

論文 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

伊藤祐二*1・北川修三*2・末永充弘*3・弘中義昭*4

要旨: 吹付けコンクリートの施工性および品質の向上を目的とし、混和材としてシリカフュームや石灰石微粉末を用いた吹付けコンクリートの現場施工試験を平成2年度から4トンネル現場で行った。その結果、混和材と高性能(AE)減水剤の使用により施工に適した軟度・流動性を確保しつつ、フレッシュコンクリートの粘性を有効に活用することで、施工性の向上が可能であること、コンクリート硬化体の緻密化による高強度化等、高品質化に大きな効果があることを確認した。さらに、吹付けコンクリートの気泡観察により、AE剤による凍結融解抵抗性の向上が可能であり、有効であるとの所見を得た。

キーワード: 吹付けコンクリート, 混和材, 粘性, 施工性, 高品質化, 凍結融解抵抗性

1. はじめに

NATMにおける吹付けコンクリートの作用効果は、必ずしも解明されているとは言えないが、優れた支保部材として位置付けられている。また、吹付けコンクリートは岩盤面への直接施工、地山と一体化した薄肉構造体の形成、施工の機動性等、他の支保部材にはない多くの特長を有し、永久構造物にも適用されている。しかし、施工状況にもよるが、吹付けコンクリートは施工時にリバウンドが30%程度あること、切羽付近での粉塵濃度が $10\text{mg}/\text{m}^3$ 程度発生する等、経済性や作業環境向上のために、これらの改善が強く望まれている。一方、品質面では吹付けコンクリートの強度が急結剤を用いない通常の打込み供試体(管理供試体)と比べて材齢28日において60~80%程度であること、品質のパラツキが大きいこと、凍結融解抵抗性が小さいこと等の問題がある。

筆者等は、平成2年度以来これらの問題を解決し、吹付けコンクリートの優れた特性を十分活用しつつ、経済性の向上および高品質化をはかることを目的に、北陸新幹線・加越、五里ヶ峯、新倶利伽羅、および東北新幹線・金田一トンネルにて現場施工試験を行ってきた[1],[2],[3]。その結果、混和材(石灰石微粉末やシリカフュームの微粒分)および高性能(AE)減水剤の使用によって、施工に適した軟度・流動性を確保しつつフレッシュコンクリートの粘性を有効に活用することで、施工性の向上が可能であるばかりでなく、コンクリート硬化体の緻密化による高強度化等、高品質化に大きな効果があることを確認した。本研究では、主として金田一トンネルにて実施した現場施工試験時の施工性および硬化後の品質、硬化体組織の気泡観察結果についての検討を行う。

2. 試験概要

2.1 因子と水準

現場施工試験における因子と水準を表-1に示す。なお、本研究では微粒分を細骨材として取り扱っており、微粒分混入率の調整は細骨材の0.15mmフルイ通過率と各水準での必要混入率との

*1 ㈱フジタ技術研究所 生産技術研究部 主任研究員、工修(正会員)

*2 日本鉄道建設公団 設計技術室 調査役

*3 日本鉄道建設公団 設計技術室 主任技師(正会員)

*4 佐藤工業㈱中央技術研究所 土木研究部 主任研究員(正会員)

差を石灰石微粉末で置換した。また、シリカフェームはセメント量の外割で使用した。

2.2 現場施工試験

金田一トンネルでの実験は3ケースの配合について、各ケース2回づつ実施した。また、コンクリートの吹付け試験は切羽の地山状況により、一次吹付けが終了した箇所において実施した。表-2に実験ケースを示す。粉塵の測定は1回あたりの吹付け量を 3m^3 とし、光散乱式デジタル粉塵計を用い、吹付け開始5分後から2回、吹付け位置から5m、15m、25m離れた左右2測点、合計6測点で行い、測定値の幾何平均を求め粉塵濃度とした。なお、トンネル内の風速・風量による粉塵量の変化が生じないようにするために、吹付け開始5分前から試験終了まで送風を停止した。リバウンド率は1回あたりの吹付け量を 1m^3 として、天端を中心とした $\pm 45^\circ$ 範囲にコンクリートを吹付け、発生したリバウンド材の重量を測定して求めた。強度試験は材齢3時間、24時間の若材齢強度(プルアウト試験)と、材齢7日、28日の長期材齢強度(コアおよび管理供試体を使用)に分けて各3個づつ行った。なお、コンクリートの吹付け速度は $10\text{m}^3/\text{hr}$ 、急結剤添加率はセメント量の7%を目標とした。表-3に使用材料を、表-4に吹付けコンクリートの基本配合を示す。

表-1 現場施工試験における因子と水準

| トンネル名 | 練混ぜ・搬送方式 | スラフ [°] の範囲(cm) | シリカフェーム添加率(C×%) | 微粒分混入率(S×%) |
|-------|-------------|--------------------------|-----------------|-------------|
| 加越 | 一括練混ぜ・空気搬送 | 8±2.5 | 0, 5, 10 | - |
| 五里ヶ峯 | | 8±1, 10±1, 13±1, 17±1 | 0, 5 | |
| 新倶利伽羅 | | 15±1 | 0, 5 | 5.5, 15, 20 |
| 金田一 | 分割練混ぜ・ポンプ搬送 | 8±2 | 0, 5 | 2, 15 |

表-2 実験ケース

| 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%+シリカフェーム5% |

表-3 使用材料

| 材 料 | 特 徴 |
|------------|---|
| セメント | 普通ポルトランド [°] , 比重:3.16, 比表面積:3260 cm^2/g |
| 細骨材 | 川砂, 比重:2.61, 粗粒率:2.58 |
| 粗骨材 | 川砂利, 比重:2.52, 粗粒率:5.33, 最大寸法:10mm |
| 微粒分 | 石灰石微粉末, 比重:2.71, 比表面積:3630 cm^2/g , 325メッシュ, 純度(CaCO_3):98.25% |
| シリカフェーム | 比重:2.25, 比表面積: $18.5 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{g}$ |
| 急結剤 | セメント鉱物系, 比重:2.68 |
| 高性能 AE 減水剤 | ポリグリコールエステル誘導体系 |

表-4 吹付けコンクリートの基本配合

| スラフ [°] の範囲(cm) | 空気量の範囲(%) | 水セメント比(%) | 細骨材率(%) | 単位セメント量(kg/m^3) | 材 料 | | | |
|--------------------------|-----------|-----------|---------|-----------------------------------|----------|-----------------------------|----------------------|------------------------|
| | | | | | 急結剤(C×%) | シリカフェーム ^{*2} (C×%) | 微粒分(S×%) | AD ^{*4} (C×%) |
| 8±2 | 3±1 | 60~65.8 | 60 | 360 | 7 | 0, 5 | 2 ^{*3} , 15 | 軟度調整 |

*1: ケース1=65.8%、ケース2, 3=60%、*2: 外割添加
*3: 細骨材の0.15mmフルイ通過率、*4: 高性能 AE 減水剤

表-5 粉体表面積の算出結果(金田一トンネル)

| ケース | 粉体表面積 |
|-----|---|
| 1 | $1.17 \times 10^9 \text{cm}^2/\text{m}^3$ |
| 2 | $1.66 \times 10^9 \text{cm}^2/\text{m}^3$ |
| 3 | $4.99 \times 10^9 \text{cm}^2/\text{m}^3$ |

結果(金田一トンネル)を示す。図-1および2に粉体表面積とリバウンド率および粉塵濃度の関係を、3トンネルの場合について示す。加越トンネルにおけるシリカフューム添加率 5, 10%での試験(粉体表面積でおよそ $4.5, 8 \times 10^9 \text{cm}^2/\text{m}^3$)においては、吹付け時に噴発が発生していた。リバウンド率はトンネルによって値が異なるものの、粉体表面積の増加に伴って減少する傾向が認められる。また、粉塵濃度の場合には加越トンネルでの試験結果を除いて、リバウンド率と同様の傾向が認められる。すなわち、単位水量一定のもとで石灰石微粉末やシリカフュームの微粒分を吹付けコンクリートに用いることでコンクリートの粘性が増大し、これをリバウンドや粉塵の低減に利用できると言える。また、加越トンネルにおける粉塵濃度の試験結果については、コンクリートの粘性と吹付機の組み合わせに関係すると考えられ、これについては後ほど述べる。

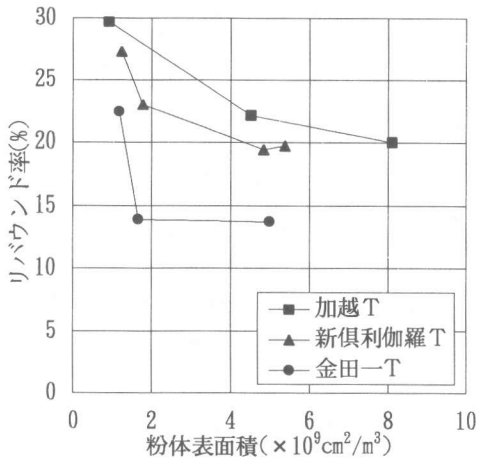


図-1 粉体表面積とリバウンド率の関係

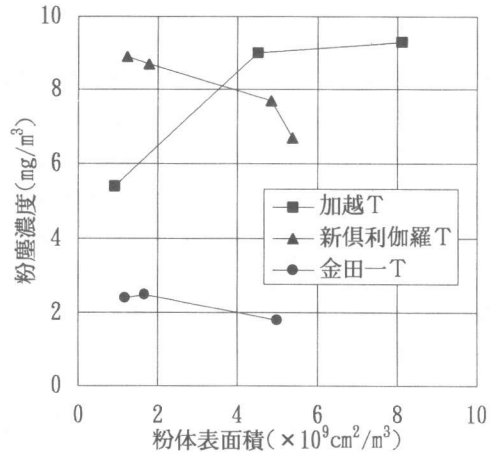


図-2 粉体表面積と粉塵濃度の関係

五里ヶ峯トンネルにおいて吹付けコンクリートのスランプを変化させて(高性能減水剤使用量を変化させて)現場施工試験を行い、スランプがどの程度施工性に影響するかを検討した。この試験においては粉体表面積が大きく ($4.06 \times 10^9 \text{cm}^2/\text{m}^3$)、スランプが 10cm 以下の領域では吹付け時に噴発が発生していた。図-3 にスランプとリバウンド率および粉塵濃度の関係を示す。この図より、リバウンド率は粉体表面積にかかわらずスランプにほぼ比例することが認められる。一方、粉塵濃度は粉体表面積によって傾向が異なる。粉体表面積が小さい場合 ($1.06 \times 10^9 \text{cm}^2/\text{m}^3$) にはスランプにほぼ比例するが、粉体表面積が大きい場合 ($4.65 \times 10^9 \text{cm}^2/\text{m}^3$) には下凸の関係であり、スランプ 13cm 付近で最低値を示した。

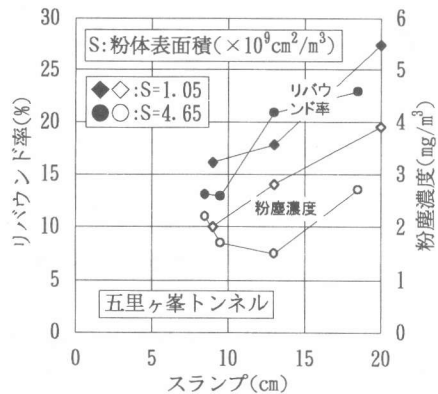


図-3 スランプとリバウンド率および粉塵濃度の関係

一般に、コンクリートのスランプが小さいほど粘性は大きいので、コンクリートの粘性を大きくするほどリバウンドと粉塵が少なくなるものと考えられる。しかしながら、吹付機の能力とコンクリートの性状(粘性)との関係から、搬送管内に十分なコンクリートが供給されない場合には、脈動や噴発の原因となってノズル先端部で粉塵が多量に発生する。加越トンネルや五里ヶ峯トン

ネルで、粉体表面積が大きくスランプが小さい領域での粉塵濃度の試験結果は、前述の原因によるものと考えられる。すなわち、コンクリートの正常な吹付けが可能な範囲内で、コンクリートの粘性を増大させること(粉体量の増大、スランプの低下)が施工性を改善するうえで重要である。

4. 吹付けコンクリートの硬化後の品質

図-4に金田一トンネルの場合の粉体表面積と吸水率の関係を示す。ここで、吹付けコンクリートの吸水率はJIS A 1110(粗骨材の比重及び吸水率試験方法)に準拠して求めた。粉体表面積の増大とともにコア供試体の吸水率は低下しており、石灰石微粉末やシリカフュームの使用によって硬化体組織が緻密化することを示している。このことがコンクリートの高品質化に大きく寄与すると考えられる。

図-5および6に金田一トンネルにおける圧縮強度を示す。各材齢において石灰石微粉末やシリカフュームを用いた吹付けコンクリートの圧縮強度が現行配合(ケース1)に比べて大きく、混和材の使用効果が表れており、この傾向は他の現場施工試験においても同様である[1],[2]。また、コアと管理供試体の強度を比較すると、材齢28日ではその比は0.6~0.7であり、一般に言われている範囲を示した。

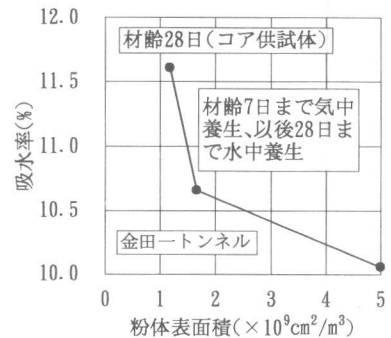


図-4 粉体表面積と吸水率の関係

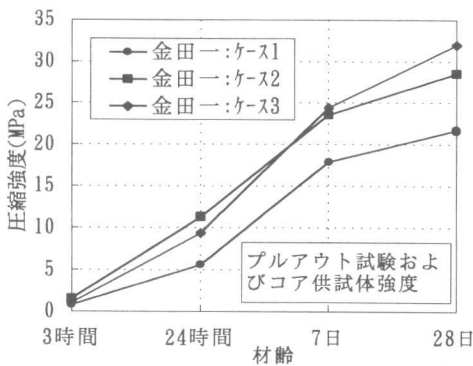


図-5 圧縮強度の経時変化

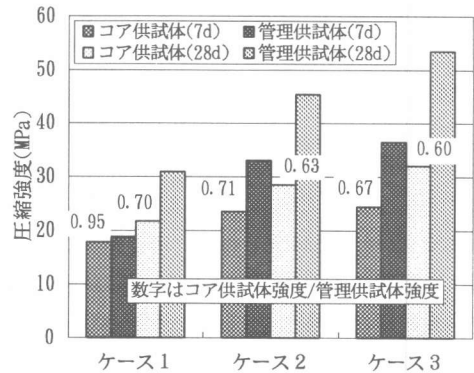


図-6 コアと管理供試体強度の比較

5. 吹付けコンクリートの硬化体組織の気泡観察

吹付けコンクリートに石灰石微粉末やシリカフュームを用いることが硬化体組織を緻密化させ、強度の増加、耐久性の向上等、吹付けコンクリートの高品質化に大きく寄与していると考えられる。新俱利伽羅トンネルでの試験では、さらにAEコンクリートとすることで十分な凍結融解抵抗性を示すことを確認した[2]。そこで、金田一トンネルでの試験において、凍結融解抵抗性と密接に関係する硬化体組織の気泡観察を試みた。試験方法はASTM-C457-82(リニアトラバース法)を基本とした。ただし、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(ボイド)も気泡として取り扱うことになる。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、(a)ボイド

も気泡として取り扱う方法(ASTM)および、(b)ポイドを気泡として取り扱わない方法(ASTM 準拠)の2つの場合について検討した(図-7参照)。また、気泡観察は吹付けコンクリートから採取したコア供試体と比較のための管理供試体(観察方法は ASTM のみ)の2種類について行った。

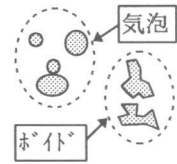


図-7 気泡とポイドの区分

吹付けコンクリートはリバウンドがある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、コア供試体の単位ペースト量は管理供試体の場合と同一と仮定して気泡間隔係数を求めた。なお、測定の結果、管理供試体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。

図-8に気泡間隔係数の比較を示す。管理供試体の気泡間隔係数は0.45mm程度、コアをASTM法で観察した場合(ASTM)には0.25mm程度、コアを ASTM 法準拠で観察した場合(ASTM 準拠)には0.33mm程度の値で、コア供試体の気泡間隔係数が管理供試体と比べて小さい結果となった。

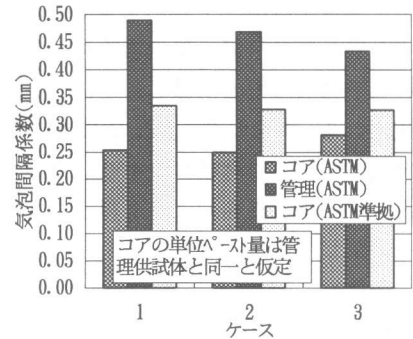


図-8 気泡間隔係数の比較

図-9に気泡の平均弦長の比較を示す。コア供試体の平均弦長は管理供試体のそれ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。

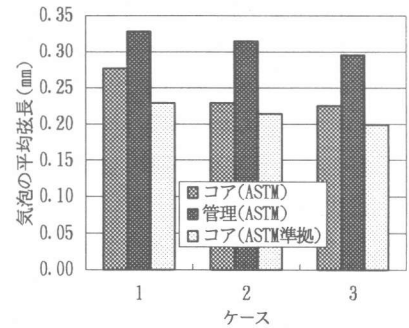


図-9 気泡の平均弦長の比較

図-10に気泡観察による空気量の比較を示す。管理供試体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、ポイド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)の空気量は粉体表面積の増加に伴い、ケース3ほど小さくなっている。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ポイドであるので、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、ポイドによる強度低下はケース1、2、3の場合におおの25、20、10%程度となる。しかし、図-6によるとコアと管理供試体強度の比はここで推定した

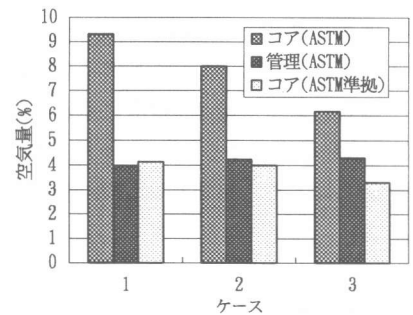


図-10 気泡観察による空気量の比較

強度低下以下になっており、吹付け後の初期養生や急結剤添加などの影響も大きいことが分かる。

図-11と12に管理およびコア供試体(ASTM 準拠)の気泡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、直径0.2mm未満の比較的小さい気泡の度数は増加する。

③管理供試体の気泡分布には配合による差は小さいが、コア供試体の場合には特に 0.3mm 未満の気泡径における度数に差が認められる。

これらより、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、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と推定される。すなわち、良質な AE 剤の使用によって吹付けコンクリートの凍結融解抵抗性を向上させ得ることを示唆している。

6. まとめ

試験の結果、以下のことが言える。

- (1) 単位水量一定のもとで石灰石微粉末やシリカフェームを吹付けコンクリートに用いることで、コンクリートの粘性が増大し、これをリバウンドや粉塵の低減に利用できる。
- (2) 正常な吹付けが可能な範囲内で、コンクリートの粘性を増大させること(粉体量の増大、スランプの低下)で吹付けコンクリートの施工性を改善できる。
- (3) 石灰石微粉末の混入やシリカフェームの添加による硬化体組織の緻密化が高強度化等、吹付けコンクリートの高品質化に大きく寄与している。
- (4) 吹付け時に生成されたボイドによる吹付けコンクリートの強度低下は無視できない値であり、場合によっては 25%程度にもなるが、吹付け後の初期養生や急結剤添加などの影響も大きい。
- (5) 大径のエントラップトエアは吹付けにより消滅しやすいが、AE 剤による小径の連行気泡は消滅しにくく、良質な AE 剤の使用により吹付けコンクリートの凍結融解抵抗性を改善可能である。

参考文献

- [1] 鬼頭誠ほか: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、pp.63-70、1995
- [2] 弘中義昭、鬼頭誠、末永充弘、登坂敏雄:高品質吹付けコンクリートの開発、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.1、pp.1347-1352、1996
- [3] 伊藤祐二ほか:分割練混ぜで製造された吹付けコンクリートの高品質化、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集、第Ⅲ部門-B、pp.136-137、1996

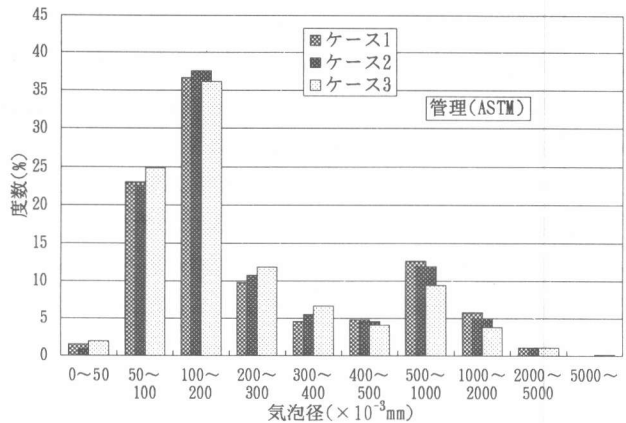


図-1 1 気泡分布の観察結果(管理供試体)

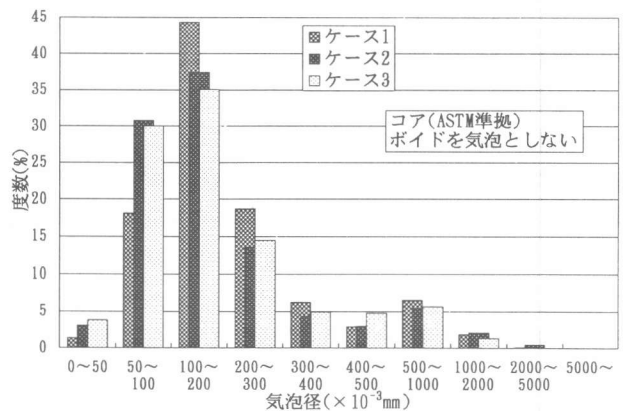


図-1 2 気泡分布の観察結果(コア供試体)