

高品質吹付けコンクリートの粘性特性と 施工管理指標に関する研究

Study on Viscous Characteristic and Index for Construction Control of
High Quality Shotcrete

登坂敏雄¹・伊藤祐二²・末永充弘³
Toshio Tosaka, Yuji Ito and Mitsuhiro Suenaga

¹正会員 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部
(〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1)

²正会員 工修 石川島建材工業株式会社 技術研究所 (〒252-1121 神奈川県綾瀬市小園720)
E-mail:yuuji_ito@ikk.co.jp

³正会員 住鉱コンサルタント株式会社 営業本部 (〒110-0008 東京都台東区池之端2-9-7)

High quality shotcrete (HQSC) is a new type of shotcrete utilizing own viscosity generated by a mixed powder for the improvement in a construction performance on the tunnel site. Although the viscosity which is the feature of HQSC has been evaluated qualitatively, the quantitative evaluation and the test method to control the viscosity on a construction site has been insufficient. This paper describes the test result of the viscous characteristics, and proposes the index for construction control of HQSC on site.

Key Words : high quality shotcrete, index for construction control, viscosity, rebound, dust

1. 高品質吹付けコンクリートの概要

高品質吹付けコンクリート¹⁾ (HQSC) は粉体の混入により発生するコンクリートの粘性を、施工性能向上に活用した新しいタイプの吹付けコンクリートである。平成9年度以降、HQSCは整備新幹線トンネル施工において、トンネル支保部材の高品質化、およびはね返り率や粉じん発生量の低減など、施工の高度化を目的に100箇所以上の施工現場で使用されている。

これまで、HQSCの特徴である粉体の混入によって発生する粘性の定性的な評価は行われてきたが、定量的な評価および現場における粘性の管理手法についての検討は十分とはいえなかった。

今回、HQSCの現場配合決定に際して、現地プラントによる試験練り、および試験吹付け時のデータをもとに、主として粘性特性を検討する機会を得たので、検討結果の概要を述べるとともに施工時の粘性管理指標を提案する。

2. 高品質吹付けコンクリートの配合と製造

(1) 配合条件

配合決定における主な条件は以下の通りである。

- 1) 結合材料はセメント(C)およびシリカフェューム(SF)として、全体量は従来の結合材量と同じ 360kg/m^3 とし、SFは、結合材量の内割り5%で 18kg/m^3 とする。
- 2) 石灰石微粉末量は細骨材の0.15mm以下粒子の必要含有率を15%と考えて、石灰石微粉末量を加えて15%となるように設計配合量を決定する。従って、結合材量に対しては外割りであり、細骨材量にとっては内割りである。
- 3) 水結合材比($W/(C+SF)$)、細骨材率(s/a)は現地試練りの結果より、所要スランプを確保するのに必要な割合を高性能減水剤の使用量と共に求める。
- 4) 切羽における設計スランプは吹付け機種の搬送方式別に定め、ポンプ搬送の場合に $8\pm 2\text{cm}$ 、空気搬送式の場合には $14\pm 2\text{cm}$ とする。
- 5) 練混ぜ方法は分割練混ぜ (SEC工法、以下省

略)を基本としている(図-1参照)。

(2) 示方および現場配合

示方配合および現場配合例を表-1および2に示す。HQSCの適用範囲は全国に亘っており、骨材、特に細骨材の物理特性値も広範囲に分布している。HQSCの粘性特性に対しては細骨材の材質、粒度、形状、さらにこれらを含め細骨材粒子の表面形状等に起因する保水特性が重要な要因となっていると考えられる。

(3) 分割練混ぜ(SEC)

通常のコンクリートが材料を一括投入して練混ぜるのに対して、分割練混ぜ(SEC)では一次練り、二次練りの連続した練混ぜ工程を経る。練混ぜのフローチャート例を図-1に示す。

<一次練り> 骨材に一次水を加え、調整練りを行った後、粉体を加えて練混ぜる。これにより骨材の周囲に粉体が付着し、造殻される。この時の造殻状態が最良となる一次水量は、事前に試験値(α , β_{OH})を求めた後、式(1)²⁾により決定している。

$$W1 = \frac{\alpha}{100} \times B + \frac{\beta_{OH}}{100} \times S \quad \dots\dots (1)$$

ここに、

$W1$: 一次水量 (kg/m³)

α : 粉体のキャピラリー状態を形成するために必要な水粉体比(%) (「トルク試験」によって求める。)

β_{OH} : 細骨材の拘束水率(%)

(細骨材の材質、粒度、形状などの相違により変化するため「遠心力試験」によって求める。)

B : 単位粉体量(=C+SF+L) (kg/m³)

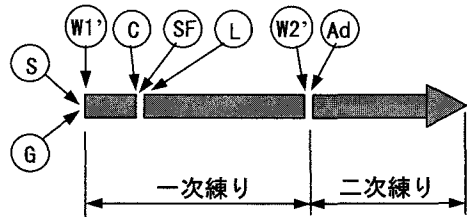
C : 単位セメント量(kg/m³)

SF : シリカフェーム混和量(kg/m³)

L : 石灰石微粉末混和量(kg/m³)

S : 単位細骨材量(kg/m³)

<二次練り> 造殻された骨材に二次水および混和剤を加えて練混ぜ、これによって造殻の一部を残し、セメントは二次水中に分散して、均質で良好な流動性を有するコンクリートが練混ぜられる。



S: 細骨材, G: 粗骨材, C: セメント, Ad: 混和剤

SF: シリカフェーム, L: 石灰石微粉末

W1': 一次水量-骨材表面水量

W2': 二次水量-Ad

図-1 練混ぜのフローチャート例

3. 粘性の検討方法

(1) コンクリートの粘性

通常、コンクリートの粘性については、図-2に示すようにビンガム流体として、降伏値および塑性粘度を与えてその特性を説明している³⁾。

一般に、スランプは降伏値に近い特性を表す指標とされている。一方、塑性粘度(η)は、 $\eta = (\text{ずり応力度}) / (\text{ずり速度})$ と定義されている。

コンクリートの流動において、ずり初速度を与

表-1 示方配合の例

粗骨材の最大寸法 (cm)	スランプの範囲 (cm)	水結合材比 (W/(C+SF)) (%)	細骨材率 (s/a) (%)	単位セメント量 (C) (kg)	石灰石微粉末(L) (S×%) (%)	混和材料		
						急結剤(Ad) (C+SF)×%	混和材(SF) (C+SF)×%	高性能減水剤
10~15	8±2	55~60	60~65	342	概ね15	4~7	5	必要量

標準スランプ(切羽) ポンプ搬送式吹付け機: 8±2cm, 空気搬送式吹付け機: 14±2cm

表-2 現場配合の例

粗骨材の最大寸法 (cm)	スランプの範囲 (cm)	水結合材比 (W/(C+SF)) (%)	細骨材率 (s/a) (%)	単位量(kg/m ³)						
				水	セメント	シリカフェーム	細骨材	石灰石微粉末	粗骨材	高性能減水剤
				W	C	SF	S	L	G	Ad
10	8±2	59.7	61.7	215	342	18	994	87	689	2.124

えるのが降伏値(τ_0)であり、流動に際して最小の(ずり応力度)である。

フレッシュコンクリートは質量が異なる材料同士の混合体であり、ペーストが成立するための粉体と水との保水性、モルタルが成立するための細骨材とペーストとの一体性、さらにモルタルが粗骨材を捉えて離さないコンクリートの材料分離抵抗性や、フレッシュコンクリートの流動特性などの粘性特性を、塑性粘度が総合的に表現していると考えられる。

(2) 検討方法

吹付けコンクリートはトンネル坑口に設置されたプラントで練混ぜられ、トンネル切羽まで運搬されて吹付けられる。現場吹付け試験は着工当初であるので、練上がり後 30 分経過後を切羽到着時と仮定し、粘性特性の検討においては練上がり直後(0 分)と切羽到着時(30 分)を主たる検討対象とした。

検討にあたって採用した粘性指標としては、スランプ、コンクリートを 5mm フルイでウェットスクリーニングしたモルタル試料のフロー試験値である 0 打フロー(f_0)と 15 打フロー(f_{15})の他、羽根沈入型粘性試験器⁴⁾(図-3 参照)による塑性粘度とした。

一方、粘性項に影響を与える要因・因子としては単位水量、水セメント比、細骨材の物理特性値、粉体量、混和剤量などがあり、因子相互間も含めて検討を行った。検討は、有効データ間において 1 粘性項に対して 1 要因・因子との関係を直線相関として、相関係数をフィッシャーの有意水準表により検定する方法によった。

(3) 流動係数(K)

モルタルフロー試験の方法は下記①から③に示すとおりである。

① 恒温、恒湿条件下で、フローテーブル上にフローコーンを設置し、所定の方法により試料モルタルをフローコーンに充填した後、フローコーンを引き上げて試料の直径を mm 単位で測定し、これを無名数の整数として f'_0 とする。

② 次に、15 回/15 秒の割合でテーブルを上下させて打撃エネルギーを連続 15 回与えた後の直径を同様に測定し、 f'_{15} とする。

③ ①、②を 2 回繰り返す、平均値を f_0 、 f_{15} とする。 f_0 、 f_{15} の評価の他、純打撃エネルギーによる拡散値としての($f_{15}-f_0$)にも着目して、粘性評価にあたって次のように考えた。

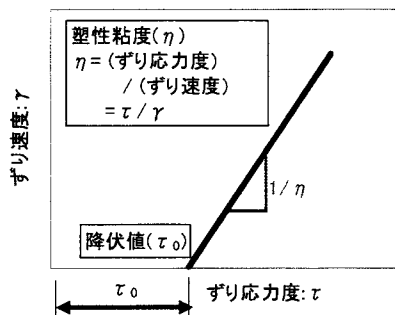


図-2 ビンガム流動の概念

1) ($f_{15}-f_0$)は、15回/15秒の割合(一定速度下)での拡散量(モルタル直径の拡大量)であり、15秒当たりの拡散速度(mm/15秒)とも考えられる。

2) (f_{15})は試料の自重と15回打撃エネルギーによるモルタル試料の直径であるが、試料の自重による項を無視すると、15回打撃エネルギーによる仕事量と考えれば、これにより($f_{15}-f_0$)の純拡散量が生じたものとも考えることができる。

フローテーブル上でのモルタルの拡散状況について考えると、所要時間15秒間に15回打撃エネルギーによる、モルタルの拡散量が($f_{15}-f_0$)である。ここで、エネルギーを「応力度」に、拡散量を「ずり速度」に変換が可能なものとする、この変換定数を(C)とおき、

$$\text{塑性粘度} = \frac{\text{ずり応力}}{\text{ずり速度}} \cong C \times \frac{f_{15}}{f_{15}-f_0} \quad \dots\dots (2)$$

に近似されることが出来る。以上のようなことから、本文では $f_{15}/(f_{15}-f_0) = K$ (流動係数)と定義して塑性粘度に近い指標として用いることとした。

(4) 羽根沈入型粘性試験

本試験は図-3 に示すような 3 枚の羽根を有する治具を、モルタルに自重で沈入させて粘性を測定する。1 試料について数種類の沈入羽根(錘を含む)の重量 W(以下、記号については図-3 参照)を用いて試験を行う(沈入速度が変化する)ことにより、沈入速度 $vt(=L/T)$ とずり応力度 $\tau(=W/A)$ の関係が得られる。沈入速度をモルタルのせん断領域の幅(h:羽根の沈入によりせん断変形を生じるモルタルの羽根からの距離)で除した値 vt/h がずり速度 γ となる。モルタルをビンガム流体と考えると、塑性粘度(η)は τ/γ で与えられる

(図-2 参照)。

本試験により得られた結果を図-4に示す関係に整理して η' (見かけの塑性粘度)を求める。しかし、モルタルのせん断領域幅(h)を測定することは非常に困難であるので、 η が既知のオイル($\eta=20\sim300\text{Pa}\cdot\text{s}$)に本試験を適用して、 η と η' の関係式(校正線)を求めた。すなわち、塑性粘度は η' と校正線により算出した。なお、本試験では、沈入時に作用する浮力およびせん断面積が一定になるように、羽根がモルタルに完全に埋まった状態から沈入させ、測定を開始した。

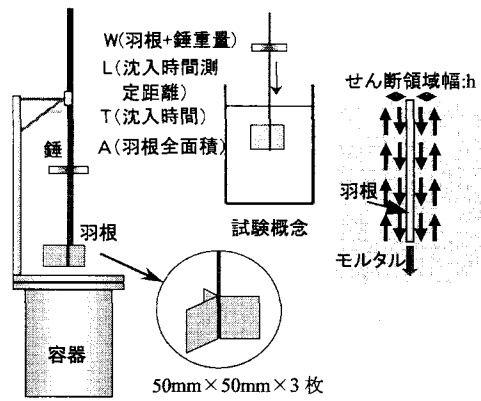


図-3 羽根沈入型粘性試験機

4. 粘性の検討結果

(1) 細骨材の地域特性と配合要因

主たる施工現場は東北、九州および北陸の3地域で施工されている新幹線トンネルである。表-3に地域別細骨材特性と配合要因を示す。この表によると、0.15mm以下粒子含有率($S_{0.15}$)や細骨材の保水特性を表現していると考えられる拘束水率(β_{OH})の平均値は北陸が最も小さく、東北、九州の順に大きくなっている。また、北陸の場合と比べて九州や東北でのバラツキが非常に大きいことが分かる。

このように細骨材の地域特性により、石灰石微粉末(L)の置換量が異なり、 α にそれほど差がないにもかかわらず単位粉体量や一次水粉体比が大きく変化している。

つづいて、図-5に $S_{0.15}$ の分布を示す。 $S_{0.15}$ は5~12%まで大きく変化しており、HQSCの粘性や安定性(経時変化やポンプ圧送性など)に大きな

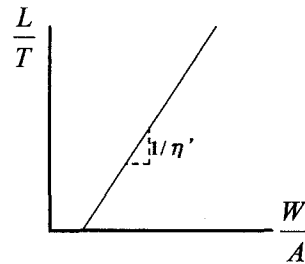


図-4 試験結果の例

表-3 地域別細骨材特性と配合要因

地域	項目	最大	最小	平均
東北	0.15mm以下 (%)	10	5	7
	FM	3.18	2.39	2.58
	β_{OH} (%)	7.95	0.13	2.49
	L (kg/m^3)	110	55	90
	B^{*1} (kg/m^3)	470	415	450
	α (%)	26.0	22.0	23.7
	W1 (kg/m^3)	165.7	109.6	124.2
	W1/B (%)	41.7	25.3	28.8
	s/a (%)	62.0	56.0	60.8
	0.15mm以下 (%)	7	5	6
北陸	FM	2.97	2.52	2.84
	β_{OH} (%)	2.37	0.82	1.59
	L (kg/m^3)	118	90	103
	B^{*1} (kg/m^3)	478	450	463
	α (%)	26.0	22.0	22.9
	W1 (kg/m^3)	138.6	106.0	118.1
	W1/B (%)	30.8	23.1	25.5
	s/a (%)	64.0	60.0	61.8
	0.15mm以下 (%)	12	6	8
	FM	2.96	2.22	2.64
九州	β_{OH} (%)	7.72	1.27	2.78
	L (kg/m^3)	97	40	76
	B^{*1} (kg/m^3)	458	400	437
	α (%)	25.0	21.0	22.4
	W1 (kg/m^3)	170.9	99.9	121.3
	W1/B (%)	39.0	23.2	27.8
	s/a (%)	64.0	55.0	61.6
	0.15mm以下 (%)	12	6	8

*1:粉体量(=C+SF+L)

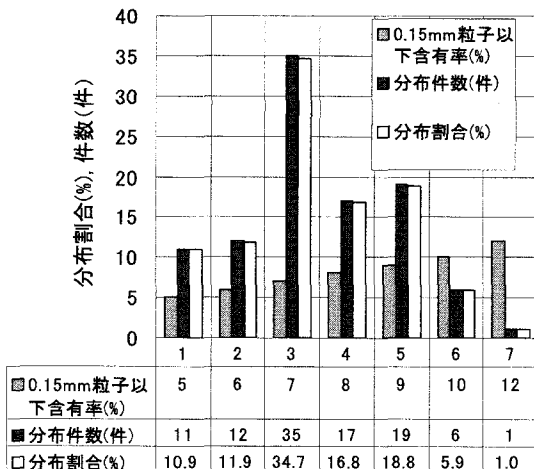


図-5 細骨材の微粒分含有率分布

差が生じることがうかがえる。 $S_{0.15}$ と β_{OH} の関係を示した図-6からも、前述のことが確認できる。

(2) スランプと粘性の関係

練上りおよび切羽におけるスランプと、モルタルフロー試験より得られた粘性に関する値（以下、粘性項： $f_0, f_{15}, (f_{15}-f_0), K$ ）との関係を検討した結果、スランプと各粘性項との間には相関が認められた（危険率 10%以下）。練上りと切羽におけるスランプと各粘性項との関係もほぼ同様であった。

切羽におけるスランプと f_0 の関係を図-7に示す。この図より、切羽スランプと切羽 f_0 の関係は 0.1%危険率で有意差があり、コンクリートの降伏値がスランプと非常に深い関係を有することが言える。

続いて、切羽スランプと切羽流動係数（ K ）の関係を図-8に示す。この場合には 10%危険率で有意差があるものの、 f_0 の場合に比べて相関度は小さい。 K はコンクリートの塑性粘度とほぼ同意と考えられるので、図-8の関係はスランプが大きいコンクリートは塑性粘度が小さいことを意味していると考えられる。

(3) 粘性の経時変化

図-9～12にスランプおよび各粘性項の、練上りおよび切羽における関係を示す。これらの図には、練上りと切羽における値が 1 : 1 の場合を点線で示している。

図-9より、練上りスランプ 10～15cm の場合に、練上りから切羽までの 30 分間で 2～3cm 低下している。 f_{15} の場合（図-10 参照）にも練上りフロー 140～200 の範囲では、30 分間で 0～12mm 低下している。すなわち、HQSC は時間の経過とともに降伏値が増加し、その結果スラ

ンプやモルタルフロー値（ f_{15} ）が低下していることを表している。

図-11に $(f_{15}-f_0)$ の比較を示す。 $(f_{15}-f_0)$ は 15 秒当たりのモルタル直径の拡散速度を示していることから、経過時間とともに HQSC の変形性能も低下していることになる。

続いて、図-12にコンクリートの塑性粘度に近

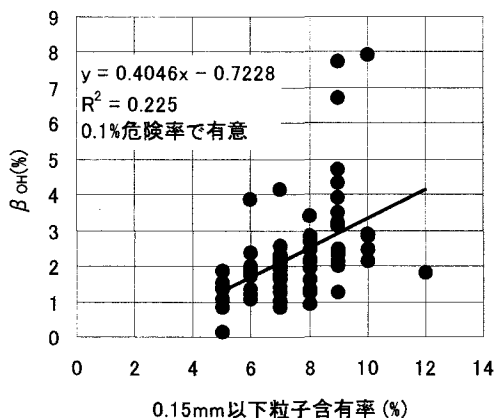


図-6 0.15mm 以下粒子含有率と β_{OH} の関係

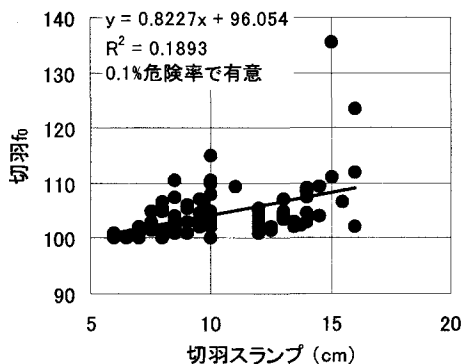


図-7 切羽スランプと切羽 f_0 の関係

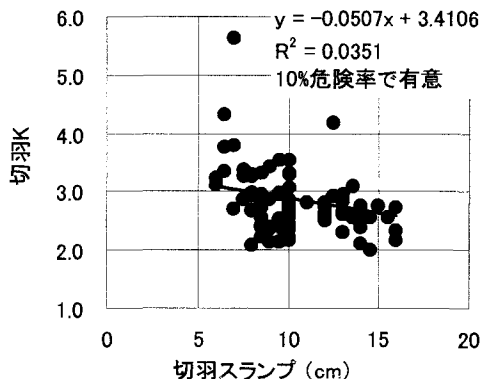


図-8 切羽スランプと切羽 K の関係

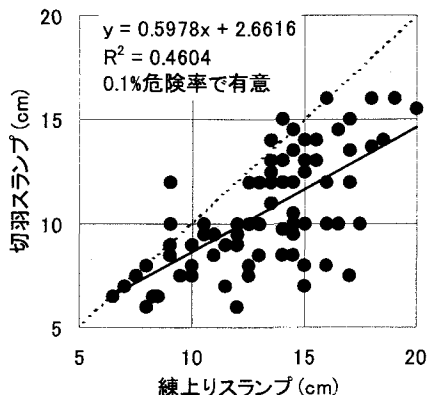


図-9 練上りと切羽におけるスランプの比較

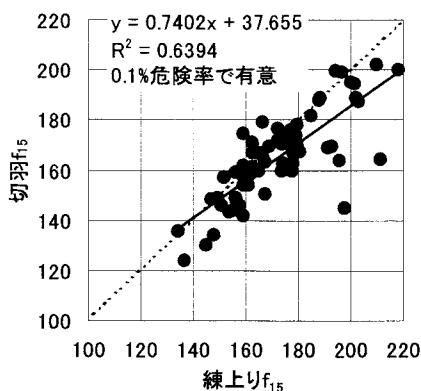


図-10 練上りと切羽における f_{15} の比較

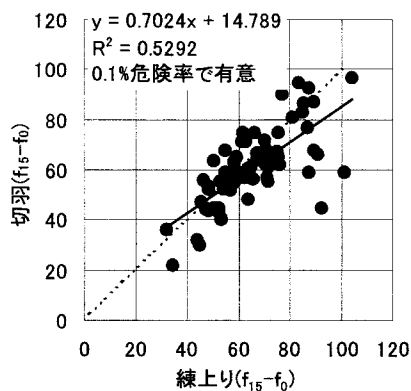


図-11 練上りと切羽における $(f_{15}-f_0)$ の比較

い指標と考えられる K (流動係数) の場合を示す。 K は練上りと切羽とでほぼ 1 : 1 の関係に近く、経時による塑性粘度の変化が小さいことが分かる。

以上の検討結果より、練上り後の時間が HQSC の粘性におよぼす影響は、降伏値が増加して変形性能も低下するものの塑性粘度の変化は小さく、HQSC の材料分離抵抗性などの安定性が高いことを表していると考えられる。

(4) 羽根沈入型粘性試験結果

本粘性試験は練上り直後にモルタルフロー試験と対応して別途行った。図-13 に降伏値と f_0 の関係を、図-14 に流動係数 (K) と塑性粘度の関係を示す。図-13 の場合には危険率 1% で、図-14 の場合には危険率 0.1% で有意差がある。

図-13 では f_0 が大きい (流動性が大きい) ほど降伏値が小さくなることを示している。一方、図-14 では塑性粘度に K が対応し、 K が大きい場合ほど塑性粘度も高くなっており、実測データとの関係からもうなずける結果となっている。

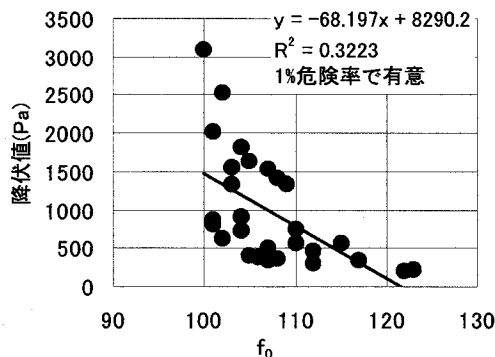


図-13 降伏値と f_0 の関係

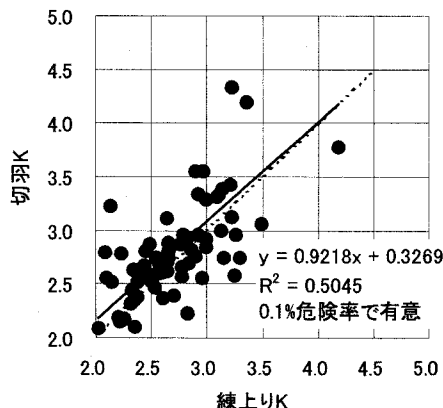


図-12 練上りと切羽における K の比較

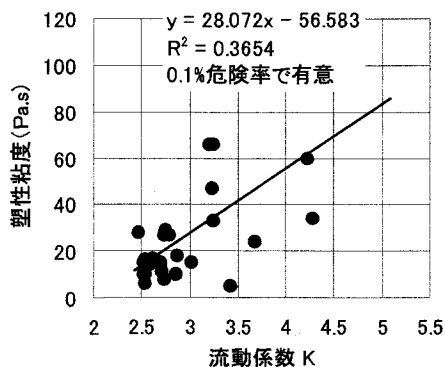


図-14 K と塑性粘度の関係

(5) 施工性と流動係数の関係

ここでは、平成 9、10 年度の実態調査時に得られた施工性データ⁵⁾と流動係数の関係を検討した。図-15 に流動係数とはね返り率の関係を、図-16 に流動係数と粉じん発生濃度の関係を示す。なお、粉じん発生濃度は従来の幾何平均であり、現在一般に行われている測定方法による値よりも大きめの値となる。

図-15 の場合には危険率 10%で有意差があるが、図-16 の場合には危険率 10%の有意水準には僅かに及ばなかった。施工性能データは現場における実測データであり、バラツキが比較的大きいにもかかわらず施工性能データと K には強い関係のあることが分かる。

図-15 によると、はね返り率 20%以下の場合が多数を占めていることが分かり、HQSC の効果は明らかである。また、筆者らは通常の吹付けコンクリートの場合には、現在一般に行われている切羽から 50m 位置で測定した場合の粉じん発生濃度が $6\text{mg}/\text{m}^3$ 程度と認識しているが、図-16 の場合には半分以上がこの値未満であり、HQSC の粉じん低減効果を示していると考えている。

施工性データと K との関係を直線近似した場合には、はね返り率の目標を仮に 15%以下とした場合には $K > 4.4$ が必要となる。粉じん発生濃度の場合には、現在の測定方法でのデータを蓄積することで、K の目標値を設定して施工管理にあたることが可能となると考えられる。

なお、K の目標値設定に当たっては地域性を考慮すること、および施工性データを蓄積することが重要と考えている。

5. まとめ

高品質吹付けコンクリートの現場配合決定に際して、採用開始以来の現地プラントによる試験練り、試験吹付け結果および平成9,10年度実態調査時のデータをもとに、粘性特性について検討した。その結果、本検討の範囲内で以下のことが言える。

- 1) 現場で比較的簡単に行うことが可能な、モルタルフロー試験より得られる流動係数 (K) は、コンクリートの塑性粘度と深い関係を有しており、施工現場における粘性管理指標となり得る。
- 2) はね返り率や粉じんの低減には、高品質吹付けコンクリートの粘性 (塑性粘度) を大きくすることが有効である。
- 3) 細骨材の地域特性により、石灰石微粉末の置

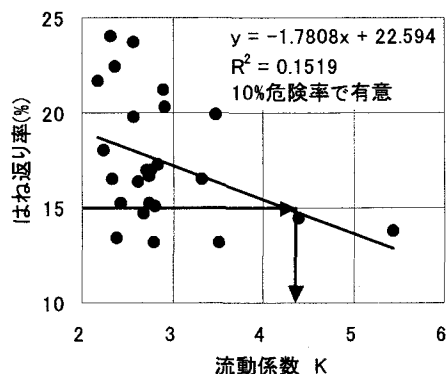


図-15 流動係数とはね返り率の関係

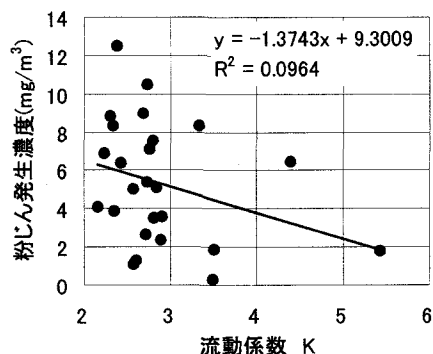


図-16 流動係数と粉じん発生濃度の関係

換量が異なり、単位粉体量や一次水粉体比が大きく変化している。このことが、粘性の経時変化の不安定さをもたらし、現場によっては高品質吹付けコンクリートの施工性低下や品質を含めたバラツキの要因となっていると考えられる。

参考文献

- 1) 北川ほか：微粒分を混入し粘性を活用した高品質吹付けコンクリートの諸特性，土木学会，トンネル工学研究発表会論文・報告集，Vol.7，pp.31-38，1997.
- 2) 日本鉄道建設公団：高品質吹付けコンクリート設計・施工指針(案)，1997.5.
- 3) (社)土木学会：土木工学ハンドブック，Vol. I，pp.171-172，1989.11.
- 4) 室賀ほか：モルタルの粘性評価試験装置の開発，土木学会年次学術講演会概要集，第5部，No.405，2000.
- 5) 伊藤ほか：分割練混ぜによる新吹付けコンクリートの施工実態，土木学会年次学術講演会概要集，第6部，pp.400-401，1999.