

論文

[1063] シリカフュームを混和したコンクリートの流動性および強度に及ぼす練混ぜの影響

山口 重英*1 大賀 宏行*2 魚本 健人*3 小林 一輔*4

1. はじめに

シリカフュームを用いたコンクリートの諸特性に関する研究は海外において数多くなされており、シリカフュームをセメントの一部と置換することによって、コンクリートの強度、流動性および耐久性を改善できると言われている〔1〕〔2〕〔3〕。シリカフュームは平均粒径約 $0.1\ \mu\text{m}$ の超微細粒子であり、その粒径がセメント粒子に比べはるかに小さいため、シリカフュームを混和しないコンクリートの場合と同様の練混ぜを行っても、シリカフュームがコンクリート中で均一に十分分散するか否かは明らかになっていないのが現状である〔4〕。モルタルやペーストでの結果より、シリカフューム混和の効果が最大限に発揮されるためにはシリカフュームがコンクリート中で十分分散していることが必要と考えられる〔5〕〔6〕。

そこで、本研究はシリカフュームを混和したコンクリートの練混ぜ時の消費電力量の変化および強度に及ぼす練混ぜに要した電力量の影響について検討し、シリカフュームを混和したコンクリートの諸特性に及ぼす練混ぜの影響を明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

普通ポルトランドセメント（比重3.15）、および非造粒型（粉末状）シリカフューム（SF）（比重2.2、エルケム社製マイクロシリカ）、骨材としては細骨材に富士川産川砂（比重2.62、F.M3.19）粗骨材に両神産碎石（比重2.69、F.M7.02）を使用した。高性能AE減水剤（SP）は高強度用および普通強度用の二種類使用しアミノスルホン酸塩系のものを用いた。使用した普通ポルトランドセメントとシリカフュームの化学組成を表1に示す。

表1 使用材料の化学組成表（％）

	Ig Loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
セメント	0.63	21.54	5.27	2.95	64.83	1.49	1.92	0.28	0.55
非造粒型	1.75	94.91	0.55	0.57	0.23	0.38	0.05	0.23	0.70

2. 2 コンクリートの配合および練混ぜ方法

コンクリートの配合は、水結合材比を35％および55％とし、シリカフュームの置換率をセメン

*1 千葉工業大学大学院学生 工学研究科（正会員）

*2 東京大学講師 生産技術研究所第5部 工博（正会員）

*3 東京大学教授 生産技術研究所第5部 工博（正会員）

*4 千葉工業大学教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

トに対し重量の内割でそれぞれ0、5、10、30%とした。コンクリートは全ての配合において練混ぜ時間120秒で、スランプ 20 ± 2 cm、空気量 4 ± 0.5 %を基本とした。なお配合の考え方として単位水量およびs/aを一定とする方法を取り、シリカフューム混和したものについては高性能AE減水剤でスランプおよび空気量を調節した。高性能AE減水剤は全結合材重量に対して添加した。各配合を表2に示す。練混ぜ方法は粗骨材から順番に粒径の大きいものが下になるように材料を投入して、空練を60秒間行い、その後注水し120秒間練り混ぜた。なおシリカフューム混入率0%と10%については最大900秒まで練り混ぜた。練混ぜには容量100リットルのパン型強制ミキサを使用した。

表2 コンクリートの配合

水結合材比%	SF置換率%	W	C	SF	S	G	SP %	スラン プcm	空気量 %	s/a (%)
		kg/m ³								
55	0	170	309	0	997	945	2.0	20	4.5	52
55	5	170	294	15.5	996	942	2.1	19	4.2	52
55	10	170	278	31	991	940	2.4	21	4.1	52
55	30	170	216	93	980	928	4.1	20.5	4.0	52
35	0	162	463	0	833	1004	1.3	22	4.5	46
35	5	162	440	23	830	1000	1.55	20.5	4.3	46
35	10	162	417	46	825	995	1.8	21	3.9	46
35	30	162	324	139	810	977	3.5	20	4.0	46

2. 3 測定項目

フレッシュ状態では、積算電力計を用いてミキサの消費電力量を2秒間隔で測定した。なおシリカフューム混入率0%と10%については、120、300および900秒において、スランプ (JIS A 1101) および空気量 (JIS A 1128) を測定した。圧縮強度試験用供試体は $\phi 10 \times 20$ cmの円柱供試体とし、材令1日でキャッピングおよび脱型を行い、所定の材令(1、4、8、13週)まで水中養生した。

3. フレッシュコンクリートの諸性状

3. 1 練混ぜ時間とスランプの関係

図1および図2に、水結合材比55%、35%の練混ぜ時間にもなうスランプ変化を、参考として図3にモルタルの練混ぜ時間にもなうフローの変化を示す。モルタルの場合、シリカフューム

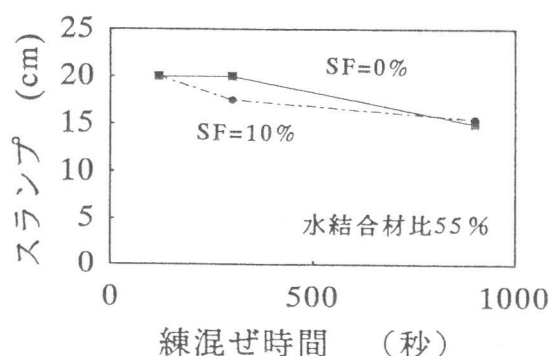


図1 練混ぜ時間とスランプの関係

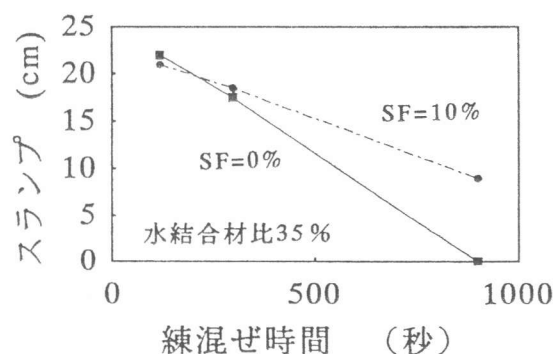


図2 練混ぜ時間とスランプの関係

を混入しないものは180秒程度でフローの最大値が現れるのに対して、シリカフュームを混和したものは1000秒程度となっている。それに対しコンクリートでは、シリカフューム混和の有無に関わらず、練混ぜ時間とともにスランプは減少し、モルタルでの結果と相反する結果となった。なおコンクリートでは、水結合材比の違いに関わらずシリカフュームを混和したものの方が、スランプの低下が少ない。水結合材比55%においては練混ぜ時間900秒の時、35%においては300秒以上で、シリカフュームを混和したコンクリートの方がスランプは大きい結果となっている。すなわちこの結果はコンクリートにおいても、シリカフュームが流動性に対し大きな影響を及ぼすことを示している。

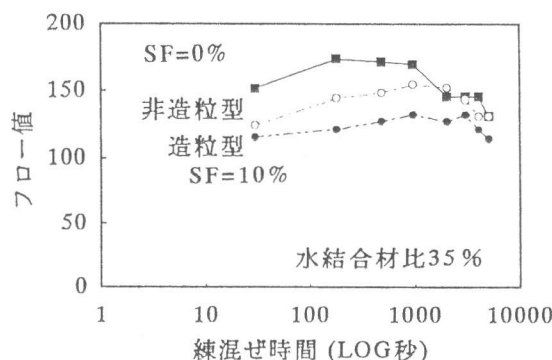


図3 練混ぜ時間とフローとの関係
(モルタル)

3. 2 練混ぜ時間とミキサの消費電力量

コンクリート練混ぜ時のミキサの消費電力量それ自体はミキサにかかる抵抗や負荷を測っていることになるので、ミキサで練混ぜている物質の降伏値や塑性粘度を測定していることになる。

このため、ミキサの消費電力量が、ほぼ一定値を示す値となったとき、ミキサ中のコンクリートも均一な状態となっていることが予想され、コンクリートの練混ぜ性能評価に対して、ミキサの消費電力量を指標とできると考えられている〔7〕。

図4および図5に、水結合材比55%、35%の練混ぜ時間120秒までの練混ぜ時間とミキサの消費電力量の関係を、図6に水結合材比35%、シリカフューム置換率0%および10%の練混ぜ時間900秒までの練混ぜ時間とミキサの消費電力量の関係を示す。また図7および図8に、水結合材比55%、35%の練混ぜ時間120秒までの練混ぜ時間とミキサの積算消費電力量の関係を示す。

水結合材比55%の場合には、シリカフューム置換率30%において練混ぜ初期の段階で小さなピークが観察されるが、それ以外はシリカフューム置換率に関わらずミキサの消費電力量は一定の値を示し、早い時期に定常状態となっているものと思われる。なお図7に示すミキサの積算電力量で比較してもシリカフューム混和による影響は認められない。一方、水結合材比35%のコンクリートでは、シリカフュームを混和し

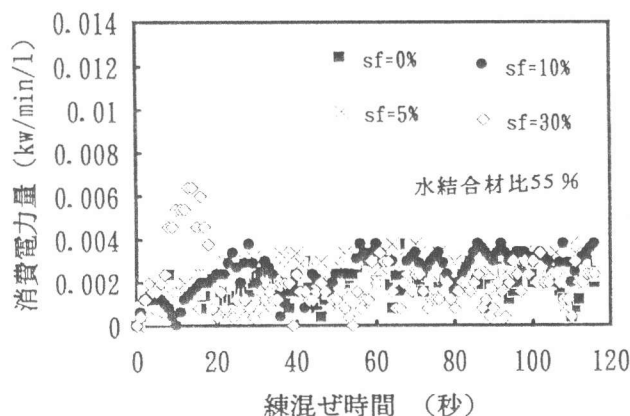


図4 練り混ぜ時間と消費電力量との関係

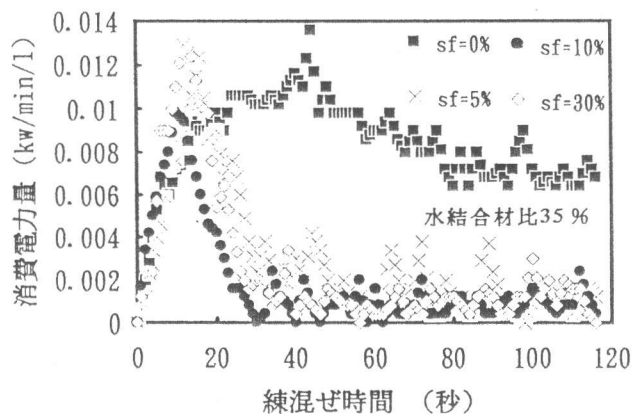


図5 練り混ぜ時間と消費電力量との関係

ないものについてはミキサの消費電力量が定常状態となるのに300秒程度要するのに対し、シリカフュームを混和したものについては、シリカフューム無混和のコンクリートに比べて、最大消費電力量のピークが現れる時期が60秒程度と早くしかも小さい値となっている。また積算消費電力量では、置換率10%で最小値となり、シリカフュームを混和したものはシリカフューム無混和のものに比べて極めて小さい。この事実は、水結合材比の低い領域でシリカフュームを混和したコンクリートの場合は、ミキサの消費電力量を指標とすると短い練混ぜ時間でシリカフュームが均一に分散し、シリカフューム混和の効果が得られるという結果となる。これはスランプでの結果と同様にモルタルでの結果と相反することになる。しかしながら今回の結果より、積算消費電力量が小さいということは、シリカフュームを混和したコンクリートにはミキサのエネルギーが伝達されにくいと思われること、さらに図6に示すように、シリカフューム混入率10%では練混ぜ時間1000秒手前で再度小さなピークをむかえ、その後また減少して定常状態となることから、図3に示すモルタルのフローの最大値が現れる練混ぜ時間が1000秒程度であることと一致する。

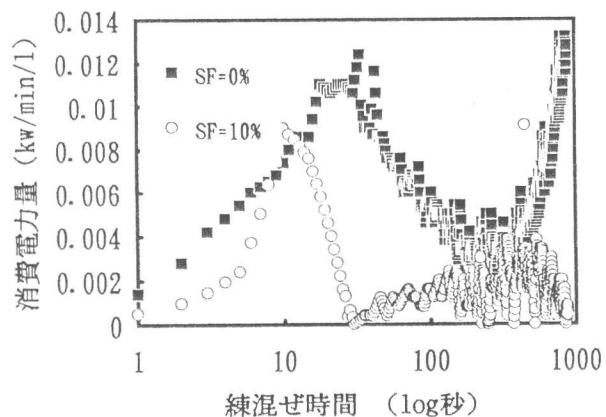


図6 練混ぜ時間と消費電力量の関係

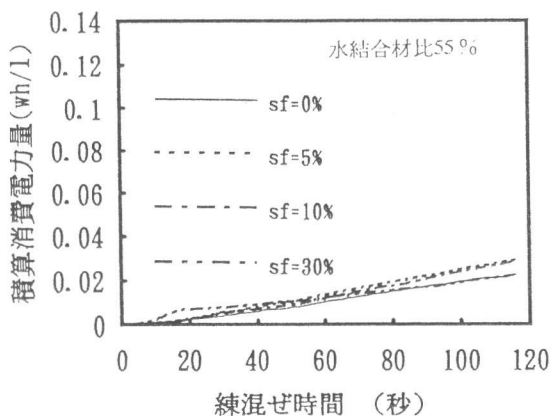


図7 練混ぜ時の積算消費電力量

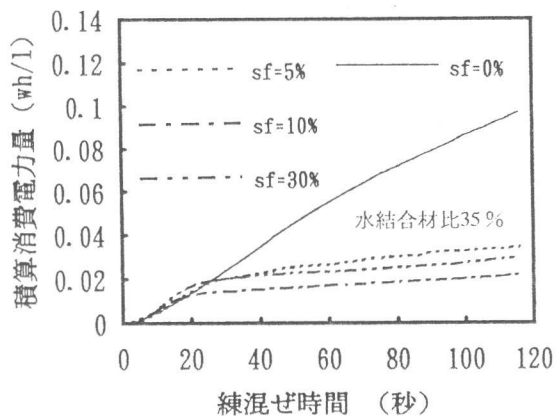


図8 練混ぜ時の積算消費電力量

4. 硬化コンクリートの諸性状

4. 1 練混ぜ時間と圧縮強度の関係

図9および図10にそれぞれ水結合材比55%、35%でのシリカフューム置換率が0%と10%における練混ぜ時間と圧縮強度の関係を示す。水結合材比55%では、シリカフューム混和の有無に関わらず練混ぜ時間とともに圧縮強度は著しく増大している。特にシリカフューム置換率0%において著しい。また練混ぜ時間120秒と900秒では20%近くの強度差がみられ、練混ぜ時間を増大させることにより、さらなる強度増加が見込まれるものと思われる。一方水結合材比35%では、シリカフューム置換率0%においては練混ぜ時間による影響はほとんど認められない。しかしながらシリ

カフュームを10%混入したものについては水結合材比55%と同様練混ぜ時間とともに圧縮強度は増加しており、練混ぜによる影響は著しい。これはモルタルやペーストでの結果と一致する結果となった〔6〕。

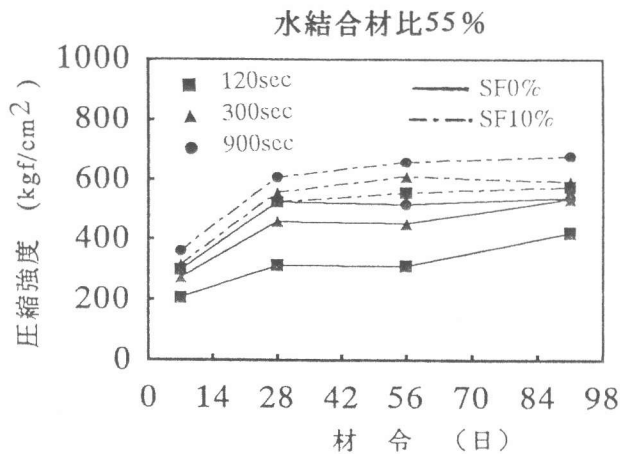


図9 練混ぜ時間と圧縮強度との関係

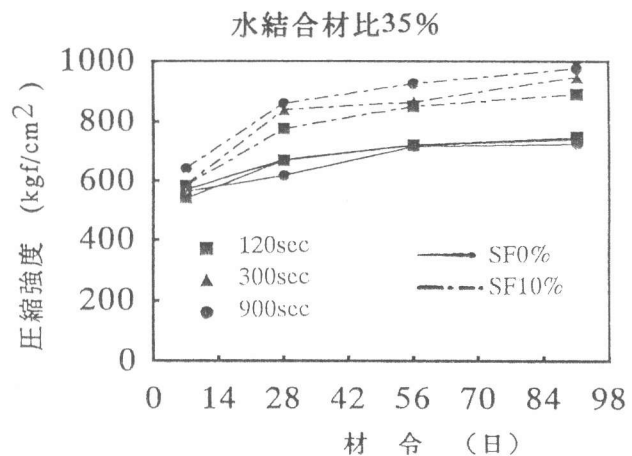


図10 練混ぜ時間と圧縮強度との関係

4. 2 積算電力量と圧縮強度の関係

図11および図12にそれぞれシリカフューム置換率0%、10%におけるミキサの積算消費電力量と圧縮強度の関係を示す。これらの図より、圧縮強度の変化曲線はシリカフュームの置換率によって異なっていることが認められる。シリカフューム置換率0%ではミキサの積算消費電力量が0.1wh/l以下の小さな値の範囲では、勾配が急な曲線であるのに対し、0.1wh/l以後は勾配の緩やかな曲線を示し、その後はほぼ一定値を示す傾向となっている。それに対し、シリカフュームが10%混入してあるものはミキサの積算消費電力量の値に関わらず、右あがりの緩やかな勾配を示している。そこでミキサの積算消費電力量が0.1wh/l時の圧縮強度を100とした相対圧縮強度を求め、図13にミキサの積算消費電力量と相対圧縮強度の関係を示す。魚本らの研究によると、ミキサの消費電力量と相対圧縮強度との間には、電力量が0.05wh/l以上では相関性が強

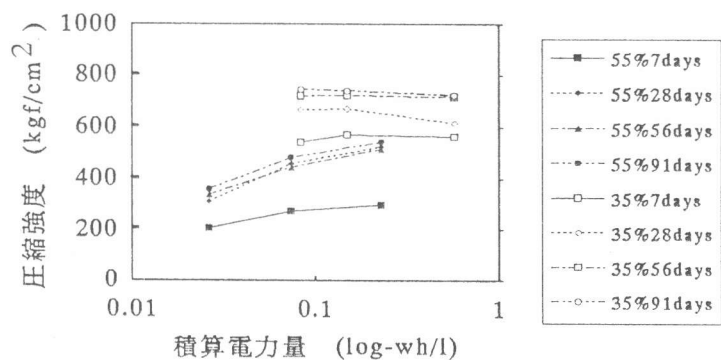


図11 積算電力量と圧縮強度の関係 (SF 0%)

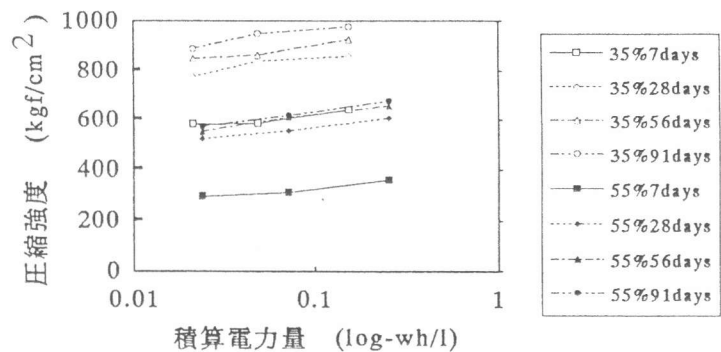


図12 積算電力量と圧縮強度の関係 (SF 10%)

く直線回帰できること、また0.05wh/l以下では強度低下が大きいことが確認されている。そこで今回実験したコンクリートと比較すると、シリカフュームを10%混入した系では、ミキサの積算消費電力量と相対圧縮強度は良好な直線関係となり、この傾きは魚本らのプレーンコンクリートでの傾きに比べ大きな傾きとなっており、シリカフュームを混和したコンクリートの圧縮強度は練混ぜ時間による影響が大きいことが確認された。

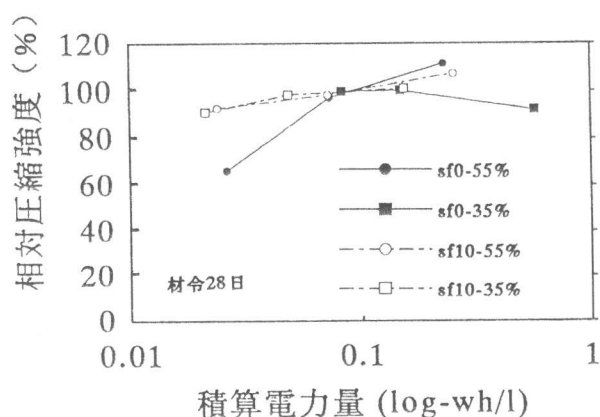


図13 積算電力量と相対圧縮強度との関係

5. まとめ

本研究の結果以下のことが明らかになった。

- (1) シリカフューム混和コンクリートの方が、練混ぜ時間にとまなうスランプの低下が少ない。
- (2) ミキサの消費電力量を指標とすると、水結合材比の低いところでシリカフュームを混和したコンクリートの方が早く練り混ざり、練混ぜに要するエネルギーも少ない。
- (3) シリカフュームを混和したコンクリートにおいてはモルタルやペーストでの結果と同様圧縮強度に及ぼす練混ぜの影響は大きいことが分かった。

《参考文献》

- [1] Nakamura,N.,Sakai,M.,Koibuti,K. and Iijima,Y. : Prooerties of High-Strength Concrete Incorporating Very Finely Ground Granulated Blast Furance Slag , ACI SP-90.Vol.2,pp.1361-1380,1986
- [2] Regourd,M. : Microstructure of High Strength Cement Paste Systems,Materials Research Society Symposia Proceedings on Very High Strength Cement-BasedMaterials , pp.3-17,1985
- [3] Khayat,K.H. and Aitcin,P.C. : Silica Fume in Concrete - An Overview,ACI SP-132,Vol.2,pp.835-872,1992
- [4] 長滝、大即、久田、松浦:シリカフュームを混和したコンクリートの耐海水性に関する基礎的研究、セメント技術大会講演集、Vol.46,pp.252-257,1992
- [5] 山口、大賀、魚本:シリカフュームの混和によるモルタルの高性能化に及ぼす練混ぜの影響、シリカフュームを用いたコンクリートに関するシンポジウム講演論文報告集、CONCRETE ENGINEERING SERIES 4,pp53-60,1993
- [6] 山口、大賀、魚本、小林:シリカフュームの反応性に関する基礎的研究、土木学会第48回年次講演会講演概要集第5部、pp.428-429,1993
- [7] 魚本、西村、渡部、田中:配合条件とミキサ消費電力量がコンクリートの品質に及ぼす影響、土木学会論文集、NO.442/V-16,pp109-118,1992
- [8] 日本シリカフューム研究会:シリカフューム技術の現状、1992