

細骨材の保水特性が高品質吹付けコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響

Influence of Water Retention Characteristic of Fine Aggregate on Fresh Properties of High-Quality-Shotcrete

登坂敏雄¹・伊藤祐二²・櫻井清一³・末永充弘⁴・朝倉俊弘⁵

Toshio Tosaka, Yuji Ito, Seiichi Sakurai, Mitsuhiro Suenaga and Toshihiro Asakura

¹正会員 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 (〒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: yuji_ito@ikk.co.jp

³正会員 リブコンエンジニアリング株式会社 (〒110-0006 東京都千代田区有楽町1-12-1)

⁴正会員 住鉄コンサルタント株式会社 (〒110-0008 東京都台東区池之端2-9-7)

⁵正会員 京都大学大学院 工学研究科 教授 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

High-quality-shotcrete (HQSC) began to be applied on the site of New Bullet Train Projects in fiscal year 1997 about ten years ago. A viscous characteristic when it is fresh, the use realities of the fine aggregate, the strength characteristic, and the strength characteristic of hardened materials have been examined for HQSC. Authors have examined the water retention characteristic of powders and the fine aggregate from the result of the fine aggregate data and the test mixing on 119 sites. This report describes the result of the examination about the influence of the water retention characteristic on the fresh properties of HQSC.

Key Words : high-quality-shotcrete, water retention characteristic, fine aggregate, fresh properties

1. はじめに

高品質吹付けコンクリート¹⁾ (HQSC) は 1997 年度から整備新幹線の現場で使用されはじめ、これまで既に約 10 年が経過している。この間、2002 年に東北新幹線(盛岡・八戸間)が、2004 年には九州新幹線(新八代・鹿児島中央間)が開業しており、東北・九州地域では大量の細骨材需要があったと考えられる。全国的に天然砂が少ない中で、特に東北・九州地域においては天然砂の供給が逼迫し、砕砂の使用が急増している。

筆者らはこれまで高品質吹付けコンクリートに関して、フレッシュ時の粘性特性と施工性能²⁾、細骨材の使用実態と強度特性³⁾、硬化体の強度特性⁴⁾などについて検討を行ってきた。本論文はこれまで施工された 119 現場の細骨材データと現場試験練りの実績から、細骨材物理特性と保水特性について検討・考察を行い、保水特性が HQSC の品質に及ぼす影響、遠心力試験方法の検討結果など、得られた知見について述べたものである。

2. 高品質吹付けコンクリートの特徴

(1) 配合条件

HQSCは従来の吹付けコンクリート配合をベースとしており、主要な条件は以下の通りである。

- i) 結合材料はセメント(C)およびシリカフューム(SF)として、全体量は従来の単位セメント量と同じ 360kg/m^3 とし、SFは結合材量の内割り5%で 18kg/m^3 とする。
- ii) 石灰石微粉末(L)量は細骨材の 0.15mm 以下粒子含有率($S_{0.15}$)の必要率を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。したがって、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。
- iii) 水結合材比($W/(C+SF)$)、細骨材率(s_a)は現地試験練りの結果より、所要スランプを確保するに必要な割合を高性能減水剤の使用量と共に求める。
- iv) 切羽時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。
- v) 練混ぜ方法は分割練混ぜ(SEC)工法を基本とする。

(2) 分割練混ぜ(SEC)

分割練混ぜ(SEC)工法は、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、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)⁹⁾により決定している。

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

$$\beta_{OH} = \frac{(\beta_o - Q)}{(1 + \frac{Q}{100})} \quad (2)$$

ここに、

W1：一次水量 (kg/m³)

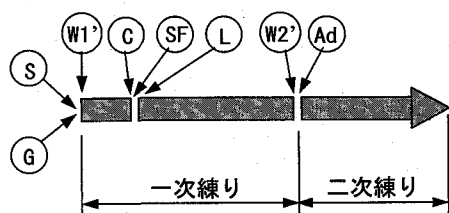
α ：粉体と水との混合において気泡を含まないもっとも強い結合状態（キャピラリー状態）を形成するのに必要な水粉体比(%)（「トルク試験⁹⁾」によって求める。）

β_{OH} ：細骨材の表面吸着水率(%)

β_o ：細骨材の吸着水率(%)

(β_{OH} および β_o は細骨材の材質、粒度、形状などの相違により変化するため「遠心力試験⁹⁾」によってその都度求める。

Q：細骨材の吸水率(%)



S：細骨材、G：粗骨材、C：セメント、Ad：混和剤

SF：シリカフューム、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

B：単位粉体量(=C+SF+L)(kg/m³)

C：単位セメント量(kg/m³)

SF：シリカフューム混入量(kg/m³)

L：石灰石微粉末混入量(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。

(3) 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のフレッシュ時および硬化後の特性に関しては粉体および細骨材の材質、粒度、粒形、さらに表面形状など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. 細骨材特性とHQSCのフレッシュ特性

(1) 細骨材種別の地域分布

データを地域別に見ると、現場数で東北地域26%、北陸地域27%、九州地域42%、その他5%の割合となっており、九州地域が多い。現場配合に大きな影響を及ぼす細骨材は6種類あり、図-2に東北、北陸、九州地域の順に地域別分布状況を示す。この図によると、九州地域の細骨材は砕砂が主であり、東北地域も混合砂を含めると砕砂が多くなっている。これに対して、北陸地域は川、山砂など天然砂が主体となっている(北陸地域の砕砂は全て石灰石砕砂)。

(2) 地域別のHQSCの配合

配合条件から、 $S_{0.15}$ が大きい場合にはLの単位量が少なくなり、単位粉体量Bも少なくなる。

表-1 示方配合

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

ポンプ搬送式吹付け機の場合の標準スランプ(切羽)：8±2cm、Lは標準配合の示方であり、詳細は文献1)による。

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	シリカフューム	細骨材	石灰石微粉末	粗骨材	高性能減水剤
10	8±2	59.7	61.7	W	C	SF	S	L	G	Ad
				215	342	18	994	87	689	2.124

表-3 に HQSC の地域別配合要因を示す。細骨材の地域特性により、水粉体比(α)にそれほど差がないにもかかわらず、単位粉体量(B)や一次水粉体比(W1/B)が大きく変化している。例えば、単位粉体量では、北陸地域の最小量が 450(kg/m³)に対して、東北の平均値、九州の最大値がほぼこの値に相当している。さらに、北陸では W1/B=24.3~28.8%に対して、東北では 21.6~40.8%、九州では 24.3~32.7%となっており、北陸地域の W1/B の値が他地域と比べて小さくて範囲が狭く、かつ安定していることが分かる。

このように細骨材特性によって HQSC の配合が変化し、粘性や分離抵抗性などのフレッシュ性状が変化して吹付け時の施工性²⁾に大きな影響を及ぼしていることが考えられる。このことについては、SEC による造殻効果

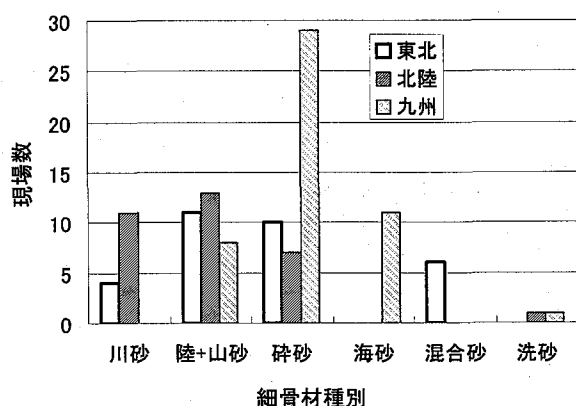


図-2 細骨材地域分布

表-3 高品質吹付けコンクリートの地域別配合要因

地域	項目	平均	最大	最小
東北	α (%)	23.7	26.0	22.0
	L(kg)	90	110	55
	B (kg)	450	470	415
	W/B(%)	48.1	52.0	46.0
	W(kg)	216.0	216.0	216.0
	W1/B(%)	29.4	40.8	21.6
	S _{0.15} (%)	7.0	10.0	5.0
	β_{OH} (%)	2.49	7.95	0.13
北陸	α (%)	22.9	26.0	22.0
	L(kg)	103	118	90
	B (kg)	463	478	450
	W/B(%)	45.2	48.0	38.0
	W(kg)	209.8	216.0	180.0
	W1/B(%)	26.0	28.8	24.3
	S _{0.15} (%)	5.9	7.0	5.0
	β_{OH} (%)	1.59	2.37	0.82
九州	α (%)	22.4	25.0	21.0
	L(kg)	76	97	40
	B (kg)	437	458	400
	W/B(%)	49.9	55.8	47.0
	W(kg)	217.9	241.0	209.0
	W1/B(%)	28.5	32.7	24.3
	S _{0.15} (%)	8.4	12.0	6.0
	β_{OH} (%)	2.8	7.7	1.3

をふまえて次節で説明する。

(3) 保水特性とHQSCの粘性特性

前節で述べたように使用材料の保水特性(α , β_{OH} , W1, W1/B)の相違によって、HQSC の配合が変化し、粘性にも影響を与えている。HQSC では使用する粉体の粘性を、施工性の向上に活用している。そこで、HQSC の粘性要因と粘性特性の関係について検討する。

なお、相関係数の判定は一般的には危険率 5%, 1%, 0.1%のいずれかで判定し、危険率が小さいほど誤りを犯す確率が小さい。本文では、データがバラツキの多い現場での値であることを考慮して、危険率 10%まで相関があると設定した。

粘性項にはスランプ、JIS R 5201 によるモルタルフロー試験時のフロー(f_{15}), 0 打フロー(f_0), ($f_{15}-f_0$)および流動係数(K)²⁾をとりあげた。なお、 f_0 はモルタルフロー試験時においてコーンを抜いた直後のモルタルの平均直径であり、($f_{15}-f_0$)は HQSC の変形速度を、K は塑性粘度を表す指標と考えている (式(3)参照)。

$$K = \frac{f_{15}}{f_{15} - f_0} \quad (3)$$

スランプと他の粘性項との関係を表-4 に示す。練上り時、または切羽到着時(切羽時)における関係は非常に高い相関を示している。しかしながら、練上り時から切羽時までの時間(30 分間)による変化量(Dif: K は切羽時の値・練上り時の値、他の粘性項では練上り時の値・切羽時の値)でのおおのの関係を検討すると、相関係数が小さく、 f_0 (Dif)とが 5%危険率で有意差が生じている。このことは、スランプと f_0 の両者とも、フレッシュコンクリートの降伏値と関係が深いことを示していると考えられる。

図-3 にスランプ(Dif)と K(Dif)との関係を示す。これらの結果から、経時粘性変化を検討するためには、スランプだけではなく時間要素と動的要素の両方を含む試験値が得られる方法(例えば、衝撃エネルギーによる拡散状況が得られるモルタルフロー試験などの経時変化測定)が、望ましいことが分かる。なお、図-3、図-4 に相関

表-4 スランプと他の粘性項との相関関係

粘性項	f_0	f_{15}	($f_{15}-f_0$)	K
練上り時スランプ	(+) ****	(+) ****	(+) ****	(-) ***
切羽時スランプ	(+) ****	(+) ****	(+) ****	(-) ****
スランプ(Dif)	(+)**	(+)	(+)	(+)

注 1) スランプ(Dif)との相関を検討する場合には粘性項も(Dif)で検討。 注 2)*:自由度に対して危険率 10%, 以下**5%, ***1%, ****0.1%の有意水準, 無印は危険率 10%で有意水準に満たない場合。 注 3)()内は回帰直線の勾配の符号。

係数の検定に関する表現方法を示すが、この方法は他の図においても同様である。

表-5 に粘性要因と HQSC 粘性項との相関を示すが、最下段に $\beta_o \leq 5\%$ の場合の β_{OH} の関係を示している。表より以下のことが分かる。

- β_o , β_{OH} , W1/B と f_{15} , $(f_{15}-f_0)$ との関係は練上り時に増加、切羽時に低下している傾向から、経時により粘性項が低下しており、フレッシュコンクリートの粘性(降伏値)が増加する傾向にある。
- β_o , β_{OH} , W1/B と $f_{15}(\text{Dif})$, $(f_{15}-f_0)(\text{Dif})$ との相関係数に有意差が認められることから、これらが粘性項の変動要因になっていると考えられる。
- Ad は f_{15} と $(f_{15}-f_0)$ を増加させるとともに、Ad 使用量の増加は $f_{15}(\text{Dif})$, $(f_{15}-f_0)(\text{Dif})$ を増加、K(Dif) を低下させる傾向にある。
- β_{OH} ($\beta_o \leq 5\%$) の場合には粘性項との関係が全データによる β_{OH} , W1/B の場合とは傾向が異なっている。通常、 β_{OH} が大きくなると、W1/B が増加し、W2/B が減少する。このことにより、 f_{15} と $(f_{15}-f_0)$ が低下、K が上昇する。したがって、 β_{OH} ($\beta_o > 5\%$) のデータが W1/B および β_{OH} の傾向に大きく影響していると考えられる。

図-4 に練上り時と切羽時における粘性項の変化状況を示す。この図によると f_{15} および $(f_{15}-f_0)$ の値は練上り時の場合と比べて切羽時において低下しており、流動性が減少していることから、前記 a) に示すとおり降伏値が増

加していることが考えられる。一方、K については練上り時と切羽時における値にほとんど差が無く、3 地域全体として塑性粘度は 30 分程度では変化が小さいことを意味している。なお、流動性が経時で低下し、K がそれほど変化しないことは、回帰式の勾配に明らかな差があることでも分かる。

さらに、K について練上り時と切羽時の関係を、地域別に検討した結果を図-5 に示す。北陸地域においては K の値は練上り時と切羽時で差が小さくて分布範囲も狭く、非常に安定している。東北および九州地域の場合には北陸地域と比べて K の分布範囲が広いこと、K の値が切羽時側に分布し(東北地域の 63%、九州地域の 56%)、塑性粘度が切羽時にやや大きくなる傾向を示し

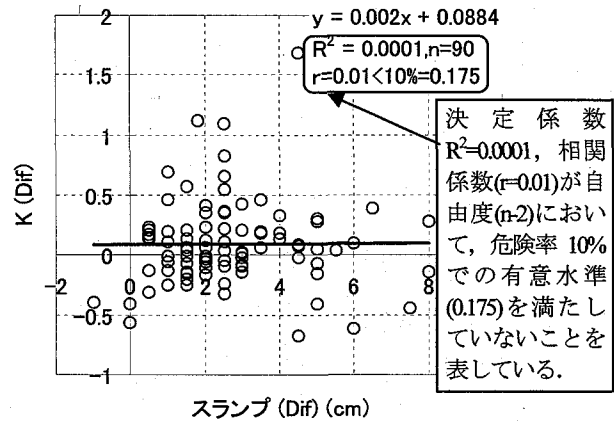


図-3 スランプ(Dif)と K(Dif)の関係

表-5 粘性要因と HQSC 粘性項との相関

粘性要因	練上り時(A)			切羽時(B)			(A)-(B)		(B)-(A)	
	f_{15}	$(f_{15}-f_0)$	K	f_{15}	$(f_{15}-f_0)$	K	$f_{15}(\text{Dif})$	$(f_{15}-f_0)(\text{Dif})$	$K(\text{Dif})$	
W1/B	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	(+)**	(+)**	(+)	
W2/B	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)*	(-)	
B	(-)	(-)	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	
Q	(-)	(-)	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	
β_o	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	(+)**	(+)**	(+)*	
β_{OH}	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)*	(+)**	(+)**	(+)	
α	(+)	(+)	(-)	(+)**	(+)**	(-)*	(+)	(-)	(-)	
Ad	(+)**	(+)**	(-)*	(+)**	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	
$\beta_{OH}(\beta_o \leq 5\%)$	(-)	(-)*	(+)**	(-)	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	

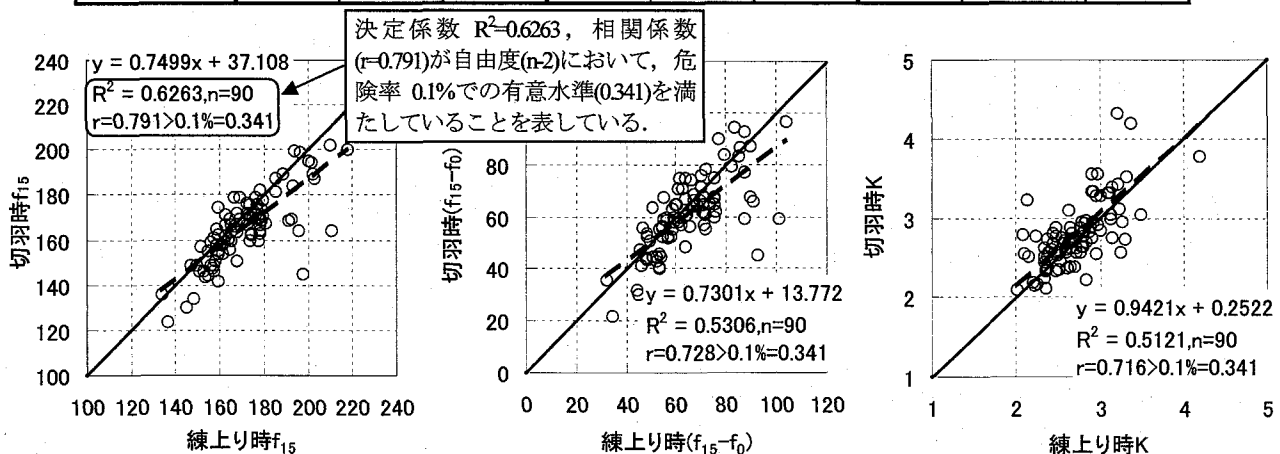


図-4 練上り時と切羽時における粘性項の変化状況

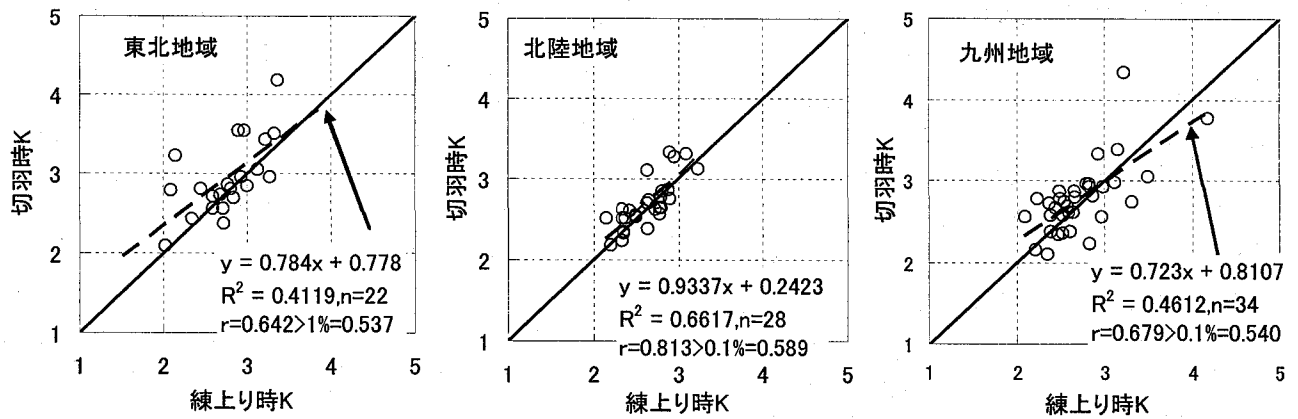


図-5 練上り時と切羽時におけるK値の比較

ている。これら3地域のデータ全体と削除した他地域の6データとで図-4に示される傾向となっている。

これらの状況と SEC 特有の造殻構造との関係を次のように考えている。

- SEC 工法で製造されたコンクリート中には造殻部と非造殻部とがあり、造殻部の水量はほぼ拘束状態にあるが、非造殻部の水量は大部分が拘束力のおよばない自由水と考えられる。造殻性能は α 、 β_{OH} 、配合内容に影響される。
- SEC コンクリート中の造殻部は立体網目構造を形成して、非造殻部を包み込んでいと考えられる。この場合造殻部を結び付けて造殻部を形成しているのは、粉体の拘束水や細骨材の表面吸着水であって、造殻部の結合性を支配しており、広い意味での保水性能と考えられる。
- 保水性能の高い造殻体によるネットワーク（造殻部）が優れた分離抵抗性を発揮していると考えられ、この性能は W/B に支配されている。
- $S_{0.15}$ が大きく(B が少なく、 β_{OH} が大きく)、 W/B が大きい場合には造殻部の結合力が小さく、スランプが大きく、降伏値や塑性粘度が低くて分離し易い、取扱い難しいコンクリートとなる。このような場合には造殻部のネットワークが弱いものとなり、自由水に対する拘束力も小さく、粘性項の経時変化量(Di)も大きくなるものと考えられる。

e) $S_{0.15}$ が小さく(B が多く、 β_{OH} が小さい)、 W/B が小さい場合には造殻部の結合力が大きく、本配合の特徴である SF と C の粒子が吸着水膜を共有する強い保水効果⁴⁾とあいまって、粘性の経時安定性や硬化体性能も高いと考えられる。

以上のことから、粉体や細骨材の物理特性に支配されている保水特性によって HQSC の配合が変化し(W/B も変化)、粘性特性（ひいては施工性）や強度が変化する。例えば、施工実績調査によると K が大きくなるとともに、吹付けコンクリートのはね返りや粉じん発生濃度が減少する傾向があることを確認している²⁾。したがって、材料の保水特性に関して検討することは、HQSC の品質確保のために極めて重要と考えている。

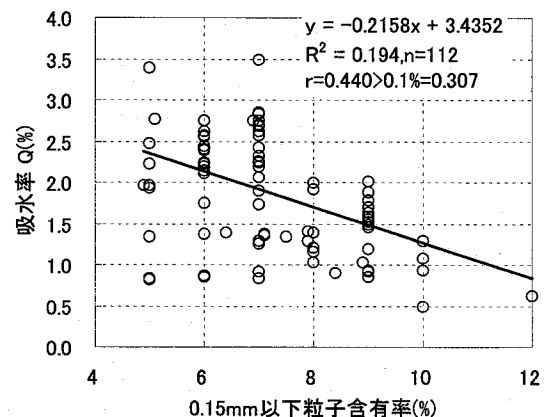


図-6 $S_{0.15}$ と Q の関係

表-6 細骨材の物理特性値の相関関係

	表乾密度	絶乾密度	洗い損失率($S_{0.075}$)	単位容積質量	実積率	粗粒率(FM)	0.15mm以下($S_{0.15}$)	吸水率(Q)	表面吸着水率(β_{OH})
表乾密度		(+) ****	(+) ****	(+) ***	(-) *	(+)	(+) ****	(-) ****	(+) ***
絶乾密度			(+) ****	(+) ***	(-) **	(+)	(+) ****	(-) ****	(+) ***
洗い損失率				(+) *	(-) **	(+)	(+) ****	(-) ****	(+) ****
単位容積質量					(+) ****	(+) *	(+)	(-) *	(-)
実積率						(+)	(-)	(+)	(-)
粗粒率(FM)							(-) ****	(-) **	(-) *
0.15mm以下($S_{0.15}$)								(-) ****	(+) ****
吸水率(Q)									(-) **

4. 骨材物理特性値と保水特性値との関係

細骨材保水特性値としては吸水率(Q)および表面吸水率(β_{OH})の2因子を考える。表-6に細骨材物理特性値との相関関係について全体傾向を示す。この表より、保水特性値Qと β_{OH} は、0.15mm以下含有率($S_{0.15}$)、洗い損失率($S_{0.075}$)、密度(表乾および絶乾)と非常に強い(-)の相関関係(危険率0.1%または1%の有意水準)にあることがわかる。例として、図-6に $S_{0.15}$ とQの関係を示す。表-6から細骨材保水特性(Qと β_{OH})と微粒分含有率($S_{0.15}$ と $S_{0.075}$)との関係は、微粒分含有率が大きくなるとともに、Qが減少し、 β_{OH} が増加する関係を示している。

表-7 細骨材保水特性値の因子間関係

因子間	傾向	有意水準	因子間の関係
β_{OH} - $S_{0.15}$	(+)	****	0.15mm 以下含有率の増加により β_{OH} は増加
Q- $S_{0.15}$	(-)	****	0.15mm 以下含有率の増加により Qは減少
β_{OH} -FM	(-)	*	FMの増加により β_{OH} は減少
FM- $S_{0.15}$	(-)	****	0.15mm 以下含有率の増加により FMは減少
Q-FM	(-)	**	FMの減少により Qは増加

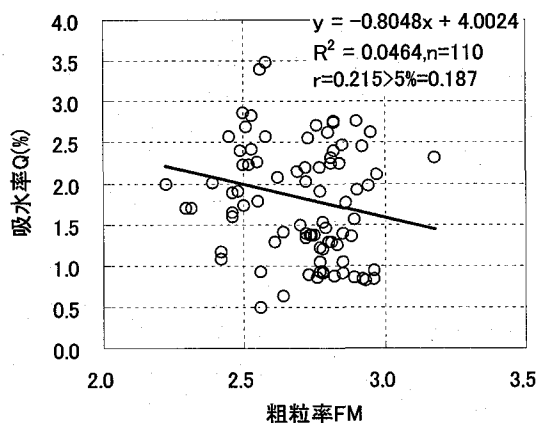


図-7 FMとQの関係

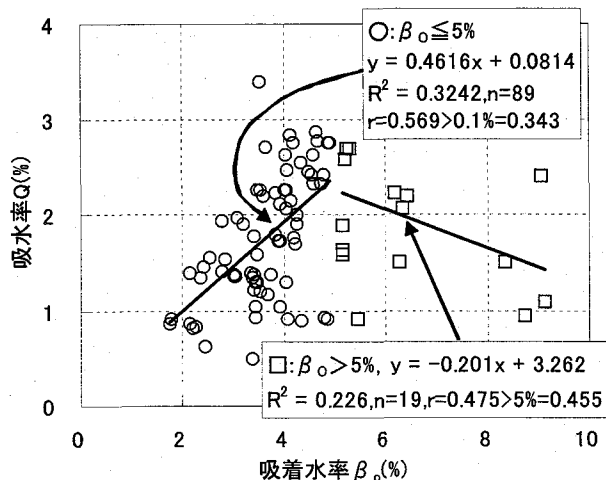


図-8 β_0 とQの関係

細骨材保水特性値の因子間関係を表-7に示す。この表によると、 $S_{0.15}$ の増加とともにFMが減少している。一方、図-7ではFMの減少とともにQが増加する結果となっており、図-6に示す $S_{0.15}$ とQの関係と矛盾している。

続いて、 β_0 とQの関係を検討する。一般に、砕砂では β_0 が大きいにもかかわらず、吸水率が小さい場合が多い。図-8に β_0 とQの関係を示す。この図によると、 β_0 5%付近を境に β_0 とQとの回帰直線の勾配が逆となっている。 $S_{0.15}$ の大きい砕砂を詳細に観察したところ、その表面に微粒分が固着しているものがある³⁾。このような細骨材の場合、JIS A 1109による表乾状態の判定が難しく、吸水率を小さめに評価したため、式(2)より β_{OH} の値を大きめに算出している場合があると考えられる。

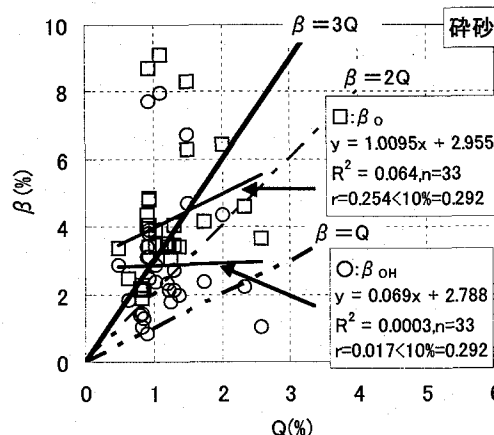
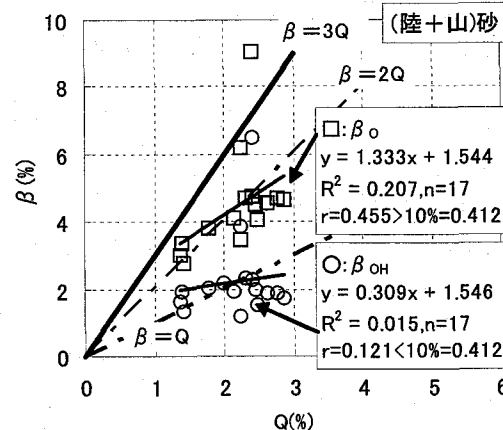
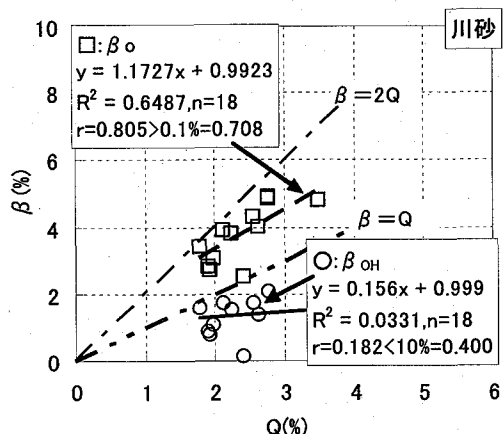


図-9 細骨材のQと β_0 、 β_{OH} との関係

5. 種類別および地域別の細骨材保水特性値

図-2に示したように、細骨材は種類も多く、地域ごとに分布状況が相違し、配合にも特徴があることが分かっている。ここでは、細骨材の種類別、地域別の保水特性について検討する。

(1) 種類別細骨材保水特性値

図-9に天然砂である川砂、陸+山砂と人工砂である砕砂の Q と β_o 、 β_{OH} との関係を示す。この図から Q と β_o との関係は天然砂では概ね、 $\beta_o \leq 2Q$ であるのに対して、砕砂では $\beta_o > 2Q$ の領域にある。

また、 Q と β_{OH} との関係について見ると、天然砂では概ね、 $\beta_{OH} \leq Q$ の関係にあるのに対して、砕砂では $\beta_{OH} \geq Q \sim 3Q$ の関係にあり、 Q の増加に対して β_{OH} の増加割合

が大きく、特に Q の小さい領域で顕著である。総じて、天然砂では比較的データ範囲も収束しており、バラツキも小さいのに対して砕砂では Q 、 β_o および β_{OH} のデータ範囲も広く分散しており、バラツキも大きい。ここで、図-9に示す低い Q の値における高い β_o 、 β_{OH} の値は、 $\beta_o > 5\%$ データによるものである。

(2) 地域別細骨材保水特性値

細骨材保水特性を検討するにあたって、異なる現場で同一の細骨材を使用している場合があるが、この場合には重みを偏らせないために1データとして取り扱った。

図-10に吸水率(Q)と吸着水率(β_o)の関係を、図-11に吸水率(Q)と表面吸着水率(β_{OH})の関係を、地域別に示す。なお、図-8において $\beta_o = 5\%$ 付近を境に β_o と Q との回帰直線の勾配が逆となる傾向を示したため、これらの図に

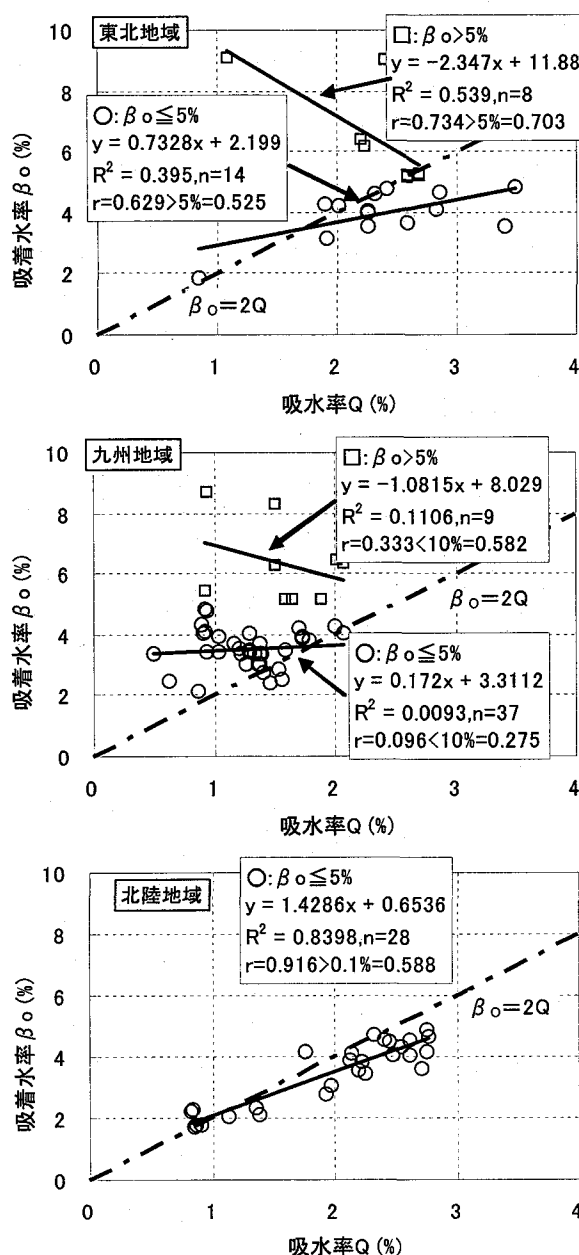


図-10 吸水率と吸着水率の関係(地域別)

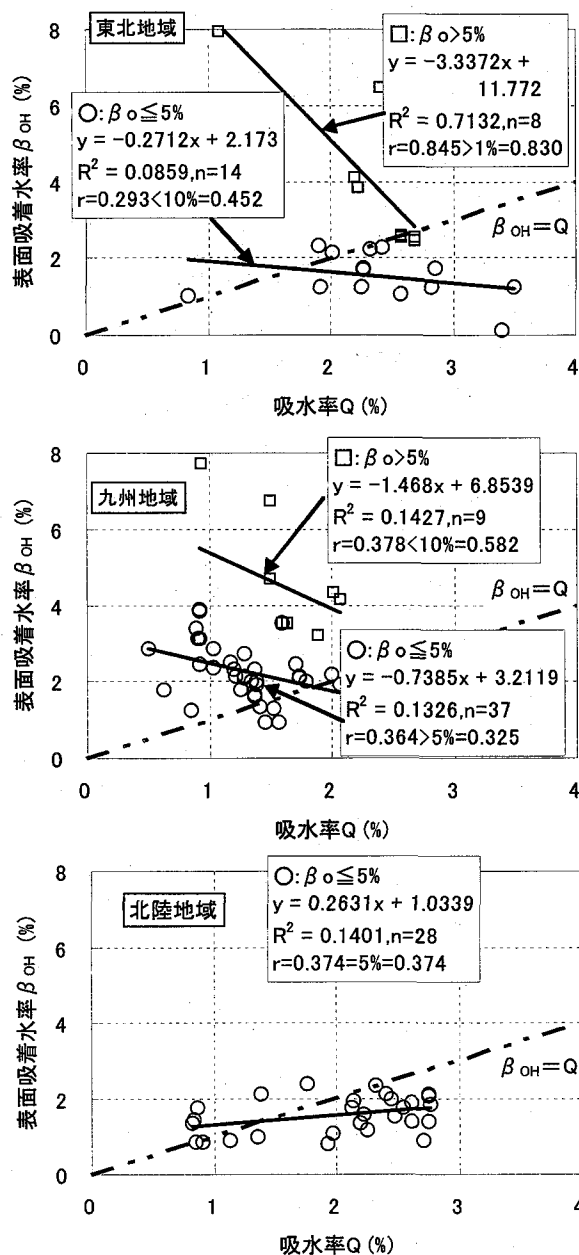


図-11 吸水率と表面吸着水率の関係(地域別)

おいては、 $\beta_o \leq 5\%$ で分割して示している。

図-10より、東北地域では $\beta_o \leq 5\%$ 領域で強い(+)相関が、 $\beta_o > 5\%$ 領域では強い(-)相関(共に危険率5%)が認められる。また、九州地域でも同様の傾向が認められるが、

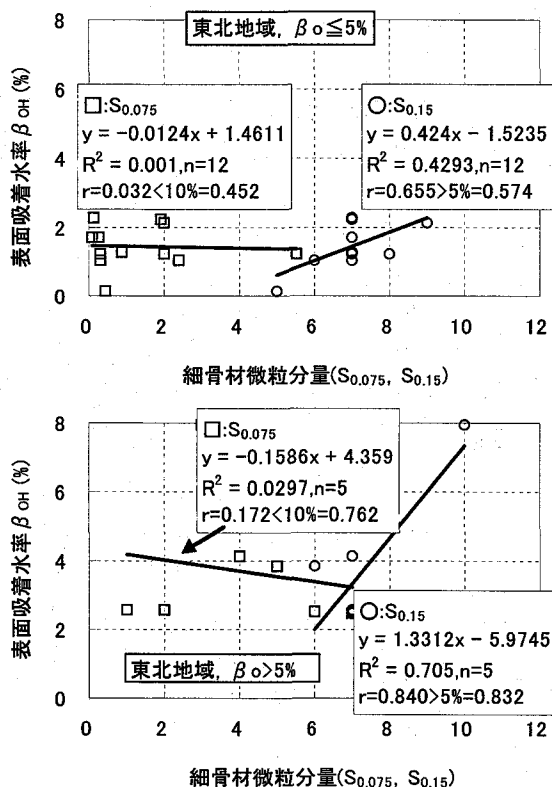


図-12 微粒分量と β_{OH} の関係(東北地域)

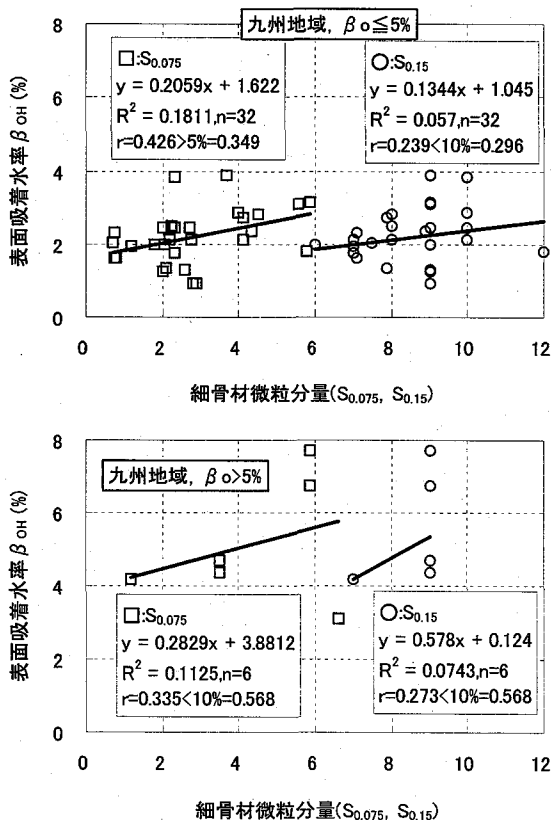


図-13 微粒分量と β_{OH} の関係(九州地域)

バラツキが大きく明確な相関は得られていない。一方、北陸地域の場合には $\beta_o \leq 5\%$ 領域のデータのみであり、Qに対して非常に強い(+)相関(危険率0.1%)を示している。

続いて、図-11より、Qと β_{OH} の関係を地域別に検討する。北陸地域での β_{OH} は分布範囲が小さいこと、大部分のデータは $\beta_{OH} \leq Q$ の関係にあること、および、強い(+)相関(危険率5%)が認められる。また、東北・九州地域の場合には、北陸地域の場合と逆の(-)傾向を示している。さらに、 $\beta_o \leq 5\%$ 領域では、東北地域はバラツキは大きいものの北陸地域同様ほぼ $\beta_{OH} \leq Q$ の関係にあるが、九州地域では大部分が逆に $\beta_{OH} \geq Q$ の関係にあり、強い(-)相関(危険率5%)を示している。

また、 $\beta_o > 5\%$ 領域では東北、九州地域共に β_{OH} とQの回帰直線の勾配が大きく、Qが減少して β_{OH} が増加する結果、特に東北地域では非常に強い(-)相関(危険率1%)を示している。

このように、北陸地域での β_o や β_{OH} には天然砂の特徴($\beta_o \leq 2Q$, $\beta_{OH} \leq Q$)が強く現れている。これに対して、九州地域の場合には、砕砂の特徴が強く現れており、東北地域の場合にはほぼ中間の状況となっている。

続いて、東北、九州両地域の β_{OH} 増加要因である細骨材微粒分量との関係を図-12 および 13 に示す。細骨材微粒分量としては洗い損失率($S_{0.075}$)と、0.15mm以下粒子含有率($S_{0.15}$)を取り上げた。これらの図によると、東北地域における β_{OH} の増加は β_o の大小にかかわらず、 $S_{0.15}$ の影響が強く見られる。一方、九州地域においては

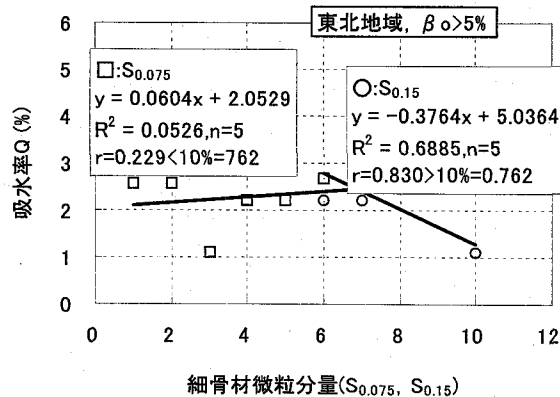
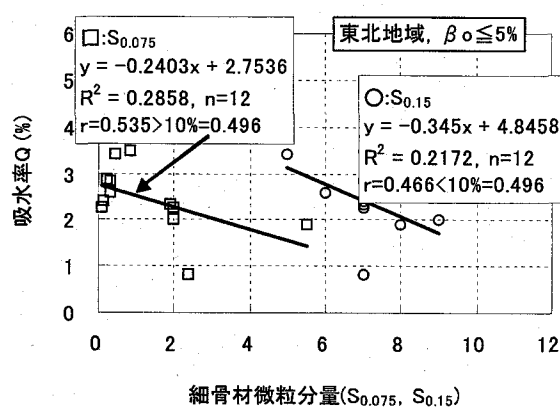


図-14 微粒分量とQの関係(東北地域)

$S_{0.075}$ の影響が強く、特に $\beta_o \leq 5\%$ において強い (+) 相関(危険率 5%) が認められる。

また、細骨材微粒分量と吸水率(Q)との関係を図-14,15 に示す。東北地域においては図-14 に示すように $\beta_o \leq 5\%$ 領域では洗い損失率($S_{0.075}$)の影響が強く認められ、 $\beta_o > 5\%$ 領域において 0.15mm 以下含有率($S_{0.15}$)の影響が強い。

一方、九州地域においては図-15 に示すように β_o の大小を問わず Q は洗い損失率と強い (-) 相関となっている。 $\beta_o \leq 5\%$ 領域では $S_{0.075}$ の影響の他、 $S_{0.15}$ 影響も同様に強く受けている。

これまで得られた保水特性値と細骨材微粒分量との関係を地域別にまとめて、表-8 に示す。これらの結果から、保水特性値に対する細骨材微粒分の影響について地域別の特徴を要約すると、以下のようになる。

- a) 北陸地域では、細骨材は全て $\beta_o \leq 5\%$ の範囲にあり、細骨材微粒分と保水特性の関係は全て (+) (危険率 5%) である。また、細骨材粗粒率(FM)と β_{OH} および

表-8 地域別細骨材保水特性の関係

地域	東北		北陸	九州	
β_o の範囲	$\beta_o \leq 5\%$	$\beta_o > 5\%$	$\beta_o \leq 5\%$	$\beta_o \leq 5\%$	$\beta_o > 5\%$
$\beta_{OH}-Q$	(-)	(-) **	(+) **	(-) **	(-)
$\beta_{OH}-S_{0.15}$	(+) **	(+) **	(+) **	(+)	(+)
$\beta_{OH}-S_{0.075}$	(-)	(-)	-	(+) **	(+)
$Q-S_{0.15}$	(-)	(-) *	(+) **	(-) ***	(-) **
$Q-S_{0.075}$	(-) **	(+)	-	(-) ****	(-) **
$FM-\beta_{OH}$	(+)	(+)	(-)	(-)	(+) ****
$FM-S_{0.15}$	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)

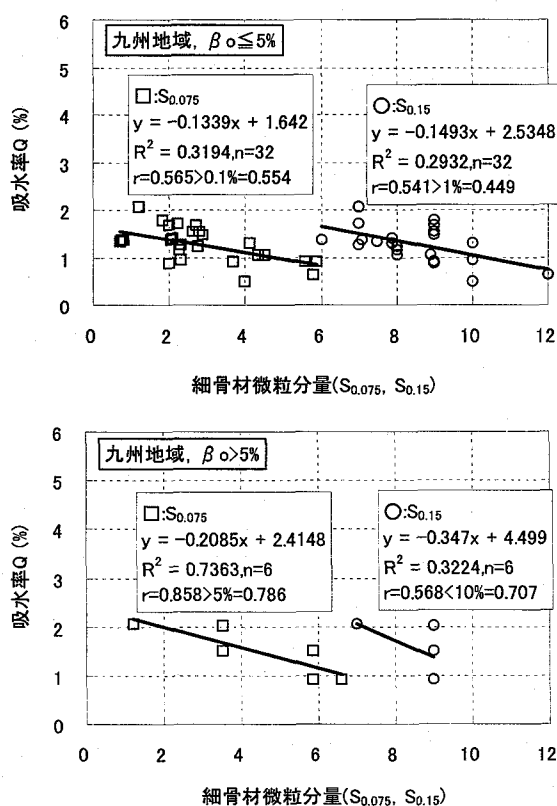


図-15 微粒分量と Q の関係(九州地域)

$S_{0.15}$ の関係は (-) であり、この関係が正常と考えられる。

- b) 九州地域では主として $S_{0.075}$ の影響が強い。また、 β_o の範囲にかかわらず、Q と β_{OH} 、 $S_{0.15}$ および $S_{0.075}$ との関係は (-) (ほとんどが危険率 5%以下) になっている。さらに、FM と β_{OH} との関係は $\beta_o > 5\%$ において非常に強い (+) 相関となっており、Q と β_{OH} の値に不具合が疑われる。

- c) 東北地域では主として $S_{0.15}$ の影響が強い。また、 β_{OH} と Q および $S_{0.075}$ との関係は (-) の相関に、Q と $S_{0.15}$ および $S_{0.075}$ ($\beta_o \leq 5\%$ の範囲) との関係も (-) となっており、Q の値に疑問がある。さらに、FM と β_{OH} との関係は β_o の値にかかわらず (+) の傾向となっており、Q と β_{OH} の値に不具合が疑われる。

β_o を求めるための遠心試験の基本的考え方は文献 5) に示されているが、検討された当時の細骨材は川砂が主体であり、砕砂が使用されることは希であった。現在では砕砂がコンクリート用細骨材として一般的に使われているが、砕砂中の微粒分が通常多いことはよく知られている。このことが、図-8 に示された状況 (β_o と Q の関係において、 β_o がほぼ 5% を境にデータの傾向に変化が見られる) を引き起こしていると考えられる。そこで、 β_o を求めている遠心試験に関して、その方法と試験結果の解析方法について次章にて検討する。

6. 遠心試験方法の検討

(1) 試験方法の概要

遠心試験は SEC 工法において造殻の性能を左右する非常に重要な、一次水量を決定するために行う試験で、その詳細は文献 6) に示されているので、以下にその概要を示す。

- a) 細骨材試料を絶乾状態とした後、含水率を 5% に調整し、バインダーとして水セメント比(W/C)45%のセメントペーストと混合し、モルタルとする。所定量のモルタルを容器に計量し、遠心分離機に設置して 438G で 30 分の遠心力を作用させ、脱水させる。
- b) 当初のモルタル試料重量(W_s)と遠心試験後のモルタル試料重量 (W_f) との差から、脱水量 ($W_d = W_s - W_f$) を求めた後、当初試料中の含水量 (W_p) との差から試験後の残留含水量 ($W_z = W_p - W_d$) を求める。含水量 (W_p) はセメントペーストの W/C に相当する水量 $W1$ と細骨材試料の調整含水率に相当する調整含水量 $W2$ とを合わせた水量 ($W_p = W1 + W2$) である。したがって、残留含水量 (W_z) は $W_z = W_p - W_d = W1 + W2 - W_d$ となる。
- c) 残留含水量 (W_z) を S/C=0, 1, 2, 3 の場合について、遠心試験を各 3 回繰返し行って算出する。

d) 各 S/C ごとに残留水量とバインダー分のセメント質量に対する割合(W_z/C)の平均値を求め、 W_z/C と S/C の関係をプロットする。この関係を直線回帰して、細骨材量に対する残留水量の割合(W_z/S)を求め、吸着水率(β_o)を得る(図-16 参照)。

(2) 細骨材保水モデル

図-17 に遠心試験における排水・脱水・吸着水モデルを示す。図-17(a)は保水性能(吸着水率: β_o)が調整含水率($A=5\%$)以下の領域($\beta_o \leq 5\%$)にある試料の場合、図-17(b)は保水性能が調整含水率を超える領域($\beta_o > 5\%$)にある試料の場合を表している。(a)の場合には、調整含水量の余剰水およびバインダーであるセメントペースト中の余剰水が、遠心力の作用によって脱水する。一方、(b)の細骨材表面吸着水部分に未充填部が存在する場合には、セメントペースト中の余剰水の一部が細骨材未充填部に吸着されることとなる。

ここで、図-17 のモデルでは、遠心試験により①余剰水は 100%排水・脱水し、②細骨材未充填部分の未充填部は余剰水の吸着により 100%充填されると仮定する。このような仮定に基づき、遠心試験時のモデルを図-18 に示すように考える。

ここで、図-18(a)は $\beta_o \leq 5\%$ の場合のモデルであり、

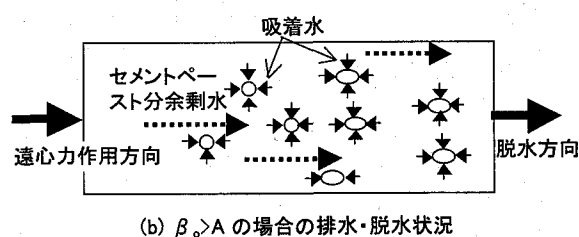
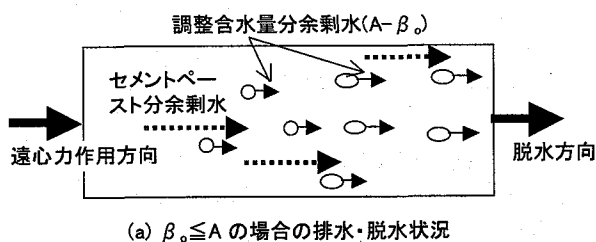


図-17 遠心試験における排水・脱水・吸着水モデル

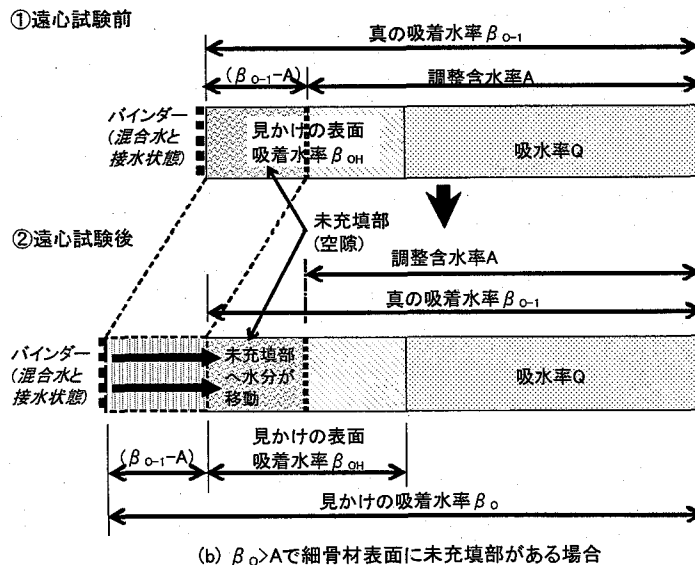
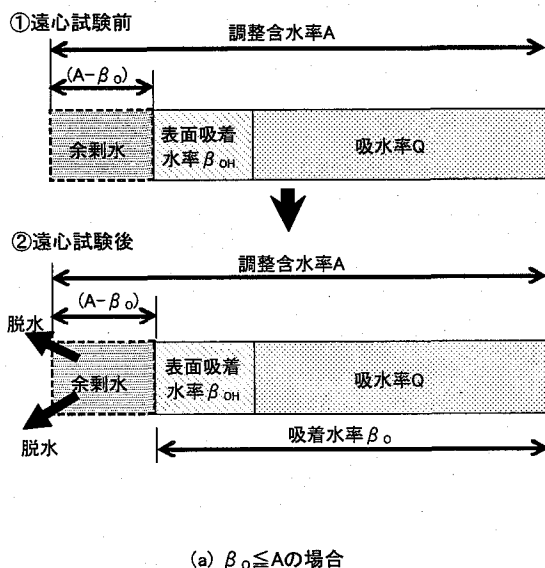


図-18 遠心試験における吸着水モデル

図-17(a)では遠心試験前に調整含水率により保水性能を超える含水率を保有している状況を、図-18(a)では遠心力の作用により保水性能を超える含水率相当分の余剰水は排水・脱水され、遠心力作用後には細骨材中に保水性能相当分の吸着水率(β_o)が残留する状況を表している。この場合には、遠心試験に関しては、これまで考えられていたとおりであり、遠心力により余剰水が排水・脱水されて細骨材の保水性能に相当する吸着水率 β_o が残留し、細骨材の吸着水率は式(4)となる。

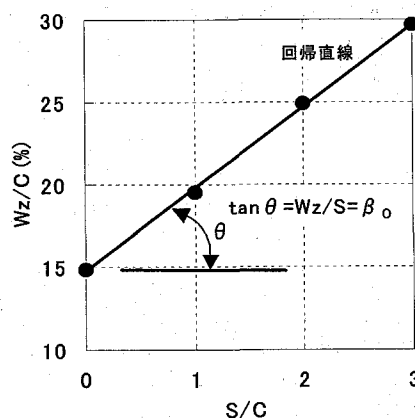


図-16 S/C と W_z/C の関係

$$\beta_o = A - (A - \beta_{o-1}) = \beta_{o-1} \quad (4)$$

ここに、

β_o ：細骨材の見かけの吸着水率(%)

β_{o1} ：細骨材の真の吸着水率(%)

次に図-18(b)において、図-17(b)では遠心試験前、調整含水率(A=5%)だけでは試料細骨材の保水性能相当分が充分満たされていない状況を示している。この場合には吸水率相当分は充填されているが、表面吸着水率(β_{OH})相当分に未充填部が生じていることを表している。図-18(b)では図-17(b)の状態で遠心力作用時、バインダーであるセメントペースト(W/C=45%)中の余剰水が遊離して排水・移動時に β_{OH} の未充填部に吸着され、この部分が完全に充填される状況を表している。この場合には、当初から細骨材表面吸着水相当分に未充填部が存在する状態であり、遠心試験時に当初想定していなかった現象が生じていると考えられることから、次のように考える。

遠心試験前に調整含水率(A=5%)で吸水率(Q)部は完全に充填されているが、 β_{OH} 部分に未充填部(空隙部分)が存在する。遠心試験後の残留水率の状況($\beta_o > 5\%$)からセメントペースト中の余剰水により、試験前に空隙部を有していた β_{OH} 部分($\beta_{o1} - A$)は完全に充填されている。この空隙部が完全充填された状態を真の吸着水率(β_{o1})と定義する。求める吸着水率は空隙部分を余剰水により充填された β_{o1} であると考え、遠心試験により算出された見かけの吸着水率(β_o)、調整含水率(A)をもとに式(5)により算出する。

$$\beta_o = (\beta_{o1} - A) + \beta_{o-1} = 2\beta_{o1} - A$$

$$\beta_{o1} = \frac{(\beta_o + A)}{2} \quad (5)$$

図-19に新旧2方式で算出した吸着水率の比較を示す。この図によると、新方式で算出した吸着水率(β_{o1})は旧方式で算出した場合と比べて、小さめの値となっており、改善が図られているが、 β_{o1} は5%を下回っていない。

また、式(5)にて算出した β_{o1} を用い、式(2)より表面吸着水率(β_{OH} と表記)を求め、図-20に示す。この場合、解析時のQはJIS A 1109による測定値をそのまま用いている。この図と図-11を比較すると、以下のことが言える。

- $\beta_o > 5\%$ の場合における β_{OH} の値が特にQの小さい領域で小さくなっている。
- 九州地域の場合には、 $\beta_o \leq 5\%$ の場合であっても特にQの小さい領域で、 β_{OH} はQと比べて大きな値を示

しており、北陸地域の場合の傾向と異なっている。

以上のことより、JIS A 1109によるQの測定値そのものに、疑いを持たざるを得ない。Qの値に不具合があるとすれば、本試験時に β_{OH} の他、Qの部分にも未充填部が存在することとなり、 β_{o1} にはこれを含んでいることに

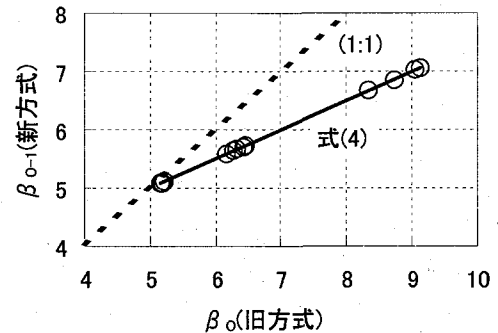


図-19 新旧2方式で算出した吸着水率の比較

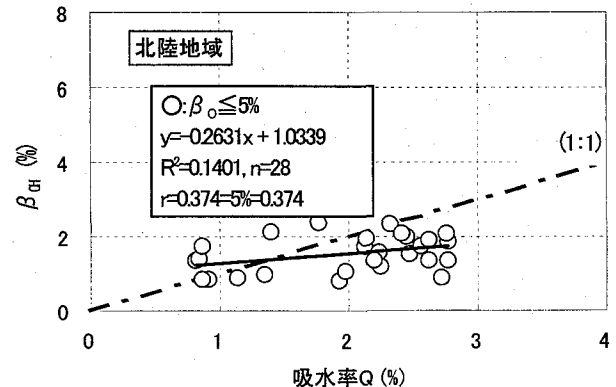
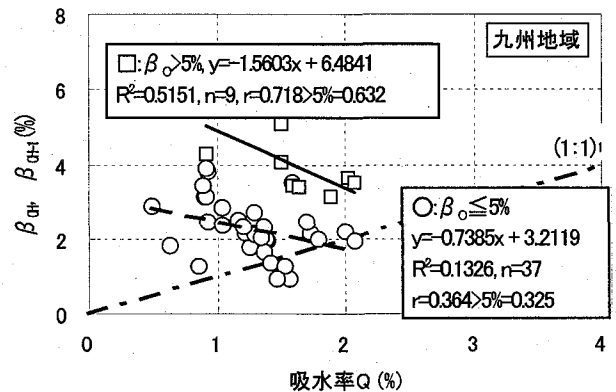
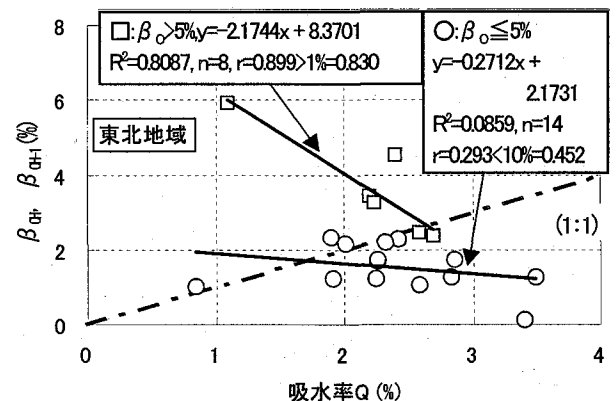


図-20 Qと β_{OH} および β_{OH} との関係(地域別)

なる。残念ながらこの場合には、現在の試験方法では β_{OH} の真値を求めることは不可能である。

対応方法としては、調整含水率 A を現行の 5% よりも大きな値(A')として遠心試験を行う、などの方法が考えられるが、吸水率の試験方法など、より一層の検討が必要である。

7. まとめ

高品質吹付けコンクリート(HQSC)について、これまで得られた検討結果から、細骨材の物性、保水特性、粘性項の経時変化状況が吹付け時の作業性、施工性能、硬化体性能に与える影響について、検討・考察を行なった。結果を以下に述べる。

(1) 東北、北陸、九州各地域の細骨材には特徴が認められるが、北陸地域では大部分天然砂が使用されており、HQSCにとっては最良の細骨材である。一方、東北、九州地域では使用細骨材の種別も多く、したがって物性のバラツキが大きいこともあるが、全体として微粒分の影響を強く受けており、HQSCにとっては良くない方向に作用していると考えられる(図-2, 12, 13)。

(2) 地域別の配合状況については、 $S_{0.15}$ による石灰石微粉末の置換量(L)、総粉体量(B)、保水特性(Q、 β_{OH})により一次水量(W1)が算出され、一次水粉体比(W1/B)が決定される。Bは北陸地域が最も多く、以下東北、九州の順になっている。このことから、一次水量中の粉体量の影響度は北陸地域が最も大きく、 β_{OH} の影響度は九州地域が最も大きい結果となっている(表-3)。HQSCは分割練り混ぜ(SEC)工法を採用しているので、W1/Bが造殻体の性能を表しているとされており⁴⁾、この造殻体に対する影響度も同様と考えられる。

(3) 粘性項、地域別粘性項の経時変化状況から、粘性項の経時安定性にW1/Bが大きく影響していることが分かった(表-5)。粘性の経時安定性がHQSCにとって、施工性確保と粉じん低減のために、最も重要と考えられる。

(4) 保水特性値に対する細骨材微粒分の影響について地域別の特徴を整理すると、東北地域においては主として0.15mm以下の影響が、九州地域においては75 μ m以下の洗い損失率の影響が強い(図-12~14)。

(5) 天然砂では概ね $\beta_{OH} \leq Q$ の関係にあるのに対して、砕砂では $\beta_{OH} \geq Q \sim 3Q$ の関係にあり、Qの増加に対して β_{OH} の増加割合が大きくなっており、この傾向は特にQの小さい領域で顕著である(図-9)。

(6) $\beta_{OH} > 5\%$ となる細骨材の大部分は砕砂であり、含有する微粒分がこの試験結果に大きく影響していると考えられる。この場合、試験時の未充填部が β_{OH} 部にのみ存在していたとした場合には、図-17(b)および18(b)のモデルの機構を考え、従来の遠心試験方法で用いられた算出式とは別の式(5)が考えられる。

(7) β_{OH} が微粒分の影響を大きく受けている実態や β_{OH} とQとの関係から、東北・九州地域のQの測定値の一部に不具合があることが疑われる(図-20)。

8. おわりに

NATMにおける吹付けコンクリートは、現場で入手可能な材料を用いて現場プラントで製造することが基本である。今回の検討結果から、東北・九州地域の一部細骨材に微粒分含有率が多く、HQSCがその影響を強く受けている状況が見られた。また、3章(3)節で述べたように、SECによる造殻性能が粘性の経時安定性に大きく影響していることもわかった。日常における施工状況の変化に着目して総粉体量や高性能減水剤の混入率を調整することで、所要の粘性を確保することが求められている。このように日常の施工管理を徹底することでHQSCの特徴を生かした分離抵抗性が高く、圧送性に優れたフレッシュコンクリートの安定供給が可能となり、はね返り率や粉じん発生量の低減化が達成できると考えている。

参考文献

- 1) 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)，pp.1-4, 1997.
- 2) 登坂，伊藤，末永：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，土木学会，トンネル工学論文集，Vol.14, pp.107-114, 2004.
- 3) 登坂，伊藤，櫻井ほか：高品質吹付けコンクリートにおける細骨材使用実態と強度特性に関する研究，土木学会，トンネル工学論文集，Vol.15, pp.79-87, 2005.
- 4) 伊藤，越智，末永ほか：分割練り混ぜ(SEC)による新吹付けコンクリートの硬化体特性，土木学会，トンネル工学研究論文・報告集，Vol.10, pp.141-144, 2000.
- 5) 辻，二羽，伊東，岡村：遠心力を利用した細骨材の保有水試験方法，土木学会論文報告集 第384号/V-7, pp.103-109, 1987年8月
- 6) 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)，pp.65-71, 1997.
- 7) 伊藤，北川，末永ほか：混和材を用いた吹付けコンクリートの施工性および品質に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19, No.1, pp.1429-1434, 1997.