

論文 短時間高強度吹付けコンクリートの基礎的性状

栗田 守朗^{*1}・石田 積^{*2}・岩崎 昌浩^{*3}・藤野 晃^{*4}

要旨：トンネル掘削における地山支保性能の向上や掘削工程の短縮などを目的に，既往の吹付けコンクリートよりも特に，初期材齢における強度向上を図るために，実験的な検討を行った。セメントの種類と量，ベースコンクリートに添加する高強度混和材の量などの影響を室内モルタル試験で検討し，さらにコンクリート吹付け試験において材齢 10 分からの強度発現性を評価し，材齢 3 時間で 18 N/mm^2 程度の圧縮強度が実施工に近い規模で得られることを確認した。

キーワード：吹付けコンクリート，モルタル，高強度，ヤング係数

1. はじめに

吹付けコンクリートは，山岳トンネルの標準工法の一次支保部材としてさまざまな研究開発がなされ，数多くの施工実績が得られている。吹き付けられたコンクリートの品質は，コンクリートに使用される材料・配合，施工状況などの多くの因子の影響を受けることが経験的に知られており，近年，これらの影響因子を定量的に評価するとともに，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に関する開発がなされている^{例え¹}。また，2002 年にコンクリート標準示方書が性能照査型に改訂されたのを受け，吹付けコンクリート全般を対象とした性能照査型指針が出版された²。一方，施工速度の向上，建設コストの縮減という要求を受け，鋼製支保工の省略や吹付け厚さの低減をめざし，吹付け直後の初期材齢 10 分で 3 N/mm^2 以上の強度発現を目的とした高性能初期強度吹付けコンクリートの開発もなされている³。

吹付け直後の初期材齢における強度向上を図ることは，例えば軟岩地山のトンネル掘削作業において，鋼製支保工建て込みを施工サイクルから省略し，鋼製支保工建て込み作業時におけ

る岩盤や吹付けコンクリートのはく離・落下による労働災害の防止，あわせて掘削サイクルの短縮によるトンネル掘進速度の大幅な向上が期待できる。また，大きな地圧を受ける軟岩地盤で深度数百メートル以上の地下トンネルなどを経済的にかつ安全に構築することも可能となると考えられる。

本論文は，大深度の軟岩質地盤に設置する施設を経済的（高速掘進）に構築するために必要とされる値である材齢 3 時間で 18 N/mm^2 程度を目標とし，既往の高性能初期高強度吹付けコンクリート技術をもとに，さらに初期材齢の強度向上を目的に，セメントの種類と量，ベースコンクリートに添加する高強度混和材の量，超急硬性セメント鉱物が主成分の急結剤の量などを要因として実験的な検討を行い，更に，模擬トンネルにおける吹付け実験を行った結果について報告するものである。

2. 実験概要

2.1 実験の種類

(1) 室内モルタル試験

吹付けコンクリートに要求される強度を満足

*1 清水建設（株）技術研究所 グループ長 博（工）（正会員）

*2 電気化学工業（株）無機材料研究センター 博（学）（正会員）

*3 電気化学工業（株）無機材料研究センター

*4 清水建設（株）北陸支店

する配合の目安を得る目的で、モルタルを用いて試験を実施した。水粉体比、セメント量、高強度混和材量などを要因として、材齢3時間から材齢12時間までの初期材齢における圧縮強度を試験した。

(2) 模擬トンネル吹付け試験

コンクリート吹付け試験は、幅5.5m、高さ4.5m、長さ20mの模擬トンネルを用いて、ほぼ実施工に近い規模で試験を実施した。

吹付け試験ではプルアウト試験およびコア供試体による圧縮強度試験を実施し、材齢10分から材齢180日までの強度性状と材齢3時間以降のヤング係数を試験した。

2.2 使用材料と配合

表-1に試験で用いた材料を示す。セメント(C)は普通ポルトランドセメント(N)と早強ポルトランドセメント(H)を用いた。骨材は近隣で入手可能な細骨材(S)と粗骨材(G)を用いた。エトリンガイトを生成する高強度混和材と超急硬性セメント鉱物が主成分の初期高強度用の粉体急結剤を用いた。又、低い水粉体比における作業性を確保するため高性能減水剤を用いた。

表-2にモルタル試験における配合を示す。モルタルの配合はコンクリートから粗骨材を除いた材料配合で設定した。単位セメント量は360,400,450,500,550kg/m³の5水準とし、
 の添加率は単位セメント量の18.1%とし、更に550kg/m³の配合では添加量が強度に及ぼす影響を検討した。単位水量はコンクリートの作業性を確保する観点からセメント量450kg/m³以下では213kg/m³とし、500kg/m³では207kg/m³、550kg/m³では185kg/m³とし、高性能減水剤の使用量を調整し、作業性を確保した。急結剤は既往の高性能初期強度吹付けコンクリート³⁾に基

表 - 1 使用材料

名前(記号)	仕様	密度 (g/cm ³)
セメント(C)	普通ポルトランドセメント	3.15
	早強ポルトランドセメント	3.13
高強度混和材 ()	エトリンガイト系混和材	2.53
細骨材 (S)	新潟県姫川砂	2.62
粗骨材 (G)	新潟県姫川産6号砕石	2.66
高性能減水剤 (SP)	ポリエチレングリコール系	
急結剤	超急硬性セメント鉱物	2.80

表 - 2 モルタル試験における検討配合

W/(C+) (%)	配合単位数 (kg/m ³)						急結剤 C× (%)
	W	C		S	(G)	SP	
50	213	360	65.1	1017	(688)	1.8	12
45	213	400	72.4	992	(671)	4	12
40	213	450	81.4	961	(651)	9	12
35	207	500	90.5	940	(636)	15	12
28.5	185	550	99.5	943	(638)	22	12
29.5	185	550	77.0	957	(648)	21	9
30.5	185	550	55.0	972	(658)	20	7

表 - 4 吹付け試験の使用機械

機械種類	仕様
吹付けロボット	伸縮ストローク：2.0m 吹付け面半径：5.7m
急結剤添加機	タンク容量：280リットル 圧送能力：1～8kg/min
コンクリート搬送機	ピストンポンプ式 最大吐出量25m ³ /hr
	圧縮空気搬送式 最大吐出量21m ³ /hr
コンプレッサ	100PS級エンジン式×2台 空気量10m ³ /min

表 - 3 吹付け試験におけるコンクリートの配合

スランブ (cm)	s/a (%)	W/(C+) (%)	単位数 (kg/m ³)						急結剤 C× (%)
			W	C		S	G	SP	
20～25	60	28.5	185	550	100	943	638	22.0	12

づき 12%とし， 添加量を減らした条件では比例して急結剤の添加量を減らした。表 - 3 に吹付け試験における早強ポルトランドセメントを用いた場合のコンクリートの配合を示す。吹付け試験ではモルタル試験で得られた結果を参考にし，短時間でより高強度が得られるセメント量 $550\text{kg}/\text{m}^3$ の配合を選定した。配合の算出に際しては，空気量は 0%とした。また，試験時期を変え，コンクリート温度 20 と 30 で比較した。セメントの種類や練上り温度が異なった場合は，上記配合を修正し，試験に供した。

2.3 吹付け設備および吹付け方法

表 - 4 に吹付け試験に用いた機械設備を示す。コンクリートの搬送にはピストンポンプ式と圧縮空気搬送式の両方で実施した。

2.4 試験項目および試験方法

モルタル試験用試験体は，練り混ぜたモルタルに急結剤を添加し，直ちに $4 \times 4 \times 16\text{cm}$ の型枠に詰めて作製した。モルタル試験体の養生は試験材齢まで湿潤条件とし，圧縮強度試験は，温度 20 ，湿度 80%で実施した。

表 - 5 にコンクリート吹付け試験における試験項目と試験方法の一覧を示す。試験はフレッシュコンクリートの性状を確認した後に吹付けを開始し，吹付け作業中に強度評価用のプルアウト板を採取した。プルアウト試験は材齢 10 分，1 時間，3 時間で実施した。また，材齢 3 時間以降では，コア供試体による強度試験も実施した。なお，プルアウト試験で得られた引抜き強度は，既往の方法⁴⁾を用いて圧縮強度に換算した。

3. 試験結果および考察

3.1 室内モルタル試験

表 - 6 に，水粉体比別に早強ポルトランドセメントと普通ポルトランドセメントの初期強度の結果を示す。図 - 1 に早強ポルトランドセメントを用いた場合の水粉体比と圧縮強度との関係を，

表 - 5 吹付け試験における試験項目と方法

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101 準拠
空気量	JIS A 1128 準拠
温度	棒状温度計にて測定
プルアウト法による推定圧縮強度	JSCE-G 561 準拠 材齢：10 分，1，3 時間 養生：現場湿潤 推定圧縮強度 = 引抜き強度 \times 4 (換算係数)
コア供試体の圧縮強度，ヤング係数	JSCE-F 552，JSCE-F 561，JIS A 1108 準拠 材齢：3 時間以降 標準水中養生 試験体寸法： $\bar{\vee}$ -コンクリート $100 \times 200\text{mm}$ ， 吹付けコンクリート(コア供試体) $55 \times 110\text{mm}$

表 - 6 モルタル試験体の初期強度 (N/mm^2)

W/(C+) (%)	3 時間		8 時間		12 時間	
	HPC	NPC	HPC	NPC	HPC	NPC
50	7.3	5.9	9.7	7.0	14.3	9.1
45	8.1	6.9	10.0	8.7	15.5	10.8
40	10.4	10.0	13.0	10.7	20.2	13.3
35	14.0	14.1	15.9	15.3	24.0	17.9
28.5	22.4	20.5	24.5	22.2	25.4	23.8
29.5	16.3	-	17.1	-	20.0	-
30.5	12.8	-	13.0	-	15.4	-

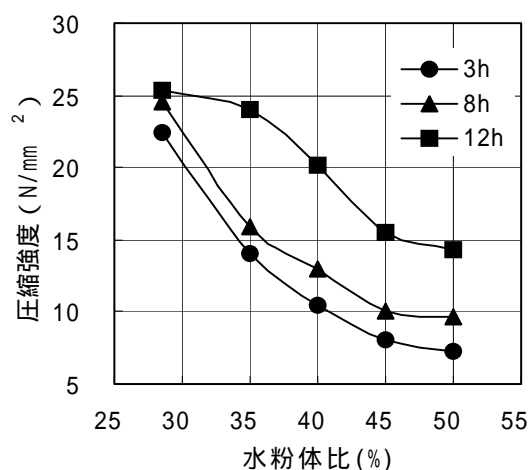


図 - 1 水粉体比とモルタル強度 (早強ポルトランドセメント)

図 - 2 に普通ポルトランドセメントを用いた場合の水粉体比と圧縮強度との関係を示す。早強ポルトランドセメントを用いた場合，水粉体比 30%以下で材齢 3 時間で $20\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の高い

強度が得られており，水粉体比の増大に伴い強度は低下する。強度発現性状は，材齢 3 時間から 8 時間の間に大きな強度増加がなく，水粉体比 28.5%の場合を除いて，材齢 8 時間から 12 時間の間で強度の増加が大きい。一方，普通ポルトランドセメントの場合は，水粉体比 28.5%で材齢 3 時間で 20N/mm^2 以上の高い強度が得られるが，材齢 8 時間から 12 時間にかけての強度の増加が認められない。普通ポルトランドセメントでは材齢 12 時間程度までの強度発現が急結剤による効果が主であるのに対し，早強ポルトランドセメントでは材齢 12 時間より早い時期にセメントの水和反応が強度発現に影響を及ぼしていると考えられる。早強ポルトランドセメントはセメント中のエアライト成分が普通ポルトランドセメントに比べて 15%程度多く，そのエアライトは材齢 4 時間から 20 時間にかけて水和が活発になることが知られている。今回使用した急結剤と高強度混和材にはエトリンガイトを生成するためにカルシウムアルミネートやサルフェイトを配合しているが，これらの成分にセメントのエアライトの水和を阻害する要因は認められず，特にエアライト成分の多い早強ポルトランドセメントで材齢 12 時間より早い時期に強度が増進したものと考えられる。

図 - 3 にセメント量一定の場合における 添加率と圧縮強度との関係を示す。いずれの材齢においても 添加率の増加にともない，圧縮強度が増加している。添加率が短時間の強度発現性に大きく寄与していることを示している。

3.2 模擬トンネル吹付け試験

表 - 7 に吹付け試験に用いたベースコンクリ

表 - 7 ベースコンクリートの性状

条件	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 ()	外気温 ()
H-30	23.0	5.2	28.0	26
H-20	23.0	6.2	19.5	20
N-30	22.5	5.5	30.5	26
N-20	23.5	6.4	22.5	20

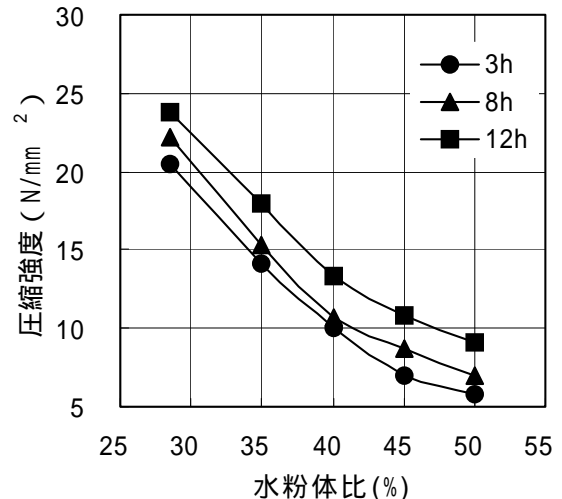


図 - 2 水粉体比とモルタル強度 (普通ポルトランドセメント)

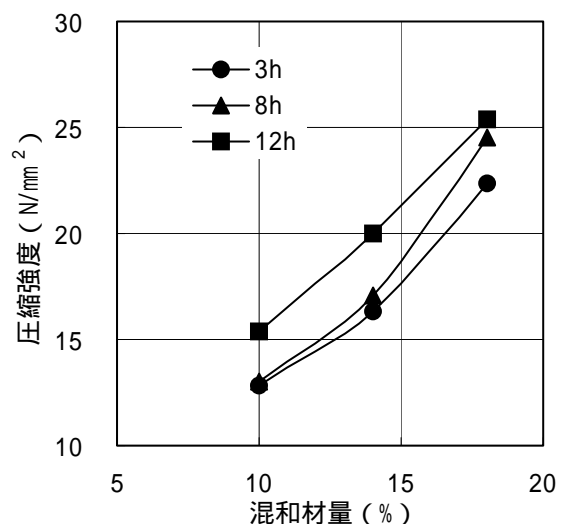


図 - 3 混和材の量と短時間強度 (早強ポルトランドセメント)



写真 - 1 模擬トンネルでの吹付け状況

ートのフレッシュ性状を示す。粉体量が多いため粘性が高いが、スランプは23cm程度、空気量は5~6%とほぼ同等なフレッシュ性状を有するベースコンクリートが製造できた。また、4配合とも良好な吹付けの作業性を有していた。写真-1に模擬トンネルにおけるコンクリート吹付け試験の状況を示す。

表-8にコンクリート吹付け試験で得られた初期の短時間から長期材齢までの圧縮強度、および急結剤を加えないベースコンクリートの材齢28日の圧縮強度を示す。

図-4に初期から長期材齢の強度結果をセメント別、コンクリート温度別に示す。圧縮強度発現性状は、材齢3時間から材齢28日にかけて急激に強度の増加が認められ、材齢3ヶ月以降の強度の伸びは小さく、ほぼ横ばいであった。材齢28日では60 N/mm²程度以上の圧縮強度が得られた。今回の試験ではモルタル試験で差が認められた材齢12時間前後を測定していないが、セメント種類による強度発現性に大きな違いは認められなかった。

図-5に材齢3時間までの初期材齢におけるブルアウト試験結果(推定圧縮強度)を示す。材齢10分においては、早強ポルトランドセメント20の測定結果が抜けているが、ほかの条件では10N/mm²以上の高い強度が得られた。材齢10分から材齢1時間の間に若干の強度の増加が認められるが、材齢1時間から材齢3時間にかけての強度増加はほとんどなく、初期の強度発現は急結剤を加えてから1時間以内にほぼ完了し

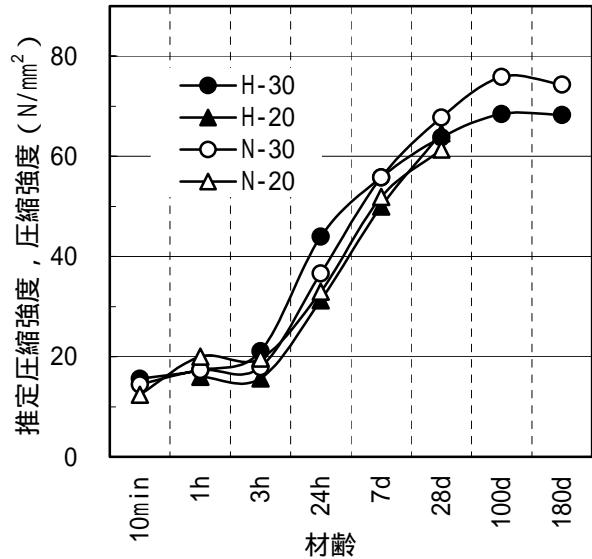


図-4 吹付けコンクリートの材齢と強度

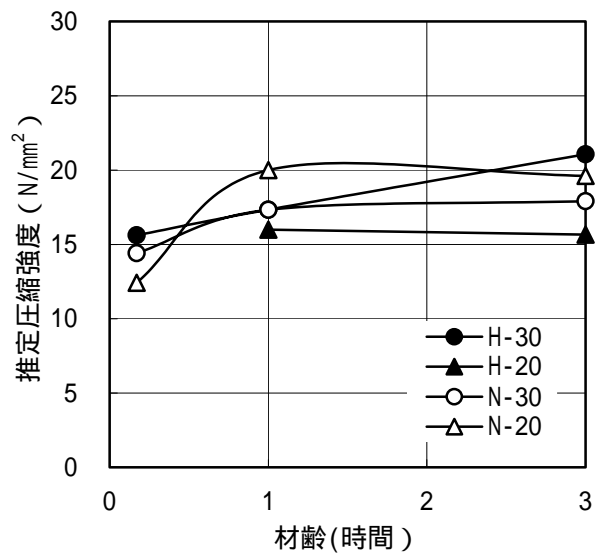


図-5 初期材齢と強度

表-8 吹付けコンクリートの強度発現性状(N/mm²)

条件	ブルアウト法による 推定圧縮強度			コア試験体						ベース 試験体
	10分	1時間	3時間	3時間	1日	7日	28日	100日	180日	28日
H-30	15.6	17.3	21.1	19.5	44.0	55.8	63.8	68.4	68.3	83.3
H-20		16.0	15.7	15.3	31.2	50.0	64.6	-	-	79.1
N-30	14.4	17.3	17.9	15.3	36.7	55.8	67.8	75.9	74.4	50.0
N-20	12.4	20.0	19.6	17.8	33.0	51.9	61.4	-	-	63.4

ていると判断できる。今回の試験で得られた材齢3時間における圧縮強度は15~21 N/mm²程度であり、目標とする圧縮強度に近い結果が得られたと考えられる。急結剤を添加したセメントの急結剤を添加したセメントの水和機構や水和反応、水和生成物については未知な点が多いため、今回のような短時間で高い強度発現する材料や配合の強度発現のメカニズムは今後の検討すべき課題であると考えられる。

表-9に吹付けコンクリートの各材齢におけるヤング係数を、図-6にそのヤング係数と圧縮強度との関係を示す。材齢3時間以降の測定結果であるが、圧縮強度とヤング係数には高い相関が認められ、とくにセメント種類や温度による影響は認められなかった。

なお、吹付け試験ではピストンポンプ式と圧縮空気搬送式の両方で実施した。搬送方式が異なることによる強度発現性などに顕著な違いは認められなかった。一方、配管内におけるコンクリートの付着は両者とも認められたが、ピストンポンプ式のほうが若干多い傾向であった。今回の結果を参考にし、今後は、地山への付着、跳ね返りなどの施工性も含めて引き続き検討する予定である。

4. まとめ

トンネル掘削における地山支保性能の向上や掘削工程の短縮などを目的に、既往の吹付けコンクリートよりも特に、初期材齢における強度向上を図るために、実験的な検討を行った。本実験の範囲で得られた知見を以下に示す。

(1) 初期材齢の強度を上げるため、セメントの種類と量、ベースコンクリートに添加する高強度混和材の量、超急硬性セメント鉱物が主成分の急結剤の使用量などの影響を検討した結果、セメント量と高強度混和材量の増加および水粉体比の低減が初期の強度増進に効果があることが明らかとなった。

(2) 模擬トンネルにおいてコンクリート吹付け試験を実施し、材齢10分で10N/mm²以上、材齢

表-9 吹付けコンクリートの各材齢とヤング係数(kN/mm²)

条件	3時間	1日	7日	28日	100日
H-30	19.3	24.6	26.4	28.6	28.9
H-20	17.9	20.1	25.8	28.0	-
N-30	16.7	26.1	30.2	32.6	34.8
N-20	18.5	21.8	28.5	29.4	-

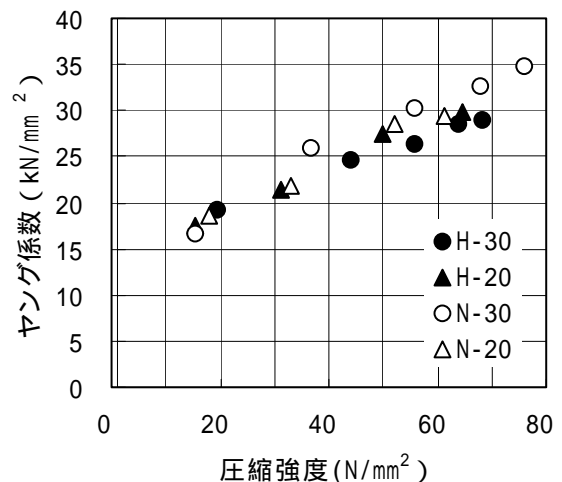


図-6 ヤング係数と圧縮強度

3時間で18 N/mm²程度の圧縮強度が得られることを確認した。また、ヤング係数は材齢3時間で18k N/mm²程度が得られることを確認した。

参考文献

- 1) 細川 佳史, 松浦 誠司, 田中 徹, 魚本 健人: ニューラルネットワークによる吹付けコンクリートの施工最適化システムの構築, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, 2002
- 2) 土木学会: 吹付けコンクリート指針(案)「トンネル編」, コンクリートライブラリー121, 2005.7
- 3) 越智 修, 小澤 勝巳, 吉原 伸行, 石田 積: 高性能初期高強度吹付けコンクリートの開発, トンネル工学研究論文, 第13巻(35), 2003.11
- 4) JHS規格: JHS 702-1992 吹付けコンクリートの初期圧縮強度試験