

フライアッシュを積極的に用いた粉体系中流動コンクリートの開発

白根 勇二^{*1}・蛸谷 祐至^{*2}・森 英治^{*2}・伊藤 毅浩^{*2}

Development of Powder Type Middle Fluidity Concrete which Used Fly Ash Positively

Yuji SHIRANE, Yuji EBITANI, Eiji MORI, Takehiro ITOU

表-1 粉体系中流動コンクリートの配合

Gmax (mm)	W/B (%)	W/(C+FA1+FA2) (%)	s/a (%)	単位粗骨材 絶対容積 (m^3/m^3)	単位量 (kg/m ³)						非鋼繊維 (kg/m ³)	混和剤 (B×%)	
					W	B		S		G		AD1	AD2
						C	FA1	S1	FA2				
20	53.3	42.9	53.1	0.31	180	270	67	836	83	837	2.76	1.2	0.012

C：普通ポルトランドセメント（密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$ ）

FA1およびFA2：フライアッシュIV種相当品（密度 $2.26\text{g}/\text{cm}^3$ ，比表面積 $3,000\text{g}/\text{cm}^2$ 程度）

S1：砕砂（密度 $2.65\text{g}/\text{cm}^3$ ，FM2.8）

G：砕石（密度 $2.70\text{g}/\text{cm}^3$ ，FM6.6）

非鋼繊維：ポリプロピレン繊維（密度 $0.91\text{g}/\text{cm}^3$ ， $L=50\text{mm}$ ，アスペクト比85）

AD1：AE減水剤（リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体）

AD2：フライアッシュ用AE剤



写真-1 加振前のスランプ性状



写真-2 加振後のスランプ性状



写真-3 中流動コンクリートの流動状況

研究の目的

山岳工法（NATM）では、覆工コンクリートの施工性の改善や品質の向上を目的に、従来の覆工コンクリート（スランプ15cm程度）よりも流動性を高め、スランプフローが35～50cm程度の中流動コンクリートを適用する事例が増えている。東・中・西日本高速道路株式会社では「トンネル施工管理要領（中流動覆工コンクリート編）」を制定しており、中流動コンクリートの適用を積極的に図っている。

一方、地球温暖化対策として二酸化炭素排出量を抑制することが課題となっており、コンクリート分野においても、産業副産物を混和材として積極的に利用することが検討されている。

そこで、トンネル覆工を対象としてフライアッシュを積極的に用いた粉体系中流動コンクリートの開発に取り組み、同コンクリートを常磐自動車道原町トンネル工事の覆工全線に適用した。

技術の説明

選定した中流動コンクリートはフライアッシュを $150\text{kg}/\text{m}^3$ 混入した粉体系である。本検討では、適用した粉体系中流動コンクリートの硬化性状、耐久性状、温度ひび割れ抑制効果、施工性、二酸化炭素排出量の削減効果について検討を行なった。

主な結論

フライアッシュを積極的に用いた粉体系中流動コンクリートは、施工性の改善に寄与するだけでなく、圧縮強度の長期的な増加が大きいこと、凍結融解抵抗性や中性化抵抗性を有すること、温度ひび割れの抑制効果が高いことが確認された。また、フライアッシュを用いることでコンクリート材料由来による二酸化炭素排出量が削減されることが明らかとなった。

*1 本店 技術研究所 基盤技術研究グループ

*2 東北支店 原町トンネル作業所

フライアッシュを積極的に用いた粉体系中流動コンクリートの開発

白 根 勇 二^{*1} 蛭 谷 祐 至^{*2}
森 英 治^{*2} 伊 藤 毅 浩^{*2}

要 旨

覆工の施工性の改善や品質の向上，環境負荷の軽減を目的に，フライアッシュを積極的に用いた粉体系中流動コンクリートの適用について検討を行なった．中流動コンクリートとは，従来の覆工コンクリート（スランプ15cm程度）よりも流動性を高め，スランプフローが35～50cm程度のコンクリートである．

検討の結果，適用した中流動コンクリートは施工性の改善に寄与するだけでなく，圧縮強度の長期的な増加が大きいこと，凍結融解抵抗性や中性化抵抗性を有すること，温度ひび割れの抑制効果が高いことが確認された．また，フライアッシュを用いることでコンクリート材料由来による二酸化炭素排出量が削減されることが明らかとなった．

キーワード 中流動コンクリート／覆工／粉体系／フライアッシュ／二酸化炭素／環境負荷低減

目 次

- | | |
|--------------------|--------------------|
| 1. はじめに | 5. 粉体系中流動コンクリートの施工 |
| 2. 粉体系中流動コンクリートの配合 | 6. 二酸化炭素排出量の削減効果 |
| 3. 粉体系中流動コンクリートの物性 | 7. まとめ |
| 4. 温度ひび割れ抑制効果 | |

APPLICATION OF POWDER TYPE MIDDLE FLUIDITY CONCRETE INCORPORATING HIGH VOLUME FLY ASH

Yuji SHIRANE
Eiji MORI

Yuji EBITANI
Takehiro ITO

Synopsis:

In this study, application of powder type middle fluidity concrete incorporating high volume fly ash was investigated to improve workability, quality of lining concrete and to reduce environmental load. Middle fluidity concrete has higher flowability (slump-flow 35~50cm) than conventional concrete (slump 15cm)

As a result, middle fluidity concrete examined in this study contributed such as improvement of workability and strength development in long term. Also, it was confirmed that the middle fluidity concrete had resistance against freeze & thaw effect, carbonation and thermal crack.

In addition, it was confirmed that using fly ash contribute to reduce carbon dioxide emission from materials.

* 1 本店 技術研究所 基盤技術研究グループ

* 2 東北支店 原町トンネル作業所

1. はじめに

山岳工法（NATM）では、覆工コンクリートの打込みおよび締固め作業が狭隘な空間での施工となるため、充填不良やコールドジョイントなどの不具合の発生が懸念される。しかし最近では、施工性の改善や品質の向上を目的に、従来の覆工コンクリート（スランプ 15cm 程度）よりも流動性を高め、スランプフローが 35～50 cm 程度のコンクリート（以下、中流動コンクリートと称す）を適用する事例が増えている。東・中・西日本高速道路株式会社では「トンネル施工管理要領（中流動覆工コンクリート編）」¹⁾（以下、施工管理要領と称す）を制定しており、中流動コンクリートの覆工コンクリートへの適用を積極的に図っている。

一方、最近では、地球温暖化対策として二酸化炭素排出量を抑制することを各産業に求められており、その具体策の検討が課題となっている。建設工事においては、材料、特にコンクリートに由来する二酸化炭素排出量が多いことから、セメント使用量を低減し、産業副産物を混和材として積極的に利用することが検討されている。

筆者らは、これまでにトンネル覆工を対象としてフライアッシュを積極的に用いた粉体系中流動コンクリートの開発に取り組んでおり、開発した同コンクリートを常磐自動車道原町トンネル工事の覆工全線に適用を図ってきた²⁾。本稿では、適用した粉体系中流動コンクリートの硬化性状、耐久性状、温度ひび割れ抑制効果、施工性や二酸化炭素の排出量削減効果について検討した結果を報告する。

2. 粉体系中流動コンクリートの配合

2.1 配合選定基準

施工管理要領に示される中流動コンクリートは、混和材として石灰石微粉末（LS）またはフライアッシュ（FA）を用いることを前提とした粉体系中流動コンクリートである。最低セメント量を 270kg/m³ に規定し、80kg/m³ の混和材を加えることで、総粉体量は 350kg/m³ を標準としている。

表-1 に、混和剤としてフライアッシュを用いた場合の中流動コンクリートの要求性能および配合選定基準を示す。フライアッシュを用いた場合、セメント種類は普通ポルトランドセメントに限定されており、単位水量は 180kg/m³ 以下としている。フレッシュ性状の要求性能には、スランプ、スランプフロー、空気量に加え、加振変形量とU型充填高さ（障害なし）が規定されている。加振変形量は、スランプフローを測定した後のコンクリートに試験装置上で棒状パイププレートを用いて 10 秒間の振動を与え、加振後に広がった量をいう。このとき、材料の分離抵抗性についても目視で確認する。U型充填高さは、JSCE-F511 に準拠したU型充填試験装置を用いて、障害物を設けない状態で試験を実施するもので、280mm 以上と規定している。

2.2 選定配合

選定した配合と使用材料を表-2 に示す。使用したフライアッシュはIV種相当品で、単位量は粉体および細骨材の置換総量で 150kg/m³ である。フライアッシュを結合材として用いた場合、ポゾラン反応による強度増進効果を効率良く期待できる量は、一般的にセメントへの置換で 20%程度であると言われている。また、フライアッシュを砂に置換して使用した場合には、コンクリートの材料分離抵抗性の向上が期待されるが、使用した細骨材の種

表-1 中流動コンクリートの配合選定基準（フライアッシュを使用する場合）

材齢28日における 圧縮強度 (N/mm ²)	粗骨材 最大寸法 (mm)	セメント の種類	最低 セメント量 (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)	スランプ ^o および スランプフロー (cm)	加振変形試験 (cm)	U型充填高さ (障害無し) (mm)	空気量 (%)
18	20 または 25	N	270	180以下	21±2.5 35～50	10秒加振後の スランプフローの 広がり 10±3	280以上	4.5 ±1.5

表-2 選定した粉体系中流動コンクリートの配合および使用材料

Gmax (mm)	W/B (%)	W/(C+FA1+FA2) (%)	s/a (%)	単位粗骨材 絶対容積 (m ³ /m ³)	単位量 (kg/m ³)						非鋼纖維 (kg/m ³)	混和剤 (B×%)	
					W	B		S		G		AD1	AD2
						C	FA1	S1	FA2				
20	53.3	42.9	53.1	0.31	180	270	67	836	83	837	2.76	1.2	0.012

C：普通ポルトランドセメント（密度3.16g/cm³）

FA1およびFA2：フライアッシュIV種相当品（密度2.26g/cm³，比表面積3,000g/cm²程度）

S1：砕砂（密度2.65g/cm³，FM2.8）

G：碎石（密度2.70g/cm³，FM6.6）

非鋼繊維：ポリプロピレン繊維（密度0.91g/cm³，L=50mm，アスペクト比85）

AD1：AE減水剤（リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体）

AD2：フライアッシュ用AE剤

類が砕砂で粒度分布が粗かったため、フライアッシュを砂に置換することでフレッシュ性状の改善が認められた。したがって、配合上はセメント置換率を 20%、砂置換率を 9%として表記した。このときの水結合材比(=W/(C+FA1))は 53.3%，砂置換分のフライアッシュも含めた水結合材比(=W/(C+FA1+FA2))は 42.9%となる。

また、中流動コンクリートには剥落防止を目的としてポリプロピレン短繊維（0.3Vol%）を使用した。混合は、コンクリート到着後にトラックアジテータ車のドラム内に空気圧送で短繊維を直接投入し、全量投入後に 120 秒間高速攪拌させた。

3. 粉体系中流動コンクリートの物性

3.1 試験項目および方法

フライアッシュを適用した場合、長期強度の増進、耐久性の向上、温度ひび割れの抑制など、コンクリートの物性改善が期待される。しかし、フライアッシュの使用量が多く、セメント置換率が大きい場合には、強度低下、中性化や凍害などに対する抵抗性の低下を招くことが懸念される。したがって、適用した粉体系中流動コンクリートについて、表-3 に示す圧縮強度試験、割裂引張強度試験、凍結融解試験および促進中性化試験を実施した。凍結融解試験の開始材齢は、フライアッシュのポゾラン反応の効果を期待して 91 日とした。また、促進中性化試験は材齢 28 日まで水中養生を行い、材齢 119 日まで気中養生を施した後に試験を開始し、促進期間 4 週と 13 週で測定を行った。

各試験の供試体は、実構造物の施工に合わせて作製した。このときの粉体系中流動コンクリートのフレッシュ



写真-1 加振前のスランプフロー性状



写真-2 加振後のスランプフロー性状

性状を表-4 に示す。また、加振前後のスランプフローを写真-1 および写真-2 に示す。

3.2 強度特性

表-5 および図-1 に圧縮強度試験と割裂引張試験の結果

表-3 試験項目

試験項目	試験方法
圧縮強度試験	JIS A 1108に準拠。 試験材齢：18.5時間，3日，7日，28日，56日，91日
割裂引張強度試験	JIS A 1113に準拠。 試験材齢：3日，7日，28日，91日
凍結融解試験	JIS A 1148（A法）に準拠。 ただし，標準水中養生の期間は91日とした。
促進中性化試験	JIS A 1153に準拠。 （炭酸ガス濃度5%，温度20℃，湿度60%） ただし，水中養生期間28日，気中養生期間91日で， 促進材齢4週と13週での測定を行った。

表-4 中流動コンクリートのフレッシュ性状

項目	繊維投入前	繊維投入後
スランプ (cm)	24.0	21.5
スランプフロー (cm)	56.5×53.5	(加振前) 46.0×44.0 (加振後) 55.5×54.0
加振変形量 (cm)	—	9.75
空気量 (%)	4.0	4.8
U型充填高さ (cm)	—	34
コンクリート温度 (℃)	26	26

表-5 強度試験結果

材 齢	18.5時間	3日	7日	28日	56日	91日
圧縮強度 (N/mm ²)	2.50	15.0	20.6	30.4	36.1	39.7
割裂引張強度 (N/mm ²)	—	1.49	2.27	2.66	—	3.57

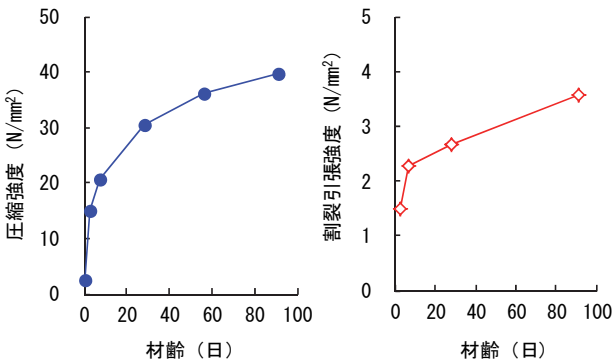


図-1 圧縮強度および割裂引張強度

を示す。材齢 28 日を経過した後も強度が増加する傾向が認められており、材齢 91 日の圧縮強度および割裂引張強度は材齢 28 日に対していずれも約 3 割増加している。これは、フライアッシュのポゾラン反応による強度増加効果であると考えられる。

3.3 凍結融解抵抗性

図-2 に、粉体系中流動コンクリートの凍結融解試験結果を示す。本試験はベースコンクリートについても試験を実施しており、ポリプロピレン繊維の混入の有無による影響も検討している。

粉体系中流動コンクリートの 300 サイクル終了時点の相対動弾性係数は、ポリプロピレン繊維の混入の有無によらず 95%以上を確保しており、高い凍結融解抵抗性を有することが確認できた。フライアッシュ用の AE 剤を使用していることや、ポゾラン反応による効果を期待するために試験開始時期を遅らせたことが良好な結果をもたらした要因と考えられる。したがって、今回適用した配合のようにフライアッシュを 150kg/m^3 と多量に混和した場合でも、適切な AE 剤を使用し、確実な養生を実施することによって凍結融解抵抗性を確保することが十分可能であることが示唆され、実用上問題ないことが確認された。

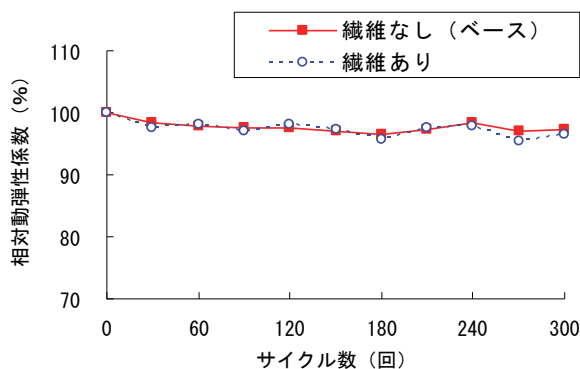


図-2 凍結融解試験結果

3.4 中性化抵抗性

図-3 に、粉体系中流動コンクリートの促進中性化試験結果を示す。図中には、参考として普通ポルトランドセメント (N) と高炉 B 種セメント (BB) を用い、水セメント比を 55%とした一般的なコンクリートの促進中性化試験 (水中養生期間 28 日、気中養生期間 28 日) の結果も示す。

粉体系中流動コンクリートの促進材齢 4 週および 13 週の結果ではあるが、中性化深さは普通ポルトランドセメント (W/C55%) よりも若干大きく、高炉 B 種セメントとほぼ同等の値となった。

なお、通常では水中養生を 28 日間、気中養生を 28 日間実施した後に試験を開始するところ、今回は装置の故

障により水中養生を 28 日間、気中養生を 91 日間経過した後に試験を開始し、気中養生期間が長くなった。試験結果への影響が無いとはいえないが、通常の屋外あるいは屋内環境下の二酸化炭素濃度は促進試験よりも低く、中性化は徐々に進行するため、粉体系中流動コンクリートの中性化抵抗性は、高炉 B 種を用いた一般的なコンクリートとほぼ同等であると考えられる。

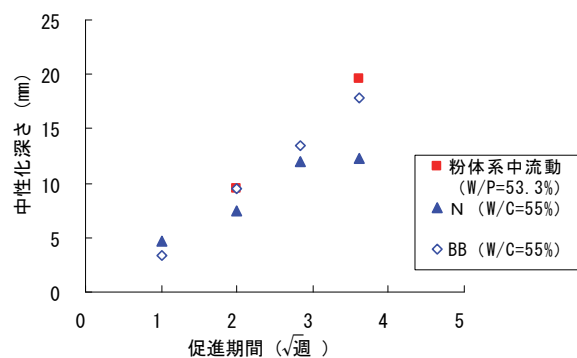


図-3 促進中性化試験結果

4. 温度ひび割れ抑制効果

4.1 検討概要

粉体系中流動コンクリートは、セメント量を増加させずにコンクリートの流動性や材料分離抵抗性を高めるために、混和材としてフライアッシュを積極的に利用したコンクリートである。言い換えれば、温度ひび割れ抑制の効果を期待できるコンクリートである。そこで、覆工コンクリートを対象に、結合材パターンをパラメータとして粉体系中流動コンクリートの温度応力解析を実施し、各配合の温度ひび割れ抑制効果を比較した。

図-4 に検討対象とした覆工コンクリートの断面図を示す。覆工コンクリートの内径半径は 5,600mm であり、覆工厚さは 350mm となっており、吹付けコンクリートの厚さが 200mm、インバートコンクリートの厚さが 500mm となっている。

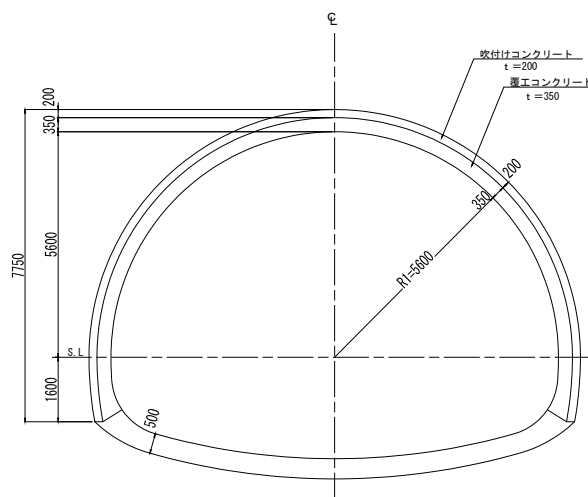


図-4 解析実施断面 (DIIIa 断面)

表-6 検討ケースおよび配合

ケース	セメント 種類	W/B (%)	s/a (%)	単位 粗骨材 絶対容積 (m^3/m^3)	単位量(kg/m^3)							非鋼繊維 (kg/m^3)	混和剤(kg/m^3)	
					水 W	結合材			細骨材		粗骨材 G		AE減水剤	高性能 AE減水剤
						N	BB	FA1	S1	FA2				
中流動FA (適用配合)	N	53.3	53.1	0.31	180	270	0	67	836	83	837	2.76	4.0	0.0
中流動N	N	48.6	53.5	0.31	175	360	0	0	944	0	837	2.76	0.0	3.6
中流動BB	BB	47.2	53.5	0.31	170	0	360	0	946	0	837	2.76	0.0	3.6

表-6 に検討ケースおよび配合を示す。検討ケースは 3 ケースとし、今回適用した粉体系中流動コンクリート『中流動 FA』の比較用として、結合材に普通ポルトランドセメントのみを使用した『中流動 N』，高炉B種セメントのみを使用した『中流動 BB』についても、解析を実施した。『中流動 N』と『中流動 BB』は、実績配合が無いため机上で想定した暫定的な配合であるが、『中流動 FA』と同様に非鋼繊維を混合したコンクリートを対象としているため、セメント量が多い配合となっている。

表-7 に主な解析条件として覆工コンクリートについて示す。各条件は主に JCI の『マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008³⁾』を参考に定めた。『中流動 FA』の断熱温度上昇特性の入力条件は、セメントの 20%をフライアッシュで置換したと考え、フライアッシュB種セメントの単位量が $337\text{kg}/\text{m}^3$ のコンクリートとして取り扱った。なお、『中流動 FA』の圧縮強度は実測値が得られているため、JCI 指針に示された予測式は適用せず、表-5 に示す圧縮強度を採用した。また、外気温は福島県相馬市における月別平年値とし、覆工コンクリートの打設日は 6/15、コンクリートの打込み温度は 23.3°C (6 月の平年値 + 5°C) とした。解析期間は、覆工コンクリート施工後の翌年 4 月末までとした。

表-7 解析条件 (覆工コンクリート)³⁾

項目	中流動 FA	中流動 N	中流動 BB
熱伝導率 (W/m・℃)	2.70		
比熱 (kJ/kg・℃)	1.15		
断熱温度 上昇特性	JCI指針に準拠 ・セメント種：FB ・セメント量： 337kg/m ³	JCI指針に準拠 ・セメント種：N ・セメント量： 360kg/m ³	JCI指針に準拠 ・セメント種：BB ・セメント量： 360kg/m ³
初期温度 (℃)	23.3		
圧縮強度 (N/mm ²)	表-5のとおり	JCI指針に準拠	
引張強度 (N/mm ²)	JCI指針に準拠		
静弾性係数 (N/mm ²)	JCI指針に準拠		
ポアソン比	0.2		
線膨張係数 (10 ⁻⁶ /℃)	10.0	10.0	12.0
熱伝達係数 (W/m ² ・℃)	打設後24時間まで 2 以 降 12		

4.2 解析結果

図-5 にコンクリートの最高温度分布図を示す。いずれのケースにおいてもコンクリートを打ち込んでから約 1 日経過した頃に最高温度に達し、最高温度は『中流動 N』，『中流動 BB』，『中流動 FA』の順で低くなった。

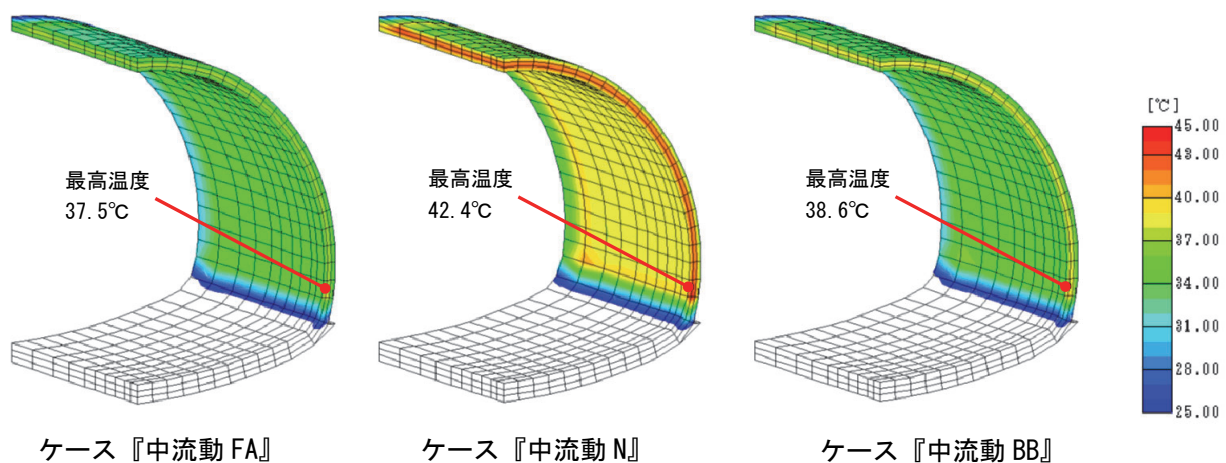


図-5 覆工コンクリートの最高温度分布図

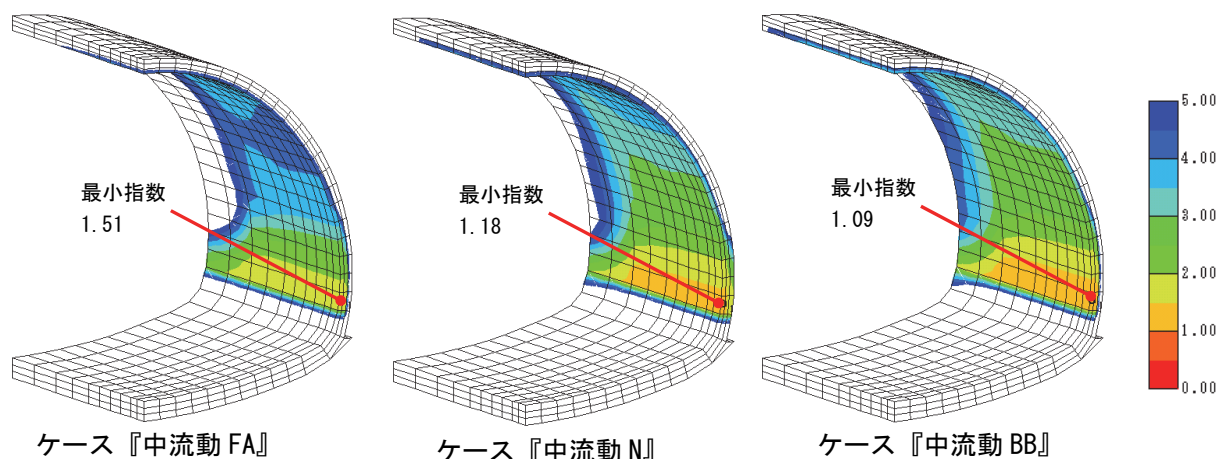


図-6 覆工コンクリートの最小ひび割れ指数分布図

フライアッシュを積極的に用いた中流動コンクリートは、普通ポルトランドセメントのみの中流動コンクリートよりもコンクリート温度を 4.9°C 低減し、発熱温度抑制に効果があることがわかる。

図-6 に温度ひび割れ指数の最小値の分布図を示す。いずれのケースにおいても覆工を施工してから 6 日後に、温度ひび割れ指数が最小値となり、『中流動 BB』、『中流動 N』、『中流動 FA』の順にひび割れ指数が大きくなった。『中流動 FA』の温度ひび割れ指数が最も小さくなった要因は、セメントの使用量が削減されたことによる発熱温度の抑制と考えられ、フライアッシュを積極的に適用した中流動コンクリートは、温度ひび割れ抑制にも有効であることが示唆される結果となった。

5. 粉体系中流動コンクリートの施工

5.1 打込みおよび締固め作業

本検討を実施した粉体系中流動コンクリートは、常磐自動車道原町トンネル工事の覆工全線（全長 749.5m）に適用した。本工事では、覆工のスパン長が 12.0m であった。一般的にスパン長が 12.0m の場合、1 段のコンクリー

ト投入箇所は型枠セントルのラップ側と妻側に左右 4 ヶ所とするが、中流動コンクリートは小さな振動エネルギーで良好な流動性および充填性を得られるため、1 段の投入箇所は側壁部から天端部まで左右 2 ヶ所で打込みを行った。

締固め作業は、型枠パイプレータを主体とし、側壁部では内部振動機を補助的に使用した。

写真-3 に、型枠セントルのラップ側の近傍における中流動コンクリートの充填状況を示す。コンクリートの流動性および充填性は良好であり、適宜、型枠パイプレータと内部振動機を使用することによって、5%程度以下の流動勾配を確保して打込みを行うことができた。

5.2 セントルに作用する圧力

粉体系中流動コンクリートは、スランブ 15cm 程度の一般的な覆工コンクリートに比べて流動性が高いため、型枠に作用する側圧も大きくなる。スランブ 15cm 程度の従来の覆工では、型枠セントルの設計側圧は 0.05N/mm^2 程度であるが、本工事では設計側圧を 0.11N/mm^2 として型枠セントルの製作を行った。

実施工においては、型枠セントルに過度な側圧が作用しないように監視を行うことと、コンクリートの充填管理を行うことを目的として、図-7 に示す位置に側圧計を設置し、計測データを確認しながら施工を行った。

図-8 に、粉体系中流動コンクリート施工時の型枠妻側における側圧測定結果の一例を示す。側圧は全測定箇所において打設高さにはほぼ比例して増加し、液圧仮定線と同傾向の推移を示している。SL 付近（No.2）の最大値は約 0.07N/mm^2 程度となっており、従来の覆工コンクリートよりも大きな側圧が作用している。また、凝結も比較的遅いため側圧作用も減少しにくく、打設完了まで従来よりも大きい側圧が作用し続ける傾向がある。したがって、粉体系中流動コンクリートを覆工に適用する場合、型枠に作用する側圧は液圧として設計されたセントルを



写真-3 中流動コンクリートの充填状況

使用すること、打込み速度等を適切に管理しながら施工することが望ましい。

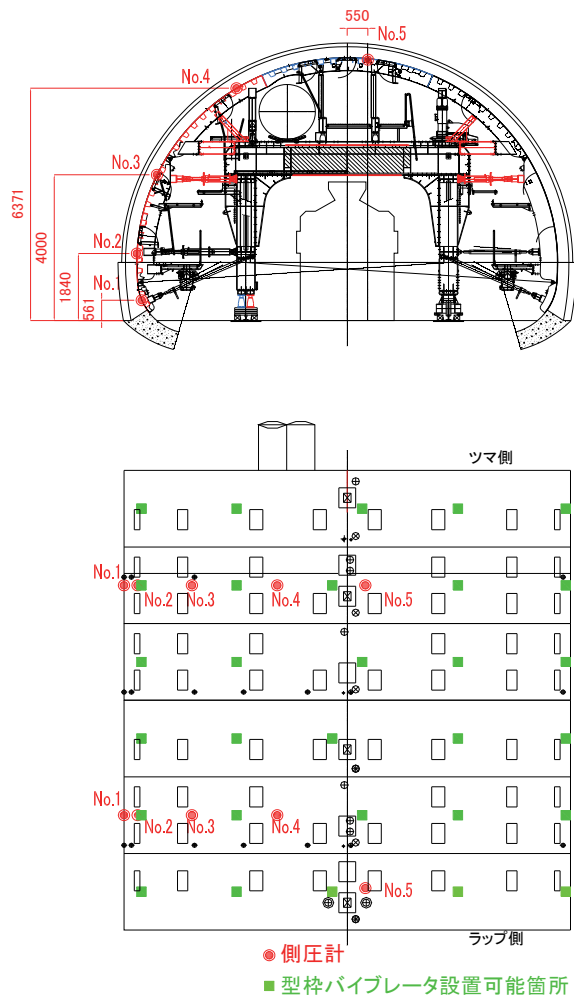


図-7 使用した型枠セントル

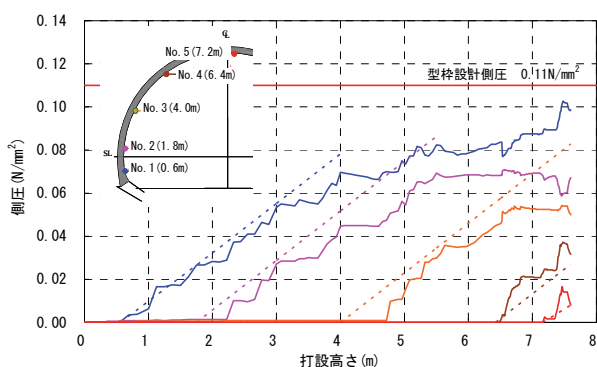


図-8 妻側の側圧測定結果（一例）

5.3 養生方法

従来、覆工コンクリートはコンクリート施工後翌日に型枠を脱型した後、散水などによる養生がほとんど実施されてこなかった。しかしながら、混和材を用いたコンクリートは所定の強度に達するまでの湿潤養生期間を長

くする必要がある。本工事では、粉体系中流動コンクリートの養生にあたり、写真-4 に示す懸架移動方式の散水養生システムによって、脱枠後 5 日以上の散水養生を実施した。



写真-4 移動式散水養生システム

5.4 覆工の仕上がり

写真-5 に粉体系中流動コンクリートの仕上がり状態を示す。中流動コンクリートの場合、クラウン部の施工はアジテータ車の入れ替え時に型枠パイプレータで締め固めるため、打込み作業の中断がほとんどない。また、良好な流動性によりコンクリートの流動勾配が緩やかである。そのため、従来施工において散見された天端部の縞模様がほとんど見られなくなった。



写真-5 覆工天端部の仕上がり状態

6. 二酸化炭素排出量の削減効果

フライアッシュを多量に用いた粉体系中流動コンクリートについて、材料由来による二酸化炭素排出量の削減効果の試算を行った。

試算を行った検討配合を表-8 に示す。試算は今回適用した粉体系中流動コンクリート『中流動 FA』の他に、結合材に普通ポルトランドセメントのみを用いた『中流動 N』、高炉B種セメントのみを用いた『中流動 BB』、高炉B種セメントを用いた一般的な覆工コンクリート配合『通常 BB』についても実施した。いずれもコンクリート

の剥落防止を考慮してセメント量が多い配合となっている。

表-9 に材料製造時における各材料の二酸化炭素排出量の原単位を示す。コンクリートの二酸化炭素排出量は、各材料の原単位に配合上の単位量を乗じ、材料毎の排出量を総和することで算出できる。

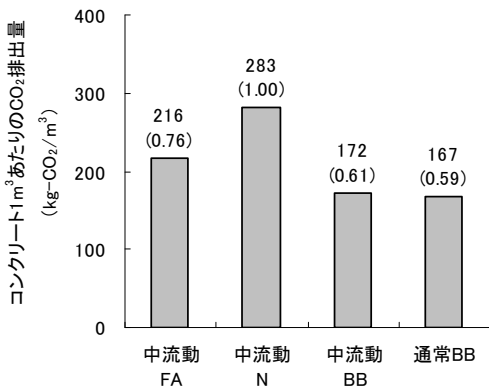
算出結果を図-9 に示す。高炉スラグ微粉末の置換率が高い『通常 BB』および『中流動 BB』の二酸化炭素排出量が最も低い結果となったが、フライアッシュを使用した粉体系中流動コンクリート『中流動 FA』も、『中流動 N』よりも二酸化炭素排出量が 24%削減する結果となった。したがって、中流動コンクリートを適用する場合に、フライアッシュを積極的に利用できれば、環境負荷軽減にも寄与することが示唆される。

表-8 二酸化炭素排出量の試算配合

ケース	セメント 種類	単位量(kg/m ³)							非鋼 繊維 (kg/m ³)	混和剤(kg/m ³)	
		水 W	結合材			細骨材		粗骨 材 G		AE 減水剤	高性能 AE 減水剤
			N	BB	FA1	S1	FA2				
中流動FA (適用配合)	N	180	270	0	67	836	83	837	2.76	4.0	0.0
中流動N	N	175	360	0	0	944	0	837	2.76	0.0	3.6
中流動BB	BB	170	0	360	0	946	0	837	2.76	0.0	3.6
通常BB (繊維あり)	BB	168	0	350	0	926	0	871	2.76	3.5	0.0

表-9 試算に用いた CO₂ 排出原単位

材料種類	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /t)
ポルトランドセメント (C)	766.6 ⁴⁾
高炉セメントB種 (BB)	458.7 ⁴⁾
フライアッシュ (FA)	19.6 ⁴⁾
砕砂 (S)	3.7 ⁴⁾
砕石 (G)	2.9 ⁴⁾
AE減水剤	123 ⁵⁾
高性能AE減水剤	200 ⁵⁾



() 内は、『中流動 N』との比較結果。

図-9 各配合の CO₂ 排出量の試算結果

6. まとめ

本検討では、覆工の施工性改善や品質向上、環境負荷の軽減を目的として、フライアッシュを積極的に用いた粉体系中流動コンクリートについて検討を行なった。以下に、得られた知見をまとめる。

- (1) フライアッシュを積極的に使用した粉体系中流動コンクリートは、フライアッシュのポゾラン反応による長期強度の増加が認められた。
- (2) 適切な AE 剤を使用し、確実な養生を実施することによって、凍結融解抵抗性を確保することが十分可能であることが示唆された。中性化抵抗性は高炉 B 種セメントを用いた一般的なコンクリートと同等の性能を有しており、実用上、特に問題がないことが確認された。
- (3) 温度ひび割れに対して非常に有利であることが、温度応力解析によって明らかとなった。
- (4) 型枠セントルに作用する圧力が大きくなる傾向があり、型枠セントルの設計および施工において注意が必要であるが、コンクリートの流動性や充填性は良好であり、コンクリート表面にも縞模様がほとんどない状態に仕上げる事ができた。

フライアッシュの利用においては、地域的な供給体制やコンクリート製造設備の改造などに課題が残るが、全国どこでも利用できるものではないのが現状であるが、副産物の有効利用や環境負荷軽減の観点から、今後も更に利用が望まれる。今回の試験結果が粉体系中流動コンクリートの適用の参考になることを期待する。

最後に、本検討にあたり、多大なご協力を頂いた東日本高速道路株式会社東北支社相馬工事事務所の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 東日本高速道路株式会社：トンネル施工管理要領「中流動覆工コンクリート編」，2008.8
- 2) 蛭谷ら：中流動繊維補強コンクリートを適用したトンネル二次覆工の施工について，土木学会第 65 回年次学術講演会，VI-005，pp.9-10，2010.9
- 3) コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008，2008.11
- 4) 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案），コンクリートライブラリー125，2005
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の環境配慮施工指針（案）・同解説，2008.9