

報告 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

小林裕二*1・笹川幸男*2・酒井芳文*3・魚本健人*4

要旨：吹付けコンクリートの配合と品質の関係を明確にするための基礎データを得ることを目的に、各種配合要因を変化させた吹付けコンクリートによる吹付け実験を試み、配合条件の違いが硬化した吹付けコンクリートの品質に及ぼす影響について強度および空隙率により調べた。その結果、急結剤添加率、水セメント比、単位セメント量、細骨材率、スランプ、細骨材表面水率、細砂置換率の変化が強度および空隙率に及ぼす影響について1つの系統立てた実験のもとで確認した。

キーワード：吹付けコンクリート、配合条件、圧縮強度、空隙率

1. はじめに

近年、吹付けコンクリートは仮設材だけでなく永久構造部材として使われるようになった。吹付けコンクリートを永久構造物として使用するためには、吹付けコンクリートの配合と品質の関係を定量的に把握する必要がある。しかし、今日まで内外を通じて数多くの研究成果が報告されているにもかかわらず定性的な評価にとどまっており、明確にされているとは言い難い。その理由として、吹付けコンクリートの品質は、その施工方法の特殊性により、実にさまざまな要因により大きく変動するために、一つの変動因子に対する影響を特定することが難しいことが挙げられる。

本報告は、吹付けコンクリートの配合と品質の関係を明確にするための精度のよい基礎データの収集を目的としたもので、吹付機やノズルワーク等の施工条件を可能な限り一定としたうえで、配合の異なるコンクリートの実物規模の吹付け実験を行った結果をとりまとめたものである。本報告では、初期強度発現特性、長期強度発現特性、および空隙特性について報告する。

表-1 使用材料

材料	物 性
セメント	普通ポルトランドセメント 比重=3.16,比表面積=3270cm ² /g
細骨材	川砂(富士川産) 比重=2.63,FM=2.99,吸水率=1.48% 山砂(市原産) 比重=2.57,FM=2.32,吸水率=2.89%
粗骨材	砕石6号(両神産) 比重=2.72,FM=6.58,吸水率=0.77%
混和剤	急結剤:カルシウムアルミネート系, 粉体 減水剤:PEG系高性能減水剤 消泡剤:非イオン系消泡剤

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリート配合

本実験に用いた使用材料を表-1に示す。

細骨材は富士川産の川砂(S1細骨材)と粒度調整用の細砂として市原産の山砂(S2細骨材)の2種類を使用した。骨材の表面水率は細骨材で1~2%,粗骨材で0.5%以下を基準に調整した。混和剤は、急結剤としてセメント鉱物系のカルシウムアルミネートを主成分とする粉体急結剤を使用し、スランプを調整する目的で高性能減水剤としてポリエチレングリコール系の高性能減水剤をまた空気量を調整する目的で消泡剤として非イオン系消泡剤を使用した。

- *1 佐藤工業(株)中央技術研究所土木研究部 (正会員)
- *2 電気化学工業(株)特殊混和材事業部 主事 (正会員)
- *3 (株)青木建設 研究所材料研究室 主任研究員 (正会員)
- *4 東京大学生産技術研究所 教授 (正会員)

表-2 コンクリート配合

配合No.	変動要因	W/C (%)	s/a (%)	細砂置換率 (vol%)	細骨材表面水率 (%)	単位量(kg/m ³)					高性能減水剤 (C×%)	消泡剤 (C×%)	急結剤 (C×%)	
						W	C	S1	S2	G				
1	急結剤	58.6	62	15	0~2	211	360	908	157	677	0	0	7	
2						211		908	157	677	0	0	10	
3						211		908	157	677	0	0	4	
4	W/C	58.6	62	15	0~2	211	360	908	157	677	0.15	0.001	7	
5		53.6				193		933	161	696	0.65	0.005		
6		48.6	62	15	0~2	175	360	958	165	714	1.25	0.01	7	
7	s/a	57				193		858	148	787	0.35	0.0035		
8	スランプ	53.6	62	15	0~2	193	360	1008	174	604	0.8	0.004	7	
9						67		1008	174	604	0.4	0.004		
10	表面水率	58.6	62	15	0~2	5	360	908	157	677	0	0	7	
11						3		211	908	157	677	0		0
12						1		211	908	157	677	0		0
13	単位セメント量	48.6	62	15	0~2	175	360	958	165	714	1.1	0.008	7	
14						190		390	924	159	689	0.7		0.003
15						204		420	891	154	665	0.45		0.0005
16						214		440	869	150	648	0.25		0.005
17	細砂置換率	58.6	62	15	0~2	0	360	211	1068	0	677	0.25	0.005	7
18						30		211	748	313	677	0.25	0.005	
19						50		211	534	522	677	0.25	0.005	

コンクリートの配合を表-2に示す。本実験では、急結剤添加率、水セメント比、細骨材率、スランプ、細骨材表面水率、単位セメント量、細砂置換率が吹付けコンクリートの硬化物性に及ぼす影響について調べた。とくに、細骨材表面水率を要因としたのは、表面水を模擬的に一次水として考えることで、分割練混ぜ(SEC)により製造されたコンクリートと同じ効果を期待しその影響を確認するためである。コンクリートのフレッシュ性状の管理目標値は、スランプ値を 17±2cm、空気量を 2.0±1.0%に設定した。

2.2 コンクリートの製造

コンクリートの製造は、0.375m³練りポルテックスミキサーを用いた。1配合当たりの練り混ぜ量は0.37m³とし、そのうち約0.05m³をベースコンクリートのフレッシュ性状試験及び管理供試体作製用試料として採取し残りを吹付け用の試料とした。使用材料はすべて人力によって計量を行い、練り上がったコンクリートはコンクリートホッパーに受けてフォークリフトによって吹付け機に投入した。

2.3 吹付け機械および吹付け方法

本実験に使用した吹付け機械の仕様を表-3

に示す。吹付け方法は湿式吹付けでおこなった。使用した吹付け機はロータエア圧送式で、コンクリートをマテリアルホース(φ50mm×20m)で急結剤を混合するY字管まで空気搬送し、Y字管で急結剤添加機から圧縮空気により送られてきた急結剤と混合して吹付けノズルより吐出した。吹付け方法は、表-4に示す吹

表-3 使用機械

使用機械	仕様
吹付け機	アリハ-社製アリハ-280.空気圧送方式
急結剤添加機	電気化学工業社製 デンカナムクリートPAC150
コンクリートミキサー	北川鉄工所製 ポルテックスミキサーV-375
コンプレッサー-1	吹付け機用. 吐出能力=15.3m ³ /min
コンプレッサー-2	急結剤添加機用. 吐出能力=5.0m ³ /min
発電機	200V. 75KVA

表-4 吹付け条件

項目	仕様および設定値
吹付け機吐出量の設定値	4.0m ³ /h
吹付け機設定圧力	0.5MPa
急結剤圧送圧力	0.55MPa
マテリアルホース径	φ50mm
マテリアルホース長	吹付け機排出口~混合管:20m 混合管:0.5m 混合管~ノズル:2.5m ノズル:0.6m
吹付け距離	1.5m
箱型枠傾斜角度	80°
ブルアウト治具傾斜角度	80°

表-5 フレッシュ性状品質管理試験および硬化体物性試験結果

配合 No.	変動因子	フレッシュ品質管理試験結果			ベースコンクリート			吹付けコンクリート					
		スランプ (cm)	空気量 (%)	急結剤 実添加量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)		空隙率 (%)	初期強度(N/mm ²)			圧縮強度 (N/mm ²)		空隙率 (%)
					材齢7日	材齢28日		1時間	3時間	24時間	材齢7日	材齢28日	
1	急結剤	18.0	1.7	10.5	29.2	41.0	14.4	2.1	3.2	18.9	23.0	28.1	18.9
2		17.0	1.7	14.1	32.4	44.3	14.3	3.1	5.6	16.3	23.0	26.4	19.1
3		17.0	1.2	6.2	30.4	41.7	14.8	2.0	2.1	16.5	26.3	30.4	19.3
4	W/C	18.5	3.3	9.6	26.3	38.1	13.5	1.6	2.2	15.1	24.3	28.5	18.0
5		15.0	2.9	10.4	33.2	44.5	11.6	1.7	4.7	20.0以上	25.3	30.5	16.3
6		20.0	2.1	8.9	41.7	53.7	10.3	3.4	5.4	20.0以上	26.0	30.6	16.6
7	s/a	17.5	1.9	8.2	34.7	45.9	13.0	4.3	4.7	20.0以上	24.6	29.0	16.5
8		18.0	3.1	9.0	35.9	45.6	13.8	2.2	3.4	20.0以上	21.4	27.3	18.2
9	スランプ	11.0	3.4	7.2	33.7	42.6	12.9	3.5	4.3	20.0以上	22.3	27.0	18.8
10	表面水率	12.0	1.8	10.5	33.1	42.7	14.8	1.9	3.5	18.9	23.2	27.7	17.9
11		10.0	1.7	10.1	34.1	42.9	13.0	2.6	4.5	19.3	24.1	27.2	17.8
12		13.0	1.6	9.7	29.6	38.6	13.7	1.7	3.0	18.2	22.5	25.9	18.8
13	セメント量	15.0	2.6	9.5	46.7	56.1	10.6	2.0	5.5	20.0以上	28.2	30.6	17.2
14		17.5	2.7	9.5	41.6	51.3	11.3	2.9	4.8	20.0以上	25.1	32.8	17.5
15		17.0	2.5	10.2	44.0	53.6	11.9	2.8	4.9	20.0以上	30.7	36.6	16.8
16		18.0	1.7	10.1	39.9	48.5	13.4	1.4	2.5	20.0以上	30.9	38.3	15.3
17	細砂置換率	18.5	2.7	9.2	26.1	39.9	13.1	1.7	4.9	17.9	25.2	31.0	16.6
18		18.5	1.9	9.8	26.3	40.3	12.9	1.7	2.5	16.9	24.6	30.4	17.3
19		18.0	2.4	10.2	26.1	38.4	13.2	2.7	2.4	17.1	20.4	24.9	20.2

付け条件により、実験を通じて同一人のノズルマンによる手吹きによって行った。試験体は JSCE F561 に準じた 60cm×60cm×25cm の箱形型枠に吹付けを行った後、初期強度測定用のプルアウト試験用型枠 9 枚に吹付けた。

2.4 実験項目および実験方法

ベースコンクリートのフレッシュ性状の管理試験として、練り上り直後のスランプと空気量をそれぞれ JIS A 1101 および JIS A 1118 に準じて測定した。

吹付けコンクリートの初期強度試験として、JSCE-G561-1994 に準じて引抜き試験を行い、せん断強度から圧縮強度に換算した。初期強度試験は、材齢 1 時間、3 時間までは現場における気中養生、その後 24 時間については恒温恒湿養生室内に運び込み、温度 20℃、湿度 60% RH の条件下で行った。

吹付けコンクリート硬化体の圧縮強度試験は、吹付け終了後 2 日間、温度 20℃、湿度 60%RH の条件下で湿布養生したパネル試験体から φ 10cm×20cm のボーリングコア供験体を採用し、材齢 7 日および材齢 28 日において各 3 本

づつ行った。採取したコア供験体は、所定の材齢に達するまで標準水中養生とした。管理供試体（急結剤含まず）としてベースコンクリートの圧縮強度を、φ 10cm×20cm の型枠を用いて JIS A 1132 に準じて作製し、コア供試体と同じ養生を行ったものについて各 3 本づつ行った。

空隙率の測定は、材齢 28 日において、ASTM C 642-90 に準じて、コア供試体および管理供試体のそれぞれについて行った。

3. 実験結果

各配合要因における、ベースコンクリートのフレッシュ性状の管理試験結果、初期強度試験結果、吹付け硬化体および管理供試体の圧縮強度試験および空隙率試験結果を表-5 に示す。また、材齢 28 日における圧縮強度と空隙率の関係を図-1 に、各配合要因の圧縮強度と材齢の関係を図-2～図-8 に示す。

3.1 急結剤添加率の変化による影響

急結剤の添加率の変化による圧縮強度と材齢の関係は図-2 に示すように、急結剤添加率

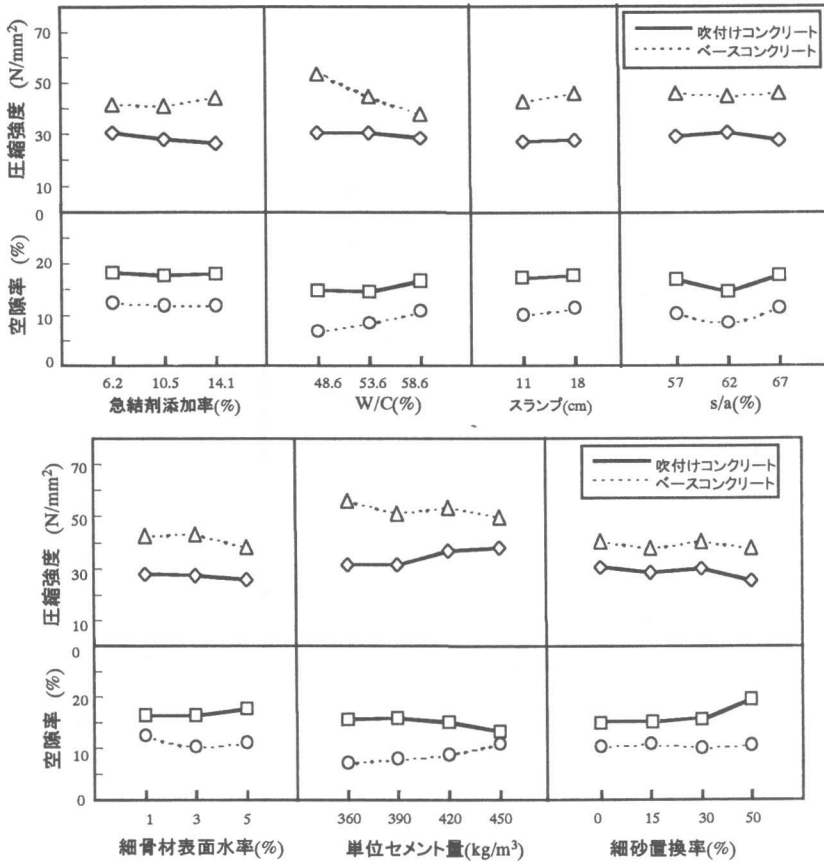


図-1 各種配合要因における圧縮強度と空隙率の関係 (材齢 28 日)

の増加によって、材齢 3 時間までの初期強度は増大した。しかし、材齢 24 時間以降は、添加率の大きいものほど強度はのびなくなり、材齢 28 日では急結剤添加率が大きいものほど低下する傾向が認められた。これまでの研究で、カルシウムアルミネート系急結剤を使用した吹付けコンクリートの長期強度は、急結剤の入っていないベースコンクリートの強度と比較すると 2 割～4 割程度低下し、添加率が多くなるほどその傾向はいちじるしいと報告¹⁾されており、本実験についても同様の結果が得られた。

一方、空隙率については、図-1 から、吹付けコンクリートの空隙率は急結剤の添加率の増減に対して、ほぼ一定であり、急結材の添加率の相違が空隙率に与える影響については今回の実験では確認できなかった。

3.2 水セメント比の変化による影響

水セメント比の変化による圧縮強度と材齢の関係は図-3 に示すように、水セメント比を低減することによって材齢 3 時間までの初期強度の増大が認められた。水セメント比と材齢 28 日強度の関係は、図-1 から、水セメント比が 58.6% の配合に対して 48.6% の配合ではベースコンクリートの強度は 41% 増大した。一方、吹付けコンクリートの強度は 7% の増加にとどまり、水セメント比を低減しても吹付けコンクリートの圧縮強度はベースコンクリートよりも増大しない結果となった。また、水セメント比と空隙率の関係も、図-1 より水セメント比 58.6% の配合に対して 48.6% の配合ではベースコンクリートで 3.2% 減少したのに対して吹付けコンクリートでは、1.4% の減少にと

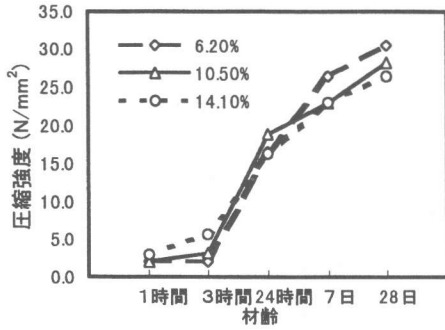


図-2 急結剤添加率の変化による材齢と圧縮強度の関係（吹付けコンクリート）

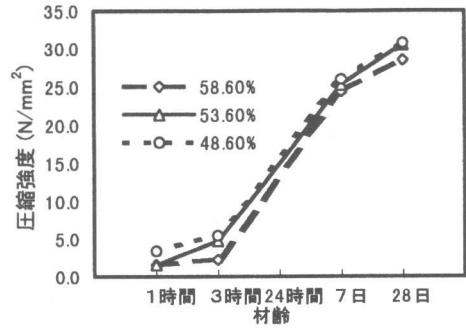


図-3 水セメント比の変化による材齢と圧縮強度の関係（吹付けコンクリート）

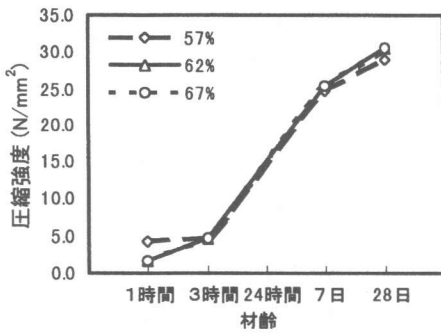


図-4 細骨材率の変化による材齢と圧縮強度の関係（吹付けコンクリート）

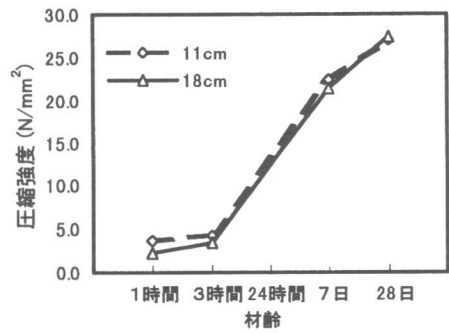


図-5 スランプの変化による材齢と圧縮強度の関係（吹付けコンクリート）

どまった。このことから、吹付けコンクリートでは、吹付けることによってコンクリート中の巻き込み空隙が通常の打設コンクリートよりも多くなり、水セメント比を低減しても密実な硬化体が得られないことが強度が増加しないことの原因の1つになったと考えられる。

3.3 細骨材率の変化による影響

細骨材率の変化が強度および空隙率に及ぼす影響は、図-4からも本実験での変動範囲(57~67%)では明確な傾向は認められなかった。本実験の細骨材率の範囲における強度および空隙率に与える影響は小さいと考えられる。

3.4 スランプの変化による影響

スランプと材齢の関係は図-5より、スランプの小さい方が、初期強度の発現性は若干高い傾向にあるが材齢28日強度においてはスランプの違いによる影響はなくなった。空隙率についてもスランプの大小による違いは今回の実験

では認められなかった。

3.5 細骨材表面水率の変化による影響

細骨材表面水率の変化が強度および空隙率に及ぼす影響については、図-6より本実験の範囲では明確な傾向は示さず、細骨材表面水率の変化が強度および空隙率に及ぼす影響は小さいと考えられる。

3.6 単位セメント量の変化による影響

単位セメント量の変化による影響については、図-1に示すように、単位セメント量を増大させることによって吹付けコンクリートの材齢28日における圧縮強度は増大する傾向を示した。また、空隙率については、単位セメント量の増大に伴って減少する傾向を示した。これらのことから、単位セメント量を多くすることは吹付けコンクリート硬化体を密実にし強度に対して有効であると考えられる。

3.7 細砂置換率の変化による影響

細砂置換率の増加に伴って吹付けコンクリートの強度は低下し空隙率も増加する傾向を示した。細砂置換率の変化は全細骨材の粗粒率の変化を示しており、本実験の範囲では粗粒率が小さくなるほど強度が小さくなる結果が得られたが、細砂の物性の影響も考えられる。

4. まとめ

配合条件の違いが吹付けコンクリートの硬化品質に及ぼす影響について強度および空隙率により調べた。その結果本実験の範囲では以下のようなになった。

- (1) 急結剤の添加率を増やすことによって、材齢 24 時間までの初期強度の発現性は大きくなったが、材齢 28 日における強度発現は阻害された。
- (2) 水セメント比の低減に伴って初期強度増大したが、材齢 28 日強度は増大せずベースコンクリートに対する圧縮強度の低下率は大きくなった。
- (3) スランプを小さくすると、初期強度は増大するが、材齢 28 日強度にはほとんど影響しない。
- (4) 単位セメント量を増大させることによって材齢 28 日における強度は増大する傾向があった。

(謝辞)

本実験は、東京大学生産技術研究所において組織されている「高品質吹付けコンクリートの開発」の共同研究における実験計画に基づき実施した実験結果についてまとめた報告であり、東大生研技官の西村次男氏をはじめ共同研究員としてご協力頂いた田沢雄二郎氏（鹿島建設（株））、岡田喬氏（（株）熊谷組）、平間昭信氏（飛島建設（株））伊東良浩氏（佐藤工業（株））、浅野篤氏（清水建設（株））、坂本淳氏（大成建設（株））、安藤慎一郎氏（（株）竹中土木）、松井健一氏（西松建設（株））、杉山律氏（（株）間組）、赤坂雄司氏（前田建設工業（株））、田湯正孝氏（（株）大林組）、見浦光夫氏（（株）北川鉄工所）、阿部隆夫氏（富士物産（株））、

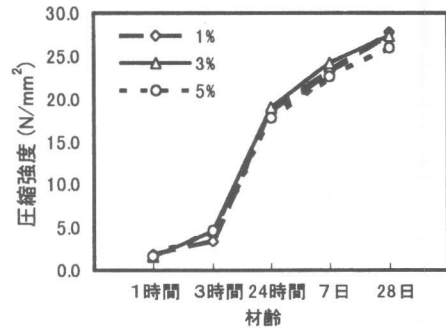


図-6 細骨材表面水の変化による材齢と圧縮強度の関係（吹付けコンクリート）

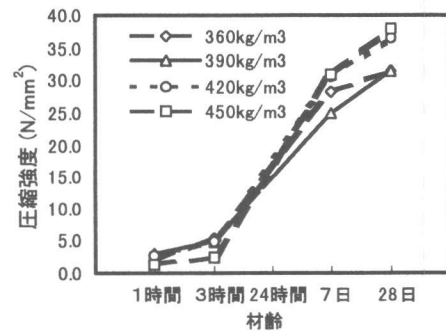


図-7 単位セメント量の変化による材齢と圧縮強度の関係（吹付けコンクリート）

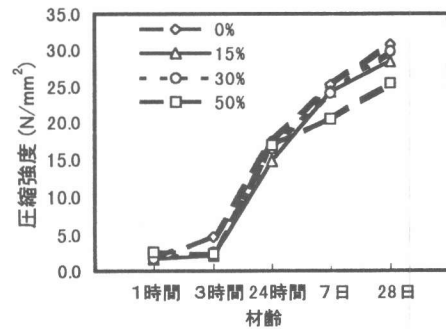


図-8 細砂置換率の変化による材齢と圧縮強度の関係（吹付けコンクリート）

吹付け実験に各社より参加された多くの方々、さらに、千葉工業大学土木工学科卒論生の淵上聡君、池田宗丈君に深い感謝の意を表します。

(参考文献)

- 1) (社)日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート，1996. 2