

吹付けコンクリートの特性に関する基礎的研究 (13)

—吹付けコンクリートの品質に及ぼす各種吹付け条件の影響—

Properties of Shotcrete(13)

The impact of Spraying Conditions on Quality of Shotcrete

安藤 慎一郎*・大野 俊夫**・伊藤 正憲***・魚本 健人****

Shinichiro ANDO, Toshio OHNO, Masanori ITO and Taketo UOMOTO

1. はじめに

吹付けコンクリートは、トンネル工事における1次ライニング材や石油備蓄基地等の地下構造物の覆工ライニング材として重要な地位を占めている。その施工機械は比較的小型で、トンネル掘削後コンクリート覆工を型枠を用いず直ちに施工できることが大きな特徴である。しかし、施工条件やノズルマンの技量により、施工性、品質等がバラツキを生じやすいといった短所も持ち合わせており、近年検討の進む、吹付けコンクリートの永久構造物化にむけては、配合条件^{1),2)}とともに吹付け条件の検討によるコンクリートの高品質化が重要となっている。

本報告は、吹付け条件を実験因子とした吹付け実験を行い、各種吹付け条件が吹付けコンクリートの品質に与える影響について検討したものである。

2. 実験概要

2.1 実験要因と水準

実験の組合せを表1に示す。実験要因は圧送方式、圧送圧力、コンクリート吐出量、吹付け距離、吹付け角度、急結剤添加位置、圧縮空気添加位置とした。各要因の水準は、予備吹付け実験の結果、安定した吹付けが可能であった水準を基本として設定した。

表1 実験の組合せ

圧送方式	実験要因	吹付け条件 ^{*1}						
		圧送圧力 (MPa)	コンクリート吐出量 (m ³ /hr)	吹付け距離 (m)	吹付け角度 [円周] (度)	吹付け角度 [軸] (度)	急結剤添加位置 (m)	圧縮空気添加位置 (m)
空気圧送	圧送圧力	0.3,0.4,0.5	8	1.5	0	0	2.6	12.6
	コンクリート吐出量	4.0,6.0,8.0,10.0	1.5	0	0	2.6		
	吹付け距離	8	0.5,1.5,2.5	0.45,90	0	2.6		
	吹付け角度円周	8	1.5	0,22.5,45	0	2.6		
	吹付け角度軸	8	1.5	0	0	2.6		
	急結剤添加位置	8	1.5	0	0	1.6,2.6,4.6		
ポンプ圧送	圧送圧力	0.2,0.25,0.35	8	1.5	0	0	2.6	12.6
	CON吐出量	4.0,8.0,12.0	1.5	0	0	2.6		
	吹付け距離	8	0.5,1.5,2.5	0	0	2.6		
	圧縮空気添加位置	8	1.5	0	0	2.6,12.6,22.6		

*1 〇は実験要因の水準を示す。なお、水準以外は設定条件とした。

*株式会社竹中土木

**鹿島建設株式会社

***東急建設株式会社

****東京大学国際・産学共同研究センター

2.2 実験方法

2.2.1 吹付け方法および吹付け設備

コンクリートの吹付けは、湿式吹付けとし、半径4.5m×延長17.0mで半円形の模擬トンネル内にて行った。吹付け設備は、空気圧送方式およびコンクリートポンプ+空気圧送方式（以下ポンプ圧送方式と称す。）の2種類とした³⁾。吹付けノズルの方向は、実験要因が吹付け角度（円周方向および軸方向の各3水準）の場合には図1に示す角度とし、他の場合では鉛直・水平方向とも0度とした。

2.2.2 使用材料およびコンクリート配合

使用材料および配合を、表2および表3に示す。実験に使用したコンクリートは、JIS生コン工場にて製造した（以下、ベースコンクリートと称す）。工場から実験位置までの所要時間は約20分である。

2.2.3 試験項目および試験方法

(1)物性試験

図2は、物性試験の実施フローを示す。フレッシュコンクリート試験については、スランプ、空気量、コンクリート温度、単位容積質量の測定をJIS A 1101およびJISA 1118に準じて行い、硬化コンクリートについては、圧縮強度、空隙率、単位容積質量の測定を行った。

硬化コンクリートの圧縮強度は、JIS A 1108に準拠し、材

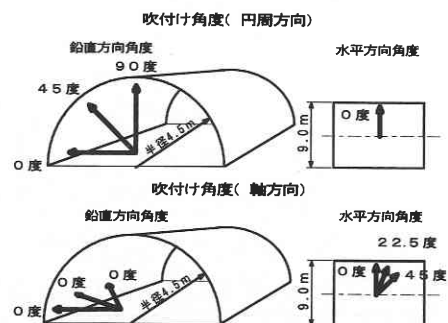


図1 吹付けノズルの方向

研 究 速 報

齢 7 日, 28 日 (空気圧送方式では 91 日まで) で測定した。供試体は, ベースコンクリート (管理用) では JIS A 1132 に準じた $\phi 10 \times 20$ cm とし, 吹付けコンクリートでは JSCE-G 502 に準じて箱型枠 (60 × 60 × 25 cm) に吹き付けた試験体から採取した $\phi 10 \times 20$ cm および $\phi 7.5 \times 15$ cm のコアとした。また, 実験因子吹付け角度 (円周方向および軸方向) においては, 模擬トンネル内面に直接吹き付けたコンクリート試験体から $\phi 7.5 \times 15$ cm のコアを採取した。なお, 各供試体数は各材齢につき 3 本とした。各供試体の養生は, 脱型およびコア採取後, 所定の材齢まで標準水中養生とした。

空隙率の測定は, 材齢 28 日において ASTM C 642-90 に準じ, 各コア供試体および管理供試体について行った。

(2)リバウンド測定

リバウンド率は, コンクリートを箱型枠に向けて吹き付け, 箱型枠および周囲の壁面に付着したコンクリートと, 付着せずに落下したコンクリートの重量を測定して算出した。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状の変化

図 3 は, ベースコンクリートおよび吹付けコンクリート (急結剤無添加) のスランプ, 空気量および単位容積質量の関係を示す。ベースコンクリートのスランプは, 圧送によって 5 ~ 10 cm 程度低下し, 空気量は同等か 1 ~ 2 % 程度低下した。スランプおよび空気量の低下は, 高圧送圧力, 少コンクリート

吐出量で大きい傾向にあり, 圧送圧力および圧送時の圧縮空気とコンクリートの混合比率が関係していると考えられる。

3.2 リバウンド

図 4 は, 圧送方式毎の各種吹付け条件とリバウンド率の関係を示す。実験要因が吹付け距離, 圧送圧力およびコンクリート吐出量の場合, リバウンド率は両圧送方式とも同様の傾向を示した。吹付け距離および圧送圧力については, 両圧送方式とも基本水準で最小となり, コンクリート吐出量では, その増大とともに小さくなった。また, 空気圧送方式における吹付け角度では, 角度 (円周・軸方向) が大きくなるに従って増大した。特に吹付け面に対して角度を振った場合 (軸方向) に差が大きく, 吹付けノズルの角度がリバウンドに影響することが認められた。他の実験要因のリバウンドは圧送方式によらず同様の傾向であり, この傾向はポンプ方式でも同様であると考えられる。

3.3 硬化物性への影響

各種吹付け条件による硬化物性への影響を, 分散分析により評価した。評価は各吹付け条件毎に圧縮強度比および空隙率比を算出し, この値を効果と考えて行った。ただし, 圧縮強度比は, ベースコンクリートで採取した管理用供試体の材齢 28 日圧縮強度に対する吹付けコンクリートのコア供試体圧縮強度の比率である。空隙率比は圧縮強度比と同様に求めた。分析は, 圧縮強度比についてはその水準 3 項目と 2 材齢に関する二元配置, 繰返し数 3 回, 空隙率比では一元配置, 繰返し数 3 回で行

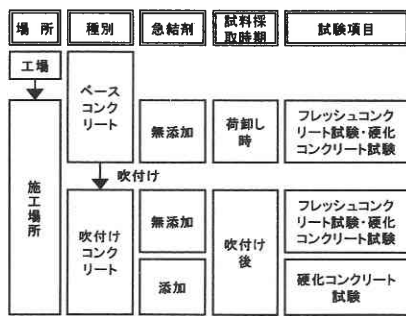


図 2 物性試験の実験の実施フロー

表 2 使用材料

区分	種類	仕様
セメント	普通ポルトランドセメント	比重 = 3.16
細骨材	山砂 (君津産)	比重 = 2.60
		F.M. = 2.60
粗骨材	砕石 (名栗産)	比重 = 2.72
		F.M. = 6.24
急結剤	カルシウムアルミネート系	比重 = 2.70

表 3 コンクリートの配合

圧送方式	粗骨材の最大寸法	スランプの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)						
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	急結剤 Cx (%)	高性能減水剤	
空気圧送	13	12±2.5	2.0±1.0	63.9	60	230	360	988	684	7	-	
ポンプ圧送	13	12±2.5	2.0±1.0	56.9	60	205	360	1031	719	7	-	

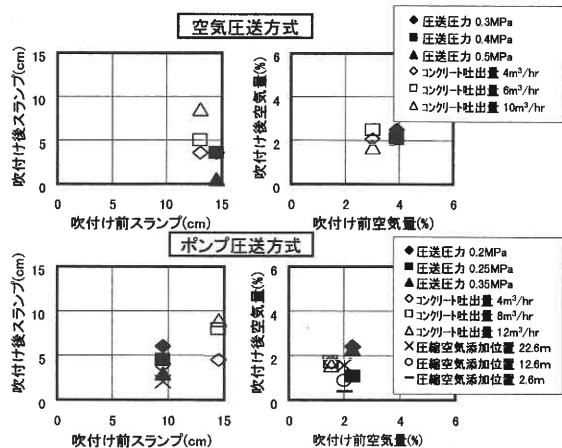


図 3 吹付けによるフレッシュ性状の変化

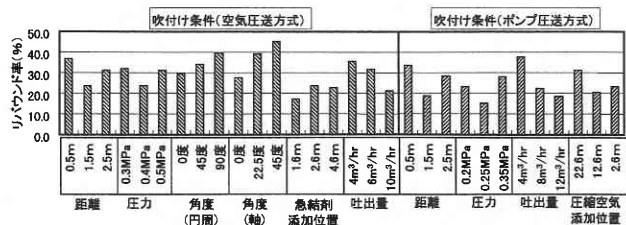


図 4 各種吹付け条件とリバウンド率との関係

った。表4に分散分析結果の一覧を、図5に空気圧送方式の要因効果図を、図6にポンプ圧送方式の要因効果図を示す。

(1) 圧送圧力の影響

空気圧送方式では、圧縮強度比と空隙率比、および平均値の差の検定にも 0.3 MPa と 0.4 MPa 間に有意差が認められた。一方、ポンプ圧送方式では、圧縮強度比、空隙率比とも各水準間に有意差は認められなかった。これは、ポンプ圧送方式では水準間の設定幅が空気圧送方式の 1/2 であり、この影響によるものと考えられる。吹付けコンクリートの品質確保のためには、一定以上の圧送圧力を確保することが必要と考えられる。

(2) コンクリート吐出量の影響

両圧送方式とも圧縮強度比のみに有意差が認められた。圧縮強度比は、空気圧送方式において 4 m³/hr、ポンプ圧送方式において 8 m³/hr 以上で低下している。ある吐出量以上では強度比が低下することが認められた。

(3) 吹付け距離の影響

両圧送方式とも圧縮強度比のみに有意差が認められた。平均値の差の検定では、空気圧送方式が 1.5 m で最も高い

表4 各種吹付け条件による分散分析結果

圧送方式	吹付け条件	基本水準	効果					
			圧縮強度比		空隙率比			
			分散分析結果	水準間の差の検定結果	分散分析結果	水準間の差の検定結果		
空気圧送	圧送圧力	0.4 MPa	**	2	0.3 ~ 0.4 0.5	*	—	—
	コンクリート吐出量	8m ³ /hr	**	2	4 ~ 6 · 10	—	—	—
	吹付け距離	1.5m	**	3	0.5 ~ 1.5 2.5, 1.5 ~	—	—	—
	吹付け角度(円周方向)	0度	**	2	0 ~ 90 45 ~ 90	**	2	0 ~ 90 45 ~ 90
	吹付け角度(軸方向)	0度	**	2	0 ~ 22.5 · 45	—	—	—
	急結剤添加位置	2.6m	**	2	1.6 ~ 2.6 4.6	—	—	—
ポンプ圧送	圧送圧力	0.25 MPa	—	—	—	—	1	0.2 ~ 0.35
	コンクリート吐出量	8m ³ /hr	*	1	8 ~ 12	—	—	—
	吹付け距離	1.5m	**	2	0.5 ~ 2.5, 1.5 ~ 2.5	—	—	—
	圧縮空気添加位置	12.6m	**	3	20 ~ 10 · 0 10 ~ 0	*	2	20 ~ 10, 10 ~ 0

** : 1%有意, * : 5%有意

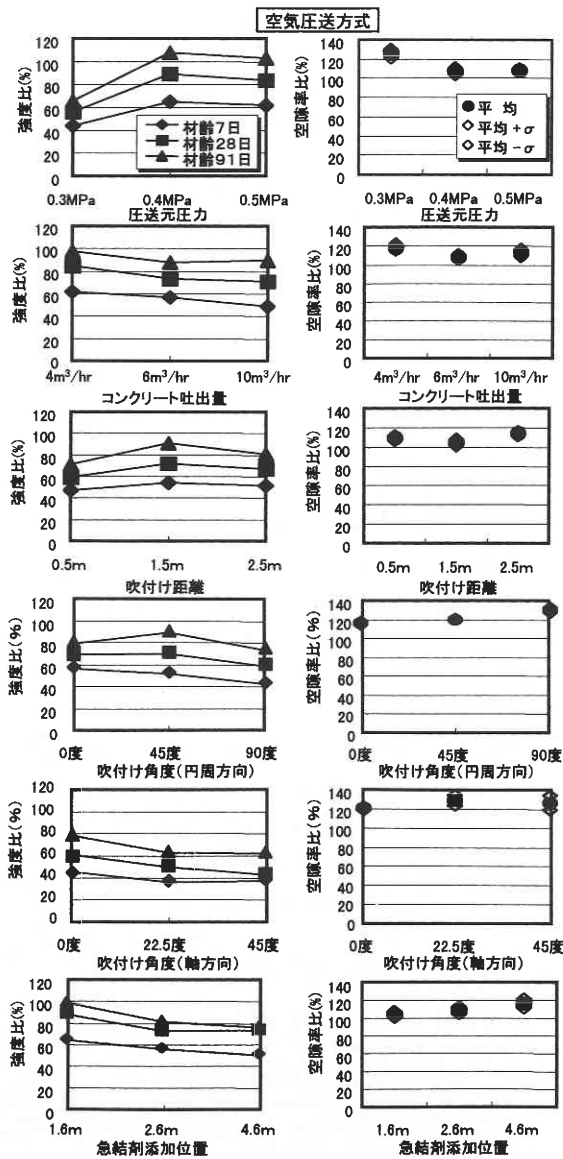


図5 要因効果図 (空気圧送方式)

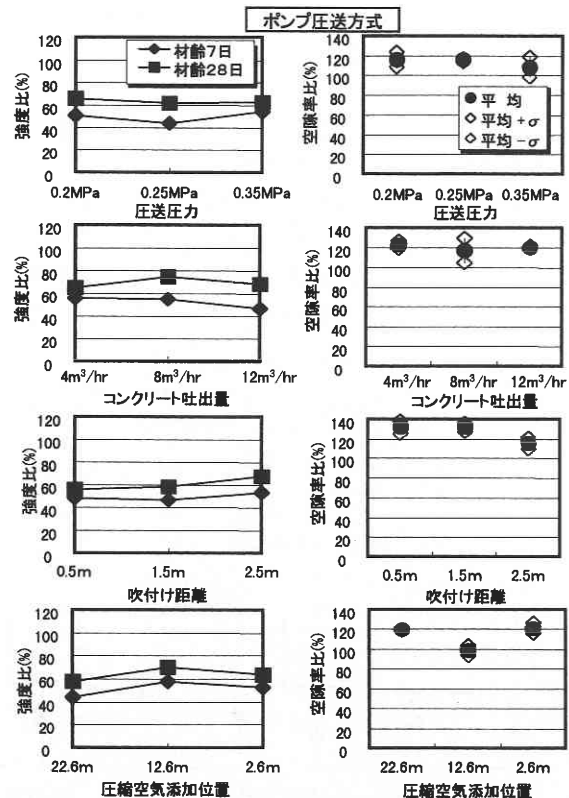


図6 要因効果図 (ポンプ圧送方式)

研 究 速 報

が、ポンプ圧送方式は2.5 mで高く、圧送方式による違いが認められた。

(4)吹付け角度の影響

円周方向では、圧縮強度比および空隙率比に、軸方向では圧縮強度比のみに有意差が認められた。軸方向の空隙率比は有意でなかったが、角度が大きくなるとともにバラツキが大きくなる傾向にある。吹付け角度による圧縮強度比の変化は空隙量の差と関係していると考えられる。

また、平均値の差の検定では円周方向の45, 90度間および軸方向の0, 22.5度間に有意差があり、軸方向へのわずかな角度変化が圧縮強度に影響することが認められた。

なお、吹付け角度については、空気圧送方式による結果であるが、ポンプ圧送方式でも同様であると考えられる。

(5)急結剤添加位置の影響

急結剤添加位置では、圧縮強度比のみに有意差が、平均値の差の検定では、1.6, 2.6 m間に有意差が認められた。吹付けノズル側に添加位置を移動することが圧縮強度を増加させると考えられる。

(6)圧縮空気添加位置の影響

ポンプ圧送方式の圧縮空気添加位置には、圧縮強度比および空隙率比ともに有意差が認められた。平均値の差の検定では、すべての水準間が有意であった。12.6 mは圧縮強度比で最も大きく、空隙率比では最も小さな値となり、最適な添加位置の存在が認められた。

(7)吹付け条件の交互作用

ポンプ圧送方式の結果をもとに、圧送圧力と距離、および圧送圧力とコンクリート吐出量との関係について、各要因の3水準について二元配置、3回繰り返して分散分析を行った。結果を表5および図7に示す。圧縮強度比における分析の結果、圧送圧力と吹付け距離との関係には距離に、圧送圧力とコンクリート吐出量との関係では各々に有意差

が認められた。距離2.5 m×圧力0.25 MPa、および吐出量8 m³/hr×圧力0.25 MPaは最も大きな値となり、最適な組合せの存在が認められた。なお、交互作用については、空気圧送方式でも同様であると考えられる。

4. ま と め

本実験の範囲で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) フレッシュ性状の変化は、圧送圧力およびコンクリート吐出量の影響を受ける。
- 2) リバウンドは、各吹付け条件の影響を受ける。圧送方式によらず、吹付け距離、吹付け圧力、コンクリート吐出量および吹付け角度が影響する。
- 3) 吹付けコンクリートの品質確保のためには、一定以上の圧送圧力、一定以下のコンクリート吐出量が必要である。吹付け角度については、円周方向では45度までは影響ないが、軸方向ではわずかな角度変化でも影響する。また、急結剤添加位置およびポンプ圧送方式の圧縮空気添加位置には、最適な設定が存在する。
- 4) 吹付け条件には交互作用があり、最適な組合せが存在する。

謝 辞

本研究は、東京大学生産技術研究所における「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。東大生研技官の西村次男氏、および受託研究員の荒木昭俊氏、小林裕二氏をはじめ、共同研究員である(株)青木建設 駒田憲司氏、(株)エヌエムビー 富山 徹氏、(株)大林組 田湯正孝氏、(株)熊谷組 岡田 喬氏、佐藤工業(株)大野一昭氏、清水建設(株) 浅野 篤氏、大成建設(株) 坂本 淳氏、電気化学工業(株) 入内島克明氏、飛鳥建設(株) 平間 昭信氏、西松建設(株) 松浦誠司氏、太平洋セメント(株) 綾田隆史氏、(株)間組 杉山 律氏、前田建設工業(株) 赤坂雄司氏、および協力会社としてご協力を頂いた(株)北川鉄工所 見浦光男氏、(株)東京測器研究所 佐藤達也氏、また、コンクリートの供給にご協力を頂いた千葉菱光(株)本社工場の方々、さらに、千葉工業大学卒論生 今村信仁氏、芝浦工業大学卒論生 久保田雄彦氏に深く感謝の意を表します。

(1999年9月10日受理)

参 考 文 献

- 1) 荒木昭俊ほか：各種配合要因の変化に伴う吹付けコンクリートのフレッシュ性状およびリバウンド特性，コンクリート工学年次論文報告集，第20巻，pp.1159-1164，1998.6.
- 2) 小林裕二ほか：各種配合要因に伴う吹付けコンクリートの強度および空隙特性，コンクリート工学年次論文報告集，第20巻，pp.1153-1158，1998.6.
- 3) 杉山律ほか：吹付けコンクリートの圧送性状に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，第21巻，pp.1357-1362，1999.7.

表5 分散分析結果 (吹付け条件の交互作用)

実験要因		効果
		圧縮強度比
ポンプ	圧送圧力×圧力	—
	吹付け距離×距離	**
圧送	圧送圧力×圧力	**
	吐出量×吐出量	**

** : 1%有意, * : 5%有意

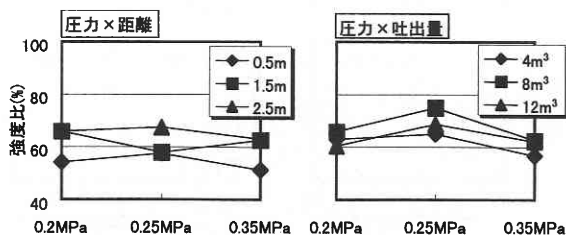


図7 要因効果図 (吹付け条件の交互作用)