

吹付けコンクリートの特性に関する基礎的研究(4)

各種配合要因の変化が吹付けコンクリートのフレッシュ及びリバウンド特性に与える影響

Properties of Shotcrete (4)

Properties of Fresh and Rebound of Shotcrete with Change of Various Mix Proportion Factors

荒木 昭俊*・平間 昭信*・伊東 良浩*・西村 次男*・魚本 健人*

Akitoshi ARAKI, Akinobu HIRAMA, Yoshihiro ITO, Tsugio NISHIMURA and Taketo UOMOTO

1. はじめに

吹付けコンクリートは、NATM (New Austrian Tunnel Method) 工法の導入及びそれに伴う材料や機械の開発により発展し、現在では、道路、鉄道、及び導水路等のトンネル工事における一次ライニング材として重要な地位を占めている。また、近年では吹付けコンクリートの高強度化及び低アルカリ化を目的とした新規工法の開発及び施工が実現化しており、シングルシェル構造物としての適用性が重要視されている。

吹付けコンクリートを一般の打設コンクリートと比較した場合の最大の特徴は、コンクリートを圧送し圧縮空気を用いてノズル先端から所定箇所へ吹付けて硬化形成させることから型枠が不要であることと、掘削直後の地山崩落を防止するために早期強度が要求されることからコンクリート圧送途中で急結材が添加されることである。

しかし、その施工方法から推測できるように、一般の打設コンクリートよりも品質のばらつきが大きく、コンクリート構造物としての信頼性に問題がある。特に、吹付け施工時に発生するリバウンドには、材料条件(コンクリート配合、急結材添加量、急結材種類等)、吹付け条件(吹付け圧力、吹付け角度、急結材添加位置、ノズルワーク等)、及び環境条件(気温、湧水の有無、土質等)の変化が複雑に寄与すると考えられ、吹付けコンクリートの品質管理を困難にしている。従って、品質やメカニズムに関する理論的アプローチを試みた研究は極めて少ないのが現状である。

牧らは、吹付け施工時の定量的評価として、骨材粒子がペースト面に衝突する挙動についての数値的な考察^{1), 2)}や、2次元個別要素法を適用して多数の粒子が吐出された場合のリバウンド特性の推定³⁾を行ってきた。後者にお

*東京大学生産技術研究所 第5部

いては、リバウンド特性に大きく関与する因子として骨材粒子を取り巻くペースト層厚や粒子間の付着力と、水セメント比を関係付けることで、モルタル吹付けにおけるリバウンド特性を概念的に現せることを見出している。しかし、より発展させるためには、実施現場に近い材料条件、吹付け条件、及び環境条件をベースに検討する必要がある。

本報告では、以上のようなアプローチの基礎データとすべく、実機吹付けシステムを用い材料条件である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た。そして、使用したコンクリートのフレッシュ及びリバウンド特性を評価した結果についてまとめた。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び機材

本実験に使用した材料を表1に示す。細骨材に関しては、粗粒率が大きい細骨材(細骨材1)をベースに、粗粒率が小さい細骨材(細骨材2)を併用した。また、本実験で使用した機械の機種及び仕様を表2に示す。使用した機械は、いずれも実施現場又は大規模実験で一般的に使用されるものである。

2.2 配合及び練混ぜ方法

表3に本実験で使用したコンクリート配合を示す。全ての配合においてフレッシュコンクリートの目標値をスランプ 17 ± 2 cm、空気量 2.0 ± 1.0 %に設定した。コンクリートの練混ぜ方法は、細骨材及び粗骨材をミキサーに投入し10秒間空練りし、さらにセメントを投入し30秒間空練り後、水を投入して120秒間練混ぜた。1バッチあたりの練混ぜ量を 0.37 m^3 とし吹付け実験に使用した。

2.3 吹付け方法

吹付け実験は、図1に示すような湿式吹付けシステムで実施した。具体的には吹付け機ホッパーに練り上がったコンクリートを投入しながら空気圧送し、急結材添加機より空

表 1 使用材料

使用材料	物性
細骨材1	富士川産川砂, 比重=2.63, F.M.=3.00
細骨材2	市原産山砂, 比重=2.57, F.M.=2.32
粗骨材	両神産G号碎石, 比重=2.72, F.M.=6.51
セメント	日本セメント社製普通ポルトランドセメント(研究用)
急結材	電気化学工業社製カルシウムアルミネート系粉体急結材
高性能減水剤	テングレース社製PEG系高性能減水剤
消泡剤	テングレース社製非イオン系消泡剤
水	水道水

表 2 使用機械

使用機械	機種及び仕様
吹付け機	アリハ-社製アリハ-280, 空気圧送方式
急結材添加機	電気化学工業社製 テンカナムクリートPAC150
ミキサー	北川鉄工所製 ホルテックスミキサーV-375
コンプレッサー-1	アリハ-280用, 吐出能力=15.3m ³ /min
コンプレッサー-2	テンカナムクリート用, 吐出能力=5.0m ³ /min

表 3 コンクリート配合

配合 No.	配合要因	W/C (%)	s/a (%)	細骨材2置換率 (vol%)	細骨材表面水率 ^{a)} (%)	高性能減水剤 (C×%)	消泡剤 (C×%)	急結材 (C×%)
1	急結材	58.6	62	15	1.49	0	0	7
2	急結材	58.6	62	15	1.43	0	0	10
3	急結材	58.6	62	15	1.43	0	0	4
4	急結材	58.6	62	15	0.98	0.15	0.001	7
5	W/C	53.6	62	15	1.01	0.65	0.005	7
6	W/C	48.6	62	15	1.02	1.25	0.01	7
7	s/a	53.6	57	15	1.14	0.35	0.0035	7
8	s/a	53.6	67	15	0.84	0.80	0.004	7
9	スランプ	53.6	67	15	0.91	0.40	0.004	7
10	スランプ	58.6	62	15	5.16	0	0	7
11	表面水率	58.6	62	15	3.50	0	0	7
12	表面水率	58.6	62	15	1.17	0	0	7
13	表面水率	48.6	62	15	1.34	1.10	0.008	7
14	表面水率	48.6	62	15	1.34	0.70	0.003	7
15	セメント量	48.6	62	15	1.14	0.45	0.0005	7
16	セメント量	48.6	62	15	1.14	0.25	0.005	7
17	細骨材2置換率	58.6	62	0	0.52	0.25	0.005	7
18	細骨材2置換率	58.6	62	30	0.63	0.25	0.005	7
19	細骨材2置換率	58.6	62	50	0.70	0.25	0.005	7

気圧送されてくる急結材を、途中に設けた混合管で合流混合させ、ノズル先端より急結性吹付けコンクリートとして吐出する方法である。

2.4 測定項目及び吹付け条件

練り上がったコンクリートのフレッシュ性状は、スランプ、空気量、温度、積算消費電力⁴⁾、及び逆スランプ流下値で評価した。吹付け施工性は、吹付けエア圧力及び急結材エア圧力については、既設の圧力ゲージより読み取った。コンクリート吐出効率については、コンクリート使用量と吹付け時間より算出した。急結材実添加率については、吹付け前と後の急結材減少量より算出した。リバウンド率測定は、図1に示すように箱型枠に向けてコンクリートを吹付け、箱型枠及び後部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することで算出した。圧送配管の脈動状態、ノズルからのダレ、及び急結材混合性の評価は、配合 No.1 を普通とする目視による5段階評価とし、3人の平均値で示した(1:非常に悪い, 2:悪い, 3:普通, 4:良好, 5:非常に良好)。吹付

表 4 吹付け条件

項目	条件
ノズルワーク	手吹き
コンクリート吐出量	4m ³ /h
吹付けエア圧力	0.44~0.49MPa
急結材エア圧力	0.49~0.54MPa
コンクリート圧送ホース径	φ50mm
コンクリート圧送ホース長	吹付け機吐出口~混合管まで20m 混合管~ノズルまで2.5m
ノズル長	0.6m
吹付け距離	1.5m

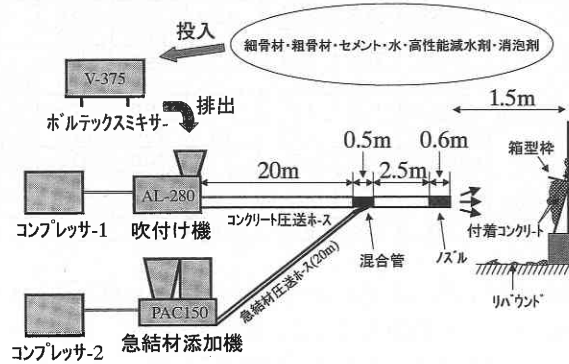


図 1 吹付け全体図

け条件は表4に示すように全ての配合において同一に設定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 フレッシュ特性及び吹付け施工性

練り上がったコンクリートの各配合要因別フレッシュ性状及び吹付け施工性の測定結果を表5に示す。吹付けコンクリートの施工において、その施工性に最も影響を与えるフレッシュ性状は、コンクリートのスランプ、粘性、分離抵抗性等が挙げられる。本実験では、積算消費電力値に着目し吹付け施工性との関連性を評価した。その結果、積算消費電力値に変化が認められた配合は、特に水セメント比と単位セメント量を変動した場合であった。これらと吹付け施工性の関連性をみると、吹付けエア圧力及び急結材エア圧力は、ほとんどの配合においてコンクリート側が0.44~0.54 MPa、急結材側が0.49~0.54 MPaであった。コンクリート吐出効率は、86~135%内で大きくばらついた。急結材実添加率は、配合 No. 2, 3を除いて7%添加になるように設定したが、7.2~10.5%内でばらついた。以上のことから、コンクリート吐出効率及び急結材実添加率は配合変動によりばらつくが、積算消費電力値の変化との明確な関連性は認められなかった。一方、圧送配管の脈動状態、ノズルからのダレ、及び急結材の混合性といった吹付け施工性との関連性をみると、水セメント比が小さくなると、積算消費電力値は大きくなり、圧送配管の脈動状態及

表 5 各種配合要因別フレッシュ性状と吹付け施工性

配合 No.	配合要因	スランブ (cm)	逆スランブ (sec)	空気量 (%)	温度(°C)		積算消費電力 (wh/l)	単位容積質量 (kg/m ³)	吹付けエア圧力 (MPa)	急結材エア圧力 (MPa)	吐出効率 (%)	急結材実添加率 (%)	圧送配管脈動状態	ノズルからのダレ	急結材混合性	
					コンクリート	気温										
1	急結材	7%	18.0	1.20	1.7	21.0	23.0	0.47	2327	0.37	0.44	86	10.5	3.0	3.0	3.0
2		10%	17.0	1.38	1.7	21.0	20.0	0.47	2334	0.42	0.49	89.7	14.1	3.0	2.0	3.0
3		4%	17.0	1.21	1.2	19.5	19.0	0.47	2341	0.44	0.49	87.4	6.2	3.0	4.0	4.0
4	W/C	58.6%	18.5	0.88	3.3	17.0	21.0	0.56	2291	0.51	0.54	108	9.6	3.7	4.0	3.7
5		53.6%	15.0	1.67	2.9	19.0	22.0	0.55	2327	0.49	0.54	99	10.4	2.3	3.0	3.0
6		48.6%	20.0	5.63	2.1	19.0	20.0	0.66	2376	0.49	0.54	113.5	8.9	1.7	3.3	2.0
7	s/a	57%	17.5	2.15	1.9	20.0	22.0	0.57	2357	0.51	0.54	103.3	8.2	2.3	2.3	3.0
8		67%	18.0	1.75	3.1	20.0	22.5	0.54	2319	0.45	0.54	105.9	9.0	3.0	4.0	3.5
9	スランブ	11cm	11.0	3.55	3.4	19.0	20.5	0.58	2307	0.44	0.54	100.3	7.2	3.0	3.7	3.0
10	表面水率	5~6%	12.0	閉塞	1.8	19.0	20.0	0.54	2327	0.49	0.53	86.8	10.5	4.0	3.3	4.0
11		3~4%	10.0	閉塞	1.7	21.0	21.0	0.54	2334	0.49	0.53	105.9	10.1	3.5	3.5	3.0
12		0~2%	13.0	1.74	1.6	20.5	20.0	0.52	2333	0.52	0.53	103.3	9.7	3.5	3.7	3.5
13	セメント量	360kg/m ³	15.0	10.1	2.6	19.0	21.0	0.72	2374	0.49	0.54	135	9.5	2.5	3.7	3.0
14		390kg/m ³	17.5	1.95	2.7	20.0	22.5	0.58	2341	0.49	0.54	114.9	9.5	2.3	2.7	2.7
15		420kg/m ³	17.0	1.39	2.5	20.0	22.0	0.52	2330	0.54	0.54	113.5	10.2	3.0	2.3	3.0
16		440kg/m ³	18.0	1.05	1.7	20.0	19.0	0.51	2330	0.49	0.54	126	10.1	1.7	1.7	2.3
17	置換率	0%	18.5	1.07	2.7	21.0	23.0	0.50	2313	0.49	0.54	109	9.2	4.0	2.7	3.7
18		30%	18.5	0.80	1.9	20.0	22.0	0.50	2316	0.49	0.54	103.3	9.8	4.0	3.0	3.0
19		50%	18.0	0.80	2.4	20.0	20.0	0.49	2301	0.49	0.54	100.8	10.2	4.0	3.3	2.7

び急結材混合性の評価が悪くなり、また、単位セメント量が増加すると、積算消費電力値は小さくなり、ノズルからのダレの評価は悪くなる傾向が認められた。

3.2 リバウンド特性

先に述べたように、スランブ値及び吹付け条件設定を同一にしても、配合によって吹付け施工性が変動する。このような変動は、リバウンド率へも影響し、厳密に同一吹付け条件での評価は困難であることを示唆している。よって、実験結果ではこのような変動による一現象と考えられるノズルからダレ落ちたコンクリート等もリバウンド率として含まれる。図2には、急結材添加率によるリバウンド率の変化を示す。10%程度まではリバウンド率の増加傾向が認められた。急結材添加率の増減は、急結速度の促進及び遅延を意味することからリバウンド率との関連性が深い。図3には、水セメント比によるリバウンド率の変化を示す。水セメント比が小さくなるほどリバウンド率は増加傾向を示した。この傾向は、牧らによるモルタル実験結果と一致している。図4には、細骨材率によるリバウンド率の変化を示す。細骨材率の増加でリバウンド率は減少した。これは、一般的に粗骨材の粒径や量でリバウンド率が影響することから妥当な結果と言える。図5にはスランブによるリバウンド率の変化を示す。水セメント比53.6%の、細骨材率67%の配合でリバウンド率が大きく変化しているが、急結材実添加率が他の配合に比べおよそ2%多かったことから、図2で説明したような急結材の添加率効果が現れたためと考えられる。図6には細骨材表面水率によるリバウンド率の変化を示す。表面水率が0~2%において若干リバウンド率が大きい。図7には、単位セメント量によるリバウンド率の変化を示す。390 kg/m³までは、リバウンド

率は減少傾向を示すが、さらにセメント量を増加させると、リバウンド率は増加傾向を示した。ペースト量が増加すれば骨材粒子間の粘着性が増大し、リバウンド率は減少傾向を示すと予測されるが、それ以上にペースト量の増加が吹付け施工性に大きく影響したためと考えられる。図8には、細骨材2置換率によるリバウンド率の変化を示す。置換率の増加でリバウンド率は減少傾向を示した。従って、砂の粒度粗さもリバウンド率と関連性がある。

4. ま と め

- (1) 各種配合要因を変動させた吹付けコンクリートのフレッシュ及びリバウンド特性を概ね把握できた。
- (2) スランブ値を同じにした条件での積算消費電力値の変化は、水セメント比及び単位セメント量を変動したときに認められ、圧送配管の脈動状態、ノズルからのダレ、及び急結材混合性との関連性は認められた。ただし、あくまでも目視評価との関連性であるため、今後定量的に検討する必要がある。
- (3) 本実験におけるリバウンド率は、吹付け施工性の変動に伴いノズルからダレ落ちたコンクリート等も含まれたため、純粋に跳ね返った量としてのリバウンド率ではない。今後これらを分離した定量的計測を実施し、吹付け施工性との関連性を明確にする必要がある。

謝 辞

本実験は、「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基づき実施し、その結果についてまとめたものであり、共同研究員として御協力頂いた田沢雄二郎氏(鹿島建設(株))、岡田喬氏((株)熊谷組)、笹川幸男

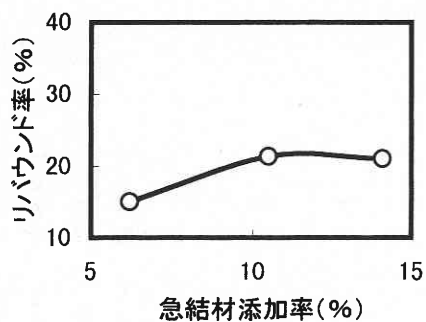


図2 急結材添加率とリバウンド率の関係

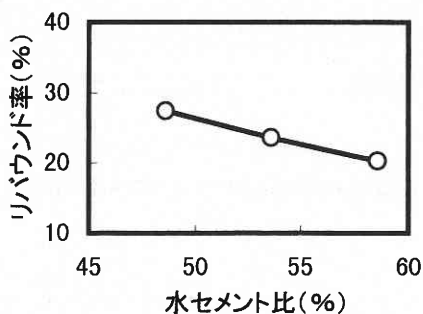


図3 水セメント比とリバウンド率の関係

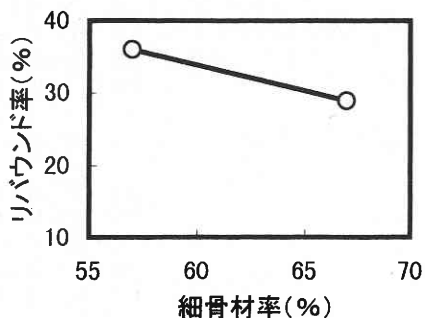


図4 細骨材率とリバウンド率の関係

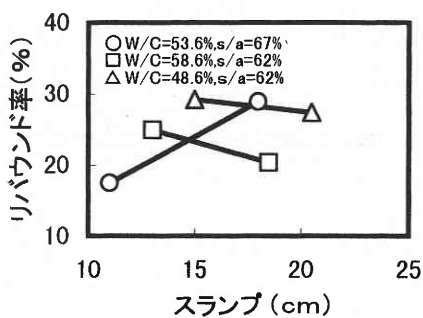


図5 スラブとリバウンド率の関係

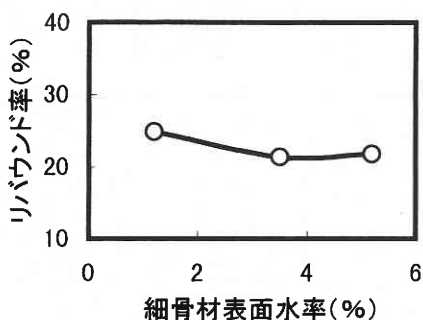


図6 細骨材表面水率とリバウンド率の関係

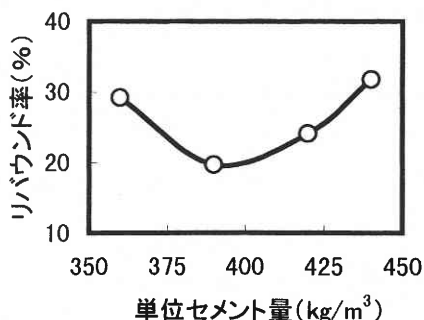


図7 単位セメント量とリバウンド率の関係

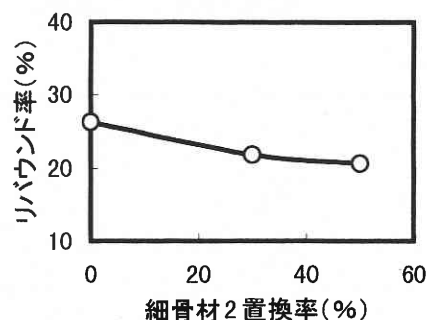


図8 細骨材2置換率とリバウンド率の関係

氏 (電気化学工業 (株)), 酒井芳文氏 ((株) 青木建設), 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), 田濁正孝氏 ((株) 大林組), 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)), また, 吹付け実験中に各社より派遣された多くの方々, さらに, 千葉工業大学土木工学科卒論生の池田宗丈君及び測上聡君に深い感謝の意を表します。

(1998年1月20日受理)

参 考 文 献

- 1) 牧, 魚本: 吹付けコンクリートの施工シュミレーションに関する基礎的研究, 第51回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp.480-481, 1996. 9.
- 2) 牧, 魚本: 吹付けコンクリートの特性に関する基礎的研究 (1)—ベースト—骨材間の付着挙動に関する数値的考察—, 生産研究, 第49巻2号, pp.111-114, 1997. 2.
- 3) 牧, 魚本: 吹付けコンクリートの特性に関する基礎的研究 (2)—個別要素法を用いた吹付け時のリバウンド推定の試み—, 生産研究, 第49巻7号, pp.24-27, 1997. 7.
- 4) 魚本, 西村, 渡部, 加藤: 新しいコンクリートの製造管理システムに関する研究, 東京大学生産技術研究所報告, 第39巻1号, pp.1-48, 1997. 3.