

岩盤の風化防止を目的とした吹付けコンクリートの 吹付け性状に関する基礎的研究

山崎勲*¹ 吉田行*¹ 田口史雄*¹ 嶋田久俊*¹

* 1 独立行政法人北海道開発土木研究所 構造部材料研究室
(〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

要旨：岩盤の風化防止を目的とした吹付けコンクリートのフレッシュ性状が、圧送性および施工性に及ぼす影響についての研究は、従来あまり行われていない^{1, 2, 3)}。筆者らはこれまでに力学特性および耐久性について検討してきたが、これらの性能は、コンクリート自体の性能よりもむしろ吐出性能あるいは圧送条件の影響を大きく受けることが明らかとなった。吹付けコンクリートの品質を安定させるためには、これらの検討が必要がある。本研究では、セメント量および水セメント比の異なる、Non-AE、AEおよび繊維補強コンクリートを用い、スランプ、空気量、降伏値、塑性粘度、リバウンド、吐出量および管内圧力について検討した。

キーワード：吹付けコンクリート、スランプ、空気量、降伏値、塑性粘度、リバウンド、吐出量、管内圧力

1. はじめに

岩盤斜面における落石や小落石を防止するためには、岩盤の風化や亀裂の発達を抑制する対策が必要である。これらを防止するために、従来からモルタル・コンクリート吹付けが行われている。また、吹付けコンクリートは、岩盤斜面・法面の保護・補強のほか、NATM工法におけるトンネルの一次覆工などに広く用いられている。さらに、最近ではコンクリート構造物の補修・補強にも使われるようになってきた。しかしながら、その施工法の特殊性から、吹付けコンクリートの品質が施工条件や作業員、特にノズルマンの技術に大きく依存しており、通常のコンクリートに比べ品質の変動が大きいこと、コンクリート構造物としての信頼性に課題を有している。

近年、NATM工法を中心とした吹付けコンクリートのメカニズム解明に向けた研究が盛んに行われている一方、岩盤保護用の吹付けコンクリートの圧送性および施工性に関する研究はあまり行われていない。NATM用と岩盤保護用の吹付けコンクリートは、コンクリートの配合や施工方法などが異なるため、それぞれの条件に合わせたコンクリートや施工機械が使用されている。そのため、NATM用の吹付けコンクリートで得られた研究成果を、岩盤保護用の吹付けコンクリートにそのまま適用することはできない。

このような背景から、筆者らは岩盤の風化や小落石の防止を目的とした吹付けコンクリートについて、圧縮強度試験や、曲げ強度試験、付着強度試験および凍結融解試験を行い、吹付けコンクリートに求められる基本的な性能について検討してきた^{4, 5)}。その結果、これらの性能は、コンクリート自体の性能よりもむしろ吐出性能あるいは圧送条件に起因して生じる内部欠陥の影響を大きく受けることが明らかとなった。

本研究では、岩盤の風化防止を目的とした吹付けコンクリートの品質を安定させることを目的として、セメント量および水セメント比の異なる、Non-AE、AEおよび繊維補強コンクリートを用い、コンクリートのフレッシュ性状が圧送性および施工性に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

Table 1 に使用材料を示す。AE減水剤はリグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体を、鋼繊維は両端フック型を用いた。

2.2 コンクリートの配合

Table 2 に各コンクリートの配合を示す。基本となる配合（以下、Plainと表記）は、法面保護工で一般的に使用されている配合^{6, 7)}とした。配合No.2～5（以下

Table 1 Properties of materials

Material	Properties
Ordinary portland cement	Density: 3.16g/cm ³
Fine aggregate	Sea sand, Density: 2.73g/cm ³ , Water absorption: 1.15%, FM: 2.56%
Coarse aggregate	Crushed stone, Density: 2.67g/cm ³ , Water absorption: 1.64%, FM: 6.48%, G-Max: 15mm
Chemical admixture	Air entraining and water reducing agent, Specific gravity: 1.25
Admixture mineral	Steel fiber, Specific gravity: 7.9(8.0), Length: 30mm, D: 0.6mm

Table 2 Mix proportions of concrete

No.	Symbol	W/C (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				Admix. (%)	Steel . (vol%)
				W	C	S	G		
1	Plain	48.6	80	175	360	1,444	354	-	-
2	C390			190	390	1,392	340	-	-
3	C420			204	420	1,338	330	-	-
4	W180	50.0		180	360	1,349	351	-	-
5	W189	52.5		189		1,414	346	-	-
6	AE	48.6		175		1,444	354	0.25	-
7	AEST					1,422	348		1.0
8	ST			-	-	-	-	-	-

それぞれ、C390、C420、W180、W189 と表記)は、レオロジー特性を把握するため、Plain をベースに、セメント量および水セメント比を変化させた。

配合 No.6 (以下、AE と表記)は、吹付けコンクリートの耐久性を向上させることを目的として AE 減水剤の使用を想定したケースである。なお、混和剤の添加率は、標準添加率である単位セメント量の 0.25% とし、Plain に練混ぜ水の一部として単純に加えた。

配合 No.7 および 8 は、AE および Plain に鋼繊維を添加したケース (以下それぞれ、AEST、ST と表記) である。繊維混入率は一般的な実績に基づいて、コンクリート容積の 1.0% とした。なお、繊維補強コンクリートの配合は、基本となる配合に単純に繊維を加えた配合とし、その容積分だけ骨材全体の容積を減らした。

2.3 コンクリートの吹付け方法

コンクリートの吹付けは、空気圧送方式の吹付け機を用いた湿式方式で、地面に対して 60 度傾斜した支保工に取り付けた木製型枠に約 1m の距離を保ちながら行った。吹付けには直径 50mm のマテリアルホースを使用し、搬送距離は水平距離で 40m とした。なお、本試験では、コンクリートのコンシステンシーが各ケースにより異なることから、吐出状態が各ケースで同様になるように吹付け圧力を調整した。これは、法面保護工において吹付けが人力で行われているため、ある一定以上の吹付け圧力では、吹付けが困難になるためである。

2.4 実験概要

(1) フレッシュコンクリート試験

フレッシュコンクリートの性状を把握するための試験として、モルタルフロー試験、スランブ試験、空気量および単位容積質量の測定を行った。

モルタルフロー試験およびスランブ試験は、吹付け前の試料で行った。モルタルフロー試験は、練り上がりのコンクリートを 5mm ふるいでウェットスクリーニングした試料を用いた。

空気量および単位容積質量の測定は、吹付けの前後に行った。吹付け前の空気量は、空気室圧力法により測定した。吹付け後の空気量は、空気量測定容器にコンクリートを直接吹付けて、単位容積質量を測定し、質量法により空気量を算出した。

(2) 降伏値および塑性粘度の測定

降伏値および塑性粘度の測定は、回転粘度計を用い、ツーポイント法によって行った。試料は、4cm の敷モルタルを敷いた円筒容器 (25 × 30cm) にコンクリートを投入し、容器を軽打して締固め、作製した。試験は、回転翼を容器の中で回転させ、回転数を 10 ~ 80r.p.m. の範囲で 10r.p.m. ごとに 8 段階に変化させ、各回転数におけるトルクを測定した。なお、本編では、上記方法によって得られた見掛けの降伏値および見掛けの塑性粘度の値を使用している。

(3) 施工性の評価

施工性を評価するために、吐出量、管内圧力および

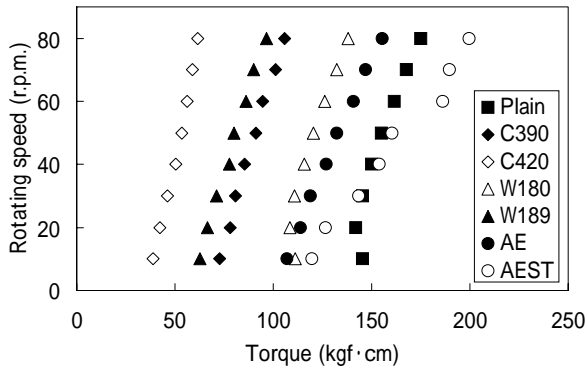


Fig. 1 Relationship between rotating speed and torque

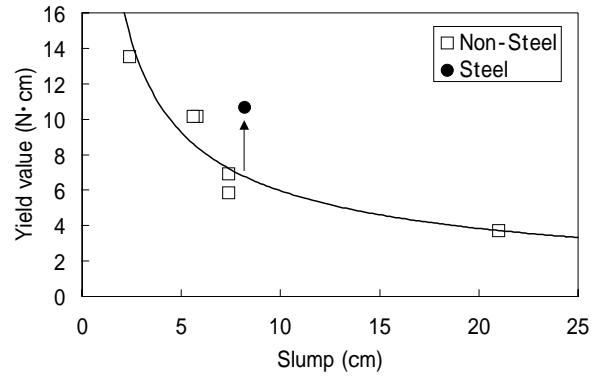


Fig. 2 Relationship between yield value and slump

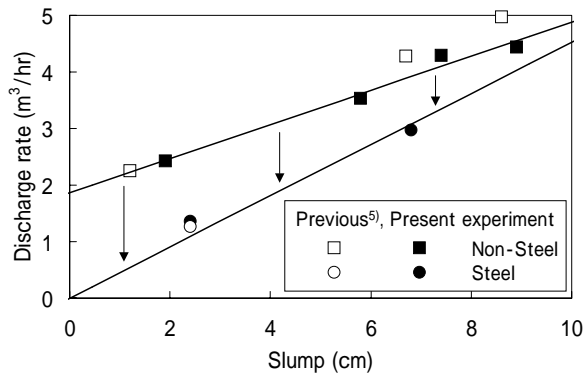


Fig. 3 Relationship between discharge rate of concrete and slump

リバウンドロス率の測定を行った。

吐出量の測定は、1 バッチのコンクリートがノズルから吐出して終了するまでの時間を計測し、単位時間当たりの材料の吐出容積で表した。

管内圧力の測定は、吐出口から 3m 地点、20m 地点および 40m 地点（吹付け機の出口）にそれぞれ圧力計を取り付け、約 3sec の間隔で測定した。

リバウンドロス率の測定は、100×100×10cm の下端を開放した木製型枠にコンクリートを吹付けて行き、その際に跳ね返った材料の質量および付着せずに流れ落ちた材料の質量を測定し、2 つを合計した質量を吹付け総質量に対する百分率で表した。なお、リバウンド測定用型枠には、型枠底板から高さ 5cm の部分にラス金網を設けた。

3. 実験結果および考察

3.1 レオロジー特性

Fig. 1 にコンクリートの流動曲線を、Table 3 に流動曲線から得られた見掛けの降伏値と見掛けの塑性粘度の値を示す。見掛けの塑性粘度は、セメント量および単位水量の違いによって大きく変化しないが、鋼繊維を混入することによって増加する傾向がみられた。これは、鋼繊維の混入によって、フレッシュコンクリートの分離抵抗性が増加していることを示している。

Table 3 Apparent yield value and apparent viscosity

Symbol	Apparent Yield Value (N·cm)	Apparent Viscosity (N·cm·min)	Slump (cm)
Plain	13.51	0.052	2.4
C390	6.90	0.048	7.4
C420	3.69	0.034	21.0
W180	10.17	0.047	5.6
W189	5.85	0.049	7.4
AE	10.14	0.070	5.8
AEST	10.68	0.125	8.2
ST	-	-	2.4

Fig. 2 に見掛けの降伏値とスランプの関係を示す。コンクリートの見掛けの降伏値は、既往の文献⁵⁾で述べられているように、スランプが大きいくほど減少する傾向にあった。しかし、鋼繊維を混入したケースでは、無混入のコンクリートに比べ、見掛けの降伏値が上昇した。

鋼繊維の混入による見掛けの降伏値の上昇は、鋼繊維の混入によって、マトリックス同士の結合が強くなったため生じたものと考えられる。

3.2 吐出量と管内圧力

Fig. 3 に吐出量とスランプの関係を示す。コンクリートの吐出量は、スランプが大きいくほど増加する傾向にあった。また、鋼繊維を混入したケースは、無混入のケースに比べ吐出量が低下した。これは、これまでの試験結果⁵⁾とも一致する。

Fig. 4 に管内圧力とスランプの関係を、Fig.5 に管内圧力と塑性粘度の関係を示す。吹付け機の圧力 (Initial pressure) は、スランプが大きいくほど増加する傾向にあった。また、管内圧力は、塑性粘度が大きいくほど上昇する傾向にあった。ただし、20m 地点での測定値はこの傾向に反しているが、これは C390 および W189 の試験において、20m 管と 17m 管の順序を誤って取り付けた可能性があるため、それぞれについて 40m 地点と 3m 地点から得られる圧力勾配から 20m 地点における

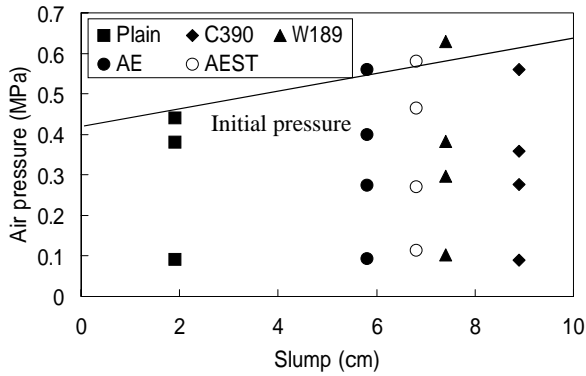


Fig. 4 Relationship between air pressure and slump

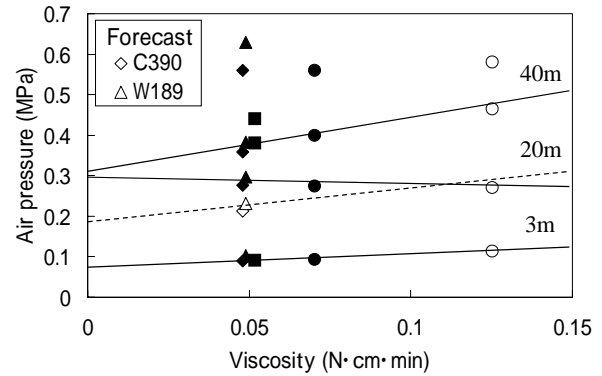


Fig. 5 Relationship between air pressure and viscosity

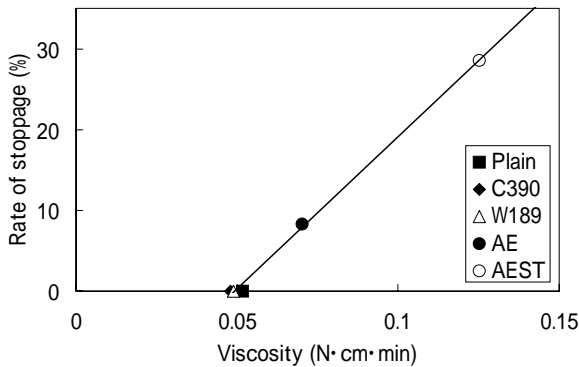


Fig. 6 Relationship between rate of stoppage and viscosity

予測値を検討しなおしたところ、他の地点と同様の傾向がみられた。また、管内圧力は圧送距離の増加に伴い減少した。

吐出量とスランプがこのような傾向になった原因として、今回使用した吹付け機がローター式の吹付け機であったことがあげられる。ローター式の吹付け機は、スランプが大きいほど1シリンダ当たり充填されるコンクリート量が増加するため、吐出量が増加したと考えられる。

吹付け機の圧力がスランプの増加によって上昇した原因は、次のように考えられる。管内において空気の流れを阻害する物体が存在する場合、空気はその物体を押し流そうとするため、空気圧は上昇する。この圧力は、阻害する物体が管の断面に占める割合によって決定すると考えられる。本試験においては、前述したとおり、スランプの増加に伴い管内に投入される1回当たりのコンクリート量が増加し、管の断面に占めるコンクリートの割合が増加したため、吹付け機の圧力は上昇したと考えられる。

各測点における管内の圧力は、塑性粘度の増加に伴い、コンクリートと管壁の間で生じる摩擦力が増加したため上昇したと考えられる。

鋼繊維の混入によって吐出量が減少する原因は、次のように考えられる。吐出量が減少するという事は、

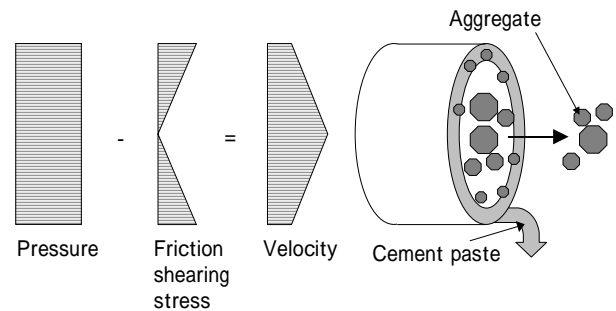


Fig. 7 Image of shotcrete

同量のコンクリートを吹付けるために時間を多く消費するという事である。前述したように、塑性粘度の高いコンクリートを圧送した場合、管壁との間で生じる摩擦力が大きいため、材料が管壁に粘着している時間が増加する。そのため、鋼繊維を混入したケースの吐出量は減少すると考えられる。

Fig.6 に閉塞率と塑性粘度の関係を示す。閉塞率は、吹付けを行った回数に対する閉塞した回数を百分率で表した。なお、1回当たりの吹付け量は、100~160リットルであった。閉塞率は、本試験範囲において、塑性粘度が大きくなるに従って増加する傾向にあった。これは、塑性粘度の増加に伴って、管内における材料の分離抵抗性が増加し、粗骨材や繊維によるブリッジが形成されやすくなったためと考えられる。

Fig.7 に吹付けコンクリートによる圧送状態のイメージ図を示す。吹付け作業時に骨材が多く見られる時間帯とモルタルが多く見られる時間帯が存在すること、およびノロの発生状況がコンクリートの配合により異なることが目視により確認されている。このことから、コンクリートは全体が同じ速度で圧送されるのではなく、セメントペーストが管壁に粘着し、管壁周辺のセメントペーストと中心付近の骨材に速度差が生じていると考えられる。

以上のことから、コンクリートの空気圧送はポンプ圧送と同様に管内摩擦力による圧力損失が存在し、損失量は塑性粘度と密接な関係にあると考えられる。ま

Table 4 Air content and mass of unit volume

Symbol	Air content (%)		Mass of unit volume (kg/m ³)	
	Before	After	Before	After
Plain	5.3	3.7	2.330	2.386
C390	5.5	4.4	2.330	2.350
W189	5.4	2.4	2.309	2.373
AE	7.7	6.7	2.299	2.292
AEST	7.7	8.2	2.323	2.366

た、本試験では、吐出状態が各ケースで同じくなるように吹付け圧力を調整していることから、コンクリートを配合によらず一定の条件で吹付けるためには、スランプが大きいほど、吹付け圧力を増加させる必要があることが明らかとなった。

3.3 空気量および単位容積質量

Table 4 に空気量と単位容積質量の測定結果を示す。吹付け後の空気量は、吹付け前の空気量に比べておおむね減少したが、鋼繊維を混入したケースのみ増加した。吹付け後の単位容積質量は、吹付け前の単位容積に比べておおむね増加した。しかし、この試験結果は、筆者らが過去に行ってきた試験結果²⁾と異なっている。本試験においては、単位容積質量が増加していることから、吹付けによりコンクリートは締め固められ、空気量が減少したと推定される。また AEST は、鋼繊維の混入によって空気を巻き込んだものと考えられる。

以上のことから、吹付けによって空気の巻き込みが発生していると考えられるが、吹付け圧力による締め固め効果が、吹付け後の空気量に関係している可能性が高いと考えられる。

3.4 リバウンドロス率

Fig. 8 にリバウンドロス率と見掛けの降伏値および見掛けの塑性粘度との関係を示す。リバウンドロス率と見掛けの降伏値および見掛けの塑性粘度に明確な相関性は見られなかった。鋼繊維を混入したケースは、混入しないケースに比べて、リバウンドロス率が上昇する傾向がみられた。

Fig. 9 にリバウンドロス率と吐出量の関係を示す。過去に行った試験データも入っているが、リバウンドロス率は、吐出量の増加に伴い減少するが、ある点を境として再び増加する傾向がみられた。

これは前述した Fig.3 より、流動性の増加によって吐出量は増加するが、流動性が大きくなると吹付けたコンクリートが付着せずに流下する量が増加するため、リバウンドロス率は再び増加すると考えられる。

このことから、吐出量の増加、すなわち流動性の増加は、リバウンドロスを少なくするために有効であると言えるが、流動性の増加によって吹付けたコンクリートが付着せずに流れ落ちてしまうため、流動性の高いコンクリート吹付けにおいては注意が必要である。

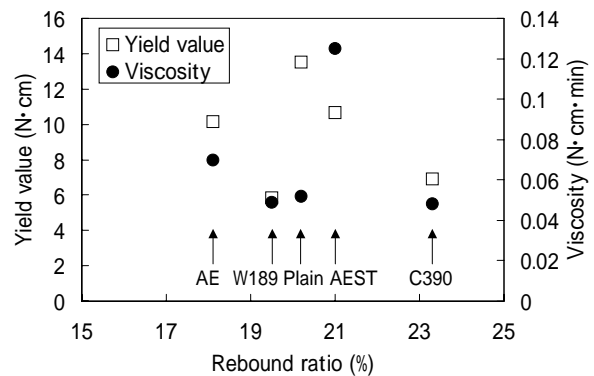


Fig. 8 Relationship between rebound ratio and yield value, viscosity

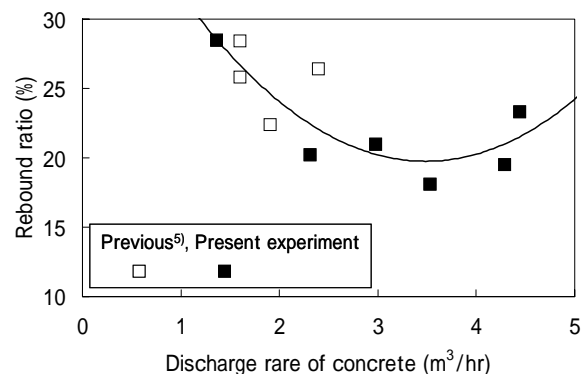


Fig. 9 Relationship between rebound ratio and discharge rate of concrete

4. まとめ

以上の結果をまとめると、以下ようになる。

- (1) 見掛けの降伏値は、一般的なコンクリートと同様に、スランプと良い相関性が得られた。
- (2) コンクリートの空気圧送はポンプ圧送と同様に管内摩擦力による圧力損失が存在し、損失量は塑性粘度と密接な関係にあると考えられる。
- (3) 吐出量は、ローター式の吹付け機を使用した場合、スランプに比例して増加するが、ノズルマンにかかる負担（圧力）を一定とするには、スランプの増加に伴って吹付け圧力を上昇させなくてはならないため、供給可能な吹付け圧力と求められる吐出量を勘案して、スランプを決定しなくてはならないことが明らかとなった。
- (4) 吹付けられたコンクリートの空気量は、吹付け圧力と関係している可能性が高い。硬化コンクリート中に含まれる空気量は、コンクリートの耐久性に大きく関係するため、今後は圧力と空気量および内部組織との関係を明らかにする必要がある。
- (5) リバウンドロス率は、吐出量の増加、すなわち流動性の増加により改善可能であるが、流動性の増加によってコンクリートが付着せずに流れ落ちてしまう

ため注意が必要である。

謝辞：

本研究を実施するにあたり、ライト工業株式会社をはじめ、関係各位の方々の多大な協力を得ました。末尾ながら、記して感謝の意を表します。

参考文献：

- 1) 社団法人土木学会編：コンクリート標準示方書施工編、26章吹付けコンクリート、pp.231-244(1994)
- 2) 日本道路公団：土木工事共通仕様書、4-13 セメントモルタル吹付け工及びコンクリート吹付け工(1997)
- 3) 日本道路公団：コンクリート吹付け工及びセメントモルタル吹付け施工管理要領(1995)

- 4) 吉田行ほか：岩盤の風化防止を目的とした吹付けコンクリートの凍結融解抵抗性、土木学会第55回年次学術講演会、V-228(2000)
- 5) 山崎勲ほか：岩盤の風化防止を目的とした吹付けコンクリートのフレッシュ性状、土木学会北海道支部論文報告集、第56号第V部門、pp.476-479(2000)
- 6) 社団法人鋼材倶楽部およびSFRC構造設計施工研究会編：繊維補強コンクリート設計施工マニュアル(法面保護工編)、技法堂出版(1995)
- 7) 社団法人日本道路協会編：道路土工 - のり面工・斜面安定工指針、丸善株式会社(1987)
- 8) 社団法人土木学会編：コンクリートのポンプ施工指針 [平成12年度]、コンクリートライブラリー100、p.178(2000)

FUNDAMENTAL STUDY ON THE SPRAYING PROPERTIES OF SHOTCRETE USED FOR CONTROLLING WEATHERING OF ROCK-BED

Isao YAMAZAKI^{*1}, Susumu YOSHIDA^{*1}, Fumio TAGUCHI^{*1} and Hisatoshi SHIMADA^{*1}

* 1 INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION

CIVIL ENGINEERING RESEARCH INSTITUTE OF HOKKAIDO, Structures Department,
Materials Division (1-3-1-34, Hiragishi, Toyohira-ku, Sapporo-shi, Hokkaido 062-8602, Japan)

ABSTRACT: In Japan, shotcrete for controlling weathering of rock-bed is not widely investigated. In particular, studies about its physical properties and durability still very limited. The present study investigates the effects of the fresh shotcrete properties on the rebound and the discharge rate of concrete as well as the air pressure in the spraying pipe. Non-air-entrained concrete, air-entrained concrete and steel fiber reinforced concrete with different water cement ratios and cement contents were considered. The properties that were investigated are: slump, air content, yield value, viscosity, rebound, discharge rate of concrete and air pressure in the spraying pipe. Results showed that:

- 1) The relationship between the yield value and slump of shotcrete is similar to that of normal concrete.
- 2) The discharge rate of concrete increases with any increase in the slump. However, to maintain the pressure on the nozzle man at certain level, the air pressure should be increased simultaneously with any increase in the slump. Thus, the slump should be determined considering the required discharge rate of concrete and the possible air pressure.
- 3) The air content in hardened shotcrete is most probably dependent on the air pressure.
- 4) The rebound of shotcrete improves with an increase the slump but a higher slump provokes a split of shotcrete.

KEY WORDS: Shotcrete, Slump, Air content, Yield value, Plastic viscosity, Rebound, Discharge rate of concrete, Air pressure