

# 報告 高流動コンクリートのトンネル巻き立て施工実験

谷口秀明\*<sup>1</sup>・増田和機\*<sup>2</sup>・酒井芳文\*<sup>3</sup>・牛島 栄\*<sup>4</sup>

**要旨：**高流動コンクリートを導水路トンネル上半模擬試験体に打設し、巻き立て部への適用性を検討した。使用したコンクリートはフライアッシュを40%置換した2成分粉体系高流動コンクリートである。施工実験によってセントルの移動に必要な早期強度を確保する上で、フライアッシュの置換率等の配合条件が限定されることがわかった。また、巻き立て部の側圧は、最下部において最大でも液圧の4割程度しか作用しなかった。なお、コンクリートの充填性の確認にはコンクリート充填感知センサを用いた。

**キーワード：**高流動コンクリート、フライアッシュ、トンネル、巻き立て

## 1. はじめに

水力発電所の導水路は上ダムから下ダムに水を導くための水路で、発電所の円滑で効率的な運転を行う上で重要な構造物である。トンネル形式は圧力水路とすることができることや高低差を利用した山岳地域で直線的な貫通によって水路延長が短縮されることから、多くの水力発電所で在来工法として構築されている。しかし、供用が開始された導水路トンネルの維持管理は難しく、巻き立てコンクリートの劣化、亀裂あるいは巻厚不足によって改修工事を必要とする事例[1]も見られ、コンクリートの品質並びに充填性の向上に伴う巻き立て部の高耐久化が望まれる。

一方、近年多くの施工実績が見られる高流動コンクリートは、その優れた自己充填性によって締固めなしでも密実に充填できることから、締固めが困難な巻き立てコンクリートの品質を向上できるものと考えられる。筆者らも火力発電所から産出されるフライアッシュの利用拡大を目的に、フライアッシュを多量に含んだ高流動コンクリートの基礎性状の研究を行ってきた[2]。

本報では、フライアッシュを多量に混入した2成分粉体系高流動コンクリートを実物大の導水路トンネル上半模擬試験体（以下、トンネル試験体と称す。）に打設し、コンクリートの充填性、強度発現性、型枠への側圧等について検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2. 1 コンクリートの配合と製造方法

使用材料を表-1に、配合を表-2に示す。使用したコンクリートは、普通ポルトランドセメントとフライアッシュを使用した粉体系高流動コンクリートである。フライアッシュは、事前に実施した室内実験で所定の早期強度が確保できる最大の置換率40%（質量比率）で混入した。単位粗骨材量は空気量を除いた場合の実積率の0.5とし、モルタル中の細骨材の容積比率を42%にした。また、早期の強度発現性を考慮し、施工性から要求される流動性状及びその保持が確保できる範囲でできるだけ少なくなるように高性能AE減水剤の使用量を決めた。

\*1 (株)青木建設 研究所 材料研究室 研究員 (正会員)

\*2 東京電力(株) 電力技術研究所 構造研究室 主任研究員 (正会員)

\*3 (株)青木建設 研究所 材料研究室 副主任研究員 (正会員)

\*4 (株)青木建設 研究所 材料研究室 室長、工博 (正会員)

練混ぜには容量 $3\text{m}^3$ の2軸強制練りミキサを使用し、1バッチ当たり $2.25\text{m}^3$ として材料一括投入した後、2分間練り混ぜた。図-1に示すように負荷油圧値は1分程度の練混ぜ時間で安定することが確認されたが、練り上がり時のスランプフローが安定せず、出荷時の品質管理が難しいことから最終的に練混ぜ時間は2分間に決めた。

## 2. 2 試験内容とフレッシュ性状の目標値

実施した試験内容を表-3に示す。コンクリートの流動性状を把握するためにスランプフロー試験、V<sub>6.5</sub>漏斗（以下、V漏斗とする。）試験及びU型充填試験を実施した。また、ポンプ筒先においてスランプフロー $62\pm 4\text{cm}$ 、V漏斗流下時間 $10\pm 5$ 秒及び空気量 $5\pm 1\%$ が得られるように出荷及び荷卸しの目標値を決めた。

## 2. 3 試験体の形状寸法と施工方法

実験に使用した試験体は、図-2に示す内半径4.1m、長さ10.5m、巻き厚0.4mの実物導水路トンネル（主筋D25を25cm、配力筋D19を30cmの間隔で配筋した。）の上半部分を模擬したもので、2.0%の縦断勾配を有する。横形単動複列油圧ピストン式ポンプ車（石川島建機製IPF-85BH）を使用して125Aの輸送管によって水平換算距離約60mを圧送した。また、コンクリートの打設は内型枠の天端の1ヶ所に設けた打設口から打設速度 $15\text{m}^3/\text{hr}$ 前後で行った。コ

ンクリートの圧縮強度が3.4MPa以上であることを確認した後、セントルの移動、脱型を行った。

## 2. 4 実験での確認事項

表-1 使用材料

| 材料名  | 種類           | 産地、成分、物性など                                   | 記号  |   |
|------|--------------|--|-----|---|
| 水    | 水道水          |  | W   |   |
| セメント | 普通ポルトランドセメント | 比重3.16、比表面積 $3200\text{cm}^2/\text{g}$       | C   | P |
| 混和材  | フライアッシュ      | 常磐火力産、比重2.07、比表面積 $2700\text{cm}^2/\text{g}$ | F   |   |
| 細骨材  | 山砂           | 霞ヶ浦産、表乾比重2.57、F.M 2.55                       | S   |   |
| 粗骨材  | 碎石2005       | 筑波産、表乾比重2.70、実積率60.4%                        | G   |   |
| 混和剤  | 高性能AE減水剤     | ポリカルボキシル酸エーテルと架橋ポリマーの複合体                     | S P |   |
|      | 空気量調整剤       | 変性アルキルカルボキシル酸化合物系陰イオン界面活性剤                   | A E |   |

表-2 配合

| 重量<br>容積<br>区別 | W/P<br>w/p<br>(%) | F/P<br>f/p<br>(%) | s/a<br>(%) | 単位量 ( $\text{kg}/\text{m}^3, \ell/\text{m}^3$ ) |     |     |     |     | 混和剤量 (PxWt%) |        |
|----------------|-------------------|-------------------|------------|---|-----|-----|-----|-----|--------------|--------|
|                |                   |                   |            | W   | P   |     | S   | G   | S P          | A E    |
|                |                   |                   |            |   | C   | F   |     |     |              |        |
| 重量             | 30.0              | 40.0              |            | 168   | 335 | 225 | 712 | 783 | 1.40         | 0.0015 |
| 容積             | 78.1              | 50.7              | 48.9       | 168   | 106 | 109 | 277 | 290 | 1.50         | 0.0020 |

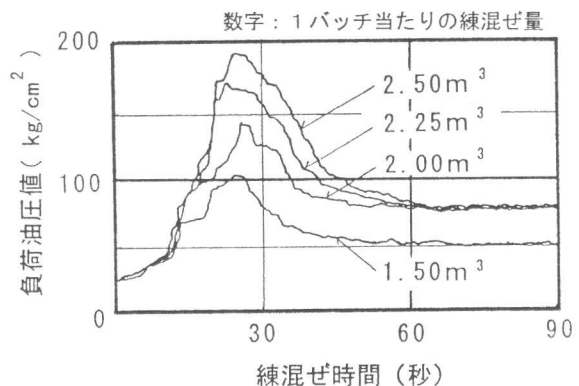


図-1 練混ぜ時間と負荷油圧値の関係

表-3 試験内容

| 試験名                       | 準拠規準・測定項目・試験条件  |
|---------------------------|---|
| スランプフロー試験 [3]             | フロー、50cm $\phi$ -到達時間                                     |
| V <sub>6.5</sub> 漏斗試験 [3] | 流下時間  |
| U型充填試験 [3]                | 充填の高さと時間、35mmと45mmの鉄筋開き                                   |
| 空気量試験                     | 空気量   |
| 凝結試験                      | JIS A 6204付属書 1、屋内・屋外の2ヶ所                                 |
| 圧縮強度試験                    | JIS A 1108、標準水中養生、現場水中養生及び現場封緘養生の管理用供試体、コア供試体並びに六角柱供試体の強度 |
| 引張強度試験                    | JIS A 1113、標準水中養生   |
| 曲げ強度試験                    | JIS A 1106、標準水中養生   |

### (1) 充填性の確認

コンクリートの充填状況は、打設時及び脱型後の目視の他、105個の充填感知センサによってリアルタイムに確認した。使用した充填感知センサはプラグ状に2本の電極を持ち、交流電源駆動によって電極間のコンクリートの電気抵抗値を測定するものである。

### (2) 側圧の確認

図-2の通り、妻・内型枠のそれぞれに4ヶ所の側圧を調べたが、妻型枠に取り付けた測圧計の一つは実験中に故障を生じ、測定できなかった。

### (3) 巻き立て部の強度発現性状の確認

六角柱供試体[4]によってコンクリートの早期強度を測定した。また、巻き立てコンクリートからコアを採取し、管理用供試体の強度と比較した。

### (4) 巻き立て部の発熱性状の確認

巻き立てコンクリート中に熱電対を取り付け、コンクリートを発熱性状を調べた。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 コンクリートの基礎性状

#### (1) フレッシュ性状

図-3はトンネル試験体への打設実験と同一の水平換算距離で実施したポンプ圧送実験の結果である。スランプフローは荷卸しから筒先までに約10cm低下したものの、V漏斗流下時間については荷卸しと筒先に顕著な差異は見られなかった。一方、テーパ管（125Aから100Aへの絞り）を取り付けた場合には、筒先のスランプフローが荷卸しから約30cmも低下した。そのため、トンネル試験体への打設実験ではテーパ管は使用しなかった。

出荷時と荷卸し時に実施したフレッシュ性状に関する試験結果を、図-4に示す。コンクリート温度が約15℃と若干低いため、出荷から荷卸しまでにスランプフローが10cm前後大きく、V漏斗流下時間が1~2秒短くなった。また、荷卸し時の各試験結果は、スランプフロー70cm、V漏斗流下時間7秒及び空気量5.5%を平均値としてほとんど変動が見られず、安定したコンクリートがトンネル試験体に打設されたものと考えられる。U型充填試験結果についても充填高さ36cm程度、充填時間17秒程度でほとんど変動がなく、粗骨材の噛み合いによる充填不良は全く見られなかった。

なお、アジテータ車No.1からNo.7までは高性能AE減水剤を1.5%添加したが、No.2やNo.5の荷卸し時のスランプフローが約75cmと大きく、骨材の表面水率等の変動によって材料分離を生じる恐

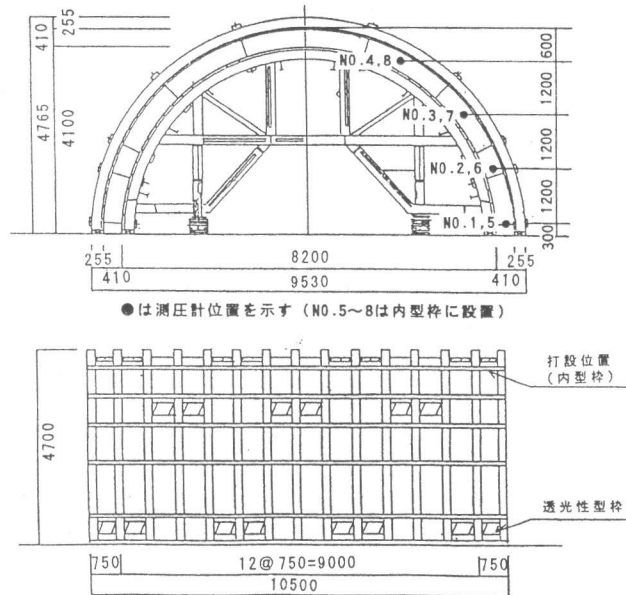


図-2 トンネル上半模擬試験体の形状寸法と測圧計の取付け位置

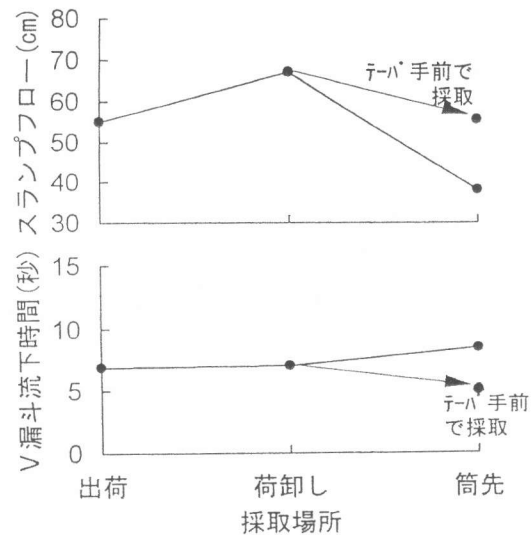


図-3 ポンプ圧送実験結果

れがあったことから、No. 8以降は使用量を1.4%に減じた。

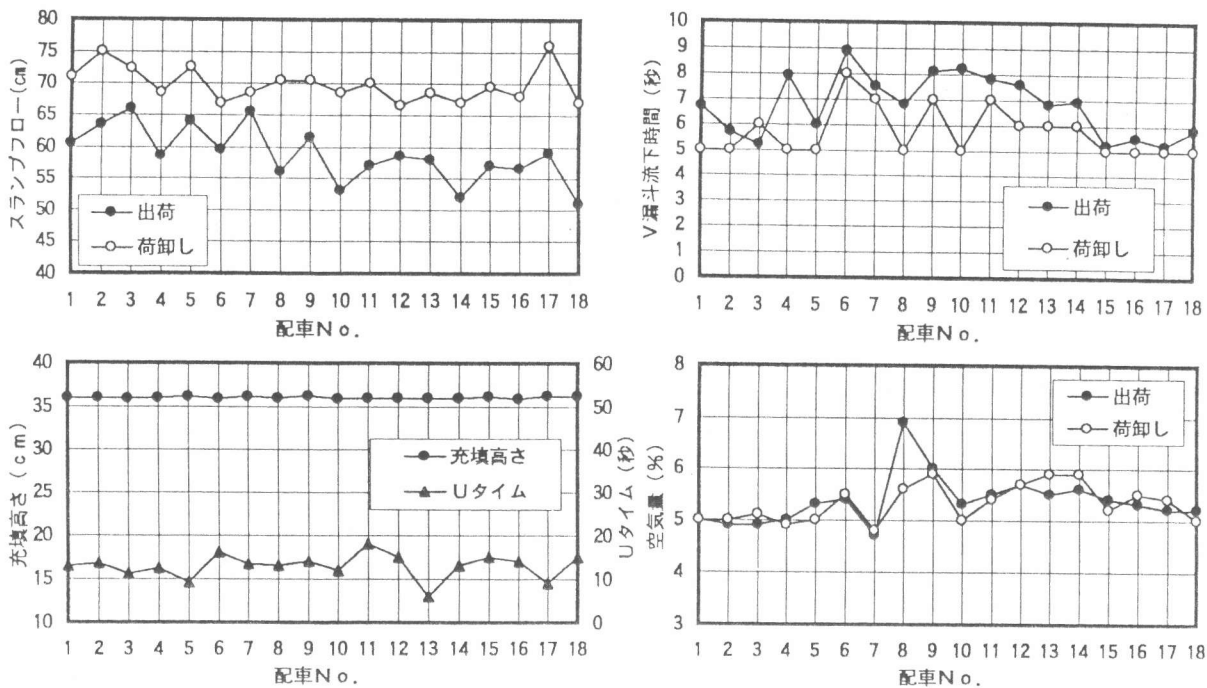


図-4 コンクリートのフレッシュ性状に関する試験結果

(2)硬化性状

使用したコンクリートの強度試験結果を、表-4に示す。荷卸しの圧縮強度は材齢7日で31.7MPa、28日では42.3MPaであった。一方、引張強度と曲げ強度は普通コンクリートの一般値よりも若干小さく、材齢28日において圧縮強度の値の1/15並びに1/9であった。トンネル試験体の地上から約20cm箇所から長さ方向に3ヶ所採取したコアの圧縮強度は、現場養生を行った管理用供試体とほぼ同程度の圧縮強度を示したものの、材齢28日において±約5Mpaのばらつきを生じた。そこで、採取したコアの単位体積質量を計算してみると、強度が小さなコアの単位体積質量はその他のコアよりも0.1t/m<sup>3</sup>前後小さい値であった。この原因として、4.1mの落下に伴うエアの巻きみや材料構成の不均一性が推測される。

表-4 強度試験結果

| 供試体名<br>採取場所 | 管理用供試体 |      |      |      |      |     | コア供試体  |      |      |        |      |      |      |
|--------------|--------|------|------|------|------|-----|--------|------|------|--------|------|------|------|
|              | 出荷     | 荷卸し  |      |      |      |     | トンネル内側 |      |      | トンネル外側 |      |      |      |
|              |        | 標水   | 標水   | 現水   | 現封   | 引張  | 曲げ     | 東側   | 中央   | 西側     | 東側   | 中央   | 西側   |
| 強度種類         | 圧縮     |      |      |      |      | 引張  | 曲げ     | 圧縮   |      |        |      |      |      |
| 養生方法         | 標水     | 標水   | 現水   | 現封   | 標水   | 標水  | なし     |      |      |        |      |      |      |
| 材齢 (日)       | 3      | 21.3 | 14.5 | 13.6 |      |     |        |      |      |        |      |      |      |
|              | 7      | 30.9 | 31.7 | 24.2 | 26.7 | 2.3 | 3.4    | 26.7 | 27.0 | 23.3   | 26.7 | 28.8 | 26.3 |
|              | 14     |      | 35.4 | 28.4 | 29.6 |     |        |      |      |        |      |      |      |
|              | 28     | 42.9 | 43.3 | 34.5 | 36.6 | 2.8 | 4.8    | 39.6 | 39.5 | 29.6   | 30.2 | 38.7 | 36.9 |

(単位: MPa)

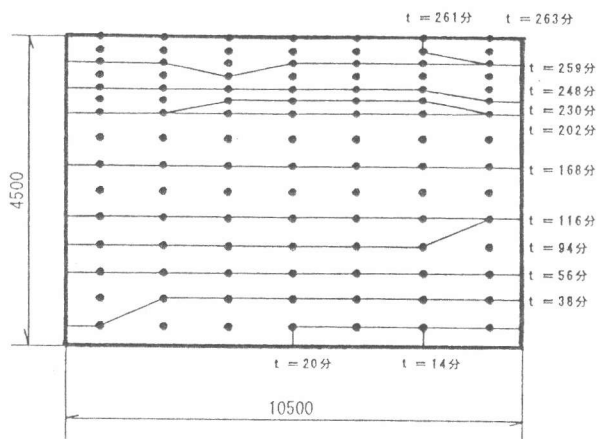


図-5 充填感知センサによる  
コンクリートの流動勾配

3. 2 コンクリートの充填性の確認

図-4は充填感知センサによるコンクリートの流動勾配である。4.1mの落下並びに10.5mの水平移

動にもかかわらずセンサ間隔30~60cmの範囲内ではほぼ水平に充填されており、コンクリートの流動勾配としては1/15~1/20程度と推測される。

写真-1、写真-2にセントルの移動とトンネルの仕上がり状況を示す。目視観察では、コンクリートの未充填箇所は全く見られなかった。トンネル天端の外型枠に接していた部分には直径1cm以上の気泡が多数見られたが、内型枠面は比較的気泡も少なく、成形性も良好であった。しかし、図-2に示したように打設口から内型枠に沿って4.1m落下させていることから、若干の巻き込みエアは認められた。ただし、実際の工事に適用した場合に岩盤・吹付けコンクリートとの付着や導水路内の水理特性への影響は少ないものと考えられる。

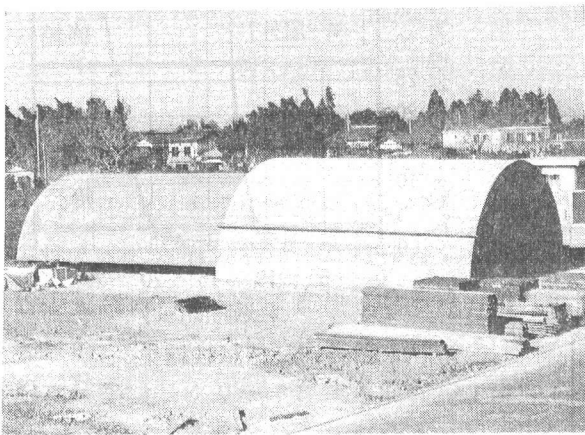


写真-1 セントル移動及びトンネル外観の状況

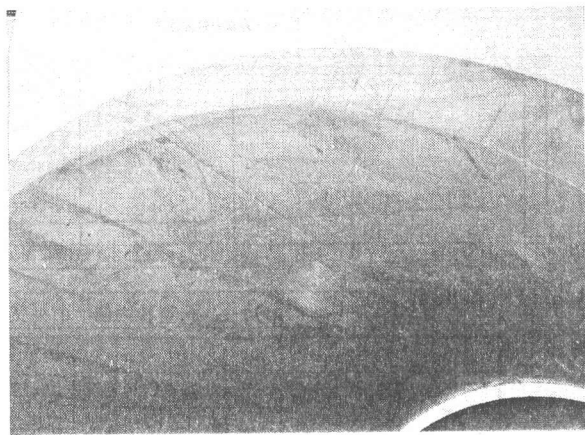


写真-2 妻・内型枠面の仕上がり状況

### 3. 3 型枠設計の検討

型枠にかかる側圧は、図-5のように内型枠の最下部No. 5の値が最大40kPaであったが、液圧が約92kPaであることから判断すると、かなり小さな値である。しかし、トンネル試験体の上部ほど液圧に近く、内型枠の最上部であるNo. 4はほぼ液圧、妻型枠のNo. 8が液圧の52%であった。ただし、内型枠は位置が高いほどその曲率に合わせて圧力の鉛直成分（コンクリート重量）の作用が大きくなり、特にNo. 4はほぼ水平状態であることから液圧になったと考えられる。

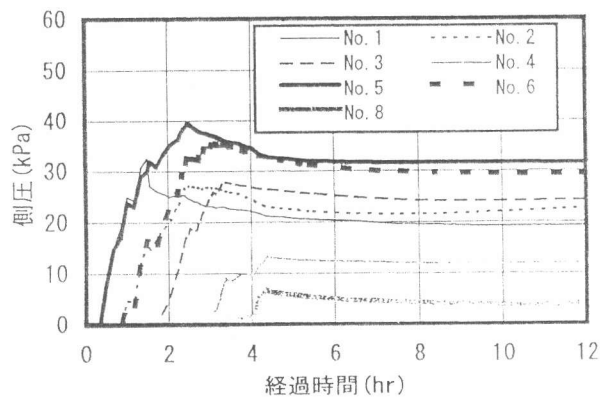


図-6 側圧測定結果

### 3. 4 セントル移動時期の検討

図-7~図-9にトンネル試験体内部温度及び外気温、凝結及び早期強度の試験結果を示す。今回の実験は11月下旬に屋外で実施したことから、外気温によって著しく凝結並びに早期強度発現が遅延した。しかし、未貫通のトンネル内は外気の影響を受けにくいことやコンクリートの発熱の影響によって、1年を通じて15~20℃となることが多い。今回の実験では屋外よりも屋内の供試体強度で実際の工事のセントル移動及び脱型の時期を決めた方が良いものと考えられる。

セントルの移動・脱型開始時期は施工サイクルから16時間とし、その時のコンクリート強度が

3. 4MPa以上であることを目標とした。しかし、実験で使用したコンクリートは、材齢16時間で2.5MPa程度しか強度を発現しておらず、所要の強度を得るためには19時間前後の存置が必要となる。早期強度の遅れの原因としては、生コンプラントでの配合調整において所定の流動性状並びに保持性を確保するため、室内配合よりも高性能AE減水剤を増やしたこと、また、低温時の製造及び運搬によってコンクリート温度が低かったことが考えられる。よって、実際の工事に高流動コンクリートを適用するに当たっては、使用材料の品質及びその変動、プラントから現場までの運搬時間あるいは製造・運搬時の外気温などを考慮し、所定の脱型強度が満足できるようにフライアッシュの置換率や高性能AE減水剤の使用量等の配合条件を決める必要がある。

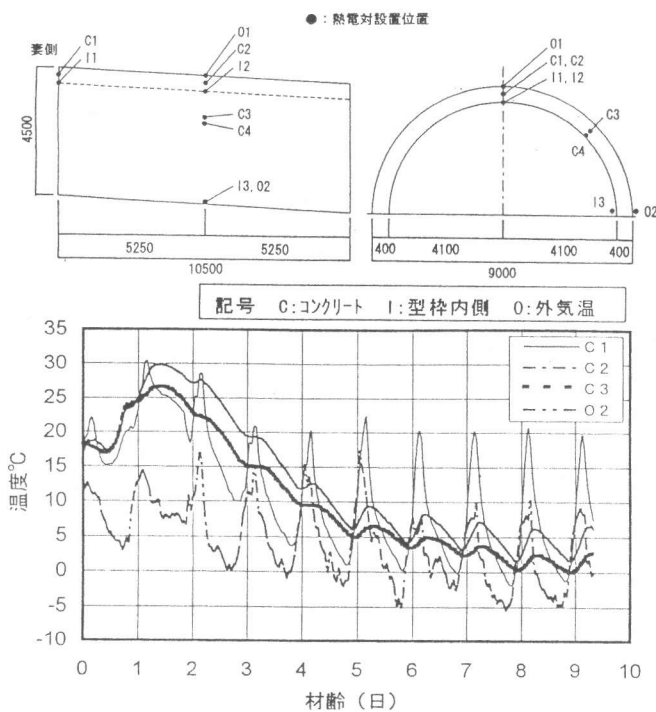


図-7 熱電対取付け位置と温度測定結果

#### 4. おわりに

フライアッシュの置換率40%の2成分粉体系高流動コンクリートを導水路トンネル上半模擬試験体に打設し、実際の工事に適用可能であることを確認した。しかし、ポンプの圧送性や早期強度の発現性等、確認すべき事柄も残されており、今後、実験を通じて確認する予定である。

#### 謝辞

ご協力頂いた、構造計測(株)、(株)ホヅリ物産及び筑波小野田ミコン(株)の方々に感謝致します。

#### 参考文献

- [1]阿部寿, 庄司忠悦, 前田長友: 水力発電所導水路の事故分析について—調査および改修工事の合理化をめざして—, 電力土木No. 199, pp. 13-25, 1985. 11
- [2]谷口秀明, 増田和機, 原田和樹, 牛島 栄: フライアッシュと分離低減剤を用いた高流動コンクリートの基礎性状, コンクリート工学年次論文報告集Vol. 17, No. 1, pp. 209-214, 1995. 6
- [3]日本コンクリート工学協会超流動コンクリート研究委員会報告書(Ⅱ), 1994. 5
- [4]神田衛, 鈴木修, 大沢洋三郎: キャッピングを必要としないコンクリート供試体の試作と効用, セメント技術年報XXVII, pp. 253-256, 1972

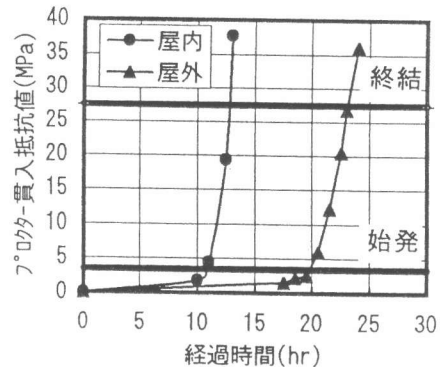


図-8 凝結試験結果

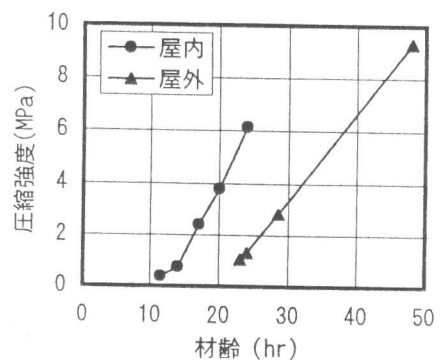


図-9 早期強度測定結果