### 3. 2 初期強度を有する高流動コンクリートの最適化

#### (1) 凝結試験結果

図-3に使用する混和剤の種類を変化させたコンクリートの凝結試験結果を示す。記号は使用した分離低減剤ならびに高性能(A E)減水剤を表しており、F A置換率は16%、A c添加率は20%である。A c無添加のコンクリートにおいては分離低減剤と高性能(A E)減水剤の組合せにより凝結時間に大きな差がみられた。特に、S C 2-W R 1の組合せについては、材齢10時間に至ってもほとんど凝結が進んでいなかった。一方、A cを添加したコンクリートは、すべて材齢10時間以内に終結しており、特に始発以降の硬化が速くなっている。

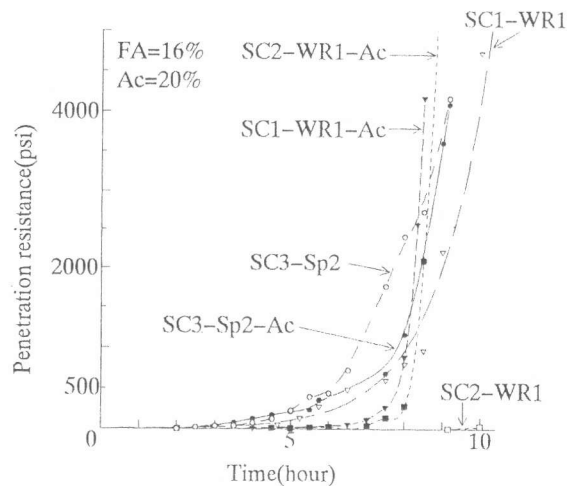


図-3 混和剤の相違による  
コンクリートの凝結時間の関係

続いてF Aの置換率を変化させた際のA cの最適な添加率を検討するため、F A置換率30%および60%のコンクリートについてA cの添加率を変化させた場合の凝結試験結果を図-4に示す。いずれの置換率においてもA c添加率5%が最も早く終結した。そのため、30%以上のF A置換率においてはA cの添加率を5%とした。

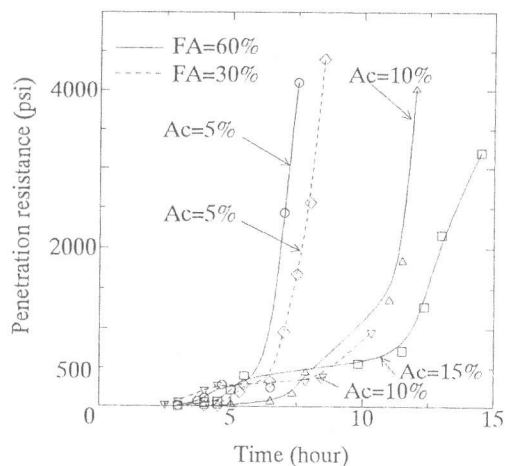


図-4 初期硬化促進材の添加率と  
凝結時間の関係

フライアッシュの置換率を変化させた場合の凝結試験結果を図-5に、A cを5%添加した場合の試験結果を図-6に示す。使用した分離低減剤と高性能(A E)減水剤は、それぞれS C 1、W R 1である。A c無添加の場合、30%以上のフライアッシュの置換率による凝結時間の大きな差は見られず、いずれの置換率の場合にも、概ね10時間前後で終結している。一方、A cを添加した場合には、いずれの添加率の場合でも8.5時間以内に終結しており、無添加の場合より少なくとも1.5時間以上早く終結を迎えている。A cを添加した場合は始発直後から急速に凝結速度が増していることがわかる。

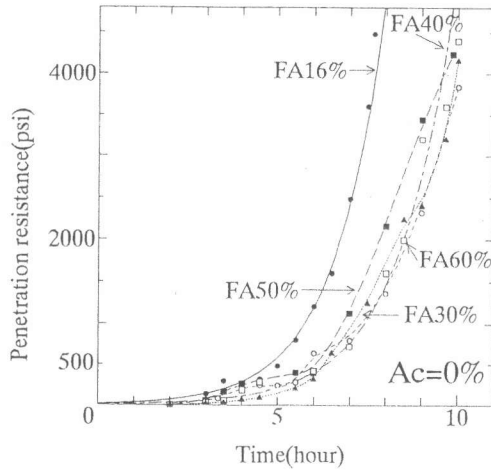


図-5 フライアッシュ置換率と凝結時間の関係 (Ac無添加)

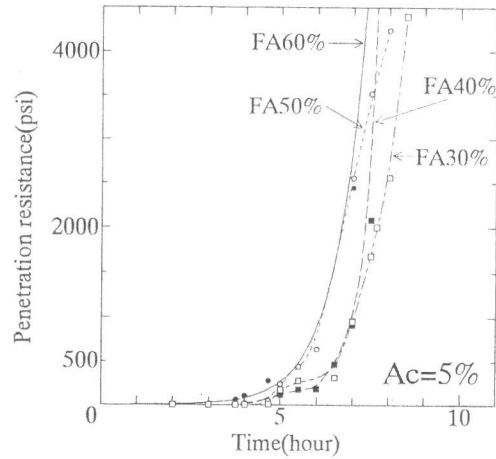


図-6 フライアッシュ置換率と凝結時間の関係 (Ac5%添加)

以上の凝結試験結果からわかるように、始発までの時間においてはAcの有無による違いはほとんど見られず、Acの凝結に与える影響は始発後の水和反応に作用していることがうかがえる。また、Ac添加の場合、フライアッシュの置換率が大きいほど、終結を早く迎える傾向が見られる。すなわち、フライアッシュの置換率が高いということは、換言すれば、セメント量がその分減少することとなり、そのためにセメントに対するAcの添加率が増加することにより、硬化が促進されたのではないかとと思われる。

## (2) 圧縮強度試験結果

使用する混和剤の種類を変化させたコンクリート (FA置換率16%) の圧縮強度の経時変化を図-7、8に示す。なお、図-7は材齢10時間における圧縮強度試験結果の拡大図である。

この結果においても初期硬化促進材の添加により初期強度が増加していることがわかる。特に、SC2-WR1の組合せにおいて初期強度の増加が顕著である。また、SC3-Sp2の組合せ

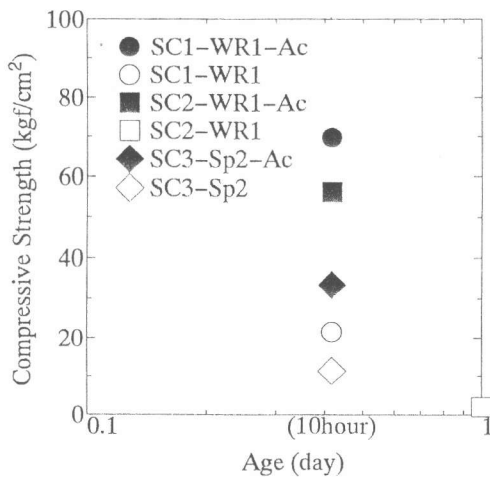


図-7 混和材料の相違による圧縮強度の比較 (FA置換率16%、材齢10時間)

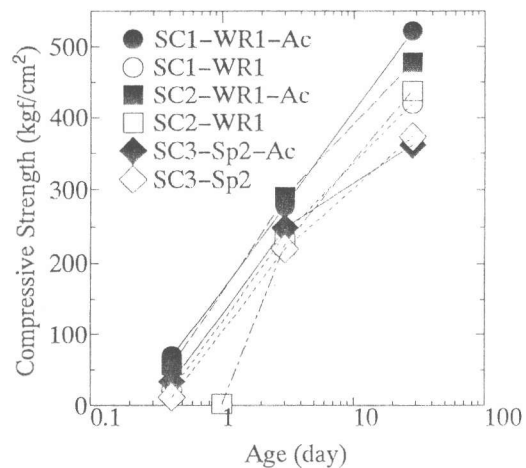


図-8 混和材料の相違による圧縮強度の比較 (FA置換率16%)

においては、A c 無添加のコンクリートが28日強度においてA c 添加のコンクリートを上回っているのに対して、S C 1 - W R 1、S C 2 - W R 1 の組合せではA c 添加による圧縮強度の増進効果が材齢10時間から28日まで続いており、凝結試験結果同様に使用材料により初期硬化促進材A c の効果が異なっている。

次に、A c 無添加でフライアッシュの置換率を変化させた場合のコンクリートの圧縮強度試験結果を図-9、10に示す。材齢10時間における圧縮強度はフライアッシュ置換率が高いほど低下している。特に、F A 置換率が16%のコンクリートに対し、F A 置換率が30%以上の場合は圧縮強度が急激に低下している。しかしながら、フライアッシュを60%置換した場合においても、材齢10時間で脱型可能な状態に硬化している。

また、いずれのコンクリートにおいても材齢が増すにしたがって、圧縮強度も増加しているが、材齢28日においてF A 置換率30%のものがF A 置換率16%の圧縮強度を上回っており、フライアッシュによるポズラン反応が徐々に進行していることがうかがえる。

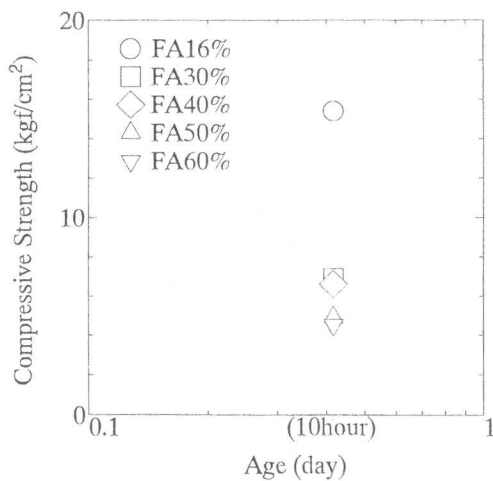


図-9 フライアッシュの置換率が圧縮強度に及ぼす影響 (A c 無添加、材齢10時間)

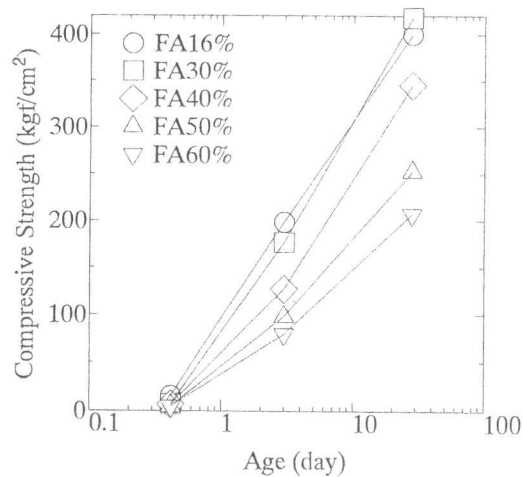


図-10 フライアッシュの置換率が圧縮強度に及ぼす影響 (A c 無添加)

フライアッシュの置換率を変化させて、初期硬化促進材A c を5%添加した場合のコンクリートの圧縮強度試験結果を図-11、12に示す。F A 置換率が高いほど、材齢10時間における圧縮強度は高くなっている。F A の置換率が30%と40%では、圧縮強度にほとんど差が見られなかった。また、F A の置換率が50%の場合は圧縮強度は10kgf/cm<sup>2</sup>と高く、さらにF A 置換率が60%の場合には、F A 置換率16%で初期硬化促進材無添加の場合とほぼ同等の高い圧縮強度を得ることができた。これに対し、材齢3日以降においてはフライアッシュ置換率が高いほど圧縮強度は低くなっている。これは、フライアッシュ置換率の大きい方がセメントの希釈効果が大きくなるためであると考えられる。

初期硬化促進材の添加により凝結時間は短縮されたが、フライアッシュ置換率が30、40%の場合、圧縮強度は初期硬化促進材無添加の場合と同等か、またはそれ以下となっている。A c の添加率をF A 置換率30%および60%における凝結試験結果より定めたが、初期硬化促進材の添加率が5%では、F A の置換率によっては必ずしも極初期材齢における強度を改善するだけの硬化促進を望めない場合があることがわかった。

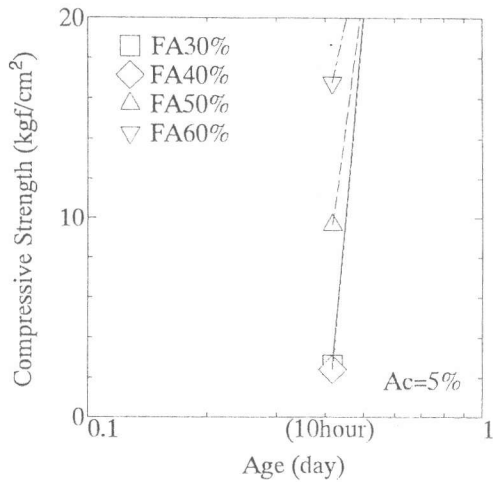


図-11 フライアッシュの置換率が圧縮強度に及ぼす影響 (Ac 5%添加、材齢10時間)

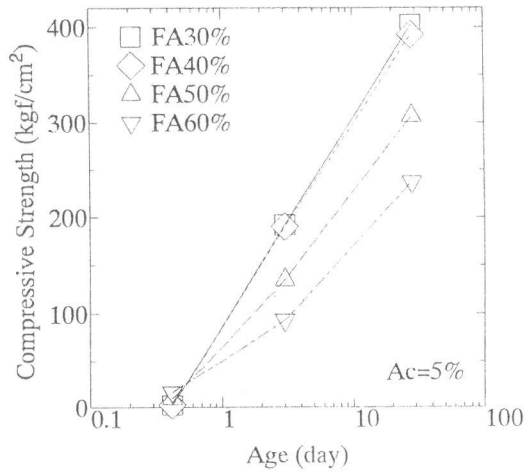


図-12 フライアッシュの置換率が圧縮強度に及ぼす影響 (Ac 5%添加)

### (3) 加圧ブリージング試験結果

以上の結果より初期硬化促進材Acを5%添加し、フライアッシュの置換率を50%または60%とすることによって極初期強度を有し、なおかつ高流動なコンクリートが得られることが確認された。そこで、これらのコンクリートのポンプ圧送性について検討するため、Acを5%添加しフライアッシュ置換率30%および60%のコンクリートについて加圧ブリージング試験を実施した。その結果を図-13に示す。使用した分離低減剤および高性能減水剤はそれぞれSC1、WR1である。いずれのコンクリートにおいても、脱水量の経時変化はポンプ圧送性の可否の目安になる標準曲線BおよびCの間に収まっており、初期硬化促進材を5%添加した高流動コンクリートに関し、フライアッシュの置換率が30~60%の範囲においてポンプ圧送性に問題のないことが明らかとなった。

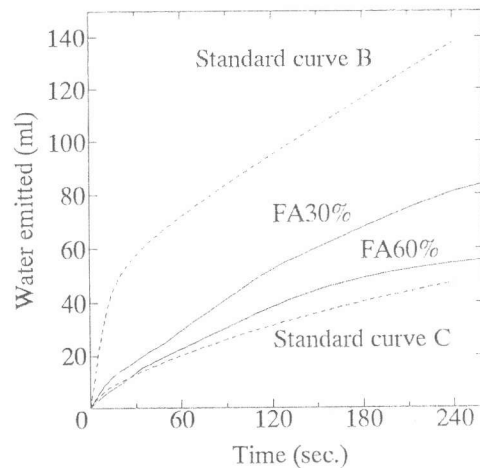


図-13 加圧ブリージング試験結果

### 4. まとめ

- 1) セメント鉱物系の初期硬化促進材の使用により、材齢10時間における圧縮強度が $10\text{kgf/cm}^2$ を上回る高流動コンクリートをフライアッシュセメントにより作製可能であることがわかった。
- 2) セメント鉱物系の初期硬化促進材を使用するとき、フライアッシュの置換率60%以下の範囲においては、置換率を高めるほど大きな初期強度発現性を期待できる。

### <参考文献>

- 1) 松岡康訓：超流動コンクリート、コンクリート工学、Vol.31、No.3、1993.3
- 2) 小泉恵介：初期強度を有する超流動コンクリートの開発、広島大学修士論文、1994