

論 文

[1034] 高強度コンクリートの特性に及ぼす練り混ぜ因子の影響

正会員○磯屋孝代 (日本国土開発技術研究所)

正会員 佐原晴也 (日本国土開発技術研究所)

星野昭平 (日本国土開発技術研究所)

正会員 竹下治之 (日本国土開発技術研究所)

1. はじめに

近年、RC構造物の超高層化を目的として、圧縮強度800~1000kgf/cm²程度の高強度コンクリートの開発が進められている。従来のコンクリートでは、全材料を一括投入して製造されてきたが、使用水量が少なく、微粉の多い、しかも極めて粘性の高い高強度コンクリートでは、従来の製造方法で十分な攪拌や練り混ぜができるかどうか明らかではない。同一配合であっても、材料の投入順序、混和剤の添加時期などの練り混ぜ方法によって、コンクリートの特性が異なる場合もあると考えられることから、本研究では、このような練り混ぜ方法が高強度コンクリートのコンシステンシー、圧縮強度などの特性に及ぼす影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 検討因子と水準

練り混ぜに影響する因子として、ミキサおよび練り混ぜ方法を選定し、材料の投入順序、ミキサのブレード回転数および練り混ぜ時間の3つの水準について検討を行った。なお、ブレード回転数は通常 65rpmとし、ミキサは、50ℓパン型強制練りミキサを使用した。

2.2 使用材料および配合

実験に使用した材料およびコンクリートの配合を、表-1および表-2にそれぞれ示す。

2.3 試験項目

フレッシュコンクリートの試験としては、スランプ、スランプフロー、空気量、練り上がり温度および5mmふるいでスクリーニングしたモルタルの粘度を、硬化コンクリートの試験としては、圧縮強度(材令7日、28日)、単位体積重量および水銀圧入法による細孔径分布を測定した。また、練り混ぜ時のミキサの消費電力を測定し、積算電力量を求めた。

表-1 使用材料

セメント C	普通ポルトランドセメント (比重 3.16, ブレーン値 3180 cm ² /g)
シリカフェイム SF	顆粒状 (比重 2.3, 比表面積 15~20 m ² /g)
細骨材 S	河間山山砂30%, 相模川水系70% (比重 2.59, F.M. 2.94)
粗骨材 G	青柳産砕石 (比重 2.65, F.M. 6.73)
減水剤 Ad	高性能AE減水剤 (芳香族7ミノリブリン酸系高分子化合物)

表-2 コンクリートの配合

最大寸法 (mm)	W/(C+SF) (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					Ad (%)*
			W	C	SF	S	G	
20	28	42	140	450	50	731	1037	3.5

3. 試験結果と考察

3.1 材料の投入順序による影響

材料の投入順序がコンクリートの特性に及ぼす影響を検討するため、表-3に示した5種類の練り混ぜ方法について試験を行

*添加量は、結合材料(C+SF)に対する割合で示した。

った。この試験では、全練りませ時間を5分とした。

(1)フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの性状を図-1に示す。これより、SM法以外の空練りを行わない練り混ぜ方法においては、高性能AE減水剤（以下、減水剤と称する）を分割添加したM2法およびM3法の方が、一括添加したS法、M1法に比べてスランプが5.5~11cm大きくなった。これは、減水剤を一括添加した場合、減水剤が結合材に多く吸着されるために減水効果に寄与する有効量が少なくなるのに対し、分割添加した場合は、結合材の表面に水和物が生成し吸着される減水剤が減少するため、減水効果が向上すると考えられる〔1〕。

空気量はS法が最も少ないが、これは材料を一括投入してコンクリートを練るために材料の分散が不十分となり、空気が混入しにくくなったためと思われる。スランプが小さくなった原因の1つであると考えられる。また、S法は練り上がり温度が高くなったが、これは練り初めから粗骨材を投入しているため、摩擦抵抗が大きくなり温度が上昇したと思われる。

空練りの有無を比較すると、空練りを行ったSM法のスランプは、空練りを行わないM2法に比べて4.5cm大きくなった。これは空練りによって結合材の分散・混合が十分となり、水や減水剤との練り混ぜも十分に行われ、さらに、巻き込み空気量も多くなったためと考えられる。

モルタルの降伏値および塑性粘度の結果を図-2に示す。スランプの小さいS法が降伏値、塑性粘度ともに大きく、実際にハンドリングした場合は、コンクリートの粘性が高く流動しにくいものとなった。

練り混ぜによるミキサの積算電力量を図-3に示す。最も高い値はS法であるが、これは先に述べたように、全材料を練り混ぜ当初より投入しているため、ミキサにかかる負荷が大きくなったためと思われる。M1法、M2法、M3法については大きな差が見られないが、SM法は、空練りの際の抵抗が小さいために最小になったと考えられる。ミキサの積算電力量は、スランプ、スランプフローとは逆傾向で、温度とは同傾向にある。

表-3 練り混ぜ方法

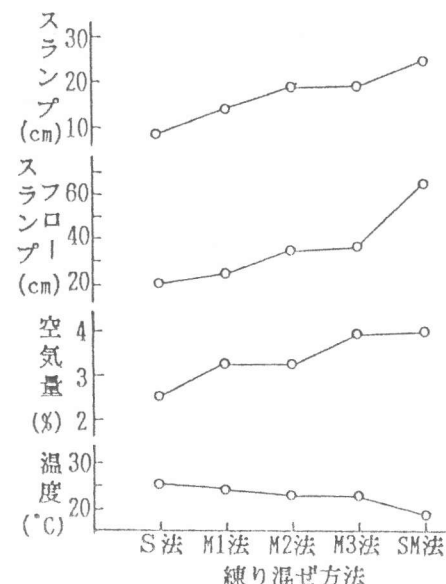
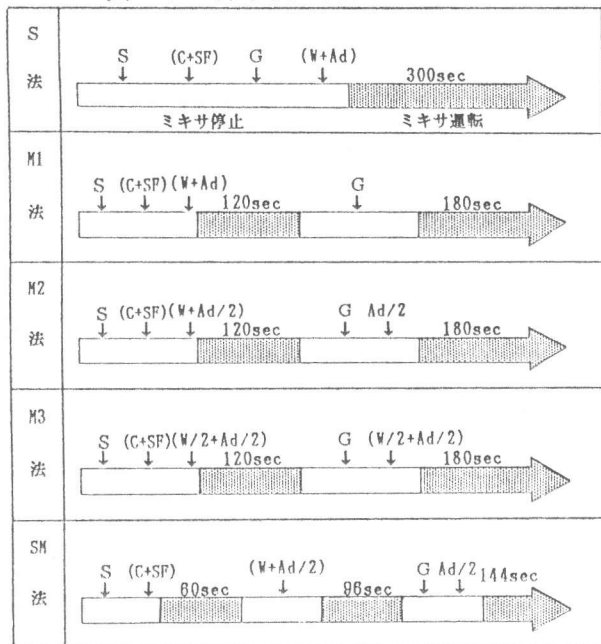


図-1 練り混ぜ方法によるフレッシュコンクリートの性状

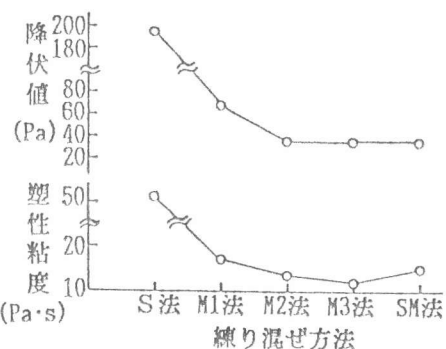


図-2 練り混ぜ方法によるモルタル粘度

(2) 硬化コンクリートの性状

圧縮強度を図-4に示す。これによれば、S法が最も高強度であり、他の練り混ぜ方法に比べて材令28日で50~150kgf/cm²程度高くなった。これは、S法は粗骨材投入後の練り混ぜ時間が長く、モルタルと粗骨材との付着が一層強化できたこと、さらに空気量が少なく強度上の欠陥部が少なかったためと考えられる。スランプの大きかった練り混ぜ方法は、高性能AE減水剤の効果が大きいため空気量が増加しており、強度低下の原因の1つと思われる。単位体積重量は、大きな差は見られなかった。

空練りを行ったSM法は、空練りを行わない他の方法に比べて圧縮強度は小さくなった。これは、練り混ぜ時間を同等にした場合、水投入後の練り混ぜ時間が空練り時間だけ短くなるために、モルタルの練り混ぜや粗骨材への付着が不十分になってしまうものと考えられる。圧縮強度は、モルタルと粗骨材の付着強度、モルタル自身の強度などによって大きく影響されるが、このような点を考慮し、水投入後の練り混ぜ時間を1分間延長した実験を行った。これによれば、練り混ぜを十分に行うことによって材令28日で約100kgf/cm²の強度増加が見られた。したがって、コンシステンシーを改善するために空練りを行う場合、強度低下を防ぐために、水投入後あるいは粗骨材投入後の必要最低限の練り混ぜ時間を確保することが重要である。

3.2 ミキサのブレード回転数による影響

練り混ぜ方法をM2法とし、ミキサのブレード回転数を30~90rpmの範囲で変化させた時の影響について検討を行った。いずれの場合もモルタルの練り混ぜ時間2分、コンクリートの練り混ぜ時間3分とし、全練り混ぜ時間を5分とした。

(1) フレッシュコンクリートの性状

図-5にブレード回転数によるフレッシュコンクリートの性状を示す。この結果から、ブレード回転数が小さくなるほど幾分スランプ、スランプフローが大きくなる傾向があることが分かる。事実、フレッシュコンクリートの状態では、低回転数のものはハンドリングは重たく感じられたが、流動性は良好であった。これは、低回転数ではセメント粒子の分散が不十分であるために見かけ水量が増加するのに対し、高回転数では減水剤の結合材への吸着量が増加するためと考えられる[2]。

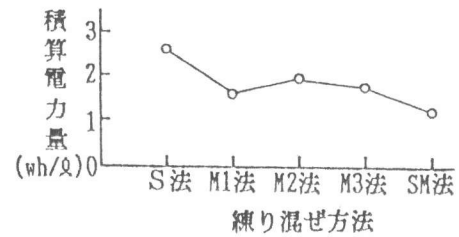


図-3 練り混ぜ方法による積算電力量

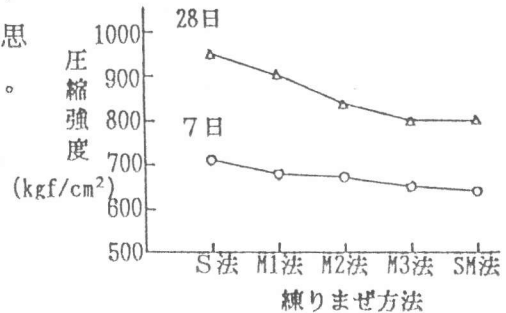


図-4 練り混ぜ方法による圧縮強度

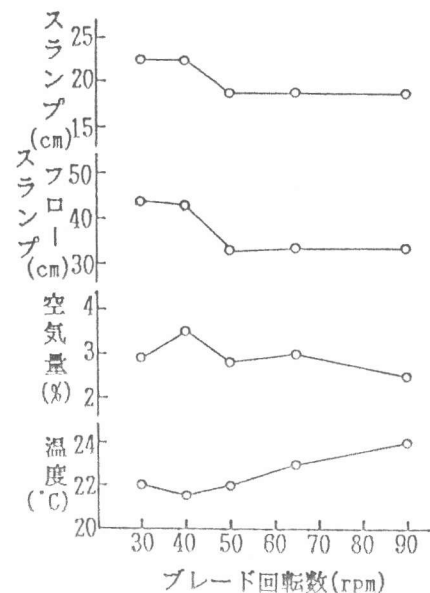


図-5 ブレード回転数によるフレッシュコンクリートの性状

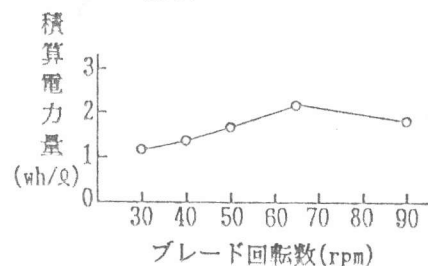


図-6 ブレード回転数によるミキサの積算電力量

空気量は高回転数になるにつれてわずかに減少し、温度は高くなる傾向が見られた。高回転数になるほど、骨材間の摩擦による熱がより多く発生するために温度が上昇したと思われる。

ブレード回転数によるミキサの積算電力量を図-6に示す。これより、回転数が増すごとに積算電力量が増加し、65rpmの場合に最高値となり、90rpmでは幾分減少した。

(2) 硬化コンクリートの性状

ブレード回転数による硬化コンクリートの性状を図-7に示す。単位体積重量を見ると、材令7日、28日ともに30および40rpmの場合に $0.02 \sim 0.05 \text{ g/cm}^3$ 低下した。

圧縮強度は、単位体積重量と同じような傾向が見られた。すなわち、30および40rpmの場合に圧縮強度が低く、それよりも高回転数ではほとんど変化がなかった。この原因として、ブレード回転数が低い場合、空気量が多めになる傾向があること、さらに、セメント粒子の分散が不十分で、水との接触が部分的であるために水酸化カルシウムの生成量が少なくなり、シリカフュームとの反応による粗骨材界面におけるケイ酸カルシウムの生長が少なくなったためと推測される。

また、ブレード回転数による細孔径分布を図-8に示す。これによれば、ブレード回転数が高くなるほど細孔容積が少なくなる傾向があり、ブレード回転数による細孔径の違いは、 $0.005 \sim 5 \mu\text{m}$ で見られた。

3.3 練り混ぜ時間による影響

3.3.1 モルタルとコンクリートの練り混ぜ時間

M2法の練り混ぜ方法で、全練り混ぜ時間を5分とした時の、粗骨材投入前後の練り混ぜ時間を変化させた場合のコンクリートの特性に与える影響について検討を行った。

(1) フレッシュコンクリートの性状

粗骨材投入前後の練り混ぜ時間を変化させた時のコンシステンシーを図-9に示す。スランプ、スランプフローは、モルタルとしての練り混ぜ時間が長くなるにつれて大きくなる傾向が見られた。コンクリートのコンシステンシーは、モルタルの性状に大きく影響されることから、モルタルの練り混ぜが十分なコンクリートほど、スランプ、スランプフローが良くなると考えられる。空気量および温度については、特に傾向は見られなかった。

モルタル粘度を図-10に示す。同図より、スランプ、ス

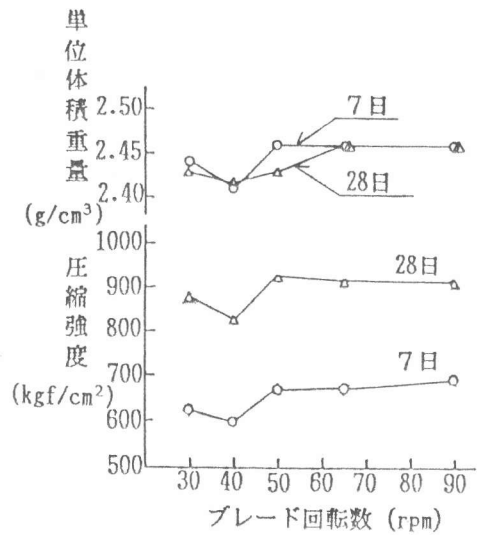


図-7 ブレード回転数による硬化コンクリートの性状

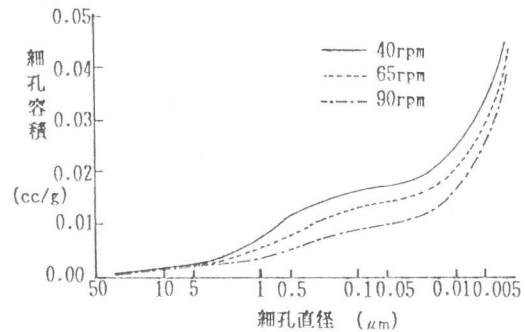


図-8 ブレード回転数と細孔径分布との関係

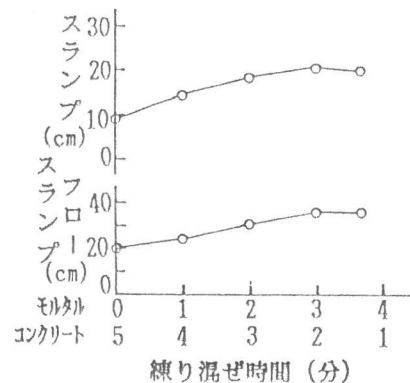


図-9 練り混ぜ時間によるコンシステンシー

ランプフローと同様にモルタルとしての練り混ぜ時間が長くなるにつれて降伏値、塑性粘度は小さくなった。一方、これまでの試験から得られた降伏値とスランプの関係を図-11に示すが、 $\gamma=0.827$ の良い相関関係が見られた。したがって、モルタルの降伏値を測定することによって、スランプを推定することができると考えられる。

(2) 硬化コンクリートの性状

図-12に圧縮強度を示す。同じ練り混ぜ時間の場合、コンクリートとしての練り混ぜ時間が4分のとき、最も高強度となったが、一般的には、コンクリートとしての練り混ぜ時間が長くなるにつれて高強度になる傾向が見られた。これは、コンクリートとしての練り混ぜ時間がある程度長くなるとモルタルと粗骨材との付着がより強化され、骨材界面からの破壊が少なくなるためと考えられる。

3.3.2 空練り時間の影響

コンクリートのコンシステンシーを改善する方法として、空練りは効果があることが分かった。そこで、空練り時間の影響を検討するため、M2法により、モルタルの練り混ぜ時間4分*2/5（1分36秒）、コンクリートの練り混ぜ時間4分*3/5（2分24秒）の合計4分間とし、空練り時間を60、30、15、0秒の4種類について試験した。なお、モルタルおよびコンクリートとしての練り混ぜ時間の比率は、コンシステンシーおよび強度の両者を満足する値として、図-9および図-12から2:3とした。

(1) フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの性状を図-13に示す。これより、スランプ、スランプフローについては、空練り時間の長さにかかわらず、空練りを行うことによってスランプ3cm、スランプフロー19cm程度増加した。空気量は、空練りを行った場合に1~1.3%増加しており、空気量の増加がコンシステンシーに影響を及ぼす1つの原因と思われる。

また、モルタルの降伏値は、空練りを行わなかった場合に最も大きく、スランプの結果と一致した。塑性粘度に関しては、空練りの影響はほとんどなかった。

(2) 硬化コンクリートの性状

空練り時間の差による圧縮強度を図-14に示す。これによれば、空練りを行わない場合、あるいは空練り時間がごく短い場合に高強度となり、それ以上の空練り時間では大差はなかった。

以上の結果から、コンシステンシーと圧縮強度を満足させるためには、空練りの時間を必要最低限（本試験の場合、約10~15秒）にすれば良いと考えられる。

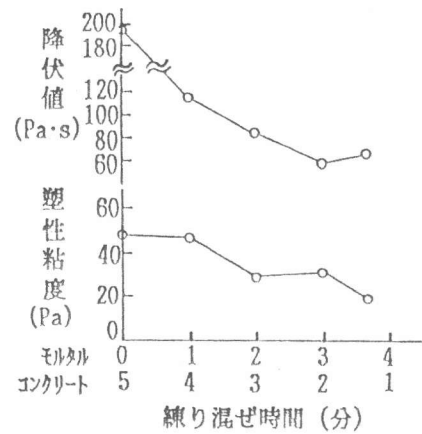


図-10 練り混ぜ時間によるモルタル粘度

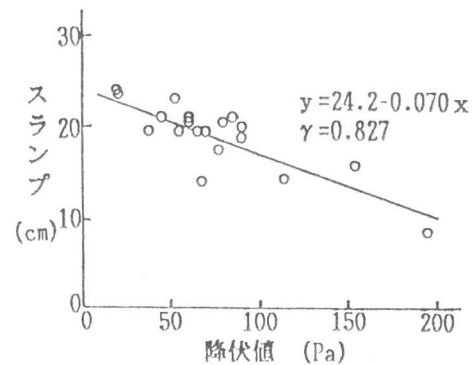


図-11 降伏値とスランプの関係

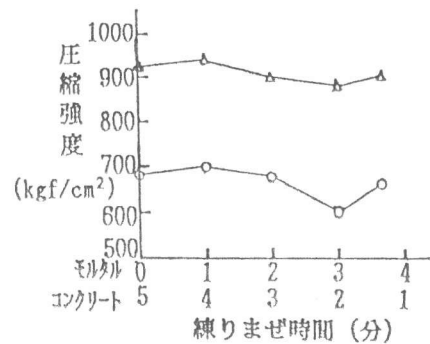


図-12 練り混ぜ時間による圧縮強度

3.4 ミキサの積算電力量とコンクリートの品質との関係

これまでの実験結果から、積算電力量とコンクリートの品質との関係について検討を行った。

ミキサの積算電力とスランプとの関係は、積算電力量が大きくなるとスランプが小さくなる傾向があり、相関係数は $\gamma=0.436$ である。特に、コンクリートとしての練り混ぜに要する積算電力量との相関性が良く、 $\gamma=0.834$ であった。

積算電力量と圧縮強度との関係は、積算電力量が増加するにしたがい、圧縮強度が増加する傾向が見られた。

4. まとめ

高強度コンクリートの練り混ぜ方法について検討を行った結果、以下のことが明らかとなった。

①材料投入順序としては、コンシステンシー面からは減水剤の分割添加や空練りが効果的であったのに対し、強度面からは材料一括投入した場合に最も高強度が得られ、両者は相反する結果となった。

②ミキサのブレード回転数としては、コンシステンシー面からは低回転数の方が良く、強度面からは逆に高回転数の方が良好な結果となった。

③モルタルとコンクリートの練り混ぜ時間において、モルタルとしての練り混ぜによってコンシステンシーは改善され、コンクリートとしての練り混ぜによって強度が増加する。したがって、モルタルとコンクリートの練り混ぜ時間の割合について適切な時間を設定する必要がある。

④空練りは、コンシステンシーの改善に効果的である。しかし、あまり長時間の空練りは必要ではなく、本試験における必要最低限の空練り時間は約10～15秒である。

⑤スランプの小さいコンクリートは、ミキサの積算電力量が増加し、圧縮強度は向上する傾向が見られた。

⑥本研究結果から本実験で使用したミキサにおいては、コンシステンシーおよび強度に対して推奨すべき練り混ぜ方法は、空練り 10～15秒、モルタル練り混ぜ 1～2分、コンクリート練り混ぜ 3分である。

参考文献

- [1] 鈴江重俊ほか：高性能減水剤のセメントへの吸着挙動、セメント技術年報35、pp.202-205、1981
- [2] 名和豊春ほか：高性能減水剤を添加したモルタルの流動性に及ぼす混練条件の影響、コンクリート工学年次論文報告集12-1、pp.285-290、1990。6

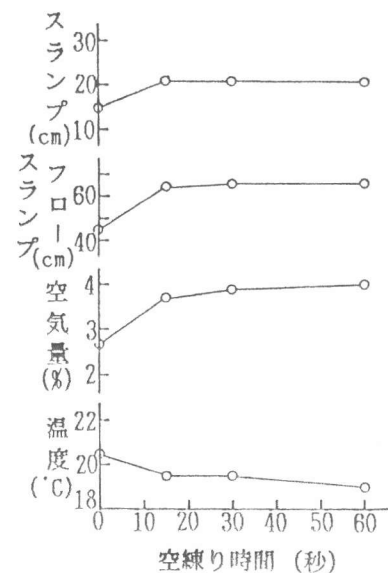


図-13 空練り時間によるフレッシュコンクリートの性状

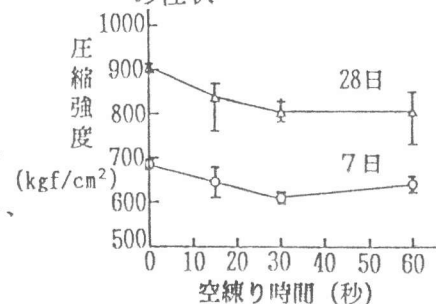


図-14 空練り時間による圧縮強度