

論文 実施工における吹付けコンクリートの充填性および硬化物性

石関 嘉一*1・舟川 勲*2・西村 次男*3・魚本 健人*4

要旨：トンネル施工における吹付けコンクリートの性状確認は，引き抜き試験法や吹付け面から採取したコアを用いた圧縮強度試験などによって行われている。しかし，吹付けコンクリートは通常の打設コンクリートと異なり不均一であると思われる。また，リバウンドや衝撃により岩盤付近から内側にかけて粗骨材量や空隙率が異なり，品質にばらつきが生じてしまうと考えられる。そこで，実トンネルから吹付けコンクリートのコアを採取し，岩盤から内空にかけて骨材面積占有率，空隙率，ピッカース硬さおよび細孔径分布等の試験を行い充填性および硬化物性の評価をした。

キーワード：吹付けコンクリート，骨材面積占有率，空隙率，ピッカース硬さ，細孔径分布

1. はじめに

NATM 工法がトンネル施工に導入されてから数十年が経過し，今日山岳トンネルの標準工法として定着している。その間 NATM 工法の主要な支保工部材である吹付けコンクリートにおいては，様々な研究がなされてきた。また，ここ数年大断面トンネルや吹付けコンクリートで永久覆工とするシングル・シェルライニングの導入を目的として，新しい急結剤や施工機械の開発，各種混和材の添加やコンクリート製造法の研究開発が行われるようになってきた。しかしながら施工性および吹付けコンクリートの品質に関する研究は十分に行われていない現状である。特に吹付けコンクリートは通常の打設コンクリートと異なり吹付け面に高速で衝突す

表 - 1 使用材料

材料名	仕 様
セメント	普通ポルトランド，密度： $3.16\text{g}/\text{cm}^3$
細骨材	長野松代産陸砂，密度： $2.59\text{g}/\text{cm}^3$ F.M.=2.76
粗骨材	長野松代産 6 号砕石，密度： $2.69\text{g}/\text{cm}^3$ F.M.=6.37
急結剤	カルシュームアルミネート系 密度： $2.57\text{g}/\text{cm}^3$
高性能減水剤	ポリグリコールエステル誘導体
空気量調整剤	消泡剤

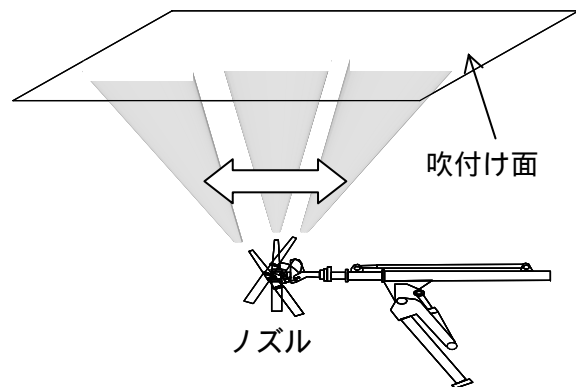


図 - 1 ノズルワーク概念図

るためリバウンドが発生し圧送前の配合と材料の構成が異なってしまう。また，剥落防止や厚さ管理のために，図 - 1 のようにノズルを左右に振りコンクリートが局所的に集中しないようにしている。そのため部材コンクリートは層状になり不均一な品質になっていると考えられる。

本研究は，実トンネル施工時吹付け条件を変化させ吹付けコンクリートのコアを採取し，岩盤から内空にかけて骨材面積占有率，空隙率，ピッカース硬さおよび細孔径分布等の試験を行った。それによって得られた結果について報告する。

*1 (株)熊谷組 技術研究所 先端技術研究グループ (正会員)

*2 (株)青木建設 研究所土木研究室 材料グループ 工修 (正会員)

*3 東京大学 生産技術研究所 (正会員)

*4 東京大学 生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター 工博 (正会員)

表 - 2 配合

配合	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				高性能減水剤 C×%	空気量調整材 C×%
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		
C360	15	17±2.5	2.5±1.0	60.3	60.4	217	360	1015	692	0.5～1.6	0.02

表 - 3 実験要因

実験 No.	吹付け 距離 (m)	圧送空 気流量	吹付け角度 (°)	設定吐出量 (m ³ /h)
1 -0	2.0	開放	0	16
1-45			45	
1-90			90	
2	1.0			
3	3.0			
4	2.0			

2. 実験概要

2.1 実施トンネル

今回吹付け実験に使用したトンネルは上信越自動車道五里ヶ峯トンネル・二期線工事・西工事である。トンネルの掘削は発破による補助ベンチ付き全断面掘削工法であり、全体的に良質な岩質であり、吹付けコンクリートの設計厚さは100mmであった。

2.2 使用材料および配合

表 - 1 , 表 - 2 に使用材料および配合を示す。使用材料は実施工に用いているものを使用した。骨材変動は品質に与える影響が大きいため練り混ぜ前に骨材の表面水試験および振るい分け試験を実施した。湿式吹付けで配合は単位セメント量 360kg/m³ とし、単位水量を減ずる目的で高性能減水剤を使用した。事前実験の結果から吹付けの吐出量が一定になるようにスランブは17cm とした。練り混ぜは現場プラントに設置してある 0.5m³ のミキサを用いて行い、10 t アジテータトラックで実験場所まで運搬した。

2.3 吹付けシステム

吹付けシステムは実施工に使用しているポンプ圧送方式のものを使用し、空気圧送長は 10m , コンプレッサーは 12m³/min のものを使用した。

2.4 実験要因

実験要因を表 - 3 に示す。実験要因はノズルから吹付け面までの距離、圧送空気流量および吹付け角度とした。ノズルと吹付け面までの距離は実験ケースごとにスタッフによって検尺した。圧送空気流量の「開放」は空気バルブの開放状態であり、「下限」は圧送限界までバルブを絞った状態とした。吹付け角度は通常に吹付けを実施した後、コアを採取した位置である。なお、本工事の標準的な施工方法は吹付け距離 2.5 m , 圧送空気流量開放状態である。

2.5 コア採取位置

コア採取位置を図 - 2 に示す。コア採取は吹付けコンクリートの水平部(0°)、天端部(90°)とその中間部(45°)とした。実験 No.1-90 , 2 , 3 , 4 は天端部から採集し、実験 No.1-0 , 1-45 は水平部、中間部から採取した。コア採取場所は直径 1m 程度の範囲を対象として材齢 7～10 日後に付着している岩盤ごと採取した。

2.6 試験方法

(1) 空隙率試験

空隙率試験は ASTM C642 に準拠し煮沸法によって実施した。供試体は写真 - 1 に示すように採取したコアを岩盤側からトンネル内空にかけて各供試体を 3cm ごとに切断し作製した。なお、各供試体の番号は岩盤側から , , とした。

(2) 骨材面積占有率

骨材面積占有率は空隙率を測定した供試体を写真 - 1 に示す破線で切断しその断面について粗骨材が占める面積を算出した。算出方法は定方位接線径¹⁾が5mm以上である骨材を粗骨材と判定し赤色に着色した。その後、供試体断面をデジタルカメラで撮影しコンピュータ処理により供試体断面の全面積に対する赤色に着色した領域の面積率を算出した。計測範囲は空隙率試

験と異なり、岩盤側の を 1cm と 2cm の厚さの供試体に分けて計測した。

(3) ビッカース硬さ試験

ビッカース試験²⁾は押し込み硬さ試験の一種で、ビッカース圧子（対面角が 136° のダイヤモンド正四角すい圧子）を用いて、試験面に永久変形を与え、その変形を生じるのに要した試験力と生じた永久変形の寸法から硬さを決定する試験である。なお、今回の試験力は 1000mN とし、供試体は空隙率試験に使用した供試体の一部を試験前にオイルカッターを用いて取り出し鏡面仕上げを行った。また、ビッカース硬さの算出方法を式(1)に示す。

$$HV = 189.10 \frac{PN}{L^2} \quad (1)$$

HV : ビッカース硬さ

PN : 試験力

L : くぼみの対角線長さの平均

(4) 細孔径分布試験

供試体は空隙率試験に使用した供試体の一部を試験前にオイルカッターにて取り出した。その後、供試体を粗砕しアセトンにて水和を停止した後、105℃で24時間乾燥させた試料を水銀圧入式ポロシメータを用いて細孔量と細孔径分布の測定を行なった。なお、水銀圧入式ポロシメータの細孔径の測定範囲は約 440 μm ~ 3.2nm であった。

3. 実験結果

3.1 空隙率試験結果

空隙率試験結果を図-3に示す。まず、吹付け角度の要因は No.1-0, No.1-90 の 供試体の空隙率が 24%程度と若干大きめではあるものの、全体的に 20% ~ 22%程度の範囲であった。次に吹付け距離および空気流量の要因において空気流量が低いケースで空隙率が 24%以上と高い値を示していた。この原因とし 2 つの要因を考えた。まず空気流量が下限値の場合、圧送速度が遅く

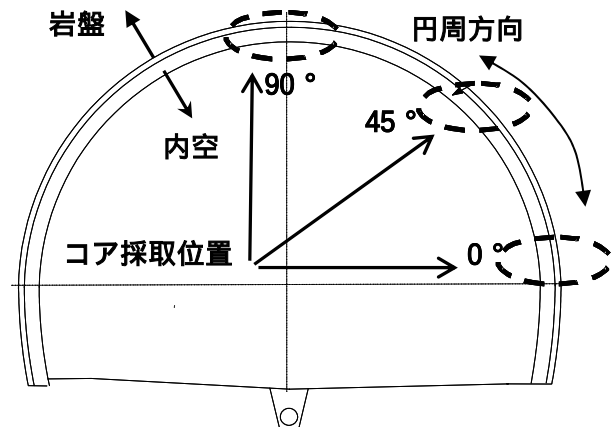


図 - 2 トンネル内コア採取位置

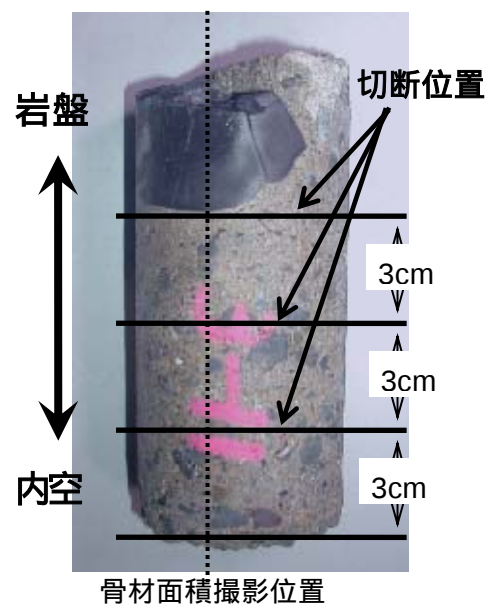


写真 - 1 コアおよび切断位置

脈動が生じることが予想される。それによりコンクリートと急結剤の混合が均等に行われず空気泡を多く含んだ状態で凝結したと考えられる。また、小林らの報告³⁾によると今回の実験において、空気流量が下限の場合、開放と比較して衝撃力が 30%程度低下していることが確認された。これらより、衝撃力が低下することにより吹付けによるコンクリートの締め固め効果が低下し空隙率が増加したと考えられる

3.2 骨材面積占有率試験結果

骨材着色処理画像例を図-4に示す。どの実験要因においても岩盤から 1cm 程度まで粗骨材がほとんど存在しない状況であった。粗骨材が付着するには吹付け面に骨材をある程度食い込

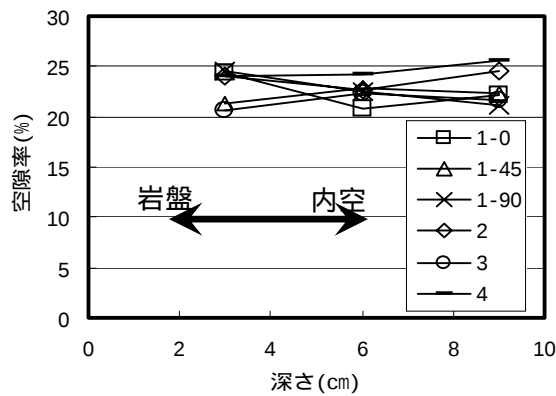


図 - 3 空隙率

ませなければならない⁴⁾。通常岩盤は骨材と同程度かそれ以上の硬度を有しているの骨材ははね返り、モルタルのみが付着する。その上に粗骨材が付着するためにはある程度の厚さのモルタル層が形成されなければならない。今回の実験ではモルタル層の形成は1cm程度有すれば粗骨材がモルタルに付着する事が確認できた。また、これらの状況をふまえて、岩盤から1cm、3cm、6cm、9cmにおける骨材面積占有率を測定し検討した。

骨材面積占有率について円周方向および天端部の試験結果を図 - 5、図 - 6 に示す。各実験要因とも岩盤から内空方向に行くにつれて、骨材面積占有率は増加している。特に1cmから3cmの間は顕著であり10～15%程度増加していることが確認できた。これは1cm～3cmの間でモルタル層が十分に形成されたため、骨材のモルタル層への食い込み量が増加し骨材面積占有率が増加したと考えられる。

ここで、空隙率および骨材面積占有率の実験結果から強度特性に影響を及ぼすと思われるモルタル中のモルタル空隙比を(2)式を用いて算出した。モルタル空隙比を図 - 7、図 - 8 に示す。円周方向においてNo.1-0、No.1-45は深さ9cmで若干上昇しているが、全体的にほぼ一定の値を示した。しかし、No.1-90は深さ3cmで他の2ケースと比較し若干高い値を示している。これは吹付け角度90°の場合、他の吹付け角度0°45°に比べリバウンド率が増加し、粗骨材が減少したため、モルタルの占める割合が増加し、

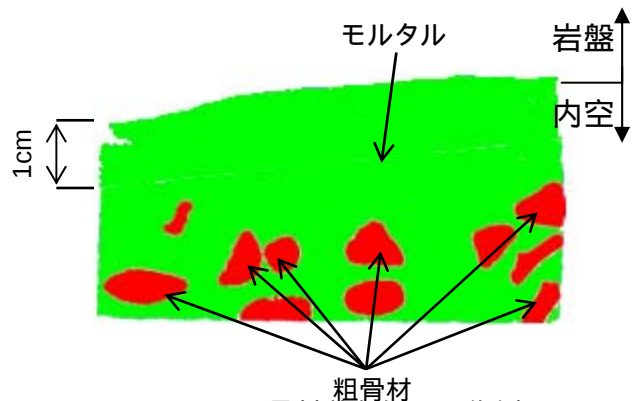


図 - 4 骨材着色処理画像例

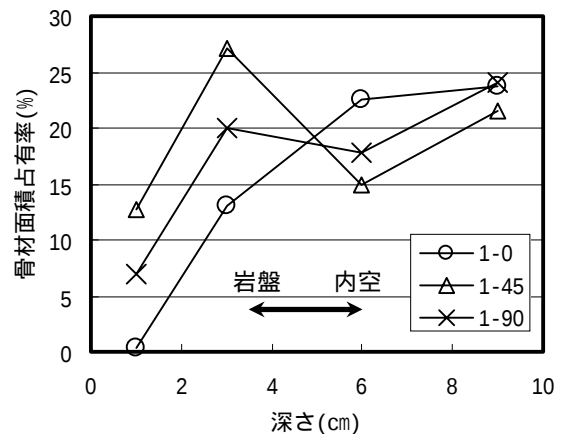


図 - 5 骨材面積占有率（円周方向）

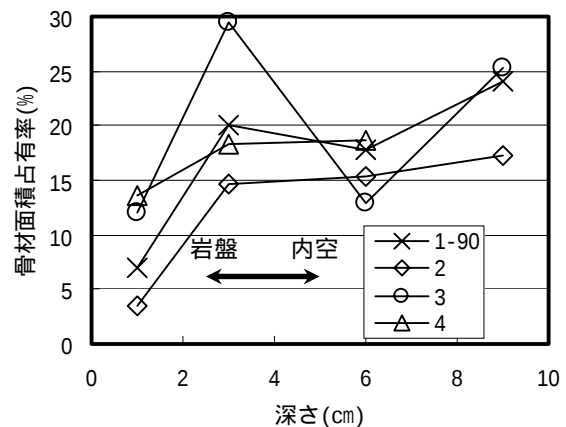


図 - 6 骨材面積占有率（天端）

$$M_v = \frac{V_0}{100 - G_0} \quad (2)$$

M_v : モルタル空隙比

V_0 : 空隙率

G_0 : 骨材面積占有率

重力の影響を受けことによりモルタル中の空隙が増加したと考えられる。また、深さ 9cm におけるモルタル空隙比は通常の吹付け作業が終了後ある程度硬化した後、再び吹付け作業を行ったため、岩盤に吹付けを行ったのと同じような状況になりモルタルが増加し空隙率が増加したものと考えられる。次に天端部において No.4 をのぞき深さ 6cm でモルタル空隙比が最低になった。天端部は円周方向と同様にモルタル量の増加と重力の影響で、深さ 3cm においてモルタル中の空隙が増加した。

3.3 ビッカース硬さ

ビッカース硬さ試験は各供試体について 30 回行い、その平均値の結果を図 - 9 に示す。円周方向において全ての深さで吹付け角度 45° が最も高く、ほぼ一定の数値を示した。深さ 3cm では 0° 、 45° 、 90° と同程度であったのに対して、深さ 6cm で吹付け角度 0° 、 90° は低下している結果となった。ビッカース硬さは藤井らの研究によって圧縮強度と線形の関係にあることを示している⁵⁾。今回の実験で円周方向のコア強度⁶⁾は吹付け角度 $0^\circ > 45^\circ > 90^\circ$ の順になっていた。しかしビッカース硬さ試験では、特にコア強度との相関はみられなかった。次に天端において No.3 (吹付け距離 3m)、No.2 (吹付け距離 1m) はどの深さにおいてもほぼ一定の値を示している。それに対して、No.1-90 (吹付け距離 2m)、No.4 (吹付け距離 2m、空気流量下限) は深さ 6cm での時、最低値を示した。円周方向同様天端でもコア強度および吹付け要因との相関関係がみられなかった。

3.4 細孔径分布試験結果

細孔径分布試験の結果は多少のばらつきはあるものの、全ての実験要因および深さ方向でほぼ同程度の値を示し優劣がつかない結果となった。そこで、コンクリートの強度に影響を及ぼすと考えられている細孔径 $50\text{nm} \sim 2\mu\text{m}$ の細孔量⁷⁾を取り出し比較検討した。 $50\text{nm} \sim 2\mu\text{m}$ の細孔量およびビッカース硬さを図 - 10 に示す。どの実験要因においても相対的に細孔量とビッ

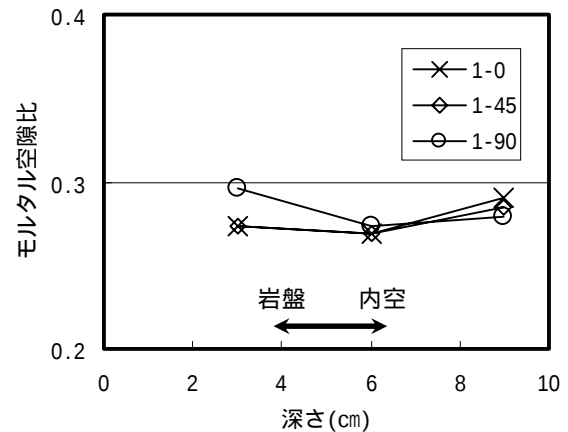


図 - 7 モルタル空隙比 (円周方向)

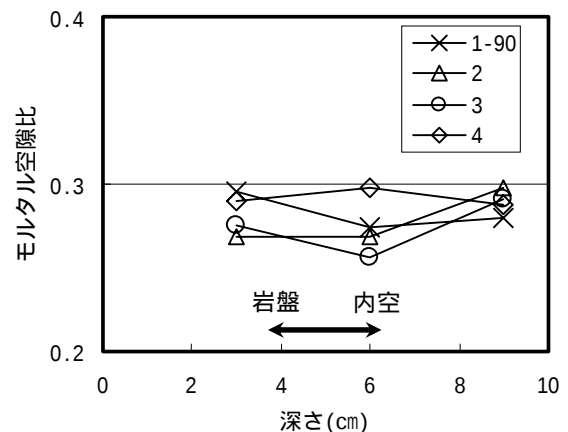


図 - 8 モルタル空隙比 (天端)

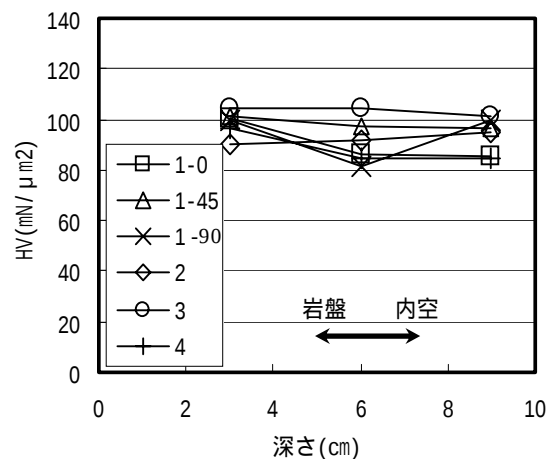


図 - 9 ビッカース硬さ

カーズ硬さは高い相関性有ることが確認できる。特に No.1-90 は細孔量の増減と共にビッカース硬さが増減していることが分かる。

4. まとめ

- (1) 吹付けコンクリートの空隙率は全体的に 20 ~ 25%程度であった。
- (2) 圧送空気流量が少ない場合、岩盤から内空にかけて空隙率は増加する。

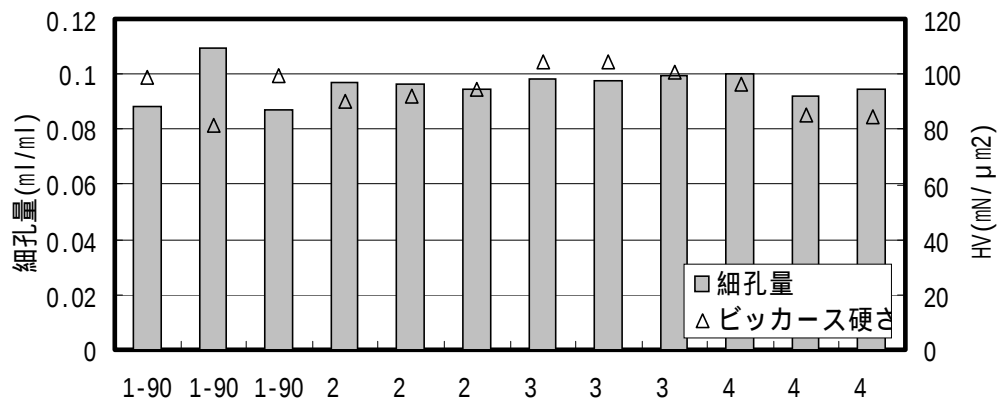


図 - 10 50nm ~ 2μm の細孔量およびビッカース硬さ

- (3) 粗骨材の付着はモルタル層が1cm程度以上形成されると良好になる。
- (4) 天端の岩盤付近は粗骨材のリバウンドによるモルタル量の増加と重力の影響で、モルタル空隙比が増加する。
- (5) 細孔径 50nm ~ 2μm の細孔量はビッカース硬さと高い相関性が有ることが確認出来た。

謝辞

本実験は、東京大学生産技術研究所における「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る。ここに共同研究員である(株)エヌエムピー 清水哲史氏、(株)大林組 藤井剛氏、鹿島建設(株)大野俊夫氏、佐藤工業(株)小林裕二氏、清水建設(株)栗林勇司氏、大成建設(株)坂本淳氏、(株)太平洋セメント(株)大森啓至氏、(株)竹中土木 安藤慎一郎氏、電気化学工業(株)荒木昭俊氏、東急建設(株)伊藤正憲氏、戸田建設(株)田中徹氏、飛島建設(株)平間昭信氏、西松建設(株)松浦誠司氏、および協力会社として御協力いただいた富士物産(株)阿部隆夫氏、(株)北川鉄工所見浦光夫氏、(株)東京測器研究所 佐藤辰也氏、(株)ブリヂストン 深津章文氏、また、施工現場を提供し実験に協力していただきました、日本道路公団東京建設局佐久工事事務所更埴工事区ならびに五里ヶ峯トンネル西工事の前田建設・本間組共同企業体のみなさま、さらに実験を手伝ってくれた東京大学博士課程ファン・ウォック氏、加藤

絵万氏、藏重勲氏、千葉工業大学大学院生高羅信彦氏、伊藤一聡氏、芝浦工業大学大学院生宮本一成氏に書面を借り深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 荒井康夫: 粉体材料の科学, 培風館, pp.161, 1992
- 2) 大脇英司ほか: 微小硬さ試験機を用いたコンクリートの機械的な性能の劣化範囲の診断, 大成建設技術研究所報第30号, pp.49-52, 1997
- 3) 小林裕二ほか: 吹付け面での吹付け圧力からみた最適吹付け条件の設定方法に関する考察, コンクリート年次論文報告集, vol24, 2002.6 (投稿中)
- 4) 牧剛史ほか: 吹付けコンクリートの特性に関する基礎的研究(1) ペースト骨材間の付着挙動に関する数値的考察, 生産研究, 49巻2号, pp.23-26, 1997.2
- 5) 藤井卓: 凍結融解作用をうける硬化セメントペーストの微小硬度変化, 土木学会第44回年次学術講演会, pp.622-623, 1989
- 6) 大野俊夫: 吹付けコンクリートの強度特性に関する一考察, コンクリート年次論文報告集, vol24, 2002.6 (投稿中)
- 7) H.Uchikawa : ENGINEERING FOUNDATION VCONFERENCE "ADVANCES IN CEMENT MANUFACTURE AND USE", pp.271-294, 1988