

論文 吹付けコンクリートにおける圧送前後の品質変化に関する研究

伊藤 正憲*1・富山 徹*2・大槻 直紀*3・魚本 健人*4

要旨:吹付けコンクリートの高品質化を目的に結合材量, 混和材料, スランプおよび空気量等を変化させた吹付けコンクリートの圧送前後の品質変化について検討した。その結果, 圧送することでスランプは低下し, 低下率は吹付け条件や配合条件によって相違した。この要因は圧送によってセメント粒子の比表面積が増加し, 流動性に寄与する自由水量の減少や高性能減水剤の分散効果が低下したことが一因として考えられた。また, 空気量は圧送前の空気量によらず, 圧送後は2~3%程度になり, これが強度および空隙率の変化に影響を及ぼしていると考えられた。

キーワード:吹付けコンクリート, 品質変化, スランプ, 空気量, 混和材料, 圧縮強度

1. はじめに

最近, トンネル工法の主流になっている NATM において吹付けコンクリートは重要な支保部材の一つである。また, 最近では, トンネルの大断面化やシングルシェルライニングへの適用等から高品質吹付けコンクリートが要求されるようになってきている。

吹付けコンクリートの高品質化には, コンクリートの高強度化, リバウンド低減などの施工性向上, 品質変動の低減など各種の項目が挙げられる。最近では, 吹付けコンクリートの高品質化の手法としてシリカフューム, フライアッシュ等の混和材の使用や高性能減水剤等の混和剤の併用など, 材料の適用に関する検討も報告されている¹⁾。

一方, 吹付けコンクリートは高圧で圧送されることから, 普通に打ち込まれたコンクリートよりも圧送によるコンクリートの性状変化が大きいと予想されるが, 圧送前後でコンシステンシーがどのように変化しているかを検討した報告は少なく²⁾, これを明確にできれば, 必要な対策を講じることで, 更なる品質の向上が期待できる。

このような背景のもと, 本研究では結合材量, 混和材, スランプ, 空気量を変化させたコンクリートを対象に, 圧送後のスランプ, 空気量および圧縮強度の変化を定量的に表すため, 急結剤を使用せずにコンクリートを吹付け, その要因の明確化に関して検討したものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本検討で使用した吹付けコンクリートの材料を表-1に, 配合表を表-2に示す。配合は, 単位結合材量を 360kg/m³および 450kg/m³とし, 水結合材比は 360kg の場合 63.9%および 56.9%, 450kg の場合 45.6%とした。目標スランプは単位結合材量 360kg の場合 12±2.5cm, 450kg の場合 21±1.5cm を基本とした。目標空

表-1 使用材料

材料	名 称	記号	密度g/cm ³	諸元, 主成分
セメント	普通ポルトランドセメント	C	3.16	比表面積 3,260cm ² /g
細骨材	千葉県 君津市産山砂	S	2.59	No.1:吸水率2.0%,F.M2.6
			2.61	No.2~25: 吸水率1.70%,F.M2.76
粗骨材	東京都八王子産 6号碎石	G	2.69	No.1:吸水率0.44%,F.M6.24
			2.66	No.2~25: 吸水率1.02%,F.M6.24
混和剤	高性能減水剤	Ad	1.05	ホリグリコールエステル誘導体
混和材	シリカフューム	SF	2.20	比表面積 200000cm ² /g
	フライアッシュ	FA	2.27	比表面積 3730cm ² /g

*1: 東急建設(株) 技術研究所 土木研究室 工修 (正会員)

*2: (株)ボゾリス物産 UGC 営業部

*3: 清水建設(株) 土木本部 技術第二部

*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 配合表

配合番号	種類	結合材量	混和材	置換率(%)	Sl (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							Ad(%)****	
									水		結合材		細骨材		粗骨材		
									W	C	SF*	FA**	S	FAS***	G		
1	360A	360	—	—	12	2	63.9	60.0	230	360			988		684	0	
2	360B		—	—	12	2	56.9	60.2	205	360			1035			0	
3	450B	450	—	—	21	2	45.6	58.2	205	450			960			0.80	
4			—	—	12	2		60.0	205	360			1035			0	
5				5	12	2		59.8	205	342	18		1028			0.77	
6				10	12	2		59.7	205	324	36		1022			1.10	
7			SF	15	12	2		59.5	205	306	54		1015			1.40	
8				10	18	2		59.7	205	324	36		1022			1.57	
9		360C		360	10	23	2	56.9	59.7	205	324	36		1022			2.37
10						10	12		5	57.8	205	324	36		943		
11			FA	10	12	2		60.8	194	306		34	1069			0	
12				10	12	5		60.3	180	284		32	1049			0	
13				10	12	2		61.5	189	331			991	96		0	
14				10	12	5		60.6	179	314			956	92		0	
15			—	—	21	2		58.2	205	450			960			0.85	
16				5	21	2		58.0	205	428	23		952			1.30	
17			SF	10	21	2		57.8	205	405	45		944			2.03	
18				15	21	2		57.6	205	383	68		936			2.03	
19				10	15	2		57.8	205	405	45		944			1.40	
20		450C		450	10	25	2	45.6	57.8	205	405	45		944			2.43
21					10	21	5		55.7	205	405	45		866			1.53
22			FA	10	21	2		57.8	205	405		45	946			0.40	
23				10	21	5		55.7	205	405		45	867			0.20	
24				10	21	2		58.2	205	450			864	84		0.67	
25				10	21	5		56.1	205	450			794	77		0.60	

*:シリカフューム,**:フライアッシュ(結合材置換),***:フライアッシュ(細骨材置換),****:高性能減水剤(結合材量×(%))

気量は2±1.0%および5±1.0%として、AE剤および消泡剤を用いて調整した。混和材の置換方法はシリカフュームの場合は結合材置換(5, 10, 15%)とし、フライアッシュの場合は結合材置換(10%)および細骨材置換(10%)とした。配合は、事前に試験練りを行い、ワーカビリティの確認を行った。また、コンクリートはプラントで製造し、約30分間運搬したのち実験に使用した。

2.2 吹付け設備

吹付けは湿式吹付け方式とし、実験で使用した圧送方式は、ロータリエア圧送式(以下、空気圧送式と称す)およびピストン式のコンクリートポンプ+空気圧送式(以下、ポンプ圧送式と称す)の2種類とした³⁾。

2.3 実験ケースと試料の採取方法

各配合における圧送条件を表-3に示す。試料の採取は吹付け機投入前にアジテータトラックから直接採取する現地到着時(「現着」と称す)、および各システムで急結剤を添加せずにコンテナにコンクリートを吹き付け、切り返しを行わない、コンテナから試料を採取する「筒先」の2種類とした。

表-3 配合別の圧送条件

種類	吹付け方式	設定吐出量(m ³ /hr)	設定圧力(MPa)
360A	空気圧送	4,6,8,10	0.3,0.4,0.5
360B	ポンプ圧送	8.0	0.25
450B			0.35
360C	空気圧送	8.0	0.37~0.52
450C			0.40~0.65

2.4 試験項目および方法

- ①スランブ試験：試験はJIS A 1101に準じ、現着・筒先の試料を対象として実施した。
- ②空気量試験：試験はJIS A 1128に準じ、現着・筒先の試料を対象として実施した。
- ③圧縮強度試験：試験はJIS A 1108に準じ、現着・筒先の試料からφ10×20cmの供試体を作製し、材齢28日に実施した。
- ④空隙率測定：試験はASTM C 642に準じ、現着・筒先の試料から供試体を作製し、材齢28日に実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 圧送前後のスランブ変化

図-1に圧送前後のスランブの変化を示す。なお、360Aは同じ配合のコンクリートを圧力0.3

～0.5MPa, 吐出量 4～10^{m3}と変化させて8回吹き付けたものである。いずれのコンクリートも吹き付けることにより, 現着のスランブに対して筒先のスランブが低下した。ただし, スランブの低下の度合いは配合により異なった。

圧送後のスランブの低下に及ぼす圧送条件の影響を明確にするため, 混和材を使用しない配合(No.1～3)を対象として, 圧送前後のスランブの相違を圧送方式で比較した。図-2に空気圧送式で吹き付けた場合の設定吐出量とスランブ低下率を, 図-3に吹付け機出口での実測圧力とスランブ低下率の関係を示す。また, 図-4にポンプ圧送式で吹き付けた場合の実測吐出量とスランブ低下率の関係を, 図-5に実測圧力とスランブ低下率の関係を示す。なお, スランブの低下率は現着と筒先の差の現着スランブに対する割合で示したものである。

図-2より混和材を使用せずに, 吹付け圧力を0.4MPa一定とし, 設定吐出量を4,6,8,10^{m3}/hrと変化させた場合, 吐出量が少なくなるほどほぼ直線的にスランブ低下率が増加した。しかし,

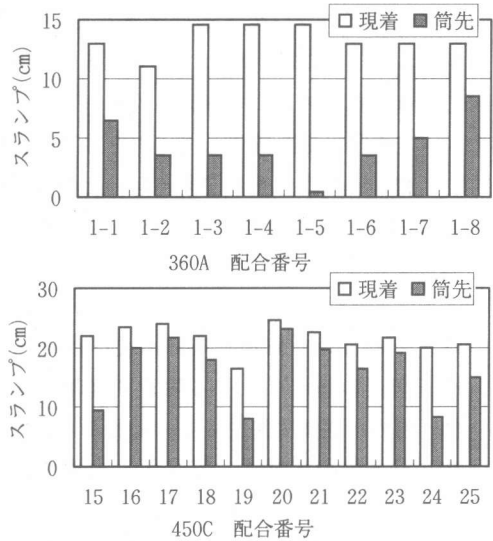


図-1 現着および筒先のスランブ

吐出量 8^{m3}/hr として圧力を変化させた場合は(図-3), 設定吐出量を変化させた場合と異なり, 吹付け圧力とスランブ低下率の間に良好な相関関係は認められなかった。一方, ポンプ圧送式については, 実測の吐出量が少なくなるほどスランブ低下率は大きくなり(図-4), また, いずれの結合材量においても, 吹付け圧力が高

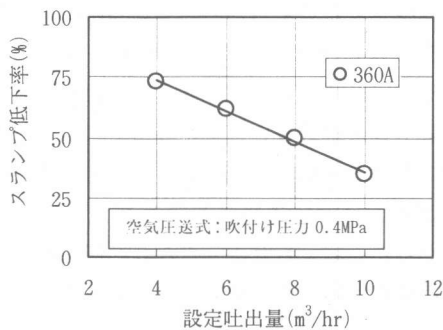


図-2 設定吐出量とスランブ低下率の関係

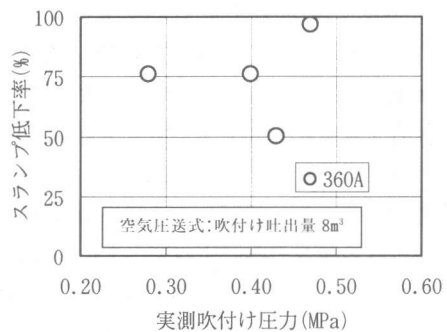


図-3 実測吹付け圧力とスランブ低下率の関係

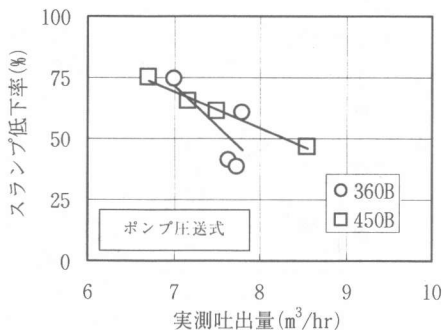


図-4 実測吐出量とスランブ低下率の関係

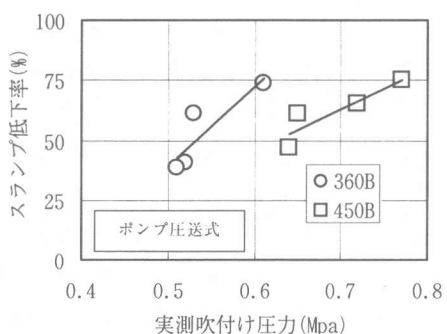


図-5 実測吹付け圧力とスランブ低下率の関係

くなるほどスランプ低下率は大きくなった(図-5)。このような圧送後のスランプ低下の原因としては、以下の3つが考えられる。

- ①：一定の吐出量を確保して圧力を高くした場合、相対的に空気流量が多く必要となり、筒先での試料採取の際に主にペースト分が飛散することによりスランプが低下した。
 - ②：スランプ低下のメカニズムとして一般的に考えられている水和反応等の化学的作用や粒子同士の衝突で生じる物理的作用が⁴⁾吹付け時の圧送圧力等でさらに助長され、コンクリート中の流動性に寄与する自由な水量(以下、自由水量)が減少した。
 - ③：②で生じた化学的・物理的作用によって高性能減水剤(以下、Ad)の粉体粒子を分散させる効果が低下した。
- そこで、②、③について考察することにした。

3. 2 圧送後のスランプ低下に及ぼす諸要因

図-6にNo.4~25のAdのコンクリート1m³当たりの単位量とスランプ低下率の関係を示す。いずれの結合材量においてもAdの単位量が多いほどスランプ低下率が小さくなる領域(凡例：○、□)と単位量に影響を受けない領域(凡例：●、■)とに分けることができ、両者は添加量が結合材重量に対して0.7%程度を境にして二分されていた。

圧送後のスランプ低下は、Ad無添加の配合では自由水量の減少のみによって、また、Adを添加した配合では自由水量の減少の他にAdの分散効果が低下した可能性も挙げられる。

ここで、Ad無添加の場合のスランプ低下は、圧送によって管内との摩擦等の影響でセメントの水和が促進し、粒子表面の生成物の増加によって比表面積が大きくなったことが一因ではないかと考え、圧送前後のセメント粒子の比表面積を次の方法により測定した。

圧送前後のコンクリート(450B)から5mmふるいを用いてモルタルを採取し、アセトンと混合して水和を停止させ、40℃、R.H.30%で恒量乾燥する。試料はさらに75μmのふるいを通過し

たものとし、ガス流動式比表面積装置で測定した。測定前の予備乾燥は1時間とした。

その結果、圧送前の比表面積が1.82m²/gであったのに対し、圧送後は2.18m²/gとなり、圧送後のセメント粒子の比表面積が約20%増加していた。従って、圧送後のスランプの低下は、セメントの水和に伴う比表面積の増加による粒子間距離の縮小、即ち、流動性に影響を及ぼす自由水量の減少が一因として考えられる。

一方、Adの影響としては、以下のように考えることができる。一般にAdの分散効果は粒子表面に吸着することで得られる反発エネルギーによって生じるといわれている⁵⁾。この反発エネルギーは粒子表面積に対して吸着するほど大きくなることから、単位表面積当たりの吸着量が多いほど分散効果が向上することになる。つまり、圧送によってセメント粒子の比表面積が増加した場合に圧送前と同じ分散効果を発揮させるためには、Adの吸着量を比表面積の増加分だけ多くする必要がある。これを補うのがセメント粒子表面に吸着しないで液相中に残存している量(残存量)である。Adは添加量が多いほどセメント粒子に吸着する量は多くなるが、同時に残存量も多くなるため、後から吸着できる量も多いことになる。このような理由により0.7%以上の添加量の領域では、Adの量が多いほど圧送後のスランプ低下率が小さくなったと考えられる。ただし、圧送前後の比表面積の測定が1水準のみであり、また、圧送前後のAdの吸着量を測定していないことから、今後、詳細に検証する必要があると考えられる。

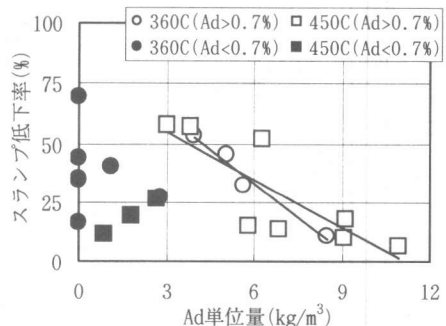


図-6 Ad 単位量とスランプ低下率の関係

3.3 圧送前後の空気量の変化

図-7に360Aの現着と筒先の空気量をそれぞれ示す。360Aは同じ配合のコンクリートを対象とし圧力0.3~0.5MPa、吐出量4~10m³と変化させて8回吹き付けているが、圧力、吐出量による空気量に及ぼす影響はほとんど認められず、いずれの場合も圧送することにより空気量が低下し、現着平均で約3.5%であったものが筒先平均では約2.2%まで低下していた。

図-8に450C(No.15~25)の現着と筒先の空気量をそれぞれ示す。目標空気量を2%とし、混和材を使用した場合は、筒先での空気量が若干増加していた。しかし、目標空気量を5%とした場合は、いずれも大きく空気量が減少していた。また、360Cおよびポンプ圧送式で吹き付けた場合にも同様の傾向を示していた。

図-9に全ての配合について現着空気量と空気量の低下量(現着から筒先の空気量を差し引いたもの)の関係を示す。配合条件、吹付け条件の違いによらず、空気量の低下量は現着の空気量が大きいくほど大きくなる傾向にあり、現着の空気量が2.5%以下の場合には増加する傾向、2.5%以上の場合には低下する傾向にあった。

このように現着の目標空気量を5%とした場合も含めて吹き付けることにより筒先のコンクリートの空気量はいずれも2~3%程度になることが認められた。また、図-10にフレッシュ時の単位容積質量の変化率((筒先-現着)/現着×100)と空気量の低下量の関係を示す。空気量の低下量が大きいくほど、単位容積質量の変化率が大きくなり、リバウンド(ペースト消失)の影響も考慮する必要があるが、空気量が減少した分だけ単位容積質量は増加していた。

3.4 硬化体に及ぼす影響

図-11に360Aの現着サンプルの材齢28日圧縮強度と空気圧送式で吹き付けた(急結剤未添加)筒先サンプルの材齢28日圧縮強度を、図-12に同じく空隙率を示す。いずれの場合も筒先でのサンプルの強度が現着時の強度を上回る傾向にあった。なお、図-11中に筒先サンプル

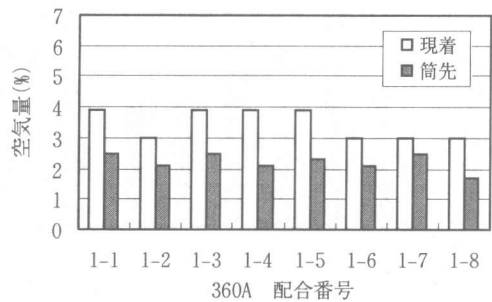


図-7 現着および筒先の空気量(360A)

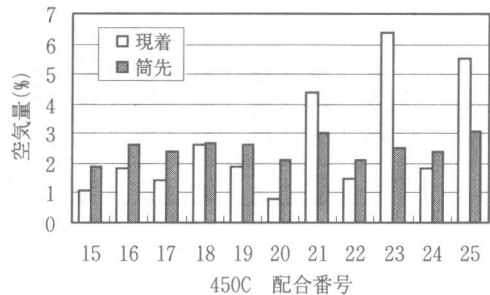


図-8 現着および筒先の空気量(450C)

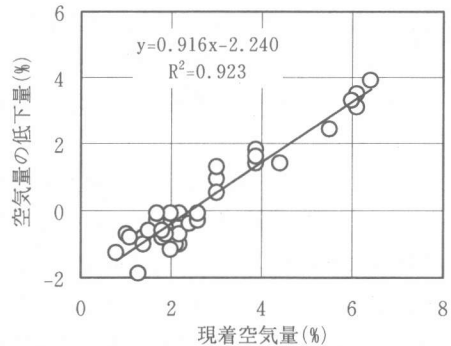


図-9 現着空気量と低下量の関係

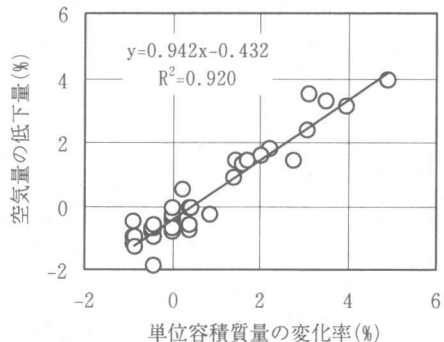


図-10 単位容積質量の変化率と空気量の低下量の関係

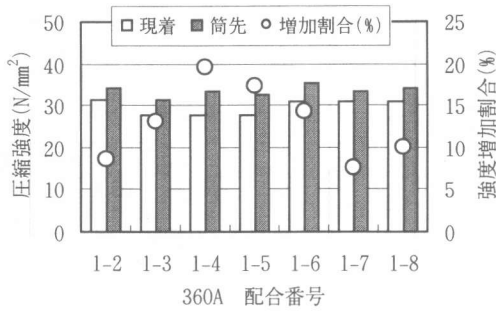


図-11 圧縮強度と強度の増加割合

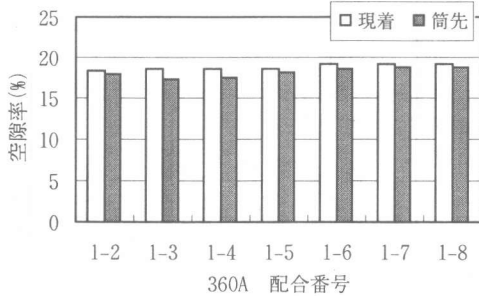


図-12 現着と筒先の空隙率

の強度の増加割合を合わせて示しているが、その増加割合は7~20%であった。また、空隙率はフレッシュ時の空気量の影響を受けて筒先のサンプルの空隙率が現着時の空隙率よりも小さくなった。

図-13に空気量の低下量と筒先強度の増加割合を示す。低下量が大きくなるほど強度は増加する傾向にあった。一般に空気量1%増えると強度が5%低下すると言われているが、今回の吹付けにおいては空気量1%の減少で強度が約10%増加しており、空気量以外の要因も影響している可能性が考えられる。今後、サンプル数を増やし、詳細な検討を行なっていきたいと考えている。

4. まとめ

吹付けコンクリートの高品質化を目指し、圧送前後の品質変化について検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 圧送前後のスランプの変化は、吹き付ける条件(吐出量、圧力等)の影響を受ける。

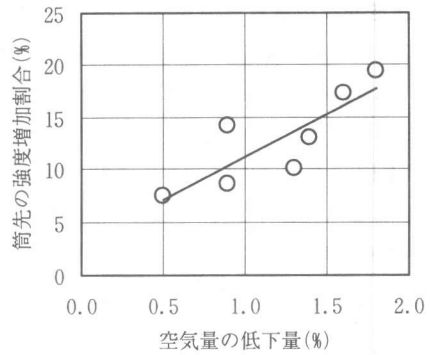


図-13 空気量の低下量と強度の増加割合の関係

- ② 圧送前後のスランプの変化は、水和に起因すると考えられる自由水量の減少および混和剤の分散効果の低下が影響を及ぼしており、混和剤添加量が多いほど、圧送によるスランプの低下が小さい。
- ③ 吹付けコンクリートのフレッシュ時の空気量は、圧送前の空気量に関わらず、圧送後はおおむね2~3%程度になっていた。
- ④ 圧送した吹付けコンクリートの強度(急結剤未添加)、空隙率は、フレッシュ時における空気量の変化の影響を受ける。

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の成果であり、共同研究各社、協力会社および関係各位のご協力に感謝致します。

参考文献

- 1) 例えば、田沢雄二郎ほか：シリカフュームを混和した高強度吹付けコンクリートの物性と適用例、土木学会論文集、No.550/V33, pp.173-184, 1996.1
- 2) 例えば、伊藤祐二ほか：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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19, No.1, pp.1429-1434, 1997
- 3) 赤坂雄司ほか：圧送方式が吹付けコンクリートの諸物性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.22, 2000(投稿中)
- 4) 岡田：スランプロス・流動化コンクリートの応用、セメント協会編セメント・コンクリート化学とその応用、pp.141-147, 1987
- 5) 坂井悦郎ほか：粒子間ポテンシャルの計算による高性能AE減水剤の作用機構、セメント・コンクリート、No.595, pp.13-22, 1996.9