

## 論文 吹付けコンクリートの強度特性に関する一考察

大野 俊夫\*1・坂本 淳\*2・荒木 昭俊\*3・魚本 健人\*4

要旨: 吹付けコンクリートの強度はコンクリートの材料・配合や施工条件, 岩盤条件など様々な要因に影響されるが, 合理的な支保設計を行うためにはこれらの影響を定量的に把握する必要がある。今回, 実際のトンネル現場で吹付け距離や圧送空気流量を要因として吹付け実験を行い, 初期強度や練混ぜコンクリートの供試体及びパネル型枠と岩盤に吹き付けた後のコアについて長期強度試験を行った。この結果, 初期強度や長期強度に及ぼす吹付け距離や圧送空気流量, コア採取部位の影響, 吹付け作業による強度低減率などを明らかにした。

キーワード: 吹付けコンクリート, 初期強度, 長期強度, 強度低減率

## 1. はじめに

吹付けコンクリートはトンネルや地下空洞などの一次覆工に広く用いられている。吹付け工法のひとつである湿式方式では, プラントで練り混ぜられたコンクリートを切羽付近までアジテータ車で運搬し, 吹付け機に移し替え, 圧縮空気やポンプで配管内を搬送した後, ノズル手前において別系統で空気搬送されてきた急結剤を添加し, 壁面に吹き付けられる。

岩盤などに吹き付けられたコンクリートの強度は, 練り混ぜられたコンクリートに用いる材料・配合のほか, 圧縮空気によって搬送されたことによる配合変化, 急結剤の種類・混ざり具合・添加率, ノズルと吹付け面の距離, 吹付け角度や圧力などの施工条件や地山条件など様々な要因が影響することが知られている<sup>1)2)</sup>。

著者らは東京大学と民間 17 社との共同研究により山岳トンネルを対象として, 物理特性及び施工性, 耐久性の点において高品質で合理的な支保設計ができる吹付けコンクリートの技術開発を進めてきている。本報告は, 実際のトンネル現場で吹付け距離や圧送空気流量などを要因として吹付け実験を行い, 練混ぜコンクリートの強度とパネル型枠の強度, 岩盤吹付け後の

強度の関係などについて報告するものである。

## 2. 実験概要

## 2.1 実験実施トンネルの概要

吹付け実験を実施したトンネルは上信越自動車道五里ヶ峯トンネル(二期線工事, 西工事)である。トンネルの掘削は発破による補助ベンチ付全断面掘削工法であり, 実験実施区間の支保パターンは, 図 - 1 に示す C1 パターン(吹付けコンクリートの設計厚さ 100mm)であった。

## 2.2 実験要因と水準の組合せ

表 - 1 に実験の要因と水準の組合せを示す。吹付け実験の要因はノズルから吹付け面までの距離と圧送空気の流量であり, 圧送空気流量の開放は空気バルブの開放状態, 下限は圧送限界までバルブを絞った状態とした。ノズルと吹付け面までの距離は実験ケースごとにスタッフによって検尺した。高強度配合を使用した実験ケース(実験 No.O-2.5-H)も採用した。なお, 本工事の標準的な施工方法は吹付け距離約 2.5m, 圧送空気流量: 開放(実験 No.O-2.5)である。

## 2.3 コンクリートの配合及び使用材料

表 - 2 にコンクリートの配合と使用材料を示す。配合は単位セメント量を  $360\text{kg/m}^3$ (C-360)

\*1 鹿島建設(株) 技術研究所土木技術研究部 (正会員)

\*2 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所土木材工研究室 工修 (正会員)

\*3 電気化学工業(株) セメント特殊混和材研究所 工修 (正会員)

\*4 東京大学 生産技術研究所都市基盤安全工学国際研究センター 教授 工博 (正会員)

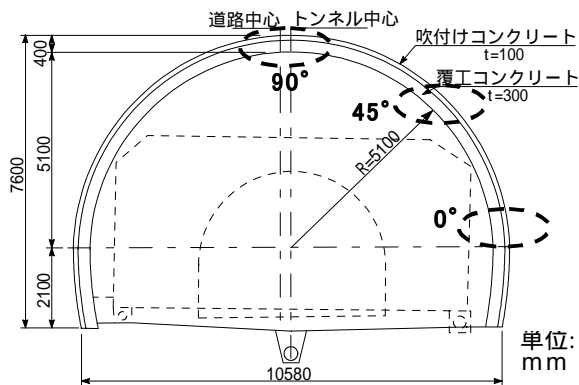


図 - 1 トンネルの標準断面図とコア採取位置

表 - 1 実験要因と水準の組合せ

実験 No.	吹付け距離 (m)	圧送空気流量 (m <sup>3</sup> /min)	単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	トンネルからのコア採取位置
O-1	1	開放	360	90°
O-2	2			0° ,45° ,90°
O-2.5	2.5			
O-3	3			
C-1	1	下限	450	90°
C-2	2			
C-3	3			
O-2.5-H	2.5	開放	450	0° ,45° ,90°

表 - 2 コンクリートの配合及び使用材料

記号	粗骨材の最大寸法 Gmax (mm)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	高性能減水剤 C×%	空気量調整剤 C×%	急結剤 C×%
C-360	15	17	2.0	60.3	60.4	217	360	1007	686	0.5~1.6	0.01~0.02	7
C-450	15	21	2.0	45.0	59.5	203	450	970	685	1.8~1.9	0.01	5

セメント: 普通ポルトランドセメント, 密度: 3.15g/cm<sup>3</sup>

細骨材: 長野県松代産陸砂, 密度: 2.59g/cm<sup>3</sup>

粗骨材: 長野県松代産6号砕石, 密度: 2.69g/cm<sup>3</sup>

高性能減水剤: ポリグリコールエステル誘導体

空気量調整剤: ポリアルキレングリコール誘導体

急結剤: 粉体, カルシウムアルミネート系, 密度: 2.57g/cm<sup>3</sup>

と 450kg/m<sup>3</sup> (C-450) とした 2 種類であり, C-360 の配合ではコンクリートの吐出量が安定し, 急結剤添加率が一定になるようにスランプ 17cm を目標とした。また, 圧縮強度の目標値 (材齢 28 日で 18N/mm<sup>2</sup>) を満足するため, 単位水量を減じる目的で高性能減水剤を使用した。

#### 2.4 吹付けシステム

吹付けシステムは図 - 2 に示す実際の工事に使用している湿式方式で, 吹付け機はポンプ圧送式である。

#### 2.5 試験項目

表 - 3 にフレッシュ及び硬化コンクリートについて実施した試験項目を示す。同表のほか, 吹付け時の施工性を評価するため 配管内圧力, 空気流量, 急結剤の実添加率, リバウンド率, 粉じん量を測定した。

長期強度試験は急結剤を添加する前の練混ぜコンクリート (以下ベースと略記), パネル型枠に吹き付けたコンクリート (以下コア箱と略記)

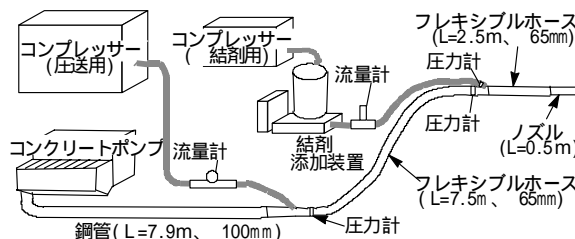


図 - 2 吹付けシステムの概要

と岩盤に吹き付けたコンクリートについて実施した。岩盤に吹き付けたコンクリートからのコア採取部位は水平部 (コア 0° と略記), 天端部 (コア 90°) とその中間 (コア 45°) であり, それぞれ直径 1m 程度の範囲を対象とし (図 - 1), コア供試体の長さが 150mm (75mm) 確保できる部位から材齢 7~10 日において採取した。

コア箱及びモールドは材齢 2 日まで坑内のむしろ中 (温度 20~26 , 湿度約 99%RH) で養生し, コア箱は材齢 2 日でコア採取を行った後, 材齢 3 日から標準水中養生を行った。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 フレッシュコンクリート

表 - 4 にフレッシュコンクリートの試験結果を示す。空気量は 1.5 ~ 2.6% の範囲にあったが、スランブは一部の試験条件（実験 No.O-2 及び O-2.5）では目標スランブの範囲（ $17 \pm 2.5$ cm）に対して小さかった。このスランブが小さかった試験条件では、コンクリートの吐出量が低下し、急結剤の実添加率が増加する結果であった。

表 - 3 試験項目

試験項目	摘要	
フレッシュ	スランブ	JIS A 1101に準拠
	空気量	JIS A 1128に準拠
	温度	棒状温度計による
硬化コンクリート	初期強度	プルアウト: JSCE G561に準拠 材齢3, 24時間にて実施, 各3本 空気圧ピン貫入法: 文献 <sup>3)</sup> による 材齢3, 24時間にて実施, 各12本, プルアウト終了後のコンクリートにて実施
	長期強度	ベースコンクリート: JIS A 1108に準拠 $\phi 100 \times h200$ mm, 材齢7, 28日, 各3本 コア箱: JSCE F561, JIS A 1107に準拠 $\phi 75 \times h150$ mm, 材齢7, 28日, 各4本 壁面コア: JIS A 1107に準拠 $\phi 75 \times h150$ mm, 材齢28日, 各4本
	静弾性係数	JSCE G502に準拠, コンプレッソメータ法 圧縮強度試験時に実施, 材齢28日
	空隙率	ASTM C642に準拠, 煮沸法による ベース, コアとも材齢28日, 各3本

#### 3.2 初期強度

図 - 3 に初期強度試験の結果から算定した推定圧縮強度を、図 - 4 に空気圧ピン貫入法とプルアウト法の両試験結果を対比して示す。

図 - 3 から、材齢 3 時間における推定圧縮強度は 1.5 ~ 3.5 N/mm<sup>2</sup> であり、材齢 24 時間ではいずれも 13 N/mm<sup>2</sup> 以上に達し、十分な初期強度に発現していることが分かる。また、急結剤の実添加率が大きかった試験 No.O-2 及び O-2.5 では初期強度が大きくなっていると思われる、このことを勘案すると、吹付け距離の影響はほとんど見られないこと、高強度配合（C-450）の初期強度は普通配合（C-360）よりも大きいこと、などが分かる。

空気ピン貫入法による推定圧縮強度は、円柱供試体の強度に一致するような換算式を用いてピンの貫入深さから求めているが<sup>3)</sup>、今回の実験においては図 - 4 に示すようにプルアウト法の推定圧縮強度とほぼ 1:1 の対応が認められた。

#### 3.3 長期強度, 単位容積質量

表 - 5 に長期材齢における硬化コンクリート

表 - 4 フレッシュコンクリートに関する試験結果

実験 No.	吹付け距離 (m)	圧送空気量 (m <sup>3</sup> /min)	目標吐出量 (m <sup>3</sup> /h)	目標急結剤添加率 (C×%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	実吐出量 (m <sup>3</sup> /h)	急結剤実添加率 (C×%)		
O-1	1	開放	16	7.0	20.5	1.5	24.5	16.5	7.4		
O-2	2				14.5	2.6	24.0	14.5	9.7		
O-2.5	2.5				13.5	2.6	26.0	12.0	10.3		
O-3	3				17.0	2.1	23.5	16.3	8.2		
C-1	1				下限	5.0	20.0	2.1	21.0	17.4	8.2
C-2	2						19.5	2.4	20.5	16.9	8.0
C-3	3						19.5	2.1	20.5	16.5	6.7
O-2.5-H	2.5						開放	23.5	2.2	26.5	16.0

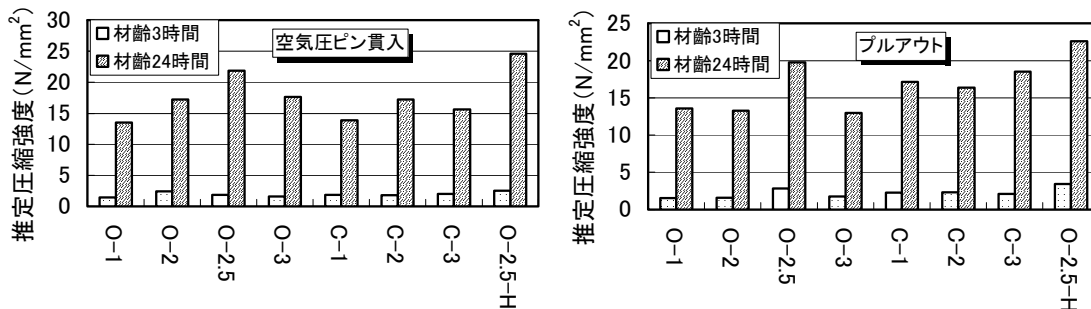


図 - 3 初期強度試験結果

の物性試験結果を示す。なお、同表中のベース比は練混ぜコンクリートから採取した供試体の材齢 28 日における試験値を基準（100%）とした場合の比率であり、コア箱比は同様にパネル型枠から採取したコア供試体を基準とした値を示している。

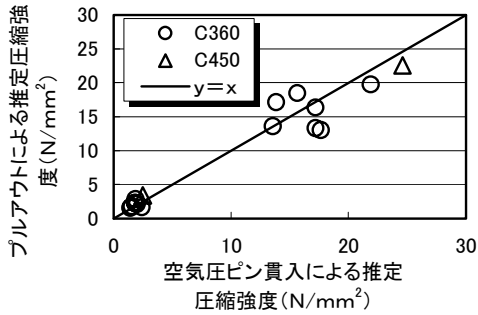


図 - 4 初期強度試験結果の比較

図 - 5(a), (b) に材齢 28 日の圧縮強度試験結果を、図 - 6(a), (b) に材齢 28 日の圧縮強度に対するベース比を、図 - 7 に吹き付けたトンネル部位のコア強度に対するコア箱比、図 - 8 に単位容積質量のコア箱比の関係を示す。

図 - 5(a), (b) は同一配合の実験であり、ベースコンクリートの材齢 28 日の圧縮強度は 36 ~ 40N/mm<sup>2</sup> とほぼ同様な値になっているが、吹き付けた後の圧縮強度は圧送空気流量によらず 18 ~ 24N/mm<sup>2</sup> 程度にまで減少している。また、急結剤の添加率が増加した（過添加の場合）、長期材齢の圧縮強度ベース比が低下することが報告されているが<sup>4)</sup>、今回の実験の範囲（0-2.5）では大きな低下傾向は認められなかった。

図 - 6(a), (b) から圧縮強度のベース比は圧

表 - 5 長期材齢における硬化コンクリートの物性試験結果

実験 No.	吹付け距離 (m)	圧送空気量 (m <sup>3</sup> /min)	項目	ベース材齢28日			コア箱材齢28日			0° コア材齢28日			45° コア材齢28日			90° コア材齢28日		
				単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )
O-1	1		平均	2324	37.2	2.6	2276	18.8	1.72	-	-	-	-	-	-	2254	20.1	2.11
			ベース比(%)	100	100	100	97.9	50.5	66.2	-	-	-	-	-	-	97.0	54.0	81.2
			コア箱比(%)	-	-	-	100	100	100	-	-	-	-	-	-	99.0	106.9	122.7
O-2	2		平均	2281	39.7	2.59	2275	24.2	2.27	2255	25.4	2.28	2251	25.0	2.26	2226	19.2	1.9
			ベース比(%)	100	100	100	99.7	61.0	87.6	98.9	64.0	88.0	98.7	63.0	87.3	97.6	48.4	73.4
			コア箱比(%)	-	-	-	100	100	100	99.1	105.0	100.4	98.9	103.3	99.6	97.8	79.3	83.7
O-2.5	2.5		平均	2293	37.3	3.27	2228	22.6	2.12	2238	25.8	2.15	2234	23.9	2.03	2200	22.6	2.01
			ベース比(%)	100	100	100	97.2	60.6	64.8	97.6	69.2	65.7	97.4	64.1	62.1	95.9	60.6	61.5
			コア箱比(%)	-	-	-	100	100	100	100.4	114.2	101.4	100.3	105.8	95.8	98.7	100.0	94.8
O-3	3		平均	2320	35.8	2.57	2306	23.4	2.5	-	-	-	-	-	-	2251	19.3	2.07
			ベース比(%)	100	100	100	99.4	65.4	97.3	-	-	-	-	-	-	97.0	53.9	80.5
			コア箱比(%)	-	-	-	100	100	100	-	-	-	-	-	-	97.6	82.5	82.8
C-1	1		平均	2322	36.6	2.61	2253	21.6	2.18	-	-	-	-	-	-	2221	19.4	1.99
			ベース比(%)	100	100	100	97.0	59.0	83.5	-	-	-	-	-	-	95.7	53.0	76.2
			コア箱比(%)	-	-	-	100	100	100	-	-	-	-	-	-	98.6	89.8	91.3
C-2	2	下限	平均	2310	36.6	2.47	2282	23.4	2.22	-	-	-	-	-	-	2235	18.0	2.23
			ベース比(%)	100	100	100	98.8	63.9	89.9	-	-	-	-	-	-	96.8	49.2	90.3
			コア箱比(%)	-	-	-	100	100	100	-	-	-	-	-	-	97.9	76.9	100.5
C-3	3		平均	2327	35.7	2.58	2279	24.3	2.19	-	-	-	-	-	-	2246	22.0	2.03
			ベース比(%)	100	100	100	97.9	68.1	84.9	-	-	-	-	-	-	96.5	61.6	78.7
			コア箱比(%)	-	-	-	100	100	100	-	-	-	-	-	-	98.6	90.5	92.7
O-2.5-H	2.5	開放	平均	2346	54.8	2.99	2264	32.1	2.38	2273	32.1	2.35	2241	30.2	2.22	2248	24.5	2.18
			ベース比(%)	100	100	100	96.5	58.6	79.6	96.9	58.6	78.6	95.5	55.1	74.2	95.8	44.7	72.9
			コア箱比(%)	-	-	-	100	100	100	100.4	100.0	98.7	99.0	94.1	93.3	99.3	76.3	91.6

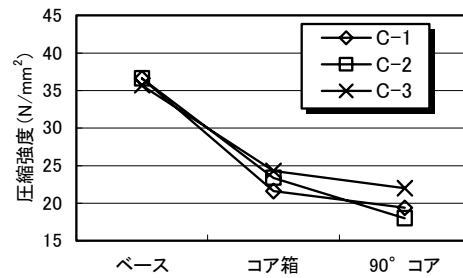
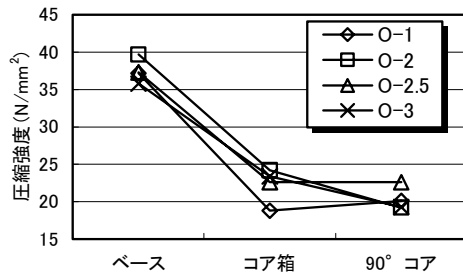


図 - 5(a) 材齢 28 日圧縮強度(圧送空気流量:開放) 図 - 5(b) 同 左(圧送空気流量:下限)

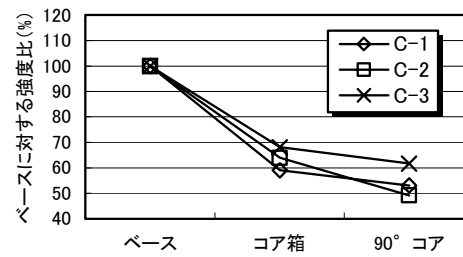
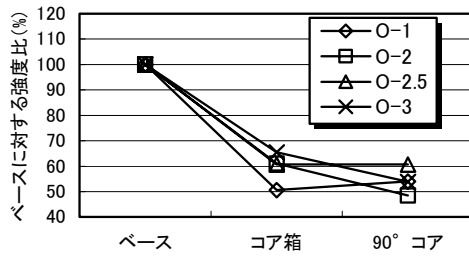


図 - 6(a) 圧縮強度ベース比(圧送空気流量:開放) 図 - 6(b) 同 左(圧送空気流量:下限)

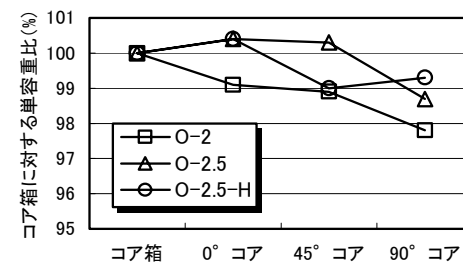
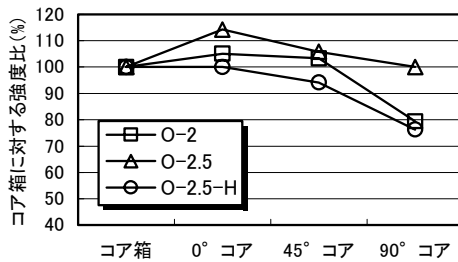


図 - 7 コア採取部位ごとのコア箱比(圧縮強度)

図 - 8 同 左 (単位容積重量)

送空気流量にかかわらずコア箱で約 50 ~ 70%, 90° コアで約 50 ~ 60% の範囲にあることが分かる。また、吹付け距離が 1m の場合にはコア箱の圧縮強度が低下する傾向が認められるが、ノズル先端が移動できず、強すぎる吹付け力が吹き付けられた直後のコンクリートを押しわけ、吹付け圧による締固め効果が期待できなかった影響と思われた。

図 - 7 から、コア採取部位に関するコア箱強度比は 0° コア > 45° コア > 90° コアの順に小さく、天端付近に吹き付けることによる強度低下(コア箱に対して 80% 程度)が認められる。これは、天端に近いほど吹き付けられた直後の硬化が不十分な段階で自重が作用するためと考え

られ、既往の研究成果にも示されているように<sup>5)</sup>、実トンネルに吹き付けられたコンクリートの最低強度は天端部であることが確認された。この傾向は図 - 8 に示す単位容積質量のコア箱比によっても確認される。

また、コア箱とほぼ同様な吹付け条件である 0° コアの強度比はいずれも 100% を超えており、合板より剛性の高い岩盤の方が吹付け時のたわみによる圧力の吸収が生じにくいいため、吹付け圧がより有効に締固め圧として作用し、圧縮強度の面で有利になったためと思われ、吹付けコンクリートの圧縮強度は地山特性の影響を受けると考えられた。

上記のことから、吹き付けられた後のコンク

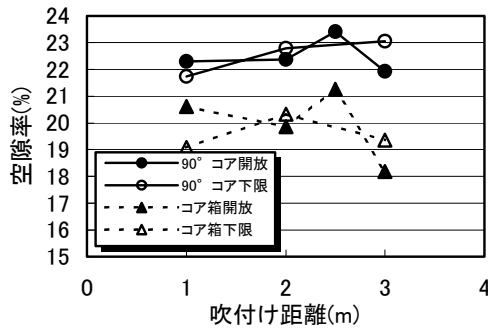


図 - 9 吹付け距離と空隙率の関係(普通強度)

リートの圧縮強度が設計で要求される場合，この吹付け作業による強度低減率(吹付け強度低減率と略記，本実験では 50～60%)を今後広範に把握し，この低減率で除した圧縮強度を練混ぜコンクリートの目標強度とすることで合理的な支保を設計する必要があると考えられた。

### 3.4 空隙率

図 - 9 に吹付け距離と空隙率の関係を，図 - 10 に空隙率とコアの圧縮強度との関係を示す。

ベースコンクリートの空隙率が 16～19%であったことから，図 - 9 より空隙率はベース<コア箱<90°コアの順であることが分かり，また，圧送空気流量開放の場合には吹付け距離が 3m の方が(2.5m は急結剤が過添加のため除外)，下限の場合には 1m の方が空隙率が小さい傾向にあることが分かる。

図 - 10 から，ばらつきは大きいですが，空隙率の増加に伴って圧縮強度が低下する傾向が見られ，吹付けコンクリートの強度には空隙率と急結剤添加率が大きく影響するとの既往の研究成果<sup>6)</sup>とほぼ同様な傾向が見られた。

## 4. まとめ

実際のトンネルにおいて吹付け実験を行った結果，以下の点が明らかになった。

- (1) 初期強度試験において，空気圧ピン貫入法とプルアウト法による推定圧縮強度はほぼ 1:1 の関係が認められた。
- (2) 吹付けコンクリートの圧縮強度は水平部より天端部の方が小さく，水平部ではパネル型

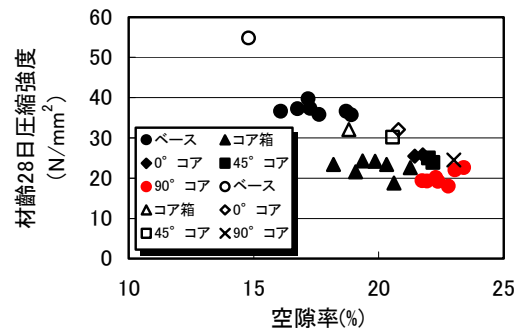


図 - 10 空隙率と圧縮強度の関係(白:高強度)

枠より大きいですが，天端部ではパネル型枠に対して 80%程度の圧縮強度であった。

- (3) 吹付け作業によって圧縮強度は低下し，天端付近の吹付け強度低減率は練混ぜコンクリート強度に対して 50～60%であった。

## 謝辞

今回，現場において吹付け実験を行うに当たり，ご理解とご協力を頂戴しました日本道路公団東京建設局 佐久工事事務所ならびに五里ヶ峯トンネル西作業所 前田建設工業・本間組共同企業体の皆様には深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) 土木学会：トンネルコンクリート施工指針(案)，コンクリートライブラリー102，2000.7
- 2) 石関嘉一ほか：吹付けコンクリートの高品質化技術の開発，コンクリート工学，Vol.39，No.10，pp.25-33，2001.10
- 3) 岩城圭介ほか：空気圧を用いたピン貫入試験による吹付けコンクリートの強度管理方法の提案，土木学会論文集，No.644，-46，pp.99-112，2000.3
- 4) 平間昭信ほか：使用材料が吹付けコンクリートの強度特性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.1381-1386，2000.6
- 5) 安藤慎一郎ほか：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，コンクリート工学年次論文集 Vol.21，No.2，pp.1351-1356，1999.6
- 6) 魚本健人：吹付けコンクリートの特性と技術の現状，コンクリート工学，Vol.37，No.8，pp.3-13，1999.8