

論文

[1011] 蒸気養生したシリカフェーム混入超高強度コンクリートの性状

長井 健雄*1・小倉 誠*2・古賀 康男*3・笠井 英志*4

1. はじめに

産業副産物であるシリカフェームをコンクリート用高性能混和材料として積極的に活用しようとする試みがノルウェーで開始されてからおよそ四半世紀が経過した。今日では、化学混和剤の発展を背景に低水セメント比のコンクリートの製造が可能となり、コンクリートの高強度化や耐久性の改善に関する研究が活発になされてきている。また、近年の土木・建築の工事現場では工期短縮、省力化、高品質化などの目的からプレキャストコンクリート製品の使用が極めて盛んであり、今後更に高強度化することで合成床版、舗装版、埋設型枠、プレキャスト高橋脚、長大スパン橋や高層建築構造物における柱部材・梁部材に向けての実用化も期待できる。

この様な状況の下、蒸気養生を施した超高強度コンクリートに関する研究報告は希少である。我々は、これまでシリカフェーム、高性能減水剤および蒸気養生を組み合わせることで得られる超高強度コンクリートの強度特性を調査してきた[1]。本報告は、この超高強度コンクリートについて凍結融解抵抗性および摩耗抵抗性に関する基礎データを取りまとめたものである。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

使用した材料について表-1に示す。シリカフェームは非顆粒状のものを使用した。粗骨材のすりへり試験(JIS A 1121)におけるすりへり減量は、 G_H が15.9%、 G_D が19.1%であり、破砕値試験(BS-812)における40 t破砕値は、 G_H が15.6%、 G_D が12.0%であった。

表-1 使用材料

種別	銘柄	品質
結合材	セメント	早強ポルトランドセメント (C) 比重:3.14 比表面積:4370cm ² /g
	シリカフェーム	E社製 非顆粒(SF) 比重:2.20 比表面積:200000cm ² /g SiO ₂ :91.2%
骨材	細骨材	木更津産山砂 (SK) 比重:2.62 吸水率:1.71% 粗粒率:2.84
		段戸産砕砂 (SD) 比重:2.60 吸水率:1.02% 粗粒率:2.30 石英片岩
		西島産砕砂 (SN) 比重:2.57 吸水率:2.22% 粗粒率:2.69 流紋岩
	粗骨材	八王子産砕石 (GH) 比重:2.68 吸水率:0.68% 粗粒率:6.81 硬質砂岩
		段戸産砕石 (GD) 比重:2.62 吸水率:0.74% 粗粒率:6.60 石英片岩
混和剤	高性能減水剤	K社製 β -ナフタリンスルホン酸ホルマリン縮合物

*1 (株)ピー・エス技術研究所主任研究員 (正会員)

*2 (株)ピー・エス技術研究所

*3 三菱マテリアル(株)セメント研究所セメント研究部主任研究員 (正会員)

*4 三菱マテリアル(株)セメント研究所セメント研究所

表-2 コンクリートの配合

No.	記号*1	W/ (C+SF) (%)	S F (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤*2
					W	C	S F	S	G	
1	S _K G _H -S F 0	40	—	45	148	370		S _K 841	G _H 1053	3.70(1.0)
2	S _K G _H -S F 15	20	15	35	148	629	111	S _K 534	G _H 1013	13.32(1.8)
3	S _D G _D -S F 15			30				S _D 455	G _D 1066	
4	S _N G _H -S F 15			30				S _N 450	G _H 1091	
5	S _D G _H -S F 15			30				S _D 455	G _H 1091	
6	S _K G _D -S F 15			35				S _K 534	G _D 990	

*1 : S_K G_H-S F 0

シリカフェームの置換率(0%, 15%)
粗骨材の銘柄(G_H:八王子産砕石, G_D:段戸産砕石)
細骨材の銘柄(S_K:木更津産山砂, S_N:西島産砕砂, S_D:段戸産砕砂)

*2 : () 内は, 単位結合材量に対する混和剤添加量 ((C + S F) × %)

2. 2 コンクリートの配合, 混練および供試体作製

コンクリートの配合を表-2に示す。超高強度コンクリートは富配合低水結合材比であることから、骨材の表面水率のわずかな変動などでフレッシュ性状が変わる。本実験では通常のPC製品用を考慮し、スランプを10cm程度としたが目標を外れるものもあった。しかし、本コンクリートはスランプでの管理は難しいと考えられ、且つ成形も十分可能なワーカビリティであったことから成形に供することとした。

混練には、パン型強制練りミキサーを使用した。骨材、セメント、シリカフェームに対して空練りを2分間行い、混和剤を含む水を投入し、3分間の本練りを行った。供試体の成形はテーブルバイブレーターによる振動締め固めとした。

2. 3 蒸気養生条件

本試験の蒸気養生条件は、前置き25°C×3時間、昇温勾配10°C/時間、温度保持65°C×5時間、降温勾配10°C/時間とし、計16時間の蒸気養生を施した。

2. 4 試験項目及び試験方法

(1) 圧縮強度試験：供試体の端面処理は研磨機を用いて行い、JIS A 1108に準じて圧縮強度試験を行った。試験材令は、脱型時(16時間)及び28日とし、材令28日の供試体は脱型後20°C、60% R.H.の恒温恒湿室内で保存した。

(2) 粗骨材の細孔構造調査：使用した粗骨材2銘柄についての細孔構造を調査した。測定には水銀圧入式ポロシメーターを使用し、37.5~75000Åの細孔半径のポアについて調査した。

(3) 凍結融解試験：ASTM C 666「急速凍結融解に対するコンクリートの抵抗性試験方法」に規定される方法A(水中における急速凍結融解)に準じた。供試体は蒸気養生後20°C水中で養生し、材令14日で試験を開始した。

(4) 摩耗試験：2種類の試験装置を使用して摩耗試験を行った。

① L i u氏報告[2]の方法(L法と称す)

本法は、水流が鉄球を動かすことにより供試体が摩損する機構に基づいている。図-1に装置の概略図を示す。供試体寸法はφ30×10cmであり、蒸気養生後に20°C恒温水中で養生し、材令28日に至った供試体について試験を開始した。摩耗量の単位は重量減少百分率である。

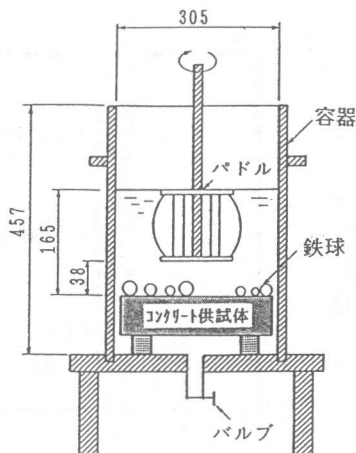


図-1 摩耗試験装置の概略図 (L法)

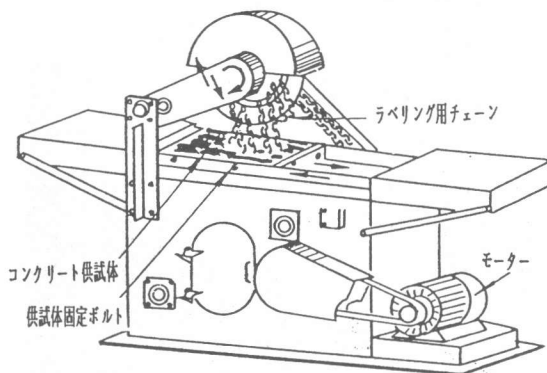


図-2 摩耗試験装置の概略図 (R法)

②ラベリング試験方法 (R法と称す)

アスファルト舗装要綱に準ずる試験装置を使用した。本法は、水平方向に往復運動する供試体に回転しながら下降上昇を繰り返すチェーンが接触し、供試体表面を剥離摩損する機構に基づいている。図-2に装置の概略図を示す。供試体寸法は10×10×38cmであり、蒸気養生後に20℃、60%R.H.の恒温恒湿室にて保存し、材令7日で試験を開始した。摩耗量の単位は摩耗深さ方向の面積である。

3. 実験結果

(1) 圧縮強度試験

表-3にフレッシュコンクリートの性状および圧縮強度性状を示す。

シリカフュームを混入しないNo.1配合の16時間強度は460kgf/cm²であり、一般的なP C製品用コンクリート相当であることを確認した。

図-3にシリカフュームを混入したコンクリート (No.2~No.6配合) における圧縮強度試験結果を示す。シリカフュームを混入したコンクリートの強度発現性を使用骨材の組合わせで判定すると、今回の実験で使用した骨材の範囲では $S_{KH} < S_{NH} < S_{DH} < S_{KG} < S_{DG}$ の順となり、圧縮強度に及ぼす影響は、細骨材よりも粗骨材の方が大きい。さらに、細骨材でも天然骨材であ

表-3 フレッシュコンクリートの性状および圧縮強度性状

No.	フレッシュ時の性状			圧縮強度(kgf/cm ²)		弾性係数×10 ⁵ (kgf/cm ²)	
	スランプ(cm)	空気量 (%)	練上温度(℃)	16時間	28日	16時間	28日
1	9.3	2.1	21.0	460	633	3.66	3.79
2	4.1	2.6	23.0	935	1001	4.18	4.29
3	6.0	2.7	23.0	1351	1474	3.89	3.90
4	4.5	—	23.0	1004	1057	3.97	4.12
5	4.0	—	23.0	1033	1120	3.99	4.03
6	7.9	—	23.0	1191	1283	3.73	3.96

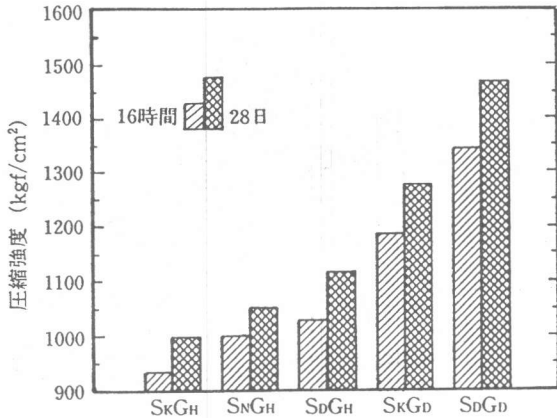


図-3 骨材の組合せによる圧縮強度試験結果 (SF15%添加)

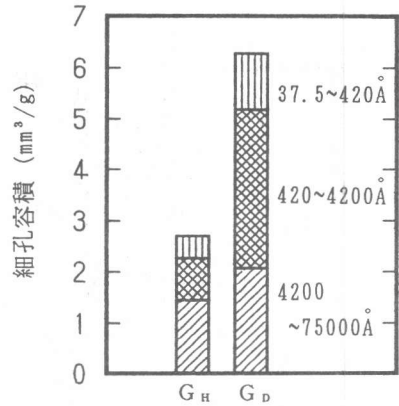


図-4 粗骨材の細孔構造調査結果

る山砂よりも人工骨材である砕砂を使用することにより強度発現性が向上する。また、2種の砕砂を比較すると、S_D(石英片岩)を使用したときの強度発現性はS_N(流紋岩)を使用したときよりも大きい。

(2) 粗骨材の細孔構造

本実験に使用した粗骨材2銘柄の細孔構造調査結果を図-4に示す。より高強度が得られた石英片岩(G_D)の全細孔容積は、硬質砂岩(G_H)に比べ大きくポーラスであることが判明した。特に、420~4200Åの細孔半径をもつポアが多い。相対的に空隙が多いことは、静弾性係数を小さくし、骨材モルタル界面での剛性の相違に起因する応力集中による付着破壊を生じにくくすると推察される。

(3) 凍結融解試験

重量減少率の結果を図-5に、相対動弾性係数の結果を図-6に示す。シリカフェームを混入していない一般的なPC製品用コンクリートは、ここでは空気連行剤を使用していないため、15サイクルを越えたあたりから急激に相対動弾性係数の低下が生じ、60サイクルでスケリングが目立ち始め、150サイクルになると供試体は完全に崩壊するにまで至った。耐久性指数は6.40である。一方、シリカフェームを混入した配合では、300サイクルまでほとんどスケリングは生じておらず、耐久性指数も97以上を示した。

シリカフェームを混入したコンクリートの凍結融解抵抗性については、優れるとする報告[3][4]と、必ずしも優れず、高いシリカフェーム混入率では劣るとする報告[5][6]とがある。本実験における蒸気養生を施したシリカフェーム混入コンクリートは、non AEコンクリートであるにもかかわらず凍結融解抵抗性がかなり改善される結果が

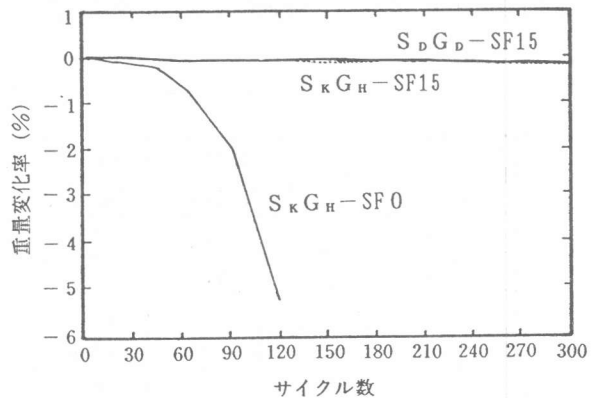


図-5 凍結融解試験結果 (重量減少率)

得られた。この理由としては、コンクリートの水結合材比が小さいこと、シリカフェームの混入により組織が緻密化し、空隙が飽水されないこと、ブリージングがなく、骨材とペーストとの結合が良好であることなどが挙げられる。

(4) 摩耗試験

図-7 にL法における摩耗試験結果を、また、図-8 にR法における摩耗試験結果をそれぞれ示す。各試験法ともに摩耗抵抗性は S_{KH} (SF無添加)

$< S_{KH}(SF添加) < S_{DG}(SF添加)$ となり、水結合材比と骨材の影響が大きい。そこで本実験では、摩耗抵抗性を向上させる要因がコンクリートマトリックスの圧縮強度にあるのか、粗骨材によるものか、あるいはその他にあるのかを究明するために、シリカフェームを混入した超高強度配合について追加実験を実施することとした。

追加実験の試験方法としては摩耗器材の摩損が少なく、かつ、摩耗減量の相違が大きく評価されたL法を採用した。追加実験の結果を図-9 に示す。摩耗抵抗性は、 $S_{KH} < S_{KG} < S_{NH} < S_{DG} < S_{DD}$ の順となり、(1)項の圧縮強度性状と一致しないことが判明した。また、細骨材を山砂から砕砂に変えることでもコンクリートの摩耗抵抗性はかなり向上する傾向が認められ、セメントペーストと細骨材における付着性の影響がうかがわれる。

今回使用した骨材の範囲では、通常のPC製品用コンクリート($S_{KH}-SF0$)の摩耗抵抗性に比べ、たとえば、一般的な砕砂・砕石を使用した超高強度コンクリート($S_{NH}-SF15$)では7倍程度の向上となり、さらに、石英片岩質の骨材を使用した超高強度コンクリート($S_{DD}-SF15$)では10倍程度の向上となることが確かめられた。

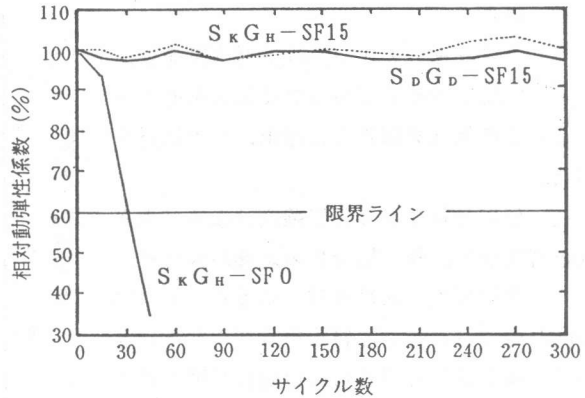


図-6 凍結融解試験結果(相対動弾性係数)

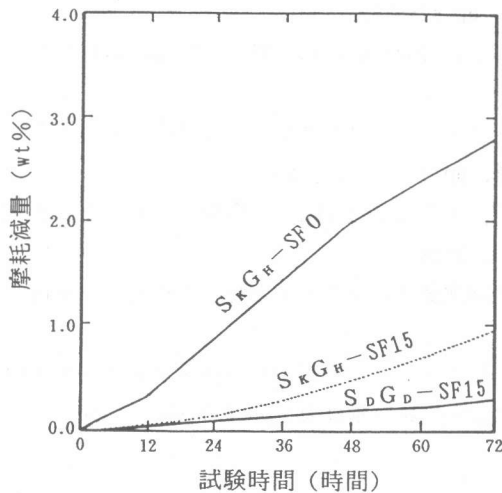


図-7 摩耗試験結果(L法)

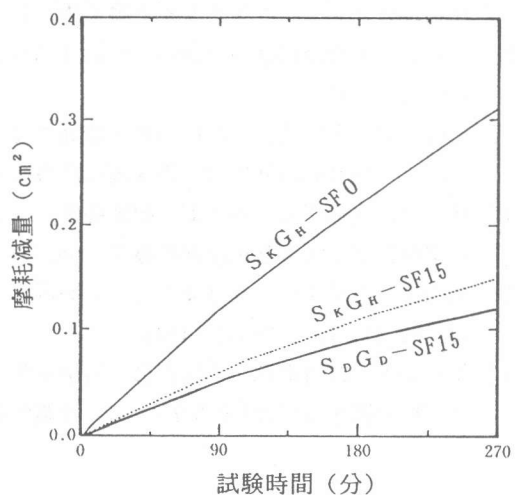


図-8 摩耗試験結果(R法)

4. まとめ

シリカフュームおよび高性能減水剤を使用し、蒸気養生を施して得られる超高強度コンクリートの物性を調査した結果、次の知見を得た。

(1) 使用骨材により圧縮強度は極めて大きな影響を受け、特に粗骨材の影響が大きい。

(2) 今回使用した粗骨材によると、より高強度が得られた石英片岩質粗骨材の全細孔容積は、硬質砂岩質粗骨材の全細孔容積に比べ大きく、ポーラスである。

(3) 水結合材比20%、単位結合材量740kg/cm³、シリカフューム添加率15%の配合で得られる超高強度コンクリートの凍結融解抵抗性は

非常に高く、non AEコンクリートであるにもかかわらず、耐久性指数97以上、重量減少率0.2%以下である。

(4) 摩耗作用を受ける場合にも超高強度コンクリートの抵抗性は大きい。たとえば、一般的な砕砂・砕石を使用した場合でも、超高強度コンクリートの摩耗抵抗性は通常のPC製品用コンクリートの摩耗抵抗性の7倍程度まで向上する。さらに、石英片岩質の骨材を使用した場合には、摩耗抵抗性は通常の10倍程度となる場合もある。

(5) 超高強度コンクリートの域になると、コンクリートの摩耗抵抗性は通常のコンクリートでいわれるような圧縮強度や粗骨材に左右されるのではなく、モルタルマトリックスの摩耗抵抗性に依存し、使用する細骨材の選定が重要となる。

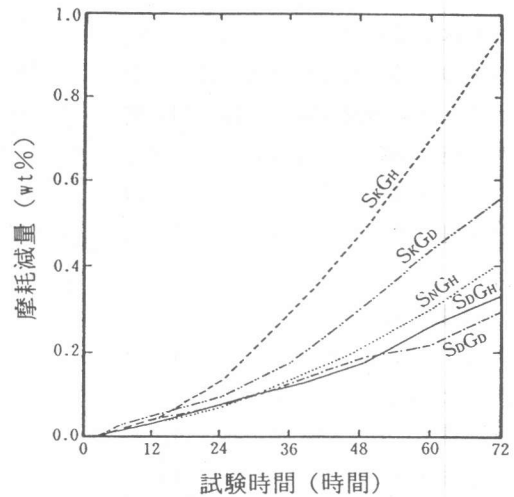


図-9 摩耗試験結果 (SF15%添加)

参考文献

- 1) 古賀康男・笠井英志・長井健雄：蒸気養生を施したシリカフューム混入コンクリートの強度性状，セメント・コンクリート論文集，No.46，pp.814-819，1992
- 2) Liu, T. C. : Abrasion Resistance of Concrete, ACI Journal, Vol.78, No.5, pp.341-350, Sep/Oct.1981
- 3) 土田伸治・丸山武彦・西山啓伸：超高強度シリカフュームコンクリートの諸性質に関する研究，土木学会第45回年次学術講演会講演梗概集，pp.196-197，1990.9
- 4) 橋大介・立部正則・西田朗：超高強度コンクリートの実用化に関する実験的研究(その6)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.497-498，1989
- 5) 窪山潔・中野正一：シリカフュームを混入した高強度コンクリートの特性，セメント技術年報，No.39，pp.217-220，1985
- 6) 三井健郎・河野浩司・吉岡保彦・岩清水隆：シリカフュームを用いた高強度コンクリートの諸特性に関する研究(その2)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.687-688，1988