

火山ガラス微粉末混和材による 覆工コンクリートの品質向上に関する検討 —新稲穂トンネルR側仁木工区における取組み—

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム ○長谷川 諒
国土交通省 北海道開発局 小樽開発建設部 小樽道路事務所 小川 修
西松建設株式会社 北日本支社 三井 功如

覆工コンクリートの打込み時の施工性と品質の向上を目的とした、火山ガラス微粉末混和材を添加したレディーミクストコンクリートについて、室内試験と実機試験による配合選定、模擬型枠を用いた流動性確認試験を行い、実覆工への打込みを行った。その結果、火山ガラス微粉末混和材の添加により、材料分離抵抗性が向上し、覆工コンクリートの均一性や表層品質の向上を確認することができた。

キーワード：覆工コンクリート、品質向上、火山ガラス、施工

1. はじめに

国土交通省では、今後増大する社会資本ストックの維持管理費を軽減するために、平成29年度から有害なひび割れに代表されるコンクリートの初期欠陥の抑制と、コンクリートの表層品質向上を目的とした試行工事を日本全国で実施している。新稲穂トンネルR側仁木工区工事は、コンクリートの品質向上の取り組みとして、国土交通省の令和2～3年度の「品質向上の試行現場」に選定された。本トンネルでは、全スパンに対して覆工コンクリート目視評価を行い、継続的な表層品質の向上を目指すこととした。

施工当初は、当初設計で示されていた国土交通省北海道開発局標準の配合24-15-40N（設計基準強度24 N/mm²、スランプ15 cm、最大骨材寸法40 cm、普通ポルトランドセメント）で施工を行ったが、一部の箇所に施工に起因する色むら、打重ね線、気泡、水はしりなどの不具合が確認されたため、締固め方法や剥離剤の種類と塗布方法、コンクリート配合（現行配合：27-18-20N）の変更を行うことで表層目視評価点数の向上が確認された。しかし、上記の対策を講じても水はしりや気泡などの項目で改善が図られなかった。

そこで、さらなる表層品質向上のためにフライアッシュや高炉スラグ微粉末よりも材料分離抵抗性に優れ、初期・長期強度の増進が他の混和材と同等以上であり、かつ、コンクリートの緻密性の向上を期待できる火山ガラス微粉末（SW）を用いた配合を検討し、決定した配合を実覆工に適用してコンクリートの品質向上を図った。

2. 配合試験

図-1に覆工コンクリートの配合決定までのフロー図を示す。室内試験では、以下の条件を満たす配合を検討した。

- ・スランプ許容範囲はAE減水剤（Ad1）使用時に18±2.5 cm、または高性能AE減水剤使用時（Ad2）で21±2.0 cm、かつ空気量は4.5±1.5%であること
- ・工場から現場までの運搬時間45分を考慮したスランプロスの値が現行配合と同程度となること

実機試験では、室内試験で条件を満たした配合を用い

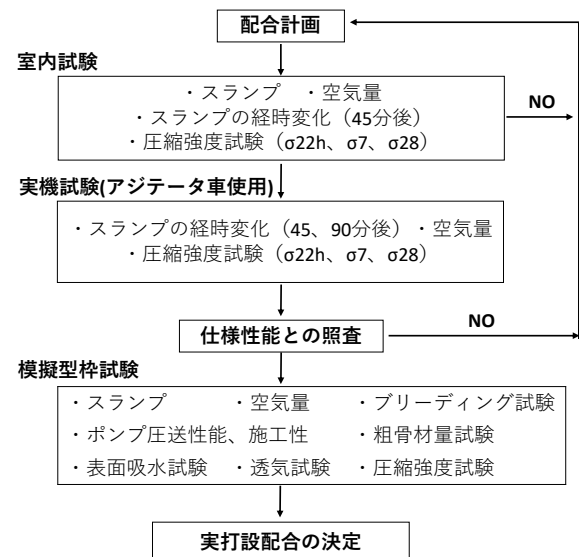


図-1 配合決定までのフロー図

て実際に使用する工場のミキサーでコンクリートを混練し、アジテータ車で45分、90分まで練置きした条件のスランプの経時変化を確認した。また、材齢22hで脱枠強度0.8 N/mm²の確保を前提に圧縮強度試験をσ_{22h}、σ_{7d}、σ_{28d}で実施した。

模擬型枠試験では、実機試験で決定した配合を用いて当初配合および現行配合との施工性を比較した。硬化後には表層品質の確認のために表面吸水試験や表層透気試験、模擬型枠供試体から採取したコアによる粗骨材面積率試験等を実施した。

(1) 室内試験

表-1に配合試験に使用した材料を示す。表-2に抜粋ではあるが配合試験で検討した配合を示す。1-1は現行配合である27-18-20Nである。1-7では、現行配合と同じ粉体量となるようにブレン比表面積6000 cm²/gの火山ガラス微粉末 (SW1) をセメント内割で5%混入した配合である。3-4は、決定配合であり、1-7のSW1をブレン比表面積14000 cm²/gの火山ガラス微粉末 (SW2) へ変更し、定めたスランプと空気量となるように混和剤量を調整した配合である。

図-2に表-2で示した配合のスランプの経時変化を示す。1-1の現行配合では、45分間の練置きで17.5 cmから13.5 cmとなり、スランプロスが4 cmであった。次にSW1を内割5%用いた1-7では21 cmから13.5 cmとなり、スランプロスは7.5 cmであった。最後にSW2を内割で5%用いた3-4の配合では22.5 cmから20.5 cmとなり、スランプロスは2 cmと配合条件を満足した。このときの空気量は練置きの前後で3.3%から5.1%と目標空気量の範囲内となった。

配合試験の過程で明らかとなったことは、SW1を添加した配合ではAd2の添加量を増加してもスランプが21 cmで頭打ちの傾向となり、スランプロスも大きい結果となった。一方で、SW2では練混ぜ直後のスランプフローが中流動コンクリートに相当する45 cm程度となり、スランプロスも低減される結果となった。そのため、配合3-4を用いて実機試験を行った。

(2) 実機試験

図-3に配合3-4を用いてアジテータ車による練置きを行ったスランプの経時変化を示す。実機で練混ぜた直後のスランプは23 cm、45分後では20 cm、90分後では16 cmと室内試験で実施したスランプロスと同程度の結果となった。

図-4に配合3-4の圧縮強度結果を示す。打込みから22時間で脱枠に必要な圧縮強度0.8 N/mm²を満足する3.4 N/mm²となり、材齢7日目には現行配合の設計基準強度27 N/mm²を超える強度発現となった。

以上のことから、配合3-4を決定配合として模擬型枠試験へ進むこととした。

表-1 使用材料

材料	種類	記号	密度 (g/cm ³)	備考
セメント	普通ポルトランドセメント	C	3.16	—
細骨材	砕砂	S1	2.66	新光町産砕砂
	陸砂	S2	2.65	幌延町産陸砂
粗骨材	碎石	G1	2.66	骨材径: 5~20mm、粗粒率: 6.58
		G2	2.66	骨材径: 20~40mm、粗粒率: 7.93
混和材	火山ガラス微粉末	SW1	2.3	ブレン比表面積: 6000cm ² /g
		SW2		ブレン比表面積: 14000cm ² /g
水	回収水	W	1	—
混和剤	AE減水剤	Ad1	1.08~1.12	変性リグニンスルホン酸化合物
	高性能AE減水剤	Ad2	1.03~1.12	ポリカルボン酸エーテル系化合物

表-2 検討した配合(抜粋)

No.	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							
			水(W)	結合材(B)		細骨材(S)		粗骨材(G)	混和剤	
				C	SW	S1	S2		Ad1	Ad2
1-1	53.5	50.4	175	327	—	545	360	894	3.27	—
1-7	53.5	52	175	312	15 ¹	561	371	862	—	3.92
3-4	53.5	52	175	312	15 ²	561	371	862	—	5.40

*1: SW1使用 *2: SW2使用

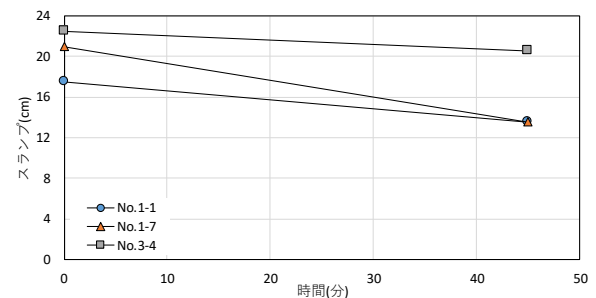


図-2 スランプの経時変化 (室内試験)

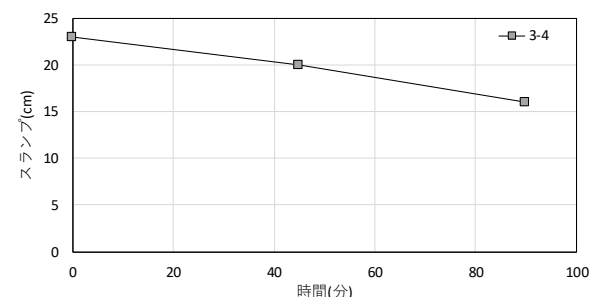


図-3 スランプの経時変化 (アジテータ車による練置き)

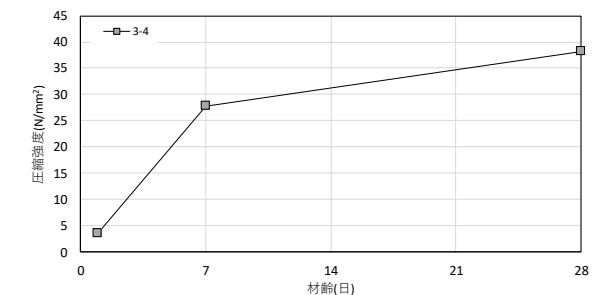


図-4 配合 3-4 の圧縮強度

(3) 模擬型枠試験

表-3に模擬型枠試験で用いた配合を、図-5に模擬型枠の寸法を示す。コンクリート圧送の配管長はトンネル坑内と同等の30mとし、1.5mの高さからコンクリートを打ち込んだ。はじめに、打込み位置で1.0mの高さまでコンクリートが打ち込まれた時点で圧送を一時停止し、50cm間隔で流動状況を記録した。次に、セントルの打込窓の間隔(1.5m)で10秒間バイブレーターを挿入し締固め、流動状況を記録した。その後は高さ50cmごとに打重ねを行い、コンクリート天端は木ごてにより表面仕上げを行った。打込み終了後はシート養生で22時間養生を行い脱枠し、脱枠以降はシート養生とした。

写真-1の(a)～(c)に各配合の打込み状況を、図-6の(a)～(c)に各配合の流動状況を示す。現着時のスランプは設計配合で15.0cm、現行配合で19.5cm、決定配合で23.0cmだった。設計配合では無振動で急勾配の流動状況であり、10秒締固めを行うとバイブレーターの挿入箇所から1m程度平坦となり段差が生じた。現行配合では無振動の場合、設計配合より勾配が緩く流動した。また、10秒締固め後では型枠の妻側(5m位置)まで流動

表-3 模擬型枠試験の配合表

No.	Gmax (mm)	SL (cm)	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)									
						水 (W)	結合材(B)		細骨材(S)		粗骨材(G)		混和剤		
							C	SW2	S1	S2	G1	G2	Ad1	Ad2	
設計配合	40	15	4.5	56.7	47.5	157	279	—	537	358	593	396	2.79	—	
現行配合	20	18	4.5	53.5	51.9	175	327	—	559	371	862	—	3.27	—	
決定配合	20	18	4.5	53.5	51.9	175	312	15	559	371	862	—	—	5.89	

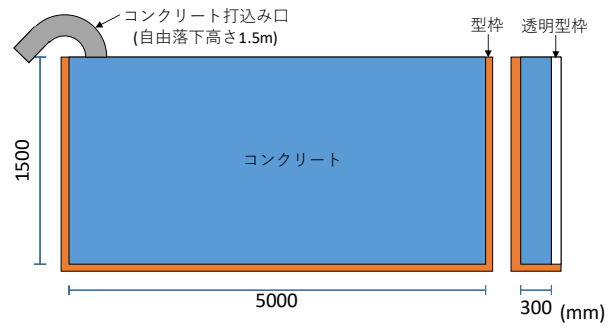


図-5 模擬型枠の寸法



(a) 設計配合

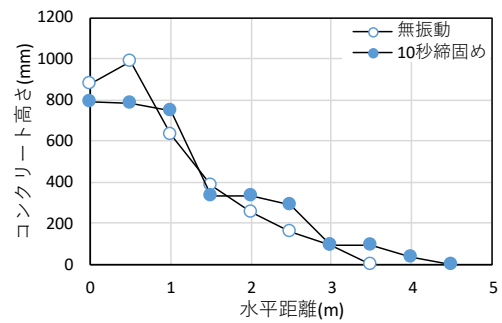


(b) 現行配合

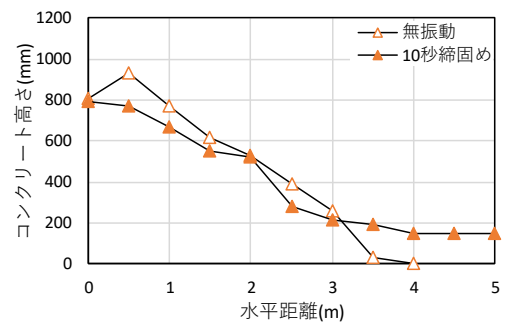


(c) 決定配合

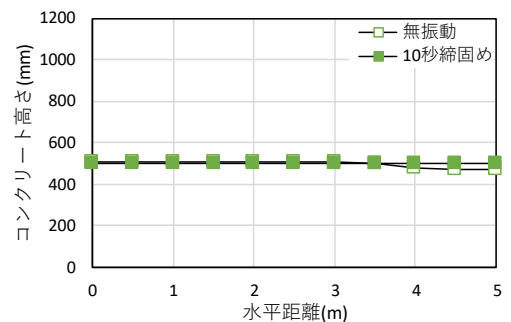
写真-1 各配合の打込み状況



(a) 設計配合



(b) 現行配合



(c) 決定配合

図-6 各配合の流動状況

した。決定配合では、無振動で打込み箇所から型枠の妻側までほぼ水平に流動した。10秒締固め後には水平となった。決定配合のスランプは23.0 cmであったが、無振動でもほぼセルフレベリングとなり、高い流動性を確保していることが明らかとなった。

3. 模擬型枠供試体の品質評価

(1) 試験計画

図-7に品質評価試験の測定位置とコア採取位置を示す。打込み側から約250 mmを「吐出」、2500 mmを「中央」、4750 mmを「妻側」とした。また、高さ方向には地面から約150 mmを「下」、750 mmを「中」、1350 mmを「上」として測定とコア採取を行った。

品質試験ではブリーディング試験、表面吸水試験（SWATおよびポロシット）、表層透気試験およびコア採取による気泡間隔係数（リニアトラバース法）測定と粗骨材面積率試験により各配合の品質比較を行った。

(2) 試験方法

ブリーディング試験ではJISA 1123に準じてブリーディング量およびブリーディング率を測定した。なお、測定は、直射日光を避けるための日除けテント下の現地で行った（外気温24～26℃）。

表面吸水試験のSWATでは、初期水頭を300 mmとして10分時点までの吸水速度を求めた。一方のポロシットでは、SWATと同じ10分間の吸水量を測定しているが、初期水頭の設定は明確には決まっていないため、今回の測定ではなるべく同じ条件となるように行った。ポロシットの表面吸水速度は式-1を用いて算出した。

$$p = q/A/t \quad (\text{式-1})$$

ここに、 p ：表面吸水速度（ $\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$ ）、 q ：吸水量（ ml ）、 A ：給水面積（ m^2 ）、 t ：吸水時間（ s ）とする。

また、SWATの算出方法を参考に、表面吸水速度と吸水時間の関係を式-2により算出した。定数 a と n は回帰分析により決定した。

$$p = a \times t^{-n} \quad (\text{式-2})$$

ここに、 a ：1秒時点での表面吸水速度を表す定数、 n ：表面吸水速度の時間変化の程度を表す定数とする。

表層透気試験では、日本非破壊検査協会試験規格²⁾のダブルチャンバー方式によるトレント法で測定を行った。なお、表面吸水試験および表層透気試験では、静電容量式の含水率測定器で含水率5.5%以下を確認している。表面吸水速度および表層透気係数の評価は表-4に示すとおりである。表面吸水速度が0.25を超えて0.5 $\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$ 以下で

は「一般」と判定され、表層透気係数では $0.1 \sim 1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ の範囲で「一般」となり、これ以上は「劣」や「極劣」、以下であれば「良」や「優」と判定される。

気泡間隔係数は、ASTM C457のリニアトラバース法に準拠して測定を行った。粗骨材面積率試験では採取したコアの周面に露出している粗骨材の面積率を求めた。

(3) 試験結果

図-8にブリーディング量とブリーディング率を示す。設計配合と現行配合ではほぼ同等の値となったが、決定配合ではブリーディングが生じなかった。これは、分離抵抗性の向上に加え、比表面積の大きいSW2が余剰水を保持した可能性が考えられる。

図-9にSWATで測定した表面吸水速度の結果を示す。各配合ともに表面吸水速度が「劣」が大半となっている。これは、22時間後に脱枠した後はシート養生のみで置置されたため、表面が乾燥し十分な水和反応が行われなかったと考えられる。しかし、決定配合の妻側-中で「一般」に相当する結果もあり、品質は向上していると考えられる。一方で、図-10にはポロシットによる表面吸水速度の実測値と回帰式から求めた値を示す。実測と回帰式による差はほとんど無いことが明らかとなった。また、同じ高さであれば配合によらず吐出側から妻側に向かっ

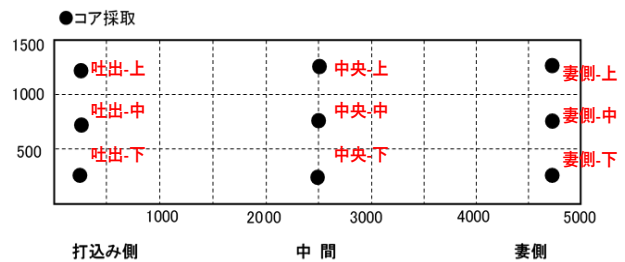


図-7 測定位置およびコア採取位置

表-4 表面吸水速度および表層透気係数の評価

	単位	優	良	一般	劣	極劣
表面吸水速度	$\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$	—	~ 0.25	$0.25 \sim 0.5$	$0.5 \sim$	—
表層透気係数	$\times 10^{-16} \text{ m}^2$	$0.0001 \sim 0.01$	$0.01 \sim 0.1$	$0.1 \sim 1$	$1 \sim 10$	$10 \sim 100$

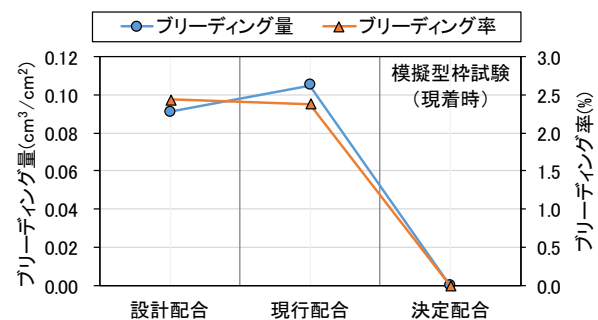


図-8 ブリーディング量とブリーディング率

て吸水速度は大きくなる傾向が確認された。全体としては、SWATの結果と同様に決定配合の吸水速度が最も小さい結果となった。

図-11に表層透気係数の結果を示す。上述のとおり、初期材齢から表層が乾燥の影響を受けやすい条件であったため、表層透気係数の値がやや大きめではあるが、各配合とも妻側へ進むにつれて若干ではあるが値が小さくなっているように見える。また、試験位置が中よりも下において表層透気係数が大きくなる傾向が確認された。各配合で比較すると設計配合>現行配合>決定配合の順に小さくなっており、決定配合の品質の向上が確認された。

図-12に気泡間隔係数を示す。模擬型枠供試体の中央-中をそのコンクリートの代表値とした。また、確認のためにその上下でも測定を行ったがペースト率は配合表の値で計算している。一般に気泡間隔係数 $250\mu\text{m}$ 以下であれば耐凍害性を有していることが知られており、採取位置での差はあるが、すべての配合で耐凍害性を有していることが確認された。

図-13に模擬型枠供試体の粗骨材面積率を示す。水平距離0の位置が打込み側である。設計配合では、妻側へ向けて粗骨材面積率が減少傾向となっているが、中位置の中央付近では粗骨材面積率が増加しており、粗骨材を連行できていないことが確認された。現行配合では、位置や水平距離によらず同等の粗骨材面積率となり、粗骨材を妻側までしっかりと連行できていることが確認された。決定配合では、下位置の妻側で粗骨材面積率が増加する傾向となった。これは、高い流動性を有している決定配合に対して、現行配合と同様に締固めと仕上げを行ったため、粗骨材が沈降したと考えられる。この結果から、流動性の高い配合では従来と同様の締固めを行うと材料分離する可能性があるため注意が必要なることを確認した。

以上の結果から、ブレン比表面積 $14000\text{cm}^2/\text{g}$ の火山ガラス微粉末を5%内割混入した配合(27-18-20N+SW(5%))において、一定程度の品質改善効果が期待できることから、実覆工において3スパン分を試行した。

4. 実覆工コンクリートへの施工と品質確認試験

今回の覆工コンクリートの1スパンの長さは12.5mであり、セメントは中流動コンクリートの側圧を考慮した設計ではないため、実覆工では現着時の目標スランプは現行配合と同様の $18\pm 2.5\text{cm}$ とし、フレッシュ性状を確認しながらAd2の添加量を適宜変更した。その結果、3スパン分のフレッシュ性状結果はスランプ17.5~20.5cm、空気量3.5~6.0%の範囲となった。

図-14に実覆工における粗骨材率を、写真-2にセントル内部でのコンクリート採取状況を示す。流動距離0m

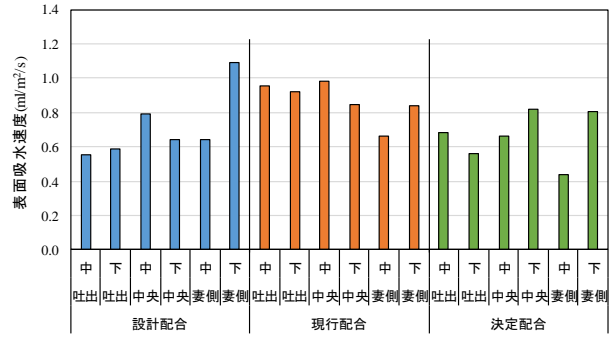


図-9 各配合の表面吸水速度 (SWAT)

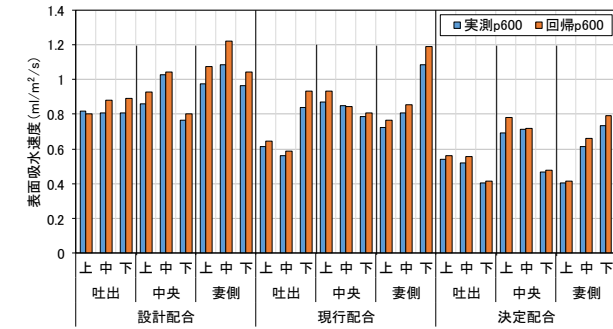


図-10 各配合の表面吸水速度 (ポロシット)

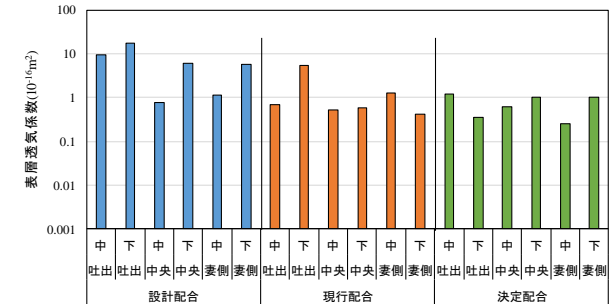


図-11 各配合の表層透気係数

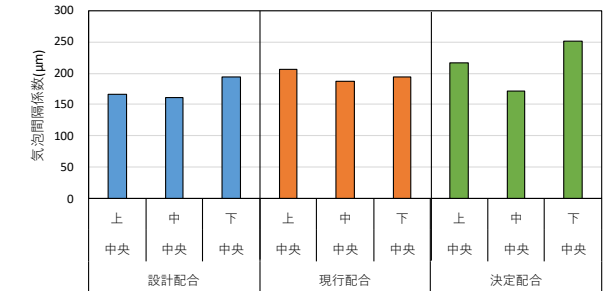


図-12 各配合の気泡間隔係数

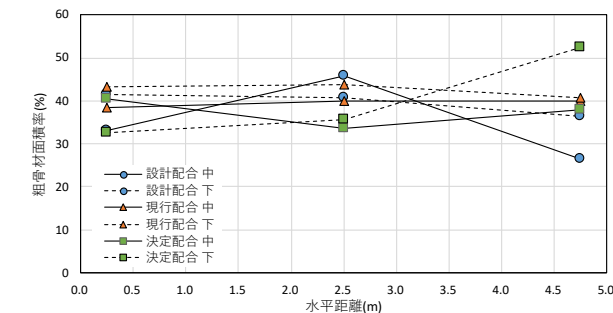


図-13 模擬型枠供試体の粗骨材面積率

の位置が吐出口部分であり、現行配合と決定配合ともに流動距離5 mおよび10 mの位置での粗骨材率は、吐出口と同等以上を確保できていることを確認した。火山ガラス微粉末の混入により材料分離抵抗性が向上し、妻側まで粗骨材を連行できており、覆工コンクリート全体の均一性が向上していると考えられる。

表-5に打込み2時間後のブリーディング量を、写真-3に吸引チューブ設置状況（赤枠部）を示す。現行配合と決定配合のブリーディング量を確認するために、覆工天端部に吸引チューブを設置し、真空ポンプで強制吸引を行った。2時間吸引を行った結果、それぞれ約5Lのブリーディングが確認された。模擬型枠試験時には決定配合のブリーディング量は0であったが、振動締めによって火山ガラス微粉末が保持していた水がブリーディングとして分離したものと考えられる。

5. まとめ

火山ガラス微粉末を用いたコンクリートの配合試験および模擬型枠試験、実覆工への施工を行い、以下の知見が得られた。

- 1) ブレーン比表面積6000 cm²/gの火山ガラス微粉末を用いた配合では、現行配合よりスランプロスが大きくなったが、ブレーン比表面積14000 cm²/gを用いて高性能AE減水剤を添加することでスランプロスを低減することができた。
- 2) 火山ガラス微粉末を用いることで、表面吸水速度および透気係数は設計配合や現行配合と同等以下となることを確認した。
- 3) 気泡間隔係数の結果から、火山ガラス微粉末を用いた配合においても耐凍害性を有していることを確認した。
- 4) 模擬型枠試験では、ブレーン比表面積14000 cm²/gの火山ガラス微粉末を内割で5%用いることでブリーディング量が0となり、材料分離抵抗性が向上することが明らかとなった。
- 5) 模擬型枠試験ならびに実施工において、スランブが約18 cm以上の確保と材料分離抵抗性が確保できていれば、妻側まで粗骨材を連行させることが可能であることが明らかとなった。

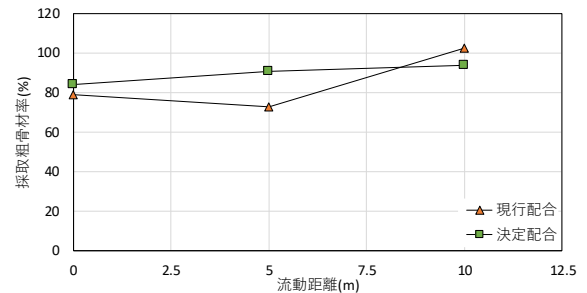


図-14 実覆工における粗骨材率



写真-2 セントル内部の採取状況

表-5 2時間後のブリーディング量

	打設量 (m ³)	2hブリーディング量 (L)
現行配合	93	5.3
決定配合	93	5.2



写真-3 吸引チューブ設置状況（赤枠部）

参考文献

- 1) 井川倫宏、玉岡優児、細田暁：表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価基準に関する基礎的研究、コンクリート工学論文集、第29巻、pp.101-109、2018
- 2) 今本啓一、下澤和幸、山崎順二、野中英、田中章夫、湯浅昇：コンクリートの表層透気試験方法規格(NDIS 3436)、コンクリート工学論文集、第59巻7号、pp.568-573、2021