

V—9 シリカフュームを中心としたモルタルの特性に関する研究

室蘭工業大学 学生員 松谷 正憲
 室蘭工業大学 正 員 尾崎 訓
 室蘭工業大学 正 員 菅田 紀之

1 はじめに

近年、混和材として話題になっているシリカフュームを混入したコンクリートの特性は、水密性や耐久性に富み、強度に対しても、28日材令における圧縮強度は無混入の場合よりも高いという報告もあるが、3日といった初期材令では無混入の場合よりも低い¹⁾といった特徴をもっている。以上のようにシリカフュームを単独使用した研究報告はなされているものの、フライアッシュや他の混和材（本研究で初めて使用したアエロジル）との複合混合の有効性や化学・物理的作用を十分にいかした相乗効果については十分明らかではないが、河野²⁾の研究によれば、シリカフュームと高炉スラグの混入は圧縮強度に、フライアッシュの混入は曲げ強度に効果的であると報告されている。

硬化したコンクリートの組成と構造は、二相材料であると仮定すれば、均質で連続したセメントペーストのマトリックス中に骨材が分散したもの、または、モルタルマトリックス中に粗骨材が分散していると考えることができる³⁾すなわちこの二相材料説に注目すれば、コンクリートの強度を左右するのは、モルタル自体の強度とモルタルと骨材との付着強度によって特徴づけられると考えられる。

そこで本研究では、コンクリートの二相材料説に注目して混和材を使用したコンクリートの性状の基礎研究として、モルタルを使用し、混和材料を単独及び複合混合したモルタルの性状を強度及び28日材令の水銀ポロシメーターによる空隙量の測定結果から複合混合の有効性を検討するとともに、モルタルと骨材の付着特性についても報告するものである。

2 試験概要

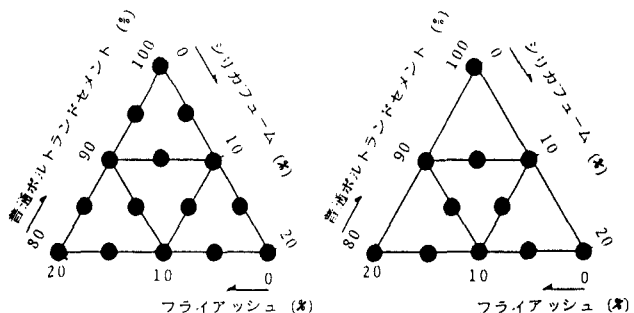
1) 使用材料

モルタル製作に使用したセメントは普通ポルトランドセメント、細骨材（F.M 2.88）は錦岡産の海砂を使った。混和剤はA E剤及びポリアルキルアリルスルホン酸塩を主成分とした高性能減水剤を使用した。骨材の付着強度試験に粗骨材のかわりに使用した石片は、寸法4×4×1cm（厚さ）のみかげ石（花こう岩）を使った。本実験に使用する混和材料の物理、化学的性質を表-1に示した。今回の実験で、空隙の充填効果を目的として使用したアエロジルは、シリカフュームより超微粉末（平均粒径0.012μm）の親水性混和材料である。

2) 混和材料とセメントの配合割合
 シリカフューム・フライアッシュ・アエロジルの3種類のシリカ質混和材の配

	比重	平均粒径 (μm)	比表面積 (cm ² /g)	化学成分 (%)
				SiO ₂
アエロジル	2.20	0.012	2040000	99.99
シリカ フューム	2.20	0.20	180000	89.5
フライ アッシュ	2.15	16	3400	60.8

表-1 混和材料の物理・化学的性質



(a) アエロジルの置換率0% の配合 (b) アエロジルの置換率1% の配合

図-1 混和材料とセメントの配合割合

合は、置換率の上限を内割で20%までとして配合を行った。普通ポルトランドセメント・シリカフューム・フライアッシュの3種類の配合割合を三角図表で示し、図-1の(a)にはアエロジルの置換率0%の配合を、(b)にはアエロジルの置換率1%の配合を組合せた。試験を行った試料数は、アエロジルの置換率0%の配合では図-1の(a)の黒点で示す15種類を、アエロジルの置換率1%の配合では図-1の(b)の黒点で示す11種類を行なった。

以後、シリカフューム・フライアッシュ・アエロジルは略記としてSF、F、Aの記号を使用し、例えばSF(40-20)は水結合材比40%、シリカフュームで20%置換したモルタルを、N(40)は混和材料を用いず水セメント比40%のモルタルを表すものとする。

3) 試験方法

混和材料を単独及び複合混合したモルタルの製作は、手練りを十分に行った後に4×4×16cmのJIS型枠に2層10回ずつ突き固めて供試体を作った。このモルタルの性質は水結合材比40%（混和材料を用いないモルタルに関しては水セメント比40%）と定め、フロー値は195～220mmとなるように高性能減水剤を添加し、AE剤はモルタルの空気量が7.5%となるように加えた。以上のようにして製作したモルタルを材令3・7・28日毎に、強度試験（圧縮、曲げ、直接引張試験）と材令28日の試料については水銀ボロシメーターによる空隙測定を行った。

骨材とモルタルの付着強度試験に使用するモルタルは混和材料を単独で使用し、高性能減水剤・AE剤の添加量は強度試験用モルタルとフロー値を合わせるために同量とした。このモルタルをJIS型枠の中央に石片を垂直にはさんで入れ、2層10回ずつ突き固めて製作した。以上のモルタルを、材令3・7・28日毎に直接引張試験による付着強度と曲げ試験による付着強度試験を行った。

3 モルタルの強度試験結果

混和材料を単独使用したモルタルとN(40)の28日材令の圧縮、直接引張、曲げ強度に対する強度比(%)の関係を図-2に示す。

シリカフュームを混入したモルタルの圧縮強度の伸びは、材令3日から7日にかけてN(40)のそれと同程度ではあるが、材令28日に及んでは置換率10%の圧縮強度はN(40)の約130%の強度がでており、それ以上に置換率が大きくなるに従って28日強度は低下している。直接引張強度は、材令28日で置換率10%のモルタルがN(40)のそれと同じ強度となっているものの、置換率が大きくなるに従って直接引張強度は低下した。シリカフュームの混入は直接引張強度の改善に貢献していないと考えられる。曲げ強度は、材令28日において置換率10%、20%で改善されていることがわかる。置換率20%の曲げ強度は、材令7日から28日までの伸びは最高で、シリカフュームのポゾラン反応は材令7～28日で起こると思われる。また、置換率5%のモルタルは圧縮・直接引張・曲げ強度の改善効果がなかった。

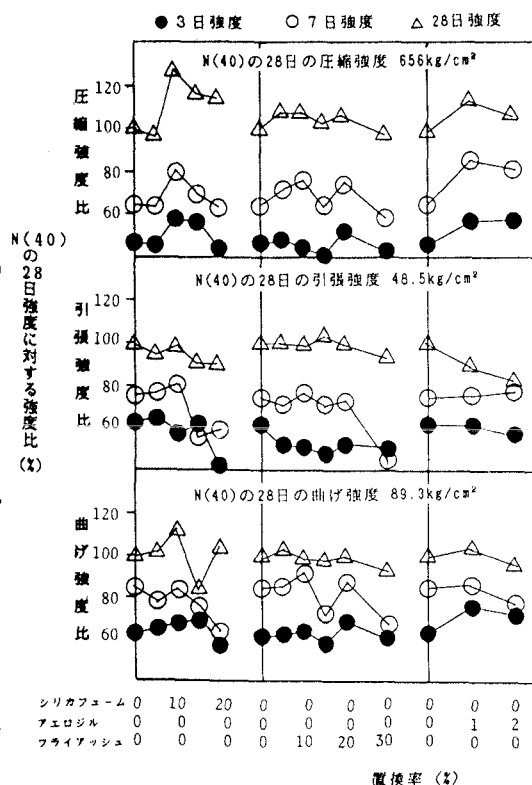


図-2 混和材料を単独使用したモルタルとN(40)の28日強度に対する強度比(%)

フライアッシュを用いたモルタルの圧縮強度は、材令28日で最高約110%の強度が出ており、置換率30%のモルタルを除いて改善効果があった。フライアッシュを用いたモルタルの圧縮強度の発現は、初期材令から始まり、穏やかに材令28日まで移行している。直接引張強度は、置換率30%を除いて、材令28日でN(40)と同程度かそれ以上となり、直接引張強度の改善に働く置換率は0~20%までと思われる。曲げ強度はフライアッシュの混入において改善されず、逆に材令28日の置換率30%においては低下している。置換率を20%以上にすると、強度試験の結果からは改善効果はみられなかった。

アエロジルの混入による圧縮強度の改善は、初期材令で著しく大きな強度発現があった。アエロジルを1%混入した場合のほうが2%混入した場合よりも改善効果はあった。しかし、直接引張強度には改善効果はなく長期材令になるに従って低下し、曲げ強度も1%混入したものは改善されているものの2%混入では逆に低下している。

以上より、比表面積の大きいシリカフュームやアエロジルを混和材料として使用したモルタルは、圧縮強度の改善効果は期待できるが、直接引張強度の改善効果は期待できず、曲げ強度の改善は、シリカフュームとアエロジル1%混入で効果があった。セメントとほぼ同じ比表面積をもつフライアッシュを混和材料として使用すれば、圧縮・直接引張強度で改善効果があり、曲げ強度についてはN(40)と変わらない。

アエロジルの置換率0%で、シリカフューム・フライアッシュ・普通ポルトランドセメントを三角図表上で複合混合した15種類の中で、N(40)の28日強度に対する材令3・7・28日の圧縮・直接引張・曲げ強度の最高値の移り変りを図-3(a)に示す。圧縮強度は、材令が進んでもシリカフューム10%・フライアッシュ0%の試料の強度が最高値を示し、シリカフュームとフライアッシュの相乗効果はなくシリカフューム10%の単独混入の方が良い結果となった。直接引張強度では、シリカフュームが5→10→0%と10%を境に減る方向に、フライアッシュは0→5→15%と増える方向に強度の伸びが認められた。すなわち、初期材令の時は、シリカフューム10%以内、フライアッシュ5%以内であれば相乗効果が認められ、長期材令になればフライアッシュを単独で約15%程度混入すれば改善効果があると考えられる。曲げ強度では材令が進むにつれてシリカフュームが5→0→10%と移動し、フライアッシュでは5→10→0%と混入しない方向で曲げ強度の伸びが認められる。曲げ強度では、圧縮強度同様にシリカフューム10%で単独混入したもののほうが長期材令になるに従って効果があった。以上より、シリカフューム・フライアッシュの複合混入では、

初期材令においては、引張・曲げ強度では複合混合の効果は認められるが、長期材令では圧縮・曲げ強度はシリカフューム10%程度を単独混入したものがよく、直接引張強度はフライアッシュ15%を単独で混入したものが効果があり複合混合の効果はみられなかった。

次に、アエロジルを1%置換し、シリカフューム・フライアッシュ・普通ポルトランドセメント

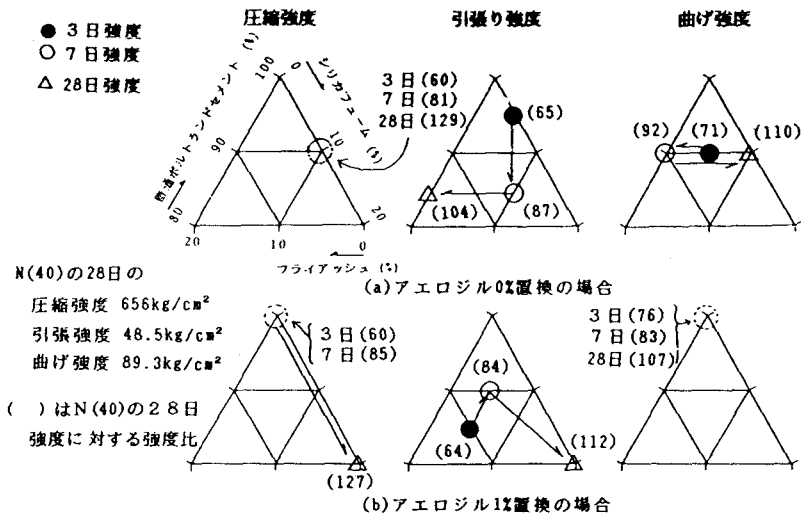


図-3 混和材料を複合混合したモルタルの強度の最高値の移り変り

トを三角図表上で複合混合した11種類の中で、N(40)の28日強度に対する材令3・7・28日の圧縮・直接引張・曲げ強度の最高値の移り変りを図-3(b)に示す。圧縮強度は、材令3・7日でアエロジルを単独で1%混入したモルタルで大きな値を示すが、長期材令になるに従ってアエロジル1%、シリカフューム20%の相乗効果があらわれ最高値を示した。直接引張強度では、材令が進むにつれてシリカフュームを5→5→20%と増加する方向に、フライアッシュは逆に10→5→0%と減少する方向に最高値の移り変りがあった。また、フライアッシュとシリカフュームの複合混合時にみられたフライアッシュの混入による直接引張強度の改善はみられなかった。これは、フライアッシュ粒子に超微粒子のアエロジルが附着しフライアッシュ本来の働きが阻害されたものと思われる。曲げ強度に関しても、アエロジルを単独で1%混入したものの方が良く、シリカフューム・フライアッシュとの相乗効果は期待できなかった。

4 モルタルの空隙測定試験結果

混和材料の置換率を変えたモルタルの細孔径分布とN(40)の材令28日圧縮強度比との関係を図-4に、また(a)水セメント比40%モルタルと(b)SF(40-20)のモルタルの細孔径分布を図-5に示す。シリカフュームを単独で混入したモルタルの全細孔容積は置換率に関係なく、フライアッシュやアエロジルを単独で混入したモルタルに比べて最も少ない値を示した。特に、 $0.1\mu\text{m}$ 以上の細孔容積は少なく密なモルタルであることが推測される。強度との関係では、 $0.1\mu\text{m}$ 以上の細孔容積の少ない置換率10%のモルタルが高い強度を示した。

フライアッシュを混入したモルタルの全細孔容積は、シリカフュームを混入したモルタル程少なくはないがN(40)のそれより少ない。 $0.1\mu\text{m}$ 以上の細孔容積は、N(40)に比べて少なくなっており、強度との関係についてもN(40)よりも高い値を示す結果となった。また、フライアッシュを混入したモルタルの細孔径分布の特徴はシリカフュームなどにみられる $0.1\mu\text{m}$ 以上の空隙が極端に少なくなるのではなく、あらゆる大きさの細孔容積が少なくなるものと思われる。

アエロジルを混入したモルタルの全細孔容積は、フライアッシュのそれと同量となっていたが、 $0.1\mu\text{m}$ 以上の空隙の量は、フライアッシュのそれよりも少なくなっていた。

また、シリカフューム10%、フライアッシュ10%を

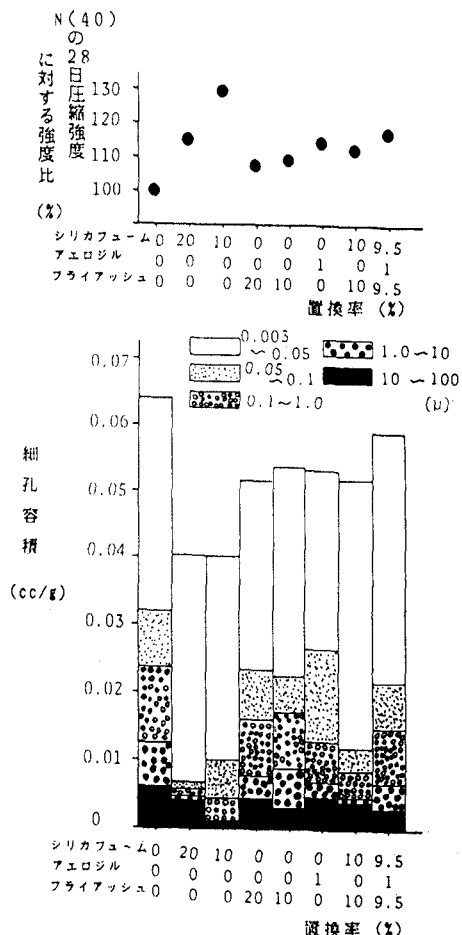


図-4 混和材料の置換率とモルタルの細孔径分布及び、N(40)の28日圧縮強度比との関係

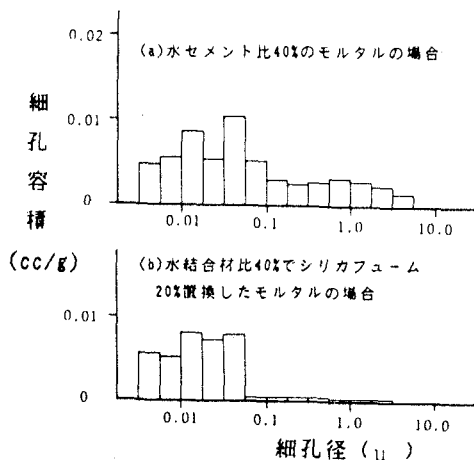


図-5 細孔径分布

複合混合したモルタルの細孔径分布は、全細孔容積はフライアッシュ10%置換のそれと同程度となっているが、

0.1 μ m以上の空隙はシリカフェームの働きによって少なくなっているものと思われる。シリカフェーム9.5%、アエロジル1%、フライアッシュ9.5%を置換したモルタルでは、全細孔容積は、N(40)に比べて少ないものの、フライアッシュやシリカフェーム、アエロジルの相乗効果はみられなかった。

以上のことより、モルタル部分の全細孔容積、特に0.1 μ m以上の空隙を少なく密なモルタルを製作するには複合混合の効果はなく、シリカフェームを単独で使用したほうがよいと思われる。また、強度との関係では0.1 μ m以上の空隙が少ないモルタルほど強度は高くなるものと思われる。

5 骨材とモルタルの付着強度試験結果

骨材とモルタルの直接引張試験による付着強度及び曲げ試験による付着強度の試験結果を図-6、7に示す。SF(40-20), F(40-20)の直接引張試験による付着強度は、材令28日までは似た強度発現があり、材令3・7・28日の強度の伸びから判断し材令28日以降はフライアッシュを混入したモルタルの方が、シリカフェームを混入したモルタルよりも直接引張試験による付着強度は伸びるものと思われる。このことは、ポゾラン反応に対応し、材令28日以前はシリカフェームを混入したモルタルが、材令28日以降はフライアッシュを混入したモルタルが効果的に粗骨材とモルタルの付着強度を高める働きがあることがわかる。アエロジルを混入したモルタルの直接引張試験による付着強度は、材令3日では強度発現はないが、材令7日目に付着強度は急激に増加し材令28日まで変化していない。これは、アエロジル混入によるモルタルの直接引張試験による付着強度は材令7日付近で、ポゾラン反応が起るためと思われる。曲げ試験による付着強度試験の結果より効果が現われたのは、シリカフェーム混入したモルタルであり、N(40)に対する材令28日の曲げ試験による付着強度は約1.3倍となった。フライアッシュ混入のモルタルの曲げ試験による付着強度は直接引張試験による付着強度の時にみられた強度発現はなく、アエロジル混入による曲げ試験による付着強度の発現は材令7日までで、材令28日にいたってはN(40)とほぼ同じとなった。

以上より、骨材とモルタルの付着面に及ぼす混和材料の影響は、フライアッシュを混入した場合、骨材とモルタルの引張試験による付着強度の改善に貢献し、シリカフェームについては、骨材とモルタルの曲げ試験による付着強度ばかりでなく直接引張試験による付着強度の改善にも貢献した。また、アエロジルは材令7日付近の付着強度の改善に効果的であった。

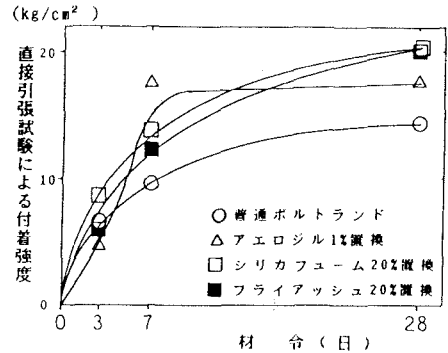


図-6 直接引張試験によるモルタルと石片の付着強度の経時変化

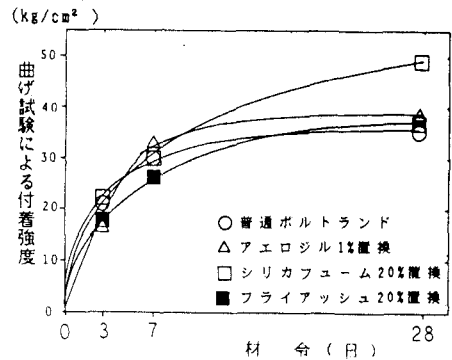


図-7 曲げ試験によるモルタルと石片の付着強度の経時変化

6 まとめ

材令28日までの範囲内における本実験の結果をまとめると、以下のようになる。

- (1) シリカフュームの単独混入は、全細孔容積を少なくし、特に $0.1\mu\text{m}$ 以上の空隙量を少なくさせ、圧縮強度・曲げ強度に十分貢献するが、直接引張強度には改善効果はない。最適置換率は、10%程度であり、5%では効果はない。また、骨材とモルタルの直接引張試験と曲げ試験による付着強度の改善に効果的である。
- (2) フライアッシュの単独混入は、置換率20%まで圧縮強度・直接引張強度の改善に効果があり、それ以上の混入は効果はない。全細孔容積は、シリカフュームのそれより少なくなりますが、N(40)に比べて少なくなった。また、直接引張試験による付着強度の改善は、材令28日以降にあらわれると思われる。
- (3) アエロジルの単独混入は、初期材令の圧縮強度に効果的であるが、長期材令の圧縮・直接引張・曲げ強度の改善に効果的でない。全細孔容積は、フライアッシュのそれと同量であるが、 $0.1\mu\text{m}$ 以上の空隙量は少なかった。また、直接引張試験・曲げ試験による付着強度は、材令7日までに発現し、材令28日においてはN(40)と同じになった。
- (4) シリカフューム、フライアッシュの2種類の複合効果は初期材令の直接引張強度・曲げ強度に効果はみられたが、長期材令では混和材料の相乗効果はみられなかった。
- (5) シリカフューム、フライアッシュ、アエロジルの3種類の複合混合では、初期材令で直接引張強度に相乗効果がみられた。長期材令になるに従って圧縮強度、直接引張強度でシリカフュームとアエロジルの相乗効果はみられたが、曲げ強度に関してはアエロジル1%単独混入したもののほうがよい。
- (6) 空隙の充填効果に関しては、混和材料の相乗効果はみられない。また、多少の誤差はあるが $0.1\mu\text{m}$ 以上の空隙量が減少しているものほど強度は増加する傾向がある。

参 考 文 献

- 1) 長滝 重義・米倉 亜州夫：シリカフュームとコンクリート、コンクリート工学、Vol. 23、pp5~15、1985. 5
- 2) 河野 清：V-233 産業副産物の混合使用に関する検討、土木学会第41回年次学術講演会、1986. 11
- 3) 岩崎 訓明：コンクリートの特性、pp2~3、1975