

# 吹付けコンクリートの特性に関する基礎的研究 (9)

—フレッシュ性状の変化が施工性及びリバウンド特性に及ぼす影響—  
Properties of Shotcrete (9)  
—Influence of Fresh Concrete Properties on Pumpability and Rebound of Shotcrete—

荒 木 昭 俊\*・西 村 次 男\*・魚 本 健 人\*  
Akitoshi ARAKI, Tsugio NISHIMURA and Taketo UOMOTO

## 1. は じ め に

吹付けコンクリートの施工では、使用するコンクリートのフレッシュ性状の違いで、配管の脈動状態、ノズル先端からダレ落ちるコンクリートの発生量（以下、ノロ発生量と記述する.）と言った施工性の良否、さらにリバウンド量の増減に大きく影響する。著者らは、各種配合要因を変動させたコンクリートを使用した吹付け実験を実施することで、そのリバウンド特性を評価してきた。その結果、コンクリートの粘性や単位セメント量（本研究では水セメント比を一定としセメント量を変動させた.）の変化が施工性に大きく影響し、リバウンド量の増減にも大きく寄与する要因であることを示唆してきた<sup>1)</sup>。

本研究では、吹付け施工におけるリバウンドに着目し、コンクリート配合が施工性に及ぼす影響を明確にし、リバ

ウンド量への寄与について考察した。また、付着したコンクリート（以下、吹付けコンクリートと記述する.）中の粗骨材量を粗骨材面積占有率比 ( $G_{(SC)}/G_{(BC)}$ ) で評価することで、吹付けコンクリート中の粗骨材量とリバウンド量の関連性について考察した。

## 2. 実 験 概 要

### 2.1 使用材料

細骨材は、富士川産川砂（比重 = 2.63, 粗粒率 = 2.99）をベースに、市原産山砂（比重 = 2.57, 粗粒率 = 2.32）を 15 vol % 置換した混合砂を使用した。粗骨材は、両神産 6 号碎石（比重 = 2.72, 粗粒率 = 6.56）を使用した。セメントは、日本セメント社製普通ポルトランドセメント（密度 = 3.16 g/cm<sup>3</sup>, 研究用）を使用した。急結剤は、電気化学工業社製カルシウムアルミネート系急結剤を使用した。

表 1 吹付けコンクリート配合

実験No.	実験要因	実験水準	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			SP (C×%)	AF (C×%)	AA (C×%)								
					W	S	G											
1		58.6%	58.6	62	193	360	1065	677	0.15	0.001	7							
2	水セメント比 (1)	53.6%	53.6									211	1094	696	0.65	0.005		
3		48.6%	48.6									175	1123	714	1.25	0.01		
4		58.6%	58.6									211	1065	677	0	0		
5	水セメント比 (2)	53.6%	53.6									193	1094	696	0.5	0.002		
6		48.6%	48.6									175	1123	714	1.1	0.008		
7		4%															4	
8	急結剤添加率	7%	58.6								211	360	1065	677	0	0	7	
9		10%															10	
10		57%															53.6	67
11	67%	1182	604								0.8	0.004						
12	表面水率	1.17%	58.6								211	1065	677	0	0			
13		3.50%																
14		5.16%																
15	単位セメント量	360kg/m <sup>3</sup>	48.6								62	175	1123	714	1.1	0.008		
16		390kg/m <sup>3</sup>										190	390	1083	689	0.7	0.003	
17		420kg/m <sup>3</sup>										204	420	1045	665	0.45	0.0005	
18		440kg/m <sup>3</sup>										214	440	1019	648	0.25	0.005	

SP:高性能減水剤  
AF:消泡剤  
AA:急結剤

\*東京大学生産技術研究所 第5部

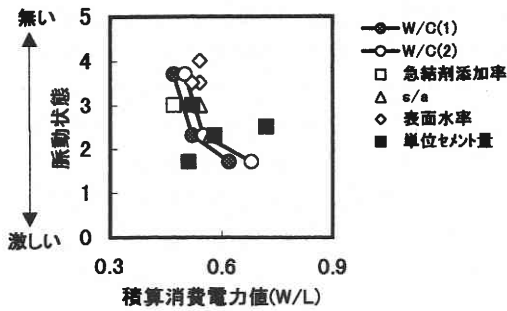


図1 積算消費電力値と脈動状態の関係

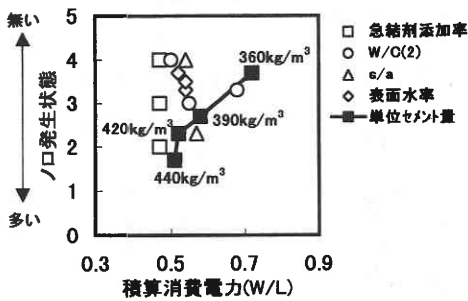


図2 積算消費電力値とノロ発生量の関係

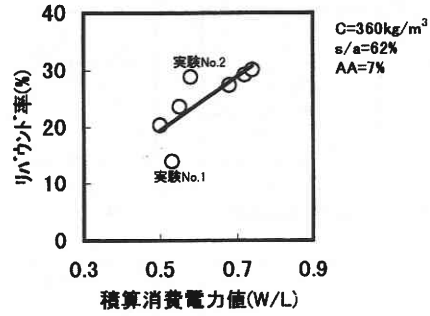


図3 積算消費電力値とリバウンド率の関係

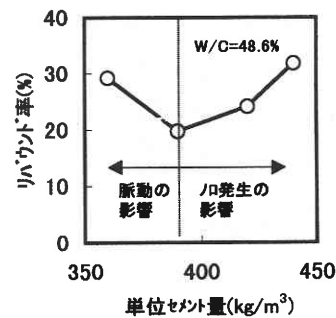


図4 単位ペースト量とリバウンド率の関係

高性能減水剤は、デンカグレース社製ポリエチレングリコール系高性能減水剤を使用した。消泡剤は、デンカグレース社製非イオン系消泡剤を使用した。水は、水道水を使用した。

2.2 配合

実験に使用したコンクリート配合を表1に示す。水セメント比を変動させたケースについては実験を2回実施した。全ての配合において高性能減水剤及び消泡剤によりスランプを  $17 \pm 2$  cm, 空気量を  $2.0 \pm 1.0$  % に調製した。

2.3 吹付け方法

実験は湿式吹付け方式を採用した。コンクリートの製造は、 $0.375 \text{ m}^3$  練りのボルテックスミキサーに細骨材及び粗骨材を投入し10秒間空練りし、セメントを加えて30秒間空練り後、水（高性能減水剤、消泡剤）を加えて120秒間練混ぜることで実施した。得られたコンクリートを吹付け機（アリバー 280）に投入して空気搬送（コンクリート吐出圧：0.39～0.44 MPa, コンクリート吐出量： $4 \text{ m}^3/\text{hr}$ , ホース内径：2 in, ホース長：23.6 m）し、途中に接続したY字管（ノズル先端から3.1 mの箇所）の一方より、急結剤添加機（ナトムクリート PAC150）から空気搬送（急結剤吐出圧：0.44～0.49 MPa, ホース内径：3/4 in, ホース長：20 m）されてくる急結剤と合流混合させ箱型枠に吹付けた。ノズル先端と吹付け面までの距離は1.5 mとした。

2.4 測定項目

積算消費電力値は、水を投入してから120秒間練混ぜたときに消費した積算電力である。脈動状態及びノロ発生量は、実験No.1を評価点3とした3人の目視による5段階評価で行い、評価点3より大きいと脈動は小さく、ノロ発生量は少ない。また、評価点3より小さいと脈動は激しく、ノロ発生量は多いことを意味する。リバウンド率は、箱型枠に付着したコンクリートの重量と、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。

粗骨材面積占有率比は、ベースコンクリートに対する吹付けコンクリート中の粗骨材面積占有率の比であり、ベースコンクリートに対する粗骨材量の減少度合を表す尺度である。式1に算出式を示す。式1中の粗骨材面積占有率の求め方は、吹付けコンクリートは $\phi 10$  cmのコアを採取し、ベースコンクリートは $\phi 10$  cmのモールド缶から供試体を採取し、吹付けコンクリートの場合、上面から3～5 cm, 箱型枠底面から2 cm, ベースコンクリートの場合、上面及びモールド缶底面から2 cm部分を切断し、両面について定方位接線径<sup>2)</sup>が5 mm以上の骨材を粗骨材と見なし、赤く色を塗り画像解析により面積を計測し、全切断面領域に対する占有率を求め上面及び底面の占有率を平均した。最終的に6本の供試体の平均値で示した。

研 究 速 報

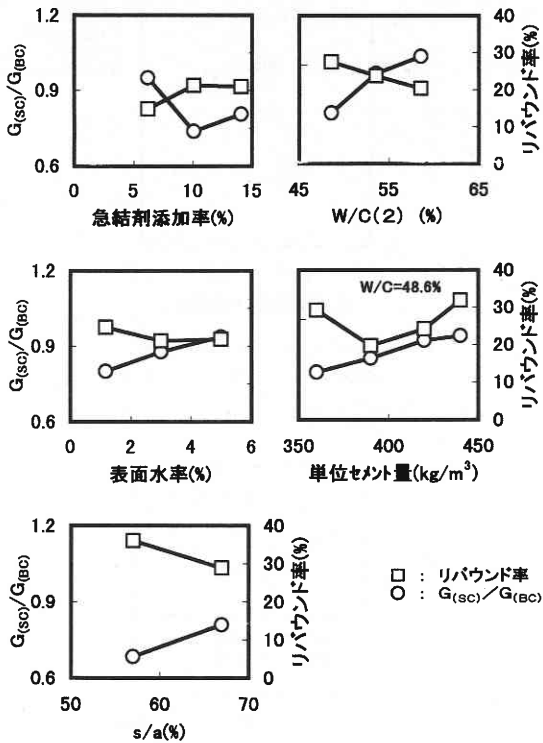


図5 各種実験要因での粗骨材面積占有率とリバウンド率の関係

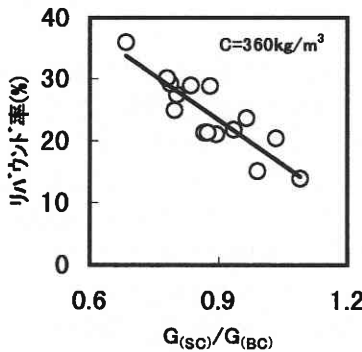


図6 粗骨材面積占有率とリバウンド率の関係

$$G_{(SC)}/G_{(BC)} = \frac{\text{吹付けコンクリートの粗骨材面積占有率}}{\text{ベースコンクリートの粗骨材面積占有率}}$$

3. 実験結果と考察

3.1 フレッシュ性状が施工性に与える影響

吹付け施工では、施工性の良否がリバウンド量や硬化コンクリート物性に影響を与える可能性が大きく、これは、コンクリート配合によるフレッシュ性状の相違が関与している。特に、本実験で使用した空気搬送方式の吹付け機では、ピストン方式に比べ空気搬送距離が長くなるのでス

ーズに搬送できるフレッシュ性状（スランプや粘性）範囲は限定されると考えられる。本研究では、リバウンドに大きく影響を与える施工性として、配管の脈動（コンクリートの流動状態が不連続となる現象）やノロ発生が挙げられ、コンクリートの粘性と密接な関係があると考えられ、コンクリートの粘性を表す指標として積算消費電力値を使用することで評価した。積算消費電力値は、粗骨材量、スランプとの関連もあるため、単純に粘性評価の指標として全般的に使用することは困難であるが、本研究ではスランプを一定としたこと、全実験ケースにおける粗骨材量の変動範囲内では、積算消費電力値の変化が非常に小さいことから粘性評価の指標として用いた。また、積算消費電力値はミキサの積算トルクと比例関係にある<sup>3)</sup>ことが既知であることから粘性を表す指標として妥当と考えられる。

図1及び図2に各実験要因別の積算消費電力値と施工性の関係を示す。図1における配管の脈動状態との関係では、水セメント比を変動させた実験で変化が認められ、水セメント比が小さくなると脈動状態が激しくなる傾向が顕著に現れている。また、再度同じ実験を繰り返しても同じ傾向を示した。他のケースにおいては、ほとんど変化は認められないが、単位セメント量を変動させた場合は、積算消費電力値に大きな違いが認められるものの、脈動状態との明確な関連性は認められなかった。図2におけるノロ発生量との関係では、単位セメント量を変動させた実験で変化が認められ、単位セメント量の増加で積算消費電力値は減少する傾向が確認できた。しかし、ここでは積算消費電力値がノロ発生量に寄与したのではなく、単位セメント量の増加により微粒分が増え、コンクリートの流動状態を変動させたことに直接起因するものである。以上の結果より、施工性に影響を及ぼす配合要因は、水セメント比及び単位セメント量を変動させた場合で顕著に現れることが認められた。

3.2 リバウンド率に与える影響

脈動状態はコンクリートの粘性（ここでは水セメント比。）と関連があり、また、ノロ発生量は単位セメント量と関連があることが示唆された。そこで、粘性による要因だけに着目し、水セメント比を変化させた全てのケース（実験 No. 1～6, No. 15）について、リバウンド率と積算消費電力値の関係をプロットした。結果を図3に示す。積算消費電力値が大きくなるとリバウンド率は増加する傾向を示した。すなわち、脈動状態が激しくなるとリバウンド率が増加する傾向であることを示唆している。また、実験 No.1 及び 2 において、大きくばらついているのは急結剤添加率が2%程度異なったためである<sup>4)</sup>。水セメント比を変動させた実験では、高性能減水剤によりスランプを一定

に調整している。そのため、水セメント比が小さくなるほど添加量が多く粘りのあるコンクリートとなる。従って、粘着性に富んだコンクリートほど骨材とペーストの分離抵抗性が向上するので、リバウンド率としては変わらないか、逆に水セメント比の低下に伴い減少傾向を示すと予想される。しかし、予想とは反する結果であることから、脈動によるコンクリートの不連続性が急結剤の混合性を大幅に変動させたことが最も大きな影響を与えているものと推定される。ノロ発生量については、先に述べたように積算消費電力値すなわち粘性との関連よりは、単位セメント量が増加したことによる配管壁との粘着性の増大による流動速度の低下が影響していると考えられる。図4には、単位セメント量とリバウンド率の関係を示す。この結果より、単位セメント量が  $390 \text{ kg/m}^3$  までは、リバウンドが減少し、 $390 \text{ kg/m}^3$  を越えるとリバウンドが増加する傾向が認められた。本ケースでは、水セメント比を 48.6% で実施しており単位セメント量が  $360 \text{ kg/m}^3$  の配合では脈動状態が激しいことから、セメントが貧配合になると脈動による影響が現れ、ペーストが富配合になるとノロ発生による影響でリバウンド率が増加したと考えられる。従って、本実験条件においては、 $390 \text{ kg/m}^3$  の配合が脈動状態及びノロ発生量の面でリバウンド率の低下に最も大きく寄与している。

### 3.3 吹付けコンクリート中の粗骨材量

施工性の変動は確実にリバウンド率に影響を及ぼす。しかし、施工性を考慮せず、コンクリート配合で考えた場合、骨材ペースト間、吹付け面コンクリート間等において粘着性が良好なコンクリートほどリバウンド量の低減に大きく寄与する。吹付け施工では、特に吹付けコンクリートとベースコンクリート中の粗骨材量に相違が認められ、乾燥収縮やヤング率等に大きく影響をもたらすと考えられる。

そこで、図5に各要因別に吹付けコンクリートの粗骨材面積占有率比をリバウンド率と共に示した。

単位セメント量を変動させたケース以外は、リバウンド率が大きくなると粗骨材面積占有率比は減少する傾向が認められ、即ち、ベースコンクリートに比べ吹付けコンクリート中の粗骨材量は減少している。一方、単位セメント量を変動させた場合、セメント量が  $390 \text{ kg/m}^3$  以上では、ノロ発生がリバウンド率を増加させているが、粗骨材面積占有率比は逆の傾向を示した。これは、単位セメント量の増加は粗骨材の分離抵抗性を高め、付着性を良好にしていること示唆し、ノロ発生による影響がなければ、ベースコンクリートと吹付けコンクリートの粗骨材量が同等になる吹付け施工が可能であったと考えられる。これは、水セメント比を変動させたケースでも脈動が無いコンクリートほど粗

骨材面積占有率比が大きいことから、施工性及び骨材の粘着性が良いコンクリートほど、吹付けコンクリートの粗骨材量はベースコンクリートと同等になると考えられる。図6は、単位セメント量を一定としたケース（実験No. 1～15）について、粗骨材面積占有率比とリバウンド率の関係を示した。この図より、粗骨材の付着性がリバウンド率に大きく影響していることがわかり、リバウンドと粗骨材量は密接な関係がある。

## 4. ま と め

本実験結果を以下のようにまとめた。

- (1) コンクリート粘性や単位セメント量の増大は施工性の良否に大きく影響する。
- (2) コンクリート粘性の増大は、リバウンド率の増加を招き、また、単位セメント量が  $390 \text{ kg/m}^3$  を越えると、リバウンド率は増加する傾向がある。
- (3) リバウンドに含有する粗骨材量が増加すると、リバウンド率は増加する。

## 謝 辞

本実験は、東京大学生産技術研究所における平成9年度『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り、共同研究員である(株)青木建設 酒井芳文氏、(株)大林組 田湯正孝氏、鹿島建設(株) 田沢雄二郎氏、(株)熊谷組 岡田喬氏、佐藤工業(株) 伊東良浩氏、清水建設(株) 浅野篤氏、大成建設(株) 坂本淳氏、(株)竹中土木 安藤慎一郎氏、電気化学工業(株) 笹川幸男氏、飛鳥建設(株) 平間昭信氏、西松建設(株) 松井健一氏、(株)間 杉山律氏、前田建設工業(株) 赤坂雄司氏、協力会社として御協力頂いた富士物産(株) 阿部隆夫氏、(株)北川鉄工所 見浦光夫氏、千葉工業大学卒論生の池田宗丈君、洲上聡君、また、吹付け実験に参加された多くの方々に感謝の意を表します。

(1998年9月7日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 荒木, 平間, 伊東, 西村, 魚本: 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—, 生産研究, 第50巻第4号, pp. 182-185, 1998. 4.
- 2) 荒井: 粉体材料の化学, 培風館, pp. 160-161, 1992.
- 3) 魚本, 西村, 渡辺, 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. 20-30, 1997. 3.
- 4) 平成9年度『高品質吹付けコンクリートの開発』—各種配合要因を変動させたコンクリートによる吹付け実験—, 資料集, 東京大学生産技術研究所, pp. 12, 平成10年3月.