

微粒分を混入し粘性を活用した高品質吹付け コンクリートの諸特性

PROPERTIES OF HIGH QUALITY SHOTCRETE WHICH USES VISCOSITY GENERATED BY MINERAL POWDER

北川修三¹⁾・末永充弘²⁾・伊藤祐二³⁾・大須賀哲夫⁴⁾・田村忠昭⁵⁾

Shuzo KITAGAWA, Mitsuhiro SUENAGA, Yuji ITO, Tetsuo OHSUGA, Tadaaki TAMURA

The authors confirmed constructability and quality of shotcrete improved by adjusting Viscosity and flowability of fresh concrete using limestone powder, silica fume, and superplasticizer for shotcrete. However, there are some uncertain matters in this high quality shotcrete, the execution management test for the viscosity and the resistance to freezing and thawing, for instance. This report describes properties of the high quality shotcrete.

Key Words: shotcrete, high quality, limestone powder, silica fume, property

1. はじめに

吹付けコンクリートは、NATMの支保部材として非常に重要な役割を担っていることは衆目の一致するところであり、地山と一体化した薄肉構造体の形成、施工面での機動性等他の支保部材にはない大きな特長を有している。一方、施工時、はね返りが多いこと、粉じん発生、品質のバラツキ、ベースコンクリートと比較しての強度が低下することなど、欠点があることも事実であり、作用効果も含めて施工性や品質に与える要因、改善策等については必ずしも解明されているとはいえない状況にある。

微粒分の混入によって増加する粘性を活用し、施工性と品質に優れた高品質吹付けコンクリート工法は、平成2年度からトンネル建設のコストダウンを主目的として、加越、五里ヶ峯、新俱利伽羅、金田一、吉尾の5トンネルでの実施工試験を通じて研究を重ねてきた^{1),2),3),4)}。これらの試験結果から、コンクリートの細骨材の一部を石灰石微粉末で、セメントの一部をシリカフュームで置換し、高性能減水剤により施工に適した粘度・流動性を確保し、フレッシュコンクリートの粘性を十分に活用することで、はね返り率、粉じん量の低減および強度など品質の向上が可能であることを確認した。

しかしながら、現場における吹付けコンクリートの粘性の管理方法については十分な検討がなされていなかった。また、AE剤を用いることで吹付けコンクリートの凍結融解抵抗性が向上することは確かめられた³⁾が、吹付けコンクリート中の気泡組織との関係については未だ関係する文献は見あたらない。

さらに、分割練混ぜ(SEC)により製造されたコンクリートは、同一配合において一括練混ぜにより製造されたコンクリートと比較して材料分離抵抗性やポンプ圧送性に優れ、ブリーディングの少ない良質のコンクリートであると言われており、金田一や吉尾トンネルにおける実施工試験においても良好な結果を確認した^{3),4)}。

1) 正会員 日本鉄道建設公団・設計技術室

2) 正会員 住鉱コンサルタント㈱・営業本部

3) 正会員 ㈱フジタ・技術研究所

4) 正会員 石川島建材工業㈱・技術研究所

5) 正会員 リブコンエンジニアリング㈱

しかし、分割練混ぜが一括練混ぜに比較して優位性を示す原因については明らかにされていない。また、分割練混ぜにおいてはコンクリートに使用する細骨材とセメント等粉体の種類と量によって定まる一次練混ぜ水率(吸着水率:W1/P、W1:一次練混ぜ水量、P:単位粉体量)が重要な意味を持つ⁹⁾が、混合粉体を使用する場合の一次練混ぜ水率の決定方法について公表されたものはない。

このような実態を踏まえ、微粒分を混入した高品質吹付けコンクリート(以下、本高品質吹付けコンクリート)の特性をより明らかにするため、検討を行ったので以下に述べる。

2. 検討概要

①本高品質吹付けコンクリートの粘性の管理方法

本高品質吹付けコンクリートは粘性を有効に活用することで施工性を向上させているので、施工管理のために粘性を評価する必要がある。実施工試験の実績をもとにして粘性の管理方法を検討した。

②分割練混ぜにおける混合粉体の吸着水率特性

本高品質吹付けコンクリートには微粒分として各種粉体が用いられる。そこで、分割練混ぜ時に各種粉体や混合粉体を用いる場合に必要となる、ペーストの一次練混ぜ水率(混合粉体の吸着水率:W1/P)を決定するためのトルク試験方法を定め、試験結果について考察を行った。

③モルタルの遠心力試験による材料間結合力の検討

シリカフェーム、石灰石微粉末を混入し、分割および一括練混ぜにより製造されたモルタルの遠心力試験を行い、モルタルの結合力(材料分離抵抗性)について検討を行った。

④吹付けコンクリートの気泡組織

吹付けコンクリートを AE コンクリートとすることで凍結融解抵抗性が向上することを、新倶利伽羅トンネルでの試験において確認したが、凍結融解抵抗性の向上に寄与する気泡の効果を検討するために、コンクリートの気泡組織観察を行い、その結果について考察した。

3. 検討内容

3. 1 本高品質吹付けコンクリートの粘性の管理方法

本高品質吹付けコンクリートは粘性の高いフレッシュコンクリートである。粘性をレオロジー的に取り扱う場合、コンクリートは一般にビンガム流体に近似される⁹⁾。ビンガム流体の流れのモードをビンガム流動といい、図-1に示す。ビンガム流体における変形速度は(1)式で表され、ずり応力がある値に達するまでは流動を開始しないが、ずり応力が限界値に達して一定のずり速度が生じた後は、降伏値(θ_f)を越えたずり応力($\tau - \theta_f$)に比例する。

一般に、降伏値は流動の起こりやすさを、塑性粘度は流動のしやすさを表し、コンクリートのスランプのような静的変形は降伏値を、モルタルフローのような動変形は塑性粘度と密接に関係する。

施工性の良い吹付けコンクリートは、圧送可能なスランプと十分

$$\dot{\gamma} = m(\tau - \theta_f) \quad (1)$$

ここに、 $\dot{\gamma}$: 変形速度
 $m = 1/\eta_{pe}$
 τ : ずり応力
 η_{pe} : 塑性粘度
 θ_f : 降伏値

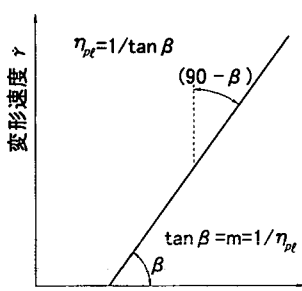


図-1 ビンガム流動

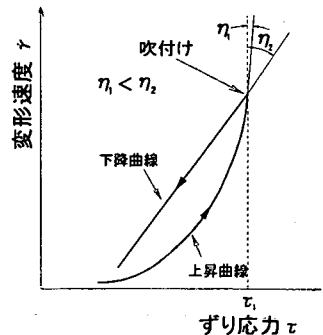


図-2 チキソトロピー性を有する物質の吹付け前後の変化

な分離抵抗性を持つ粘度を有すると共に岩盤に付着すると同時に定着・固化するチキソトロピー性が要求される。すなわち、外力(振動等)が加えられたときには粘性が低く、外力がとりのぞかれたときには瞬時に粘性が高くなる(流動しにくくなる)性質を有するコンクリートが適している。この概念を図-2に示す。

コンクリートの粘性は降伏値と塑性粘度の両方の特性を有しており、現場においてこの両方を管理する必要がある。このために両者の特性を表現する指標として、切羽でのモルタルフロー試験により求められたフロー値(f_{15})を切羽コンクリートのスランプ(Sl :cm 単位)で除した、フロー指標(f_{15}/Sl)を提案する。フロー指標はビンガム流体の両特性(塑性粘度 $\propto f_{15}$ 、降伏値 $\propto Sl$)を表現していると考えられる。

図-3および4に金田一、吉尾トンネルにおいて得られたフロー指標と施工性の関係を示す。この施工性の試験結果から、フロー指標は21以上であることが望ましいと考えている。

3. 2 混合粉体の吸着水率特性

3. 2. 1 検討方法

混合粉体の吸着水率は、トルク試験においてペーストの練混ぜトルクが最大となる時の水粉体比 η として求めた。

3. 2. 2 検討結果

表-1に試験に用いた粉体の基本特性および試験により得られた単味粉体の吸着水率を示す。なお、比表面積は窒素吸着法(BET法)を用いて求めた。

セメントとシリカフューム(SF)とを混合した粉体(混合粉体)について、SFの内割り混合率をパラメータとして求めた吸着水率を表-2に示す。混合率が5~10%において最小となった。なお、混合率90%における吸着水率がSF単味の場合よりも大きな値を示している。

3. 2. 3 考察

吸着水は粉体粒子の表面および粒子間に拘束されていると考えられる。単純化のため大部分の吸着水が粒子表面に拘束されていると仮定し、吸着水量を粉体の表面積で割ると吸着水の概算水膜厚が得られる。この結果得られた水膜厚 $T(\mu m)$ と比表面積 $A(cm^2/g)$ との関係を果乗近似すると非常に良い相関(相関係数 0.9667)が有り、(2)式の関係が得られた。

$$T=298.6A^{-0.7879}\approx 300A^{-0.8} \tag{2}$$

混合粉体の吸着水率の試験結果を図-5に示す。この図には粉体単味の吸着水率を単純加算した場合も示すが、両者は明らかに異なっており、特にSF混合率が低い場合にはセメント単味の吸着水率よりも小さな値を示してい

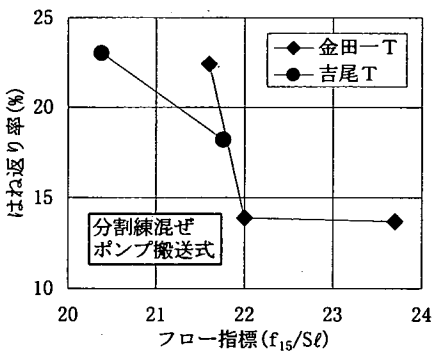


図-3 フロー指標とはね返り率の関係

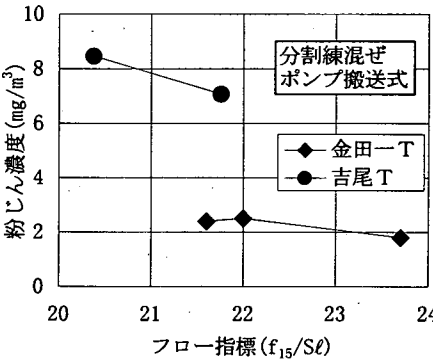


図-4 フロー指標と粉じん濃度の関係

表-1 粉体の基本特性と吸着水率

粉体名	比重 (g/cm³)	比表面積 (cm²/g)	吸着水率 (%)
セメント	3.16	11700	24
SF	2.2	243000	36
100M 炭カル	2.7	12900	19
200M 炭カル	2.7	10790	19
325M 炭カル	2.7	18840	24
17000 スラグ	2.92	46400	41
アルミナ 90000	3.7	90000	33

表-2 吸着水率試験結果

SF混 合率 (%)	試験 結果 (%)	SF混 合率 (%)	試験 結果 (%)
5	21	30	25
7	22	40	26
10	21	50	31
15	22	90	47
20	22	100	36

る。そこで、セメントの吸着水中にSFが独自の吸着水を持たずに混入しているものとする、混合粉体の吸着水率 C_1 はセメントの吸着水率 C_c より減少する。ここで、SFの混合率(内割)を R_0 、密度を D_{SF} とすると、 C_1 は式(3)で与えられる。

$$C_1 = C_c(1 - R_0) - R_0/D_{SF} \tag{3}$$

(3)式の計算結果を図-5に示す。試験結果と(3)式の計算結果を比較すると、混合率が5%程度までは両者は良く合っているが、混合率が高くなると次第に乖離が大きくなる。

そこで、SFの一部はセメントの吸着水中に存在するが、残りの部分は独自の吸着水を保有しているものと考え、混合したSF(混合率 R_0)のうちセメント吸着水中に存在するSFの割合 R_1 (R_0 に対する割合)は(4)式で与えられる。

$$R_1 = \{C_c - (C_c - C_{SF})R_0 - C\} / (C_{SF} + 1/D_{SF})R_0 \tag{4}$$

ここで、 $R_0 \cdot R_1$ は総粉体量のうちセメント吸着水中に存在するSFの割合を、 C_c はセメント単味の吸着水率を、 C_{SF} はSF単味の吸着水率を示す。表-2の吸着水率試験結果より求めた、 R_1 および $R_0 \cdot R_1$ の計算結果を図-6に示す。なおSF単味の吸着水率は、混合粉体の吸着水率を外挿して $C_{SF}=0.51$ とした。図-6によると、 R_1 は混合率が大きくなると急速に低下している。一方、セメント吸着水中のSF率($R_0 \cdot R_1$)には最大値があり、SF混合率30%前後で8%程度となっている。

SFはほぼ球形であるので、その投影面積と表面積との比はおおよそ1/4である。従ってセメント吸着水中のSFがセメントの表面を覆っている割合Fは、(5)式で与えられる。

$$F = A_{SF} \cdot R_0 \cdot R_1 / \{4A_c(1 - R_0)\} \tag{5}$$

ここで、 A_{SF} 、 A_c はそれぞれSFおよびセメントのBET法による比表面積である。混合率 $R_0=5\%$ の時、セメント表面の約30%が粒子で覆われていることになる。なお、 $R_0 \cdot R_1$ が最大となる8%前後において割合Fは50~70%となる。

(1)式によればセメント吸着水の概略水膜厚は $0.2\mu m$ 程度であり、SFの平均径($0.1\mu m$ 前後)とほぼ同様な寸法である。また前述のとおりSFの混合率が5%程度と小さいときは、その大部分がセメントの吸着水中にあると考えられ、その様な時にセメント表面をSFが覆う割合は(5)式から約30%程度であり、これらのことから混合粉体のモデルを図-7のように推定することができる。

従って、超微粉によりセメントの改質を行う場合には、その超微粉をできるだけセメントの表面付近に配し、吸着水量が少なく練混ぜトルクが大きいところで練混ぜることが効果的であると考えられる。なお、細骨材、セメント単味および混合粉体の吸着水率試験方法については日本鉄道建設公団・「高品質吹付けコンクリート設計・施工指針(案)⁹⁾」を参照されたい。

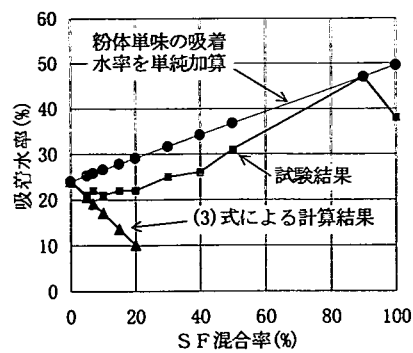


図-5 混合粉体の吸着水率

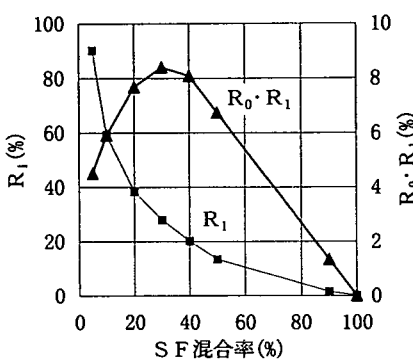


図-6 吸着水中のSF率計算結果

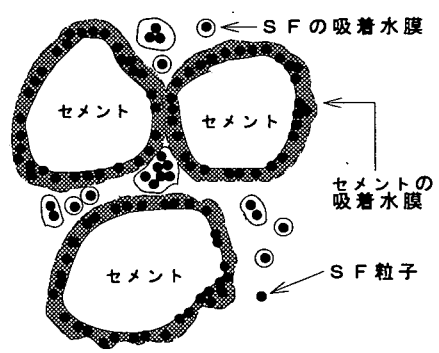


図-7 混合粉体のモデル

3. 3 材料間結合力の検討

3. 3. 1 検討概要

分割練混ぜ、一括練混ぜにより製造されたモルタルに関して、練混ぜ方式の違いによる水、粉体、細骨材の結合力を評価するために遠心力を作用させ、モルタルの保水率と遠心力との関係を把握した。試験は、微粒分を混入しないセメントを使用したモルタルの場合と、微粒分を混入し(シリカフュームを結合材の 5%置換、細骨材の 0.15mm 以下の微粒分が 15%となるように石灰石微粉末を置換)、軟度を調整するため高性能減水剤を添加したモルタルの場合とについて、それぞれ分割練混ぜと一括練混ぜにより製造されたモルタルで行った。表－3 に試験ケースと配合を示す。遠心力試験は以下の方法にて行った。

表－3 試験ケースおよび配合

ケース	練混ぜ方法	水結合材比 W/(C+SF) (%)	砂粉体比 S/(C+SF)	シリカフューム置換率 SF/(C+SF) (%)	石灰石微粉末置換率 S×%	高性能減水剤 (C+SF)×%
CASE1	分割練混ぜ	60	3	0	0	0
CASE2	一括練混ぜ	60	3	0	0	0
CASE3	分割練混ぜ	60	3	5	15*1	0.5
CASE4	一括練混ぜ	60	3	5	15*1	0.5

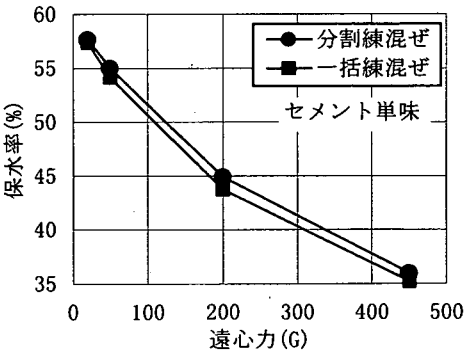
*1：細骨材の 0.15mm 以下の微粒分が 15%となるような石灰石微粉末の置換率

- ①モルタルを試験用容器 4 本にそれぞれ 300g 充填し、充填した質量を測定する。
- ②遠心分離器の遠心管に入れ、所定の遠心力になる回転数まで徐々に回転数を上げる。
- ③30 分間所定の遠心力で脱水した後、回転を止め、取出す。
- ④取出し後の試料質量を測定し、保水率を算出する。

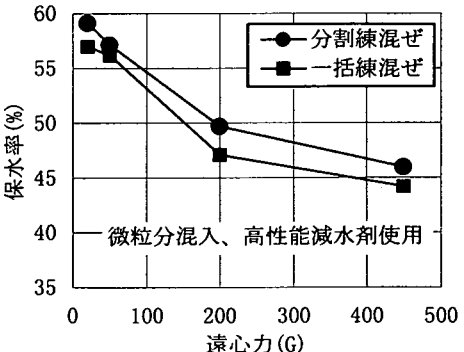
3. 3. 2 検討結果

図－8 および 9 に遠心力と保水率の関係を示す。試験結果より、微粒分(シリカフューム、石灰石微粉末)混入の有無および遠心力の大きさにかかわらず、分割練混ぜにより製造されたモルタルは、一括練混ぜの場合に比べて保水率が高い。

図－8 と 9 を比較すると、微粒分を混入し高性能減水剤の使用により軟度を調整したモルタルの保水率は、練混ぜ方法によらずセメント単味の場合より大きくなる。これは、微粒分を混入し高性能減水剤を使用した場合には、セメントを含む混合粉体の分散効果が大きく、これにより混合粉体が周囲に拘束可能な水量が増加した(拘束可能水量の増加)ために、遠心力が作用しても水が分離されにくくなったためと考えられる。



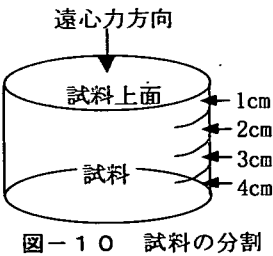
図－8 遠心力と保水率の関係



図－9 遠心力と保水率の関係

また、保水率の試験結果から、粉体粒子の分布状態に練混ぜ方法による影響が存在すると考えた。そこで、遠心力を作用させて脱水したセメントペーストを遠心力作用方向に 1cm ずつの層に分割して (図－10 参照)、

各層のセメント粒子の粒度分布をマイクロトラックにて測定した。図-11に試料高さと通過率50%となるとき粒子径(メジアン径:D50)の関係を示す。ここで、D50が大きいことは、粒子が粗くなることを示している。分割練混ぜの場合のD50は



試料上面から試料高さ方向に向かって大きくなり、3cmで最大値を示す。一方、一括練混ぜの場合には試料高さ1cmから4cmにかけて余り変化がない。分割練混ぜで製造した試料ペーストの場合には、作用する遠心力の方向により粒度が大きく変化していることから、保水能力が大きかったことが推察される。

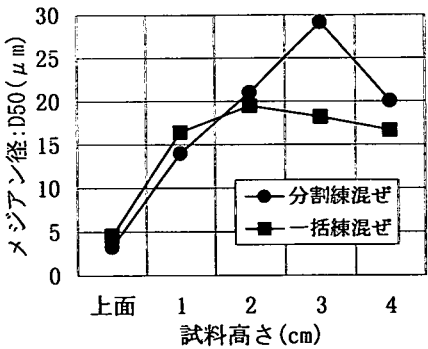


図-11 試料高さとメジアン径の関係

3. 4 気泡組織観察

3. 4. 1 試験概要

吹付けコンクリートの品質(凍結融解抵抗性)改善を目的として、金田一トンネルでの実施工試験³⁾時に作成した供試体にて、硬化コンクリートの気泡組織観察を試みた(表-4参照)。本実施工試験においては、減水剤に高性能 AE 減水剤を用いることで吹付けコンクリートに微細な気泡を連行させた。

表-4 試験ケース

ケース	種 別
1	現行配合
2	現行配合+微粒分 15%
3	現行配合+微粒分 15%+シリカフューム 5%

3. 4. 2 観察方法

コンクリートの気泡組織観察は ASTM-C457-82(リニアトラバース法)を基本とした。この方法では吹付け前からコンクリート中に存在した気泡以外に、吹付け時にコンクリート中に閉じこめられた空隙も気泡として取扱うことになる。コンクリート中にあらかじめ存在した気泡が吹付けによってどう変化するかを検討するために、吹付けコンクリートの場合には、(a)空隙も気泡として取扱う方法(ASTM)および、(b)空隙を気泡として取扱わない方法(ASTM 準拠)の2つの場合について検討した(図-12参照)。また、管理供試体は通常の打込みで作成し、吹付けによる空隙の生成が無いので ASTM でのみ観察した。

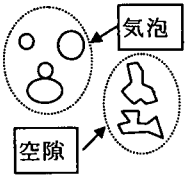


図-12 気泡と空隙の区分

3. 4. 3 観察結果および考察

コンクリートの単位ペースト量には配合による変化は小さく、35~37%の範囲であったが、吹付け時にはね返りのためコア供試体の単位ペースト量が明らかでない。そこで、気泡の平均弦長(観察された気泡の弦の長さの平均値)を図-13に比較する。コア供試体の平均弦長は管理供試体の場合と比べて小さくなる傾向が認められた。さらに、平均弦長は配合にかかわらず管理(ASTM)>コア(ASTM)>コア(ASTM 準拠)の順となっており、吹付けにより大径の気泡が消滅したことが推定される。

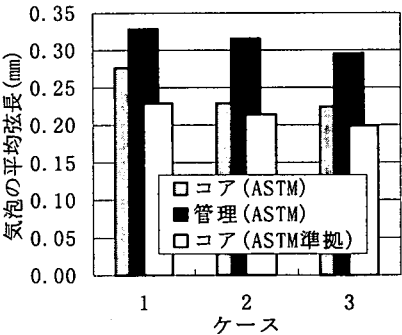


図-13 気泡の平均弦長の比較

図-14に気泡観察による空気量の比較を示す。管理(ASTM)の空気量が配合によらず4%程度であるのに対して、コア(ASTM)の空気量は管理(ASTM)の場合と比べて大きくなる傾向が認められ、空隙の生成を示している。空気量の増加は配合によって異なるが、2%~5%程度であった。また、コア(ASTM)の空気量は粉体量の増加に伴い小さくなっている。一方、コア(ASTM 準拠)の空気

量は管理(ASTM)の場合とそれほど変わらず、最大で 1% 程度の変化であった。コア(ASTM)と管理(ASTM)の空気量の差が吹付け時に生成された空隙であるので、これによる吹付けコンクリートの強度低下も無視できない。セメント空隙比説によると、コンクリート中の空気量が 1% 増加するごとに、圧縮強度は 5% 程度低下すると言われているので、空隙による強度低下はケース 1、2、3 の場合でのおの、25、20、10% 程度となる。

図-15 にコアと管理供試体の強度の比較を示す。この場合、コアと管理供試体強度の材齢 28 日における比率は 0.6~0.7 と、一般に言われている範囲を示した。吹付けにより生成された空隙による強度低下率を図-14 より推定したが、この値以上にコア供試体強度が低下していることから、実際には施工時の養生や急結剤添加の影響があることが伺える。

図-16 および 17 に気泡径分布の観察結果を示す。これらの図より以下のことが言える。

- ①吹付けによって、直径 0.5mm 以上の比較的大きな気泡の度数が減少する。
- ②吹付けによっても、直径 0.2mm 未満の比較的小さい気泡の度数は増加する傾向を示す。

すなわち、比較的大径のエントラップトエアは吹付け時の衝撃によって減少するが、AE 剤によって連行された比較的小径の気泡は吹付け時の衝撃によっても消滅しにくいものと推定され、良質な AE 剤の使用によって吹付けコンクリートの耐凍結融解性を向上させるものと考えられる。

4. まとめ

微粒分の混入によって増加する粘性を活用し、施工性と品質に優れた高品質吹付けコンクリートについて、その特性を明らかにすることを目的として種々検討を行い、以下の知見が得られた。

- (1) 本高品質吹付けコンクリートの場合には、現場において降伏値と塑性粘度の両方を管理する必要があり、フロー値とスランプから定まるフロー指標(f_{fs}/S_l)が 21 以上であることが望ましい。
- (2) セメント、シリカフェーム、混合粉体の吸着水率試験より、混合粉体の吸着水率は単味の場合の値を単純加算して求めることはできず、混合粉体を用いた試験が必要である。また、効果的な練混ぜを行うには、シリカフェームの大部分が吸着水中に存在し、吸着水率がほぼ最小となる混合率 5

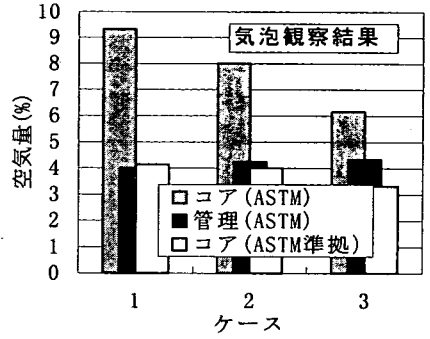


図-14 空気量の比較

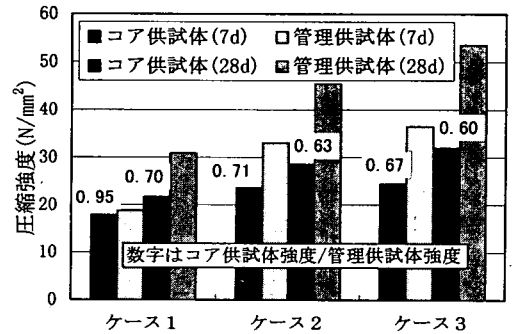


図-15 コアと管理供試体強度の比較

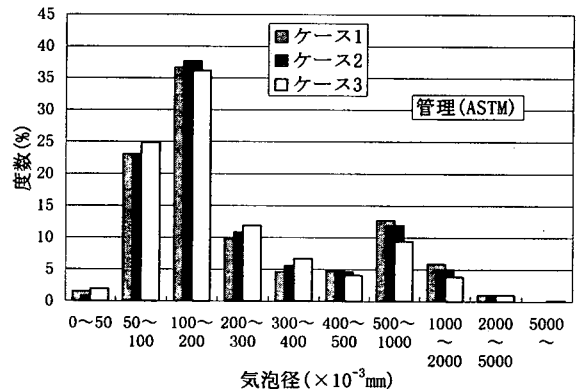


図-16 管理供試体の気泡径分布

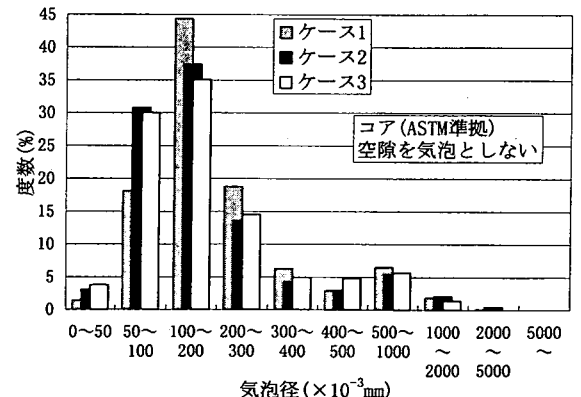


図-17 コア供試体の気泡径分布

～10%が合理的な混合率と考えられる。

(3)モルタルの遠心力試験結果より、微粒分を混入したコンクリートを分割練混ぜで製造して保水率を大きくすることで、材料分離抵抗性と施工性に優れた吹付けコンクリートが得られるものと考えられる。

(4)吹付けコンクリートの気泡組織観察より、比較的大径のエントラップトエアは吹付け時の衝撃によって減少するが、小径の気泡は残存する傾向が確認された。これにより、AE 剤によって連行された比較的小径の気泡は吹付け時の衝撃によっても消滅しにくいものと推定され、良質な AE 剤の使用によって吹付けコンクリートの耐凍結融解性を向上させ得ると考えられる。

5. おわりに

微粒分とシリカフュームを混入し、粘性を活用する高品質吹付けコンクリートは平成2年度以来5トンネルで実施工試験を行ってきた。平成8年度にはこれらの技術的取りまとめを(社)日本トンネル技術協会に、「高品質吹付けコンクリート工法の研究・開発」として委託した。協会では委員会(委員長:魚本健人教授・東京大学生産技術研究所)を設置して検討審議の結果、「高品質吹付けコンクリート設計・施工指針(案)」として集約がなされ、日本鉄道建設公団においても規準化されたところである。しかしながら、本工法は実用化の段階に歩を進め入れたばかりである。今後、試験段階とは相違した切羽での湧水、地山等の条件、骨材等材料の複雑な変化に遭遇することが想定されるが、本格的実用化に向けて現場での適切な対応が望まれるところである。当分の間、現場での対処の記録、施工実績、諸試験のデータ等を集積すると共に、微粒分の最適粒度範囲、粘性特性、品質面における強度特性、コアの力学的特性等についても研究を深度化し、本工法の確立を目指していきたいものと考えている。今後共、皆様方のご指導をお願いする次第である。

なお、本論文は日本トンネル技術協会・「高品質吹付けコンクリート特別委員会」の研究成果の一部であることを付記いたします。

<参考文献>

- 1) 鬼頭、末永、登坂、弘中、吉永：吹付けコンクリートの施工性および品質特性の向上を目指した配合の提案、土木学会、トンネル工学研究発表会論文・報告集、第4巻、1994.11
- 2) 鬼頭、末永、登坂、吉永、弘中：微粒分を混入した吹付けコンクリートの施工特性、土木学会、トンネル工学研究発表会論文・報告集、第5巻、1995.11
- 3) 伊藤、北川、末永、弘中：混和材を用いた吹付けコンクリートの施工性および品質に関する研究、日本コンクリート工学協会、コンクリート工学年次論文報告書集、1997.6
- 4) 山元、園田、北川、末永、宮本：微粒分を混入し粘性を活用した吹付けコンクリートの実施工試験、土木学会、第52回年次学術講演会講演概要集、第Ⅲ部門、1997.9
- 5) 岸谷、伊東、加賀、山本：SECコンクリート工法、建築技術 No.380、1993
- 6) 岡田清他：最新コンクリート工学、(株)国民科学社、1986.3
- 7) 星、大須賀、門倉、北川、末永：分割練混ぜにおける混合粉体の吸着水率に関する考察、土木学会、第52回年次学術講演会講演概要集、第Ⅴ部門、1997.9
- 8) 北川、末永、田村、園田、山元：微粒分を混入し粘性を活用した吹付けコンクリートの材料分離抵抗性に関する試験、土木学会、第52回年次学術講演会講演概要集、第Ⅴ部門、1997.9
- 9) 高品質吹付けコンクリート設計・施工指針(案)、日本鉄道建設公団、1997.5
- 10) 施工能率、作業環境の向上を目指した高品質吹付けコンクリート工法の開発研究報告書、日本トンネル技術協会、1997.3