

# 報告 各種配合要因の変化に伴う吹付けコンクリートのフレッシュ性状及びリバウンド特性

荒木昭俊\*1・平間昭信\*2・伊東良浩\*3・西村次男\*4

**要旨:** 各種配合要因及び水準を変化させたコンクリートを使用して湿式吹付け実験を試みた。フレッシュコンクリートの積算消費電力値の変化は、単位セメント量が同じ配合であれば、コンクリートの施工性（圧送配管の脈動状態及び急結剤の混合状態）と関連性がある。また、ベースコンクリート及び付着コンクリート中で占める粗骨材の面積を比較すると、付着コンクリートの方が小さく、リバウンド中に粗骨材が優先的に落下している。

**キーワード:** 吹付けコンクリート, 施工性, 粗骨材, 面積, リバウンド率

## 1. はじめに

吹付けコンクリートは、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、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。しかし、一般の打設コンクリートと異なり、圧縮空気により吹き飛ばし施工されることから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、吹付け施工で発生するリバウンドは、配合条件、吹付け条件、及び環境条件が複雑に影響し合い品質管理を困難にしていることから、品質やメカニズムに関する理論的研究は少ないのが現状である。

本報告では、吹付けコンクリートに対する理論的アプローチの手掛かりとすべく、吹付け条件を一定とし、コンクリートの配合条件を変動させた場合の吹付け実験を試みることで、フレッシュ性状及びリバウンド特性を評価した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料及び機材

本実験で使用した材料及び機材を表-1及び

表1 使用材料

使用材料	素性
細骨材	富士川産川砂, 比重=2.63, F.M.=2.99
細砂	市原産山砂, 比重=2.57, F.M.=2.32
粗骨材	両神産6号砕石, 比重=2.72, F.M.=6.56
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)
急結剤	電気化学工業社製カルシウムアルミネート系粉体急結剤
高性能減水剤	デンカケレス社製PEG系高性能減水剤
消泡剤	デンカケレス社製非イオン系消泡剤
水	水道水

表2 使用機材

使用機材	機種及び仕様
吹付け機	アリバ <sup>®</sup> -社製 アリバ <sup>®</sup> -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
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	アリバ <sup>®</sup> -280用, 吐出能力=15.3m <sup>3</sup> /min
コンプレッサー-2	デンカナムクリート用, 吐出能力=5.0m <sup>3</sup> /min

表-2に示す。細骨材に関しては、粗粒率が大きめの細骨材 (S)と、粗粒率が小さめの細砂 (S2)を併用した。粗骨材の表面水率は、0.5%以内に調整して使用した。

### 2.2 コンクリート配合

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物性を、スランプ値は 17 ± 2cm, 空気量は 2.0 ± 1.0%と定めた。

\*1 電気化学工業 (株) 青海工場セメント特殊混和材研究所研究員 工修 (正会員)

\*2 飛鳥建設 (株) 技術研究所材料研究室主任 (正会員)

\*3 佐藤工業 (株) 中央技術研究所研究員 工博 (正会員)

\*4 東京大学生産技術研究所 技術官 (正会員)

表3 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 <sup>3</sup> )					高性能減水剤 (C×%)	消泡剤 (C×%)	急結剤 (C×%)
						W	C	S	S2	G			
1		58.6	62	15	1.49	211	360	908	157	677	0	0	7
2	急結剤	58.6	62	15	1.43	211	360	908	157	677	0	0	10
3		58.6	62	15	1.43	211	360	908	157	677	0	0	4
4		58.6	62	15	0.98	211	360	908	157	677	0.15	0.001	7
5	W/C	53.6	62	15	1.01	193	360	933	161	696	0.65	0.005	7
6		48.6	62	15	1.02	175	360	958	165	714	1.25	0.01	7
7	s/a	53.6	57	15	1.14	193	360	858	148	787	0.35	0.0035	7
8		53.6	67	15	0.84	193	360	1008	174	604	0.80	0.004	7
9	スランプ	53.6	67	15	0.91	193	360	1008	174	604	0.40	0.004	7
10		58.6	62	15	5.16	211	360	908	157	677	0	0	7
11	表面水率	58.6	62	15	3.50	211	360	908	157	677	0	0	7
12		58.6	62	15	1.17	211	360	908	157	677	0	0	7
13		48.6	62	15	1.34	175	360	958	165	714	1.10	0.008	7
14	セメント量	48.6	62	15	1.34	190	390	924	159	689	0.70	0.003	7
15		48.6	62	15	1.14	204	420	891	154	665	0.45	0.0005	7
16		48.6	62	15	1.14	214	440	869	150	648	0.25	0.005	7
17	細砂置換率	58.6	62	0	0.52	211	360	1068	0	677	0.25	0.005	7
18		58.6	62	30	0.63	211	360	748	313	677	0.25	0.005	7
19		58.6	62	50	0.70	211	360	534	522	677	0.25	0.005	7

2.3 試験方法

2.3.1 練混ぜ方法

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、水を投入してから 120 秒間練混ぜた。1 バッチあたりの練混ぜ量は 0.37m<sup>3</sup> とし、約 0.05m<sup>3</sup> をフレッシュ性測定用とし、残りを吹付け実験に使用した。

2.3.2 フレッシュ性

練り上がったコンクリートのフレッシュ性は、スランプ、温度、単位容積質量、逆スランプ流下値、及び積算消費電力値<sup>1)</sup>で評価した。

2.3.3 吹付け方法及び吹付け条件

吹付け実験は、直径 9m × 高さ 4.5m の模擬トンネル内で湿式吹付け方法で実施した。その時の吹付け条件を表-4に示す。

2.3.4 施工性

コンクリート及び急結剤エア圧力は、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、コンクリート使用量と吹付けに要した時間より算出した。急結剤実添加率は、吹付け前と後の急結剤減少量を測定することで算出した。圧送配管の脈動状態、ノズル先端からのダレ（以下、ノロと表現する。）、及び急結剤の混合状態は、表-3の配合 No.1 を基準とした

表4 吹付け条件

項目	詳細
ノズルワーク	手吹き
コンクリート吐出量	4m <sup>3</sup> /h
吹付け圧力	0.44~0.49MPa
急結剤圧送圧力	0.49~0.54MPa
マテリアルホース径	φ50mm
マテリアルホース長	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

目視による5段階評価とし、3人の平均値で現した。(1:非常に悪い, 2:悪い, 3:普通, 4:良好, 5:非常に良好)

2.3.5 リバウンド測定

リバウンド率は、コンクリートを 60 × 60 × 25cm の箱型枠に向けて吹付け、箱型枠及び周囲の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。本実験では、ノロ等の吹付け面まで到達しなかったコンクリートも落下したコンクリートに含まれている。

2.3.6 付着コンクリート中の粗骨材占有率

箱型枠に採取したコンクリートブロックをφ10 × 20cm でコアリングし、そのコア供試体の型枠底面から 1 ~ 2cm の部分と上面から 3 ~ 4cm の部分を切断し、それぞれの断面内で粗骨材が占める面積を算出した。算出方法は、定方向接線径<sup>2)</sup>が 5mm 以上である骨材に赤く色を塗り、赤色部分の面積を画像解析により求め、

表5 各種配合要因別フレッシュ性状及び施工性

配合No.	変動要因	スランプ (cm)	逆スランプ 流下値 (sec)	空気量 (%)	温度(°C)		積算消費 電力 (wh/l)	単位容積 質量 (kg/m <sup>3</sup> )	吹付け エア圧力 (MPa)	急結剤 エア圧力 (MPa)	吐出 効率 (%)	急結剤 実添加率 (%)	圧送配管 脈動状態	ノロ 発生量	急結剤 混合状態	
					コンクリート	気温										
1	急結剤	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	0.50	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	0.59	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	スランプ	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	5.16%	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		3.50%	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		1.17%	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 <sup>3</sup>	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 <sup>3</sup>	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 <sup>3</sup>	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 <sup>3</sup>	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	細砂 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

底面及び上面領域の平均面積をコア断面積に対する占有率として算出した。この操作を6本の供試体について行い、その平均値を最終的に粗骨材占有率とした。また、比較のために各配合毎の管理供試体についても同様に行った。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 フレッシュ性状と施工性

練り上がったコンクリートのフレッシュ性状及び各種配合要因別施工性を測定した結果を表-5に示す。吹付けコンクリートの施工において、施工性に最も影響を与えると考えられるフレッシュ性状はコンクリートの軟度、粘性、及び分離抵抗性等が挙げられ、それらを測定することで概ね施工性との関連性を評価できると考えられる。本実験では、スランプ値を同じとする方針で進めたのでコンクリートの粘性を現すと考えられる積算消費電力値の変化で評価した。その結果、水セメント比と単位セメント量を変動させたときに大きな変化が認められた。水セメント比の場合は、コンクリートの粘性が増大したため、単位セメント量の場合は、単位容積あたりの高性能減水剤量が増加したための変化と考えられる。

次に、各配合が施工性に与える影響を確認するために、吹付けエア圧力、急結剤エア圧力、コンクリート吐出効率、急結剤実添加率、圧送

配管の脈動状態、ノロの発生量、及び急結剤の混合状態を各配合要因別に評価した。表-5に示すように、吹付け及び急結剤エア圧力は、全体的に安定していた。コンクリート吐出効率は、低い場合で86%、高い場合で135%までばらついた。コンクリート吐出効率が100%ならば、設定吐出量通りにコンクリートが吐出されていることになる。本実験では、ばらつきの影響もあるが水セメント比が小さい配合(48.6%)で100%を越える傾向が強いようである。これは、吹付け機の性能と関係すると考えられるが明確な原因についてはわからない。急結剤実添加率は、配合No.2及び3を除き、急結剤添加機で7%設定を行った配合で比較すると、7.2～10.5%内ではばらつき、ほとんどの配合において設定値よりも2～3%程度急結剤が過剰添加されていた。圧送配管の脈動状態は、特に水セメント比が低下するほど悪くなる傾向を示した。ノロの発生量は、特に単位セメント量が増加するほど多くなる傾向を示した。急結剤の混合状態は、特に水セメント比が低下するほど悪くなる傾向を示した。

以上のことより、コンクリート吐出効率及び急結剤実添加率は、配合によるばらつきが認められるが、積算消費電力値の変化と明確な関連性は確認できなかった。一方、圧送配管の脈動状態及び急結剤の混合状態は、積算消費電力値

の変化が現れた水セメント比と関連性が認められる。これは、水セメント比の低下により粘性は増大するので、吹付け機ローター内へのコンクリートの充填性が低下し、圧送抵抗も大きくなる。それに伴い、圧送中のコンクリートの流動状態は非連続的となることから、脈動が激しくなり急結剤の混合状態も悪くなることに起因する。しかし、単位セメント量の場合は、水セメント比のように積算消費電力値が大きくなると圧送配管の脈動状態及び急結剤の混合状態が悪くなる傾向はない。従って、ノロ発生量の増加は、単位セメント量の増加で骨材量が減少し、圧送配管の内壁近傍で流動しているコンクリート層を衝突により乱しながらスムーズに吐き出させる効果が低下することが大きく影響しており、単位セメント量（粉体量）が同じ配合であれば、積算消費電力値で施工性をある程度評価できると考えられる。

以上のことは、あくまでも目視評価との関連性であり定量的評価ではない。従って、フレッシュ性状と施工性の関係をより明確化するためには、脈動状態、急結剤の混合状態、及びノロ発生量を定量的に測定することが重要である。

### 3.2 各種配合要因別リバウンド率と付着 コンクリート中の粗骨材占有率

#### 3.2.1 急結剤添加率の影響

図-1には、急結剤添加率に対するリバウンド率と粗骨材占有率(以下、占有率と表現する。)の関係を示す。尚、図中の占有率(BC)とはベースコンクリート、占有率(SC)とは吹付けられ付着したコンクリートを示す。リバウンド率は、急結剤添加率が10%程度まで増加したが、それ以上の増加は認められなかった。また、占有率は、相当する管理供試体中の占有率より少ない。これは、明らかに吹付けられたコンクリートの細骨材率が高くなっていることを示唆している。また、リバウンド率と占有率の関連性は、リバウンド率が増加傾向を示すと占有率(SC)は減少傾向を示した。

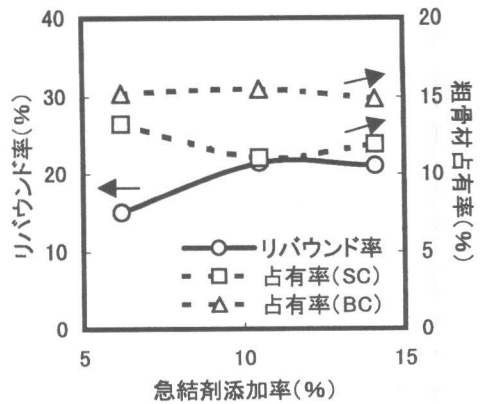


図-1 急結剤添加率との関係

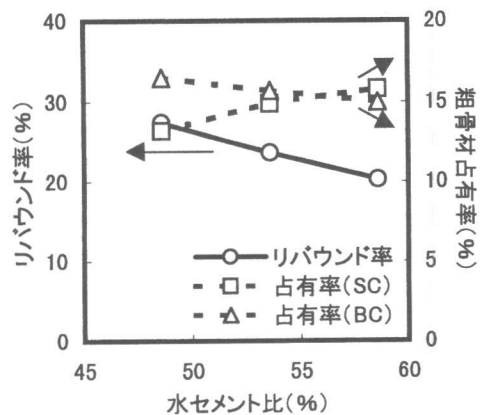


図-2 水セメント比との関係

#### 3.2.2 水セメント比の影響

図-2には、水セメント比に対するリバウンド率と占有率の関係を示す。リバウンド率は、水セメント比が低下するほど増加した。これは、水セメント比の減少に伴い、圧送配管の脈動が激しくなり、圧送配管内を流れるコンクリートが非連続的となることで、急結剤の混合状態が不均一となったことが影響している。或いは、水セメント比が低くなると骨材を取り巻くペースト濃度は高くなり、水セメント比が低くなるとリバウンド率が大きくなることからリバウンド中のセメント含有率は高くなると予想される。一方、表-5より、急結剤添加率の配合間の差は殆どないことから、実際には、付着したコンクリート中のセメントに対する急結剤の混合割合が増加したことが影響しているとも考えられる。また、占有率(SC)は、水セメント比

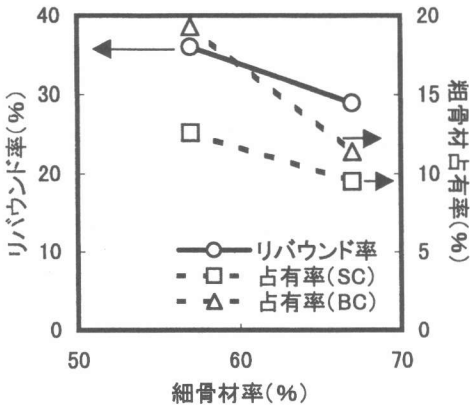


図-3 細骨材率との関係

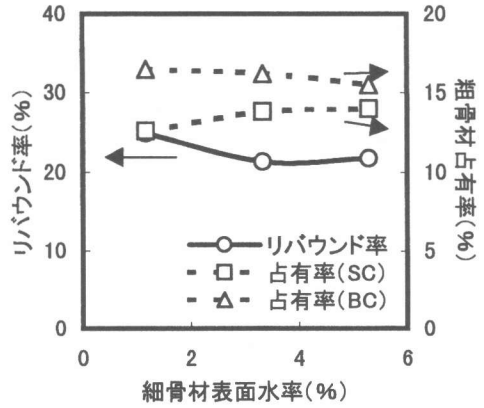


図-5 細骨材表面水率との関係

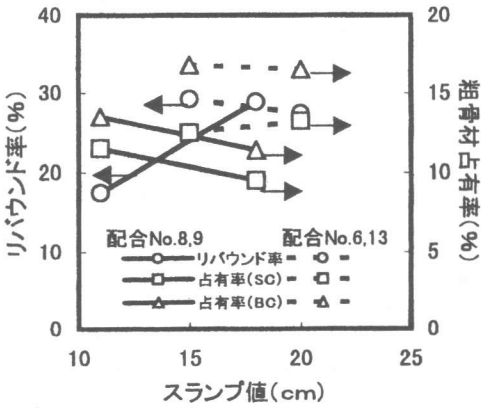


図-4 スランプ値との関係

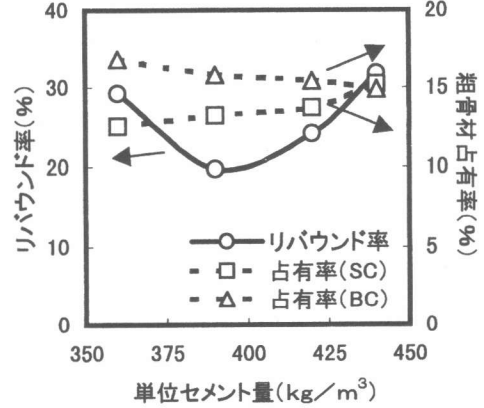


図-6 単位セメント量との関係

の低下に伴い減少しておりリバウンド率との関連性が認められる。

### 3.2.3 細骨材率の影響

図-3には、細骨材率に対するリバウンド率と占有率の関係を示す。リバウンド率は、細骨材率の増加で減少した。リバウンド率は粗骨材の大きさや量で大きく影響することから妥当な結果と言える。また、占有率(SC)は、細骨材率の増加に伴い減少している。

### 3.2.4 スランプ値の影響

図-4には、スランプ値に対するリバウンド率と占有率の関係を示す。リバウンド率は、水セメント比=53.6%、細骨材率=67%の配合において大きく変化した。これは、表-5の配合No.8及び9からわかるように急結剤添加率の差が約2%あることから、急結剤の添加率効果が現れたためと考えられる。他の配合について

は大きな変化は認められないことから、本実験のスランプ範囲内では、スランプの大小によるリバウンド率への影響は小さいと考えられる。

### 3.2.5 細骨材表面水率の影響

図-5には、細骨材表面水率に対するリバウンド率と占有率の関係を示す。表面水率が1.17%の場合で若干リバウンド率が大きい、細骨材表面水率によるリバウンド率への大きな影響は認められなかった。また、占有率(SC)についても表面水率が1.17%の場合若干減少している。

### 3.2.6 単位セメント量の影響

図-6には、単位セメント量に対するリバウンド率と占有率の関係を示す。単位セメント量が390kg/m³まで減少傾向を示すが、さらにセメント量を増やすと増加傾向を示した。これは、占有率が単位セメント量の増加に伴い多くなっ

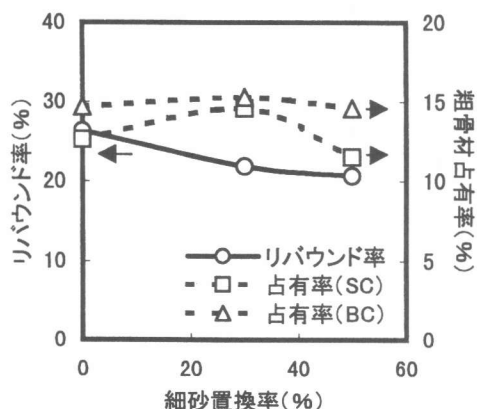


図-7 細砂置換率との関係

ていることから、単位セメント量を増加させればペースト-骨材間の粘着性が增大し、リバウンド率の減少傾向を示すと考えられる。しかし、粘着性が增大すると共に、先に述べたようにコンクリートの吐出をスムーズに促進させる効果が低下するのでノロの発生量が増加し、リバウンド率に加味されたことが原因と考えられる。このように、ノロ等の吐出状態の変動からくる二次的要因が顕著に現れると、占有率(SC)とリバウンド率の関連性を不明確にすると考えられる。

### 3.2.7 細砂置換率の影響

図-7には、細砂置換率に対するリバウンド率と占有率の関係を示す。リバウンド率は、細砂置換率の増加に伴い減少した。細砂置換率の増加は、全細骨材の粗粒率を小さくすることから、粗粒率の小さい細骨材の使用でリバウンド率は減少することを示唆している。また、占有率(SC)は、細砂置換率の増加に伴い多くなると考えられたが、細砂置換率が50%になると逆に減少し、リバウンド率と矛盾する結果となった。この場合も二次的要因が作用したと考えられる。

## 4. 結論

①スランプ値及び単位セメント量が同じ条件で、積算消費電力値に変化が認められた配合要因は水セメント比であり、積算消費電力値が大

きくなると圧送配管の脈動状態及び急結剤の混合状態が悪くなる。また、単位セメント量の変動はノロ発生量に大きく影響する。これら配合要因では、リバウンド率への影響も大きく、フレッシュ性状とリバウンド率の関連性を明確化するには、脈動状態、急結剤の混合状態、及びノロを定量的に測定することが重要である。

②占有率(BC)と占有率(SC)を比較すると、全体的に占有率(SC)の方が小さく、細骨材率が高くなる。また、同じ細骨材率の配合でノロ発生による二次的要因が顕著に現れなければ、占有率(SC)とリバウンド率には関連性があり、占有率から配合間のリバウンド傾向の推定が可能と考えられる。

## 謝辞

本報告は、東京大学生産技術研究所 魚本健人教授の下で組織された「高品質吹付けコンクリートの開発」を目的とする共同研究による実験結果をまとめたものであり、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)、笹川幸男氏(電気化学工業(株))、酒井芳文氏((株)青木建設)、坂本淳氏(大成建設(株))、安藤慎一郎氏((株)竹中土木)、杉山律氏((株)間)、赤坂雄司氏(前田建設工業(株))、田湯正孝氏((株)大林組)、松井健一氏(西松建設(株))、浅野篤氏(清水建設(株))、阿部隆夫氏(富士物産(株))、見浦光夫氏((株)北川鉄工所)、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文君及び淵上聡君に深い感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1)魚本健人・西村次男・渡部正・加藤佳孝：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，vol.39, No.1, pp.20-30, 1997.3
- 2)荒井康夫：粉体材料の化学，培風館，pp.160-161, 1992