

[76] シリカフェームを用いた高強度コンクリートのクリープ性状

正会員 田沢雄二郎 (鹿島建設技術研究所)
 正会員 信田 佳延 (鹿島建設技術研究所)
 正会員○石井 明俊 (鹿島建設技術研究所)

1. はじめに

コンクリート用混和材としてのシリカフェームに関しては近年、多くの研究がなされつつあるが、その多くは、シリカフェームの添加によるコンクリートの強度、耐久性（耐凍結融解性、耐海水性）の向上、あるいは、アルカリ骨材反応の抑制等に関するものである。また、その対象構造物としては、海洋構造物をはじめ、耐久性が要求される多くの構造物が考えられている。

筆者らはこれまでに、北極海域における石油掘削用プラットフォームを対象とした、シリカフェームを用いた高強度軽量コンクリートに関する検討を実施してきた。その結果、シリカフェームの使用によって高強度軽量コンクリートの強度、耐凍結融解性を向上できることが確認された^{1),2)}。一方、シリカフェームはPC構造物に使用されることも多く、これらの構造物の設計に必要なクリープ特性に与えるシリカフェームの影響については、ほとんど解明されていないのが現状である。これらの背景のもとに、シリカフェームを用いたコンクリートのクリープ特性を調べるため、室内クリープ試験を実施した。本報文はシリカフェームを混入した軽量および普通コンクリートについて載荷期間1年までの結果を報告する。

2. 実験方法

(1) 実験要因と水準

実験要因と水準は表-1に示すとおりである。載荷応力は、軽量コンクリートについては極地用軽量コンクリートプラットフォームにおけるプレストレス導入応力の最大値を考慮して90kgf/cm²とし、普通コンクリートでは、JIS試験方法（原案）に従って、載荷開始材令における圧縮強度の約30%とした。

(2) 使用材料および配合

本試験の使用材料を表-2、コンクリートの配合を表-3に示す。ここで、人工軽量骨材はあらかじめ所定の吸水量に調整したものをを使用した。また、シリカフェームはセメントの一部置換えとして使用した。

(3) 試験方法

クリープ試験方法はJIS原案に従った。クリープおよび乾燥収縮試験用の供試体は、直径15cm、高さ60cmの円柱形であり、その養生方法を図-1に、密封養生供試体の形状寸法を図-2に示す。

クリープ試験開始直前に、クリープ試験用供試体と同一養生を行った供試体を用いて圧縮強度試験を実施し、載荷応力を定めた。

クリープ試験の載荷装置は油圧式で、

表-1 実験要因と水準

コンクリート	要因	水準		
		水	骨材	養生
軽量	骨材の種類	ML	BM	
	シリカフェーム添加率	0%	10%	
	養生条件	密封	気中	
	載荷応力	90kgf/cm ²		
普通	シリカフェーム添加率	0%	7.5%	15%
	養生条件	密封	気中	
	載荷応力	載荷開始時圧縮強度の30%		

表-2 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント、	比重=3.15	
細骨材	富士川産川砂F.M.=2.64、	比重=2.62	
粗骨材	人工軽量	ML (造粒型低吸水性) F.M.=6.58、	比重=1.33
	骨材	BM (造粒型中吸水) F.M.=6.42、	比重=1.41
	普通骨材	大井川産川砂利、F.M.=6.62、	比重=2.65
混和材	シリカフェーム、粉末度約25 ^m /g、	比重=2.20	
混和剤	AE減水剤	リグニンスルホン酸塩、ポリオール複合体	
	AE助剤	炭性ロジン酸塩	
	高性能減水剤	高縮合芳香族スルホン酸塩	
	流動化剤	メラミンスルホン酸塩系複合物	

表-3 コンクリートの配合

配合略号	骨材の種類	シリカフェーム添加率(%)	骨材最大寸法(mm)	スランピング(cm)	空気量(%)	水セメント比(%)	水結合材比(%)	摺骨材率(%)	単位量 (kg/m ³)							
									水	セメント	細骨材	粗骨材	シリカフェーム	AE減水剤	AE助剤	高性能減水剤
ML-0	軽量ML	0				28			150	536	594	536	0	0.25	0.006	0.5
ML-10		10				31			150	482	587	530	54	0.25	0.005	1.0
BM-0	軽量BM	0		15	20±2.0	5±1	28	28	150	536	594	568	0	0.25	0.006	0.5
BM-10		10				31			150	482	587	562	54	0.25	0.005	1.0
N-0		0				40			160	400	730	1019	0	—	0.006	0.2
N-7.5	川砂利	7.5	25	12±2.5	4±1	43	40	42	160	370	725	1013	30	—	0.008	0.6
N-15		15				47			160	340	721	1006	60	—	0.009	1.0

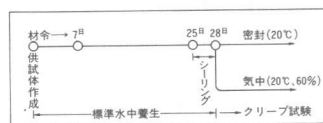


図-1 クリープ試験用供試体の養生方法

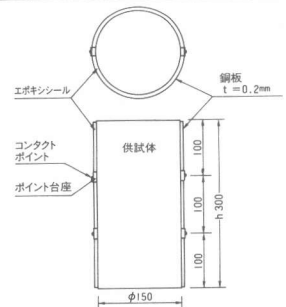


図-2 供試体の形状寸法

載荷は手動式ポンプを使用し、荷重の確認は供試体上部に設置したロードセルを用いて行った。載荷持続期間中のひずみの測定はコンタクトゲージを使用した。コンタクトゲージによる計測長さは10cmとした。

3. 実験結果

(1) 圧縮強度および弾性係数

材令28日および材令6ヶ月における圧縮強度、および弾性係数(1/3割線弾性係数、コンプレッソメータ法)の結果を表-4に示す。材令28日における圧縮強度は、軽量コンクリートで537~638 kgf/cm²、普通コンクリートで463~522 kgf/cm²であり、また、弾性係数の値は軽量コンクリートで2.27 ~ 2.46 × 10⁵ kgf/cm²、普通コンクリートで3.23 ~ 3.44 × 10⁵ kgf/cm²となった。

図-3および図-4は、軽量コンクリートと普通コンクリートの、材令に伴う圧縮強度の変化を示したものである。材令6ヶ月の圧縮強度を100とした場合の材令7日および28日における比率をシリカフェーム無添加の場合について見ると、軽量コンクリートでそれぞれ79, 96, 普通コンクリートでそれぞれ61, 94となり、この比率はシリカフェームの混入によって若干小さくなる傾向を示した。

(2) クリープ

a. 単位クリープひずみおよびクリープ係数

表-5にクリープ試験結果の一覧を示す。ここで、クリープひずみ、単位クリープひずみ、クリープ係数はそれぞれ次式によって求めた。

$$\begin{aligned} \epsilon_c &= \epsilon_a - \epsilon_e - \epsilon_s \\ \mu \epsilon_c &= \epsilon_c / \sigma \\ \phi_c &= \epsilon_c / \epsilon_e \end{aligned}$$

ここに、 ϵ_c : クリープひずみ
 ϵ_a : 全ひずみ
 ϵ_e : 載荷時弾性ひずみ
 ϵ_s : 載荷後の乾燥収縮ひずみ
 $\mu \epsilon_c$: 単位クリープひずみ
 σ : 載荷応力
 ϕ_c : クリープ係数

表-4 圧縮強度および弾性係数

配合略号	圧縮強度 (kgf/cm ²)		弾性係数 (×10 ⁵ kgf/cm ²)		
	材令28日	材令6ヶ月	材令28日	材令6ヶ月	
軽量 コンクリート	ML-0	551	608	2.45	2.56
	ML-10	638	644	2.46	2.69
	BM-0	537	571	2.27	2.39
	BM-10	583	668	2.30	2.47
普通 コンクリート	N-0	463	494	3.44	3.70
	N-7.5	478	548	3.26	3.81
	N-15	522	625	3.23	3.69

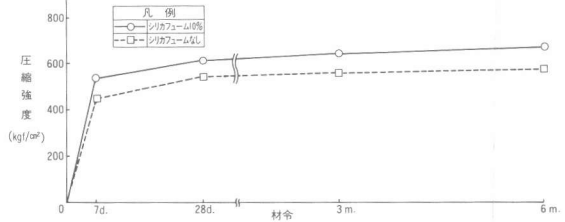


図-3 圧縮強度の経時変化(軽量コンクリート)

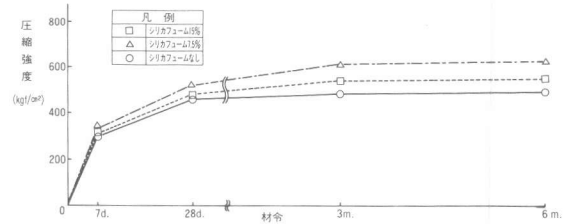


図-4 圧縮強度の経時変化(普通コンクリート)

表-5 クリープ試験結果

配合略号	骨材種類	シリカフェーム添加率(%)	養生条件	載荷材令(日)	載荷応力(kg/cm ²)	載荷時弾性ひずみ(×10 ⁻⁵)	クリープひずみ(×10 ⁻⁵)					単位クリープひずみ(×10 ⁻⁶ /kgf/cm ²)					クリープ係数					乾燥収縮ひずみ(×10 ⁻⁶)					
							1週	1ヶ月	3ヶ月	6ヶ月	1年	1週	1ヶ月	3ヶ月	6ヶ月	1年	1週	1ヶ月	3ヶ月	6ヶ月	1年	1週	1ヶ月	3ヶ月	6ヶ月	1年	
ML-0	軽量骨材	0	密封	28	90	35.7	10.1	13.8	15.7	18.6	23.0	1.12	1.53	1.74	2.07	2.56	0.28	0.39	0.44	0.52	0.64	0.2	2.2	3.4	3.6	3.9	
							14.7	23.7	40.1	50.2	51.7	1.63	2.63	4.46	5.58	5.74	0.41	0.66	1.12	1.41	1.45	1.2	2.6	7.1	8.7	12.2	
			気中				5.7	10.4	10.7	13.5	15.3	0.63	1.16	1.19	1.50	1.70	0.18	0.33	0.34	0.42	0.48	3.7	4.7	6.3	6.4	6.8	
							10.1	18.2	25.7	32.0	31.2	1.12	2.02	2.86	3.56	3.47	0.32	0.57	0.81	1.01	0.98	6.9	7.4	16.2	21.9	32.5	
ML-10	軽量骨材	10	密封		28	90	31.8	18.4	22.6	24.7	24.5	28.6	2.04	2.51	2.74	2.72	3.18	0.56	0.68	0.75	0.74	0.86	2.8	3.7	4.0	5.2	6.1
								21.6	36.5	54.3	56.9	60.0	2.40	4.06	6.03	6.32	6.67	0.65	1.10	1.64	1.72	1.81	4.2	5.3	6.0	8.3	10.6
			気中					11.5	15.3	15.9	15.6	16.4	1.28	1.70	1.77	1.73	1.82	0.33	0.44	0.46	0.45	0.47	1.9	2.0	2.4	3.0	4.1
								10.5	15.9	26.7	28.3	30.4	1.17	1.77	2.97	3.14	3.38	0.30	0.46	0.77	0.81	0.87	5.0	6.5	7.9	8.2	8.8
BM-0	軽量骨材	0	密封	28		90	33.1	20.4	32.7	37.7	47.8	51.5	1.47	2.35	2.71	3.44	3.71	0.53	0.84	0.97	1.24	1.33	2.2	2.0	3.4	6.3	7.3
								24.8	35.0	47.0	56.6	59.6	1.78	2.52	3.38	4.07	4.29	0.64	0.90	1.21	1.46	1.54	2.5	9.8	28.6	38.2	42.3
			気中					11.6	15.2	25.5	27.4	29.2	0.81	1.06	1.78	1.92	2.04	0.30	0.39	0.65	0.70	0.74	2.2	5.0	4.9	4.8	6.7
								16.7	31.0	40.2	40.4	40.4	1.17	2.17	2.81	2.83	2.83	0.42	0.79	1.02	1.03	1.03	9.8	16.9	30.6	34.6	37.9
BM-10	軽量骨材	10	密封		28	90	34.8	14.2	17.8	24.8	25.5	26.1	0.90	1.13	1.58	1.62	1.66	0.33	0.41	0.58	0.59	0.61	2.6	6.3	13.1	14.9	16.1
								16.0	31.6	42.7	44.8	46.9	1.02	2.01	2.72	2.85	2.99	0.37	0.73	0.99	1.04	1.09	8.6	17.9	34.2	39.7	46.9
			気中					11.6	15.2	25.5	27.4	29.2	0.81	1.06	1.78	1.92	2.04	0.30	0.39	0.65	0.70	0.74	2.2	5.0	4.9	4.8	6.7
								16.7	31.0	40.2	40.4	40.4	1.17	2.17	2.81	2.83	2.83	0.42	0.79	1.02	1.03	1.03	9.8	16.9	30.6	34.6	37.9
N-0	普通骨材	0	密封	28		139	38.7	10.1	13.8	15.7	18.6	23.0	1.12	1.53	1.74	2.07	2.56	0.28	0.39	0.44	0.52	0.64	0.2	2.2	3.4	3.6	3.9
								14.7	23.7	40.1	50.2	51.7	1.63	2.63	4.46	5.58	5.74	0.41	0.66	1.12	1.41	1.45	1.2	2.6	7.1	8.7	12.2
			気中					5.7	10.4	10.7	13.5	15.3	0.63	1.16	1.19	1.50	1.70	0.18	0.33	0.34	0.42	0.48	3.7	4.7	6.3	6.4	6.8
								10.1	18.2	25.7	32.0	31.2	1.12	2.02	2.86	3.56	3.47	0.32	0.57	0.81	1.01	0.98	6.9	7.4	16.2	21.9	32.5
N-7.5	普通骨材	7.5	密封		28	143	39.3	11.6	15.2	25.5	27.4	29.2	0.81	1.06	1.78	1.92	2.04	0.30	0.39	0.65	0.70	0.74	2.2	5.0	4.9	4.8	6.7
								16.7	31.0	40.2	40.4	40.4	1.17	2.17	2.81	2.83	2.83	0.42	0.79	1.02	1.03	1.03	9.8	16.9	30.6	34.6	37.9
			気中					14.2	17.8	24.8	25.5	26.1	0.90	1.13	1.58	1.62	1.66	0.33	0.41	0.58	0.59	0.61	2.6	6.3	13.1	14.9	16.1
								16.0	31.6	42.7	44.8	46.9	1.02	2.01	2.72	2.85	2.99	0.37	0.73	0.99	1.04	1.09	8.6	17.9	34.2	39.7	46.9
N-15	普通骨材	15	密封	28		157	43.0	10.1	13.8	15.7	18.6	23.0	1.12	1.53	1.74	2.07	2.56	0.28	0.39	0.44	0.52	0.64	0.2	2.2	3.4	3.6	3.9
								14.7	23.7	40.1	50.2	51.7	1.63	2.63	4.46	5.58	5.74	0.41	0.66	1.12	1.41	1.45	1.2	2.6	7.1	8.7	12.2
			気中					5.7	10.4	10.7	13.5	15.3	0.63	1.16	1.19	1.50	1.70	0.18	0.33	0.34	0.42	0.48	3.7	4.7	6.3	6.4	6.8
								10.1	18.2	25.7	32.0	31.2	1.12	2.02	2.86	3.56	3.47	0.32	0.57	0.81	1.01	0.98	6.9	7.4	16.2	21.9	32.5

これらの結果を軽量コンクリート、普通コンクリートそれぞれについて、載荷期間1年を中心に検討すると以下のとおりである。

b. 単位クリープひずみの経時変化

図-5から図-8は単位クリープひずみの経時変化を示したものである。

これらの結果から、Rossの式、

$$\epsilon_c = t / (a + bt) \quad (a, b: \text{実験定数})$$

用いて最終クリープの推定値を求め、これと載荷期間1年における値との比を求めると、シリカフェーム無添加の場合は0.81～0.87、シリカフェーム添加の場合は0.85～0.94となり、骨材の種類、あるいは養生条件の差にかかわらず、シリカフェームの添加によってその比率は大きくなる傾向が示された。

また、載荷期間1年における単位クリープひずみに対する載荷期間6か月の比率を見ると、軽量コンクリートの気中養生、および普通コンクリートの場合は0.93～1.00の範囲であるのに対し、軽量コンクリートの密封養生の場合にはシリカフェーム無添加で0.81～0.86、10%添加で0.88～0.96となり、この場合、載荷期間1年でのクリープひずみに対する6か月の比率は、シリカフェームを添加したものが大きくなった。

c. シリカフェームの添加率と単位クリープひずみ

図-9および図-10は、載荷期間1年におけるシリカフェーム添加率と単位クリープひずみとの関係を示したものである。

図-9の結果から、軽量コンクリートの単位クリープひずみはシリカフェームの添加によって、

ML骨材、密封養生：2.56 → 1.70

ML骨材、気中養生：5.74 → 3.47

BM骨材、密封養生：3.18 → 1.82

BM骨材、気中養生：6.67 → 3.38

となり、無添加に対する比率は50～65%となった。

また、図-10の結果から、普通コンクリートにおける単位クリープひずみの変化は、

シリカ7.5%添加、密封養生：3.71 → 2.04

シリカ7.5%添加、気中養生：4.29 → 2.83

シリカ15%添加、密封養生：3.71 → 1.66

シリカ15%添加、気中養生：4.29 → 2.99

となり、無添加に対する比率は45～70%であった。

このように、軽量コンクリート、普通コンクリートともに、すべての条件において、シリカフェームの添加により単位クリープひずみの減少傾向が示されており、これは、シリカフェームの添加により、コンクリートのマトリックスがより緻密な構造になったためと考えられる。シリカフェームを用いたコンクリートのクリープに関する研究例は極めて少ないが、M. Builらの研究³⁾によれば、普通コンクリートでシリカフェームを25%添加した場合、シリカフェーム無添加のものと比較して、クリープひずみは75～95%に減少し、定性的には本実験結果と同じ傾向を示している。

次に、養生条件の差が単位クリープひずみに及ぼす影響については、図-9の結果から、軽量コンクリ

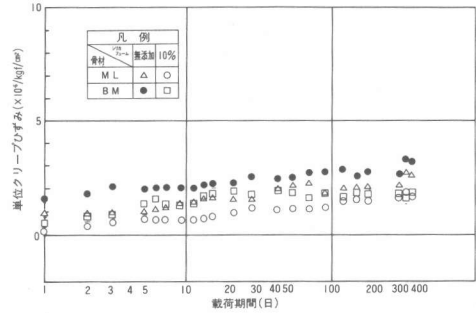


図-5 単位クリープひずみの経時変化(軽量、密封)

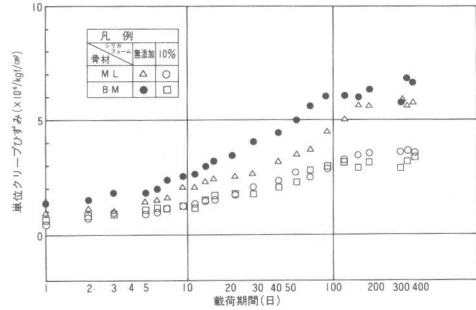


図-6 単位クリープひずみの経時変化(軽量、気中)

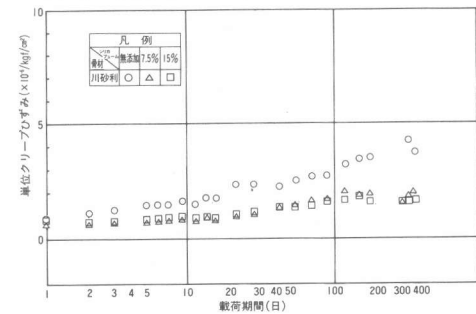


図-7 単位クリープひずみの経時変化(普通、密封)

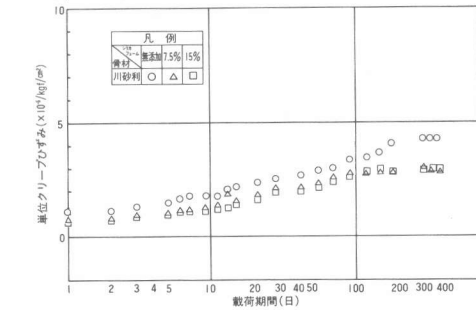


図-8 単位クリープひずみの経時変化(普通、気中)

ートではシリカフェームの添加率、骨材の種類にかかわらず、気中養生での単位クリープひずみは密封養生のおよそ2倍となった。一方、普通コンクリートの場合は図-10から、養生条件による差はシリカフェームの有無によって異なり、シリカフェーム無添加の場合には差がほとんど見られないが、シリカフェームを添加した場合は、気中養生での単位クリープひずみは密封養生の1.4~1.8倍となった。

d. クリープ係数

図-11および図-12は、軽量コンクリートおよび普通コンクリートそれぞれの載荷期間1年における、クリープ係数に対する要因効果を示したものである。

図-11の結果から、軽量コンクリートにおけるシリカフェーム無添加および10%添加のクリープ係数の平均値は、おの

おの1.19, 0.70であり、シリカフェームの添加による減少比率は約60%となった。また、気中養生のクリープ係数に対する密封養生の比率は平均で約50%となった。さらに、骨材の種類について見ると、MLのクリープ係数の平均値が0.89であるのに対し、BMの平均値は1.00であり、BMのクリープ係数がMLを若干上回る傾向が見られた。次に、図-12の結果から、普通コンクリートにおけるシリカフェーム無添加、7.5%添加、15%添加におけるクリープ係数はそれぞれ、平均で1.44, 0.89, 0.85であり、シリカフェームの添加によるクリープ係数の減少比率は約60%となった。また、気中養生のクリープ係数に対する密封養生の比率は平均で73%となった。

CEB-FIP 指針⁴⁾によれば、設計用クリープ係数は構造物の環境条件によって、屋外(湿度75%)では1.4~2.7, 屋内(湿度55%)では1.7~3.8となっており、屋内条件に対する屋外条件の比率は71~85%の範囲である。これと比較して、本試験の普通コンクリートの結果はほぼ同じ値であることが示された。

4. まとめ

シリカフェームを用いた高強度コンクリートの物性に関する検討のうち、コンクリートのクリープ性状を把握することを目的として室内クリープ試験を実施した。載荷期間1年までの試験結果の概要をまとめると次のとおりである。

- 最終クリープ推定値に対する載荷期間1年の比率は、シリカフェーム無添加のもので0.81~0.87, 添加したもので0.85~0.94となり、シリカフェームの添加によって大きくなる傾向を示した。
- 軽量コンクリート、普通コンクリートともに、シリカフェームの添加によってコンクリートの単位クリープひずみは減少し、その比率は、軽量コンクリートで50~65%, 普通コンクリートでは45~70%であった。また、軽量コンクリートではシリカフェームの有無にかかわらず、気中養生の単位クリープひずみは密封養生の約2倍となり、普通コンクリートではシリカフェームを添加した場合、気中養生は密封養生の1.4~1.8倍となり、無添加の場合には両者の差がほとんど見られなかった。
- シリカフェームを添加したコンクリートのクリープ係数は、軽量コンクリート、普通コンクリートともに、無添加と比較して約60%に減少した。また、養生条件の差による影響は骨材の種類によって異なり、気中養生に対する密封養生の比率は軽量コンクリートで48%, 普通コンクリートで73%であった。

(1) 田沢ら; 第6回コンクリート工学年次講演会論文集, 1984, pp.121~124

<参考文献> (2) 田沢ら; 第7回コンクリート工学年次講演会論文集, 1985, pp.213~216

(3) M.Buil, et.al.; Cement and Concrete Research, Vol.15(1985), pp. 463~466

(4) CEB-FIP Model Code for Concrete Structures, 1978

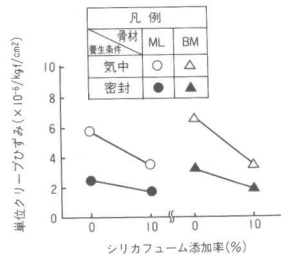


図-9 シリカフェーム添加率と単位クリープひずみ(軽量コンクリート)

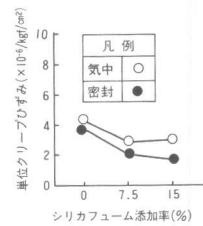


図-10 シリカフェーム添加率と単位クリープひずみ(普通コンクリート)

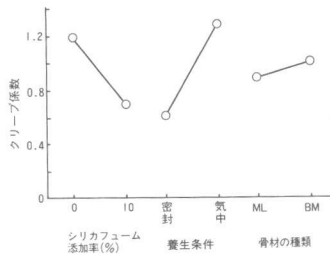


図-11 クリープ係数の要因効果(軽量コンクリート)

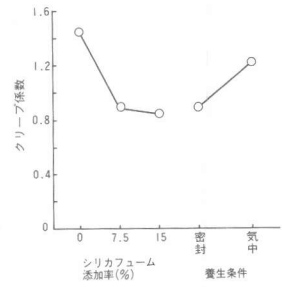


図-12 クリープ係数の要因効果(普通コンクリート)