

報告

[1060] 湿式細粒化セメントの ECL 工法用コンクリートへの適用性の検討

来田 充^{*1}・井筒庸雄^{*2}・岩渕 丞^{*3}・山田雅稔^{*4}

1. はじめに

シールドの掘進と並行して、コンクリートを加圧された状態で直ちに打設し地山に密着した覆工を連続的に形成していく形式のECL工法では、高流動で分離抵抗性があり、かつ内型枠脱型のために早期に強度が発現するコンクリートが要求される[1]。そのため、早強セメントを用いることにより早期に高強度を発現させているが、発熱量が大きくなる傾向があり、新しい結合材の開発、利用が待たれている。

既往の研究により、湿式粉碎した普通セメントを用いて早期強度の発現性がよいコンクリートが得られることが知られている[2]。一方グラウト工事用として開発された湿式細粒化セメントもスラリー状の微粒セメントであり、これを高濃度で製造すればコンクリート配合にも用いることができ、製造過程で高性能減水剤を併用すれば高い流動性を付与することができると考えられる。特に、上記のECL工法用コンクリートに用いた場合、早期強度の発現性が良く、従来配合と同程度の強度発現を有する配合にした場合は単位セメント量を低減でき、発熱に対して有効な対策となることが期待される。また、必要量だけ現場で製造できるという利点がある。

本報告は、上記のECL工法用コンクリート(以下、ECLコンクリートと略す)に対する湿式細粒化セメントの適用性について、配合試験、ポンプ圧送試験、実機モデル打設実験[4]を行ったものである。

2. 湿式細粒化セメントの物性

湿式細粒化セメント(Wet Milled Cement, 以下WMCと略す)はダム工事におけるセメントグラウトの浸透性の向上を目的として開発されたものである[3]。セメントグラウト注入工程に、マイクロミルによる湿式細粒化工程を組み込み、微粒セメントを現場で必要量製造するもので、セメント粒子の団粒化や風化が生じにくく、粉塵が出ない等の利点がある。グラウトに用いる場合は水セメント比が300%前後で粉碎されることが多いが、今回は高性能減水剤を用い水セメント比37%で粉碎したもの用いた。図-1にWMCの製造工程の概略図を、図-2に粒度分布を示す。

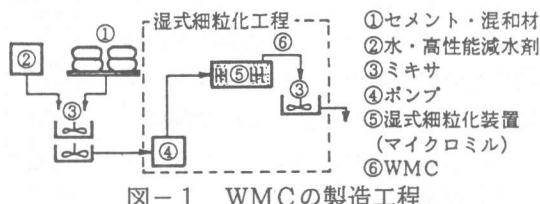


図-1 WMCの製造工程

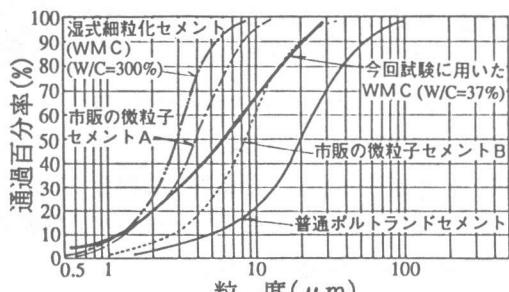


図-2 WMCの粒度分布

*1 鉄建建設(株)エンジニアリング本部材料研究開発部(正会員)

*2 電源開発(株)元総合技術試験所課長代理

*3 開発工事(株)土木本部部長

*4 サンフロー(株)企画技術部次長

3. 実験の概要

3.1 使用材料

使用した材料を表-1に示す。なお、WMCの製造は配合試験においては小型マイクロミル(容量15ℓ)を、圧送試験・実機モデル打設実験では大型マイクロミル(容量59ℓ)を使用した。

3.2 評価方法

ECLコンクリートに要求される性能を満たすため、以下の条件を設定した。

①圧送性、型枠内での充填性を考慮して練上がりのスランプフローを60cm以上とし、目視による分離が見られないこと。

②コンクリートの圧入時には流動性を失わず、打設速度の変化やトラブルの発生にも対応できるようスランプフローが3時間経過後においても50cm以上であること。また型枠に打込んでから所定時間経過後は速やかに硬化し、練混ぜ24時間後の圧縮強度は100kgf/cm²以上であること。

③高水圧下等、厳しい施工条件下でも覆工コンクリートの品質低下がないこと。以上の条件①②について配合試験を行い、条件をみたす配合について圧送実験を行い、さらに条件③の確認のために実機モデル打設実験を行うこととした。コンクリートの試験については、表-2の項目について行った。

(1) 配合試験

配合試験ではWMC単味による配合(配合名 WMC)、一部をフライアッシュと置換した配合(WF)、一部を普通セメントと置換した配合(WO)、フライアッシュ一部置換に未粉碎セメントを添加した配合(WOF)について行った。検討配合を表-3に示す。練混ぜは図-3に示す方法で行った。

(2) 圧送試験

配合試験により選定した配合に対し実機練り・圧送試験を行い、実機ミキサーによる練りませ効果・コンクリートの性状・ポンプ圧送性を把握し、実機モデル打設実験への適用性を評価検討した。配管計画は図-4に示すものとし、実施工例を参考にして配管径をφ100mm 配管長を120mとした。吐出量はポンプ能力の50%(11m³/h)と100%(18m³/h)に設定し、圧送時のコンクリート圧力はひずみゲージ式圧力計により計測した。計測は各設定吐出量に対して2回ずつ配管中のコ

表-1 使用材料

| 材 料 | 比 重 | 性 質 |
|--------------------|-------------|---|
| 湿式細粒化セメント (WMC) | 1.95 (液) | 比表面積=7000(cm ² /g) 平均粒径6μm |
| 普通セメント | 3.16 | 比表面積=3250(cm ² /g) N社製 |
| 早強セメント | 3.14 | 比表面積=4390(cm ² /g) N社製 |
| フライアッシュ | 2.25 | 比表面積=3140(cm ² /g) D社製 |
| 細骨材(混合砂) | 2.64 | 栃木県葛生産砂と 千葉県市原産山砂の等量混合 FM2.80 吸水率2.30 |
| 粗骨材(碎石) | 2.64 | 東京都青梅産(硬質砂岩) FM6.64 吸水率1.85 |
| 高性能減水剤 | 1.21 | ナタリ系 S社製 |
| 遲延剤 | 1.10 | リカニンクルホン酸塩変成物 S社製 |

表-2 コンクリートの試験項目

| 試験項目 | 試験方法 |
|----------------|---|
| スランプ・スランプフロー試験 | JIS A1101準拠 |
| DINフロー試験 | DIN 1048準拠 |
| 空 気 量 | JIS A1128準拠 |
| 圧 縮 強 度 | JIS A1108準拠 |
| 長 さ 变 化 | JIS A1129準拠 |
| 加压ブリージング試験 | 土木学会『コンクリートのポンプ施工指針(案)』準拠 |
| 簡易断熱温度上昇試験 | 約52cm角の発泡スチロール 製の容器の中心部にコンクリートを10ℓ詰め、熱電対 により中心部の温度を測定 |

表-3 検討配合

| 配合名 | 水結合材比 (%) | 細骨材率 (%) | 単位結合材量(kg/m ³) | | | 高性能 減水剤 (%) ^{*5} | スランプ フロー (cm) |
|---------------------|--------------|-------------|----------------------------|-------------------|-------------|---------------------------------|---------------------|
| | | | WMC | 未粉碎 セメント | フライアッ シュ | | |
| 従来 | 45.0 | 50.0 | --- | 400 ^{*6} | 66 | 3.4 ^{*7} | 68.0×67.0 |
| WMC | | | 400 | --- | --- | 4.3 | 66.0×65.0 |
| OPC | | | --- | 400 | --- | 1.0 | 38.0×36.0 |
| WF20 | | | 320 | --- | 80 | 3.0 | 63.0×62.0 |
| WF40 | | | 240 | --- | 160 | 2.3 | 62.0×60.0 |
| WF60 | | | 160 | --- | 240 | 1.5 | 53.0×54.0 |
| WO80 | | | 80 | 320 | --- | 1.5 | 57.0×56.0 |
| WO60 | | | 160 | 240 | --- | 2.0 | 60.0×60.0 |
| WO40 | | | 240 | 160 | --- | 2.6 | 59.0×57.0 |
| WOF | | | 160 | 80 | 160 | 1.7 | 50.0×48.0 |
| WOF-2 ^{*8} | 40.9 | 54.0 | 240 | 40 | 160 | 2.0 | 61.0×59.0 |

*5 結合材×重量% *6 従来配合のみ早強セメント

*7 別に分離低減剤(360g/m³)を含む *8 実機練りに先立つ予備配合試験結果

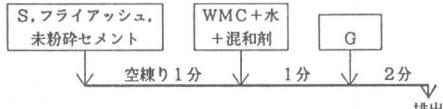


図-3 練混ぜ方法

ンクリート圧力とポンプ油圧を測定することとし、圧力損失を参考値として求めた。

(3) 実機モデル打設実験

実機モデル打設実験では、圧送試験で評価したコンクリート配合の高打設圧力での施工性と覆工コンクリートの性状を調査し、WMCのECLコンクリートへの適用性を検討した。打設実験機は最大圧力 10kgf/cm^2 の被圧水地盤で覆工厚

400mm 、内径 $\phi 2000\text{mm}$ の覆工体を 1800mm 形成できるようになっている。実験機概要図を図-5に、実験手順のフローを図-6に示す。実験条件は以下のように設定した。

①モデル地盤は破碎質滞水地盤を想定し、土槽を7号砕石で満たしたのち水締めして、土槽天端において 4kgf/cm^2 の水圧を設定した。

②コンクリートの打設圧力は妻枠上部圧力計によって管理し、水圧に対して常に打設圧が上回るようにした。

4. 実験結果および考察

4.1 配合試験

配合試験の結果を表-3に示す。配合名 OPCは高性能減水剤の添加量が増えると共に分離が著しくなり、スランプフローを 40cm 以上にするには分離低減剤の併用なしでは困難であると認められた。配合名 WMC、WF、WOでは高性能減水剤の添加量の調整のみによりスランプフローで 60cm 近傍の値を確保できたが、目視による分離状況の観察では、配合名WOは全体的に骨材とペースト分がやや分離している状況が観察されたものの、WMC、WFでは良好な状況であった。

図-7に配合別の圧縮強度試験結果を材令1日と28日について示す。早強セメントを 400kg/m^3 、フライアッシュを 66kg/m^3 用いている従来配合の試験結果を併記している。配合名 WMC、OPC、

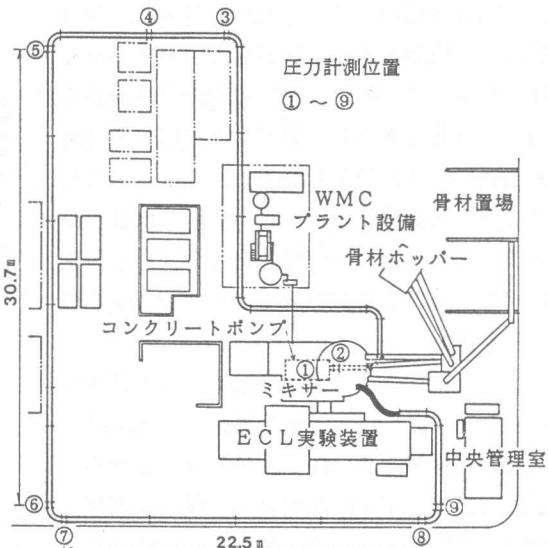


図-4 圧送試験配管概略図

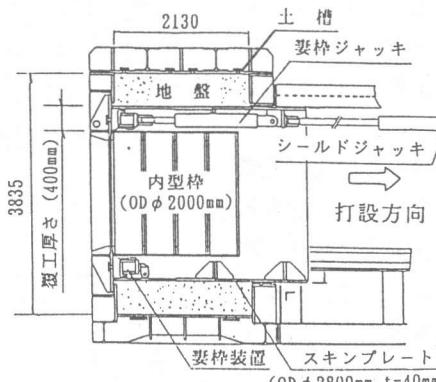


図-5 打設実験機概要図

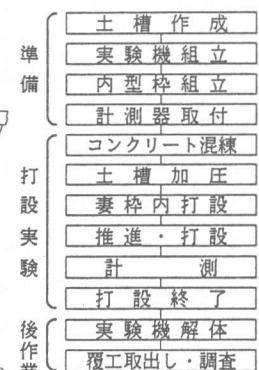


図-6 打設実験手順

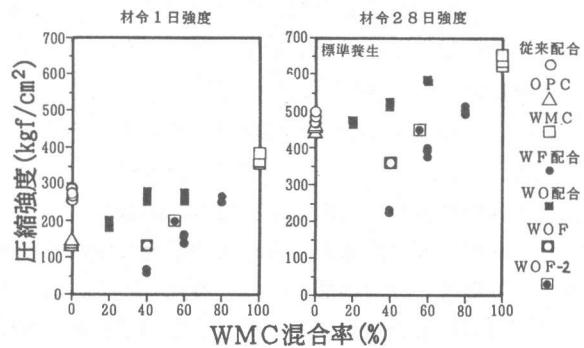


図-7 圧縮強度試験結果

WF、WOは水結合材比と単位結合材量、細骨材率は同じ配合であり、WMCの混合率が高くなるにつれて各材令における圧縮強度が高くなっていることから、WMCは強度の発現性に優れていると認められる。WO40配合の材令1日強度は強度発現が小さいが、これはフレッシュ性状がやや分離気味だったためと考えられる。なお、実機配合である WOF-2配合の結果を併記した。

図-8に配合別の簡易断熱温度上昇試験の結果を示す。配合名 WMCは従来配合と同様温度上昇量が大きいが、従来配合とほぼ同じ強度発現を示すWF20配合では最高温度が約28%低減されている。また、1日強度100kgf/cm²以上を満足するWF40配合では約50%低減されている。WOF配合においてもWMCの相当量が未粉碎普通セメントに置換されているためWF40配合よりさらに低減されている。

図-9はコンクリートの長さ変化（乾燥材令7日）の試験結果である。他の配合と比較して WOF配合では従来配合よりも5割程度低い数値となっており、長さ変化については、適当な結合材の配合比率を選択すればかなり低減することが確認できた。

図-10はスランプフローの低減を目的として、遅延剤を投入した配合のスランプフロー経時変化の試験結果を示す。遅延剤を結合材に対して0.4%投入した結果、スランプフロー低減形高性能AE減水剤を用いる従来配合とほぼ同等のスランプフロー保持時間が確保された。加圧ブリージング試験では、WMC配合比率が50%以上の配合における脱水曲線は標準曲線C[5]と従来配合（最終脱水率15%程度）との中間にあり、脱水しにくいコンクリートであると考えられる。

これらの結果を総合的に検討し、WF40配合を圧送試験実施配合として採用した。

4.2 圧送試験

圧送試験の試験実施配合を表-4に示す。WF40配合を圧送したが、配管途中で閉塞が発生したため試験を中止した。閉塞箇所の観察では、コンクリートのペースト部分が逃げて粗骨材のアーチング現象が見られた。原因として結合材量の不足により分離抵抗性が不十分で高圧打設には不向きであると考えられたため、細骨材率を54.0%とし、未粉碎普通セメントを混合して単位結合

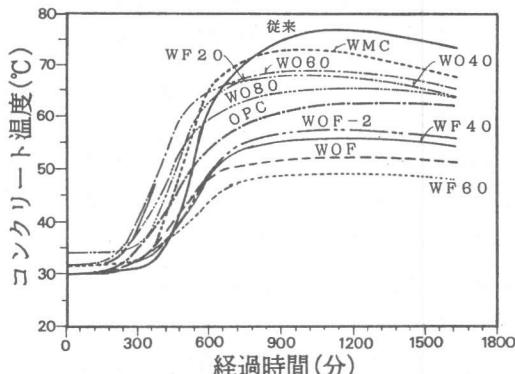


図-8 簡易断熱温度上昇試験結果

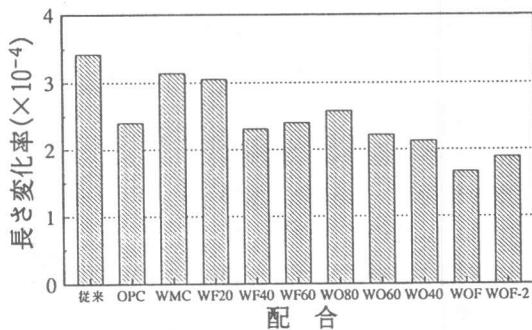


図-9 長さ変化試験結果

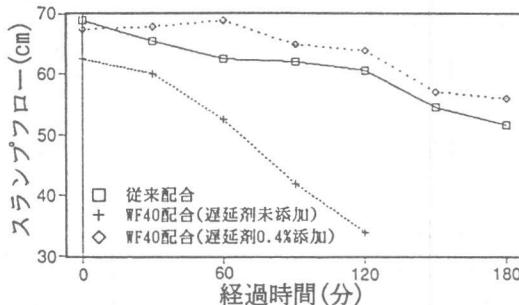


図-10 スランプフロー経時変化

材量を増加した WOF-2配合を圧送したところ、各圧送条件において順調に圧送された。但し、配合試験では

60cmのフローがあつたが実機練りにおいては60cm以上のフローを出すことは困難であった。これは配合試験と実機練りに用いたマイクロミル

の粉碎効率の相違により、WMCの粘性が増加したためと考えられる。WOF-2配合の圧力損失は、特にペント管部で一般的に言われている普通コンクリートの数値に比較して5割程高い結果となった[5]。管内圧力測定結果を表-5に示す。

以上の結果からスランプフローに問題があるものの改善可能と判断し、WOF-2配合を実機モデル打設実験に用いることとした。

4.3 実機モデル打設実験

試験実施配合は、圧送試験の結果が良好であった WOF-2配合とした。実験は 4kgf/cm^2 の被圧水地盤で覆工厚 400mmを確保することを条件とした。打設は、モルタルを 0.5m^3 先送りしたあとコンクリートを 4.5m^3 圧送した。コンクリートのフレッシュ性状は1バッチ目はスランプフローが60cmに達しなかったが、そのまま実験を続行した。今回もミルスケールの相違によりWMCの粘性が不安定になったためと考えられ、高濃度でのマイクロミルの運転条件の確認が今後の課題となった。

打設実験中は常に水圧よりコンクリート圧力を高く管理することができ、1164mm打設して実験を終了した。フレッシュコンクリートの試験結果を従来配合と比較して表-6に、実施配合の圧縮強度試験結果

を図-11に示す。覆工コンクリートの温度履歴の測定結果では、同一コンクリートによる簡易断熱温度上昇試験の測定結果ほど顕著な温度の低減効果は現れていないが、覆工体の最高

表-4 圧送試験実施配合

| 配合名 | 単位量 (kg/m^3) | | | | | | | | スランプフロー試験結果 | |
|-------|-------------------------|---------------------|-------------|-----|-----|-----|-------------|------------|-------------|-----------|
| | W | WMC 粉体換算 セメント | 未粉碎 セメント | F/A | S | G | WMC内 減水剤 | 後添加 減水剤 | | |
| WF40 | 179 | 240 | -- | 160 | 870 | 874 | 8.40 | 0.72 | 1.6 | 54.5×55.5 |
| WOF-2 | 179 | 240 | 40 | 160 | 900 | 810 | 8.40 | 0.58 | 1.6 | 47.0×48.0 |

表-5 管内圧力測定結果

| データ No. | 吐出量 m^3/h | 平均圧力 (kgf/cm^2) | | | | | | | | | 圧力損失 ($\text{kgf/cm}^2/\text{m}$) | | | | |
|------------|------------------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------------------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| | | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ | ⑦ | ⑧ | ⑨ | ③-④ 直管 5.50m | ⑤-⑥ 直管 30.70m | ⑥-⑦ ペント管 2.07m | ⑦-⑧ 直管 22.50m | ⑧-⑨ ペント管 2.07m |
| 低-1 | 11.54 | 73.37 | 11.87 | 7.14 | 7.71 | 6.59 | 4.39 | 3.84 | 1.80 | 2.09 | -0.104 | 0.072 | 0.266 | 0.091 | -0.140 |
| 高-1 | 20.56 | 100.07 | 17.01 | 10.24 | 10.92 | 9.56 | 6.33 | 5.71 | 2.91 | 2.78 | -0.124 | 0.105 | 0.300 | 0.124 | 0.063 |
| 低-2 | 11.10 | 76.25 | 12.29 | 7.67 | 8.34 | 7.21 | 4.93 | 4.35 | 2.37 | 2.31 | -0.122 | 0.074 | 0.280 | 0.088 | 0.029 |
| 高-2 | 20.39 | 102.29 | 17.33 | 10.59 | 11.31 | 10.03 | 6.83 | 6.24 | 3.20 | 3.06 | -0.131 | 0.104 | 0.285 | 0.135 | 0.068 |

表-6 フレッシュコンクリート試験結果

| 配合 | 練り返し | | | | | 静置 | | |
|-------|-----------|--------------|-----------------|----------------|------------|--------------|-----------------|------------------|
| | 経時 (分) | スランプ (cm) | スランプフロー (cm) | DIN70- (cm) | 空気量 (%) | スランプ (cm) | スランプフロー (cm) | コンクリート 温度(°C) |
| WOF-2 | 0 | 22.5 | 37.0×37.5 | 56.5×58.5 | 0.8 | | | 17.0 |
| | 30 | | | | | 20.5 | 31.0×28.5 | 15.0 |
| | 60 | 19.0 | 26.0×27.0 | 46.5×48.5 | 0.7 | 16.5 | 26.5×26.0 | 15.5 |
| | 90 | | | | | 13.0 | 24.0×24.0 | 15.0 |
| | 120 | 15.5 | 25.0×25.0 | 43.5×41.5 | 1.2 | | | 15.0 |
| | 180 | 12.0 | 23.0×23.0 | 41.0×39.0 | 1.2 | | | 15.0 |
| 従来 | 0 | 27.5 | 77.0×76.0 | 73.0×70.0 | 0.9 | | | 17.0 |
| | 30 | | | | | 27.0 | 71.0×69.0 | 17.0 |
| | 60 | 27.0 | 72.0×69.0 | 70.0×70.0 | - | 24.0 | 60.0×59.0 | 16.0 |
| | 90 | | | | | 22.0 | 54.0×52.0 | 16.0 |
| | 120 | 27.0 | 67.0×67.0 | 64.0×63.0 | - | | | 15.5 |
| | 180 | 23.0 | 38.0×38.0 | 52.0×50.0 | 0.9 | | | 16.0 |

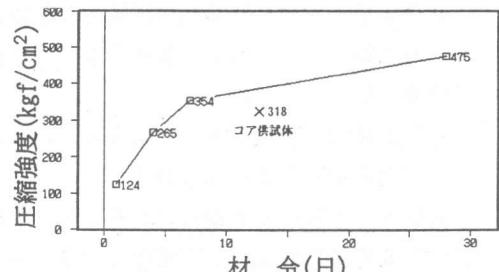


図-11 圧縮強度試験結果

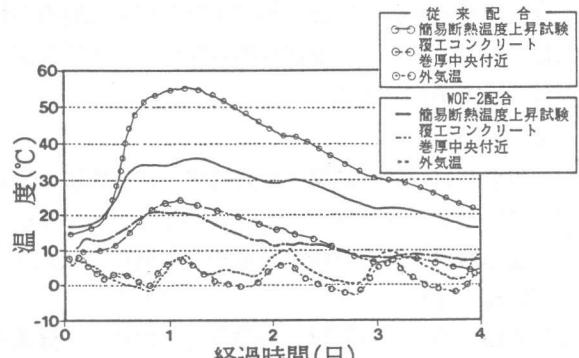


図-12 温度履歴測定結果

温度は3℃程低減され、温度の下降も早まる傾向が見られた(図-12)。打設後7日目で土槽から取りだした覆工コンクリートの出来形を目視観察した結果では、巻厚も確保でき、おおむね良好な覆工となった。覆工体出来形を縦断方向に4箇所切断した結果では、いずれも密実な硬化コンクリートが形成されているのが確認できたが、切断面において粗骨材の偏りが一部に見られた(写真-1)。これはフレッシュ性状が当初の目標に達していなかったため、型枠内での骨材の流動が不十分であったためと考えられる。

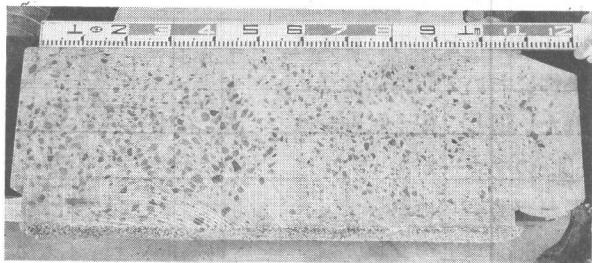


写真-1 覆工コンクリート縦断面(側面部)

5.まとめ

湿式細粒化セメント(WMC)は、コンクリート配合に用いた場合には高い流動性の付与が可能であり、早期強度の発現性にもすぐれていることが確かめられた。さらにECLコンクリートへの適用性を検討した結果、以下の点が明らかとなった。

①覆工コンクリートの温度履歴の測定結果では、寒中打設のため冷却効果が大きく、並行して行った簡易断熱温度上昇試験の測定結果ほど顕著な温度の低減効果は現れていないが、覆工体の最高温度は3℃程低減され、温度の下降も早まる傾向が見られた。

②材令1日における圧縮強度 100kgf/cm^2 以上の要求性能は十分クリアできた。

③乾燥収縮に関しても、従来配合よりも低減できると考えられる。

④実施工にあたっては、

1)湿式細粒化装置(マイクロミル)のミルスケールの相違によるWMCの粘性のばらつき

2)骨材の粒度分布のばらつき

3)WMCを製造してからコンクリートを練混ぜるまでの時間

などに不安定要素があり、所要のコンクリートの性状を安定して確保するには今後さらに検討を要する。

今後の研究では、以上の影響を把握するための実験をさらに行って配合設計上の資料を得ると共に、WMCプラントを従来のコンクリートプラントに組み入れるための一連のシステムを開発していく予定である。

参考文献

- 1) 川名英二・熊本義寛・高野佳博・畔柳典章: ECL工法による信発水路トンネルの設計・施工、コンクリート工学、Vol.27、No.12、1989.12
- 2) 山田雅穂・森部紀晴・中島浩二: 微粉碎セメントに関する研究、セメント技術年報、Vol.41、pp.82-85、1987
- 3) 吉田 裕・松井利積・馬場恭平: WMC(湿式細粒化セメント)グラウト工法とその適用性について、電力土木、No.201、pp.59-77、1986.3
- 4) 飯島正和・山口恒夫・山村康夫・小室好孝: 高水圧下におけるTEK-ECL工法の適応性について、土木学会第47回年次学術講演会講演概要集第6部、pp.208-209、
- 5) 土木学会: コンクリートのポンプ施工指針(案)、コンクリートライブラリ、No.57、1985.