

論文

[1092] 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

正会員 武若耕司 (鹿児島大学工学部)

1. まえがき

著者は、過去3年間にわたって、南九州に多量に存在するしらす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、しらすを細骨材として使用したコンクリートの最大の特徴の1つとして、非常に優れた耐硫酸塩性能を有していると予想される結果が得られた。¹⁾

ところで、しらすは、火山の噴火時に火山ガラスを主とする溶融物質の破片および粒子が厚い雲状となって流下し、堆積、溶結してできた発泡状物質であり、その全体的な化学組成はいわゆるポゾラン物質に非常に類似している。従って、しらす使用コンクリートの優れた耐硫酸塩性能は、しらす自身のポゾラン反応性となんらかの関わりを有しているとも予想できる。またこのことは、従来、ポゾランの使用によって改善が期待されている他の耐久性上の諸性能についても、しらすの使用による改善効果を予期させるものでもある。

そこで本研究では、しらすを細骨材として使用したコンクリート(以下、しらすコンクリート)を中心として、しらすの使用によるコンクリートの耐久性改善効果に関する若干の検討を試みた。

2. 実験の概要

2. 1 検討項目

しらすコンクリートの耐久性に関して、①耐硫酸塩性、②耐海水性および③アルカリ骨材反応に対する抵抗性の3つの項目を取り上げて検討を行った。

2. 2 使用しらすの諸性質

検討を行ったしらすの主な物理的性質を、比較のため使用した川砂とともに表-1に示す。なお、地山から採取したしらすは、粒径5mm以上の軽石分を除去して用いたが、一部の実験では、地山しらす中に多量に含まれる0.15mm以下の細粒分も除去したもの、あるいは、この細粒分単独のものについても検討した。表-1には、これら分級したしらすの物性についても示した。

また、表-2には、地山しらすおよび分級しらすの主な化学組成および鉱物組成について示した。この結果からも明らかのように、しらすは、その化学組成がポゾランに極めて類似し、内部

表-1 しらすおよび川砂の主な物理的性質

細骨材の種類	比重		吸水率 (%)	粗粒率 (%)	実積率 (%)	洗い試験 (%)		単位容積質 量(kg/m ³)	40t破碎 値(%)	比表面積 (cm ² /g)
	表乾	絶乾				0.15mm以下	74μ以下			
緑川産川砂	2.61	2.54	2.95	3.28	64.7	5.2	1.7	1647	2.5	-
谷山産地山しらす*	2.06	1.85	11.31	1.58	64.1	-	21.9	1187	29.1	-
田上	2.06	1.86	10.88	1.88	59.1	29.5	15.8	1101	29.8	-
0.15mmOVER*	2.07	1.89	9.50	2.36	-	0.0	0.0	-	-	-
0.15mmUNDER	2.39**	-	-	-	-	100.0	100.0	-	-	1610

* 5mm以上の粒子はあらかじめ除去してある

** 絶乾にした試料の真比重

表-2 しらすの化学組成および鉱物組成

種類	化学組成									鉱物組成		
	ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	火山ガラス	石英	長石
地山しらす	2.02	69.84	14.97	2.59	2.92	0.58	3.94	2.49	0.28	++++	++	+++
0.15mmOVER	1.43	68.64	16.54	2.65	3.64	0.70	3.81	1.98	0.29	++++	++	+++
0.15mmUNDER	2.96	71.70	13.36	2.35	1.61	0.37	3.53	3.35	0.28	+++++	+	+

には多量の火山ガラスが含まれている。

2. 3 実験方法

1) 耐硫酸塩性に関する検討：使用したコンクリートの配合を表-3に示す。なお、これらの配合は、これまでの検討結果を基に、スランプ値一定となるように定めたものである¹⁾。実験は、φ100*200 mm円柱供試体を水中養生28日後から硫酸ナトリウム10%水溶液中に全浸漬させ、その重量あるいは動弾性係数等の長期の変化状況を調査した。

また、特に、地山しらす中に多量に含まれる細粒分の影響を検討するため、表-4の配合で作製した40*40*160mmモルタル供試体による実験も実施した。この実験では供試体を材令14日まで水中養生した後、硫酸ナトリウム10%水溶液中に供試体の半分を部分浸漬させ、コンクリート供試体と同様の物性調査を実施した。今回の報告では、コンクリート供試体については浸漬材令約120週まで、また、モルタル供試体については浸漬材令約50週までの結果を示す。

2) 耐海水性に関する検討：実験室内の海水槽内に表-3の配合で作製したコンクリート円柱供試体を材令28日から全浸漬させ、その重量および動弾性係数の変化について調査を行った。ここでは、浸漬材令約120週までの結果を示す。また、W/C50%の供試体については浸漬材令120週における塩分浸透状況についても調査した。

3) アルカリ骨材反応の抑制に関する検討：アルカリ反応性の粗骨材を使用したことによって生じる劣化に対する、しらすの抑制効果を検討した。使用した反応性粗骨材は、鹿児島県郡山産の砕石である。これは、ガラス質両輝石安山岩に分類され、火山ガラスを全岩に対して33%程度含むものである。なお、この骨材の化学法による有害性判定結果を、比較のため用いた未反応性粗骨材、しらすおよび川砂の結果とともに図-1に示す。

アルカリ骨材反応試験には75*75*400mmのコンクリート供試体を用い、供試体は材令1日で脱型後40℃、RH100%の養生槽で養生して反応を促進させた。コンクリートの基本配合を表-5に示す。コンクリート中のアルカリ量は、セメントと

表-3 耐硫酸塩性および耐海水性試験用コンクリートの配合

細骨材の種類	W/C (%)	S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				高性能減水剤(cc/m ³)	備 考
			C	W	S	G		
地山しらす	30	29	797	236	306	938	4780	田上産
	40	31	578	231	376	1080	-	"
	50	31	428	224	415	1199	-	谷山産
	60	33	362	217	455	1196	-	"
	70	35	299	209	502	1209	-	"
	80	39	254	203	579	1167	1500	田上産
川砂	30	41	660	198	637	934	3300	緑川産
	40	43	495	198	727	982	-	"
	50	45	396	198	798	994	-	"
	60	47	330	198	859	987	-	"
	70	49	283	198	915	970	-	"
	80	55	248	198	967	945	1500	"

*目標スランプ値10cmとして配合を定めた。

表-4 耐硫酸塩性試験用モルタルの配合

NO.	細骨材の種類	W/C (%)	W/S (%)	単 位 量 (kg/m ³)		
				W	C	S
A	川砂	60	17	265	444	1556
B	"	45	18	264	580	1400
C	地山しらす	60	36	349	581	968
D	しらす0.15mmunder	60	85	495	824	582
E	"	85	68	502	590	742
F	しらす0.15mmover	60	37	355	592	960
G	豊浦標準砂	60	29	353	588	1217

*いずれも目標フロー値を200mmとして配合を定めた

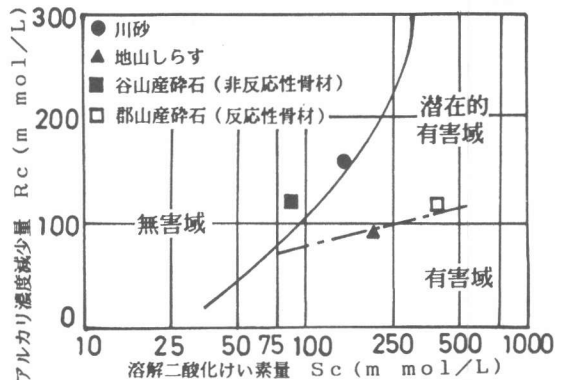


図-1 使用骨材のアルカリ骨材反応性に関する化学法による試験結果

表-5 アルカリ骨材反応試験用コンクリートの基本配合

細骨材の種類	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				しらす微粉末
			C	W	S	G	
川砂	50	46	193	386	825	928	-
"	50	46	193	386	806	928	19kg/m ³
地山しらす	50	31	225	450	404	1095	-
しらす0.15mmover	50	31	225	450	404	1095	-

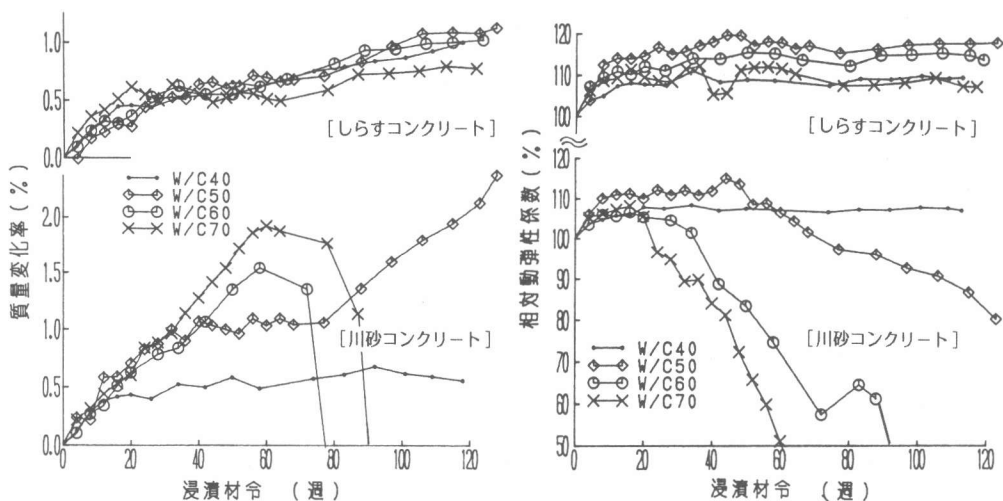


図-2 Na_2SO_4 10%水溶液中のコンクリートの重量および相対動弾性係数の変化

して等価 Na_2O 0.61%の普通ポルトランドセメントを使用し、これに NaOH を添加して、セメント重量比で0.8、1.6 および2.4%となるように設定した。ここでは、材令16週までの結果を示す。

3. しらすを使用したコンクリートの耐硫酸塩性能

図-2には、硫酸ナトリウム10%水溶液中に浸漬させたコンクリート供試体の重量および相対動弾性係数の経時変化を示した。また、動弾性係数の代表的な値を図-3に示す。これらの結果から、しらすコンクリートと川砂コンクリートにおける耐硫酸塩性能の明らかな相違を確認できる。すなわち、しらすコンクリートでは、いずれの水セメント比においても、約2年の浸漬期間中に物性の著しい変化は認められず、安定した性状を示しているのに対し、川砂使用の場合には、特に $W/C50\%$ 以上において、早いものでは浸漬材令20週目前後から重量の急激な増加傾向とこれに付随する動弾性係数の著しい減少傾向が現れた。

従って、浸漬初期にはいずれの水セメント比においても、川砂コンクリートの動弾性係数がしらすコンクリートの値を1~2割程度上回っていたが、浸漬材令1年後には、 $W/C50\%$ 以上で両者の関係は逆転し、さらに浸漬材令1年半後には、 $W/C60\%$ 以上の川砂コンクリートは破壊の様相を呈していた。また、川砂コンクリートの場合には、 $W/C40\%$ 以下のものについてもコンクリート表面に多数のポップアウトやふくれを起こしている箇所が確認されたが、しらすコンクリートでは、写真-1に示すように、

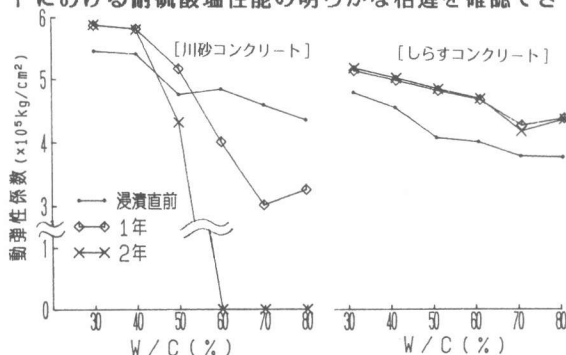


図-3 Na_2SO_4 10%水溶液中のコンクリートのW/Cと動弾性係数の関係

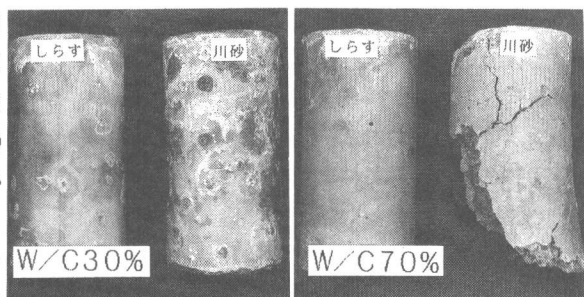


写真-1 Na_2SO_4 10%水溶液中のコンクリートの状況 (浸漬材令: 120週)

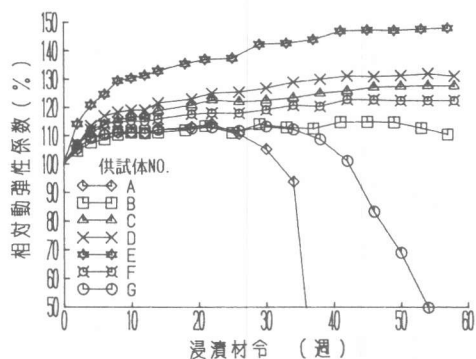


図-4 Na₂SO₄ 10%水溶液中のモルタル供試体の相対動弾性係数変化

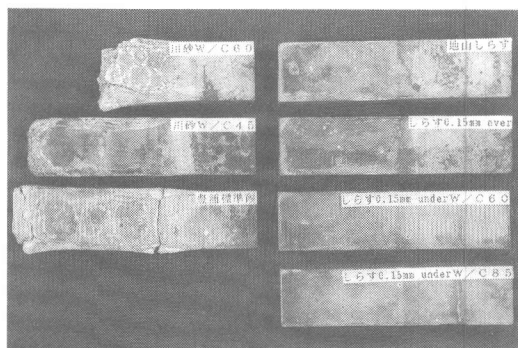


写真-2 Na₂SO₄ 10%水溶液中のモルタルの状況 (浸漬材令: 55週)

W/C40%以下の供試体において若干のふくれが確認された以外は、いずれのコンクリートとも外見上の健全性も十分に保持されていた。

図-4にはモルタル供試体における相対動弾性係数の経時変化を、また、写真-2には浸漬材令1年における供試体の外観状況を示した。これらの結果からも、しらすの使用によるモルタルの耐硫酸塩性能の明らかな向上を確認できる。ただし、相対動弾性係数の変化の状況や外観観察結果などを総合すると、用いるしらすの分級状況の相違によってもこの性能は幾分異なり、全般的には、0.15mm以下の細粒分を除去したしらす、地山しらす、細粒分のみのしらすの順にしらす中の細粒分の混入量が多い程、これを使用したモルタルの耐硫酸塩性能もより高まるようである。

4. しらすを使用したコンクリートの耐海水性能

図-5には、海水槽内に浸漬させたコンクリートの相対動弾性係数の経時変化を示した。浸漬材令2年までのところ、しらすあるいは川砂のいずれを使用したコンクリートにおいても、海水浸漬による物性あるいは外観の大きな変化は見受けられず、いずれも健全性は維持されていた。

一方、図-6は、塩分の分析方法に関するJCI案に基づいて測定したW/C50%のコンクリート中の全塩分および可溶性塩分量を示したものである。この結果にはしらすコンクリートと川砂コンクリートの相違が明確に現れており、コンクリート表面からいずれの深さにおける塩分量ともしらすコンクリートが川砂コンクリートに比べて少なく、その差は、内部ほど大きく現れる傾向にあった。また、図中には、拡散方程式の解への近似からコンクリートの塩分拡散係数およびコンクリート表面塩分量の推定を行った結果についても示した。表面塩分量の推定結果には使用細骨材の違いによる差が認められないが、塩分拡散係数については、しらすコンクリートは川砂コンクリートのおよそ1/5程度となり、コンクリート自身の塩分浸透抵抗性に差があることを明確に示している。ただし、塩分量調査を行ったコンクリートの動弾性係数に関しては、川砂コンクリートがしらすコンクリートに比べ1割程度大きな値を示していることから、今回測定された塩分浸透量の差はコンクリートマト

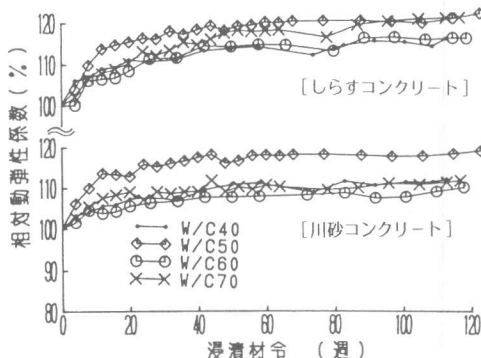


図-5 海水浸漬コンクリートの相対動弾性係数の経時変化

リックスの品質に基因するのではなく、しらす自身が塩分浸透のなんらかの障壁となっているものと思われる。

5. しらすのアルカリ骨材反応抑制効果

図-7には、粗骨材の全てに反応性骨材を用いたコンクリートの各アルカリ量毎の供試体長さ変化を、細骨材として地山しらすを使用した場合と川砂使用の場合で比較して

示した。今回使用した反応性骨材では、これまでのところ、細骨材のいかにかわらずアルカリ量2.4%の場合のみにコンクリートの膨脹が認められたが、この場合のしらすコンクリートの膨脹量は川砂使用の場合に比べて明らかに小さく、しらすの使用によるアルカリ骨材反応抑制効果を予想できる。

図-8は、アルカリ量2.4%の場合について、全粗骨材量に占める反応性骨材の混入割合とコンクリートの膨脹量の関係を示したものである。また、写真-3には、アルカリ骨材反応によって生じたコンクリートのひびわれ発生状況の一例を示したが、これらの結果においても、地山しらすの使用による膨脹抑制効果を明確に確認できる。なお、図-8によると、しらすおよび川砂のいずれを細骨材として使用した場合とも反応性骨材の混入率に対するベシマムの存在を確認できるが、今回の実験では、このベシマムについてもしらす使用と川砂使用で多少異なった傾向を示し、前者では後者に比べて反応性骨材の混入率が幾分少ない値でベシマムが現れるようであった。

一方、図-9には、0.15mm以下の細粒分を完全に除去したしらすを細骨材とした使用した場合および、川砂コンクリートに細粒分のみをセメント重量の5%添加させた場合（この添加量は、地山しらすを細骨材として使用した場合にコンクリート中に混入される細粒分の約15%に相当）のコンクリートの膨脹傾向を示した。この図から、①細粒分を除去したしらすを使用したコンクリートの膨脹傾向は川砂コンクリートほぼ同じであり、この場合にはしらすの膨脹抑制効果は認められないこと、②しらす細粒分のコンクリート中への混入割合が少ない場合には、反応がかえって助長されること等がわかる。

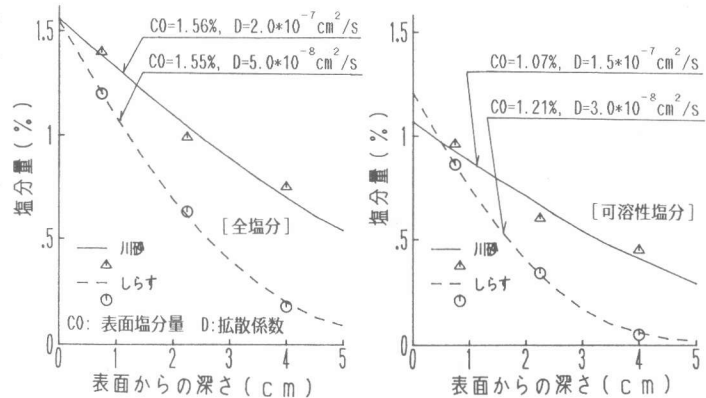


図-6 コンクリート中への塩分浸透状況の調査結果

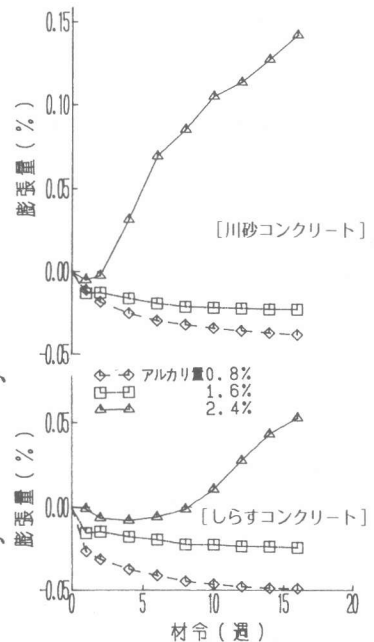


図-7 アルカリ骨材反応性及びアルカリ量の影響 (反応性骨材混入率: 100%)

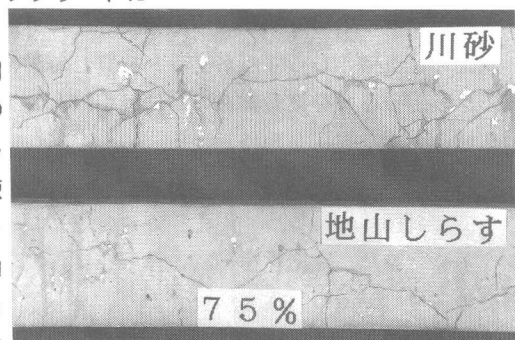


写真-3 アルカリ骨材反応試験におけるコンクリートのひびわれ状況 (材令: 16週)

これらの結果は、前述した地山しらすのアルカリ骨材反応抑制効果のほとんどが、このしらすの約30%近くを占める0.15mm以下の細粒分に起因していることを示している。また、細粒分の添加が少量の場合に起こる膨脹助長作用については、フライアッシュ等の過少添加の場合にも現れることを考慮すると、しらす細粒分には、アルカリ骨材反応に対してポゾランと類似の効果十分に期待できるものと思われる。

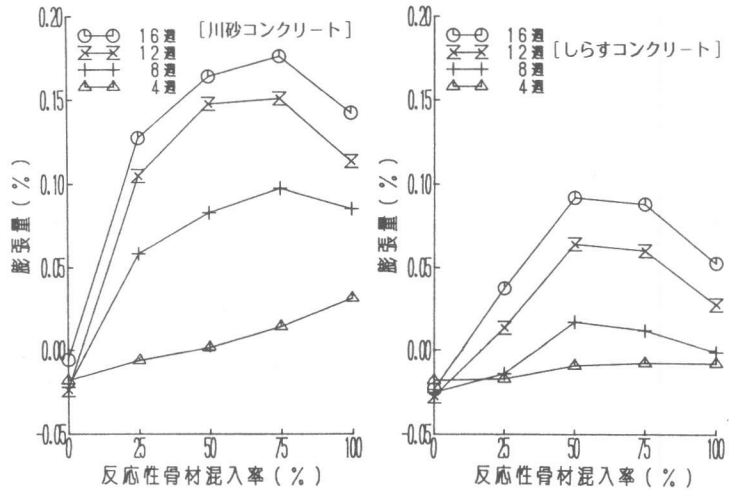


図-8 反応性粗骨材の混入率に対するベシマム曲線(アルカリ量:2.4%)

なお、図-1に示した化学法による結果では、しらす自体もアルカリ骨材反応に対して有害領域となる。今回の検討の範囲内では、しらす自身がアルカリ骨材反応を起こす状況は確認されず、少なくとも、地山しらすを細骨材として使用する場合には、実用的な範囲においては問題は生じないように思われる。しかし、しらすのより有効な利用を考えるにあたっては、この問題のさらに十分な検討が必要である。

6. まとめ

しらすを使用したコンクリートの耐久性に関する検討を行い、次のような結果が得られた。

- 1) しらすを細骨材として使用したコンクリートの耐硫酸塩性能は、通常のコンクリートに比べて格段に優れている。
- 2) しらすコンクリートは、海洋からの塩分浸透に対しても極めて高い抵抗性を示し、その塩分拡散係数は同一水セメント比の川砂コンクリートのおよそ1/5であった。
- 3) 地山しらす中の0.15mm以下の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。

以上の結果は、しらすがポゾラン物質と類似の性能を有する可能性の極めて高いことを示すものであり、しらすを細骨材あるいは混和材として有効に利用することによって、コンクリートの耐久性の大幅な改善も期待できる。

7. 謝辞

本研究に使用したしらすの化学分析を住友セメント(株)セメント・コンクリート技術開発センターに、また、反応性粗骨材の分析を東京大学生産技術研究所第5部小林研究室にお願いした。関係の各位に感謝の意を表します。

- <参考文献> 1) 武若他、:しらすのコンクリート用材料への有効利用に関する研究、土木構造・材料論文集、第4号、1989、pp.103~116

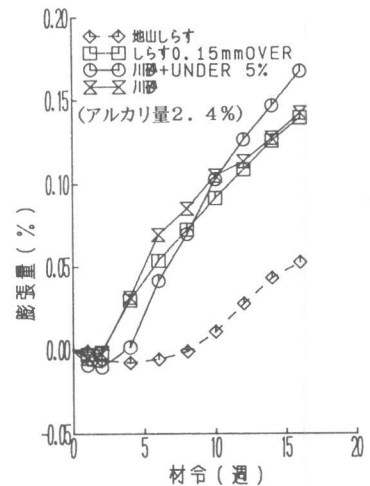


図-9 しらす細粒分のアルカリ骨材反応抑制効果に関する検討