

論文 シラスコンクリートの収縮特性に関する基礎的研究

小出 美佐都^{*1}・武若 耕司^{*2}・山口 明伸^{*3}・二河 瑞規^{*4}

要旨：シラスコンクリートは、土木構造物への実用化が進められる一方で、シラスの微粒分を多く含むために単位水量が大きくなることから、乾燥収縮量の増大が問題とされている。そこで本研究では、自己収縮の影響も含めた収縮特性ならびに、収縮ひび割れの発生状況等について検討を行った。併せて、シラス微粒分にポゾラン活性が認められることから、乾燥開始材齢を変化させた場合の収縮性の違いについても検討を行った。これらの結果、長期間湿潤養生することでポゾラン反応の進行による組織の緻密化から乾燥収縮量は低減し、養生中の自己収縮を考慮しても収縮量は普通コンクリート程度まで抑制できることが確認された。

キーワード：シラスコンクリート, 乾燥収縮, 自己収縮, 単位水量, ひび割れ, シラス

1. はじめに

著者らは、1980年代後半から、南九州に大量に存在するシラスの有効な利用方法の1つとして、コンクリート用細骨材への利用を考えた諸検討を行ってきた。その結果、シラスを細骨材として使用したコンクリートの耐硫酸塩性が、通常のコンクリートに比べて格段に優れていることや、海洋からの塩分浸透に対しても極めて高い抵抗性を示すこと、さらには、地山シラス中の0.15mm以下の微細粒分にはアルカリ骨材反応に対する抑制効果が期待できることが分かってきた。これらは主に、シラスの成分として約70%も含まれるシリカのポゾラン反応による効果といえるが、これは微細粒分においてより有効に発現することも明らかになっている¹⁾。

1990年代後半に入り、海砂の採取規制に伴う代替骨材としてシラスが着目されるようになると、シラスを細骨材として用いるコンクリート、いわゆるシラスコンクリートのより本格的な検討が進むようになってきた。その結果、鹿児島県では、シラスコンクリートの積極的な活用を目指して、1998年からは毎年、シラスコンクリートを用いたモデル工事が実施され、さらに、2002年からは、シラスコンクリートの耐久性上の特徴を生かし、温泉環境に建設される橋梁基礎工事に我が国で初めてシラスコンクリートが本格的に適用されるまでになった²⁾。また、2001年に産学官一体となった『シラスコンクリート検討委員会』が設立され、2006年1月には、鹿児島県より「2005年制定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)」が発刊された³⁾。

しかしながら、シラス細骨材は、シラス中に約20~40%も含まれる0.15mm以下の微粉末を除去せずに、5mm以下の粒径のシラス全てを細骨材として使用するため、出来

上がったシラスコンクリートではシラス微粉末も含めると粉体量がかなり多くなり、適切な流動性を得るための単位水量が大きくなる。そのため、前述のマニュアルでは単位水量低減のために、シラスコンクリートの実用化に際して、高性能AE減水剤を標準使用としているが、それでも、単位水量は195~200kg/m³と、一般のコンクリートに比べて大きくなる。このため、収縮ひび割れの発生が懸念される上部工や建築部材のような薄肉の部材へのシラスコンクリートの適用は未だ見合わせているのが現状である。

そこで、本研究では、シラスコンクリートの収縮特性について検討するため、シラスコンクリートならびに、比較用の普通コンクリートを対象に、乾燥開始材齢が異なる場合の自由収縮性状の違い、および収縮拘束状態における乾燥収縮ひび割れの発生状況、さらには養生期間における自己収縮ひび割れを考慮したシラスコンクリートの長期収縮性状とシラスのポゾラン反応性との関係などについて、実験的検討を行った。

表-1 使用材料

セメント	C: 普通ポルトランドセメント (密度 3.16 kg/m ³)
細骨材	シラス: 鹿児島県横川町産シラス (表乾密度 2.20 kg/m ³ , 0.075mm 以下微粒分量 20.1%) 川砂: 富士川産川砂 (表乾密度 2.64 kg/m ³)
粗骨材	G: 始良産砕石 (表乾密度 2.62 kg/m ³)
混和剤	SP: 高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系) AE: AE 減水剤 Air 助剤: 空気量調整剤(陰イオン界面活性剤系)

*1 コーアツ工業(株)工修 (正会員)

*2 鹿児島大学大学院 理工学研究科 教授 工博 (正会員)

*3 鹿児島大学大学院 理工学研究科 准教授 工博 (正会員)

*4 鹿児島大学 工学部海洋土木工学科 (非会員)

表 - 2 コンクリートの配合および 28 日圧縮強度

コンクリートの種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								スラブ値(cm)	空気量 (%)	28 日強度 (N/mm ²)
			W	C	シラス	川砂	G	SP (%)	AE (%)	Air 助剤(%)			
シラス SP	40	31.0	203	508	403	-	1069	0.85	-	0.20	11.0	4.9	43.7
	50	33.0	195	390	462	-	1117	0.85	-	0.15	10.0	4.8	38.4
	60	35.0	195	325	506	-	1119	1.05	-	0.19	10.0	4.5	24.8
川砂 AE	40	41.5	173	433	-	709	989	-	0.28	0.18	10.0	5.0	46.1
	50	43.5	173	346	-	775	996	-	0.24	0.18	10.0	4.1	37.6
	60	45.5	173	288	-	833	986	-	0.20	0.10	11.0	4.3	32.2

* Air 助剤は 100 倍希釈したものの混入%

表 - 3 各試験における実験条件および測定方法

W/C	試験名	供試体の種類	供試体の測定条件	測定方法
40 50 60	自己収縮試験	内寸法 10×10×40 cmの型枠内 (ポリエステルフィルムで封緘状態)	凝結開始時間～材齢 7 日 (脱型以前)	JCI 法(改訂版 2002)
			養生 7 日後 水中浸漬	JIS A 1129-3 に準拠 (20±2 , 60±5%)
	乾燥収縮試験	自由膨張供試体	養生 7 日後	
		拘束供試体	養生 28 日後	
	収縮ひび割れ試験		養生 91 日後	JIS A 1151 に準拠

* 養生条件は湿潤養生状態

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

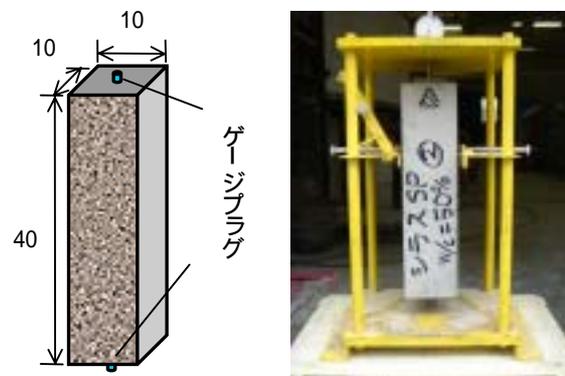
本実験で使用した材料を、表 - 1 に示す。セメントに普通ポルトランドセメント、細骨材に鹿児島県横川町産シラスおよび比較用の川砂、粗骨材に碎石を用いた。また、シラスコンクリートでは、混和剤として高性能 AE 減水剤（以下 SP）を、川砂コンクリートでは AE 減水剤（以下 AE）を用い、それぞれ水セメント比 40%、50% および 60% の 3 水準とした計 6 配合のコンクリートについて、表 - 2 に示す配合で作製した。また、目標スラブ値を 10±1 cm、目標空気量を 4.5±0.5% と定めた。なお、添加した混和剤の添加量は粉体量に対する割合であるが、シラスコンクリートの場合には、セメント質量とシラス全質量の 20.1% の割合で含まれる 0.075 mm 以下のシラス微粉末質量との和を粉体量とし、これに対する割合で混和剤を注入した。なお、シラスコンクリートの配合は、『2005 年制定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)』³⁾ に基づき決定した(以下、シラスコンクリートおよび川砂コンクリートをシラス SP および川砂 AE と称す)。各配合のコンクリートにおける 28 日圧縮強度試験の結果を表 - 2 に併せて示す。

2.2 実験方法および測定方法

各試験は表 - 2 に示す配合で作製したコンクリートを用いて行い、実験条件および測定方法は表 - 3 にまとめて示す。



写真 - 1 JCI 法による自己収縮の測定状況
(凝結の始発より材齢 7 日まで)



(単位: cm)

図 - 1 自由膨張供試体およびひずみ測定方法

(1) 自己収縮試験

凝結始発時間から材齢7日までの材齢初期における自己収縮試験は、日本コンクリート工学協会自己収縮研究委員会の「セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法(改訂版2002)」⁴⁾の脱型以前の試験方法に従って行った。試験にあたっては、まず、内寸法 10×10×40 cmの型枠を用いて、収縮ひずみ測定用供試体3体と、コンクリートの熱膨張係数を補正するためのコンクリート温度補正用に熱電対を埋め込んだ供試体1体を作製し、凝結始発直後から、自己収縮ひずみの測定を開始した(表-3および写真-1参照)。始発時間は、JIS R 5201によるセメントペーストの凝結始発時間(2.55(hrs.))および、水セメント比と凝結時間に関する既往の文献⁵⁾を参考に、W/C=40%、50%、60%のそれぞれの始発時間を3.5(hrs.)、4.0(hrs.)、4.5(hrs.)と設定した(表-3参照)。

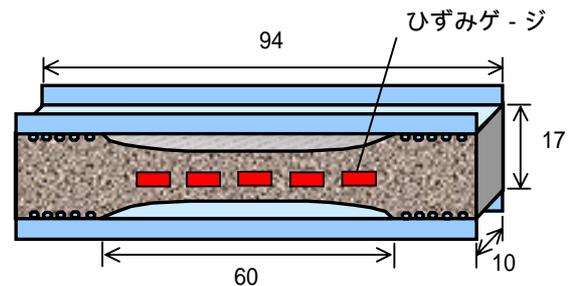
材齢7日以降における養生期間中の自己収縮ひずみの測定については、乾燥収縮試験と同様、図-1に示す10×10×40 cm供試体を用いて、JIS A 1129-3に準拠して行った。すなわち、供試体は各条件それぞれ3体ずつ作製し、7日間湿潤養生後に初期値を測定し、直ちに水中浸漬(20±2)を開始した。なお、この場合の自己収縮ひずみの測定時には、供試体の質量も併せて測定した(表-3参照)。

(2) 乾燥収縮試験

図-1に示すように10×10×40 cmのコンクリート供試体の端部にゲージプラグを埋め込んだものを自由膨張供試体として用い、JIS A 1129-3に準拠して、乾燥収縮ひずみをダイヤルゲージ法で計測した。供試体は各条件でそれぞれ3体ずつ作製し、7日、28日および91日間湿潤養生後に初期値を測定し、直ちに恒温恒湿室(20±2, 60±5%)で乾燥を開始した。なお、測定期間は材齢365日目までとし、各測定時には、供試体の質量も併せて測定した(表-3参照)。

(3) 収縮ひび割れ試験

乾燥収縮試験と同時進行で、拘束された供試体の乾燥ひび割れ特性を把握するために、図-2に示す拘束供試体を用いて、乾燥収縮ひび割れ発生までの日数を把握する試験を行った。試験方法はJIS A 1151に準拠し、供試体に発生するひび割れの確認は、目視によって毎日1回行い、貫通ひび割れが確認できた時点でひび割れ発生乾燥材齢とした。さらに、コンクリート表面(打設時底面)に貼り付けたひずみゲージによりひび割れが発生するまでのコンクリートのひずみを1時間おきに測定し、その収縮ひずみの急変点からも合わせてひび割れ発生時の確認を行った。ひずみゲージは、図-2に示すように供試体くびれ部分にあたる引張応力が卓越する部分に、



(単位: cm)

図-2 拘束供試体の概要図

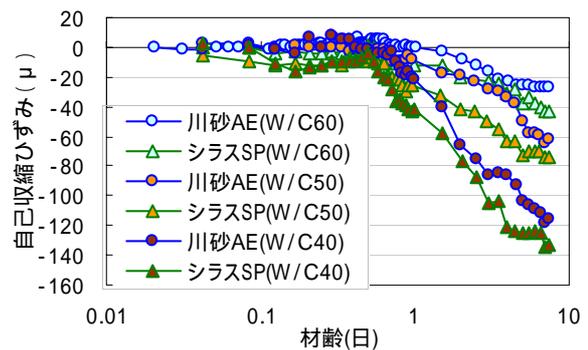
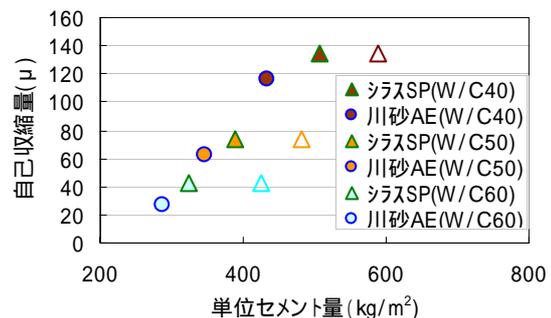


図-3 自己収縮ひずみの経時変化(材齢7日以前)



* 図中の白抜きは、全微粒分量(単位セメント量にシラスの単位微粒分量を足したものを)を示す。

図-4 単位セメント量と自己収縮量との関係(材齢7日以前) 10 cm間隔で5箇所に貼り付けた。収縮ひび割れ試験では、乾燥収縮試験に用いる自由膨張供試体と同一バッチのコンクリートを用い、供試体は各条件それぞれ3体ずつ作製した。養生条件および実験環境共に乾燥収縮試験と同一とし、各供試体は7日間湿潤養生後に、脱型しゲージを貼り付け、恒温恒湿室(20±2, 60±5%)で乾燥を開始した(表-3参照)。

3. 実験結果および考察

3.1 自己収縮試験結果

図-3に水セメント比40%、50%および60%の場合のシラスSPと川砂AE、それぞれにおける凝結始発時から材齢7日までの自己収縮ひずみの経時変化を示す。なお、この結果を含め、以下で示す結果はすべて同一条件にお

ける供試体 3 体の平均値である。それぞれの水セメント比ごとに見ると、いずれも、シラス SP の方が川砂 AE よりも自己収縮ひずみが大きくなっていった。実施した全てのコンクリートについて単位セメント量と材齢初期における自己収縮量の関係を取りまとめて図 - 4 に示す。なお、図中の白抜きは、シラス SP において全微粒分量（セメント量 + 0.075 mm 以下のシラス微粒分量）を横軸にとった場合を示す。この図から、単位セメント量が大きくなると、それに従って自己収縮量は直線的に増大し、自己収縮量と単位セメント量との関係はシラス SP も川砂 AE もほぼ同一線上にあると言える。この結果より、シラスの微粒分のポゾラン活性に起因する自己収縮は、少なくとも材齢初期の段階では考慮しなくても良いと考えられた。

材齢 7 日以降のひずみの測定は、湿潤養生 7 日後脱型した供試体を水中浸漬状態にすることで測定した。図 - 5 および 6 には、一例として W/C=40% のシラス SP と川砂 AE について、湿空養生 7 日で脱型し、その直後から水中浸漬状態にした場合のひずみと質量変化率の経時変化を示す。このうちひずみに関しては、川砂 AE では測定期間中僅かに膨張する程度であったが、シラスコンクリートでは、材齢 40 日程度まで引張ひずみの増加が確認された。一方、質量変化率については、いずれも水中浸漬直後に大きく増加し、その後は穏やかな増加となっており、これは吸水の影響によるものと考えられた。

3.2 乾燥収縮試験結果

(1) 乾燥開始材齢が異なる場合の乾燥収縮特性

乾燥収縮試験においては、シラスのポゾラン活性に着目し、長期養生をすることで、その間にポゾラン反応によるシラス SP の緻密化が進み、その後の乾燥収縮が抑制されるのではないかとこの観点から検討を行った。ここではまず、乾燥開始材齢以降の収縮量のみについて検討する。図 - 7 および図 - 8 に W/C=60% の場合の 7 日、28 日、91 日間湿潤養生後の乾燥過程における収縮ひずみおよび質量変化率の経時変化について示す。材齢 7 日後乾燥させた場合、単位水量の大きいシラス SP の乾燥収縮ひずみは川砂 AE より 150 μ 程度も大きく、質量変化率においても同様で、その差は 1.5% 程度と大きい。次に、材齢 28 日後乾燥させた場合では、シラス SP と川砂 AE との間の乾燥収縮の大小関係は材齢 7 日後に乾燥させた場合と変わりはないが、それぞれの大きさについて見ると、川砂 AE では、乾燥収縮ひずみと質量変化率のいずれもが、材齢 7 日後乾燥させた場合と同程度であるのに対し、シラス SP では、収縮ひずみおよび質量変化率ともに川砂 AE の値に明らかに近づいていた。さらに、材齢 91 日後乾燥させた場合では、養生期間の増加によるシラス SP の乾燥収縮抑制の効果が著しく現れ、乾燥収

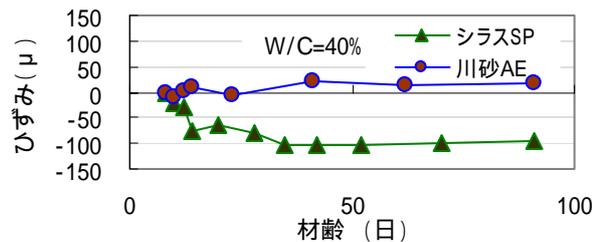


図 - 5 水中浸漬状態における自己収縮ひずみの経時変化

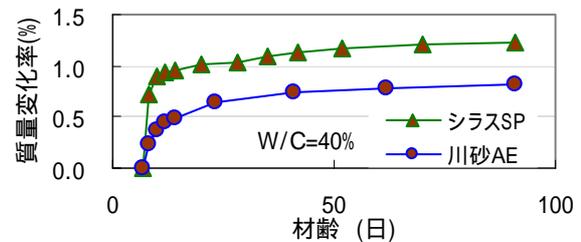


図 - 6 水中浸漬状態における質量変化率の経時変化
縮ひずみは川砂 AE よりも小さくなり、400 μ 程度にまで低下した。また、シラス SP の質量変化率も川砂 AE とほぼ同じとなった。これらのことから、シラス SP では養生中におけるシラスのポゾラン反応に起因するコンクリートの緻密化がペースト部分からの水分の蒸発を減少させ、乾燥収縮を抑制したと考えられた。図 - 9 は各水セメント比において、収縮および質量変化がほぼ収束した材齢 1 年時の質量減少量と乾燥収縮量との関係を示したものである。この結果、W/C=60% の場合だけではなく W/C=40% および 50% の場合についても、川砂 AE の収縮ひずみおよび質量変化率の収束値は、初期養生期間の如何にかかわらず、ほとんど違いは見られないのに対し、シラス SP については材齢 91 日養生後乾燥させた場合では乾燥収縮量および質量減少量のいずれについても大幅に抑制されていた。また、この養生期間の増加による乾燥収縮抑制効果は、高 W/C になるにつれて顕著になる傾向も認められた。

(2) 自己収縮を考慮した場合の乾燥収縮特性

図 - 10 には、初期の養生期間における自己収縮を考慮し、自己収縮と乾燥収縮を足し合わせた総収縮ひずみの経時変化を推定した結果の一例として、W/C=40% の場合を示した。7 日間湿潤養生後、乾燥を受けたシラス SP の収縮ひずみは自己収縮ひずみを考慮すると 700 μ 程度となり、川砂 AE よりも 100 μ 程度大きくなった。一方、91 日間の養生後に乾燥の影響を受ける場合のシラス SP では、91 日までの水中養生期間中にポゾラン反応に起因すると思われる自己収縮ひずみの増大が確認されたが、この養生期間中における自己収縮ひずみを考慮しても、その合計の収縮ひずみは 550 μ 程度にとどまり、この値は 7 日間養生後乾燥状態とした川砂 AE の収縮ひずみよりも小さく、また、91 日間養生した川砂 AE と比較して

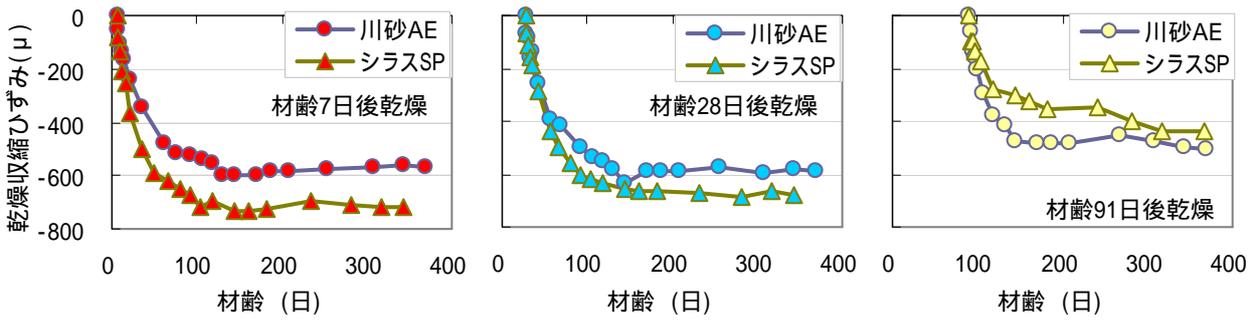


図 - 7 乾燥収縮ひずみの経時変化 (W/C=60%の場合)

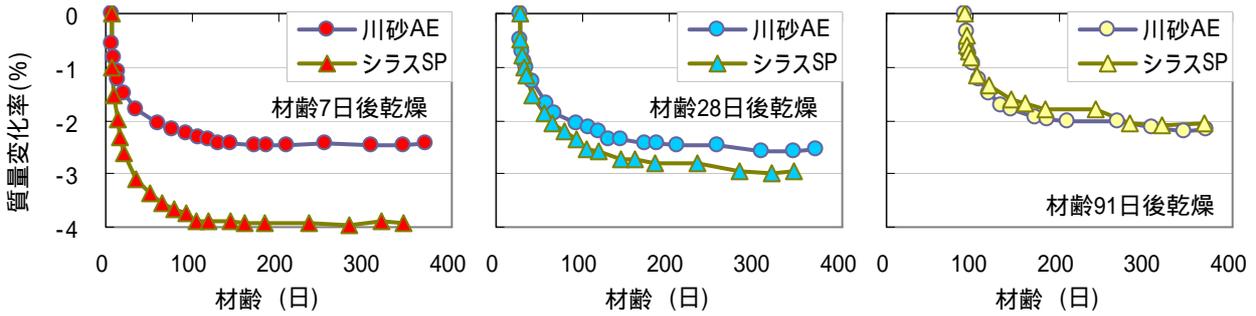


図 - 8 質量変化率の経時変化 (W/C=60%の場合)

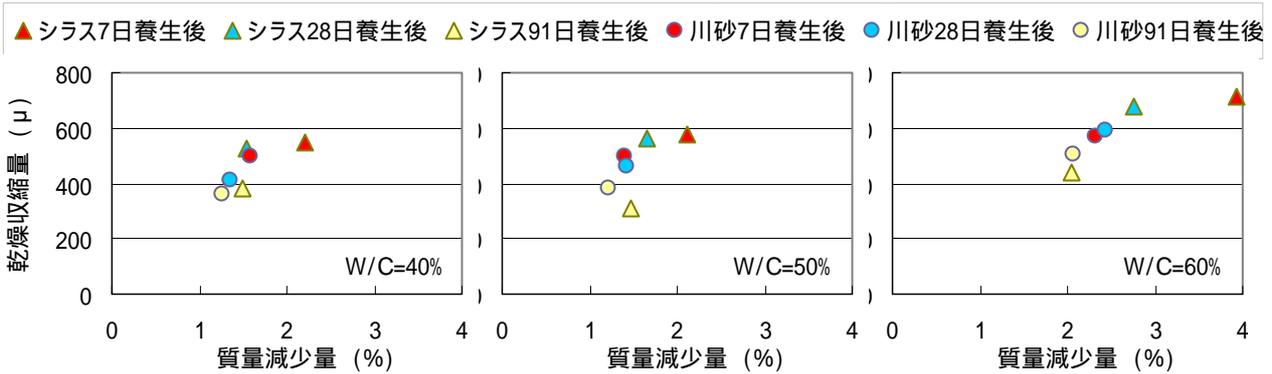


図 - 9 乾燥開始材齢を変化させた場合の質量減少量と乾燥収縮量の関係

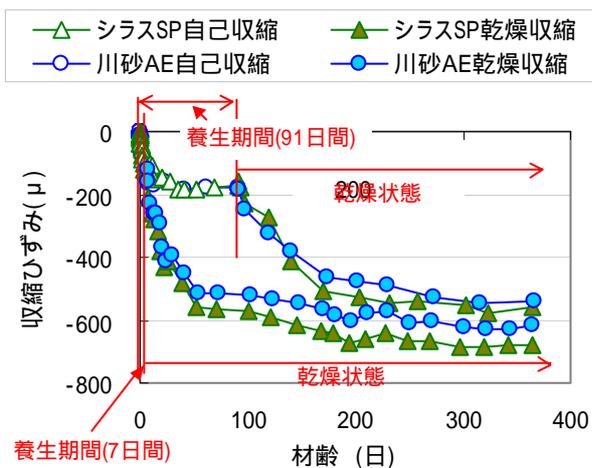


図 - 10 収縮ひずみの重ね合わせ (W/C=40%の場合)

も、ほぼ同程度であった。この結果から、シラス SP は自己収縮の影響を考慮しても養生期間を長くすることで、収縮ひずみをある程度抑制できると考えられた。

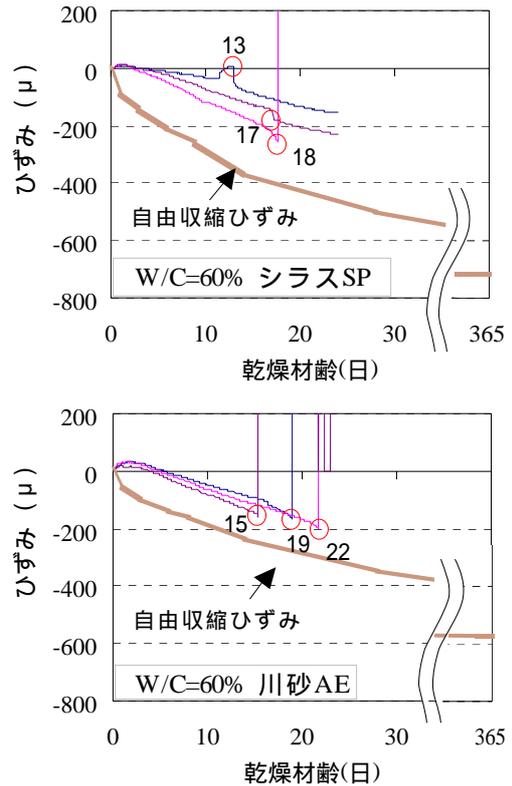
3.3 乾燥収縮ひび割れ試験結果

拘束供試体におけるひび割れの発生状況は、いずれの供試体とも、乾燥開始から数日後に、打設時上面に1本あるいは複数の目視で確認できる程度の表面ひび割れが発生し、その後、その中の1本が反対側の面(打設時底面)まで進行して、貫通ひび割れとなった。図-11に、拘束供試体表面のひずみの経時変化の一例として、最も乾燥収縮が大きかった W/C=60%について示す。なお、図中のひずみは、収縮ひび割れ発生位置直近のひずみゲージによるひずみであり、同一条件で3体ずつある供試体についてそれぞれ示すとともに、ひび割れ発生時点の乾燥材齢についても図中に表記した。また、乾燥収縮試験において自由膨張供試体で測定された材齢7日乾燥開始の乾燥収縮ひずみを、自由収縮ひずみとして併せて示した。この図において、ひび割れ発生乾燥材齢について見ると、シラス SPの方が川砂 AEよりも、幾分早くひび割れが発生し、発生時期もばらつく傾向にあるが、それ

ほど大きな差は認められない。ただし、ひび割れ発生時付近のひずみ挙動に着目すると、川砂 AE では、ひずみゲージにより測定されているひずみが、ひび割れ発生による応力解放により急激に変化し、その急変が生じた時期と収縮ひび割れの貫通が確認された時期とが一致するのに対して、シラス SP では、ひずみに急激な変化が認められないまま貫通ひび割れが確認される状況も見られた。図 - 12 は、ひび割れ発生直前に拘束供試体で測定されたひび割れ近傍のひずみと、同一条件における自由膨張供試体における乾燥収縮ひずみとのひずみ差、すなわちひび割れ発生時にコンクリートに生じたと予測される引張ひずみと、ひび割れ発生乾燥材齢との関係を示した。この結果からも、ひび割れの発生材齢については、上記したように W/C が同じ場合、シラス SP が川砂 AE よりも幾分短い傾向にあった。しかしその一方で、ひび割れ発生時にコンクリート内に生じたと推定される引張ひずみについてみると、W/C=40% の場合では川砂 AE がシラス SP よりも若干大きいものの、W/C が大きくなると、シラス SP の方がその値はかえって大きくなる傾向にあった。この結果と図 - 11 で示した拘束時のコンクリートひずみ挙動から、養生 7 日後に乾燥状態にした場合、特に高 W/C のシラス SP おいては、ひび割れが貫通するまでの時期にコンクリートが塑性的な挙動を示している状況が想定され、その原因の 1 つとしてコンクリート内部に微細ひび割れが発生している可能性が示唆された。また、このため、図 - 11 において、シラスコンクリートのひび割れ発生時期がよければついたものと考えられた。ただし、長期養生した場合、特にシラス SP では、収縮抑制が大幅に期待できることならびに、ポゾラン反応によるコンクリートの緻密化から微細ひび割れの発生も抑制されると考えられることから、適切に養生されたシラス SP では、乾燥収縮ひび割れの発生は、同程度の水セメント比の川砂 AE と同程度あるいはそれ以上のひび割れ抵抗性を有すると予想された。

4. まとめ

- (1) 材齢初期段階での自己収縮について、シラス微粒分のポゾラン活性に起因する収縮は考慮しなくて良い。
- (2) シラスコンクリートは養生期間を十分にとることで、養生中の自己収縮を加味した場合でも、収縮は大幅に抑制できる。
- (3) シラスコンクリートにおける乾燥収縮ひび割れについては、適切に十分な養生を行うことで収縮抑制が大幅に期待でき、また、ポゾラン反応によりコンクリート組織が緻密化することから、同程度の水セメント比の川砂コンクリートと同程度あるいはそれ以上のひび割れ抵抗性を有すると予想された。



図中の○は目視によるひび割れ発生時点、"数字"はひび割れ発生時の乾燥材齢を示す。
図 - 11 ひび割れ供試体におけるひずみ変化

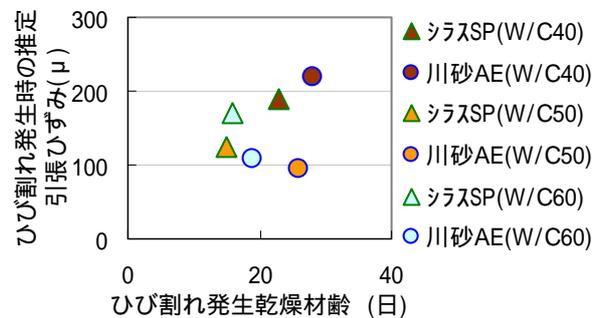


図 - 12 ひび割れ発生時における乾燥収縮ひずみとひび割れ供試体に生じたひずみとのひずみ差の関係

参考文献

- 1) 武若耕司：しらすの利用によるコンクリートの耐久性改善に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.11，No.1，pp.551 - 556，1989
- 2) 武若耕司：シラスコンクリートの特徴 - 鹿児島県制定マニュアルの内容を基にして - ，コンクリート工学，Vol.45，No.2，pp.16 - 23，2007.2
- 3) 鹿児島県：2005年 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），Nov.2006
- 4) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮委員会報告書，pp.51 - 54，2002.9
- 5) 魚本健人，大下健二：高性能減水剤によるコンクリートの凝結遅延に関する基礎的研究，コンクリート工学論文集，pp.119 - 129，1994