

論文 繊維補強吹付けコンクリートの施工性に関する研究

磯部 哲^{*1}・杉山 律^{*2}・白根勇二^{*3}・魚本健人^{*4}

要旨: 繊維補強した吹付けコンクリートの配合（繊維混入率、混和材、繊維種類など）を変化させ、その施工性について検討を実施した。その結果、管内圧力、圧送空気流量は、繊維混入の有無、混入率の多少による影響をほとんど受けないこと、配合条件、繊維混入率に関わらず繊維リバウンド率は全体リバウンド率を上回ることなどが確認された。

キーワード: 繊維補強、吹付けコンクリート、管内圧力、リバウンド、空気流量

1. はじめに

今日 NATM がトンネル施工に導入されてから数十年経過し、山岳トンネルの標準工法として定着している。その間 NATM の主要な支保部材である吹付けコンクリートにおいては、様々な研究開発がなされてきた。また、ここ数年大断面トンネルやシングルシェルライニングの導入を目的として吹付けコンクリートの高品質、高強度化の開

発が行われるようになり、なかでも繊維補強吹付けコンクリートは、じん性が大きく改良されるため、大きな変形、地圧が見込まれる箇所でも活用されてきている。また、第 2 東名・名神高速道路の扁平大断面トンネルの建設においても、繊維補強吹付けコンクリートを活用することが検討されており、今後需要の増大が予想される。しかしながら、この繊維補強吹付けコンクリートの施工性についての検討は十分に行われていない。このような吹付けコンクリート技術の現状に対して、筆者らは平成 9 年度より吹付けコンクリートのメカニズムの解明や各種解析手法による品質管理システムの構築など、「高品質吹付けコンクリートの開発」を目的とした共同研究を進めている。

本文は、上記研究の一環として、繊維補強吹付けコンクリートの配合（繊維混入率、混和材、繊維種類など）を変化させた場合、吹付けコンクリートの圧送性状、リバウンドにどのように影響するのかについて検討、報告するものである。

2. 実験概要

2. 1 使用材料および配合

使用材料を表-1、配合を表-2 および実験水準を

表-1 使用材料

材料	名称	密度 (g/cm ³)
セメント	普通ポルトランドセメント	3.15
細骨材	千葉県君津市産山砂	2.62 (表乾)
粗骨材	東京都八王子産 6 号碎石 (G _{max} =15mm)	2.69 (表乾)
混和剤	高性能減水剤 (ホリグ リコールエステル誘導体)	1.05
混和材	シリカフェーム	2.20
	石灰石微粉末	2.71
急結剤	セメント鉱物系粉体急結剤	2.57
繊維	鋼繊維 (L=30mm, φ0.6mm)	7.85
	ビニロン繊維 (L=30mm, φ0.7mm)	1.30
	ポリプロピレン繊維 (L=30mm, φ1.6mm)	0.91

*1 清水建設(株) 土木本部技術第 2 部 (正会員)

*2 (株)間組 土木本部技術設計部 主任 (正会員)

*3 前田建設工業(株) 技術研究所 (正会員)

*4 東京大学国際・産学共同研究センター 教授 工博 (正会員)

表-2 配合およびフレッシュコンクリートの性状

水結合材比 (%)	要因	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤 (B×%)	繊維種類	繊維混入率 (vol%)	急結剤添加率 (B×%)	目標値		測定値	
			セメント	水	細骨材	粗骨材	混和材					スランプ (cm)	空気量 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
55.6 (一般強度)	繊維混入率の変化	60.0	360	200	1048	716	-	-	鋼繊維	0	7.0	12	2	11.5	1.9
		62.5	369	205	1069	659				0.5				11.0	2.3
		65.0	378	215	1090	603				1.0				12.5	2.2
		67.5	387	225	1108	549				1.5				12.0	2.0
44.4 (高強度)	繊維混入率の変化	58.2	450	205	972	716	-	-	鋼繊維	0	5.0	21	2	21.0	1.2
		61.2	450	205	1014	659				0.5				20.5	1.8
		63.8	462	215	1032	603				1.0				19.5	1.7
		70.0	518	215	1048	460				1.5				20.0	1.3
	混和材種類	63.4	416	205	1017	603	シリカフューム	46	2.2	1.0	-	-	-	22.5	1.6
		63.8	462	205	930	603	石灰石微粉末	106	1.5					20.0	1.4
	繊維種類	63.8	462	215	1032	603	-	-	1.0	ポリプロピレン	-	-	-	19.5	2.3
		63.8	462	215	1032	603	-	-	0.9	ビニロン				19.5	2.0

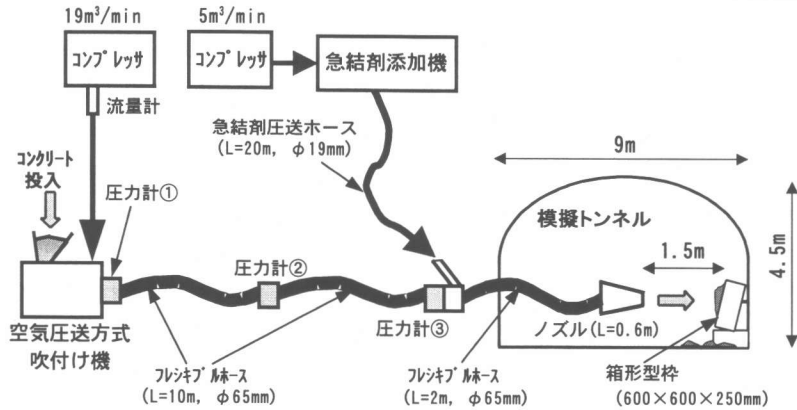


図-1 配管システム図

表-3 に示す。配合は、水結合材比を 55.6%（以下一般強度と称する）、44.4%（以下高強度と称する）の 2 水準とした。繊維を混入した配合については、水セメント比を一定にして、ペースト量の増減、および高性能減水剤を用いて良好なワーカビリティおよび目標スランプを得られるよう調整した。目標スランプは、一般強度については 12cm、

高強度については 21cm を基本とした。繊維長さは一般にトンネル吹付けでよく用いられている寸法として 30mm とした。繊維混入率はコンクリート全量に対する容積比で、0、0.5、1.0、1.5% の 4 水準とした。また、繊維種類の比較のためにポリプロピレン繊維およびビニロン繊維を用いた配合の実験も実施した。

表-3 実験水準

実験要因	実験水準
吹付けシステム	空気圧送方式
繊維混入率	0, 0.5, 1.0, 1.5 (vol%: 鋼繊維のみ)
繊維材料	鋼繊維, ビニロン, ポリプロピレン
混和材種類	シリカフューム 結合材質量置換(10%)
	石灰石微粉末 細骨材容積置換(10%)

混和材については、リバウンド、粉塵の低減が期待できるとして、シリカフューム（結合材 10% 質量置換）、石灰石微粉末（細骨材 10% 容積置換）の 2 種類を考慮して実験に組込んだ。置換率については、別途実験によりリバウンド低減に最も効果のあった数値とした。¹⁾

なお、コンクリートの練り混ぜはコンクリートプラントで行い、品質を確認後アジテータラッ

クで試験場所まで 20 分程度運搬した。

2. 2 吹付け設備および吹付け方法

吹付け実験は湿式吹付けとし、吹付け方式は空気圧送方式を採用した。主な配管システムを図-1 に示す。

空気圧送方式は、フレッシュコンクリートをロータリー方式の吹付け機で空気圧送するもので、急結剤を混合する Y 字管までフレキシブルホース内を 20m 圧送し、Y 字管で急結剤と混合し吹付けノズルより吐出させた。ノズルの操作は、遠隔操作可能な吹付けロボットを使用した。これらの吹付けシステムは、実際の施工現場での吹付けシステムを参考²⁾にして、できるだけこれに近い形とした。なお、吹付けコンクリートの吐出量は 8.0m³/hr 一定とした。

2. 3 試験項目および試験方法

(1) フレッシュコンクリートの性状

吹付け機に投入する前にアジテータ車から直接

抜き取り、フレッシュコンクリートの性状としてスランブおよび空気量を測定した。その測定結果を表-2に示す。

(2) 管内圧力

管内圧力の測定は、模擬トンネル内に設置した箱形型枠(寸法600mm×600mm×250mm)吹付け時に実施した(図-1参照)。箱形型枠吹付けは、管内圧力、空気流量が安定したのを確認してから実施した。

管内圧力は、図-1に示すように、①配管内の吹付け機出口、②中間位置および③急結剤添加位置に圧力センサーを取り付け0.05sec間隔で測定し、その平均値、変動係数を算出した。

(3) 空気流量

空気流量測定は、箱形型枠吹付け時に測定した。空気流量は、コンプレッサ出口に取付けたフロ一式流量計により測定した。

(4) リバウンド測定

リバウンド測定は、箱形型枠吹付け時に測定した。

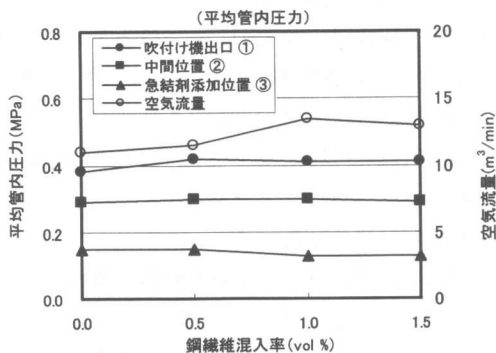


図-2 平均管内圧力, 圧力変動, 空気流量 (一般強度: 鋼繊維混入率)

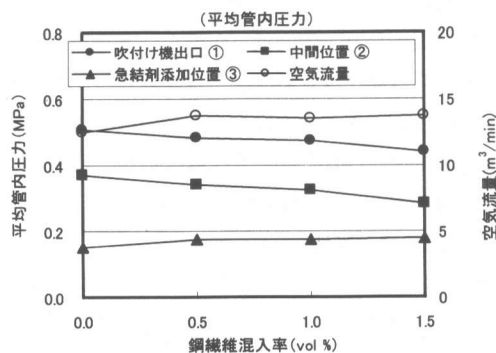


図-3 平均管内圧力, 圧力変動, 空気流量 (高強度: 鋼繊維混入率)

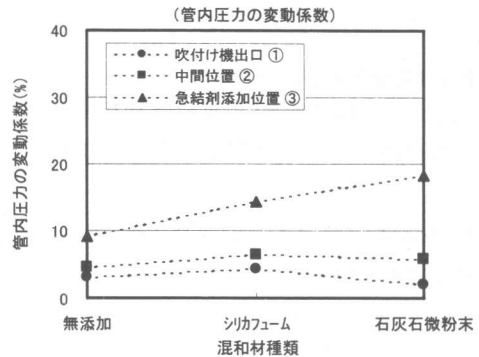
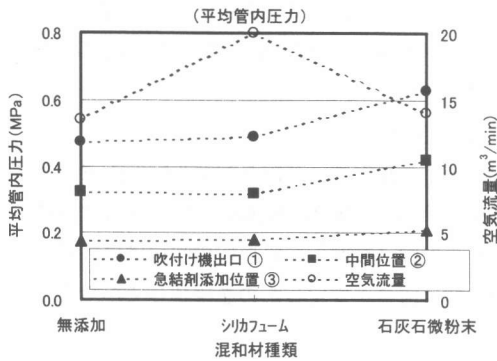


図-4 平均管内圧力，圧力変動，空気流量（混和材種類）

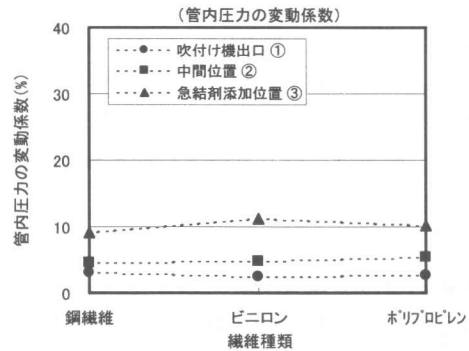
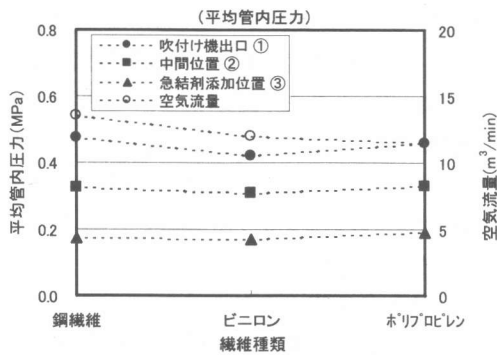


図-5 平均管内圧力，圧力変動，空気流量（繊維種類）

吹付けコンクリート全体のリバウンド率（以下全体リバウンド率と称する）は、リバウンド材の質量を吹付けに使用したコンクリートの総質量で除して算出した。繊維リバウンド率は、リバウンド材中の繊維質量を吹付けに使用したコンクリート中の繊維総質量で除したものである。

3. 実験結果

3.1 管内圧力の変化について

管内圧力および管内圧力の変動は、圧送抵抗および脈動など、圧送性の善し悪しの指標となる。

各要因別の管内圧力の平均値（以下平均管内圧力と称する）、管内圧力の変動と空気流量の関係を図-2から図-5に示す。

(1) 鋼繊維混入率の影響

図-2, 3から分かるように、一般強度、高強度のいずれについても、鋼繊維混入率を0, 0.5, 1.0, 1.5vol%と変化させても管内圧力の大きさ、損失の度合いにはほとんど影響はなかった。しかし、

管内圧力の変動は高強度では繊維混入による影響がほとんど見られないのに対し、一般強度では急結剤添加位置で鋼繊維を混入することにより変動が3~4割程度大きくなる傾向が見られた。これは、流動性の少ないコンクリートほど、鋼繊維の混入が圧送抵抗性に影響することを示している。

(2) 混和材種類の影響

図-4から分かるように、石灰石微粉末を混入した場合に管内圧力、管内圧力の変動とも増加する傾向が見られた。これは、細骨材容積置換による石灰石微粉末の混入により粉体量が増加しモルタル粘度が高くなり、管内抵抗が増大したためであると考えられる。シリカフュームを混入した場合は、管内圧力の大きさ、損失の度合いは混和材無添加の場合に比べほとんど変化はないが、管内圧力の変動が大きくなる傾向がみられた。

(3) 繊維種類の影響

図-5に示すように、繊維種類を変化させて鋼繊維補強吹付けを行った場合、管内圧力の大きさ、

変動、損失の度合いにはほとんど変化は見られなかった。

3. 2 リバウンド率

図-6~9に各要因別の空気流量と全体リバウンド率および繊維リバウンド率、図-10~12に今回実験のうち繊維を混入した吹付けを行ったものについて空気流量と全体リバウンド率、繊維リバウンド率および全体リバウンドと繊維リバウンドの関係を示す。

図-6~9より、全ての要因、水準において繊維

リバウンド率が全体リバウンド率を上回ることがわかった。また図-10, 11より全体リバウンド率は10~20%、繊維リバウンド率は12~25%の範囲に収まることがわかった。

一般に空気圧送圧力が高いとリバウンドは多くなるといわれているが³⁾、今回の実験結果からは図-10, 11に示すようにデータのばらつきが大きく、明確にはその傾向は把握できなかった。

また、図-8に示すように、今回の実験では混和材の添加によるリバウンド低減効果は明確にはみられなかった。その原因としては、混和材の添加

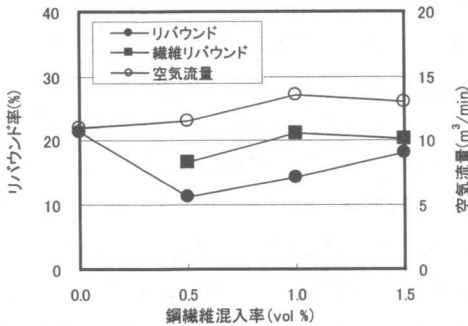


図-6 リバウンド率、空気流量（一般強度：繊維混入率）

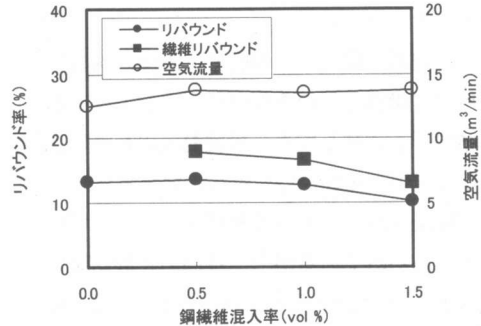


図-7 リバウンド率、空気流量（高強度：繊維混入率）

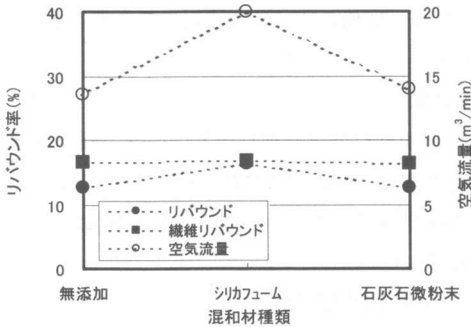


図-8 リバウンド率、空気流量（混和材種類）

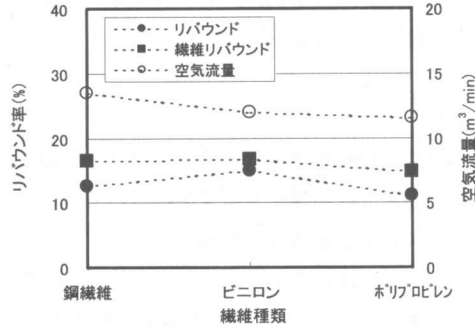


図-9 リバウンド率、空気流量（繊維種類）

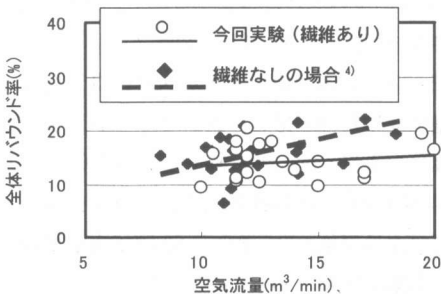


図-10 空気流量と全体リバウンド率

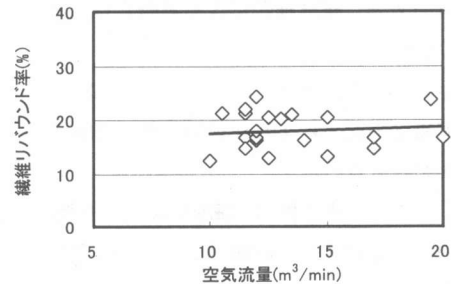


図-11 空気流量と繊維リバウンド率

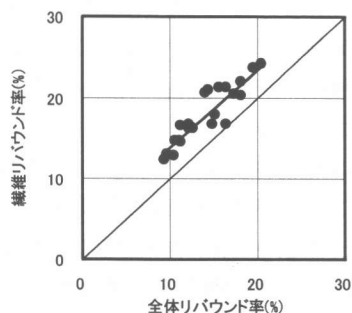


図-12 全体リバウンド率と繊維リバウンド率

によりモルタルの粘度が増加することが、壁面への付着性を増加させる一方で、図-4に示すように管内圧力の変動を増加させ、吹付けが不安定になったためと考えられる。

また、今回の実験と同一の吹付け設備、吹付け方法を用いて繊維なしの条件でリバウンド率を測定した結果⁴⁾と比較しても、繊維混入の有無によるリバウンド率の差異は特にみられなかった。

一般に繊維リバウンド率は材料リバウンド率の2倍程度といわれているが⁵⁾、今回の実験結果では繊維リバウンド率は全体リバウンド率+3%程度の値となった(図-12参照)。この違いは、施工条件(実施工トンネルと模擬トンネルの違い、吹付け角度の違い)によるものと考えられる。

4. まとめ

各種配合条件が繊維補強吹付けコンクリートの施工性にどのような影響を及ぼすかについて検討した結果、次のことが明らかとなった。

- ① 流動性の高いコンクリート(スランプ21cm)の吹付けでは、コンクリート圧送時の管内圧力、空気流量は、繊維の混入の有無、繊維の混入率の多少、繊維種類による影響をほとんど受けない。
- ② 流動性の低いコンクリート(スランプ12cm)では鋼繊維の混入により圧送抵抗性が増加する傾向がみられる。
- ③ 全体リバウンド率の値は、繊維の混入の有無、繊維の混入率の多少、繊維種類による影響をほとんど受けない。

- ④ 配合条件、繊維混入率に関わらず、繊維リバウンド率は、全体リバウンド率を上回る。

謝辞

本研究は、東京大学国際・産学共同研究センターにおける「高品質吹付けコンクリートの開発」を目的とした共同研究による成果である。ここで、共同研究員である(株)青木建設 駒田憲司氏、(株)エヌエムピー 清水哲史氏、(株)大林組 保岡哲治氏、鹿島建設(株) 大野俊夫氏、(株)熊谷組 岡田喬氏、佐藤工業(株) 小林裕二氏、大成建設(株) 坂本淳氏、太平洋セメント(株) 大森啓至氏、(株)竹中土木 安藤慎一郎氏、電気化学工業(株) 荒木昭俊氏、東急建設(株) 伊藤正憲氏、戸田建設(株) 田中徹氏、飛鳥建設(株) 田中斉氏、西松建設(株) 松浦誠司氏、および協力会社として御協力いただいた富士物産(株) 阿部隆夫氏、(株)北川鉄工所 見浦光夫氏、(株)東京測器研究所 佐藤辰也氏、(株)ブリヂストン 深津章文氏、また、吹付け実験に参加された多くの方々やコンクリートプラントを提供していただいた太平洋セメント(株) 佐倉研究所の方々、関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高品質吹付けコンクリートの開発 各種混和剤を変化させた吹付け実験 共同研究報告書, pp.40-60, 東京大学 国際・産学共同研究センター, 2000.3
- 2) トンネルの吹付けコンクリート, (社)日本トンネル技術協会, pp98-137, 1996.2
- 3) トンネルの吹付けコンクリート, (社)日本トンネル技術協会, pp.125, 1996.2
- 4) 石関嘉一ほか: 使用材料が吹付けコンクリートの施工性に及ぼす影響, コンクリート工学協会年次論文報告集, vol.22, No.2, pp.1390, 2000.6
- 5) 岩城圭介ほか: 繊維補強吹付けコンクリートの曲げじん性評価, 土木学会台53回年次学術講演会概要集第V部門, pp644-645, 1998