

シラスを細骨材として用いた 吹付けコンクリートの施工

日向 哲朗¹・多宝 徹²・杉山 律³

¹正会員 (株) 間組 本店 土木事業本部 技術第三部 (〒105-8479 東京都港区 虎ノ門2-2-5)
E-mail:hyugat@hazama.co.jp

²正会員 (株) 間組 九州支店 新武岡トンネル作業所 (〒890-0034 鹿児島県鹿児島市田上7-2-12)
E-mail:taho@hazama.co.jp

³正会員 (株) 間組 本店 土木事業本部 土木設計部 (〒105-8479 東京都港区 虎ノ門2-2-5)
E-mail:sugiyama@hazama.co.jp

近年、南九州地方では、海砂賦存量の減少などにより海砂採取が厳しい状況となりつつあり、将来のコンクリート構造物の持続的な建設のために、代替骨材としてシラスの適用が検討されている。このような状況を踏まえ、今回、鹿児島県のシラス台地を掘削する新武岡トンネル工事において、トンネルの掘削ずりであるシラスをトンネルの支保部材である吹付けコンクリートの細骨材として用いる試みを実施した。

施工を通じて、シラスの吹付けコンクリートへの十分な適用性を確認したとともに、トンネル現場におけるシラス骨材の利用は、単なる代替骨材としての意味だけではなく、建設副産物である掘削ずりの発生量低減、コスト縮減といった効果も期待できることが確認できた。

Key Words : Shirasu, shotcrete, fine aggregate

1. はじめに

南九州地方では、海砂賦存量の減少、海砂採取による漁業への影響や、環境保全の観点から、近い将来、持続的な海砂採取が困難となる状況も予想されている。このような状況下で鹿児島県では、海砂の代替骨材としてシラスの適用が検討され¹⁾、一部の大規模構造物においても採用されている²⁾。しかしながら、現時点では、シラス骨材を用いたコンクリートの本格的な普及に向けては、いくつかの課題を有しており、今後は、課題の解決に向けた実構造物レベルでの着実な検証が必要である。

このような状況を踏まえ、今回、鹿児島県のシラス台地を掘削する新武岡トンネル工事において、掘削ずりであるシラスを吹付けコンクリートの細骨材として用いる試みを実施した。

その結果、シラスはトンネルの吹付けコンクリートの細骨材として十分な適用性を有することが確認できた。また、施工を通じて、トンネル現場におけるシラス骨材の利用は、単なる代替骨材としての意味だけではなく、建設副産物である掘削ずりの発生量低減、コスト縮減といった効果も確認できた。

本稿では、この概要について報告するものである。

2. シラスの定義

南九州の地形は、新第三紀以前の堆積岩や火山岩類を基盤として、後期鮮新世以降（およそ 400 万年前以降）に鹿児島地溝から噴出した多数の火砕流堆積物が積み重なった火砕流台地（シラス台地）より形成されている。台地を形成している火砕流は、大規模なものだけでも、約 33 万年前の加久藤カルデラを起源とする加久藤火砕流堆積物、阿多カルデラを起源とする約 24 万年前の阿多鳥浜火砕流、約 11 万年前の阿多火砕流、始良カルデラを起源とする約 2.5 万年前の妻屋火砕流、入戸火砕流などが挙げられ、これ以外にも数多くの火砕流堆積物が点在している。これらのうち、入戸火砕流は南九州における後期更新世大規模火砕流のうち最大のもので、すでにあったカルデラを現況のように整形するとともに、カルデラから半径約 100km もの広大な地域に広がり堆積して、大きな地形変化をもたらした。

これらの火砕流堆積物の非溶結部を総称して、広義のシラスと表現されることが多い。しかし、これらの火砕流堆積物は、非溶結部に限ると、その堆積量は入戸火砕流が圧倒的であり、それ以外の未固結の火砕流堆積物は極めて少ない。また、同じ非溶結堆積物でも、およそ 2.5 万年前に流出した入戸火砕流と主に 11～33 万年前に

流出したその他の火砕流では、噴出年代、組成鉱物や固結状態、風化の程度、物理的性質も異なる。そこで、本稿では、骨材として用いるシラスを狭義のシラスとして、入戸火砕流堆積物に限定する。

ところで、これまで述べてきたシラスは火砕流堆積物が堆積時の形態で原位置にそのままの状態にとどまったものを指している。これは次に述べる二次堆積物と区分するために、一次シラスと呼ばれることもある。これに対して、一次シラスが侵食・運搬され、再堆積したものは二次シラスと定義される。二次シラスについては、その成因により、性質が大きく異なるため、骨材としては利用しない。

写真-1にシラス（一次シラス）の露頭を示す。

3. 工事概要

(1) トンネルの概要

鹿児島東西道路は、鹿児島市の中心部と郊外を結ぶ延長 3.4km の道路で、そのうち 2.7km がトンネルとなる。約 2.7km のトンネルのうち、郊外側の約 1.5km 区間が比高 30～80m のシラス台地を貫く山岳トンネルで、残りの約 1.2km が市街地直下の沖積層に構築される都市トンネルとなる。最終的に、山岳トンネルと都市トンネルはつながった一本のトンネルとなるが、山岳トンネルの中間付近に、ランプトンネルを接合させ、市街側の坑口からアプローチする。都市トンネル部分の施工は、将来計画であり、今回の新武岡トンネル新設工事では、ランプトンネル（2車線）を用いた山岳トンネル区間（約 1,500m）の暫定供用を目指している。

図-1 に位置図、図-2 に鹿児島東西道路概念図、図-3 にトンネルの地質縦断面図を示す。新武岡トンネルの掘削

は主に郊外側から実施しており、平成 23 年 9 月 1 日時点で郊外側から 818m地点まで、市街地側からランプトンネルの迎掘りが約 300m地点まで到達している。

(2) 地形・地質概要

新武岡トンネルが位置する鹿児島市域の地形は、その多くを占める海拔標高 50～200m の台地または丘陵地（シラス台地）と、鹿児島湾岸や主要河川沿いに分布する沖積低地に代表される。シラスは、図-4³⁾ に示すように四万十層などの基盤層の上部に堆積して台地を形成しており、本トンネルはこの台地を貫く形で計画されている。本トンネル掘削位置の地質は、ほとんどが新鮮な非溶結のシラス（一次シラス）である。



写真-1 シラスの露頭

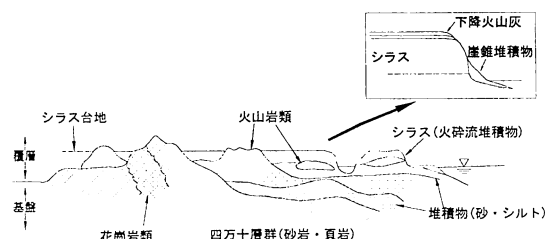


図-4 鹿児島市付近の地質概念図

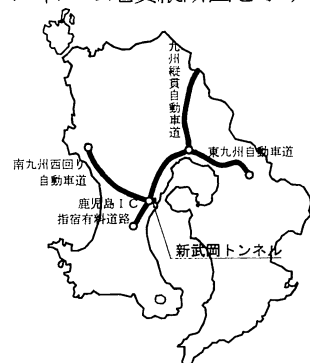


図-1 位置図

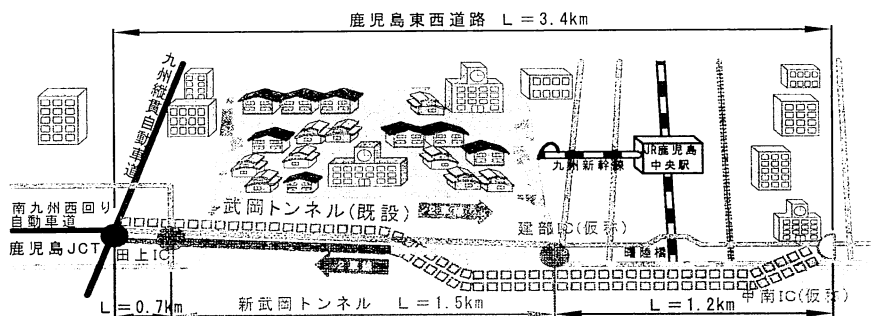


図-2 鹿児島東西道路概念図

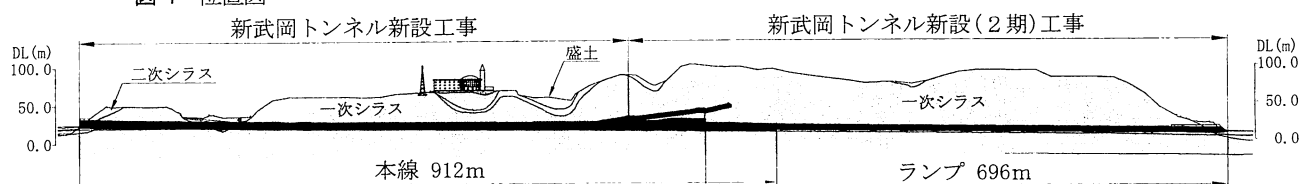


図-3 トンネル地質縦断面図

4. コンクリート用細骨材としてのシラスの利用

(1) 実績・適用基準

シラスを用いたコンクリートの技術基準については、鹿児島県が2006年1月に「シラスを細骨材として用いるコンクリートの設計施工マニュアル（案）」（以下、マニュアル案と称す）¹⁾を制定しているほか、国土交通省九州地方整備局制定の「九州地区における土木コンクリート構造物 設計・施工指針（案）2008年4月」⁴⁾では、骨材の章においてシラスを取り上げている。

本トンネルにおけるシラスを細骨材に用いた吹付けコンクリート（以下、シラス吹付けコンクリートと称す）については、これらを参考に開発した。

なお、マニュアル（案）では、細骨材としての品質のばらつきを少なくするという観点から使用できるシラスを限定し、識別が容易で入手しやすい入戸火砕流堆積物の一次シラスを対象としている。本トンネル掘削位置のシラスは、ほとんどが入戸火砕流堆積物の一次シラスであり、この条件を満足している。また、これまでのシラス細骨材の適用事例は土木構造物のみであり、建物のように薄い部材に用いた場合の諸特性については十分な知見が得られていないことから、建築構造物はマニュアル（案）の適用対象外とされている。

(2) シラス細骨材の特徴

シラスは乱さない状態では粒子間のインターロッキング効果や固結効果により、弱く固結した状態を示すが、一度乱すとこの性質は失われ、ミクロンオーダーの微粒子から数10cmにも及ぶ軽石塊（写真-2 参照）までを含んだ粒状体となる（写真-3 参照）。このうち軽石塊は、非常にポーラスで、破碎強度も極端に低い。従って、一般に、シラスを細骨材として用いる際には、乱した状態の粒状体のシラスのうち呼び寸法5mmの網ふるいを通過したものを用いている（写真-4 参照）。

通常のコンクリート用細骨材では10%以下に制限されている呼び寸法0.15mmの網ふるいを通過する細粒分が、シラス細骨材中には数10%のオーダーで含まれているが、マニュアル（案）では、これを除去することなく、骨材として用いることとしている。これは、以下の理由による。

- ・微粒分を除去する労力や時間を削減することで、骨材単価の増大を防ぐことができる。
- ・シラスにはポズラン活性が認められるが、微粒分において、より有効に発現される。
- ・シラスの微粒分には、粗骨材のアルカリ骨材反応を抑制する効果も期待できる。

また、シラスは一般の骨材と比較して、0.15mm以下の細粒分を多量に含む他に、比重が小さく、吸水率が

大きいなどの特徴を有する。このようなことから、骨材の分類上、シラスはいわゆる低品質骨材とみなされる。

一方で、シラス細骨材を用いるコンクリートではポズラン反応が期待できるため、普通砂コンクリートに比べて高い耐硫酸塩性を有することや、塩化物イオンの浸透やアルカリ骨材反応に対しても高い抑制性能を有することが確認されており、この点を活かしたコンクリートの利用も考えられている。

一般的な川砂とシラスのシラス細骨材の諸物性値の比較を表-1に示す。

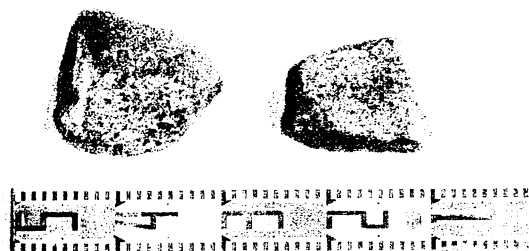


写真-2 軽石塊



写真-3 乱したシラス（分級前）



写真-4 シラス細骨材（分級後）

表-1 川砂とシラスのシラス細骨材の諸物性値の比較

	一般的な 川砂	シラス	
		最小～最大	平均
密度(g/cm ³)	2.5～2.65	2.0～2.25	2.18
吸水率(%)	1～3	2.5～9.2	4.97
粗粒率	2～3.5	1.1～1.9	1.46
実積率(%)	55～65	49～63	55.1
微粒分量(%)	～5	17～35	23.8

(3) シラス細骨材を使用する上での問題点と解決策

a) 品質面の課題

シラス細骨材の品質面の最も大きな課題は、多量の微粒分混入などの影響により、所定の流動性を得るための単位水量がかなり大きくなることである。高性能AE減水剤を用いない場合、普通砂コンクリートと同一のスランプを得るための単位水量は、普通砂コンクリートの10～15%増とする必要がある。今回の吹付けコンクリートへの適用では、高性能減水剤の使用によりスランプを確保することとした。

また、シラスの粒子表面は凹凸に富み角張っていること、細粒分を多量に含んでいることから、表面乾燥飽水状態をJISで定められたフローコーンで判定することができない。そこで、マニュアル（案）で定めている直立コーンによる判定を行った。

表面水率の管理では、通常のチャップマンプラスコでは微粒分の影響で気泡を巻き込み、これを抜くために24時間静置する必要がある。そこで、含水率を測定し、含水率と吸水率から表面水率を算出した。

b) 製造面の課題

過去にシラス細骨材を用いた工事では、シラスコンクリートの適用現場毎にシラス細骨材製造設備を設けて対応している。また、生コン工場でシラスコンクリートを製造する場合、シラス細骨材の貯蔵設備を新たに設ける必要がある。そのため、海砂等から大量生産される普通砂に対し、製造コスト面で著しく不利であった。

また、シラス細骨材は普通砂と比較すると、吸水率が大きく保水性があり乾燥しにくいいため、降雨時やその直後のシラスの採取を避け、保管ヤードも雨水がかからないように屋根や囲いを設置する必要がある。

一方で、トンネル工事におけるシラス細骨材の使用においては、上記の課題が大きく改善できる可能性がある。本現場では、トンネル掘削によりシラスが定常的に採取されている状況であり、採取コストが不要である。また、掘削したシラスは建設副産物として輸送コストをかけて場外搬出していたものであるが、これを現地にて再利用

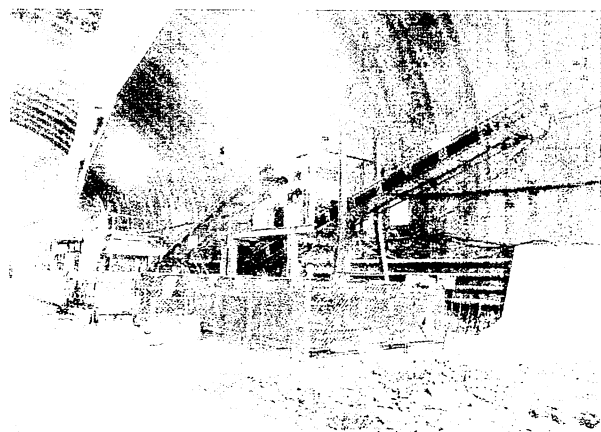


写真-5 シラスふるい分け設備

することで、輸送コストが縮減される。さらに、普通砂を購入し工事現場まで運搬するコストも不要となる。

また今回、シラス細骨材の製造設備はトンネル坑内に設けたため、雨水を避けるための特別な保管ヤードは不要である。コンクリートプラントについても、当初は細骨材として普通砂（海砂）を用いた吹付けコンクリートを製造していたが、細骨材の全量をシラス細骨材に切り替えた配合としたため、貯蔵設備の増設等の設備の改造は不要である。このため、当現場では、普通砂からシラス細骨材の切替に必要となった新しい設備は、ふるい分け設備のみであり、これまでの実績と比較して非常に安価なシラス細骨材の製造が可能であった。

こうした条件により、海砂の代替骨材の利用という目的に加え、工費面でもコスト低減となった。坑内に設置したふるい分け設備の状況を写真-5に示す。

5. シラス吹付けコンクリートの配合設計

(1) 配合設計

使用材料を表-2に、普通砂（海砂）を用いた当初の配合を表-3に示す。当初の配合をもとにして、細骨材をシラスに置き換えた配合を検討した。

マニュアル（案）によると、シラスコンクリートは、普通砂コンクリートに比べ長期にわたって強度が増進し、適切な養生がなされた場合は、材齢1～3年で、両者はほぼ同程度か、シラスコンクリートの方が高い強度を示すことが確認されている。

吹付けコンクリートに求められる重要な性能のひとつである若材齢における強度に関しては、材齢28日程度までの比較的初期材齢時で、シラスコンクリートが普通砂コンクリートに比べて0～15%程度低い強度となることが報告されている。また、シラス細骨材は表面水率の管

表-2 使用材料

材料	種類・産地など	密度その他
セメント	普通ポルトランドセメント	3.16 g/cm ³
細骨材	海砂 鹿児島県肝属郡 南大隅町沖合	2.53 g/cm ³ F.M.=2.54
シラス細骨材	新武岡トンネル坑内	2.22 g/cm ³ F.M.=1.64
粗骨材	6号砕石 (S-13)	2.69 g/cm ³
粉体急結剤	カルシウムアルミネート系	2.40～2.95 g/cm ³
粉じん低減剤	湿式用 天然高分子	—
高性能減水剤	ポリカルボキシル酸エーテル系化合物と分子間架橋ポリマーの複合体	1.02～1.06 g/cm ³

表-3 普通砂を使用した当初配合

配合区分	スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						高性能減水剤	粉じん低減剤
				W	C	S	G				
18N/m ²	10±2	63	56	227	360	934 (海砂)	777	—			0.36

表-4 シラス吹付けの配合表

配合 区分	スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
				W	C	S	G	高性能 減水剤	粉じん 低減剤
18N/mm ²	10±2	58	48	209	360	722 (シラス)	947	3.96	0.36

理が難しく、表面水率の変動により強度のばらつきが大きくなることが考えられる。この2点を考慮し、水セメント比は当初配合から5%小さくした。

細骨材率については、マニュアル（案）によるとシラスコンクリートにおいて普通砂コンクリートと同程度のワーカビリティを確保するためには、最適細骨材率は普通砂コンクリートの場合より10%程度小さくする必要がある。これを参考に、当初配合より小さい値とした。

以上の水セメント比、細骨材率の設定のもと、単位セメント量を設計基準強度 18N/mm² の吹付けコンクリートの標準的な値である 360kg/m³ として、高性能減水剤の添加により所定のスランプを確保した。配合表を表-4に示す。

なお、シラス細骨材は微粒分を多く含むことから、石炭灰等の粉体と同様に、コンクリートの粘性増加による粉じん発生量の抑制効果が得られる可能性がある。表-4において、シラスの微粒分量を23%とすると722kg/m³のうちの微粒分は166kg/m³となり、これは吹付けコンクリートに石炭灰を用いる場合の一般的な使用量（100～130kg/m³）を超える。ただし、配合設計段階では、シラス吹付けコンクリートについて、これまでの施工実績がないため、普通砂の配合と同量の粉じん低減剤を使用するものとした。

(2) 試験吹付け

実際の施工に用いている現場のコンクリートプラントと吹付け設備により、切羽鏡面への試験吹付けを行い、圧送性や付着状況を確認した。コンクリートプラントおよび吹付け設備の仕様は、一般的な山岳トンネルに適用されるものであり、コンクリートプラントは0.5m³ 練り強制二軸型、吹付け設備は一体型吹付け機械（ポンプ併用空気圧送方式、コンプレッサ搭載型）である。

試験吹付けの結果、脈動や配管閉塞などの圧送性についての問題は見られず、また、はね返り率（JSCE-F 563-2005 により測定）については、19.7%と普通砂吹付けの場合の22.1%と比較して、小さい値となっており、良好な付着性を確認できた。

(3) 強度試験結果

試験吹付け時に採取した供試体による強度試験結果を表-5に示す。各材齢の強度は規格値を満足する結果が得られた。

表-5 強度試験結果

	σ 1 (N/mm ²) プルアウト	σ 7 (N/mm ²) コア	σ 28 (N/mm ²) コア
規格値	—	—	18.0
普通砂	平均 9.7	平均 18.7	平均 26.1
シラス	12.5	17.6	22.8

(4) 耐アルカリ骨材反応性の確認

マニュアル（案）では、シラスは採取地の違いや微粒分の混入の有無にかかわらず、「JIS A 1146骨材のアルカリシリカ反応性試験（モルタルバー法）」により、「無害」と判定されることが示されており、シラスコンクリートについては、粗骨材が「無害」と判定されたものについては、耐アルカリ骨材反応性に関する照査を省略してよいこととされている。

しかしながら、シラス吹付けコンクリートについては、急結材からアルカリ成分が多量に供給されることから、安全のため、コンクリートのアルカリシリカ反応性迅速試験方法（ZKT-206:2007）を実施した。その結果、耐アルカリ骨材反応性について問題ないことを確認した。

6. 実施工結果

(1) 実施工への適用

試験施工により、シラス吹付けコンクリートが実施工に適用可能であることが確認できたため、実施工への適用を開始した。

(2) 施工性の確認

シラス吹付けコンクリートの施工状況を、写真-6 および写真-7に示す。

シラス吹付けコンクリートは、高能減水剤を用いてスランプを設定しているため、普通砂の配合と比較して、粘性が高くなる。そのため、吹付け面を平滑に仕上げるために多少のノズルマンの慣れを要する。

このような粘性の増加は、一般の打込みシラスコンクリートでも指摘されているが、スランプ 10cm 程度の範囲においては、ポンプ圧送性等のワーカビリティも良好であるようである。

現状において、吹付けコンクリート仕上がり面は、普通砂コンクリートと大きな遜色はないと考えるが、さらに仕上がり面の平坦性を向上させるためには、ポンプの圧送性、付着性を考慮して、スランプの設定を変更するといった対策が考えられる。ただし、このような対策については、コスト増となるため、費用対効果の観点を含めた総合的な判断が必要であり、今後の検討課題である。



写真-6 シラス吹付けコンクリートの施工状況

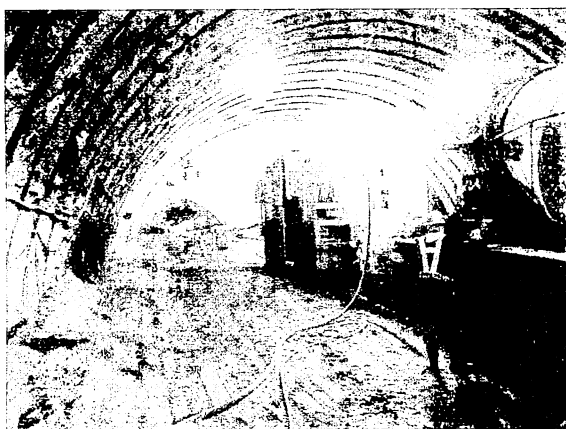


写真-7 大断面区間のシラス吹付け施工状況

(3) 圧縮強度試験結果

品質管理における圧縮強度試験結果を、普通砂吹付けの結果と合わせて表-6 に示す。シラス吹付けは普通砂の吹付けの値と比べると、ばらつきが若干大きくなっているが、十分に規格値を満足しており、適切な品質管理により要求品質を満足させることができる。

ばらつきが大きくなる要因としては、微粒分を多く含むシラス細骨材の表面水の管理が、普通砂と比べて難しいことなどが考えられる。シラスを細骨材として用いる場合には、これらの条件を踏まえて、「5. シラス吹付けコンクリートの配合設計」で述べたように、水セメント比の設定に配慮した配合設計を行う必要がある。

表-6 圧縮強度試験結果

	普通砂吹付け		シラス吹付け	
	σ 24h	σ 28d	σ 24h	σ 28d
データ数	15	15	14	14
平均値(N/mm ²)	9.7	26.1	11.3	26.0
標準偏差	1.09	1.76	2.89	3.32
変動係数(%)	11.2	6.77	25.5	12.8

(4) 粉じん抑制効果

施工を進めていくなかで、シラスに含まれる微粒分による粉じん抑制効果に期待し、粉じん低減剤の使用量を低減した場合の粉じん濃度を測定した。

その結果、使用量を当初の 0.36kg/m³ から 0.18kg/m³ にまで低減した場合にも、粉じん濃度は普通砂吹付け施工時と同等となることを確認した。

(5) 環境負荷の低減

本トンネルでは、約 11,700m³のシラス吹付けコンクリートを施工予定である。当初の配合により施工する場合、海砂の使用量として約 8,600m³ (11,700 t) が見込まれるが、シラス吹付けの適用により、これが不要となる。また、掘削残土を骨材として利用するため、残土処理量についても約 5,600m³の低減となる。

謝辞：シラス吹付けコンクリートの適用性の検討については鹿児島大学工学部教授武若耕司先生にご指導を賜った。また、実際の現場における運用においては発注者である九州地方整備局鹿児島国道事務所から様々なご指導ならびにご協力を頂いた。ここに、深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 鹿児島県土木部：シラスを細骨材として用いるコンクリートの設計施工マニュアル（案），2006。
- 2) 例えば，山口明神，武若耕司，清川秀樹，中尾好幸：高熱・温泉環境下の橋梁基礎へのシラスコンクリートの適用に関する検討 土木学会第 58 回年次学術講演概要集，V-606，pp.1209-1210，2003。
- 3) 鹿児島市地盤図編集委員会：鹿児島市地盤図，p9，1995。
- 4) 九州地区における土木コンクリート構造物 設計・施工指針（案），国土交通省九州地方整備局，2008.4

THE APPLICATION OF SHOTCRETE WITH SHIRASU AS FINE AGGREGATE

Tetsuro HYUGA, Toru TAHO and Ritsu SUGIYAMA

In South Kyusyu region, most of fine aggregate is produced from the sea sand. But, in recent years, mining sand from sea beds is becoming an environmental issue and in the near future, it would run out. Therefore, there has been carrying out various research to apply Shirasu, which is defined as the non-welded part of pyroclastic flow deposits, to use as fine aggregate.

Authors developed shotcrete with Shirasu as fine aggregate and applied to the construction of Shin Takeoka tunnel which is excavated through a Shirasu plateau. In this application, authors confirmed enough applicability of Shirasu to the fine aggregate of shotcrete.