

水を分割添加するコンクリートの
練混ぜ技術に関する研究

早川 光敬

水を分割添加するコンクリートの
練混ぜ技術に関する研究

早川光敬

水を分割添加するコンクリートの 練混ぜ技術に関する研究

概要

1970年代前半までは、コンクリートを製造する時に、材料のミキサへの投入順序を変えても、各材料が均一になるように混ぜられていれば、コンクリートの性質は基本的には変化しないものと考えられていた。これに対し、表面水をもった細骨材とセメントを練り混ぜた後、表面水分を補正した投入水を加えて再度練り混ぜて製造したモルタルの流動性やブリーディングなどの性質が、もとの細骨材の表面水の大きさによって変化することを見いだした。このことは、最終的に構成する材料の比率が同じでも、製造方法により、できたものの性質が変わってくることを示している。この製造方法は表面水に相当する水を1回目の水、残りの投入水を2回目の水として、水の添加を2回に分けた練混ぜ方法といえる。このように水の添加を二回に分けた練混ぜ方法を分割練混ぜと呼ぶことにした。

分割練混ぜでコンクリートを製造する際、一次と二次の投入水の割合により、製造されたコンクリートのブリーディングや圧縮強度が変化する。そして一次と二次の水の比率を適切に選べるとコンクリートの圧縮強度が高くなる。この分割練混ぜ効果を発見した当時、圧縮強度が増加するのは、骨材が水セメント比の小さなセメントペーストと一旦練混ぜられることで、骨材とマトリックスであるセメントペーストの付着が改善されるためと考えていた。これがSECモデルの考え方である。しかし、骨材とマトリックスの付着が改善されることを確認した研究はない。

本研究は分割練混ぜで圧縮強度が増大する機構を検討し、圧縮強度の増大効果が得られる条件をあきらかにすることを目的に行った。特に、分割練混ぜで製造したコンクリートの骨材とマトリックスの界面に着目し、骨材周辺のマトリックスの組織の違い、骨材とマトリックスの付着性状をあきらかにしようとした。さらにこのことから圧縮強度の増大効果が得られる条件をあきらかにし、品質改善効果の大きい分割練混ぜ方法を確立して、建設工事で用いられるコンクリートの品質を高めることを目指して研究を行うことにした。

はじめにセメントペーストにおける分割練混ぜの特性を検討した。セメントと投入水の一部分を練り混ぜ、これに残りの投入水を加えて再度練り混ぜてセメントペーストを製造する実験を行い、分割練混ぜの効果に与える一次の水セメント比、一次練混ぜ時間、混和剤の添加方法、セメントの種類の影響を明らかにした。その主なことは、普通ポルトランドセメントを用いた時はブリーディングを最小にする一次の水セメント比が24%程度であること、一次練混ぜ時間を長くするとブリーディング低減効果も大きくなること、AE減水剤および高性能減水剤は添加時期が遅いと流動性が大きくなり、ブリーディングも増えること、混合セメントより普通ポルトランドセメントのほうが分割練混ぜ効果が大きいことなどである。

次にモルタルおよびコンクリートにおける分割練混ぜの特性を検討した。骨材の投入時期を変えた実験を行い、一次練混ぜ前に骨材を投入する方法によるものは、一次練混ぜ終了後に骨材を投入する場合に比べて、圧縮強度が高くなることを明らかにした。

つづいて、分割練混ぜによりコンクリートの圧縮強度が増加する原因を説明するモデルとして、SECモデルとGEMモデルをとりあげ、検討した。GEMモデルは田沢らによって提唱されたモデルで、強度増加の原因を分割練混ぜによるブリーディングの減少で骨材下面の欠陥が減少するためというモデルであり、これを裏付ける実験結果も公表されている。しかしながら、骨材の投入順序による強度の差を説明するのに適したモデルとはなっていない。SECモデルは先に述べたように、一次練混ぜによる骨材とマトリックスの付着性状の改善により強度増加がもたらされるというものであり、この骨材の投入順序による効果の差をよく説明できる。しかし、粗骨材が一次練混ぜ時から存在する分割練混ぜ方法により、骨材とマトリックスの付着性状が改善されることを示す直接的なデータがこれまでに得られているわけでない。このため実際の骨材界面の組織と付着性状について検討していくことにした。

はじめに文献調査により、骨材とマトリックスの付着性状および骨材周辺のマトリックスの組織はコンクリートの圧縮強度に明確に影響を与えることを示した。ついで岩石とセメントペーストによる試験体でX線回折法による分析および押し抜き付着試験を行なった。X線回折法による分析では、岩石の表面をあらかじめ水セメント比の小さいセメントペーストにまぶした場合、通常の場合に比べて岩石付近のセメントペーストの水酸化カルシウムの結晶の配向度が小さくなり、配向度が最大を示す位置が岩石に近くなることを明らかにした。配向度が小さいということは、結晶の方向が一定でなく、欠陥となりにくいことを示していると考えられ、あらかじめ水セメント比の小さいセメントペーストにまぶした場合岩石近くの組織が改善されているものといえる。セメントペースト中に打ち込んだ岩石の押し抜き試験では、岩石の表面をあ

らかじめ水セメント比の小さいセメントペーストにまぶした場合、通常の場合に比べて押し抜き付着強度が大きくなることを示した。この傾向は、水セメント比が大きいほど、また岩石表面が平滑なものより粗な場合の方が明瞭であった。このようなことから、本論文では、実際に分割練混ぜでコンクリートの圧縮強度が増加するのは、分割練混ぜによるブリーディングの減少による骨材下面の欠陥の減少と、一次練混ぜによる骨材とマトリックスの付着性状の改善の両者の効果とするのが妥当であるとした。

つづいて、品質改善効果の大きい分割練混ぜ方法を確立するために、改善効果が大きくなる条件を検討した。一次練混ぜを骨材を含めて行なう分割練混ぜでモルタルを製造する場合、セメント種類、骨材の表面水率、一次水と骨材をあらかじめ練り混ぜる方法、骨材の粒度、骨材中の微粒分量、および混和剤が与える影響を調査した。その結果、一次練混ぜを骨材を含めて行なう分割練混ぜでモルタルの製造する場合、結合材として普通ポルトランドセメントを用いた場合にブリーディングの減少効果が最も大きく、ついでフライアッシュ、中庸熱、高炉の順に小さくなることがわかった。またセメントに対する細骨材の比率が大きくなるとブリーディングを最小にする一次の水セメント比は大きくなる。この大きくなる割合は、砂セメント比の2倍の数値程度である（例えばブリーディングを最小にする一次の水セメント比が24%の時に $[24 + 2 \times (S/C)]\%$ となる）ことを示した。また、細骨材の粒度が小さくなるとブリーディングを最小にする一次の水セメント比が大きくなること、細骨材の微粒分量が大きくなるとブリーディングを最小にする一次の水セメント比が大きくなることなどがあきらかになった。

さらに、これまでの検討結果をふまえ、品質の安定化および改善効果の大きいコンクリートの分割練混ぜ方法を提示した。これは、一次練混ぜは骨材を含めて行なうこと、また一次の水セメント比はセメントペーストの分割練混ぜでブリーディングを最小にする一次の水セメント比（普通ポルトランドセメントの場合24%程度）を基準に、これを骨材量および粒度に応じた量（[砂セメント比の2倍の数値]%程度）大きくする方法である。

提案した品質改善効果の大きい練混ぜ方法の応用例として鋼繊維補強コンクリートについて検討を行なった。モルタルと鋼繊維の付着試験を行い、鋼繊維をあらかじめ水セメント比の小さいセメントペーストにまぶすことで、付着強度が大きくなることを示した。この試験では、モルタルを分割練混ぜで製造した方が、従来法によるものより付着強度が大きくなった。ただし、付着強度の大きくなる割合については、モルタルの練混ぜ方法より、鋼繊維をセメントペーストにまぶす処理の有無の影響の方が大きかった。鋼繊維補強コンクリートの製造試験では、分割練混ぜ方法を用いると、曲げ強度、曲げタフネスが大きくなることをあきらかにした。さらに、分割練混ぜ方

法でも、鋼繊維を一次練混ぜから入れたものは、二次練混ぜ以降に入れたものに比べ、曲げ強度、曲げタフネスが大きくなることを示した。一次練混ぜ時に鋼繊維が存在する分割練混ぜでコンクリートを製造した場合、従来法で製造したものに比べ、材齢4週で、曲げ強度は鋼繊維の混入量1.0%の時7%、2.0%の時20%増加した。また曲げタフネスは混入量1.0%の時7%、2.0%の時22%、せん断強度は混入量1.0%の時15%、2.0%の時5%増加した。このことから提案した練混ぜ方法は鋼繊維補強コンクリートの品質改善に効果があることがわかる。

最後に提案した練混ぜ方法を建設工事に適用し、その効果を検証した。地上3階、地下1階、延べ床面積2,633m²の事務所ビルの建設に提案した分割練混ぜ方法によるコンクリートを用いた。コンクリートの全打設量は2,510m³で、このうち1,900m³を分割練混ぜ方法によるコンクリートを用い、残りの610m³は従来法で製造したコンクリートを打ち込んだ。その結果、分割練混ぜによるコンクリートは従来法によるものと比べて圧縮強度で16%増大し、ブリーディングは44%減少した。この他、ホテルの建設工事への適用例も示し、実際の工事に提案した分割練混ぜ方法を採用することで、コンクリートの品質を改善できることを示した。

目次：

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	
1.2 研究の目的	
1.3 本論文で用いた用語と記号	
1.3.1 用語	
1.3.2 記号	
1.4 本論文の構成	
第2章 本研究に至る経緯	9
2.1 本章の概要	
2.2 プレパックドコンクリート用モルタルの研究	
2.2.1 概要	
2.2.2 モルタルの流動性・充てん性の評価方法	
2.2.3 細骨材の表面水率がモルタルの流動性・分離性状に与える影響	
2.2.4 まとめ	
2.3 SECコンクリートの研究	
2.3.1 概要	
2.3.2 SECモルタル・コンクリート	
2.3.3 SEC法がコンクリートのスランプ・ブリーディングに与える影響	
2.3.4 SEC法がコンクリートの強度に与える影響	
2.3.5 まとめ	
2.4 SEC法に関連する既往の研究	
2.4.1 概要	
2.4.2 剣持らによる研究	
2.4.3 魚本らによる研究	
2.4.4 まとめ	
2.5 セメントペーストにおける分割練混ぜ効果の発見	
2.6 検討すべき課題	
第3章 セメントペーストにおける分割練混ぜ方法	28
3.1 本章の概要	
3.2 分割練混ぜ方法の效果に影響する要因	
3.2.1 概要	
3.2.2 一次の水セメント比	
3.2.3 一次練混ぜ時間の影響	
3.2.4 混和剤の添加方法の影響	
3.2.5 セメントの種類の影響	
3.2.6 文献調査	
3.2.7 まとめ	
3.3 分割練混ぜ効果が生じる機構	
3.3.1 概要	
3.3.2 ブリーディングが減少する機構に関する研究	
3.3.3 SEC法との関係	
3.3.4 まとめ	
3.4 セメントペーストにおける分割練混ぜ方法のまとめ	

第4章	モルタル・コンクリートにおける分割練混ぜ方法	49
4.1	本章の概要	
4.2	骨材の投入時期の検討	
4.2.1	概要	
4.2.2	コンクリートによる実験1	
4.2.3	コンクリートによる実験2	
4.2.4	まとめ	
4.3	SECモデルとGEMモデル	
4.3.1	概要	
4.3.2	SECモデル	
4.3.3	GEMモデル	
4.4	圧縮強度が増加するメカニズムの検討	
4.5	まとめ	
第5章	分割練混ぜによりコンクリートの圧縮強度が増加する機構	60
5.1	本章の概要	
5.2	文献調査	
5.2.1	コンクリート中の骨材界面の状態	
5.2.2	界面の性状とコンクリートの品質	
5.3	分割練混ぜによるコンクリート中の骨材界面	
5.3.1	概要	
5.3.2	直接引張試験およびX線回折法による分析	
5.3.3	骨材の押し抜き付着試験	
5.3.4	コンクリート中の骨材界面のX線回折法による分析	
5.3.5	改善効果のまとめ	
5.4	まとめ	
第6章	品質改善効果の大きい分割練混ぜ方法	82
6.1	本章の概要	
6.2	一次練混ぜ時に骨材が存在する分割練混ぜ効果に影響を及ぼす要因	
6.2.1	概要	
6.2.2	セメントの種類の影響	
6.2.3	細骨材の表面水率の影響	
6.2.4	一次水による含水調整の影響	
6.2.5	細骨材の粒度の影響	
6.2.6	細骨材中の微粒分の影響	
6.2.7	混和剤の影響	
6.2.8	まとめ	
6.3	品質改善効果の大きい分割練混ぜ方法の検討	
6.4	まとめ	

第7章	分割練混ぜによる界面改善効果の鋼繊維補強コンクリートへの利用	-----123
7.1	本章の概要	
7.2	鋼繊維とマトリックスの付着の改善	
7.2.1	実験の概要	
7.2.2	モルタルと鋼繊維の付着試験	
7.3	分割練混ぜにおける鋼繊維の投入時期の影響	
7.3.1	実験の概要	
7.3.2	投入時期の影響	
7.4	一次練混ぜ時に鋼繊維が存在する分割練混ぜによる鋼繊維補強コンクリート	
7.4.1	実験の概要	
7.4.2	分割練混ぜによる鋼繊維補強コンクリートの性質	
7.5	まとめ	
第8章	品質改善効果の大きい分割練混ぜ方法の建設工事への適用	-----137
8.1	本章の概要	
8.2	発電所内建屋の建設工事	
8.2.1	工事概要	
8.2.2	事前の検討	
8.2.3	コンクリート工事	
8.2.4	まとめ	
8.3	寒冷地に建つホテルの建設工事	
8.3.1	工事概要	
8.3.2	コンクリート工事	
8.4	まとめ	
第9章	結論	-----148

第1章 序論

1. 1 研究の背景

コンクリートは鉄鋼とともに建設における構造体を形作るための重要な材料の一つであり、セメント、骨材、水などの構成材料を計量、練り混ぜることにより製造される。現在、建設工事に使われるコンクリートは、多くの場合レディーミクストコンクリート工場においてミキサの中で練り混ぜ、製造されている。コンクリートを構成する材料をミキサに投入する順序については、全材料を同時に投入する方法や、いくつかの材料を時間をずらして投入する方法などがあり、非常に多くの方法が考えられる。一般に材料のミキサへの投入順序は、用いるミキサの特性を考慮し、もっとも効率良く、構成材料を均一にできる順序が選ばれている。呼び強度 24、スランプ 18cm 程度の一般建築用コンクリートを製造する時には全材料をほぼ同時に投入する方法が選ばれることが多く、練混ぜ負荷の大きい高強度コンクリートを製造する時には、あらかじめモルタルを練り混ぜてから、粗骨材を投入する方法が多く行われている。

1970年代の後半までは、材料のミキサへの投入順序を変えても、各材料が均一になるように混ぜられていれば、コンクリートの性質は基本的には変化しないものと考えられていた。筆者らは、大成建設(株)技術研究所において、リブエンジニアリング(株)、(社)日本鉄道建設公団とともに充てん用モルタルの研究を行い、1978年に表面水をもった細骨材とセメントを練り混ぜた後、表面水分を補正した投入水を加えて再度練り混ぜることにより製造したモルタルの性質が、もとの細骨材の表面水の大きさによって変化することを見だし、建築学会で発表した¹⁾。またこのことは同時に(社)日本鉄道建設公団の原島ら(1978)²⁾により土木学会で発表された。この練混ぜ方法は表面水に相当する水を一回目の水、残りの投入水を二回目の水として、水の添加を二回に分けた練混ぜ方法ともいえる。このように水の添加が二回に分けられた練混ぜ方法を分割練混ぜ方法とよぶことにする。

その後、モルタルやコンクリートにおける分割練混ぜの体系的な検討を行い、水の分割割合によりブリーディングや圧縮強度が変化することがわかってきた。さらに適切な水の分割割合を選ぶことにより、通常の練混ぜ方法で製造した同一調合のコンクリートに比べて、ブリーディングが少なく、圧縮強度が大きいコンクリートを製造できることもわかった。また、骨材の表面水量を調整することに

より、モルタルやコンクリートの品質変動を小さくできることもあきらかにした3)。

このように、分割練混ぜ方法にはコンクリートの品質を大幅に改善する可能性がある。このため分割練混ぜにより、ブリーディングが減少したり、圧縮強度が増加する条件および機構をあきらかにすることは、効果の大きい練混ぜ方法を確立するために重要である。

分割練混ぜ効果を発見した当時、圧縮強度が増加する理由として、一次練混ぜでできた水セメント比の低いセメントペーストが、二次練混ぜ後も骨材のまわりに残り、骨材とマトリックスの付着がよくなるためと考えていた。しかし、実際に骨材とマトリックスの界面がどのようになっているか、また付着がよくなっているかを確認した研究はこれまでに行われていない。

また、1981年に筆者ら4)5)、および田沢ら(1982)6)によって、骨材の存在しないセメントペーストにおいても、分割練混ぜによりブリーディングが変化することが見いだされた。圧縮強度が骨材とマトリックスの付着の改善によるとする説明は、このセメントペーストにおいて分割練混ぜによりブリーディングが変化する現象を考慮していない。

このように、分割練混ぜにより、ブリーディングが減少したり、圧縮強度が増加する条件および機構の解明には不十分なところが残されている。特に圧縮強度が増加する機構があきらかにできれば、圧縮強度の増大効果の大きい練混ぜ方法も確立できることになる。

1. 2 研究の目的

水の添加を二回に分けた分割練混ぜ方法によりコンクリートを製造する場合、水の添加割合を適切に選ぶことにより、圧縮強度の増大、ブリーディングの減少など、コンクリートの品質を大幅に改善できる可能性がある。本研究の目的はコンクリートにおいて、分割練混ぜにより圧縮強度が増大する機構を検討し、圧縮強度の増大効果が得られる条件をあきらかにすることである。特に分割練混ぜで製造したコンクリートの骨材とマトリックスの界面に着目し、X線回折法を用いた分析による骨材周辺のマトリックスの組織の違い、押し抜き試験による骨材とマトリックスの付着強度性状をあきらかにすることを目指した。圧縮強度の増大効果が得られる条件をあきらかにすることで、増大効果の大きい分割練混ぜ方法を確立することができる。品質改善効果の大きい分割練混ぜ方法を確立し、建設工事で用いられるコンクリートの品質を高めることが本研究のねらいである。

1. 3 本論文で用いた用語と記号

1. 3. 1 用語

本論文では分割練混ぜに関する用語を以下のように定義して用いた。

(1) 分割練混ぜ(方法)：セメントペースト、モルタルおよびコンクリートを製造する際に、水の添加を二回に分けた練混ぜ(方法)。ダブルミキシング、およびDMと称されることもあるが、本論文では「分割練混ぜ」を用いる。

(2) 一次練混ぜ：分割練混ぜにおいて、一回目の水が投入された後、二回目の水が投入される前に行われる練混ぜ。

(3) 二次練混ぜ：分割練混ぜにおいて、二回目の水が投入された後に行われる練混ぜ。

(4) 一次投入水：分割練混ぜにおいて、一次練混ぜのためにミキサに投入される水。

(5) 一次水：分割練混ぜにおいて、一次練混ぜ時にミキサ内に存在する有効水。すなわち一次練混ぜ時に存在する骨材の表面水と、一次投入水の合計。

(6) 二次投入水：分割練混ぜにおいて、一次練混ぜ終了後に投入される水。

(7) 二次水：分割練混ぜにおいて、一次練混ぜ終了後に投入される有効水。二次投入水と一次練混ぜ終了後に投入される骨材の表面水の和。

(8) 一次の水セメント比：一次練混ぜにおける、一次水のセメント質量に対する比率。

(9) SECモルタル・コンクリート：骨材の表面水率を調整してセメントと練り混ぜ、さらに残りの水を加えて練り混ぜることにより製造されるモルタル・コンクリートのことである。このモルタル・コンクリートでは骨材の回りが水セメント比の適当に小さいキャピラリー状態のセメントペーストの皮殻で包まれた状態になっていると考えている³⁾。本論文では、一次の水セメント比が15~35%程度で、一次練混ぜ時に骨材が存在する分割練混ぜにより製造したモルタル・コンクリートを示すものとする。

(10) SEC法：一次の水セメント比が15~35%程度で、一次練混ぜ時に骨材が存在する分割練混ぜ方法。

(11) SECモデル：SEC法の効果を説明するためのモデルで、モルタルまたはコンクリート中の骨材が、水セメント比の小さいセメントペーストの皮殻で包まれた状態になっているというもの。詳細は4.3.2参照。

(12) GEMモデル：分割練混ぜによりコンクリートの強度が増大する効果を説明するために田沢ら(1989)7)によって提唱されたモデルで、分割練混ぜによ

るブリーディングの減少により、コンクリート中の粗骨材下部に発生する欠陥の寸法が小さくなるために強度が増進するというもの。詳細は4.3.3参照。

1. 3. 2 記号

本論文で用いた主な記号は以下のとおりである。

(1) セメント:	C
(2) 細骨材:	S
(3) 粗骨材:	G
(4) 有効水:	W
(5) 投入水:	w
(6) 一次水:	W1
(7) 一次投入水:	w1
(8) 二次投入水:	w2
(9) 一次の水セメント比	W1/C
(10) 混和剤:	Ad
(11) 練混ぜ:	Mix

1. 4 本論文の構成

第2章では分割練混ぜ方法の発見の経緯と、分割練混ぜの効果の例を示した。モルタルを製造する場合、セメントと骨材を空練りしてから水を加えてさらに練り混ぜる方法によると、使用する骨材の表面水率によってまだ固まらないモルタルの性質が変化することがわかった。この現象を利用した練混ぜ方法として、練混ぜ水の一部（一次投入水）を投入することにより骨材の表面水率を調整してセメントと空練りし、さらに残りの水（二次投入水）を加えてコンクリートを製造する方法を提案・検討した。この製造方法の効果を実験によりあきらかにし、分割練混ぜがコンクリートの性質を大幅に改善する可能性を示した。さらにセメントペーストにおいても分割練混ぜ効果がみられることをあきらかにした。このようなことから、分割練混ぜはコンクリートの品質改善をもたらすことが期待できる方法であり、一般のコンクリートの製造に適切に利用できるようにすることが重要であると考えた。そこで分割練混ぜによる品質改善効果が得られる条件をあきらかにし、品質改善効果の大きい練混ぜ方法を確立することを目的に研究を進めることにした。なお、この章は1982年以前に著者が係わった研究を取り扱っている。また、本研究に関係する1982年以前の文献を調査、整理した。1982年以後

の文献については、第3章以降の関係する章において紹介、検討を行っている。

第3章では分割練混ぜによる品質改善効果が得られる条件をあきらかにするため、水とセメントの系（セメントペースト）における分割練混ぜの特性を検討した。一次水とセメントを練り混ぜ（一次練混ぜ）、これに二次水を加えて再度練り混ぜ（二次練混ぜ）セメントペーストを製造する実験を行ない、分割練混ぜ方法の効果に与える一次の水セメント比、一次練混ぜ時間、混和剤の添加方法、セメント種類の影響などを調査し、分割練混ぜの特性をあきらかにした。これらの結果をもとに、次章以降の骨材を含めた検討結果を加えて、品質改善効果の大きいコンクリートの練混ぜ方法を確立することとした。

第4章では水とセメントと骨材の系（モルタル・コンクリート）における分割練混ぜの特性を検討した。はじめに一次水、セメントおよび骨材により一次練混ぜを行ない、これに二次水を加えて二次練混ぜを行ないコンクリートを製造する場合と、一次練混ぜは一次水とセメントで行ない、骨材は一次練混ぜ終了後に投入する場合を比較検討した。その結果、一次練混ぜを骨材を含めて行なう方法が圧縮強度の増大により大きな効果があることをあきらかにした。

つづいて、分割練混ぜによりコンクリートの圧縮強度が増加する原因を説明するモデルとして、SECモデルとGEMモデルをとりあげ、検討した。

GEMモデルは強度増加の原因を分割練混ぜによるブリーディングの減少による骨材下面の欠陥の減少によるものと説明するモデルであり、モデルの正しさは実験などで検証されている。しかしながら、先に示した粗骨材の投入順序による強度の差を説明するのに適したモデルとはなっていない。

SECモデルは著者らが提唱したモデルで3) 8)、モルタルまたはコンクリート中の骨材が図-1-4-1のように、水セメント比の小さいセメントペーストの皮殻で包まれた状態になっているというものである。このモデルは一次練混ぜによる骨材とマトリックスの付着性状の改善により強度増加がもたらされるというものであり、この粗骨材の投入順序による効果の差をよく説明できる。しかし、粗骨材が一次練混ぜ時から存在する分割練混ぜ方法により、骨材が水セメント比の小さいセメントペーストの皮殻で包まれた状態になっていること、および骨材とマトリックスの付着性状が改善されることを示す直接的なデータがこれまでに得られているわけではない。このためSECモデルについては、さらに骨材とマトリックスの付着性状を調査し、実際に性状改善されているかどうかを確認することとした。

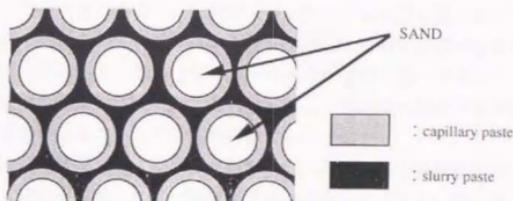


図-1-4-1 SECコンクリートのモデル 3)

第5章では、分割練混ぜで一次練混ぜを骨材を含めて行なう方法によるとコンクリートの圧縮強度が高くなる理由として、骨材が一次練混ぜ時に水セメント比の小さいセメントペーストにまぶされることにより硬化後の骨材界面である遷移帯の組織が改善されるためというSECモデルをもとにした仮説を検証した。SECモデルでは、骨材が水セメント比の小さいセメントペーストの皮殻でおおわれているとしているが、ここでは皮殻が形成されているかどうかは問わずに、骨材周辺の組織が通常の場合と変わっているのか、またそのために骨材とマトリックスの付着が改善されているのか、について検討した。岩石とセメントペーストによる試験体でX線回折法による分析および押し抜き付着試験を行ない、骨材と水セメント比の小さいセメントペーストの練混ぜである一次練混ぜにより、骨材とセメントペーストの界面である遷移帯の組織が強固になり、界面の押し抜き付着力が大きくなることを確認した。このことは先の仮説も強度増加の原因を説明するのに有効であることを裏付けているものといえる。このようなことから、実際に分割練混ぜでコンクリートの圧縮強度が増加するのは、分割練混ぜによるブリーディングの減少による骨材下面の欠陥の減少と、一次練混ぜを骨材を含めて行うことによる遷移帯組織の改善の両者の効果とするのが妥当であることを示した。

第6章では、品質改善効果の大きい分割練混ぜ方法を確立するために、品質が安定し、改善効果が大きくなる条件を検討した。一次練混ぜを骨材を含めて行なう分割練混ぜでモルタルを製造する場合、セメント種類、骨材の表面水率、一次水と骨材をあらかじめ練り混ぜる方法、骨材の粒度、骨材中の微粒分量、および混和剤が与える影響を調査した。これらの実験から、上記の条件が変化した場合に、ブリーディングを最小にする一次の水セメント比が、どのように変化するかを明らかにした。

さらに、これまでの検討結果をふまえ、品質の安定化および改善効果の大きいコンクリートの分割練混ぜ方法を提示した。これは、一次練混ぜは骨材を含めて

行なうこと、また一次の水セメント比はセメントペーストの分割練混ぜでブリーディングを最小にする一次の水セメント比を基準に、骨材の品質や量を考慮して決定すべきことである。このように、一次練混ぜを骨材を含めて行なう分割練混ぜによる界面改善効果を検証したこと、さらにこの界面改善効果を有効利用した練混ぜ方法を提案したことが本論文の特徴である。

第7章では分割練混ぜによる界面改善効果の応用例として鋼繊維補強コンクリートについて検討を行なった。一次練混ぜを一次水、セメント、骨材および鋼繊維で行なう分割練混ぜによって、曲げタフネスが改善されることを確かめ、骨材と同様に繊維とマトリックスの間にも界面改善効果があることをあきらかにした。

第8章では提案した練混ぜ方法を実際の建設工事に用いるために行った検討と、実際の工事で使用した状況を示し、建設工事において効果が得られることをあきらかにした。

第9章は全体のまとめである。

参考文献

- 1) 山本康弘、加賀秀治、黒羽健嗣、早川光敬、伊東靖郎、「減圧注入工法によるプレバッキングドコンクリートに関する一連の研究（その3）注入モルタルの流動性に及ぼす諸要因」、日本建築学会大会学術講演梗概集、1978年9月、pp247-248
- 2) 原島龍一、剣持三平、伊東靖郎、「高強度スラリーモルタルの特性について」、土木学会年次学術講演会、V-114、1978年、pp223-224
- 3) 山本康弘、黒羽健嗣、丸嶋紀夫、石井貴和、早川光敬、「S.E.C.コンクリートの基礎理論と物性」、大成建設技術研究所報、第14号、1981年、pp9-19
- 4) Mitsutaka Hayakawa, Yasuro Itoh, "A New Concrete Mixing Method for Improving Bond Mechanism", Bond in Concrete - Proceedings of International Conference on Bond in Concrete, Paisley, Scotland, 1982-6, pp282-288
- 5) 早川光敬、山本康弘、丸嶋紀夫、伊東靖郎、「SECコンクリートの基礎的性状に関する研究」、第4回コンクリート工学年次講演会講演論文集、1982年、pp121-124
- 6) 田沢栄一、松岡康訓、金子誠二、伊東靖郎、「ダブルミキシングで作成したセメントペーストの諸性質について」、第4回コンクリート工学年次講演会講演論文集、1982年、pp125-128

- 7) 田沢栄一、笠井哲郎、岡本修一、「ダブルミキシングで製造したコンクリートの圧縮強度」、土木学会論文集、第408号、1989年8月、pp139-146
- 8) 山本康弘、加賀秀治、黒羽健嗣、早川光敬、伊東靖郎、「S.E.C.コンクリートの研究（特性と強度）」、日本建築学会大会学術講演梗概集、1980年9月、pp57-58

第2章 本研究に至る経緯

2. 1 本章の概要

分割練混ぜ方法の発見の経緯と、分割練混ぜ方法の効果の例を示した。この練混ぜ方法の効果を実験によりあきらかにし、分割練混ぜがコンクリートの品質を安定させるとともに、品質を大幅に改善する可能性を示した。この章は主に1982年以前に筆者が係わった研究を取り扱っている。また、関係する他者の研究で1982年以前のを調査、整理した。

2. 2 プレバッキングコンクリート用モルタルの研究

2. 2. 1 概要

プレバッキングコンクリート工法を利用してコンクリート部材を製造する研究の中で、モルタルのフレッシュ性状を測定する試験方法を提案した。この試験方法を用いた一連の研究により、同一調合のモルタルでも、使用する骨材の表面水率が変ると、そのフレッシュ性状が規則的に変化することをあきらかにした。この研究では、表面水を持った骨材とセメントを練り混ぜた後、表面水分を差し引いた投入水を加えて再度練り混ぜることによりモルタルを製造していた。ここでは、試験方法の概要と、使用する骨材の表面水率がモルタルの流動性やブリーディングに与える影響についての実験例を紹介する 1) 2) 3)。

2. 2. 2 モルタルの流動性・充てん性の評価方法

プレバッキングコンクリート工法は、粗骨材を均一に先詰めしているため、品質が密実で、体積変化の小さいコンクリートが得られる。さらにモルタルの注入を行う時、型枠内を減圧状態にしておけば、空隙を小さくできることが期待される。このようなことから、型枠内に粗骨材を充てんしておき、その空間を減圧状態にしてモルタルを注入し、コンクリート部材を製造する方法である減圧注入工法の研究・開発を進めてきた。

プレバッキングコンクリート工法によりコンクリート部材を製造する場合、充てん方法の確立とともに、充てん性の良いモルタルの製造および品質管理技術の確立が重要である。従来、これらの注入モルタルの品質管理としての流動性の測定は、Pルートからのモルタルの流下時間によっていた。さらに研究室レベルでは、

回転粘度計などから得られる塑性粘度やせん断降伏値も測定されていた。しかしながら、Pロートや回転粘度計から得られるモルタルの特性値から、型枠に詰められた粗骨材の間隙にモルタルを注入するために必要な圧力などを推定することは困難である。このため、実際の注入に類似した状態におけるモルタルの挙動を測定できるように、ガラス球を詰めた円筒部を有する、モルタルの流動性測定装置を考案した(図-2-2-1)。

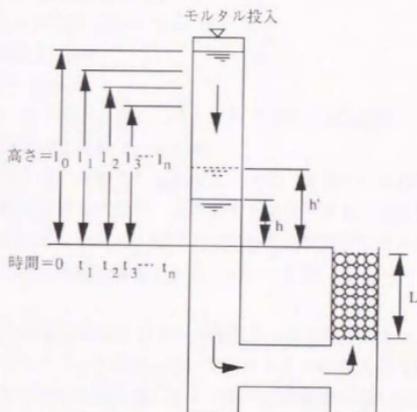


図-2-2-1 モルタルの流動性測定装置 1)

試験方法は、まずモルタル投入口よりモルタルを投入し、抵抗体よりオーバーフローして静止した時の重力差より相対初期せん断応力降伏値(F_0)を求め、次に抵抗体側排出口にフタをして、適当な高さまでモルタルを投入後、フタをとり、モルタル面の低下速度を測定し、速度と圧力の関係から、相対流動粘度係数(λ)を求めるようにした。 F_0 、 λ 値の計算方法は、次式によった。

$$F_0 = \frac{\rho h}{L} \quad (1)$$

$$P_u = \frac{l_0 + l_1}{L} \rho - F_0$$

$$U_f = \frac{l_0 - l_1}{t_1}$$

$$\lambda = \frac{P_u}{U_f} = \frac{\frac{l_0 + l_1}{2} \rho - F_0}{\frac{l_0 - l_1}{t_1}} \quad (2)$$

F₀: 相対初期せん断応力降伏値 (g/cm²)

ρ: 流体の単位容積質量 (g/cm³)

h: 初期モルタル静止高さ (cm)

L: 抵抗体長さ (cm)

P_u: 速度圧 (g/cm²)

U_f: 抵抗のない部分におけるモルタルの速度 (空塔速度) (cm/sec)

λ: 相対流動粘度係数 (g·sec/cm²)

(1) および (2) 式で求められるF₀およびλは、材料のせん断降伏値と塑性粘度だけでなく、抵抗体の形状などにより決まる数値である。減圧注入工法の研究においては、このF₀とλを用い、粗骨材を詰めた円筒型枠にモルタルを注入するために必要な圧力が実用的に算定できることを示した 1)。

2. 2. 3 細骨材の表面水率がモルタルの流動性・分離性状に与える影響

プレバッキングコンクリート工法において、モルタルの注入圧力算定に利用できるF₀ (相対初期せん断応力降伏値) とλ (相対流動粘度係数) が、細骨材の表面水率によってどのように変化するかを調べた。測定は先述の流動性測定装置を用い、抵抗体はφ20mmのガラス球とした。結果の一例を図-2-2-2に示す。

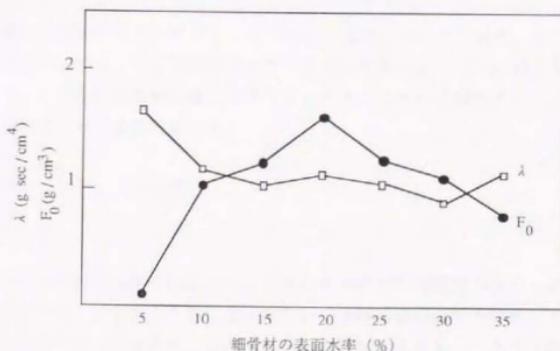


図-2-2-2 細骨材の表面水率とモルタルの流動性の関係 2)

実験に用いた材料は普通ポルトランドセメント（比重3.16）と檜川産の川砂（表乾比重2.57、粗粒率1.45）で、スルホン酸系の減水剤をセメント重量の1%用いた。水セメント比は40%、細骨材とセメントの比率は重量で1:1とし、細骨材の表面水率を5~35%の範囲で5%ごとに変化させた。表面水の調整は、20%までは前もって行い、20%を超える場合はあらかじめ20%に調整しておいた試料をモルタル練混ぜ直前に、ミキサ中において所定の表面水率になるように加水し調整した。練混ぜは30リットル練り自転公転（自転183rpm、公転42rpm）式ミキサを用い、細骨材とセメントを3分間練り混ぜた後、残りの水と減水剤を加えてさらに2分間練り混ぜてモルタルを製造した。図-2-2-2からわかるように、 F_0 （相対初期せん断応力降伏値）は表面水率の増加につれて大きくなり、20%をピークとして再び小さくなっている。 λ （相対流動粘度係数）は表面水率5%の時が最大であり、10%で急激に小さくなり、それ以上はわずかに小さくなる傾向になっている。図には示していないが、ブリーディング率は、表面水率5%の時に極端に大きく発生し、その他の場合は認められなかった。

このように、表面水率の異なる細骨材とセメントを練り混ぜ、残りの水を加えてさらに練り混ぜて製造したモルタルは、最終的に構成する材料であるセメント・細骨材・水の比率はすべて同じであるにもかかわらず、流動性やブリーディングが異なることがあきらかになった。

2. 2. 4 まとめ

プレバックドコンクリート工法を利用してコンクリート部材を製造する研究の中で、注用モルタルの流動性・充てん性を評価する独自の試験方法を提案し、これを用いて各種モルタルのフレッシュ性状を調査した。その結果、モルタルを製造する場合、セメントと骨材を空練りしてから水を加えてさらに練り混ぜる方法によると、使用する骨材の表面水率によってモルタルの流動性やブリーディングなどが変化することがわかった。

2. 3 SECコンクリートの研究

2. 3. 1 概要

使用する骨材の表面水率によって、できたモルタルの流動性やブリーディングなどが変化することがあきらかになったため、骨材の表面水率を調整してから練り混ぜることによりモルタル・コンクリートの品質を改善することを目指した研

究を行った。その結果、練混ぜ水の一部（一次投入水）を投入して骨材と練り混ぜることにより表面水率を調整し、これをセメントと空練りし、さらに残りの水（二次投入水）を加えてモルタル・コンクリートを製造する方法で、一次投入水と骨材の表面水の合計である一次水の量を適切に選ぶことにより、ブリーディングを小さく、圧縮強度を大きくできることがわかった。この練混ぜ方法をSEC法と呼ぶことにした。ここではSEC法がコンクリートのフレッシュ性状および強度に与える影響の調査結果の例を示した。

2. 3. 2 SECモルタル・コンクリート

SECモルタル・コンクリートは練混ぜ水の一部（一次投入水）で骨材の表面水率を調整してセメントと空練りし、さらに残りの水（二次投入水）を加えて練り混ぜることを原則として製造したモルタル・コンクリートのことである4) ~7)。SECは Sand Enveloped with Cement の頭文字をとったもので、この方法で練り混ぜられたモルタルおよびコンクリート中の骨材が、その周りを一次練混ぜ時の水セメント比に近いセメントペーストで包まれたような状態になっているものと考え、名付けられたものである。

2. 3. 3 SEC法がコンクリートのスランプ・ブリーディングに与える影響

SEC法により製造したコンクリートのフレッシュ性状を調べた実験例を紹介する7)。

水セメント比が50%、60%で目標スランプが10cm、18cmのもの、水セメント比が70%で目標スランプが18cmのもの合計5種類の基本調合のコンクリートについて、それぞれ通常の練混ぜ方法によるもの(N)と、SEC法によるもの(SEC-A)について、コンクリートのフレッシュ性状を比較した。また、同一調合でコンクリートを製造すると、通常の練混ぜ方法によるものと、SEC法によるものではスランプや空気量が異ってくるため、SEC法によって製造するもので混和剤の添加量を調整して、通常の練混ぜ方法によるものと同程度のスランプと空気量になるように調整したもの(SEC-B)も製造した。コンクリートの調合および結果の一部を表-2-3-1に示す。

用いた材料は普通ポルトランドセメント(比重3.15)、細骨材は大井川産川砂(比重2.63、粗粒率3.09)、粗骨材は多摩産碎石(最大寸法20mm、比重2.64、粗粒率6.43)、混和剤は天然樹脂酸塩系AE剤とナフタリン系高性能減水剤である。細骨材の表面水率は通常の練混ぜ方法によるものでは2.3%、SEC法によるものでは使用前日に表面水調整装置(サンドコントローラー)7)により3.4%に調

整した。

練混ぜは容量250リットルのパン型強制練りミキサを用い、練混ぜ量は150リットルとした。通常の方法によるもの(N)では、全材料を投入後90秒間練り混ぜ、SEC法によるもの(SEC-AおよびB)では一次投入水と細骨材、粗骨材を30秒間練り混ぜ、これにセメントを加えて120秒間(一次練混ぜ)、さらに二次投入水と混和剤を加えて90秒間練り混ぜた(二次練混ぜ)。一次水の量は、骨材があらかじめ持っている表面水量と一次投入水の合計がセメント重量に対して18%になるようにした。このことを一次の水セメント比が18%であると表現している。

表-2-3-1 コンクリートの調合とフレッシュ性試験結果 7)

目標 スラン プ (cm)	W/C (%)	練混ぜ 方法	計画配合 (kg/m ³)						スラ ンプ (cm)	空 気 量 (%)	単位容 積質量 (kg/m ³)	プリー ディン グ量 (cc/cm ³)
			セメ ント	細骨 材	粗骨 材	水	AE剤	高性能 減水剤				
10	50	N					0.071	-	10.5	4.0	2,349	0.12
		SEC-A	356	800	986	178	0.071	-	7.5	3.2	2,376	0.03
		SEC-B					0.107	1.42	9.0	3.3	2,366	0.03
	60	N					0.059	-	10.7	3.4	2,337	0.08
		SEC-A	293	860	983	176	0.059	-	7.0	3.6	2,337	0.05
		SEC-B					0.088	1.46	9.9	3.1	2,360	0.03
18	50	N					0.074	2.22	18.0	4.1	2,353	0.10
		SEC-A	370	802	932	185	0.074	2.22	14.2	2.9	2,373	0.03
		SEC-B					0.148	2.59	19.5	4.4	2,336	0.03
	60	N					0.060	1.81	18.4	3.8	2,343	0.13
		SEC-A	302	873	927	181	0.060	1.81	10.2	2.3	2,379	0.05
		SEC-B					0.121	2.42	18.5	3.8	2,323	0.05
	70	N					0.051	1.80	19.0	3.8	2,351	0.74
		SEC-A	257	963	876	180	0.051	1.80	12.2	2.2	2,371	0.19
		SEC-B					0.103	2.06	18.0	4.4	2,314	0.08

測定はスランプ、空気量、単位容積質量、プリーディング、および加圧プリーディングについて行った。プリーディングはJIS A 1123に準じて行い、加圧プリーディングはR.D.Browneら(1977)8)の提案した方法に沿って行った。

各コンクリートの性質は表-2-3-1に示すとおりで、SEC-Aはスランプおよび空気量が通常の方法によるもの(N)に比べて小さくなった。これは、混和剤の使用量を通常のコンクリートと同一にしているためであり、混和剤量を調整すればスランプおよび空気量を合わせることができるものである。プリーディング試験の結果を図-2-3-1に、加圧プリーディング試験の結果を図-2-3-2に示す。

以上は1981年4月に行った実験の結果である。SEC法によるものの一次練混ぜにおける水セメント比が18%と、必ずしもプリーディングを最小にする値とはな

っていないが、分割練混ぜにより、コンクリートのブリーディングを顕著に減らせることが示されたものといえる。また、加圧ブリーディング試験の結果は、SEC法によるコンクリートで加圧された時の初期の水の排出速度が、通常の方法によるNの排出速度に比べ小さくなっていった。

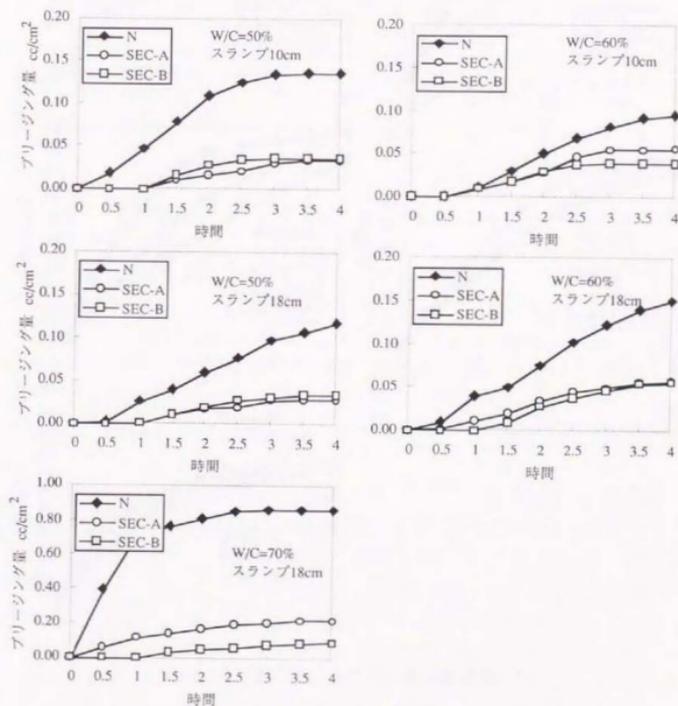


図-2-3-1 ブリーディング試験結果 7)

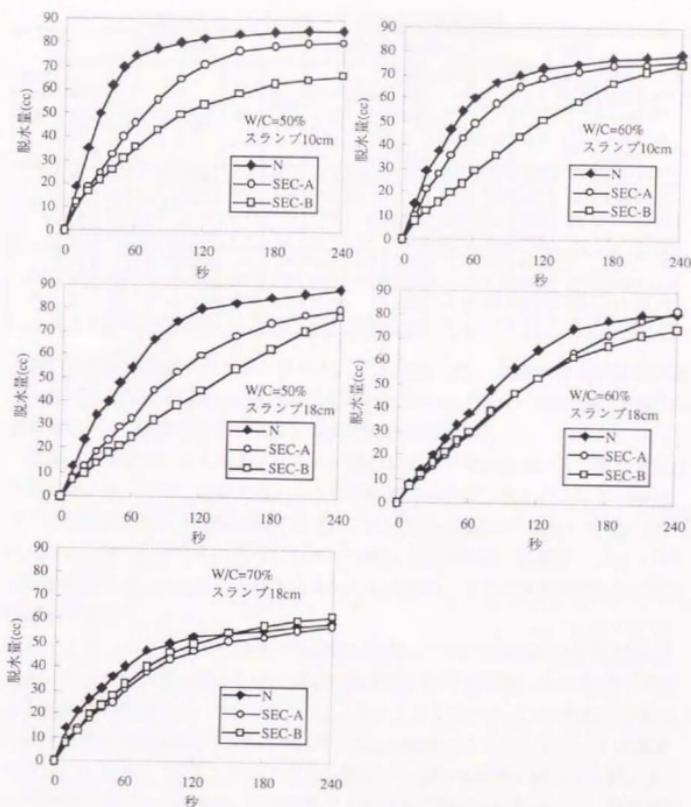


図-2-3-2 加圧ブリーディング試験結果 7)

2. 3. 4 SEC法がコンクリートの強度に与える影響

SEC法により製造したコンクリートの強度を調べた実験例を紹介する 7)。

目標スランブを18cmとし、水セメント比が30、40、50、および60%のコンクリートについて、それぞれ通常の練混ぜ方法によるもの(N)と、SEC法によるもの(SEC-A)の強度を比較した。コンクリートの調査および結果の一部を表-2-3-2に示す。

表-2-3-2 コンクリートの調合と試験結果 7)

練混ぜ方法	配合 (kg/m ³)						練り上がり性能				物性				
	W/C (%)	セメント	川砂	川砂利	水	減水剤	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)	ブリーディング率 (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)		引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (x10 ⁴ kgf/cm ²)	ポアソン比
											7日	28日			
N	30	546	666	1110	162	2.1	18.3	2.9	2374	0.78	468	567	37	3.69	0.21
	40	428	762	1050	176	3.4	18.6	2.7	2416	1.00	362	483	34	3.64	0.20
	50	360	734	1090	179	0	17.7	1.6	2363	3.51	274	387	31	3.31	0.20
	60	287	876	1014	174	1.2	18.8	2.1	2351	2.82	208	328	30	3.16	0.21
SEC-A	30	552	613	1011	164	7.4	19.7	2.5	2400	0	591	669	43	3.54	0.22
	40	426	757	1043	171	3.9	19.0	1.7	2393	0	463	579	40	3.52	0.19
	50	361	736	1093	180	1.9	18.1	1.2	2370	0	294	415	33	2.91	0.21
	60	287	874	1011	172	1.4	14.7	1.9	2340	0	258	378	33	3.02	0.20

用いた材料は普通ポルトランドセメント（比重3.15）、細骨材は大井川産川砂（比重2.63、粗粒率2.94）、粗骨材は大井川産川砂利（最大寸法25mm、比重2.64、粗粒率6.86）、混和剤はナフタリン系高性能減水剤である。

練混ぜは容量50リットルのアイリッヒ型強制練りミキサを用い、通常の方法によるもの（N）では、骨材とセメントを90秒間練り混ぜ、水を投入して60秒間、さらに減水剤を加えて60秒間練り混ぜた。SEC法によるもの（SEC）では一次の水セメント比が20%になるようにして一次投入水と細骨材、粗骨材、セメントを90秒間練り混ぜ、これに二次投入水を加えて60秒間、さらに減水剤を加えて60秒間練り混ぜた。

コンクリートは、φ10×20cmの供試体を作製してその圧縮強度と弾性係数を測定した。また引張強度はφ15×20cmの供試体を作製してJIS A 1113に準じて割裂引張強度を測定した。結果は表-2-3-2に示すとおりで、セメント水比（C/W）と強度の関係は図-2-3-3に示すようになった。SEC法によるコンクリートは通常の方法によるもの（N）に比べて圧縮強度が10～20%程度高い値となった。また引張強度も増加しているが、圧縮強度ほどの増加は認められなかった。弾性係数も表-2-3-2に示しているが、これはほぼ同じ値となった。

以上の結果、分割練混ぜ方法の一種であるSEC法により、同じ調合で通常の製造方法によるコンクリートに比べて圧縮強度を大きくできることが示されたものといえる。

このようにSEC法により強度が大きくなる原因については、骨材が一次練混ぜにより水セメント比の小さいセメントペーストの皮殻で包まれ、これが二次練混ぜ以降も残り、骨材とマトリックスの付着がよいためと考えていた。なお、SECモデルの詳細については4章であらためて紹介する。

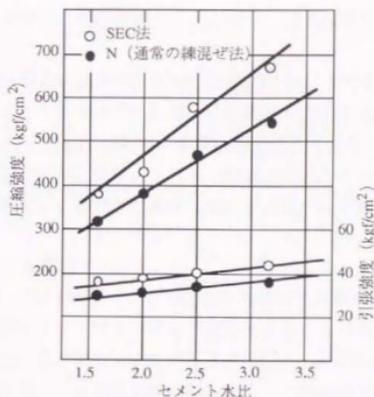


図-2-3-3 セメント水比と強度の関係 7)

2. 3. 5 まとめ

練混ぜ水の一部を投入することにより骨材の表面水率を調整してセメントと空練りし、さらに残りの水を加えてコンクリートを製造する方法を提案・検討した (SEC法)。目標スランプ10、18cm、W/C=50、60、70%のコンクリートで通常の方法、同一調合のSEC法、混和剤の量を調整して通常の方法によるものとスランプをあわせたSEC法、の3種について、スランプ、空気量、単位容積質量、ブリーディング、および加圧ブリーディングを測定した。その結果、SEC法によれば、ブリーディングが大幅に少なくなることが示された。

水セメント比を変化させたコンクリートについてSEC法によるものと通常の方法によるものの圧縮強度、引張強度、弾性係数を測定した。その結果、SEC法では10~20%程度圧縮強度が高くなることが示された。

2. 4 SEC法に関連する既往の研究

2. 4. 1 概要

2.2に示したプレバクトコンクリート用モルタルの研究、および2.3のSECコンクリートの研究は、筆者らとリブコンエンジニアリング(株) (当時代表伊東靖郎氏) が共同で研究したものである。なお、伊東氏はこれらの知見をもとに、細骨材の表面の水と空気の状態に着目し、表面吸着水という概念とその評価方法を

提案し、学位論文「骨材の表面状態がコンクリートに及ぼす影響に関する研究」をまとめている。

ここでは、骨材の表面水率がモルタルの流動性やブリーディングに明確な影響を与えることがあきらかになったことで、この現象を説明しようとした剣持ら(1978) 9)の研究と、SEC法の効果を実験計画法により検証した魚本ら(1981) 10~15)の研究を紹介する。なお、これらの研究はセメントペーストにおいても分割練混ぜの効果があることがまだあきらかにされていない時点での研究である。

2. 4. 2 剣持らによる研究

筆者らがリブコンエンジニアリング(株)との共同研究の中で、骨材の表面水率がモルタルの流動性やブリーディングに影響を与えることを見いだした後、(社)日本鉄道建設公団はリブコンエンジニアリング(株)と、表面水率を変えた細骨材とセメントを練り混ぜ、これに投入水を加えてさらに練り混ぜて製造するモルタルの実験研究を行っている。その研究で、剣持ら(1978) 9)は表面水率の値により流動性、ブリーディング、および強度が変化する現象を次のように説明している。

一般に、ある微粉体に徐々に水分を加えていくと図-2-4-1の如く混合エネルギーが変動する。セメントでは水セメント比が25%程度でエネルギーの最も大きなCapillary域となり、可塑性を示す。

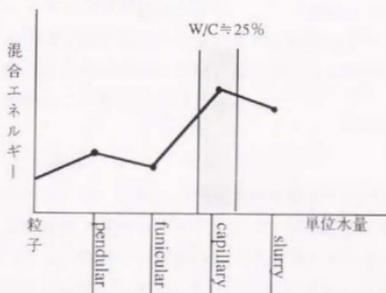


図-2-4-1 単位水量と混合エネルギーの関係 9)

砂とセメントを混練すると砂の表面水率に応じて砂の周囲に上述のCapillary域のモルタルが外皮殻を形成する。この様子を示したのが図-2-4-2のモデルである。表面水量の増大にともない外皮殻は厚くなりある所定の表面水率の時にそれらは最大厚になる。

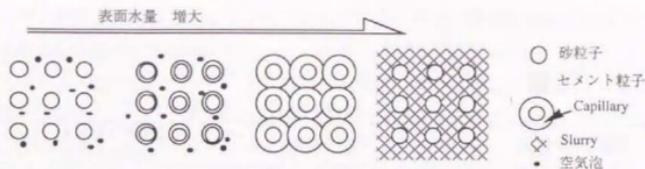


図-2-4-2 表面水をもつ砂とセメントを混合したときのモデル図 9)

表面水率が20%程度の砂と同じ質量のセメントを練り混ぜると砂の周囲に堅固なセメントペーストの皮殻ができる。これがさらに水を加えて練り混ぜた後も砂の表面に残り、図-2-4-3のように皮殻のついた砂が互いに接触して骨格を構成し、その間を水セメント比の大きいセメントペーストが存在するような状態となる。このためモルタルの強度が増大する。

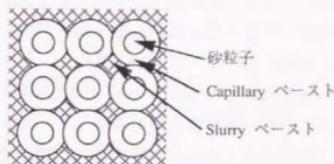


図-2-4-3 適当な表面水率をもつ砂によるモルタルのモデル図 9)

一方、分離・ブリーディングが表面水量10~25%で発生しないのは表面水が存在する砂にセメント粉体が接するとその量により吸着現象がおこり造殻し、ブリーディングとして浮上する余剰水も中に閉じ込められるためである。

以上が剣持らが説明している主な内容である。

2. 4. 3 魚本らによる研究

魚本ら(1981)10)11)12)は骨材の表面水率を調整してセメントと練り混ぜた後、水を投入して再度練り混ぜる方法について、実験計画法により検討を行っている。論文の中ではこの練混ぜ方法を分割方式と呼んでいるが、方法としては前述したSEC法に該当する方法である。また比較用の通常の方法は一括方式と呼んでいる。実験で用いられた練混ぜ方法を表-2-4-1に示す。

実験より、分割方式は一括方式に比べ、同じスランプを得るための単位水量が大きくなること、ブリーディングが減少すること、ブリーディングに及ぼす細骨材の表面水率の影響を小さくすることをあきらかにしている。また圧縮強度が材齢7日で10%、28日で7%程度増加し、強度のパラツキが小さくなるが、引張強度

とヤング率では明確な差はなかったとしている。さらに乾燥収縮が約10%大きくなることを指摘している。

表-2-4-1 練混ぜ方法一覧 10)

	高性能減水剤の後添加	練混ぜ手順	練混ぜ所要時間
一括方式	無	SGCW ↓ <u>2分</u>	2分
	有	SGCW ↓ <u>2分</u> Ad ↓ <u>1分</u>	3分
分割方式	無	SGW1 ↓ <u>1分</u> C ↓ <u>1分</u> W2 ↓ <u>2分</u>	4分
	有	SGW1 ↓ <u>1分</u> C ↓ <u>1分</u> W2 ↓ <u>2分</u> Ad ↓ <u>1分</u>	5分

(注) C:セメント、S:細骨材、G:粗骨材、W:水、Ad:高性能減水剤、=:練混ぜ文献10)の表をもとに練混ぜ手順の表現を本論文にあわせて変更している。

さらに、魚本ら(1982)13)14)15)は分割方式による練混ぜ方法のメカニズムをあきらかにするために一次水量を要因とする実験、検討を行っている。

実験より、ブリーディングを最小とする一次水量が存在し、その量はコンクリートの配合によって若干異なるが、一次水セメント比で15~35%となっているとしている。またブリーディングの少ないものほどスランプも小さくなる傾向があるとしている。あまり明瞭ではないが一次水セメント比25~45%の場合に最も高い圧縮強度になること、ブリーディングが少ない場合ほど若干ではあるが圧縮強度が高くなる傾向がみとめられることを示している。

分割練混ぜ方法によりコンクリートの品質が変化するメカニズムについて、一次練混ぜを行った場合に生じる造粒現象に着目している。この造粒現象とは粉体と液体とが共存し、その液量が少ない場合に一般に認められるもので、粉体に添加された液体が均一に分布せず、偏在するために生ずる現象であるとされている。その原因は、粉体材料間に含まれる液体による結合力にあり、その結合力は粉体の粒子間空隙体積に対する保水液の体積比で表した空隙飽和度とサクシオンポテンシャルによって定まるとされている。また、この結合力は、粉体の粒子径に逆比例するため、粒子径が小さいほどその結合力は大となるとしている。このことから、分割方式で練り混ぜた場合、粒子径の小さいセメントと細骨材が早く造粒され、その結合力も高いために、二次水を投入して練混ぜを行ってもその水は容易に遊離しにくく、ブリーディングが減少するものと考えている。また圧縮強度については、粗骨材を含めた全材料が造粒されることにより、二次水を添加した後も骨材との付着が良くなり強度増に結び付いたものと考えている。

2. 4. 4 まとめ

骨材の表面水率を調整してセメントと練り混ぜた後、水を投入して再度練り混ぜてモルタルまたはコンクリートを製造する方法によれば、表面水の量を適切に選ぶことにより、ブリーディングが減少し、圧縮強度が増加する。このことは筆者らが行ったモルタルの研究およびSECコンクリートの研究であきらかになったことであるが、この現象を説明もしくは検証しようとする研究を紹介した。この練混ぜ方法の効果のメカニズムについて、剣持らは次のように考えた。すなわち、一次練混ぜで砂の周囲に堅固なセメントペーストの皮殻ができる。これがさらに水を加えて練り混ぜた後も砂の表面に残り、皮殻のついた砂が互いに接触して骨格を構成し、その間を水セメント比の大きいセメントペーストが存在するような状態となる。この皮殻がブリーディングの発生をおさえ、皮殻が接触して骨格を構成するために圧縮強度を増加させるというものである。また魚本らはSEC法によりコンクリートの強度が増進し、ブリーディングが減少することを検証した上で、そのメカニズムについて次のように考えた。すなわち、一次練混ぜでセメントと砂が造粒され、結合された水が遊離されにくいためにブリーディングが減少し、また骨材が造粒され付着がよくなるために強度が増加するというものである。

2. 5 セメントペーストにおける分割練混ぜ効果の発見

分割練混ぜ方法がモルタルの性質に大きな影響を与えることが、細骨材とセメントを先に練り混ぜ、その後水を添加して練り混ぜる方法を用いた実験の中で見いだされたことから、その機構については骨材とセメントペーストの関係で議論されてきた。しかし、細骨材とセメントの比率が異なるモルタルの実験から、モルタルのせん断降伏値を表す指標と考えられる F_0 を最大にする水の分割条件は、細骨材の表面水率からではなく、一次の水セメント比から決まってくると考えたほうがよいことがわかってきた。図-2-5-1は細骨材とセメントの比率を変えたモルタルを細骨材とセメントを先に練り混ぜ、その後水を添加して練り混ぜる方法で製造し、その F_0 を測定した結果である（未発表資料、1979年2月に行った筆者らの実験より）。 F_0 を最大にする表面水率は砂セメント比によって変わってくるが、一次水セメント比でみると20～30%で F_0 が最大になっていることがわかる。

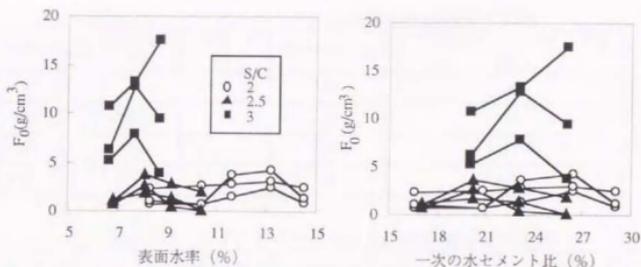


図-2-5-1 砂セメント比の異なるモルタルの相対初期せん断応力降伏値

せん断降伏値を最大にしたり、ブリーディングを最小にする条件が一次の水とセメントの比率で決ってくるとすれば、細骨材のまったくない条件、すなわちセメントペーストにおいても分割練混ぜ効果が認められる可能性が考えられる。そこでセメントペーストにおける分割練混ぜの効果を試験することにした。

まず、セメントペーストにおける分割練混ぜの効果があるかどうかを確認するため、水セメント比40%と60%のセメントペーストについて、水とセメントを同時に投入して90秒間練り混ぜる方法(N)と、一度水セメント比20%で120秒間練り混ぜてから所定の水セメント比とするための残りの水を投入して90秒間練り混ぜる方法(S)の2つの方法を比較した。ブリーディングは土木学会規準「プレバックドコンクリートの注入モルタルのブリーディング率および膨脹率試験方法(ポリエチレン袋方法)」に準じ、2時間後のブリーディング率を測定した。結果を表-2-5-1に示す。分割練混ぜによりブリーディングが約3分の1に減少し、セメントペーストにおいても分割練混ぜ効果が認められることがわかった。この実験を行ったのは1981年7月22日のことである。

翌日、ブリーディングを最小にする一次の水セメント比を確認する実験を行った。また、材料を同時に投入する方法では、練混ぜ時間を変えた試験も行った。水セメント比は50%一点とし、ブリーディングは3時間まで測定した。結果を表-2-5-2および図-2-5-2に示す。この図は文献(16)(17)(18)の中で公表したものである。このように、セメントペーストにおいても分割練混ぜ効果があること、ブリーディングを最小にする一次の水セメント比は25%程度であることがあきらかになった。

表-2-5-1 セメントペーストにおける分割練混ぜ試験

練混ぜ方法	練混ぜ時間 (秒)	一次のW/C (%)	最終W/C (%)	2時間後のブリーディング率 (%)
一括 (N)	90	-	40	3.6
分割 (S)	120+90	20	40	1.2
一括 (N)	90	-	60	10.7
分割 (S)	120+90	20	60	3.9

表-2-5-2 セメントペーストにおける分割練混ぜ効果

記号	練混ぜ方法	練混ぜ時間 (秒)	一次のW/C (%)	最終W/C (%)	ブリーディング率 (%)		
					1時間	2時間	3時間
N-90	一括 (N)	90	-	50	3.8	6.8	7.7
N-210	一括 (N)	210	-	50	3.3	6.2	7.2
N-330	一括 (N)	330	-	50	4.3	8.4	8.6
S-15	分割 (S)	120+90	15	50	2.0	3.8	3.9
S-20	分割 (S)	120+90	20	50	1.5	2.3	2.5
S-25	分割 (S)	120+90	25	50	1.4	1.5	1.6
S-30	分割 (S)	120+90	30	50	1.3	2.4	3.0
S-35	分割 (S)	120+90	35	50	1.4	4.3	5.8

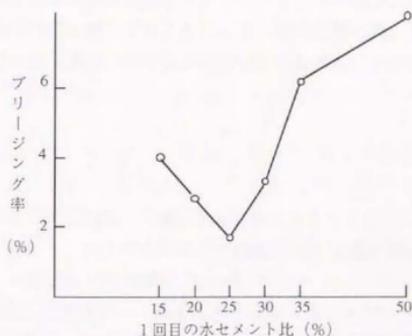


図-2-5-2 一次の水セメント比とセメントペーストのブリーディングの関係 17)

2. 6 検討すべき課題

骨材の表面水率を調整してセメントと練り混ぜた後、水を投入して再度練り混ぜてモルタルまたはコンクリートを製造する方法により、ブリーディングを減少させたり、圧縮強度を増大させたりできることがわかった。

分割練混ぜにより、ブリーディングが減少したり圧縮強度が増加する条件および機構をあきらかにすることは、効果の大きい練混ぜ方法を確立するために重要である。圧縮強度が増加する理由として、骨材が一次練混ぜにより水セメント比の小さいセメントペーストの皮殻で包まれ、これが二次練混ぜ以降も残り、骨材とマトリックスの付着がよいためと考えていた。しかし、実際に水セメント比の低いセメントペーストが残っていることを示すデータや、付着が向上したことを示すデータが得られているわけではなく、上記の説明は、あくまで仮定の範囲をでないものである。

またセメントペーストにおいても、分割練混ぜによりブリーディングが変化することがわかった。上記の圧縮強度が増加する理由の説明はこの現象を考慮していない。さらに、分割練混ぜで製造したセメントペーストに骨材を加えるような練混ぜを行った場合、どのような効果がみられるかもわかっていない。

検討すべき課題は、コンクリートの品質を大幅に改善する可能性のある分割練混ぜ方法について、品質改善効果が得られる機構と、改善効果を得るための条件をあきらかにすることである。こうしてブリーディングの減少、圧縮強度の増大効果の大きい練混ぜ方法を確立することにより、建設工事に用いられるコンクリートを、使用材料は変えずに、その品質を安定して高めることが期待できるのである。

参考文献

- 1) 黒羽健嗣、早川光敬、伊東靖郎、「減圧注入工法によるプレバッキングドコンクリートに関する研究 その1 注入モルタルの流動性に関する基礎理論」、日本建築学会論文報告集、第282号、1979年8月、pp1-7
- 2) 黒羽健嗣、早川光敬、伊東靖郎、「減圧注入工法によるプレバッキングドコンクリートに関する研究 その2 注入モルタルの流動性およびその他の性能におよぼす各種要因の影響」、日本建築学会論文報告集、第293号、1980年7月、pp11-19
- 3) 黒羽健嗣、早川光敬、伊東靖郎、「減圧注入工法によるプレバッキングドコンクリートに関する研究 その3 コンクリートの物性」、日本建築学会論文報告集、第314号、1982年4月、pp9-16

- 4) 山本康弘、加賀秀治、黒羽健嗣、早川光敬、伊東靖郎、「S.E.C.コンクリートの研究(特性と強度)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、1980年9月、pp57-58
- 5) 山本康弘、加賀秀治、黒羽健嗣、伊東靖郎、丸嶋紀夫、早川光敬、「S.E.C.(造殻)コンクリートの施工性に関する研究」、日本建築学会大会学術講演梗概集、1981年9月、pp89-90
- 6) 早川光敬、加賀秀治、山本康弘、伊東靖郎、黒羽健嗣、丸嶋紀夫、「S.E.C.(造殻)コンクリートの物性に関する研究」、日本建築学会大会学術講演梗概集、1981年9月、pp91-92
- 7) 山本康弘、黒羽健嗣、丸嶋紀夫、石井貴和、早川光敬、「S.E.C.コンクリートの基礎理論と物性」、大成建設技術研究所報、第14号、1981年、pp9-19
- 8) R.D.Brown, P.B.Bamforth, "Tests to Establish Concrete Pumpability", Journal of the American Concrete Institute, 1977-5, pp193-203
- 9) 原島龍一、剣持三平、伊東靖郎、「高強度スラリーモルタルの特性について」、土木学会年次学術講演会、V-114、1978年、pp223-224
- 10) 魚本健人、小林一輔、星野富夫、西村次男、「コンクリートの練り混ぜ方法に関する基礎的研究(1) 単位水量とブリージング」、生産研究33巻8号、1981年8月、pp5-7
- 11) 魚本健人、小林一輔、星野富夫、西村次男、「コンクリートの練り混ぜ方法に関する基礎的研究(2) 強度とヤング率」、生産研究33巻9号、1981年9月、pp20-23
- 12) 魚本健人、小林一輔、星野富夫、西村次男、「コンクリートの練り混ぜ方法に関する基礎的研究(3) 乾燥収縮と重量変化」、生産研究33巻11号、1981年11月、pp5-8
- 13) 魚本健人、星野富夫、「コンクリートの練り混ぜ方法に関する基礎的研究(4) 1次水量によるコンクリート品質の変化」、生産研究34巻3号、1982年3月、pp25-27
- 14) 魚本健人、星野富夫、「コンクリートの練り混ぜ方法に関する基礎的研究(5) ブリージングおよび圧縮強度が最小・最大となる条件」、生産研究34巻4号、1982年4月、pp28-31
- 15) 魚本健人、「コンクリートの練り混ぜ方法に関する基礎的研究(6) 分割方式によるコンクリートの練り混ぜ機構」、生産研究34巻5号、1982年5月、pp31-34
- 16) Mitsutaka Hayakawa, Yasuro Itoh, "A New Concrete Mixing Method for Improving Bond Mechanism", Bond in Concrete - Proceedings of International Conference on Bond in Concrete, Paisley, Scotland, 1982-6, pp282-288

- 17) 早川光敬、山本康弘、丸嶋紀夫、伊東靖郎、「SECコンクリートの基礎的性状に関する研究」、第4回コンクリート工学年次講演会講演論文集、1982年、pp121-124
- 18) 早川光敬、加賀秀治、山本康弘、伊東靖郎、黒羽健嗣、丸嶋紀夫、「SECコンクリート工法のキャピラリーミキシング効果に関する研究」、日本建築学会大会学術講演梗概集、1982年10月、pp325-326

第3章 セメントペーストにおける分割練混ぜ方法

3. 1 本章の概要

水とセメントの系（セメントペースト）における分割練混ぜの特性を検討した。セメントを一次水と練り混ぜ、これに二次水を加えて再度練り混ぜてセメントペーストを製造する実験を行ない、分割練混ぜ方法の効果に与える一次の水セメント比、一次練混ぜ時間、混和剤の添加方法、セメント種類の影響を調査した。さらに、セメントペーストにおける分割練混ぜ効果に影響を与える要因や、分割練混ぜによりブリーディングが減少する原因について関連する文献を調査し、分割練混ぜの特性をあきらかにした。

3. 2 分割練混ぜ方法の効果に影響する要因

3. 2. 1 概要

セメントペーストにおいて、セメントを一次水と練り混ぜ、これに二次水を加えて再度練り混ぜて製造する実験を行ない、分割練混ぜ方法の効果に与える一次の水セメント比、一次練混ぜ時間、混和剤の添加方法、セメント種類の影響を調査した。

3. 2. 2 一次の水セメント比

(1) 目的

セメントペーストの分割練混ぜ方法において、ブリーディングを最小にする一次の水セメント比を確認する目的で試験を行った。2.5に示したように、セメントペーストで一次水とセメントを練り混ぜ、これに二次水を加えて再度練り混ぜセメントペーストを製造すると、一次の水セメント比によってペーストのブリーディング量が変化する。一次の水セメント比を15%程度から増加させていくと25%程度でブリーディングが最小になり、この先は一次の水セメント比の増加とともにブリーディングも増加していく。ここでは最小のブリーディングをもたらす一次の水セメント比を求めるために、一次の水セメント比を1%きざみで変化させた実験を行った。

(2) 試験計画

1) 使用材料・調査

セメントは普通ポルトランドセメント、水は上水道水を用いた。

セメントペーストの水セメント比は50%とした。

2) 練混ぜ方法

容量10リットルのモルタルミキサーを用い、セメントと一次水を低速で1分間、続けて中速で1分間練り混ぜた。これに二次水を加え低速で45秒間、中速で45秒間練り混ぜた。一次の水セメント比は20~26%のあいだで1%きざみで変化させた。また比較のため、セメントに全量の水を加え、低速で45秒間、続けて中速で45秒間練り混ぜるものを試験した。練混ぜ量は、セメント5kgと水2.5kg(約4.1リットル)である。

3) 測定

ブリーディングは土木学会規準「プレバッキングコンクリートの注入モルタルのブリーディング率および膨張率試験方法(ポリエチレン袋方法)」に準じ、30分間ごとのブリーディング率を測定した。測定はブリーディング量が減少するまで行った。

(3) 結果

結果を表-3-2-1と図-3-2-1に示す。これから普通ポルトランドセメントを用いた場合、ブリーディングを最小にする一次の水セメント比は23ないし24%程度であることが示された。また、水セメント比で1%という細かい間隔で実験を行った場合でも、結果はなめらかな曲線を示していることから、ブリーディングに対する分割練混ぜ効果は、変動が小さく、再現性が高い現象であると考えられる。

表-3-2-1 セメントペーストにおける一次の水セメント比とブリーディング

記号	練混ぜ方法	練混ぜ時間(秒)	一次のW/C(%)	最終W/C(%)	ブリーディング率(%)							
					0.5時間	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
S20	分割	120+90	20	50	0.1	0.4	1.2	1.6	1.9	2.1	2.0	1.9
S21	分割	120+90	21	50	0.5	0.9	1.2	1.5	1.6	1.7	1.4	1.2
S22	分割	120+90	22	50	0.4	0.6	0.9	1.1	1.2	1.0	0.88	-
S23	分割	120+90	23	50	0.3	0.7	0.8	0.9	1.0	0.8	0.7	-
S24	分割	120+90	24	50	0.2	0.5	0.6	0.8	1.0	0.9	0.7	-
S25	分割	120+90	25	50	0.3	0.7	0.9	1.1	1.1	1.0	0.6	-
S26	分割	120+90	26	50	0.4	0.8	1.2	1.4	1.4	1.2	1.0	-
N	一括	90	-	50	-	4.7	8.5	11.2	12.4	14.0	15.0	13.8

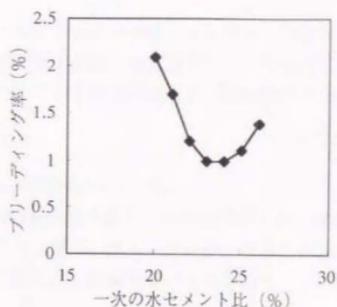


図-3-2-1 一次の水セメント比とブリーディング

3. 2. 3 一次練混ぜ時間の影響

(1) 目的

分割練混ぜ方法において一次練混ぜの方法がブリーディングの発生に与える影響を調べるために実験を行った。分割練混ぜの特徴は、一次練混ぜを行うことにあるといえる。ここでは一次練混ぜの時間やミキサの速度を変化させ、一次練混ぜの方法が分割練混ぜ効果に及ぼす影響を調査した。また、一括練混ぜにおける練混ぜ時間とミキサの速度がブリーディングに与える影響を調査した。

(2) 試験計画

1) 使用材料・調合

セメントは普通ポルトランドセメント、水は上水道水を用いた。
セメントペーストの水セメント比は40%とした。

2) 練混ぜ方法

容量10リットルのモルタルミキサを用い、セメントと一次水の練混ぜを低速で10秒間、30秒間、60秒間、120秒間および240秒間の5水準（SLシリーズ）、および高速で30秒間と60秒間の2水準（SHシリーズ）を加えた合計7水準で行った。二次練混ぜはいずれも低速で90秒間とした。一次の水セメント比は24%とした。また、セメントに全量の水を加えて練り混ぜる一括練混ぜについて、練混ぜ時間を60秒、90秒、120秒、240秒、および600秒の5水準で、ミキサの速度を低速（NLシリーズ）と高速（NHシリーズ）の2水準として、組合せで合計10水準の練混ぜについて試験を行った。

3) 測定

ブリーディングは土木学会規準「プレバックドコンクリートの注入モルタルのブリーディング率および膨張率試験方法（ポリエチレン袋方法）」に準じ、30分間ごとのブリーディング率を測定した。測定はブリーディング量が減少するまで行った。

(3) 結果

結果を表-3-2-2と図-3-2-2に示す。

SL10～SL240の結果をみると、分割練混ぜにおいては一次練混ぜ時間が60秒以下では、短いほどブリーディングが多くなることが示された。一次練混ぜが10秒と極端に短い場合は一括練混ぜによるもののブリーディングに近い結果となる

表-3-2-2 セメントペーストにおける一次練混ぜ時間とブリーディング

記号	練混ぜ方法	練混ぜ時間(秒)		一次のW/C(%)	最終W/C(%)	ブリーディング率(%)					
		一次	二次			0.5時間	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
SL10	分割	低10	低90	24	40	0.3	0.6	0.9	1.0	0.8	0.7
SL30	分割	低30	低90	24	40	0.2	0.3	0.4	0.3	0.2	
SL60	分割	低60	低90	24	40	0.0	0.2	0.2			
SL120	分割	低120	低90	24	40	0.0	0.2	0.2			
SL240	分割	低240	低90	24	40	0.0	0.2	0.2			
SH30	分割	高30	低90	24	40	0.2	0.4	0.5	0.5	0.4	0.2
SH60	分割	高60	低90	24	40	0.1	0.2	0.2			
NL60	一括	低60		-	40	0.5	1.1	1.7	2.1	2.0	1.9
NL90	一括	低90		-	40	0.5	1.2	1.8	2.1	2.2	2.1
NL120	一括	低120		-	40	0.7	1.3	1.8	2.1	2.0	1.9
NL240	一括	低240		-	40	0.6	1.1	1.6	1.8	1.7	1.5
NL600	一括	低600		-	40	0.6	1.1	1.7	1.9	1.7	1.5
NH60	一括	高60		-	40	0.5	1.1	1.3	1.3	1.3	1.1
NH90	一括	高90		-	40	0.5	1.1	1.4	1.3	1.3	1.2
NH120	一括	高120		-	40	0.4	0.9	1.0	0.9	0.9	0.7
NH240	一括	高240		-	40	0.6	1.0	1.3	1.5	1.3	1.2
NH600	一括	高600		-	40	0.5	1.0	1.2	1.3	1.3	1.1

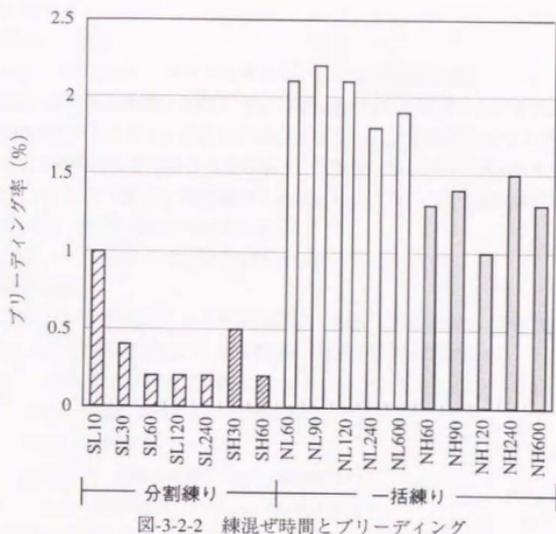


図-3-2-2 練混ぜ時間とブリーディング

が、一次練混ぜが30秒以上あれば、分割練混ぜによるセメントペーストのブリーディングは一括練混ぜによるものに比べて半分以下になった。SL30,60とSH30,60を比較して、一次練混ぜにおけるミキサ羽根の回転速度は今回の実験の範囲ではブリーディングにほとんど影響を与えないという結果であった。

NL60~600とNH60~600の結果より、一括練混ぜにおいては、練混ぜ時間はブリーディングにあまり影響を与えないことが示された。また、ミキサ羽根の回転速度は高速にした方がブリーディングが少なくなる結果となった。

3. 2. 4 混和剤の添加方法の影響

(1) 目的

分割練混ぜ方法において、混和剤の添加時期がブリーディングの発生に与える影響を調べるために実験を行った。高性能減水剤、AE剤、AE減水剤の3種の混和剤について、水セメント比2水準(W/C=40、50%)で、練混ぜ方法と混和剤の添加方法を5種類変化させ、単位容積質量、ブリーディング、円筒型沈入試験の測定を行なった。

(2) 試験計画

1) 使用材料・調査

セメントは普通ポルトランドセメント、水は上水道水を用いた。

混和剤は高性能減水剤、AE剤、およびAE減水剤の3種類のものを使用した。高性能減水剤はナフタリンスルホン酸ホルマリン高縮合物を主成分とするもの、AE剤は天然樹脂酸塩を主成分とするもの、AE減水剤はリグニンスルホン酸塩を主成分とするものである。使用量はセメント1kgに対し、高性能減水剤は6ml、AE剤は0.4ml、AE減水剤は2.5mlとした。

水セメント比は40%と50%の2水準とした。

2) 練混ぜ方法

容量30リットルのモルタルミキサーを用い、低速（公転42rpm、自転183rpm）で練り混ぜた。各練混ぜ方法および混和剤の添加時期を以下に示す。

記号 投入および練混ぜ時間

S C+w1 (Mix120秒) +w2 (Mix90秒)

N C+w (Mix90秒)

S-1 C+w1+Ad (Mix120秒) +w2 (Mix90秒)

S-2 C+w1 (Mix120秒) +w2+Ad (Mix90秒)

S-後 C+w1 (Mix120秒) +w2 (Mix60秒) +Ad (Mix90秒)

N-同 C+w+Ad (Mix90秒)

N-後 C+w (Mix60秒) +Ad (Mix90秒)

なお、分割練混ぜ (S) における一次の水セメント比は24%とした。

3) 測定

単位容積質量は容量2リットルの容器を用いて測定した。

ブリーディングは土木学会規準「プレバクドコンクリートの注入モルタルのブリーディング率および膨張率試験方法（ポリエチレン袋方法）」に準じ、30分間ごとのブリーディング率を測定した。測定はブリーディング量が減少するまで行った。

円筒型沈入試験は一種のペネトロメータであって、流体中に質量を変えた円筒を沈入させ、その質量と沈入深さによって流動性を評価する試験方法である。この方法は容器に入ったままの流体の流動性を簡便に評価できること、およびセメントペーストからコンクリートまで幅広い対象に対応できるものとして開発・提案したものである¹⁾。ここでは直径2cmのアクリル樹脂製の円筒棒を用意し、円筒棒に重錘を加えて質量を調節したものを、縦に静かに試料中に沈入させ、その時の円筒の質量 (W) と沈入深さ (H) を測定した。試料は直径15cmの容器

に深さが22cmになるように詰めた。測定は1回ごとに棒を抜き、重錘の質量を増加させ、再び同じ位置に沈ませて繰返し測定した。一般に水のような流体では、そこに浮いている物体の質量は流体中の物体の体積と流体の質量の積に等しくなるというアルキメデスの原理が成り立つ。これに対し、セメントペーストのような流体ではこの関係が成立しないので、逆に両者の差でその流体の特性を表現することができる。そこでこの試験方法の結果を、流体がその中に保持し得る物体の密度と、その流体の密度の差で表現することとした。

$$\rho_{\text{eff}} = (W / \pi r^2 H) - \rho \quad (\text{g/cm}^3)$$

ここに、W：重錘を加えた円筒の質量 (g)、r：円筒棒の半径、H：沈入深さ (cm)、 ρ ：試料の密度 (g/cm³)。

試験装置はこの円筒が鉛直に沈入できるようにしたガイドと、沈入深さを測るための針と目盛が付いたものを用意した。一般に ρ_{eff} の値は沈入深さによって変化するため、基準沈入深さとして15cmを選び、深さ15cm前後の値から補間により $\rho_{\text{eff}15}$ を計算により求めた。なお、沈入試験の結果は流体のせん断降伏値との相関が高く、モルタルではテーブルフローの値と良い相関を示すことが解っている1)。

(3) 結果

結果を表-3-2-3~4に示す。

同一調合における単位容積質量の差は、空気量の差を表しているものと考えられる。空気連行性を有するAE剤 (SVシリーズ) とAE減水剤 (SPシリーズ) の結果をみると (図-3-2-3)、分割練混ぜにおいても、一括練混ぜにおいても、後添加を行ったものは単位容積質量は大きくなっており、後添加では空気が連行されにくいことがわかる。分割練混ぜにおいて、一次水で添加した場合と、二次水で添加した場合とでは明確な差は認められない。

ブリーディングについては、調合、混和剤の種類、添加時期によらず、分割練混ぜによれば、一括練混ぜに比べてブリーディングを顕著に減少させられることがわかる (図-3-2-4)。分割練混ぜにおいて、AE剤 (SVシリーズ) では添加時期によりブリーディングはほとんど影響を受けない。これに対し、高性能減水剤とAE減水剤 (SMシリーズ、SPシリーズ) では、一次水とともに添加した場合のブリーディングが最も少なく、二次水添加と後添加ではブリーディングが増加した。添加時期による増加の割合は高性能減水剤の方が大きく、また高性能減水剤 (SMシリーズ) では二次水とともに添加した場合の方が、後添加した場合よりブリーディングが大きくなる結果となった。

円筒沈入試験の結果から、混和剤が流動性に与える効果のみをみることができる。

混和剤の種類によらず、添加時期が遅くなるほど $\rho_{\alpha 15}$ の値が小さくなり、流動性を大きくする（降伏値を小さくする）効果が高くなることが示されている（図-3-2-5）。

表-3-2-3 混和剤の影響（W/C=40%）

記号	混和剤	練混ぜ方法	混和剤添加時期	温度（℃）	単位容積質量（g/cm ³ ）	ブリーディング率（%）	円筒沈入試験 $\rho_{\alpha 15}$ （g/cm ³ ）
S40	なし （ブレン）	分割	-	25.8	1.931	0.65	0.7
N40		一括	-	25.5	1.916	3.39	0.9
SM40-1	高性能 減水剤	分割	一次水と	29.0	1.916	0.04	0.5
SM40-2		分割	二次水と	26.5	1.892	0.72	0.1
SM40-後		分割	後添加	26.5	1.918	0.32	0.2
NM40-同		一括	投入水と	26.5	1.878	5.17	0.5
NM40-後		一括	後添加	25.0	1.946	12.51	0.0
SV40-1		AE剤	分割	一次水と	26.0	1.846	0.54
SV40-2	分割		二次水と	25.3	1.827	0.59	0.6
SV40-後	分割		後添加	25.5	1.884	0.62	0.4
NV40-同	一括		投入水と	25.8	1.862	2.95	0.9
NV40-後	一括		後添加	25.0	1.928	3.54	0.7
SP40-1	AE減水 剤		分割	一次水と	21.2	1.892	0.50
SP40-2		分割	二次水と	20.5	1.893	1.76	0.3
SP40-後		分割	後添加	21.0	1.942	1.61	0.2
NP40-同		一括	投入水と	20.6	1.881	3.94	0.4
NP40-後		一括	後添加	-	1.937	9.55	0.2

表-3-2-4 混和剤の影響 (W/C=50%)

記号	混和剤	練混ぜ方法	混和剤添加時期	温度 (°C)	単位容積質量 (g/cm ³)	ブリーディング率 (%)	円筒沈入試験 ρ_{a15} (g/cm ³)
S50	なし (ブレン)	分割	-	24.0	1.823	1.32	0.1
N50		一括	-	23.0	1.806	14.39	0.2
SM50-1	高性能 減水剤	分割	一次水と	24.0	1.798	0.52	0.2
SM50-2		分割	二次水と	24.0	1.796	14.69	0.1
SM50-後		分割	後添加	24.8	1.812	6.03	0.0
NM50-同		一括	投入水と	24.5	1.821	19.18	0.0
NM50-後		一括	後添加	24.0	1.825	26.65	0.0
SV50-1		AE剤	分割	一次水と	25.0	1.712	1.54
SV50-2	分割		二次水と	25.0	1.711	1.12	0.2
SV50-後	分割		後添加	24.0	1.825	1.41	0.2
NV50-同	一括		投入水と	23.0	1.786	12.89	0.1
NV50-後	一括		後添加	24.0	1.836	14.52	0.1
SP50-1	AE減水 剤		分割	一次水と	20.0	1.796	0.91
SP50-2		分割	二次水と	21.5	1.780	6.09	0.0
SP50-後		分割	後添加	21.5	1.824	6.98	0.1
NP50-同		一括	投入水と	22.0	1.792	17.38	0.1
NP50-後		一括	後添加	21.5	1.819	24.15	0.0

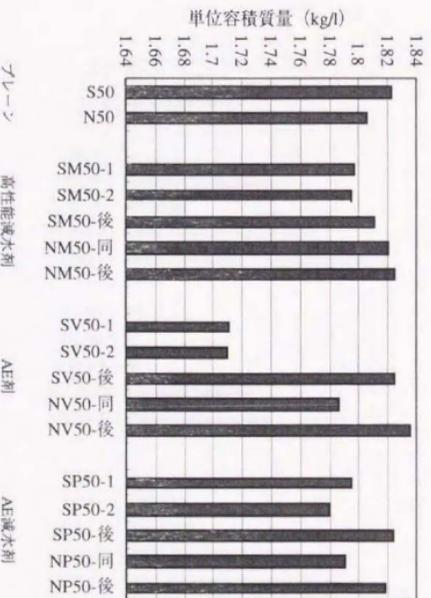
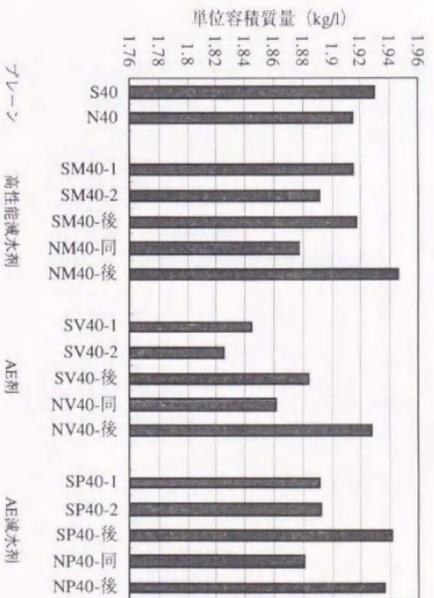


図-3-2-3 混和剤の添加時期がセメントペーストの単位容積質量に与える影響
(上：W/C=40%、下：W/C=50%)

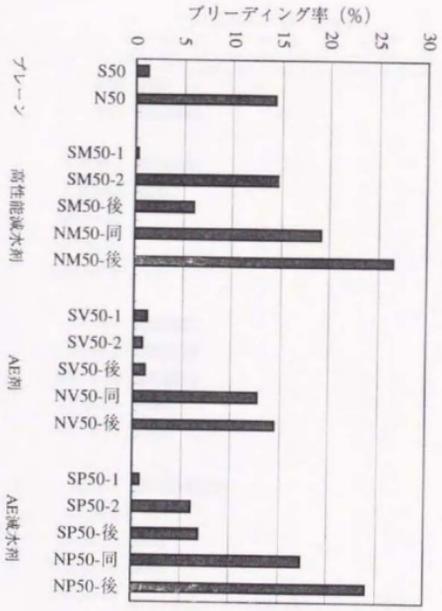
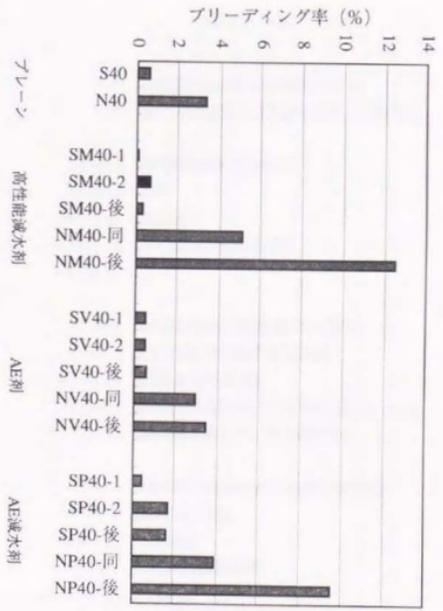


図3-2-4 混和剤の添加時期がセメントペーストのブリーディング率に与える影響
 (上：W/C=40%、下：W/C=50%)

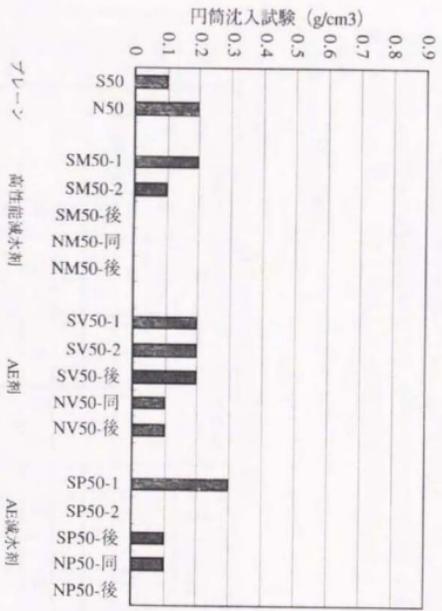
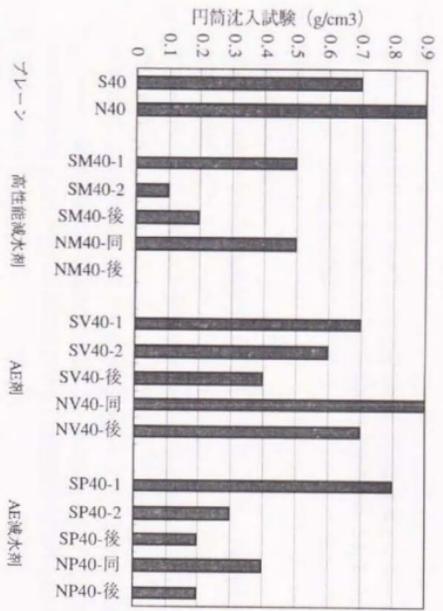


図3-2-5 混和剤の添加時期がセメントペーストの流動性に与える影響
(上：W/C=40%、下：W/C=50%)

3. 2. 5 セメントの種類の影響

(1) 目的

高炉セメントやフライアッシュセメントのような混合セメントについても、普通ポルトランドセメントと同じような分割練混ぜ効果がみられるのかどうかを確認するために、試験を行った。

(2) 試験計画

1) 使用材料・調合

セメントは高炉セメントB種およびフライアッシュセメントC種とした。水は上水道を使用した。

セメントペーストの水セメント比は50と60%の2水準とした。

2) 練混ぜ方法

容量10リットルのモルタルミキサーを用い、セメントと一次水を2分間練り混ぜた。これに二次水を加え90秒間練り混ぜた。一次の水セメント比は25%とした。また比較のため、セメントに全量の水を加え、90秒間練り混ぜるものを試験した。

3) 測定

ブリーディングは土木学会規準「プレバックドコンクリートの注入モルタルのブリーディング率および膨張率試験方法（ポリエチレン袋方法）」に準じ、1時間ごとのブリーディング率を測定した。測定は3時間まで行った。

(3) 結果

結果を表-3-2-5に示す。

表-3-2-5 セメント種類の影響

記号	セメント種類	練混ぜ方法	練混ぜ時間	一次のW/C(%)	最終W/C(%)	ブリーディング率(%)		
						1時間	2時間	3時間
SBB50	高炉B種	分割	120+90	25	50	1.3	2.8	2.8
NBB50		一括	90	-		1.3	2.7	2.7
SBB60		分割	120+90	25	60	2.9	5.0	7.9
NBB60		一括	90	-		3.4	7.1	7.3
SFC50	フライアッシュC種	分割	120+90	25	50	1.7	3.0	3.9
NFC50		一括	90	-		2.2	4.7	6.0
SFC60		分割	120+90	25	60	3.1	5.0	6.2
NFC60		一括	90	-		4.3	7.7	10.5

ブリーディングに対する分割練混ぜ効果は高炉セメントB種ではほとんどみられず、フライアッシュC種では効果はみられたが、普通ポルトランドセメントにおける効果より小さい。このようにセメントの種類が変わると、分割練混ぜ効果も変わってくるのがわかる。

3. 2. 6 文献調査

(1) 田沢らによる研究

田沢ら (1982) 2)、(1988) 3) による一連の研究から、セメントペーストにおける分割練混ぜについて以下のことがあきらかにされている。

1) 普通ポルトランドセメントを用いたセメントペーストでは、分割練混ぜによりブリーディングが最小になる一次の水セメント比は最終水セメント比によらず一定である。

水セメント比を40、50、60%の3水準で、一次の水セメント比を7%きざみとしたセメントペーストの分割練混ぜの実験から、図-3-2-6に示すように、ブリーディングが最小になる一次の水セメント比は21%で、最終水セメント比によらず一定であるという結果を得ている。

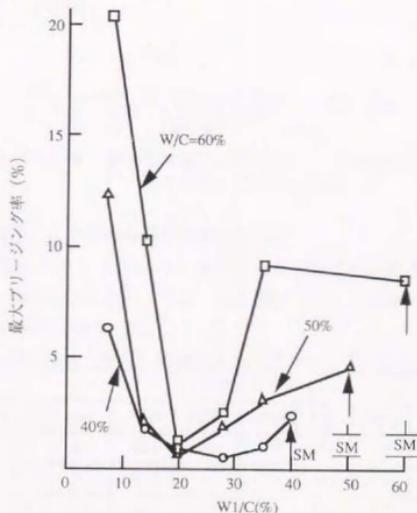


図-3-2-6 水セメント比を変えたペーストにおける一次の水セメント比とブリーディング 2)

2) 分割練混ぜによりブリーディングが最小になる一次の水セメント比はセメントの粉末度に比例する。

粉末度が $3240\text{cm}^2/\text{g}$ の普通ポルトランドセメント、 $4370\text{cm}^2/\text{g}$ の早強ポルトランドセメント、および 6280 と $8820\text{cm}^2/\text{g}$ の2種類のコロイダルセメントを用いて行った分割練混ぜによるセメントペーストの実験から、図-3-2-7に示すように、セメントの粉末度が大きくなるとブリーディングが最小になる一次の水セメント比も大きくなる結果を得ている。

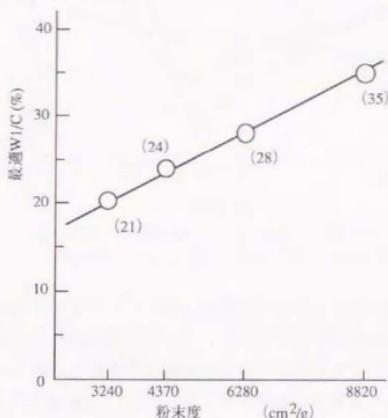


図-3-2-7 セメントの粉末度とブリーディングを最小にする一次の水セメント比の関係 2)

3) セメントの種類により分割練混ぜ効果が変わる。

3種類の中磨熱セメント(表-3-2-6)を用いた分割練混ぜによるセメントペーストの実験から、図-3-2-8に示すように、ある種のセメントにおいては分割練混ぜ効果が現れない結果を得ている。

表-3-2-6 使用したポルトランドセメント 3)

種類	記号	化学成分 (%)								
		ig. loss	insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Total
普通	NP	1.1	0.1	20.5	6.4	3.0	62.5	1.7	1.9	97.2
中磨熱A	MP-A	0.9	0.6	21.2	4.9	4.4	62.1	2.2	2.1	98.4
中磨熱B	MP-B	1.4	0.4	21.8	4.7	4.3	61.8	2.0	2.3	98.7
中磨熱C	MP-C	0.4	0.47	21.6	4.8	3.8	62.6	3.1	1.8	98.5

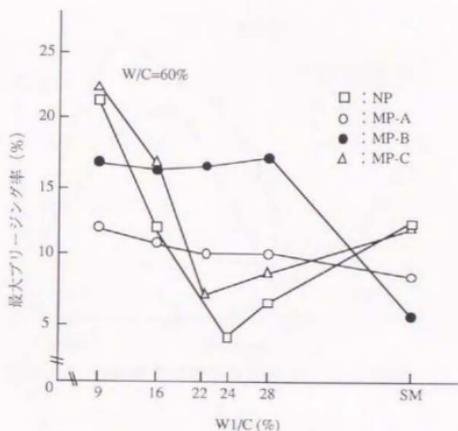


図-3-2-8 中庸熱セメントを用いた場合の
一次の水セメント比とブリーディングの関係 3)

また、普通ポルトランドセメントの一部をフライアッシュで置換した実験から、置換率が大きくなると分割練混ぜによるブリーディングの減少率も小さくなり、分割練混ぜ効果が見られる置換率の限界は30%であったとしている。また高炉スラグ粉末で置換した実験から、ブリーディングを最小にする一次の水セメント比は21%から28%に変るが、置換率が上がってもブリーディング率は変らない結果を得ている。

4) 分割練混ぜ効果に与える温度の影響はあまり大きくない

水セメント比60%の普通ポルトランドセメントを用いたセメントペーストの分割練混ぜ実験から、図-3-2-9に示すように、温度が9℃程度になると、23℃の場合に比べ、ブリーディングを最小にする水セメント比は4%小さくなるが、その時のブリーディングはほとんど増加しない結果を得ている。

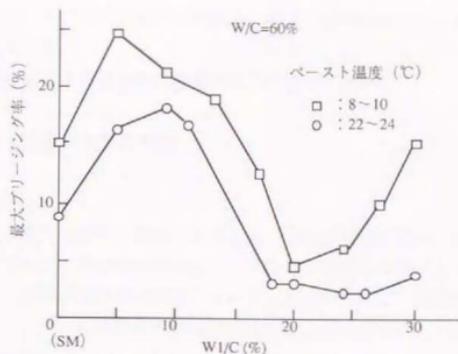


図3-2-9 分割練混ぜ効果におよぼす温度の影響 3)

3. 2. 7 まとめ

セメントペーストについて、セメントを一次水と練り混ぜ、これに二次水を加えて再度練り混ぜて製造する実験、および同種の実験に関する文献調査を行い、分割練混ぜ方法の効果に与える各種要因の影響を調査した。その結果、セメントペーストにおける分割練混ぜの特性について、以下の事項があらかになった。

- ・普通ポルトランドセメントを用いた場合、ブリーディングを最小にする一次の水セメント比は23ないし24%程度である。
- ・分割練混ぜにおいては一次練混ぜ時間が60秒程度までは、長い方がブリーディングが少なくなる。
- ・分割練混ぜにおいて、空気連行剤を一次水で添加した場合と、二次水で添加した場合とでは明確な差は認められない。後添加した場合は空気が連行されにくくなる。
- ・分割練混ぜにおいて減水剤を用いる場合は、一次水とともに添加した場合のブリーディングが最も少なく、二次水添加と後添加ではブリーディングが増加する。添加時期による増加の割合は高性能減水剤の方が大きい。また高性能減水剤では二次水とともに添加した場合の方が、後添加した場合よりブリーディングが大きくなる。
- ・セメント種類により分割練混ぜ効果が変わる。
- ・分割練混ぜによりブリーディングが最小になる一次の水セメント比は最終水セメント比によらず一定である。

- ・分割練混ぜによりブリーディングが最小になる一次の水セメント比はセメントの粉末度に比例する。
- ・分割練混ぜ効果に与える温度の影響はあまり大きくない。

3. 3 分割練混ぜ効果が生じる機構

3. 3. 1 概要

前節までに、適当な条件を選ぶことにより、分割練混ぜによってセメントペーストのブリーディングを大幅に減少させられることがあきらかになった。ここでは、ブリーディングが減少する理由について、文献調査により検討を加えた。また、セメントペーストにおける分割練混ぜ効果と、第2章で示したSEC法の効果との関係を論じた。

3. 3. 2 ブリーディングが減少する機構に関する研究

分割練混ぜを行うと、どのような機構でブリーディングが減少するのかという問題は、現在までのところ完全に解明されているわけではない。しかし、いくつかの研究から、分割練混ぜによると、いったん分散したセメント粒子が凝集して保水性の高い組織を形成し、その結果ブリーディングが減少するものと考えられるのが有力となっている。

長瀧ら(1983)4)は分割練混ぜによるセメントペーストについて、従来のものに比べ結合水量が大きくなることを指摘している。さらにセメントペーストについて土質の圧密試験を行い、圧力と透水係数および間隙比の関係から、練混ぜ方法によるセメントペーストの内部組織の相違を、図-3-3-1に示すモデル図のように考えている。

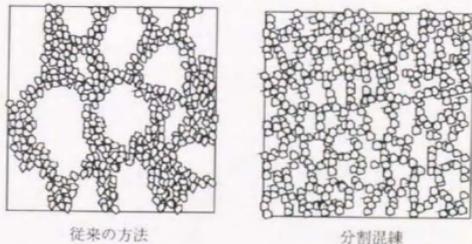


図-3-3-1 練混ぜ方法を変えたセメントペーストの内部組織のモデル図 4)

名和ら (1985) 5) は分割練混ぜと一括練混ぜによるセメントペーストでは塑性粘度は同程度となること、および、分割練混ぜによるペーストの降伏値は一次の水セメント比によって変化し、ブリーディングが少なくなる一次の水セメント比の時には一括練混ぜしたものより降伏値が大きくなることを確認している。さらに減圧濾過した時の脱水量の経時変化の違いなどから、分割練混ぜペーストでは個々の粒子がセメントペーストの全体にわたって緻密な高次の凝集構造を形成しているものと考えている。

田沢ら (1990) 6) は名和らと同様セメント粒子の凝集に着目し、凝集しやすさの程度をあらわすゼータ電位を測定している。粒子はゼータ電位の絶対値が小さいほど凝集しやすくなるといわれている。図-3-3-2は普通ポルトランドセメントを用い、一次の水セメント比を24%として分割練混ぜにより製造したセメントペースト (図中でDMと表示) と、一括練混ぜで製造したペースト (図中でSMと表示) について、セメント粒子のゼータ電位の経時変化を示したものである。どちらの練混ぜ方法によっても、粒子のゼータ電位は時間とともに $\pm 0\text{mV}$ を通過して負から正に移行しているが、分割練混ぜを行うと、より早い時期 (接水後10分以内) に $\pm 0\text{mV}$ に達しており、セメント粒子の凝集力が最大となる時期がセメントペーストの練混ぜ中またはその直後にくる。分割練混ぜにおいてゼータ電位が早く変化するのは、初期水和の違いが液相中に溶出するイオン、特にカルシウムイオンの量の違いとなり、これによりゼータ電位に差が生じるものと考えている。結論としては、ブリーディングの違いが生じるのは分割練混ぜによりセメント粒子の凝集構造に変化が生じたためとしている。

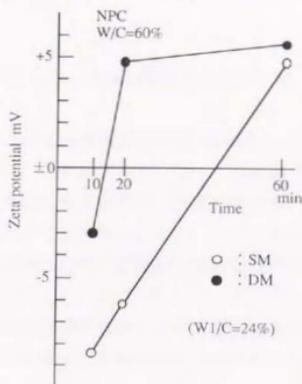


図-3-3-2 セメントペーストにおけるゼータ電位の経時変化 6)

3. 3. 3 SEC法との関係

第2章では練混ぜ水の一部（一次水）で骨材の表面水率を調整してセメントと空練りし、さらに残りの水を加えて練り混ぜて製造したコンクリートをSECコンクリートと呼び、一次水量を適切に設定したSECコンクリートではブリーディングが減少し、圧縮強度が大きくなることを示した。

SECコンクリートでブリーディングが減少することについては、SEC法はセメントに対して水の添加が2回に分かれる分割練混ぜになっており、本章の結果からコンクリートを構成するセメントペーストのブリーディングが少なくなるためと説明できる。これに対し、コンクリートの強度が増加する現象については、ブリーディングの減少により内部欠陥ができにくくなるためとの説明も可能であるが、この点については次章以降で詳細に検討を加える。

いずれにしても、ここで得られたセメントペーストにおける分割練混ぜの特性をもとに、次章以降の骨材を含めた検討結果を加えて、コンクリートにおけるブリーディングの減少、圧縮強度の増加効果の大きい分割練混ぜ方法を確立することとした。

3. 3. 4 まとめ

分割練混ぜ行くと、どのような機構でブリーディングが減少するのかという問題は、現在までのところ完全に解明されているわけではない。しかし、いくつかの研究から、分割練混ぜによると、いったん分散したセメント粒子が凝集して保水性の高い組織を形成し、その結果ブリーディングが減少するものと考えてるのが有力となっている。

3. 4 セメントペーストにおける分割練混ぜ方法のまとめ

セメントペーストにおける分割練混ぜの特性を検討した。一次水とセメントを練り混ぜ（一次練混ぜ）、これに二次水を加えて再度練り混ぜ（二次練混ぜ）セメントペーストを製造する実験を行ない、分割練混ぜを行うことでブリーディングを顕著に減少させられることを見いだした。また分割練混ぜ方法の効果に与えるセメント種類、一次練混ぜ時間、混和剤の添加方法の影響などを調査し、分割練混ぜの特性をあきらかにした。今回得られたセメントペーストにおける分割練混ぜの特性をもとに、次章以降の骨材を含めた検討結果を加えて、コンクリートにおけるブリーディングの減少、圧縮強度の増加効果の大きい分割練混ぜ方法を確立することとした。

参考文献

- 1) 黒羽健嗣、早川光敬、伊東靖郎、「モルタルの流動性に関する新試験法の提案」、日本建築学会大会学術講演梗概集、1983年9月、pp277-278
- 2) 田沢栄一、松岡康訓、金子誠二、伊東靖郎、「ダブルミキシングで作成したセメントペーストの諸性質について」、第4回コンクリート工学年次講演会講演論文集、1982年、pp125-128
- 3) 田沢栄一、笠井哲郎、「フレッシュセメントペーストのダブルミキシング効果」、土木学会論文集、第396号、1988年8月、pp135-142
- 4) 長瀧重義、氏家勲、戸矢栄一、「分割混練したセメントペーストの内部組織」、第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集、1983年、pp149-52
- 5) 名和豊春、江口仁、「セメント粒子の分散性状と流動性に関する一考察」、セメント技術年報39、1985年、pp182-185
- 6) 田沢栄一、笠井哲郎、「セメントペーストのダブルミキシング効果とその発生機構」、材料、第39巻第442号、1990年7月、pp1007-1013

第4章 モルタル・コンクリート における分割練混ぜ方法

4. 1 本章の概要

分割練混ぜでコンクリートを製造する場合に、骨材の投入時期がコンクリートのブリーディングや圧縮強度に与える影響を調査した。その結果、細骨材と粗骨材がともに一次練混ぜ時からミキサ内に存在する分割練混ぜ方法によるもので、最も圧縮強度が大きくなることがあきらかになった。

つづいて、分割練混ぜによりコンクリートの圧縮強度が増加する原因を説明するモデルについて検討した。代表的なモデルであるSECモデルとGEMモデルを紹介し、これに実験結果を加えて検討を加えた。その結果、現象を正しく説明するためには、どちらのモデルも単独では十分でなく、特に骨材とマトリックスの界面の性状を調査する必要があることを示した。

4. 2 骨材の投入時期の検討

4. 2. 1 概要

分割練混ぜでコンクリートを製造する場合の、骨材、特に粗骨材の投入時期が、コンクリートの圧縮強度に与える影響を調査した。

4. 2. 2. コンクリートによる実験1

(1) 目的

コンクリートを分割練混ぜで製造する際に、粗骨材の投入時期がコンクリートの圧縮強度に与える影響を調べる目的で実験を行った。

(2) 試験計画

1) 使用材料・調合

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は粗粒率2.61の海砂、粗骨材は最大寸法25mm、粗粒率6.93の砕石を用いた。

混和剤はリグニンスルホン酸系のAE減水剤遅延型を、水は上水道水を用いた。

コンクリートの調合を表4-2-1に示す。

表-4-2-1 コンクリートの調合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 W (kg/m ³)	単位量 (kg/m ³)			
			セメント C	粗骨材 G	細骨材 S	AE減水剤:Ad (ml/m ³)
55	39.1	186	338	1211	678	843

2) 練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜ方法を表-4-2-2に示す。分割練混ぜにおいて細骨材はすべて一次練混ぜ前に投入するものとし、粗骨材の投入時期を一次練混ぜ前 (S-1)、一次練混ぜの途中 (S-2)、およびモルタルを練混ぜた後 (S-3) の3通りの方法を試験した。一次の水セメント比は25%とした。さらに比較のために全材料を同時に投入する一括練混ぜによるもの (N-1) を行った。

練混ぜには容量50リットルの強制パン型ミキサを用いた。

表-4-2-2 練混ぜ方法

記号	練混ぜ方法
N-1	S+G+C+w+Ad (Mix180秒)
S-1	S+G+w1+Ad (Mix10秒) +C (Mix90秒) +w2 (Mix80秒)
S-2	S+w1+Ad (Mix10秒) +C (Mix60秒) +G (Mix30秒) +w2 (Mix80秒)
S-3	S+w1+Ad (Mix10秒) +C (Mix60秒) +w2 (Mix30秒) +G (Mix80秒)

3) 測定

まだ固まらないコンクリートについてはスランブ、空気量、およびブリーディングを測定した。測定方法は各JISに準じて行った。

圧縮強度はφ10cm×20cmの供試体を標準養生し、材齢7日と28日で試験を行った。

(3) 結果

結果を表-4-2-3に示す。

コンクリートの分割練混ぜにおいて、粗骨材の投入時期によって圧縮強度が変化することがわかった。一次練混ぜ時に細粗骨材が両方存在する方法によるもの (S-1) は一括練混ぜによるもの (N-1) に比べて4%程度強度が高くなった。これに対し、粗骨材の投入が後になるS-2とS-3では強度の改善はみとめられなかった。

表-4-2-3 試験結果

記号	スランブ (cm)	空気量 (%)	ブリーディ ング率 (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	
				材齢7日	材齢28日
N-1	15.5	4.0	1.0	285	368
S-1	12.8	4.0	0.3	297	383
S-2	16.8	3.8	0.8	268	369
S-3	14.6	3.9	0.9	272	367

4. 2. 3 コンクリートによる実験2

(1) 目的

コンクリートを分割練混ぜで製造する際に、骨材の投入時期がコンクリートの圧縮強度に与える影響を調べる目的で実験を行った。

(2) 試験計画

1) 使用材料・調合

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は粗粒率3.09の川砂、粗骨材は最大寸法20mm、粗粒率6.43の砕石を用いた。

混和剤は天然樹脂塩系AE剤とナフタリン系高性能減水剤を、水は上水道水を用いた。

コンクリートの調合を表-4-2-4に示す。

表-4-2-4 コンクリートの調合

水セメント 比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 W (kg/m ³)	単位量 (kg/m ³)				
			セメント C	粗骨材 G	細骨材 S	AE剤 Ad1 (0/cwt)	高性能減 水剤:Ad2 (0/cwt)
50	46.4	187	373	941	809	0.02	0.7

2) 練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜ方法を表-4-2-5に示す。分割練混ぜにおいて細骨材と粗骨材を一次練混ぜ前に投入する方法 (S-4)、一次練混ぜをセメントと一次水のみで行う方法 (S-5)、おなじことをモルタルミキサで行い、コンクリートミキサに移して残りの材料を投入する方法 (S-6) の合計3通りの方法を試験した。一次の水セメント比は25%とした。さらに比較のために全材料を同時に投入する一括練混ぜによるもの (N-2) を行った。

練混ぜには容量50リットルの強制パン型ミキサを、また一部で30リットル練り

自転公転式（自転183rpm、公転42rpm）モルタルミキサを用いた。

表-4-2-5 練混ぜ方法

記号	練混ぜ方法
N-2	S+G+C+w+Ad (Mix90秒)
S-4	S+G+w1 (Mix30秒) +C (Mix120秒) +w2+Ad (Mix90秒)
S-5	C+w1 (Mix120秒) +S+G+w2+Ad (Mix90秒)
S-6	C+w1 (Mix120秒=モルタルミキサ) → コンクリートミキサへ移動 +S+G+w2+Ad (Mix90秒)

3) 測定

まだ固まらないコンクリートについてはスランブ、空気量、およびブリーディングを測定した。測定方法は関係する各JISに準じて行った。

圧縮強度はφ10cm×20cmの供試体を標準養生し、材齢7日と28日で試験を行った。

(3) 結果

結果を表-4-2-6に示す。

一次練混ぜ時に細粗骨材が両方存在する方法によるもの (S-4) は一括練混ぜのもの (N-2) に比べ強度が17%程度高くなった。これに対し、一次練混ぜをセメントと水のみで行ったS-5とS-6は一括練混ぜに対する圧縮強度の改善効果は6%以内にとどまった。

表-4-2-6 試験結果

記号	スランブ (cm)	空気量 (%)	ブリーディング率 (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	
				材齢7日	材齢28日
N-2	19.0	4.6	2.20	273	363
S-4	17.5	3.0	0.42	298	425
S-5	17.5	3.6	1.57	283	384
S-6	18.0	4.0	0.87	274	366

4. 2. 4 まとめ

分割練混ぜにおける骨材の投入時期を変化させた二つの実験より、骨材の投入時期がコンクリートの圧縮強度に影響を与えることがあきらかになった。いずれの場合も、最も圧縮強度が高くなるのは、骨材を一次練混ぜの前から投入しておく方法であった。

4. 3 SECモデルとGEMモデル

4. 3. 1 概要

分割練混ぜによるコンクリートで圧縮強度が増加する現象を説明するモデルとして、SECモデルとGEMモデルを紹介する。SECモデルでは、骨材とセメントペーストの付着が改善されることにより強度が増加すると説明している。一方GEMモデルでは、分割練混ぜによるブリーディングの減少によって、粗骨材下部の界面に発生する欠陥の寸法が小さくなるために強度が増加すると説明している。

4. 3. 2 SECモデル

SECコンクリートという呼び方を初めて使ったのは、1980年の日本建築学会大会の学術講演梗概集の中である 1)。そこでは「S.E.C.コンクリートとは、Sand Enveloped with Cement の略で、図-4-3-1の如く骨材の囲りを水セメント比の適当に小さいキャピラリーの状態にしたセメントの皮殻で包んだ状態にしたコンクリートのことである。これにより、ブリーディングが少なく、又、細・粗骨材の分離が少なく、コンクリートの沈降が少なく、さらに圧縮強度が高く、バラツキの少ないコンクリートとなる。」と定義した。この考え方は、2.2で紹介したように、モルタルの研究から提案したものであるため、その名称がセメントに包まれた砂 (Sand Enveloped with Cement) というようになっている。

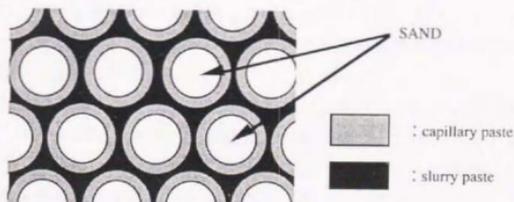


図-4-3-1 SECモデル図 1)

ブリーディングが減少する原理について、当初、ブリーディング水を砂のまわりのセメントペーストの皮殻が閉じ込めるためと説明していた。これは、SECモデルを提案した時点においては、セメントペーストにおける分割練混ぜ効果が発見されていなかったことによるものである。ブリーディングの減少は、骨材の周辺の状況からでなく、水とセメントの関係で論じるべきであることは第3章で述

べたとおりである。

SECコンクリートで強度が増加する原理については、1981年の日本建築学会大会の学術講演梗概集の中で次のように説明した 2)。「骨材の周りに存在する水セメント比の小さいセメントの皮殻は、コンクリートの硬化後の性質についても有利な性質を示すものと思われる。即ち、コンクリート中の骨材とセメントペーストの付着力を、その界面に於て、強度の強い皮殻で包むことによって改善し、圧縮強度や伸び能力、繰返し曲げ耐力や衝撃疲労の面で優れた性質を示す。」このように、骨材とセメントペーストの付着が改善されることにより強度の増進がもたらされるというのがSECモデルの説明である。

4. 3. 3 GEMモデル

分割練混ぜを行ったコンクリートにおいて、圧縮強度が増加するメカニズムを、分割練混ぜによるブリーディングの減少によって、粗骨材下部の界面に発生する欠陥の寸法が小さくなるためと説明するのがGEMモデル (Gravel Enveloped with Mortar) であり、田沢ら (1989) 3) によって提唱されている。その論文では、分割練混ぜ (論文中ではDMと称されている) で製造したコンクリートの圧縮強度が増加するメカニズムをあきらかにすることを目的としてセメントペースト、モルタル、コンクリートについてのブリーディングと圧縮強度の関係を実験的に検討している。さらにコンクリートを骨材とモルタルの2相モデルに置き換え、その界面にブリーディングを想定して設けた人工欠陥がモデルコンクリートの圧縮破壊性状に及ぼす影響について検討している。このうち、セメントペースト、モルタル、コンクリートにおけるブリーディングと圧縮強度の関係についての実験的検討は以下のものである。

この研究ではセメントペースト、モルタル、コンクリートについて練混ぜ方法を変えて、ブリーディングとその圧縮強度との関係について検討している。また、コンクリートについては粗骨材の最大寸法、コンクリートの容積に対する粗骨材容積比を変化させている。また、モルタル、コンクリートについて、圧縮強度の供試体寸法の影響を試験し、均一性係数について検討している。

コンクリートの配合は表4-3-1に示すとおりである。

コンクリートは、セメントペーストをホバート型モルタルミキサーで製造した後、100 l のパン型強制練りコンクリートミキサーを用いてセメントペーストと細・粗骨材を練り混ぜて製造している。練混ぜ方法は表4-3-2に示すとおりSM(従来の練混ぜ方法)、DMおよびSECである。高性能減水剤の添加はモルタル、コンクリートとも、SMでは練混ぜ水に、DMでは一次水に溶かして行っている。

DM、SECにおける一次水セメント比 (W1/C) は、24% (高性能減水剤を一次水に添加した場合は21.5%) および9%であり、このW1/Cはそれぞれセメントペーストにおいてブリージングが最小および最大値を示す場合のものである。

表-4-3-1 コンクリートの配合 3)

No.	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					粗骨材	
				W	C	S	G	Ad	粒度(mm)	岩種
①	40	60	40	178	297	713	1144	0.743	標準粒度	フォルンフェルス
②	25、40	60	39	178	297	713	1144	0.743	標準粒度	石灰岩
③	20	60	37	174	290	697	1220	0.726	10~20	石灰岩
④	30	60	37	174	290	697	1220	0.726	20~30	石灰岩
⑤	40	60	37	174	290	697	1220	0.726	30~40	石灰岩
⑥	30	60	54	223	372	893	813	0.930	20~30	石灰岩

表-4-3-2 練混ぜ方法 3)

成分	方法
セメントペースト	SM : W $\xrightarrow{L: 0.5分}$ $\xrightarrow{+C}$ $\xrightarrow{H: 3分}$ 排出
	DM : W1 $\xrightarrow{L: 0.5分}$ $\xrightarrow{+C}$ $\xrightarrow{H: 1分}$ $\xrightarrow{+W2}$ $\xrightarrow{H: 2分}$ 排出
モルタル	SM : W $\xrightarrow{L: 0.5分}$ $\xrightarrow{+C}$ $\xrightarrow{H: 2分}$ $\xrightarrow{+S}$ $\xrightarrow{H: 1.5分}$ 排出
	DM : W1 $\xrightarrow{L: 0.5分}$ $\xrightarrow{+C}$ $\xrightarrow{H: 1分}$ $\xrightarrow{+W2}$ $\xrightarrow{H: 1分}$ $\xrightarrow{+S}$ $\xrightarrow{H: 1.5分}$ 排出
	SEC : (W1+S) $\xrightarrow{L: 0.5分}$ $\xrightarrow{+C}$ $\xrightarrow{H: 1.5分}$ $\xrightarrow{+W2}$ $\xrightarrow{H: 2分}$ 排出
コンクリート	SM : W $\xrightarrow{L: 0.5分}$ $\xrightarrow{+C}$ $\xrightarrow{H: 2分}$ $\xrightarrow{+(S+G)}$ $\xrightarrow{1.5分}$ 排出
	DM : W1 $\xrightarrow{L: 0.5分}$ $\xrightarrow{+C}$ $\xrightarrow{H: 1分}$ $\xrightarrow{+W2}$ $\xrightarrow{H: 1分}$ $\xrightarrow{+(S+G)}$ $\xrightarrow{1.5分}$ 排出
	SEC : (W1+S)+C $\xrightarrow{1.5分}$ $\xrightarrow{+(W2+G)}$ $\xrightarrow{2分}$ 排出

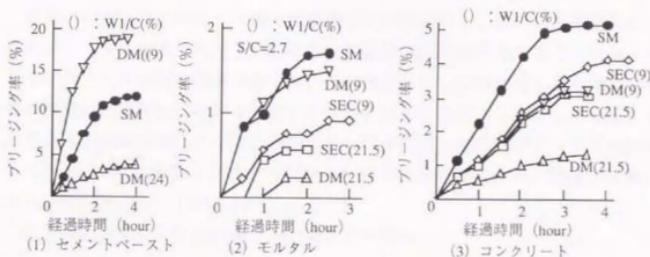


図4-3-2 プリージング率の経時変化 3)

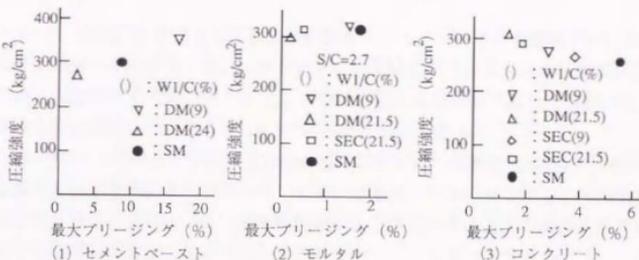


図4-3-3 最大フリージング率と圧縮強度の関係 3)

図4-3-2はセメントペースト、モルタルおよびコンクリートのフリージング率の経時変化を示したものである。モルタル、コンクリートの場合DM、SECともW1/Cに関係なくフリージングはSMの場合より小さくなっている。

図4-3-3は最大フリージング率と圧縮強度の関係をセメントペースト、モルタル、コンクリートについてそれぞれ示したものである。セメントペーストの場合、フリージングが大きく実質W/Cが小さいほど圧縮強度が大きくなっている。モルタルの場合はフリージングとの相関は明瞭ではなく、フリージングによらずほぼ一定の圧縮強度を示している。一方、コンクリートの場合セメントペーストの場合とは逆で、フリージングの増加に伴い圧縮強度は低下している。また、SECとDMには差が認められず、フリージングと圧縮強度の相関のみが認められたとしている。これらのことから、SECとDMは本質的には同等のもので、コンクリートの強度増大の効果は両者ともモルタルのフリージングが減少することにより、

粗骨材の下に空隙が生じにくくなるためであると説明している。

また、モデルコンクリートの圧縮破壊特性の試験から、粗骨材を模擬したインクルージョンとモルタルマトリックスの境界面に欠陥が存在することによりモデルコンクリートの圧縮強度は低下し、その低下量は、欠陥が長くなるほど、またその位置が加力方向に対して垂直となるほど大きくなることを示している。このことから分割練混ぜにより強度が改善される理由は、ブリーディングの減少によって粗骨材下部の界面に発生する欠陥の寸法が小さくなるために強度が改善されると説明できるとしている。

以上が田沢らによるGEMモデルの考え方である。

4. 4 圧縮強度が増加するメカニズムの検討

4.3で、分割練混ぜにより圧縮強度が改善されるメカニズムを説明する代表的な2つのモデルを紹介した。SECモデルでは骨材とマトリックスの付着に原因を求め、GEMモデルではブリーディングの減少による粗骨材下部の欠陥が少なくなることで説明していることは4.3で述べたとおりである。

このうち、GEMモデルは直感的にも理解しやすく、田沢ら(1989)3)の綿密な実験から十分実証されたものとしてよいと考えられる。すなわち、圧縮強度の増加のメカニズムの一つは、分割練混ぜによるブリーディングの減少により粗骨材下部の欠陥が少なくなるためといえる。

一方SECモデルについて、田沢らは否定的な見解を示している。すなわち、実験ではSECとDMで差が認められず、ブリーディングと圧縮強度の相関のみが認められたことから、SECとDMは本質的に同等のものであるとしている。しかし、この議論の根拠になっている、田沢らの実験におけるSECコンクリートの練混ぜ方法は、表4-3-2に示されるように、一次練混ぜ時に存在する骨材は細骨材のみであり、粗骨材は二次水とともに投入されている。SECモデルでいう骨材とマトリックスの付着が改善される効果は、一次練混ぜ時に水セメント比の小さなセメントペーストが骨材を覆うことによるものであるから、この実験における付着改善効果は、セメントペーストと細骨材の間のみ期待できることになる。つまり、先に引用した田沢らの検討では、粗骨材を一次練混ぜから投入した分割練混ぜ法における強度増進を説明するSECモデルについては否定も肯定もしていないことになる。

また、4.2に示したコンクリートの分割練混ぜにおける骨材の投入時期を変化させた二つの実験では、骨材の投入時期がコンクリートの圧縮強度に影響を与え

ることがあきらかになっている。いずれの場合も、最も圧縮強度が高くなるのは、骨材を一次練混ぜの前から投入しておく方法であった。二つの実験では細粗骨材両者を一次練混ぜ前から投入したもののブリーディングが小さかったため、GEMモデルと矛盾する結果となったわけではないが、骨材とマトリックスの付着が改善されるというSECモデルを裏付ける結果とも考えられる。

これらのことから、圧縮強度の増加の理由の説明に、GEMモデルは有効であるが、一方SECモデルも成立している可能性があることになる。しかし、SECモデルについては骨材界面が実際に改善されているか否かが直接確認されているわけではない。このため、骨材界面の性状について次章以降で検討して行くことにした。

4. 5 まとめ

モルタル・コンクリートにおける分割練混ぜの特性を検討した。ここでは特に一次水、セメントおよび骨材により一次練混ぜを行ない、これに二次水を加えて二次練混ぜを行なう場合と、一次練混ぜは一次水とセメントで行ない、骨材は一次練混ぜ終了後に投入する場合を比較検討した。その結果、一次練混ぜを骨材を含めて行なう方法が圧縮強度の増大により大きな効果があることがわかった。

分割練混ぜによりコンクリートの圧縮強度が増加する原因を説明するモデルについて検討した。代表的なモデルであるSECモデルとGEMモデルを紹介し、これに骨材の投入時期を変化させたコンクリートの実験結果を加えて検討を加えた。その結果、圧縮強度が増加する理由の説明に、GEMモデルは有効であるが、一方SECモデルも成立している可能性があることをあきらかにした。しかし、SECモデルについては骨材界面が実際に改善されているか否かが直接確認されているわけではない。このため、コンクリートを一次練混ぜ前に骨材を投入する分割練混ぜ方法で製造した場合の、骨材とマトリックスの界面である遷移帯の組織と、骨材とマトリックスの付着性状について、次章以降で検討して行くことにした。

参考文献

- 1) 山本康弘、加賀秀治、黒羽健嗣、早川光敬、伊東靖郎、「S.E.C.コンクリートの研究(特性と強度)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、1980年9月、pp57-58
- 2) 早川光敬、加賀秀治、山本康弘、伊東靖郎、黒羽健嗣、丸嶋紀夫、「S.E.C.(造殻)コンクリートの物性に関する研究」、日本建築学会大会学術講演梗概集、

1981年9月、pp91-92

- 3) 田沢栄一、笠井哲郎、岡本修一、「ダブルミキシングで製造したコンクリートの圧縮強度」、土木学会論文集、第408号、1989年8月、pp139-146

第5章 分割練混ぜ方法により コンクリートの圧縮強度が増加する機構

5.1 本章の概要

前章では、分割練混ぜによりコンクリートの圧縮強度が増加する現象を説明するためのモデルにGEMモデルとSECモデルがあることを述べた。強度増加の原因を分割練混ぜによるブリーディングの減少が骨材下面の欠陥を減少させるためと説明するGEMモデルについては、有効なモデルであると考えた。しかし、4.2に示した粗骨材の投入順序による強度の差は、一次練混ぜによる骨材とマトリックスの付着性状の改善により強度増加がもたらされるというSECモデルのほうがより明解な説明をあたえるものと考えられる。しかし、骨材とマトリックスの付着性状などが改善されることを示す直接的なデータはこれまでに得られていない。

本章では、はじめに文献調査によりコンクリート中の遷移帯と呼ばれる骨材のごく近傍のマトリックスの組織が、一般のセメントペーストの組織に比べて粗く、コンクリート全体の中で弱い部分となっていることを示した。また、遷移帯の組織が改善されることにより、コンクリートの圧縮強度も改善されるものであることを示した。

次に、粗骨材が一次練混ぜ時から存在する分割練混ぜ方法でコンクリートを製造した場合の、コンクリート中の骨材界面の状態と、骨材とマトリックスの付着性状を調べることを目的に、以下の試験を行った。はじめに、水セメント比25%のフレッシュセメントペーストと一旦接触させた岩石のまわりにセメントペーストを打ち込んだ試験体について、直接引張試験、X線回折法による分析、および押し抜き試験の3種類の試験を行なった。この結果、岩石をセメントペーストに一旦接触させる処理を行うことで、岩石近くのセメントペーストの組織が密になり、付着強度が高くなることをあきらかにした。続いて、練り混ぜたコンクリートからあらかじめ混ぜ込んだ成形骨材とその周囲のモルタルを取り出し、硬化後の界面のX線回折法による分析を行なった。その結果、粗骨材が一次練混ぜ時から存在する分割練混ぜ方法で、コンクリート中の骨材界面の状態が改善されている可能性が高いことを示した。

5. 2 文献調査

5. 2. 1 コンクリート中の骨材界面の状態

コンクリート中の骨材界面の状態について、研究者によって報告されていることに違いはあるが〔例えば岩崎ら(1975)1)、内川(1989)2)、C.A.lanptonら(1980)3)、R.Zimbelmann(1985)4)〕、一般に認められていると思われることをまとめると次のようになる。骨材の近く、 $40\mu\text{m}$ 程度までは通常のペーストよりポーラスになっている。この範囲は遷移帯(Transition Zone)と呼ばれており、2層構造になっていることが多い。骨材付近には $2\sim 3\mu\text{m}$ の水酸化カルシウムとエトリンガイト結晶からなる薄い膜があり、その上に針状やパネル状の結晶からなる層ができる。また骨材に近い部分では水酸化カルシウムの結晶が一定の方向にならぶ傾向がある。

この骨材界面の一般的な状況については、セメント・コンクリートの1994年5月号のC&Cエンサイクロペディアのページに、菅谷(1994)5)により解りやすく書かれているので以下に要約して紹介する。

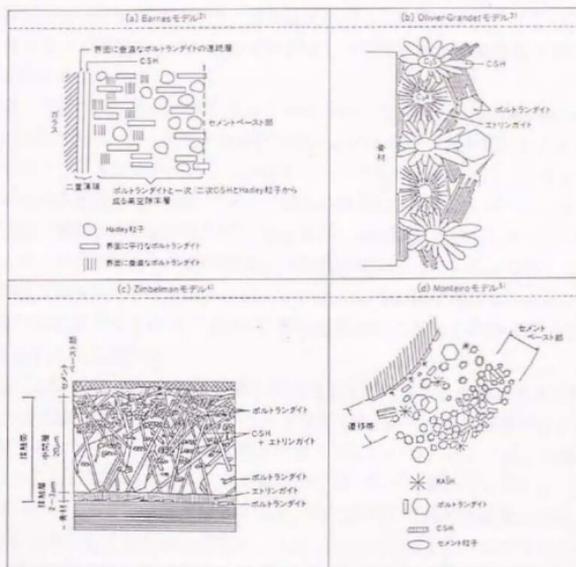
骨材とセメントペーストの界面にはセメントペースト部と不連続な領域がある。この領域は「遷移帯(transition zone)」と呼ばれ、Caに富んだ水和物から成る空隙量の大きな部分である。この遷移帯は、骨材表面から約 $40\mu\text{m}$ 以内の領域に形成される。一般に、コンクリート中の骨材の平均間隔は $75\sim 100\mu\text{m}$ であるので、コンクリートの諸物性に関して遷移帯の影響は無視できない。

この遷移帯の厚さはセメントや骨材の種類、骨材径、コンクリートの配合、材齢で変化する。たとえば、骨材径が大きくなるほど、水セメント比が高いほど遷移帯は厚くなる。さらに遷移帯の厚さは材齢によって変化し、1週材齢まで急激に増加した後、徐々に薄くなってゆく。

これまでに報告されている遷移帯の構造モデルの模式図を示したのが図-5-2-1である。骨材表面には六角板上のボルトラングナイト(水酸化カルシウム結晶)が析出する。多くの場合は骨材表面にボルトラングナイトの平板状の結晶面、すなわち(001)面が平行に配向するが、(001)面が垂直に配向する場合や、配向の認められない場合もある。このボルトラングナイトによって形成される領域は骨材表面から $10\sim 20\mu\text{m}$ の厚さを有し、その結晶配向度は骨材表面で大きく、セメントペースト部に向かうに従って小さくなる。

一方、C-S-Hは骨材表面からセメントペースト部に行くに従い多くなる。これらの遷移帯に生成する水和物の種類および析出量は、セメントと骨材の種類によって著しく異なる。たとえば、高炉セメントではスラグのボゾラン反応によりボ

ルトランダイトが消費されるためにその量は少なくなる。また、石灰石骨材を使用した場合は、骨材表面での骨材自身の水和も加わるため水和物の析出量は多くなる。



- 2) Barnes, B.D., Diamond, S., and Dolch, W.L., The contact zone between portland cement paste and glass "aggregate" surfaces, *Cem. Concr. Res.*, 8[2], pp.233-244, 1978
- 3) Olivier, J.P. and Grandt, J., Processus de formation de l'aurole de transition, Liaison pates de ciment matériaux associés, *Cill. Int.*, Toulouse, France, pp.A-14aA-22, 1982
- 4) Zimbelman, R., Contribution of cement-aggregate bond, *Cem. Concr. Res.*, 15[5], pp.801-808, 1985
- 5) Monterio, P.J.M., Improvement of the aggregate-cement paste transition zone by grain reinforcement of hydration products, 8th Int. Cong. on the Chem. of Cement, Rio, Brasilia, 3, pp.433-437, 1976

図-5-2-1 遷移帯の構造モデル 5)

5. 2. 2 界面の性状とコンクリートの品質

分割練混ぜにおける圧縮強度の改善の説明で、骨材とマトリックスの界面が改善されることにより圧縮強度が増加するという説明がなされているが、実際に骨

材界面の性状が、どの程度圧縮強度に影響を与えるものかを文献調査により検討する。

小阪ら(1971)6)、(1975)7)はモデル粗骨材の表面にパラフィンを塗布したのを用い、コンクリートの圧縮強度の調査を行っている。その結果、パラフィン被覆骨材を用いたコンクリートの強度は著しく小さくなった。このことから、粗骨材の表面が強度の小さいものであれば、コンクリートの強度も小さくなることがわかる。

逆に、骨材の界面組織が密になると強度が高くなる例として、Benturら(1987)8)の報告がある。水セメント比が同一で、シリカフェームを混入したものではないもので、セメントペーストとコンクリートで比較試験を行っている。その結果、ペースト強度ではシリカフェーム混入の効果はみられないが、コンクリートでは強度の増加がみられたとしている。また、SEM観察ではシリカフェームの混入により、コンクリート中の骨材界面の組織が密になっていた。このことから、この実験におけるシリカフェーム混入コンクリートの強度増加は、セメントペースト部分の強度によるものではなく、界面組織が密になったために増加したものと考えられるとしている。

内川(1995)9)は、この遷移帯には毛細管空隙の中でも比較的大きい径 50nm ~ $2\mu\text{m}$ の空隙が多いこと、コンクリート強度が 50nm ~ $2\mu\text{m}$ の空隙の量と密接な関係があること、さらに遷移帯の厚さが厚くなるにつれ、コンクリート強度が小さくなることを指摘している。その説明の一部を以下に要約して示す。

直径 3nm ~ $2\mu\text{m}$ を毛細管空隙とすると、硬化体中の毛細管空隙量は材齢の進行とともに減少する。硬化セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの空隙量分布の材齢の進行に伴う変化を図-5-2-2に示す。セメントペーストでは遷移帯

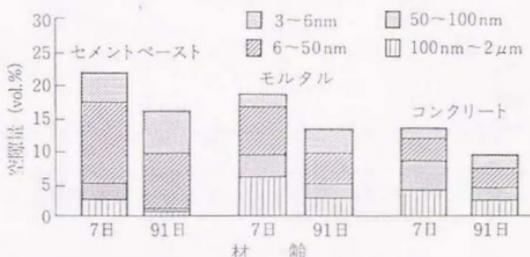


図-5-2-2 硬化セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの空隙量分布の材齢の進行に伴う変化 (W/C=0.5, 20°C) 9)

が存在しないため、モルタルやコンクリートに比べ50nm~2 μ mの大径の空隙量および全空隙に占める径50nm~2 μ mの空隙量の割合が少なく、しかも材齢が経過するとその量が激減し、材齢91日では3~50nmの小径の空隙の量が全空隙量の95%以上を占める。一方、コンクリートでは材齢が経過しても50nm~2 μ mの大径の空隙の減少割合は小さく、材齢91日においてもその量は全空隙量の1/2以上を占めている。径50nm~2 μ mの大径空隙は、大部分が硬化コンクリートの遷移帯を構成する空隙と見なされる。同様に、モルタルの遷移帯は20から800nmの空隙で構成されている。

セメントペーストの強度はセメント水和生成物の凝集エネルギーから計算した値の1/10~1/10000である。また大部分のコンクリートはセメントペーストと骨材との境界面で破断される。これらの事実は、固体に力が加わった場合、何らかの理由により、組織中の特異点に応力が集中することを示し、特異点としては、組織中の空隙や構造欠陥等が挙げられる。

セメントペーストでは圧縮強度は6nm~2 μ mの毛細管空隙量と高い相関を示すのに対し、モルタルおよびコンクリートでは50nm~2 μ mの空隙と高い相関を示す。W/C=0.4~0.6のAEコンクリートおよびW/C=0.55でセメントペースト部分の体積割合が52~80%のモルタルの50nm~2 μ mの毛細管空隙量と圧縮強度との関係を図-5-2-3に示す。セメントペースト単位体積当たりに換算した50nm~2 μ mの

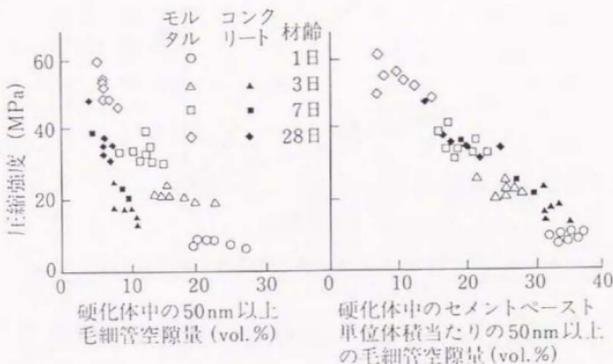
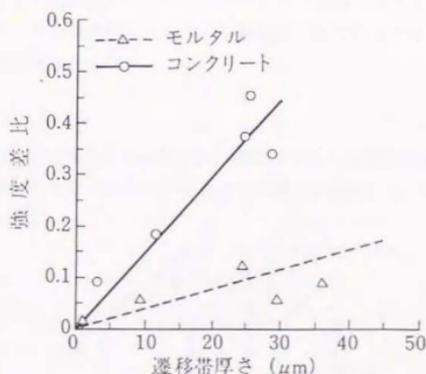


図-5-2-3 コンクリートおよびセメントペースト部分の体積割合が52~80%のモルタルの50nm~2 μ mの毛細管空隙量と圧縮強度の関係 9)

毛細管空隙量とモルタルおよびコンクリートの圧縮強度との間には、直線関係がある。これらの事実は、コンクリートの強度が径50nm~2 μ mの毛細管空隙の量、すなわち遷移帯の構造と組織に密接に関連していることを示すものであるとしている。

遷移帯厚さと、セメントペースト強度とモルタルまたはコンクリート強度との差をペーストの強度で除した値との関係を示したのが図-5-2-4である。モルタルおよびコンクリートとも、遷移帯の厚さが厚くなるにつれ、強度発現は低くなり、ペースト強度との差は大きくなる。同じ遷移帯厚さに対する強度は、コンクリートの方がモルタルより低い。遷移帯厚さと強度差比との関係線の勾配は、モルタルではコンクリートの約1/4であり、遷移帯の生成に伴う強度低下はコンクリートほど大きくない。これは、モルタルではセメントペースト部分に占める遷移帯組織の割合がコンクリートに比べて少なく、遷移帯の空隙径分布が小径側にシフトしているためであると考えている。



$$\text{強度差比} = \frac{\text{ペーストの強度} - \text{モルタルまたはコンクリートの強度}}{\text{ペーストの強度}}$$

図-5-2-4 遷移帯厚さと強度差比との関係 (W/C=0.5, 20℃) 9)

内川の以上の説明によっても、骨材とマトリックスの界面の性状がコンクリートの圧縮強度に明確に影響をあたえるものであることがわかる。

5. 3 分割練混ぜによるコンクリート中の骨材界面 10)

5. 3. 1 概要

粗骨材が一次練混ぜ時から存在する分割練混ぜ方法でコンクリートを製造した場合の、コンクリート中の骨材界面の状態と、骨材とセメントペーストないしモルタルとの付着性状を調べることを目的に試験を行った。はじめに、水セメント比25%のフレッシュセメントペーストに一旦接触させた岩石のまわりにセメントペーストを打ち込んだ試験体について、直接引張試験、X線回折法による分析、および押し抜き試験の3種類の試験を行なった。続いて、練り混ぜたコンクリートからあらかじめ混ぜ込んだ成形骨材とその周囲のモルタルを取り出し、硬化後の界面のX線回折法による分析を行なった。

5. 3. 2 直接引張試験およびX線回折法による分析

(1) 試験の目的

骨材を水セメント比の低いセメントペーストと一旦練り混ぜる方法が、骨材付近のセメントペーストの状態にどのような影響を与えているのかを調査することを目的に試験を行なった。

(2) 試験方法

1) 概要

骨材を模擬するものとして2cm角の立方体に成形した硬質砂岩を用いた。この岩石のわきにセメントペーストを打ち込んで試験体を製造した(図-5-3-1)。

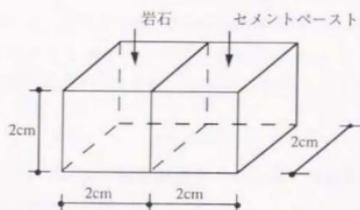


図-5-3-1 直接引張試験およびX線回折法による分析用試験体の形状 10)

試験体製造後7日目に直接引張試験を行ない、岩石とセメントペーストを剥離させた後、剥離面をX線回折法により分析して水酸化カルシウム結晶の配向度を調査した。本実験の前に材齢と配向度の関係を調査し、材齢7日における配向度

は材齢28日に比べ幾分高くなる傾向があるものの、その値に大きな違いはないことを確認した。

2) 試験体の種類

試験体は次の9種類とし、それぞれ3体ずつ製造した。まずセメントペーストを打ち込む前の岩石の処理を以下の3種類とした。1日以上水中に保存したものをビンセットでつかみ、強く振って水をきったもの（湿潤状態と呼ぶ、記号=W）、研究室に置いておいたもの（乾燥状態と呼ぶ、記号=D）、湿潤状態のものを練混ぜ直後のW/C=25%のセメントペーストに30秒間押し付けたもの（模擬SECと呼ぶ、記号=S）である。模擬SECでセメントペーストに押し付けた後の岩石の状態は、岩石表面の水膜がとれて幾分白っぽくなる程度で、目に見える厚さでセメントペーストが残存することはなかった。

また、セメントペーストはブリーディングの影響を小さくするため、すべて分割練混ぜ方法により製造した。セメントペーストの水セメント比は40、50、60%の3種類とした。先の岩石の処理の3種類と、セメントペーストの水セメント比の3種類の組み合わせで合計9種類とした。

3) 試験体の製造および養生

セメントペーストは日本セメント社製の普通ポルトランドセメントと上水道水を用いて製造した。用いたミキサは容量5リットルのモルタルミキサである。セメント1kgにまず250gの水を加えて低速で3分間練り混ぜた後、所定の水セメント比になるよう二次水を加えてさらに3分間練り混ぜた。このように、一次の水セメント比は25%となるようにした。

骨材を模擬するものとして千葉県銚子市外川町産の硬質砂岩を2cm角の立方体に成形したものをを用いた。これを2cm×2cm×8cmの型枠内に片側が2cmあくように置き、その空間にセメントペーストを打ち込んだ。

作製した試験体は20℃の室内に1日おいたあと、脱型し、20℃の水中に試験時まで保管した。

4) 直接引張試験

岩石部およびセメントペースト部を側面からつかみ、直接引張により破断する時の荷重を記録した。試験は材齢7日で行なった。

5) X線回折法による分析

引張試験を終ったものについて直ちに測定を行なった。供試体を固定したホルダーをX線回折装置にセットし、Cuターゲットを用いて、回折角 2θ で18度付近と34度付近を含む範囲を、1分間4度の速度で測定した。

基本的な測定方法および結果の評価方法はGrandet等（1980）11）の方法に準

じた。セメントペースト側の供試体について、X線回折装置による測定を終えた試料をとりだし、0.1mgまで表示する電子秤で重量を測定した。測定面を400番のエメリーパーで研磨し、再度重量測定後、ふたたびX線回折法による分析を行った。研磨前後の重量差とセメントペーストの計算上の単位容積質量より研磨された深さを推定した。この操作を各供試体について4回繰り返した。水酸化カルシウムの結晶の配向度 (I) を34度付近のピークの大きさであらわされる(101)面のX線回折強度と18度付近のピークの大きさであらわされる(001)面のX線回折強度から次式を用いて評価した。

$$I = \{ (001) \text{面の回折強度} / (101) \text{面の回折強度} \} \div 0.74$$

Iが1.0の時、水酸化カルシウムの結晶が配向性をもたずに、ランダムに存在していることを意味しており、数値が大きくなるほど水酸化カルシウム結晶のC軸が界面に垂直な方向にならぶ傾向が強いことを示している。

なお、試験体は1条件について各3体製作したが、直接引張試験で岩石上にセメントペーストが残り、平滑な破断面が得られなかったものについてはX線回折法による分析を行なわなかった。このため、水セメント比が50および60%のものではX線回折法による分析を行なう供試体は各2体とした。

(3) 結果と考察

1) 直接引張試験

結果を図-5-3-2に示す。同一条件の供試体の結果に相当大きなばらつきがみら

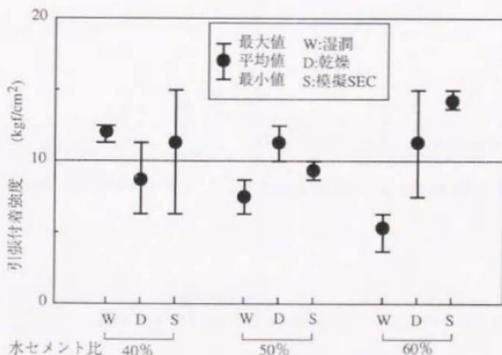


図-5-3-2 直接引張試験結果 (10)

れたが、傾向としては以下の事項が認められた。水セメント比40および50%では岩石の状態によって引張付着強度はさほど違わない。水セメント比が60%では、岩石の表面が湿潤であると、乾燥したものおよび模擬SECのものに比べ引張付着強度が小さくなる。

2) X線回折法による分析

直接引張試験により破断した供試体のセメントペースト側のX線回折法による試験結果の一例を、水セメント比60%について、界面からの距離を変え、湿潤状態の岩石の結果を図-5-3-3に、模擬SECの結果を図-5-3-4に示す。

また、ペースト側の測定による骨材からの距離と水酸化カルシウムの結晶の配向度 (I) の関係を図-5-3-5~7に示す。

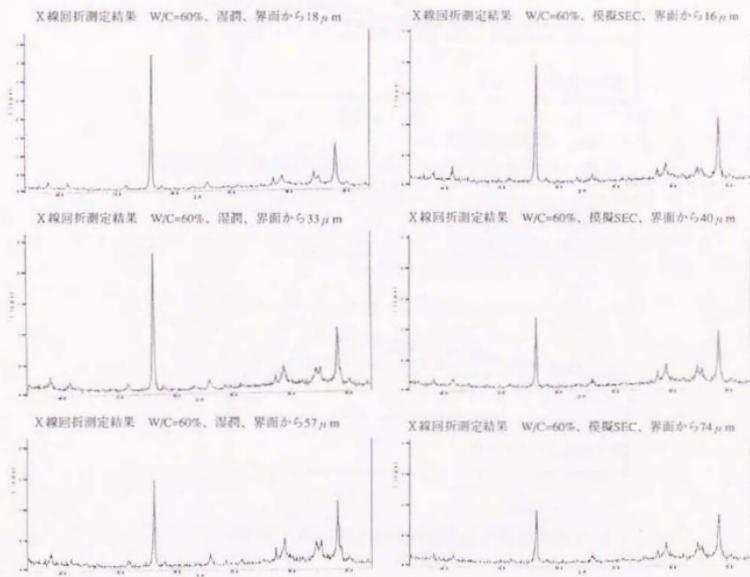


図-5-3-3 X線回折測定例(湿潤)

図-5-3-4 X線回折測定例(模擬SEC)

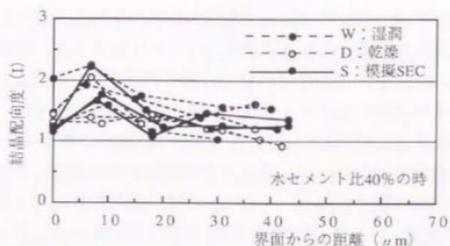


図-5-3-5 界面からの距離とCa(OH)₂結晶の配向度の関係-1 10)

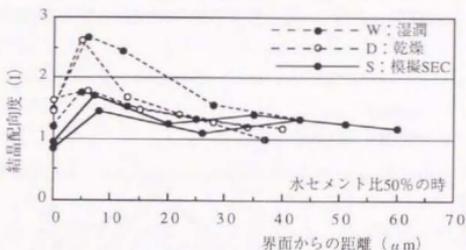


図-5-3-6 界面からの距離とCa(OH)₂結晶の配向度の関係-2 10)

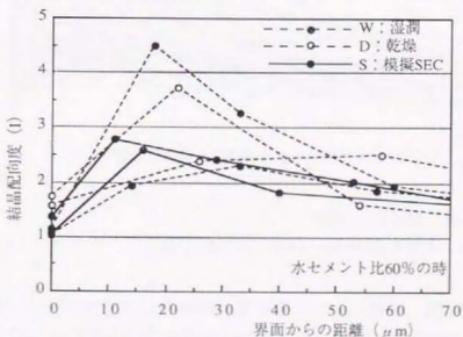


図-5-3-7 界面からの距離とCa(OH)₂結晶の配向度の関係-3 10)

図-5-3-5より、水セメント比が40%の時、水酸化カルシウムの結晶の配向度は岩石の表面状態による影響をほとんど受けていないことが分かる。ところが図-5-3-6、7より、水セメント比が50、60%と高くなってくると、模擬SECのもの

配向度が湿潤または乾燥状態のものの配向度より小さくなる傾向がみられる。また、いずれの状態のものも水セメント比が高くなるほど配向度が高くなる傾向が見られるが、模擬SECでは高くなる割合が他のものに比べて小さいことがわかる。

事前に行なった予備試験の結果を含め、水セメント比が50%のものの結果を図5-3-8に示す。データ数は模擬SEC12点、それ以外24点である。実線が模擬SECによるものであり、破線がそれ以外のものを表している。総じて模擬SECによるものが水酸化カルシウムの結晶の配向度が低く、配向度の高い範囲が短くなっていることがわかる。配向度の最大値の平均は模擬SECで1.57、模擬SEC以外で2.03、標準偏差はそれぞれ0.53、0.44となっている。また模擬SECでは配向度が最大となる場所の骨材からの距離の平均は12.1 μm であり、模擬SEC以外では17.5 μm であった。

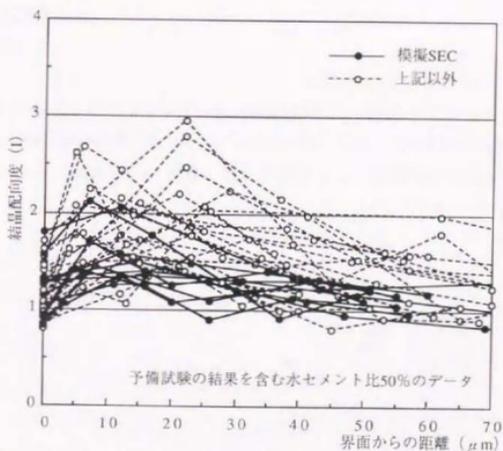


図5-3-8 界面からの距離とCa(OH)₂結晶の配向度の関係 10)

直接引張試験とX線回折法による分析の結果を比べてみると、湿潤状態では、水セメント比が高くなると引張付着強度が低くなり、結晶の配向度が高くなっている。模擬SECでは、水セメント比が変わっても引張付着強度、配向度ともに大きく変わらない。以上の点では引張付着強度と水酸化カルシウム結晶の配向度は相関がありそうに見える。ところが岩石が乾燥した状態では、水セメント比が高くなっても引張付着強度はあまり変わらないが、配向度は高くなっている。今回の結果

からは配向度の大きさと引張付着強度には直接的な関係はないものと推察された。

5. 3. 3 骨材の押し抜き付着試験

(1) 試験の目的

前章では骨材を一旦水セメント比の低いセメントペーストと練り混ぜる方法で、骨材付近の水酸化カルシウムの結晶の配向度を小さくする効果があることが認められた。しかし、引張付着強度には明確な差は認められなかった。すなわち、練混ぜ方法により異なった組織ができることはあきらかになったが、この組織の違いが機械的性質にどのように影響を与えているかは不明確であった。

ここでは、練混ぜ方法が付着特性に与える影響を明かにすることを目的に、付着特性の試験方法の中では組織の違いの影響がやすいと考えられる押し抜き方式の試験を行なった。

(2) 試験方法

1) 概要

三井(1991)12)の提案したPush-out試験に準じ、直径 ϕ 12.7mm、高さ9mmに成形した硬質砂岩の周囲にセメントペーストを打込み、7日後に砂岩部分を上から押し抜くように載荷して、荷重と変位を測定した。供試体の形状を図-5-3-9に示す。

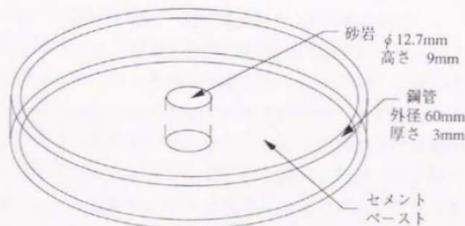


図-5-3-9 押し抜き試験用試験体の形状 10)

2) 試験体の種類

試験体は次の18種類とし、それぞれ3体ずつ製造した。

まず岩石の側面(付着面となる部分)の表面粗さを2種類(平滑・粗面)とした。平滑な面は#400のカーボランダムを用いて作製したもので、粗面の方は#60で作製した。つぎにセメントペーストを打ち込む前の岩石の処理をX線回折法による分析の時と同様、湿潤状態(W)、乾燥状態(D)、および模擬SEC(S)の

3種類とした。セメントペーストの水セメント比は40、50、60%の3種類とした。このように岩石表面の粗さ2種、表面処理の3種類、水セメント比の3種類の組合せで合計18種類とした。

3) 試験体の製造および養生

セメントペーストは5.3.2と同じ分割練混ぜ方法で製造した。

骨材を模擬するものとして、直径 ϕ 12.7mm、高さ9mmに成形した千葉県外川町産の硬質砂岩を用いた。型枠として外径が60mm、厚さ3mmの鋼管を長さ9mmに切断したものをを用いた。鋼管をプラスチックの平板上に置き、成形した岩石を鋼管の中央に置いて周囲に岩石と同じ高さまでセメントペーストを打ち込んで製造した。

作製した試験体は20℃の室内に1日おいたあと、20℃の水中に試験時まで保管した。

4) 押し抜き試験

試験は変位制御型の試験機を用い、1分間に0.1mmの速度で岩石を押し抜くように載荷し、荷重と変位を測定記録した。記録紙はフルスケール500kgとし、記録速度は20mm/minとした。なお、試験材齢は7日とした。

(3) 結果と考察

荷重と変位の関係の一部を図-5-3-10に示す。また、各供試体の最大荷重を図-5-3-11、12に示す。試験体数は一条件について3体である。

図-5-3-11に示すように、岩石の表面が平滑な状態では水セメント比の影響、岩石の含水状態およびペースト処理の影響はともに小さいことがわかる。ただし、模擬SECによるものは他に比べて最大荷重が若干高くなる傾向がみられた。

図-5-3-12に示すように岩石の表面が粗になると試験条件の影響が明瞭に現れるようになる。水セメント比40%では岩石の状態による結果の差はほとんどない。ところが、水セメント比が50、60%と大きくなると岩石の状態によって最大荷重に差が生じてくる。水セメント比60%では、模擬SECの押し抜き強度は湿润状態のもの1.76倍、乾燥状態のものに比べても1.28倍になっている。

岩石が湿润状態であると、表面水により周囲のセメントペーストの水セメント比が高くなる。このため湿润状態のもので強度が低くなるのは当然と考えられる。しかし、模擬SECが乾燥状態のものに比べても高くなっていることで、水セメント比25%のセメントペーストに押し付ける処理は表面水を取り除く以上の効果を示していることになる。

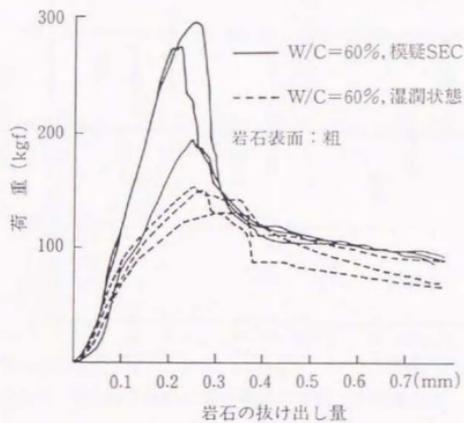


図-5-3-10 押し抜き試験結果の例 10)

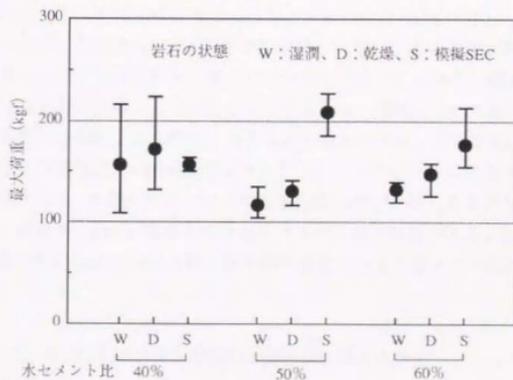


図-5-3-11 押し抜き試験における最大荷重 (岩石表面平滑) 10)

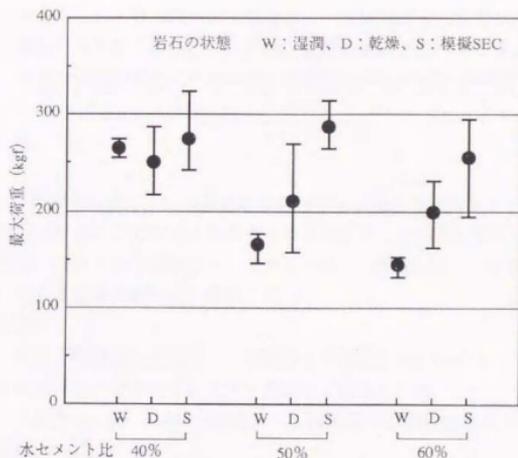


図-5-3-12 押し抜き試験における最大荷重 (岩石表面粗) 10)

表面が粗な岩石で押し抜き強度に差が生じたのは、表面の凹凸とからみあう部分の強度が異なっていたためと考えられる。岩石の表面の凹凸の大きさが $20\mu\text{m}$ 程度はあるので、表面から $20\mu\text{m}$ 程度までのセメントペースト強度が押し抜き強度に影響することが予想される。水セメント比が50ないし60%で、模擬SECの押し抜き強度が普通のものより高くなっていることは、模擬SECの界面付近の強度が普通のものより高いことを示しているものと考えられる。このことはX線回折法による分析で模擬SECの配向度が小さくなっていることとよく符合する。すなわち模擬SECでは、水酸化カルシウムの結晶の配向度が小さくなることで組織が密になり、表面から $20\mu\text{m}$ 程度までのセメントペースト強度が大きくなることで表面が粗な岩石を用いた場合の押し抜き付着強度が大きくなっていると考えられる。

5. 3. 4 コンクリート中の骨材界面のX線回折法による分析

(1) 試験の目的

岩石を水セメント比25%のセメントペーストに一旦押し付けた後、セメントペーストが接触した面に所定の水セメント比のセメントペーストを打ち込んだものは、何も処理しないものに比べ、界面付近の水酸化カルシウム結晶の配向度が低

くなることがあきらかになった。この処理は、一次練混ぜから全骨材を投入したSEC工法を模擬したものである。ここでは、実際のコンクリートの中で、練混ぜ方法によって骨材周辺の組織に同様な違いが生じているか否かを調査することにした。

(2) 試験方法

1) 概要

一辺2cmの立方体に成形した硬質砂岩を骨材として混入させたコンクリートを製造し、練混ぜ直後にこの砂岩と周辺のモルタルを取り出した。硬化後にこの立方体の岩石からモルタルを剥離させ、モルタル面をX線回折法により分析して、水酸化カルシウム結晶の配向度を調査した。

2) 試験体の種類

練混ぜ方法は分割練混ぜ方法で、一次練混ぜに骨材を入れないペースト先練り法と、一次練混ぜから全骨材を投入する方法の二種類とした。

水セメント比を40、50、60%の3種類とし、試験体の種類は練混ぜ方法との組み合わせで6種類とした。

3) 試験体の製造

使用材料は、日本セメント社製の普通ボルトランドセメント、相模産の陸砂(粗粒率=2.80)、八王子産の碎石(最大寸法20mm、粗粒率=6.75)、リグニンスルホン酸系のAE減水剤、および上水道水である。

目標スランプは18cm、空気量は4%程度になるように計画した。計画割合を表5-3-1に示す。

練混ぜには容量100リットルの強制パン型ミキサを用いた。ペースト先練り法(P法)では、セメントと一次水を2分間練り混ぜ、残りの材料を投入後再度2分間練り混ぜた。全骨材を一次練混ぜから入れておく方法(S法)では、セメント、細粗骨材、一次水を2分間練り混ぜ、残りの材料を投入後再度2分間練り混ぜた。混和剤は二次水に混入させた。一次の水セメント比はどちらも25%とした。

千葉県銚子市外川町産の硬質砂岩を2cm角の立方体に成形したものを、一種類のコンクリートについて二個、粗骨材の中に混入させておいた。これを練り上がり直後にコンクリートから拾いだし、2×2×8(cm)の型枠内におさめ、側面のモルタルとともに硬化させた。この供試体は翌日脱型し、試験時まで20℃の水中に保存した。

表5-3-1 計画調査

水セメント比 (%)	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)	単位置 (kg/m ³)				
			水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤
40	18	4.0	185	463	694	945	1.85
50			180	360	771	966	0.90
60			180	300	828	958	0.75

4) コンクリートの品質

まだ固まらないコンクリートについて、スランブ、空気量、ブリーディング、温度を測定した。

5) X線回折法による分析

材齢22~25日において、硬質砂岩よりモルタル部分を剥離させ、モルタル側についてX線回折法による分析を行なった。試験方法は5.3.2に示した方法と同様である。

(3) 試験結果と考察

1) コンクリートの品質試験結果

コンクリートのスランブ、空気量、ブリーディング量、および温度の測定結果を表5-3-2に示す。

表5-3-2 コンクリートの品質試験結果

練混ぜ方法	水セメント比 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	ブリーディング量 (cc/cm ³)	コンクリート温度 (℃)
P法	40	18.9	5.5	0.15	19.8
S法		18.5	6.0	0.13	20.0
P法	50	18.5	4.3	0.16	19.8
S法		19.0	3.5	0.16	20.4
P法	60	19.2	4.7	0.19	19.2
S法		19.3	4.1	0.17	19.7

2) X線回折法による分析結果

骨材からの距離と水酸化カルシウム結晶の配向度の関係を図-5-3-13~15に示す。

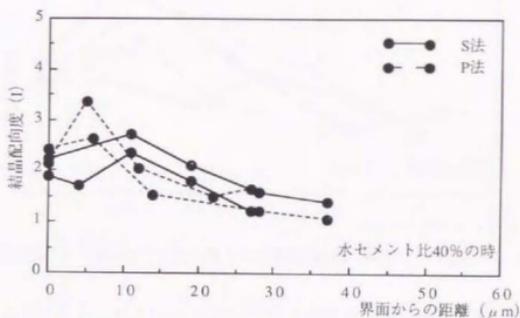


図-5-3-13 界面からの距離とCa(OH)₂結晶の配向度の関係-5 10)

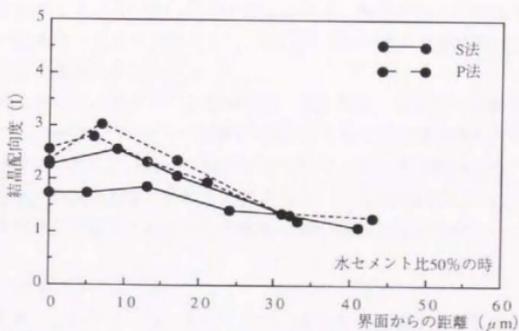


図-5-3-14 界面からの距離とCa(OH)₂結晶の配向度の関係-6 10)

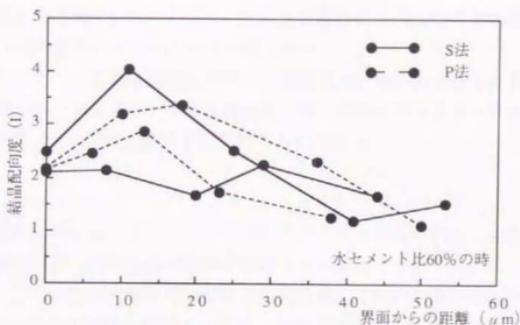


図-5-3-15 界面からの距離とCa(OH)₂結晶の配向度の関係-7 10)

図-5-3-13をみると、水セメント比40%では配向度の最大値はP法の方が高い値となっている。また図-5-3-14をみると、水セメント比50%ではP法はS法に比べ配向度が大きくなっている。図-5-3-15によれば、水セメント比60%では同一条件の二体の供試体の結果の差が大きく、S法の一体はP法より配向度が小さいが、一体は大きい結果となった。

今回の実験では、水セメント比60%の1体を除き、骨材を一次練混ぜから入れたS法によるものが、ペースト先練りのP法によるものより水酸化カルシウム結晶の配向度が小さくなるという結果が得られた。データの数はいくつか少ないものの、このことから、分割練混ぜで骨材を一次練混ぜから入れたS法により、コンクリート中の骨材界面が改善されている可能性は高いものと考えられた。

5. 3. 5 改善効果のまとめ

骨材を水セメント比の低いセメントペーストと一旦練り混ぜる方法がコンクリート中の骨材界面の状態に与える影響を調査した。セメントペーストと岩石を用い、直接引張試験、界面の水酸化カルシウムの結晶の配向度をみるX線回折法による分析、および円柱状の岩石の押し抜き試験を行なった。

X線回折法による分析の結果からは、岩石の表面を一旦水セメント比25%のセメントペーストと接触させると、硬化後の界面の水酸化カルシウム結晶の配向度が低くなることが確認された。また、押し抜き試験の結果から、同じくセメントペーストと接触させたものは付着強度が高くなること示された。

コンクリート試験ではデータ数は少ないものの、分割練混ぜで骨材を一次練

ぜから入れた方法によるものが、ペースト先練りによるものより水酸化カルシウム結晶の配向度が小さくなる結果が得られた。

以上のことから分割練混ぜで骨材を一次練混ぜからいれておくことと骨材界面の性状が改善され、コンクリートの圧縮強度が高くなるものと考えられる。このことは4章で紹介したSECモデルを裏付けるものである。

5. 4 まとめ

文献調査から、コンクリート中の骨材とマトリックスの界面の性状がコンクリートの圧縮強度などの性質に影響をあたえていることをあきらかにした。続いて、セメントペーストと岩石を用いた直接引張試験、界面の水酸化カルシウムの結晶の配向度をみるX線回折法による分析、および円柱状の岩石の押し抜き試験を行い、岩石を水セメント比25%のセメントペーストに一旦押し付ける処理を行うことにより、水酸化カルシウムの結晶の配向度が小さく、押し抜き強度が大きくなることを示した。さらにコンクリートの実験から分割練混ぜで、一次練混ぜから骨材を入れたものは水酸化カルシウムの結晶の配向度が小さくなる場合が多いことがわかった。これらのことから分割練混ぜで骨材を一次練混ぜからいれておくことで、骨材界面の性状が改善され、これがコンクリートの圧縮強度が高くなる原因の一つであるといえることを示した。

参考文献

- 1) 岩崎訓明、富山泰全、「セメントペーストと骨材の界面の微視構造と強度」、セメント技術年報29、1975年、pp131-134
- 2) 内川浩、「組成と構造の観点から見た硬化セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの類似点と相違点」、セメントコンクリート、No.507、1989年5月、pp33-45
- 3) C.A.Langton, D.M.Roy, "Morphology and Microstructure of Cement Paste/Rock Interfacial Regions", 7th International Congress on the Chemistry of Cement, 1980, III, ppVII-127-132
- 4) R.Zimbelmann, "A Contribution to the Problem of Cement-Aggregate Bond", Cement and Concrete Research, Vol.15, 1985, pp801-808
- 5) 菅谷秀幸、「C&Cエンサイクロペディア、骨材-セメントペースト界面」、セメント・コンクリート、No.567、1994年5月、pp46-48
- 6) 小阪義夫、谷川恭雄、太田福男「モデル粗骨材を用いたコンクリートの圧縮強度について」、材料、第20巻、第208号、pp41-46、1971年1月

- 7) 小阪義夫、谷川恭雄、「複合材料としてのコンクリートの力学性質」、材料、第24巻、第260号、1975年5月、pp12-23
- 8) A.Bentur, A.Goldman, M.D.Cohen, "The Contribution of the Transition Zone to the Strength of High Quality Silica Fume Concretes", Bonding in Cementitious Composites, Materials Research Society, Vol.114, 1987-12, pp97-103
- 9) 内川浩、「解説—セメントペーストと骨材の界面の構造・組織がコンクリートの品質に及ぼす影響」、コンクリート工学、Vol.33、No.9、1995年9月、pp5-17
- 10) 早川光敬、「練混ぜ方法がコンクリート中の骨材界面の状態に与える影響」、大成建設技術研究所報、第26号、1993年、pp69-76
- 11) J.Grandet, J.P.Ollivier, "New Method for the Study of Cement-Aggregate Interfaces", 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris Vol.III, ppVII-85-89, 1980
- 12) 三井健郎、「高強度コンクリートのマトリックス骨材界面領域の付着特性の定量的評価方法」、日本建築学会大会学術講演梗概集、1991年9月、pp831-832

第6章 品質改善効果の大きい分割練混ぜ方法

6. 1 本章の概要

前章までに分割練混ぜを用いることでコンクリートの品質を改善できることがあきらかになった。本章では、分割練混ぜ方法の中でブリーディングを少なく、圧縮強度を大きくする条件を明らかにすることにより、品質改善効果の大きい練混ぜ方法を確立することをめざして検討を行った。

これまでの検討から、分割練混ぜで圧縮強度が大きくなるのは、モルタル部分のブリーディングの減少と、一次練混ぜ時に骨材を存在させることによる骨材とマトリックスの付着の改善によることをあきらかにした。ここでは一次練混ぜ時に骨材が存在する方法において、ブリーディングを最小にする条件を調べるための実験を行った。これはGEMモデルに示されているように、モルタルのブリーディングが少なくなれば、粗骨材の周囲の欠陥が少なくなり、コンクリートの圧縮強度が増大することが期待できるからである。実験の結果、ブリーディングを最小にする一次の水セメント比は、骨材の量や粒度によって変化することがあきらかになった。

前章までに行った検討と、上記の実験の結果から、品質改善効果の大きい分割練混ぜ方法を示した。それは一次練混ぜ時に骨材が存在するようにし、一次の水セメント比をセメントペーストでブリーディングを最小にする一次の水セメント比（普通ポルトランドセメントの場合24%）を基準とし、これを骨材の量および粒度に応じた量（数パーセント程度）大きくする方法である。さらに、分割練混ぜによる品質改善効果が大きくなるのは、普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比が60%程度と比較的高いコンクリートであることをあきらかにした。

6. 2 一次練混ぜ時に骨材が存在する分割練混ぜ効果に影響を及ぼす要因

6. 2. 1 概要

4.2では、分割練混ぜにおいて、骨材を一次練混ぜ前に投入しておくことが圧縮強度増加に効果的であることを示した。ここでは、一次練混ぜ時に骨材が存在する分割練混ぜ方法において、セメント種類、骨材の表面水率、一次水と骨材をあらかじめ練り混ぜる方法、細骨材の粒度、細骨材中の微粒分、および混和剤が与える影響を、モルタル実験により調査した。

6. 2. 2 セメント種類の影響

(1) 目的

一次練混ぜ時に骨材が存在する分割練混ぜ方法において、セメントの種類、およびセメントと骨材の比率が変わった時に、ブリーディングを最小にする一次の水セメント比や、モルタル性状がどのように変化を調べることを目的に、モルタル実験を行った。

(2) 試験計画

1) 使用材料・調合

セメントは普通ポルトランドセメント、中庸熟ポルトランドセメント、高炉セメントB種の3種類とし、混和材としてフライアッシュを用いた。細骨材は大井川産の川砂(吸水率1.65%、粗粒率2.90)を用いた。

フライアッシュについては、質量比で普通ポルトランドセメントとフライアッシュを9:1で混合したものを、他のセメントと同じように扱った。

混和剤は用いずに、水は上水道水を用いた。

調合は砂とセメントの質量比(S/C)を1、2、3の3種類とし、水セメント比はS/Cが1の時は40%、2の時は55%、3の時は70%とした。

2) 練混ぜ方法

分割練混ぜ(S1)については

S1: S + w1 (Mix30秒) + C (Mix120秒) + w2 (Mix90秒)

とし、比較用の通常の練混ぜ(N)については

N: S + w (Mix30秒) + C (Mix210秒)

とした。一次の水セメント比は20、25、30%の3種類とした。

練混ぜには容量10リットルのモルタルミキサーを用いた。

3) 測定

測定はフレッシュモルタルについて、温度、単位容積質量、およびブリーディング試験を行った。ブリーディングは土木学会規準に準じて行い、2時間後のブリーディング率を測定した。硬化後の性状については、4×4×16cmの供試体を用い、材齢7日と28日に曲げ強度と圧縮強度を測定した。供試体の養生は標準養生とした。

(3) 結果

結果を表-6-2-1~4、図-6-2-1~5に示す。

今回の実験の範囲では用いた結合材はどれでも分割練混ぜ法を用いることでブリーディングは減少したが、その割合は普通ポルトランドセメントが最も大きく、ついでフライアッシュ、中庸熟、高炉の順に小さくなった。またブリーディング

を最小にする一次の水セメント比は、S/Cが1の時は25%、S/Cが2の時は25~30%、S/Cが3の時は30%となっており、砂セメント比が増加すると、ブリーディング最小にする一次の水セメント比が大きくなることがわかった。分割練混ぜによる強度の増加は中庸熟で大きく、他の結合材では0~1割程度の上昇である。分割練混ぜによる強度の増加は材齢1週の方が4週より大きい傾向がみられた。

表-6-2-1 モルタル試験結果 (普通ポルトランドセメント)

記号	S/C	W/C (%)	練混ぜ方法	一次のW/C (%)	単位容積質量 (kg/l)	ブリーディング率 (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)		曲げ強度 (kgf/cm ²)	
							7日	28日	7日	28日
N1-20	1	40	S1	20	2.161	0.4	460	588	82.0	84.2
N1-25				25	2.176	0.2	473	605	75.4	79.1
N1-30				30	2.186	0.7	465	598	73.6	84.7
N1-N			N	—	2.180	1.6	468	574	80.2	86.1
N2-20	2	55	S1	20	2.131	2.1	322	436	56.9	70.5
N2-25				25	2.173	1.9	344	463	59.2	75.0
N2-30				30	2.153	1.9	343	452	63.0	72.3
N2-N			N	—	2.175	3.8	318	444	60.8	74.6
N3-20	3	70	S1	20	2.153	3.2	212	326	45.7	60.2
N3-25				25	2.155	2.9	218	331	48.2	58.5
N3-30				30	2.158	2.8	214	337	45.5	60.5
N3-N			N	—	2.163	4.8	212	340	49.0	57.9

表-6-2-2 モルタル試験結果 (中熱ポルトランドセメント)

記号	S/C	W/C (%)	練混ぜ方法	一次のW/C (%)	単位容積質量 (kg/l)	ブリーディング率 (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)		曲げ強度 (kgf/cm ²)	
							7日	28日	7日	28日
M1-20	1	40	S1	20	2.190	4.0	432	701	78.4	101.0
M1-25				25	2.205	2.8	428	695	79.5	100.0
M1-30				30	2.221	2.8	441	691	74.7	97.6
M1-N			N	—	2.227	4.3	375	613	71.9	101.1
M2-20	2	55	S1	20	2.187	6.9	240	479	55.5	85.1
M2-25				25	2.215	6.2	240	486	52.3	80.1
M2-30				30	2.195	6.9	243	495	51.5	79.9
M2-N			N	—	2.206	9.6	174	438	43.4	83.3
M3-20	3	70	S1	20	2.187	10.9	131	323	36.8	63.9
M3-25				25	2.188	8.2	140	349	38.4	70.8
M3-30				30	2.201	8.1	138	344	38.0	67.3
M3-N			N	—	2.205	9.4	109	274	28.0	65.6

表-6-2-3 モルタル試験結果 (高炉セメントB種)

記号	S/C	W/C (%)	練混ぜ方法	一次のW/C (%)	単位容積質量 (kg/l)	ブリーディング率 (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)		曲げ強度 (kgf/cm ²)	
							7日	28日	7日	28日
BB1-20	1	40	S1	20	2.151	3.0	386	610	67.2	95.8
BB1-25				25	2.188	2.7	428	618	68.1	92.0
BB1-30				30	2.186	2.6	412	629	65.9	87.7
BB1-N			N	—	2.180	3.1	390	597	62.6	90.6
BB2-20	2	55	S1	20	2.170	4.1	260	469	49.3	73.6
BB2-25				25	2.162	4.0	260	462	52.8	73.1
BB2-30				30	2.190	5.0	265	467	51.2	76.2
BB2-N			N	—	2.191	4.4	234	446	48.3	74.9
BB3-20	3	70	S1	20	2.172	5.7	166	342	38.8	60.8
BB3-25				25	2.184	5.7	164	354	38.6	66.0
BB3-30				30	2.180	5.4	164	345	40.4	63.3
BB3-N			N	—	2.180	7.1	148	325	35.5	59.1

表-6-2-4 モルタル試験 (フライアッシュ混入)

記号	S/C	W/C (%)	練混ぜ方法	一次のW/C (%)	単位容積質量 (kg/l)	ブリーディング率 (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)		曲げ強度 (kgf/cm ²)	
							7日	28日	7日	28日
F1-20	1	40	S1	20	2.170	1.6	511	604	72.7	84.8
F1-25				25	2.174	—	481	592	80.2	85.7
F1-30				30	2.187	1.5	504	620	83.1	87.3
F1-N			N	—	2.174	2.8	438	574	75.7	88.2
F2-20	2	55	S1	20	2.139	3.5	282	372	59.2	68.8
F2-25				25	2.158	3.6	286	419	59.6	70.1
F2-30				30	2.168	3.5	294	410	58.0	75.9
F2-N			N	—	2.180	6.5	277	401	58.6	72.0
F3-20	3	70	S1	20	2.153	5.7	191	254	49.1	58.0
F3-25				25	2.160	5.7	180	272	48.5	60.0
F3-30				30	2.160	5.0	197	296	47.2	61.8
F3-N			N	—	2.175	8.7	176	270	43.5	59.2

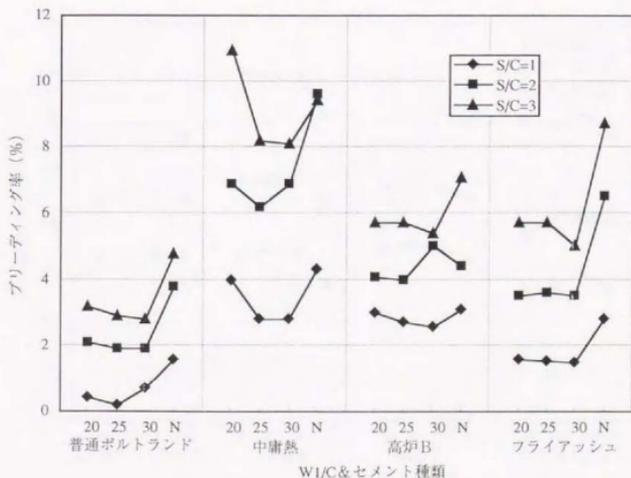


図-6-2-1 セメント種類ごとの一次水セメント比とブリーディング

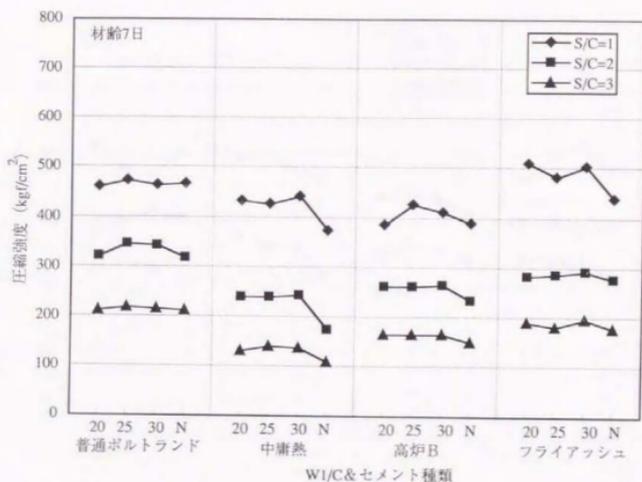


図-6-2-2 セメント種類ごとの一次水セメント比と材齢7日圧縮強度

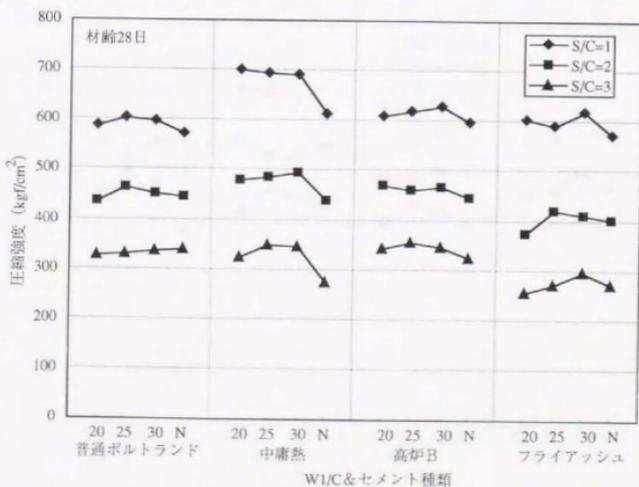


図-6-2-3 セメント種類ごとの一次水セメント比と材齢28日圧縮強度

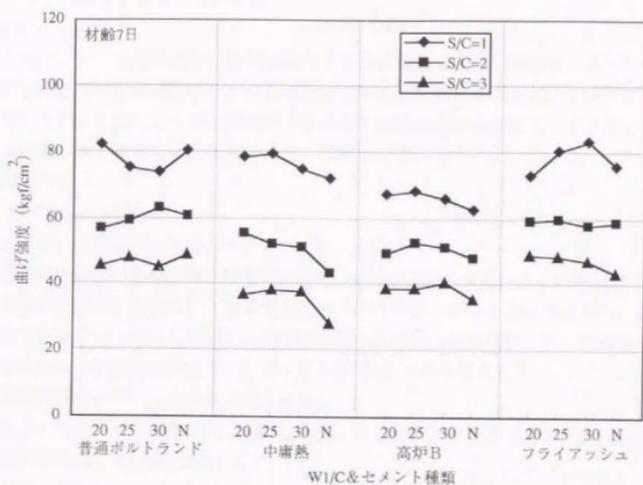


図-6-2-4 セメント種類ごとの一次水セメント比と材齢7日曲げ強度

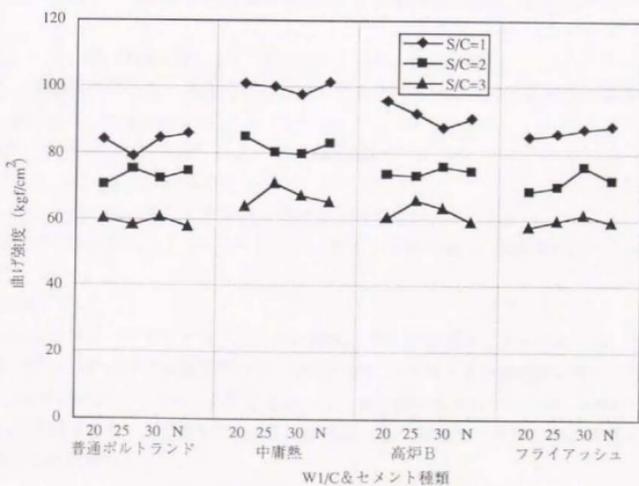


図-6-2-5 セメント種類ごとの一次水セメント比と材齢28日曲げ強度

6. 2. 3 細骨材の表面水率の影響

(1) 目的

モルタルを一次練混ぜ時に骨材が存在する分割練混ぜ方法で製造する場合、使用する細骨材の含水状態がモルタルの性質に与える影響を調べることを目的に実験を行った。比較として分割練混ぜで骨材を一次練混ぜ以後に投入する方法と、全材料を一括で練り混ぜる通常の方法も試験した。

(2) 試験計画

1) 使用材料・割合

セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。

細骨材は相模川産の川砂(吸水率3.48%、粗粒率2.80)を用いた。試験には、一旦絶乾状態にしたものを、モルタルミキサの中で所定の水を加えて攪拌し、表面水率を調整したものを用いた。調整は試験の24時間以上前に行った。含水量は、絶乾のもの、表面水率が0、2、4、6、および8%のものを用意した。

混和剤は用いずに、水は上水道水を用いた。

割合は砂とセメントの重量比(S/C)を2、3の2種類とし、水セメント比はS/Cが2の時は58%、3の時は75%とした。

2) 練混ぜ方法

練混ぜ方法は一次練混ぜ時に骨材の存在する分割練混ぜ方法(S1)については

$$S1: S+w1(\text{Mix}30\text{秒})+C(\text{Mix}120\text{秒})+w2(\text{Mix}90\text{秒})$$

とし、比較用の骨材を一次練混ぜ後に投入する分割練混ぜ(S2)と通常の練混ぜ(N)についてはそれぞれ

$$S2: C+w1(\text{Mix}120\text{秒})+S+w2(\text{Mix}90\text{秒})$$

$$N: C+S+w(\text{Mix}90\text{秒})$$

とした。一次の水セメント比はS1では25%、S2では24%とした。

練混ぜには容量30リットルのモルタルミキサ(公転42rpm、自転183rpm)を用いた。

3) 測定

測定はフレッシュモルタルについて、温度、単位容積質量、テーブルフロー、およびブリーディング試験を行った。ブリーディングは土木学会規準に準じて行い、2時間後のブリーディング率を測定した。硬化後の性状については、4×4×16cmの供試体を用い、材齢7日と28日に曲げ強度と圧縮強度を測定した。供試体の養生は標準養生とした。

(3) 結果

結果を表-6-2-5~6、図-6-2-6~13に示す。結果をみると、細骨材の表面水率はテーブルフローとブリーディングに影響を与え、砂の水分が少ないほど両者の値は大きくなる傾向が認められた。表面水率の影響は通常の練混ぜで最も大きく、分割練混ぜで一次練混ぜ時に砂が存在する時が最も小さい。このことから、一次練混ぜ時に骨材が存在する分割練混ぜ方法 (S1) は、練混ぜ時の細骨材の表面水率によるモルタルの品質の変化を小さくできる練混ぜ方法であるといえる。

表-6-2-5 モルタル試験結果 (表面水率の影響 - S/C=2)

記号	S/C および W/C (%)	練混ぜ 方法	一次の W/C (%)	含水状 態又は 表面水 率(%)	単位容 積質量 (kg/l)	テーブ ルフロ ー (mm)	ブリー ディン グ率 (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)		曲げ強度 (kgf/cm ²)	
								7日	28日	7日	28日
								2S1-A	S/C=2 W/C =58%	S1	25
2S1-0	表乾	2.122	244	1.54	262	414	50.0	70.6			
2S1-2	2	2.120	247	1.20	270	398	52.2	69.8			
2S1-4	4	2.102	243	1.57	273	391	53.0	66.9			
2S1-6	6	2.110	242	1.82	280	409	51.9	67.8			
2S1-8	8	2.132	249	1.59	282	401	49.4	66.6			
2S2-A	S2	24	絶乾	2.115	266	3.89	263	435			
2S2-0			表乾	2.110	257	2.39	258	429		54.8	71.5
2S2-2			2	2.110	250	1.88	276	434		58.2	72.7
2S2-4			4	2.117	250	1.46	270	426		58.9	73.0
2S2-6			6	2.116	248	1.59	280	461		58.7	72.8
2S2-8			8	2.115	246	1.56	284	449		60.4	71.8
2N-A			N	-	絶乾	2.099	271	13.68		250	440
2N-0	表乾	2.112			274	12.85	224	383		48.0	65.0
2N-2	2	2.106			249	4.61	260	417		55.8	73.7
2N-4	4	2.100			246	4.36	275	437		56.6	69.0
2N-6	6	2.133			241	4.60	284	435	53.1	75.7	
2N-8	8	2.111			240	4.23	278	448	61.5	67.6	

表-6-2-6 モルタル試験結果 (表面水率の影響 - S/C=3)

記号	S/C および W/C (%)	練混ぜ 方法	一次の W/C (%)	含水状 態又は 表面水 率(%)	単位容 積質量 (kg/l)	テーブ ルフロ ー (mm)	ブリー ディン グ率 (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)		曲げ強度 (kgf/cm ²)	
								7日	28日	7日	28日
								3S1-A	S/C=3 W/C =75%	S1	25
3S1-0	表乾	2.076	248	3.12	130	266	42.6	56.3			
3S1-2	2	2.096	244	2.64	124	267	40.1	54.0			
3S1-4	4	2.088	244	2.72	121	257	39.0	53.4			
3S1-6	6	2.083	244	2.90	120	265	40.9	57.6			
3S1-8	8	2.090	246	2.92	130	271	41.0	56.2			
3S2-A	S2	24	絶乾	2.076	262	7.57	115	246		37.1	52.1
3S2-0			表乾	2.076	247	3.83	104	240		35.7	49.3
3S2-2			2	2.099	247	4.15	108	231		37.1	53.8
3S2-4			4	2.092	246	3.88	107	237		35.8	54.1
3S2-6			6	2.090	242	3.60	108	242		38.8	54.6
3S2-8			8	2.102	244	2.89	106	233		33.2	50.2
3N-A	N	-	絶乾	2.108	278	14.92	128	267		41.2	60.0
3N-0			表乾	2.111	261	7.16	126	258		43.6	59.2
3N-2			2	2.115	258	5.78	130	252		43.0	56.9
3N-4			4	2.114	252	5.14	126	259		44.0	56.8
3N-6			6	2.118	246	4.22	142	275		44.0	57.7
3N-8			8	2.118	250	5.09	141	265		41.2	56.7

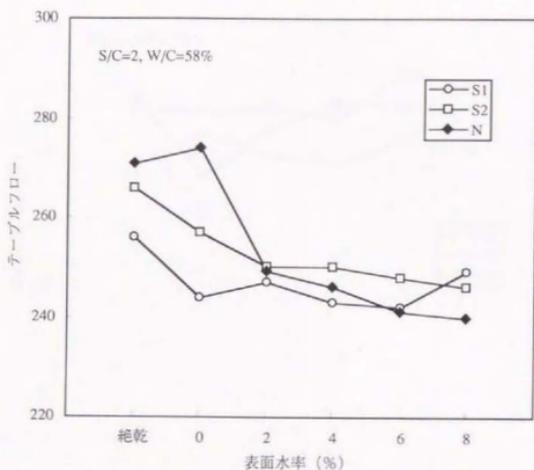


図-6-2-6 練混ぜ方法ごとの細骨材の初期表面水率とテールフロー (S/C=2)

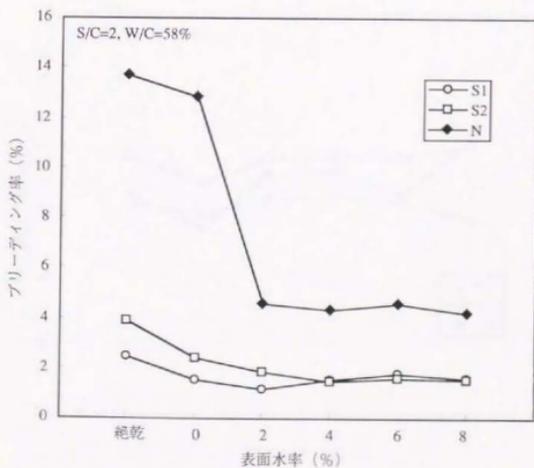


図-6-2-7 練混ぜ方法ごとの細骨材の初期表面水率とブリーディング (S/C=2)

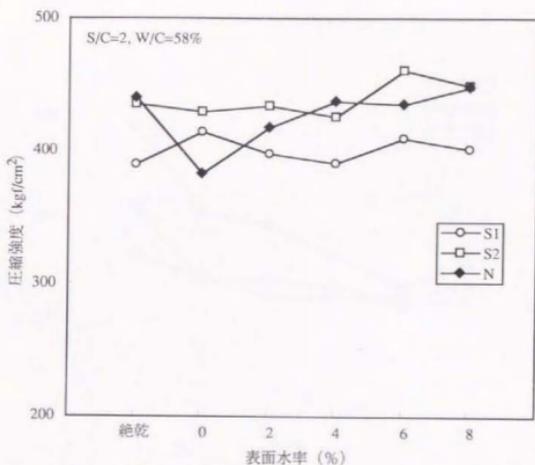


図-6-2-8 練混ぜ方法ごとの細骨材の初期表面水率と材齢28日圧縮強度 (S/C=2)

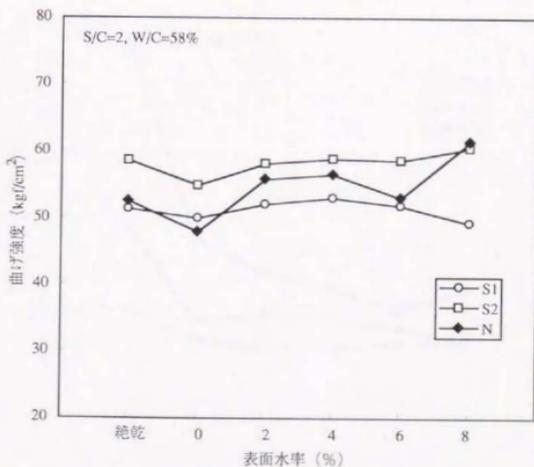


図-6-2-9 練混ぜ方法ごとの細骨材の初期表面水率と材齢28日曲げ強度 (S/C=2)

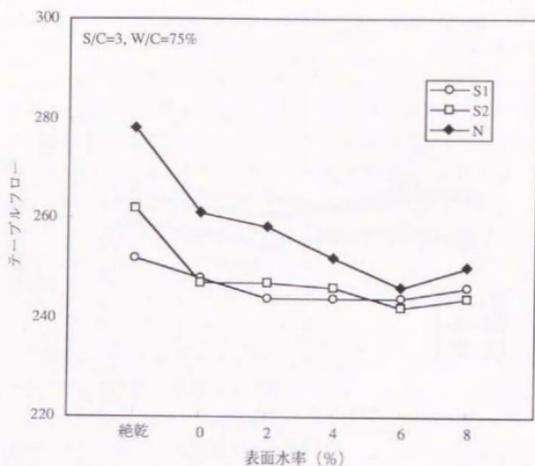


図-6-2-10 練混ぜ方法ごとの細骨材の初期表面水率とアールフロー (S/C=3)

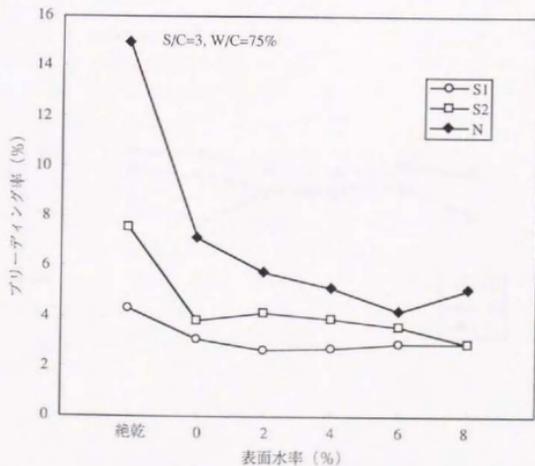


図-6-2-11 練混ぜ方法ごとの細骨材の初期表面水率とブリーディング (S/C=3)

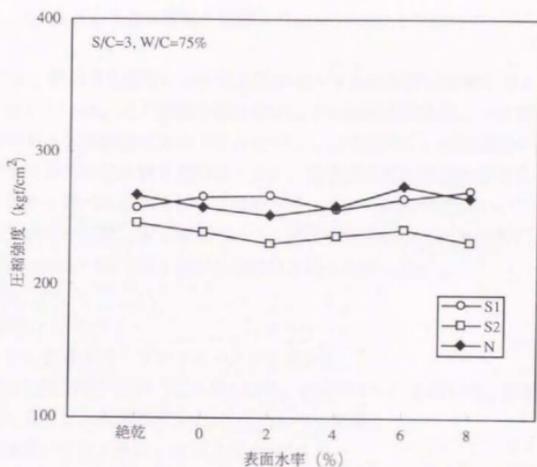


図-6-2-12 練混ぜ方法ごとの細骨材の初期表面水率と材齢28日圧縮強度(S/C=3)

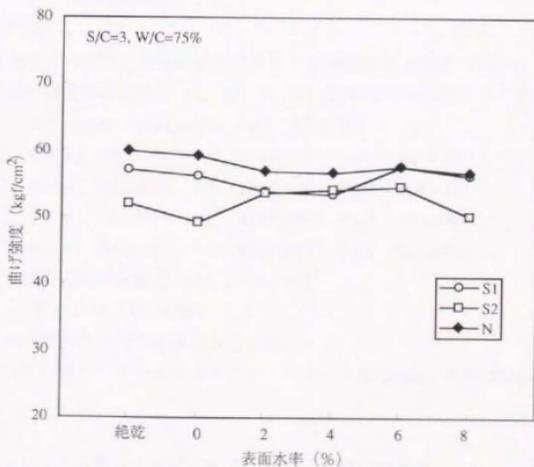


図-6-2-13 練混ぜ方法ごとの細骨材の初期表面水率と材齢28日曲げ強度(S/C=3)

6. 2. 4 一次水による含水調整の影響

(1) 目的

6.2.3では、使用する細骨材の含水状態がモルタルの性質に影響を与えることがあきらかになった。この影響を最も受けにくい練混ぜ方法は、一次練混ぜ時に骨材が存在する分割練混ぜ方法であったが、ここではさらに一次練混ぜ前に細骨材と一次水をあらかじめ練り混ぜることが、細骨材の含水状態の影響をどの程度緩和できるかを調べることを目的に実験を行った。分割練混ぜにおいて一次練混ぜ前に細骨材を一次投入水と練混ぜ、この練混ぜ時間を変えて実験を行った。比較として全材料を一括で練り混ぜる通常の方法も試験した。

(2) 試験計画

1) 使用材料・調合

セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。

細骨材は相模川産の川砂（吸水率3.48%、粗粒率2.80）を用いた。試験には、表乾に近いものと、表面水率が6%程度のものを用意した。

混和剤は用いず、水は上水道水を用いた。

調合は砂とセメントの質量比（S/C）を2、3の2種類とし、水セメント比はS/Cが2の時は58%、3の時は75%とした。

2) 練混ぜ方法

練混ぜ方法は一次練混ぜ時に骨材の存在する分割練混ぜ方法（S1）で、一次水と細骨材の練混ぜ時間を0、10、20、30、および60秒の5水準について試験した。

S1-0: S+w1+C (Mix120秒) +w2 (Mix90秒)

S1-10: S+w1 (Mix10秒) +C (Mix120秒) +w2 (Mix90秒)

S1-20: S+w1 (Mix20秒) +C (Mix120秒) +w2 (Mix90秒)

S1-30: S+w1 (Mix30秒) +C (Mix120秒) +w2 (Mix90秒)

S1-60: S+w1 (Mix60秒) +C (Mix120秒) +w2 (Mix90秒)

とし、比較用の通常の練混ぜ（N）については

N: C+S+w (Mix90秒)

とした。一次の水セメント比は25%とした。

練混ぜには容量30リットルのモルタルミキサ（公転42rpm、自転183rpm）を用いた。

3) 測定

測定はフレッシュモルタルについて、温度、単位容積質量、テーブルフロー、およびブリーディング試験を行った。ブリーディングは土木学会規準に準じて行い、最大ブリーディング率を記録した。硬化後の性状については、4×4×16cm

の供試体を用い、材齢7日と28日に曲げ強度と圧縮強度を測定した。供試体の養生は標準養生とした。

(3) 結果

結果を表-6-2-7~8、図-6-2-14~21に示す。一次水と細骨材の練混ぜ時間が長くなるとテーブルフロー、ブリーディングが小さくなる傾向が認められた。しかし、一次水と細骨材の練混ぜ時間の影響は練混ぜ方法の影響に比べて小さい。

表-6-2-7 モルタル試験結果 (一次水と細骨材の練混ぜ時間 - S/C=2)

記号	S/C および W/C (%)	練混ぜ 方法	一次水 と細骨 材の練 混ぜ時 間(秒)	一次 の W/C (%)	表面 水率 (%)	単位 容積 質量 (kg/l)	テー ブル フロ ー (mm)	ブリー ディン グ率 (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)		曲げ強度 (kgf/cm ²)	
									7日	28日	7日	28日
2D-S1-0	S/C =2	S1	0	25	1.6	2.157	240	1.13	334	490	61.2	76.2
2D-S1-10			10			2.157	234	0.98	326	486	62.6	73.8
2D-S1-20			20			2.160	230	0.93	313	504	62.5	76.7
2D-S1-30			30			2.152	230	0.81	332	427	61.8	69.4
2D-S1-60			60			2.160	223	0.84	300	398	60.0	75.9
2D-N			N			-	-	2.146	240	4.65	330	491
2W-S1-0	W/C =58%	S1	0	25	6.0	2.148	235	1.54	317	458	58.3	73.2
2W-S1-10			10			2.140	228	0.86	320	438	66.6	77.0
2W-S1-20			20			2.154	228	1.23	330	481	59.7	75.8
2W-S1-30			30			2.168	224	0.98	320	462	57.3	72.5
2W-S1-60			60			2.146	220	1.31	328	473	63.2	73.7
2W-N			N			-	-	2.150	240	2.85	342	484

表-6-2-8 モルタル試験結果 (一次水と細骨材の練混ぜ時間 - S/C=3)

記号	S/C および W/C (%)	練 混ぜ 方 法	一次水 と細骨 材の練 混ぜ時 間(秒)	一次 の W/C (%)	表面 水率 (%)	単 位 容 積 質 量 (kg/l)	テ ー ブ ル フ ロ ー (mm)	プ リ ー デ ン グ 率 (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)		曲げ強度 (kgf/cm ²)	
									7日	28日	7日	28日
									3D-S1-0	S/C =3	S1	0
3D-S1-10	10	2.120	244	4.07	161	280	43.6	59.4				
3D-S1-20	20	2.130	242	3.51	165	284	42.8	62.0				
3D-S1-30	30	2.138	242	3.24	167	286	42.1	59.5				
3D-S1-60	60	2.141	238	2.96	164	286	43.4	56.6				
3D-N	N	-	-	2.136	261	12.54	168	301	42.0			64.8
3W-S1-0	W/C =75%	S1	0	25	6.1	2.138	230	1.55	168	300	42.3	63.0
3W-S1-10			10			2.164	215	0.91	213	372	48.9	69.6
3W-S1-20			20			2.147	228	1.21	168	303	42.7	64.7
3W-S1-30			30			2.146	233	1.26	167	286	41.2	63.3
3W-S1-60			60			2.134	226	1.06	177	317	43.4	61.3
3W-N			N			-	-	2.142	237	5.7	167	312

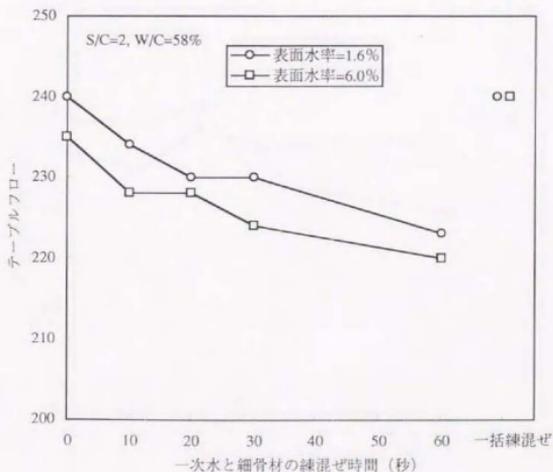


図-6-2-14 一次水と細骨材の練混ぜ時間とテーブルフロー (S/C=2)

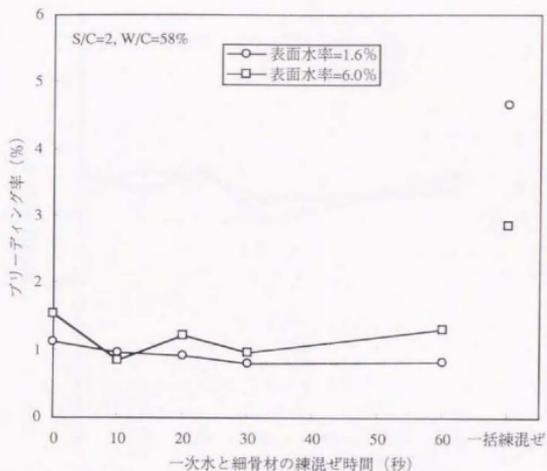


図-6-2-15 一次水と細骨材の練混ぜ時間とブリーディング (S/C=2)

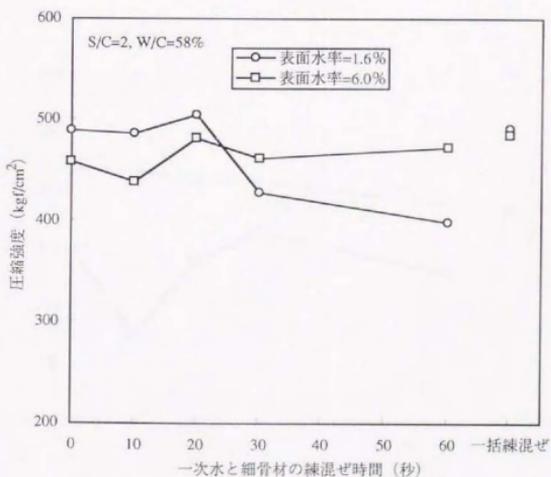


図-6-2-16 一次水と細骨材の練混ぜ時間と材齢28日圧縮強度 (S/C=2)

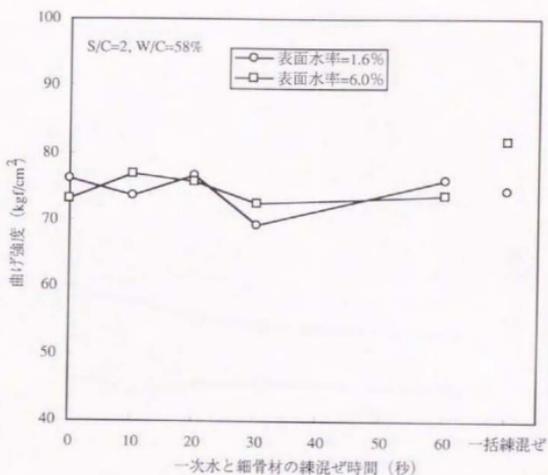


図-6-2-17 一次水と細骨材の練混ぜ時間と材齢28日曲げ強度 (S/C=2)

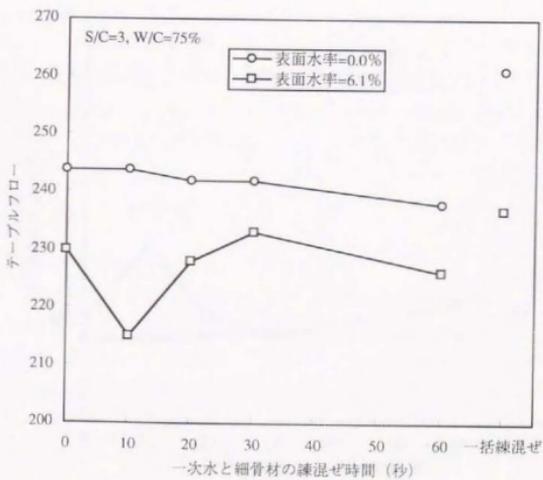


図-6-2-18 一次水と細骨材の練混ぜ時間とテーブルフロー (S/C=3)

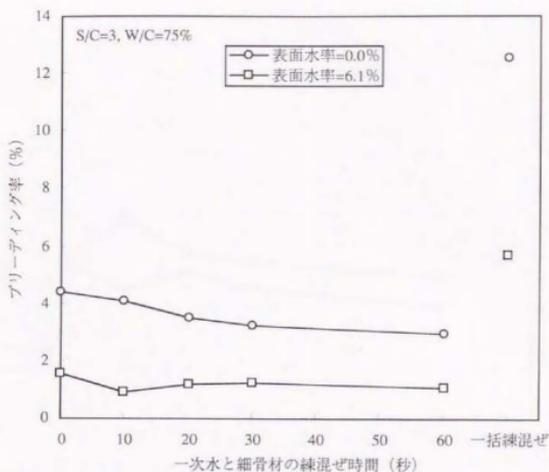


図-6-2-19 一次水と細骨材の練混ぜ時間とブリーディング (S/C=3)

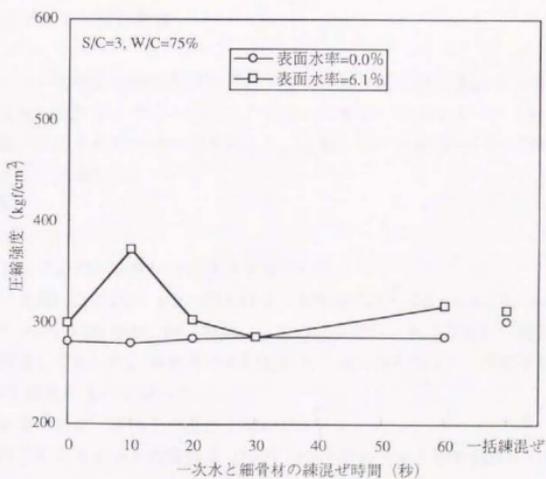


図-6-2-20 一次水と細骨材の練混ぜ時間と材齢28日圧縮強度 (S/C=3)

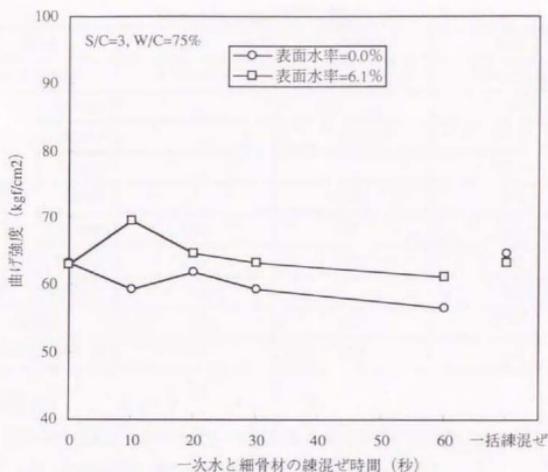


図-6-2-21 一次水と細骨材の練混ぜ時間と材齢28日曲げ強度 (S/C=3)

6. 2. 5 細骨材の粒度の影響

(1) 目的

モルタルを一次練混ぜ時に骨材が存在する分割練混ぜ方法で製造する場合、使用する細骨材の粒度が、ブリーディングを最小にする一次の水セメント比に与える影響を調べることを目的に実験を行った。比較として全材料を一括で練り混ぜる通常の方法も試験した。

(2) 試験計画

1) 使用材料・調合

セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。

細骨材は相模川産の川砂(吸水率3.48%、粗粒率2.80)を0.6mmと1.2mmのふりにより分け、粗粒率が1.20(細目)、2.39(中目)、および4.23(粗目)の細骨材を調整して用いた。各細骨材の粒度分布を表-6-2-9に示す。各細骨材は表面水率が4%程度のものを用いた。

混和剤は用いずに、水は上水道水を用いた。

調合は細骨材とセメントの質量比(S/C)を2、水セメント比を58%とした。

表-6-2-9 細骨材の粒度分布

呼称	細目	中目	粗目
ふるい分け	0.6mm以下	0.6mm～1.2mm	1.2mm以上
通過率 (%)	10mm		100
	5mm		95.6
	2.5mm		58.8
	1.2mm	100	10.3
	0.6mm	100	6.9
	0.3mm	57.3	4.0
	0.15mm	22.7	1.6
粗粒率	1.20	2.39	4.23
吸水率 (%)	3.3	3.9	3.7

2) 練混ぜ方法

練混ぜ方法は一次練混ぜ時に骨材の存在する分割練混ぜ方法 (S) については
 $S: S+w1(\text{Mix}30\text{秒})+C(\text{Mix}120\text{秒})+w2(\text{Mix}90\text{秒})$

とし、比較用の通常の練混ぜ (N) については

$N: C+S+w(\text{Mix}90\text{秒})$

とした。一次の水セメント比は20、25、30、35、40%の5水準とした。

練混ぜには容量30リットルのモルタルミキサ (公転42rpm、自転183rpm) を用いた。

3) 測定

測定はフレッシュモルタルについて、温度、単位容積質量、テーブルフロー、およびブリーディング試験を行った。ブリーディングは土木学会規準に準じて行い、ブリーディング率は最大値を記録した。硬化後の性状については、4×4×16cmの供試体を用い、材齢7日と28日に曲げ強度と圧縮強度を測定した。供試体の養生は標準養生とした。

(3) 結果

結果を表-6-2-10、図-6-2-22～25に示す。細骨材の粒度が小さくなるとブリーディングを最小にする一次の水セメント比が大きくなることが示された。

表-6-2-10 モルタル試験結果 (細骨材の粒度の影響 - S/C=2)

記号	細骨材の粗粒率	練混ぜ方法	一次のW/C (%)	単位容積質量 (kg/l)	テーパーフロー(mm)	ブリーディング率(%)	圧縮強度 (kg/cm ²)		曲げ強度 (kg/cm ²)	
							7日	28日	7日	28日
細S20	1.20	S	20	2.166	185	0.85	300	415	58.8	76.1
細S25			25	2.100	186	0.62	345	449	66.6	80.8
細S30			30	2.104	189	0.60	340	417	64.2	76.5
細S35			35	2.129	184	0.54	324	431	58.0	80.8
細S40			40	2.100	190	0.48	340	453	62.9	77.5
細N			N	-	2.113	184	1.56	328	418	64.0
中S20	2.39	S	20	2.140	234	2.02	348	410	64.7	74.2
中S25			25	2.144	240	2.33	330	411	61.8	80.1
中S30			30	2.146	238	1.79	330	428	65.1	72.5
中S35			35	2.142	237	2.26	340	420	64.7	68.6
中S40			40	2.140	242	2.57	340	426	64.7	79.5
中N			N	-	2.118	236	6.22	297	434	60.2
粗S20	4.23	S	20	2.139	237	2.58	310	460	56.3	63.9
粗S25			25	2.176	237	2.59	305	460	54.1	64.3
粗S30			30	2.163	242	3.35	303	455	53.7	69.6
粗S35			35	2.157	242	5.61	294	462	51.3	73.4
粗S40			40	2.143	258	8.92	258	443	55.0	75.3
粗N			N	-	2.171	237	16.04	295	499	54.9

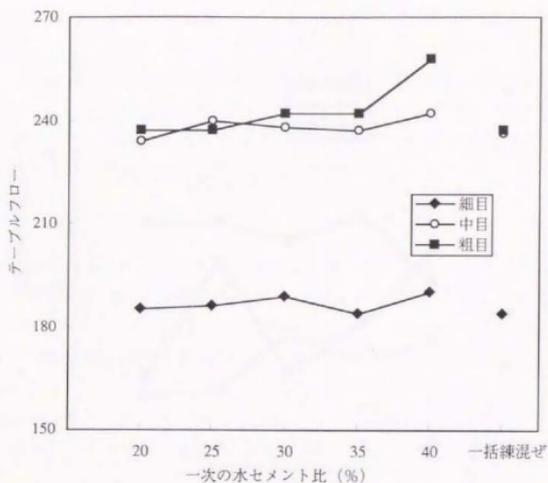


図-6-2-22 細骨材の粒度による一次の水セメント比とテールフロー

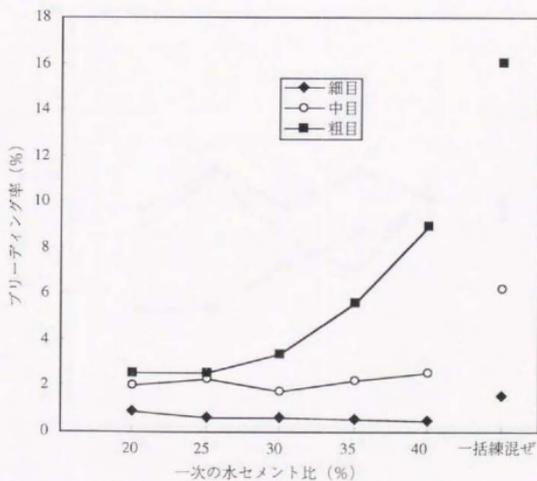


図-6-2-23 細骨材の粒度による一次の水セメント比とブリーディング

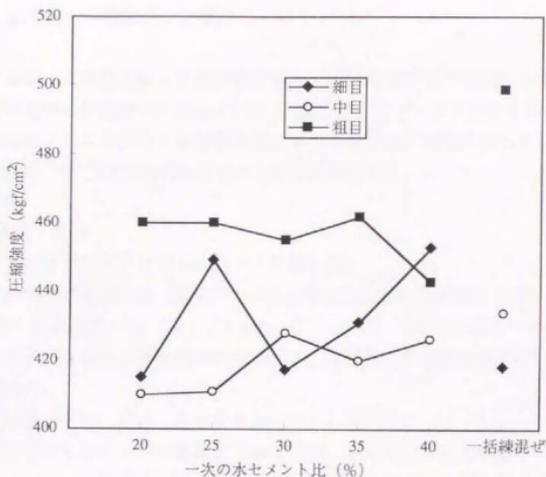


図-6-2-24 細骨材の粒度による一次の水セメント比と材齢28日圧縮強度

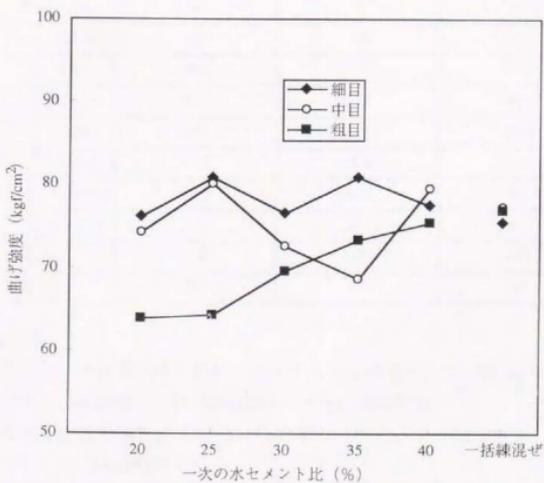


図-6-2-25 細骨材の粒度による一次の水セメント比と材齢28日曲げ強度

6. 2. 6 細骨材中の微粒分の影響

(1) 目的

モルタルを一次練混ぜ時に骨材が存在する分割練混ぜ方法で製造する場合、使用する細骨材中の微粒分（0.15mm以下）の割合が、ブリーディングを最小にする一次の水セメント比に与える影響を調べることを目的に実験を行った。比較として全材料を一括で練り混ぜる通常の方法も試験した。

(2) 試験計画

1) 使用材料・調合

セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。

細骨材は相模川産の川砂（吸水率3.48%、粗粒率2.80）を調整して用いた。0.15mm以下の割合は2.6%（少）、9.6%（中）、および15.7%（多）の3水準とした。各細骨材の粒度分布を表-6-2-11に示す。各細骨材は表面水率が4%程度のものを用いた。

混和剤は用いずに、水は上水道水を用いた。

調合は細骨材とセメントの質量比（S/C）を2、水セメント比を58%とした。

表-6-2-11 細骨材の粒度分布

呼称		少	中	多
通過率 (%)	10mm	100	100	100
	5mm	98.1	98.2	98.3
	2.5mm	81.7	83.0	84.1
	1.2mm	60.1	63.0	65.5
	0.6mm	37.7	42.2	46.1
	0.3mm	18.3	24.2	29.3
	0.15mm	2.6	9.6	15.7
粗粒率		3.02	2.80	2.61
吸水率 (%)		3.3	3.5	3.7

2) 練混ぜ方法

練混ぜ方法は一次練混ぜ時に骨材の存在する分割練混ぜ方法（S）については
 $S: S+w1(\text{Mix}30\text{秒})+C(\text{Mix}120\text{秒})+w2(\text{Mix}90\text{秒})$

とし、比較用の通常の練混ぜ（N）については

$N: C+S+w(\text{Mix}90\text{秒})$

とした。一次の水セメント比は20、25、30、35、40%の5水準とした。

練混ぜには容量30リットルのモルタルミキサ（公転42rpm、自転183rpm）を用

いた。

3) 測定

測定はフレッシュモルタルについて、温度、単位容積質量、テーブルフロー、およびブリーディング試験を行った。ブリーディングは土木学会規準に準じて行い、ブリーディング率は最大値を記録した。硬化後の性状については、4×4×16cmの供試体を用い、材齢7日と28日に曲げ強度と圧縮強度を測定した。供試体の養生は標準養生とした。

(3) 結果

結果を表-6-2-12、図-6-2-26～29に示す。細骨材の微粒分量が大きくなるとブリーディングを最小にする一次の水セメント比が大きくなることが示された。

表-6-2-12 モルタル試験結果（細骨材の微粒分の影響 - S/C=2）

記号	微粒分の割合 (%)	練混ぜ方法	一次の W/C (%)	単位容積質量 (kg/l)	テーブルフロー (mm)	ブリーディング率 (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)		曲げ強度 (kgf/cm ²)	
							7日	28日	7日	28日
少S20	2.6	S	20	2.158	244	2.09	277	528	63.1	76.8
少S25			25	2.157	245	2.34	300	529	62.1	77.7
少S30			30	2.164	246	2.44	322	549	66.0	74.6
少S35			35	2.168	243	2.44	318	539	63.7	77.1
少S40			40	2.156	247	4.01	267	548	65.1	85.5
少N			N	-	2.151	250	8.51	231	510	60.0
中S20	9.6	S	20	2.149	234	1.05	301	434	61.9	75.6
中S25			25	2.158	231	0.94	323	459	64.4	73.3
中S30			30	2.165	236	1.19	341	405	64.7	77.8
中S35			35	2.159	234	1.20	344	485	66.9	77.2
中S40			40	2.174	245	2.16	328	318	64.3	79.8
中N			N	-	2.150	270	7.25	304	344	62.4
多S20	15.7	S	20	2.151	242	1.55	342	469	60.2	75.0
多S25			25	2.168	249	1.96	336	478	63.3	78.5
多S30			30	2.175	240	1.36	347	484	60.3	70.1
多S35			35	2.182	242	1.53	347	506	62.2	75.7
多S40			40	2.168	246	2.63	322	499	62.8	76.5
多N			N	-	2.164	246	6.08	287	470	57.1

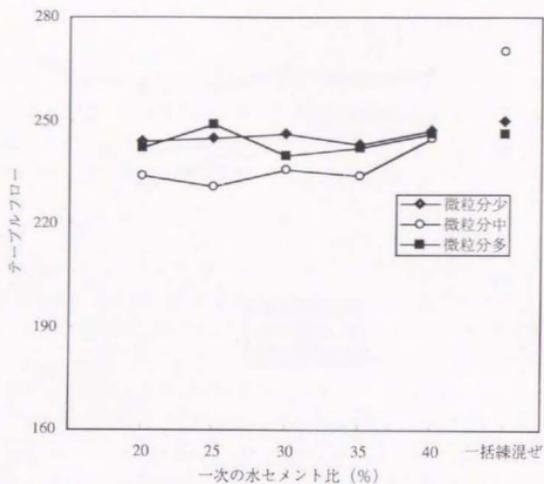


図-6-2-26 細骨材中の微粒分量による一次の水セメント比とテーブルフロー

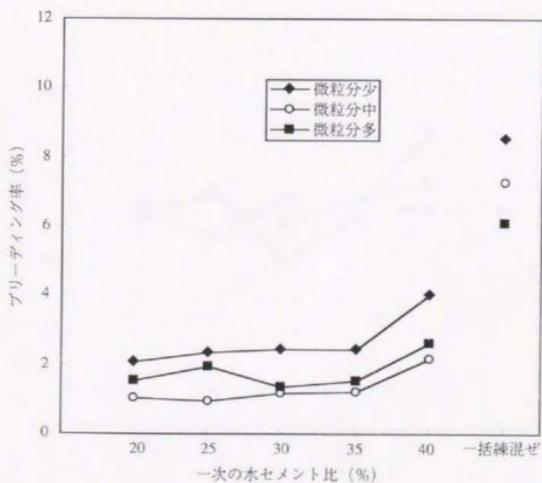


図-6-2-27 細骨材中の微粒分量による一次の水セメント比とブリーディング

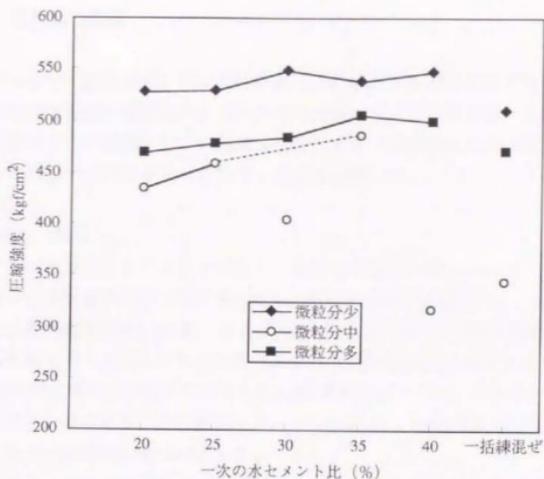


図-6-2-28 細骨材中の微粒分量による一次の水セメント比と材齢28日圧縮強度

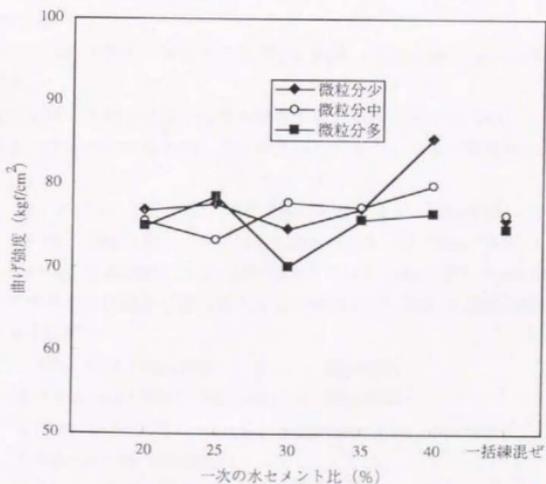


図-6-2-29 細骨材中の微粒分量による一次の水セメント比と材齢28日曲げ強度

6. 2. 7 混和剤の影響

(1) 目的

モルタルを一次練混ぜ時に骨材が存在する分割練混ぜ方法で製造する場合、使用する混和剤の種類や添加時期がモルタルの性質に与える影響を調べることが目的に実験を行った。比較として分割練混ぜで骨材を一次練混ぜ以後に投入する方法と、全材料を一括で練り混ぜる通常の方法も試験した。

(2) 試験計画

1) 使用材料・調合

セメントは普通ポルトランドセメント、水は上水道水を用いた。

細骨材は相模川産の川砂（吸水率3.48%、粗粒率2.80）を用いた。

混和剤は高性能減水剤、AE剤、およびAE減水剤の3種類のものを使用した。高性能減水剤はナフタリンスルホン酸ホルマリン高縮合物を主成分とするもの、AE剤は天然樹脂酸塩を主成分とするもの、AE減水剤はリグニンスルホン酸塩を主成分とするものである。使用量はセメント1kgに対し、高性能減水剤は6ml、AE剤は0.4ml、AE減水剤は2.5mlとした。

調合は砂とセメントの質量比 (S/C) を2、3の2種類とし、水セメント比はS/Cが2の時は58%、3の時は75%とした。

2) 練混ぜ方法

容量30リットルのモルタルミキサーを用い、低速（公転42rpm、自転183rpm）で練り混ぜた。

練混ぜ方法は一次練混ぜ時に骨材の存在する分割練混ぜ方法 (S1) については混和剤を一次水に入れるもの、二次水に入れるもの、および後添加するものの3種類とした。

S1-1: S+w1+Ad (Mix30秒) +C (Mix120秒) +w2 (Mix90秒)

S1-2: S+w1 (Mix30秒) +C (Mix120秒) +w2+Ad (Mix90秒)

S1-3: S+w1 (Mix30秒) +C (Mix120秒) +w2 (Mix60秒) +Ad (Mix90秒)

比較用の骨材を一次練混ぜ後に投入する分割練混ぜ (S2) と通常の練混ぜ (N) についてはそれぞれ

S2-1: C+w1+Ad (Mix120秒) +S+w2 (Mix90秒)

S2-2: C+w1 (Mix120秒) +S+w2+Ad (Mix90秒)

S2-3: C+w1 (Mix120秒) +S+w2 (Mix60秒) +Ad (Mix90秒)

N-1: C+S+w+Ad (Mix90秒)

N-3: C+S+w (Mix60秒) +Ad (Mix90秒)

なお、分割練混ぜにおける一次の水セメント比はS1の場合25%、S2の場合24%

とした。

3) 測定

測定はフレッシュモルタルについて、温度、単位容積質量、テーブルフロー、ブリーディング試験、および円筒型沈入試験を行った。ブリーディングは土木学会規準に準じて行い、ブリーディング率は最大値を記録した。円筒型沈入試験は3.2.4に示す方法で行い、練り上がり直後と90分後の $\rho_{\alpha 15}$ と $\rho_{\alpha 20}$ を測定した。

硬化後の性状については、4×4×16cmの供試体を用い、材齢7日と28日に曲げ強度と圧縮強度を測定した。供試体の養生は標準養生とした。

(3) 結果

結果を表6-2-13～18、図6-2-30～41に示す。AE剤の添加時期はテーブルフローやブリーディングに対してはほとんど影響を与えないことがわかる。しかし、単位容積質量の結果をみると、添加時期が早いものほど小さくなり、一次水とともに投入するほうが空気連行性がよいことを示している。またAE減水剤および高性能減水剤では、一次水とともに投入した場合に比べ、二次水とともに投入した場合と後添加した場合、テーブルフローは大きくなり、ブリーディングも大きくなった。このように混和剤の添加時期はモルタル性状に様々な影響を与えることが示された。

表6-2-13 モルタル試験結果 (混和剤の影響：高性能減水剤、S/C=2)

記号	S/C および W/C (%)	練混ぜ方法	単位 容積 質量 (kg/l)	テー ブル フ ロー (mm)	ブ リ ー デ ィ ン グ 率 (%)	円筒型沈入試験(g/cm ³)				圧縮強度 (kgf/cm ²)		曲げ強度 (kgf/cm ²)	
						直後		90分後		7日	28日	7日	28日
						$\rho_{\alpha 15}$	$\rho_{\alpha 20}$	$\rho_{\alpha 15}$	$\rho_{\alpha 20}$				
2MS1-1		S+w1+Ad→C→w2	2.207	228	0.67	1.4	1.3	11.0	10.0	401	566	67.9	68.7
2MS1-2		S+w1→C→w2+Ad	2.187	262	1.69	0.4	0.3	3.1	2.8	425	498	68.9	72.1
2MS1-3	S/C=2	S+w1→C→w2→Ad	2.215	266	1.32	0.3	0.3	3.5	3.1	414	519	71.0	63.0
2MS2-1	W/C=53	C+w1+Ad→S+w2	2.186	232	0.62	1.3	1.1	14.0	12.0	401	553	63.6	67.5
2MS2-2		C+w1→S+w2+Ad	2.202	254	0.91	0.5	0.5	4.0	3.6	408	554	69.0	75.1
2MS2-3		C+w1→S+w2→Ad	2.192	284	2.13	0.3	0.3	3.9	3.4	389	571	66.7	70.9
2MN-1		S+C+w+Ad	2.182	254	3.87	0.5	0.5	2.8	3.0	396	486	68.5	79.3
2MN-3		S+C+w→Ad	2.210	278	4.26	0.2	0.2	20.0	18.0	369	575	71.7	81.5

表-6-2-14 モルタル試験結果 (混和剤の影響：高性能減水剤、S/C=3)

記号	S/C および W/C (%)	練混ぜ方法	単位 容積 質量 (kg/l)	テー プ フ ロ ー (mm)	ブ リ ー デ ィ ン グ 率 (%)	円筒型沈入試験(g/cm ³)				圧縮強度 (kgf/cm ²)		曲げ強度 (kgf/cm ²)	
						直後		90分後		7日	28日	7日	28日
						ρ a 15	ρ a 20	ρ a 15	ρ a 20				
3MS1-1	S/C =3	S+w1+Ad→C→ w2	2.192	226	2.16	2.2	1.8	14.0	14.0	287	430	57.2	71.5
3MS1-2		S+w1→C→ w2+Ad	2.188	252	2.83	0.6	0.5	7.0	7.6	264	422	57.2	67.3
3MS1-3		S+w1→C→w2→ Ad	2.196	246	3.86	0.6	0.6	12.0	14.0	267	428	54.5	74.7
3MS2-1	W/C =69	C+w1+Ad→S+w2	2.198	242	2.11	2.9	2.3	17.0	16.0	264	395	52.5	67.0
3MS2-2		C+w1→S+w2+Ad	2.180	246	3.62	0.7	0.6	9.3	10.0	253	400	52.3	67.7
3MS2-3		C+w1→S+w2→ Ad	2.198	260	4.50	0.5	0.6	8.4	9.1	272	391	55.9	74.2
3MN-1		S+C+w+Ad	2.160	245	5.85	0.9	0.7	14.0	44.0	264	415	56.3	77.5
3MN-3	S+C+w→Ad	2.192	253	6.01	0.5	0.4	10.0	27.0	251	374	57.4	75.1	

表-6-2-15 モルタル試験結果 (混和剤の影響：AE剤、S/C=2)

記号	S/C および W/C (%)	練混ぜ方法	単位 容積 質量 (kg/l)	テー プ フ ロ ー (mm)	ブ リ ー デ ィ ン グ 率 (%)	円筒型沈入試験(g/cm ³)				圧縮強度 (kgf/cm ²)		曲げ強度 (kgf/cm ²)	
						直後		90分後		7日	28日	7日	28日
						ρ a 15	ρ a 20	ρ a 15	ρ a 20				
2VS1-1	S/C =2	S+w1+Ad→C→ w2	2.108	228	0.89	2.1	1.5	15.0	14.0	364	542	62.6	78.0
2VS1-2		S+w1→C→ w2+Ad	2.152	231	1.03	1.3	1.1	12.0	11.0	340	518	64.7	78.4
2VS1-3		S+w1→C→w2→ Ad	2.170	229	0.77	1.4	1.0	26.0	26.0	351	575	69.8	83.0
2VS2-1	W/C =53	C+w1+Ad→S+w2	2.136	233	0.93	1.7	1.4	20.0	22.0	364	533	64.3	79.8
2VS2-2		C+w1→S+w2+Ad	2.166	234	1.06	1.3	1.1	17.0	17.0	332	471	62.2	71.1
2VS2-3		C+w1→S+w2→ Ad	2.204	225	0.90	1.6	1.2	20.0	21.0	385	576	68.2	84.8
2VN-1		S+C+w+Ad	2.079	240	3.79	1.3	1.4	9.9	19.0	308	488	56.2	86.2
2VN-3	S+C+w→Ad	2.160	240	3.32	1.0	0.8	9.7	20.0	360	534	68.5	78.2	

表-6-2-16 モルタル試験結果 (混和剤の影響: AE剤、S/C=3)

記号	S/C および W/C (%)	練混ぜ方法	単位 容積 質量 (kg/l)	テー ブル フロ ー (mm)	プリー デ イン グ 率 (%)	円筒型沈入試験(g/cm ³)				圧縮強度 (kgf/cm ²)		曲げ強度 (kgf/cm ²)	
						直後		90分後		7日	28日	7日	28日
						ρ a 15	ρ a 20	ρ a 15	ρ a 20				
3VS1-1	S/C =3	S+w1+Ad→C→ w2	2.094	228	2.06	1.9	1.6	14.0	15.0	174	306	45.6	58.9
3VS1-2		S+w1→C→ w2+Ad	2.114	226	2.01	1.9	1.6	13.0	15.0	176	299	43.3	61.3
3VS1-3		S+w1→C→w2→ Ad	2.158	227	2.17	1.6	1.3	17.0	18.0	192	339	45.5	61.4
3VS2-1		C+w1+Ad→S+w2	2.100	226	2.51	1.7	1.4	19.0	19.0	181	308	45.8	63.7
3VS2-2		C+w1→S+w2+Ad	2.046	238	1.93	1.6	1.3	13.0	14.0	177	292	42.8	61.2
3VS2-3		C+w1→S+w2→ Ad	2.150	222	2.61	1.6	1.4	19.0	18.0	220	328	50.7	62.0
3VN-1		S+C+w+Ad	2.082	236	5.11	1.7	1.5	19.0	21.0	187	336	45.0	64.2
3VN-3		S+C+w→Ad	2.150	232	4.67	1.6	1.6	13.0	13.0	208	350	50.4	69.2
3VS2-2		W/C =69	C+w1→S+w2+Ad	2.046	238	1.93	1.6	1.3	13.0	14.0	177	292	42.8

表-6-2-17 モルタル試験結果 (混和剤の影響: AE減水剤、S/C=2)

記号	S/C および W/C (%)	練混ぜ方法	単位 容積 質量 (kg/l)	テー ブル フロ ー (mm)	プリー デ イン グ 率 (%)	円筒型沈入試験(g/cm ³)				圧縮強度 (kgf/cm ²)		曲げ強度 (kgf/cm ²)	
						直後		90分後		7日	28日	7日	28日
						ρ a 15	ρ a 20	ρ a 15	ρ a 20				
2PS1-1	S/C =2	S+w1+Ad→C→ w2	2.132	236	0.92	1.7	1.4	5.3	5.2	327	459	63.3	67.5
2PS1-2		S+w1→C→ w2+Ad	2.147	258	1.98	0.5	0.5	1.4	1.4	327	471	64.9	69.9
2PS1-3		S+w1→C→w2→ Ad	2.166	266	2.80	0.4	0.4	0.9	1.0	383	571	75.6	85.1
2PS2-1		C+w1+Ad→S+w2	2.130	242	1.47	1.1	1.0	3.8	3.9	360	542	66.0	70.9
2PS2-2		C+w1→S+w2+Ad	2.120	253	3.19	0.5	0.4	1.3	1.4	309	421	61.9	66.6
2PS2-3		C+w1→S+w2→ Ad	2.170	268	3.22	0.5	0.4	1.1	1.6	373	572	68.5	79.3
2PN-1		S+C+w+Ad	2.108	258	4.63	0.6	0.5	2.4	4.6	309	489	59.8	69.5
2PN-3		S+C+w→Ad	2.155	272	11.23	0.4	0.4	2.8	3.5	330	460	68.3	75.1

表-6-2-18 モルタル試験結果 (混和剤の影響: AE減水剤、S/C=3)

記号	S/C および W/C (%)	練混ぜ方法	単位 容積 質量 (kg/l)	テー ブル フロ ー (mm)	ブリー デ ィン グ 率 (%)	円筒型沈入試験(g/cm ³)				圧縮強度 (kgf/cm ²)		曲げ強度 (kgf/cm ²)		
						直後		90分後		7日	28日	7日	28日	
						ρ_{a15}	ρ_{a20}	ρ_{a15}	ρ_{a20}					
3PS1-1	S/C =3	S+w1+Ad→C→ w2	2.145	240	1.74	1.7	1.5	6.2	6.1	226	381	54.3	63.9	
3PS1-2		S+w1→C→ w2+Ad	2.148	250	3.38	0.8	0.7	2.3	3.5	224	379	57.2	66.1	
3PS1-3		S+w1→C→w2→ Ad	2.179	247	2.91	0.9	0.8	2.9	3.2	224	388	61.0	69.6	
3PS2-1		W/C =69	C+w1+Ad→S+w2	2.159	236	1.20	2.1	1.8	8.6	9.0	198	366	53.4	64.4
3PS2-2			C+w1→S+w2+Ad	2.079	252	3.37	0.6	0.5	2.5	4.8	185	322	50.4	59.3
3PS2-3			C+w1→S+w2→ Ad	2.168	248	2.98	0.7	0.6	4.4	5.1	221	399	58.8	68.5
3PN-1		S+C+w+Ad	2.124	254	7.53	0.6	0.6	5.8	17.0	193	344	52.5	52.2	
3PN-3		S+C+w→Ad	2.188	255	7.52	0.4	0.3	10.0	29.0	218	384	61.3	76.0	

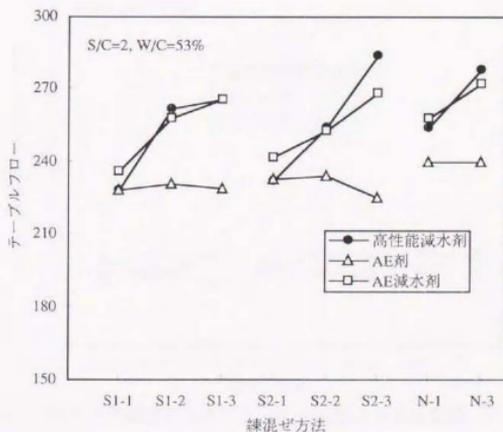


図-6-2-30 混和剤が練混ぜ方法ごとにテーブルフローに与える影響 (S/C=2)

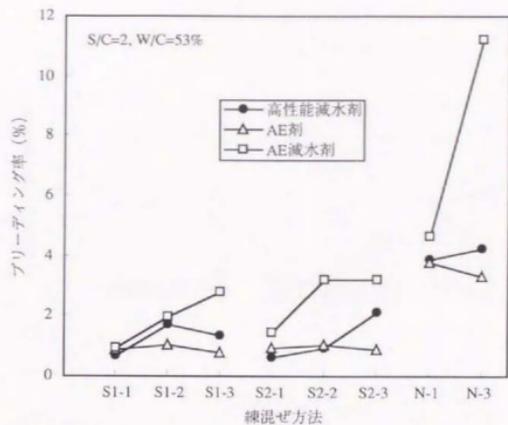


図-6-2-31 混和剤が練混ぜ方法ごとにブリーディングに与える影響 (S/C=2)

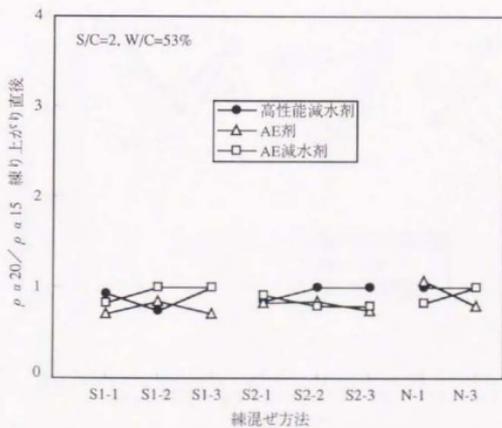


図-6-2-32 混和剤が練混ぜ方法ごとに沈入試験に与える影響 (S/C=2)

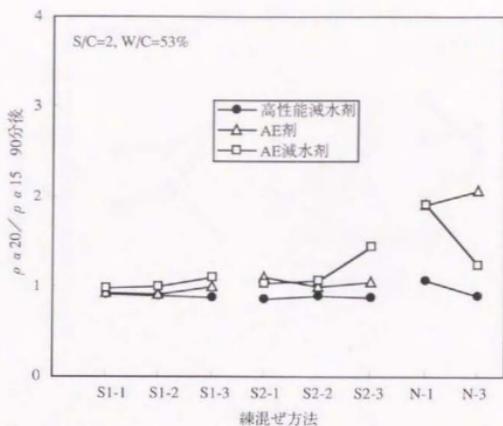


図-6-2-33 混和剤が練混ぜ方法ごとに沈入試験（経時）に与える影響（S/C=2）

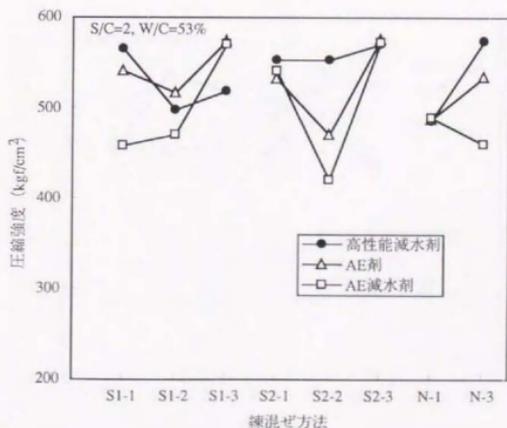


図-6-2-34 混和剤が練混ぜ方法ごとに材齢28日圧縮強度に与える影響（S/C=2）

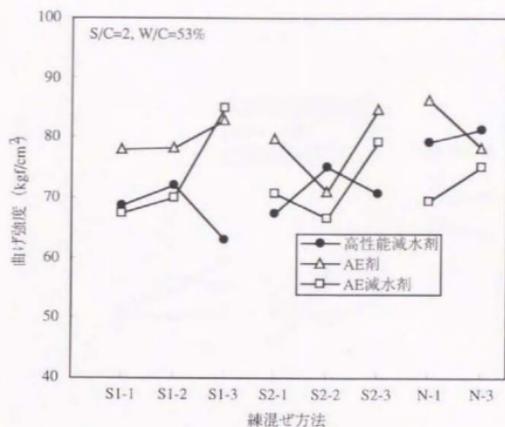


図-6-2-35 混和剤が練混ぜ方法ごとに材齢28日曲げ強度に与える影響 (S/C=2)

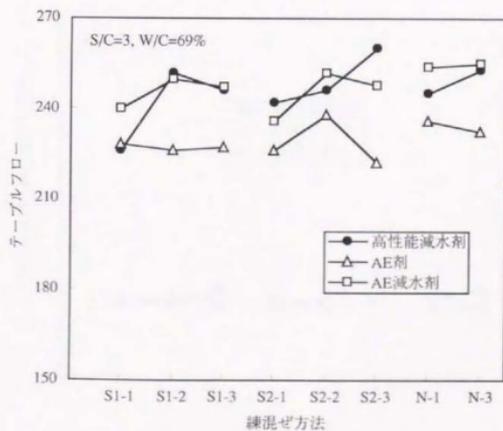


図-6-2-36 混和剤が練混ぜ方法ごとにテーパーフローに与える影響 (S/C=3)

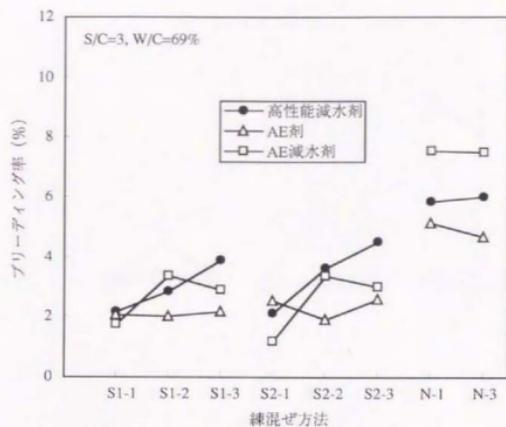


図-6-2-37 混和剤が練混ぜ方法ごとにブリーディングに与える影響 (S/C=3)

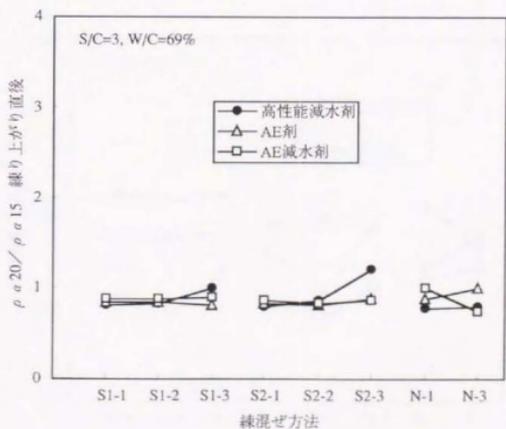


図-6-2-38 混和剤が練混ぜ方法ごとに沈入試験に与える影響 (S/C=3)

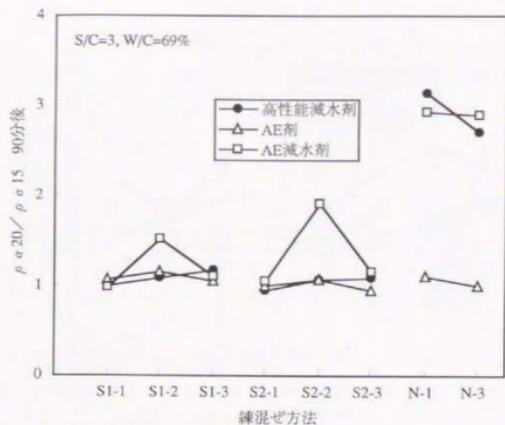


図-6-2-39 混和剤が練混ぜ方法ごとに沈入試験（経時）に与える影響（S/C=3）

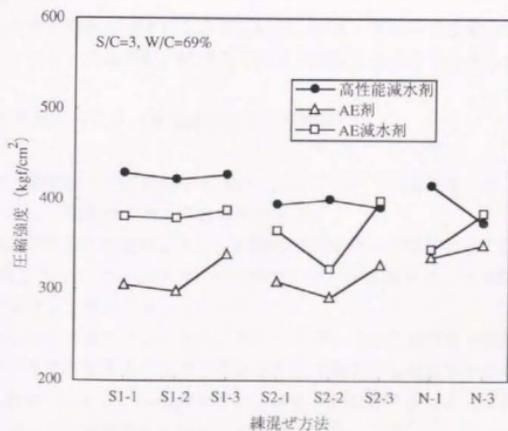


図-6-2-40 混和剤が練混ぜ方法ごとに材齢28日圧縮強度に与える影響（S/C=3）

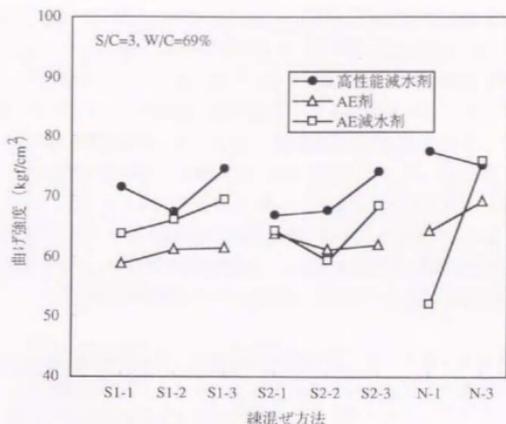


図6-2-41 混和剤が練混ぜ方法ごとに材齢28日曲げ強度に与える影響 (S/C=3)

6. 2. 8 まとめ

一次練混ぜを骨材を含めて行なう場合には、ブリーディングを最小にする一次の水セメント比が、骨材の量、粒度などにより変化することを明らかにした。

6. 3 品質改善効果の大きい分割練混ぜ方法の検討

これまでの結果から分割練混ぜを用いてコンクリートの品質を大きく改善できるのは以下のような場合であることがわかった。

- (1) 4.2および第5章の検討より、一次練混ぜ時に骨材が存在すること。
- (2) 第3章および6.2の検討より、一次の水セメント比はセメント種類、骨材の粒度および量によって異なること。

基本となる一次の水セメント比は、セメントペーストにおける分割練混ぜでブリーディングを最小にする一次の水セメント比であり、普通ポルトランドセメントでは24%程度である。この値はセメント種類、特に粉末度によって異なる。粒度の細かいセメントを使用する場合、この値は大きくなる。

さらに一次練混ぜ時に存在する骨材の量と粒度によって一次の水セメント比を調整する必要がある。6.2.2でセメントに対する骨材の比率が高いほど一次の水セメント比を大きくすることがブリーディングの減少に有効であることがわかった。セメントペーストにおいてブリーディングを最小にする一次の水セメント比

が24%であり、S/Cが3の時にブリーディングを最小にする一次の水セメント比が30%であることから、一般には一次の水セメント比を $[24+2 \times (S/C)]$ %程度にするのがよいと考えられる。また6.2.5と6.2.6の結果、細骨材の粒度が小さい時や、微粒分の多い時は、この数値を若干大きくするのがよい。一方、ブリーディングを最小にする一次の水セメント比は、骨材の粒度が細かいほど、また微粒分の量が多いほど影響を受けることがあきらかになっているのであるから、粗骨材の量により一次の水セメント比を変化させる必要はないものと考えられる。

(3) 3章の検討より、一次の練混ぜ時間は60秒程度以上とすること。

(4) 5章の検討より、骨材界面改善効果による圧縮強度の増進効果はコンクリートの水セメント比が40%程度と小さい場合より50ないし60%程度の時の方が大きいこと。

(5) 3章および6.2の検討より、分割練混ぜ効果はフライアッシュセメント、高炉セメントなどの混合セメント、および中庸熱セメントなどより普通ポルトランドセメントを用いた場合の方が大きいこと。

(6) 3章および6.2の検討より、AE剤の添加時期は早い方（一次練混ぜ時）が空気連行性がよいこと、減水剤の添加時期は遅い方（二次練混ぜ時もしくは後添加）が減水効果が大きいこと。

6. 4 まとめ

分割練混ぜによってコンクリートを製造する際に、ブリーディングを少なく、圧縮強度を大きくする条件を明らかにするための検討を行った。

一次練混ぜ時に骨材が存在する場合に、ブリーディングを最小にする条件を調べるための実験を行った。その結果、ブリーディングを最小にする一次の水セメント比は、骨材の量や粒度によって変化することがあきらかになった。

最後に、品質改善効果の大きい分割練混ぜ方法を示した。基本は一次練混ぜ時に骨材が存在するようにし、一次の水セメント比をセメントペーストでブリーディングを最小にする一次の水セメント比（普通ポルトランドセメントの場合24%）を基準とし、これを骨材量および粒度に応じた量（砂セメント比の2倍の数値）パーセント程度）大きくする方法である。さらに、一次練混ぜ時間は60秒程度以上とするのがよい。また、分割練混ぜにより大きな品質改善効果が期待できるコンクリートの調合条件は、普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比が60%程度と高い場合である。

第7章 分割練混ぜによる界面改善効果の 鋼繊維補強コンクリートへの利用

7. 1 本章の概要

前章までに、分割練混ぜで一次練混ぜ時に骨材が存在する場合、骨材とマトリックスの界面が改善され、このためにコンクリートの圧縮強度が増加することをあきらかにした。鋼繊維補強コンクリートにおいても骨材と同じように鋼繊維を一次練混ぜから投入しておくことで、繊維とマトリックスの付着が向上し、鋼繊維補強コンクリートの曲げ性状などを改善できることが期待される。本章では、モルタルと鋼繊維の付着試験、および鋼繊維の投入順序を変えた分割練混ぜによるコンクリートの実験を行い、一次練混ぜ時に鋼繊維を投入しておくことで、鋼繊維補強コンクリートについても界面改善効果がみられることをあきらかにした。さらに、一次練混ぜから鋼繊維を投入しておく分割練混ぜにより製造した鋼繊維補強コンクリートの性質を調査した¹⁾。

7. 2 鋼繊維とマトリックスの付着の改善

7. 2. 1 実験の概要

分割練混ぜで鋼繊維補強コンクリートを製造する場合、一次練混ぜ時に鋼繊維が存在する練混ぜ方法を用いることにより、鋼繊維とマトリックスの付着が改善される可能性について調べることを目的に、鋼繊維を水セメント比24%のセメントペーストに接触させたものとさせないものをモルタルに打込み、付着試験を行った。その結果、あらかじめ鋼繊維をセメントペーストに接触させたものは、接触させないものに比べて、付着強度が2倍程度大きくなることがあきらかになり、一次練混ぜから鋼繊維を投入しておく分割練混ぜにより鋼繊維とマトリックスの界面改善効果が得られる可能性が高いことがわかった。

7. 2. 2 モルタルと鋼繊維の付着試験

(1) 試験の目的

分割練混ぜで一次練混ぜから鋼繊維を投入しておくことが鋼繊維とマトリックスの付着性状を改善する可能性があるかどうかを確認することを目的に、モルタル

ルの練混ぜ方法2種（通常の方法、分割練混ぜ）、鋼繊維の表面処理2種類（W/C=24%のセメントペーストを接触させたものとさせないもの）で付着試験を行なった。

(2) 試験計画

1) 使用材料・調合

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は粗粒率2.80の相模川産川砂を用いた。

混和剤はリグニンスルホン酸塩を主成分とするAE減水剤を、水は上水道水を用いた。

鋼繊維は神戸製鋼社製で、インデント加工を施した異形のカットワイヤー（直径0.5mm、長さ30mm）を用いた。鋼繊維の形状を図-7-2-1に示す。

モルタルの調合を表-7-2-1に示す。

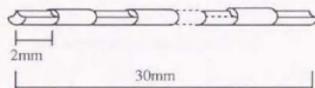


図-7-2-1 鋼繊維の形状 1)

表-7-2-1 モルタルの調合 1)

練り混ぜ	砂セメント比	水セメント比 (%)	温度 (°C)	テーブルフロー (mm)	単位容積質量 (kg/l)	ブリーディング率 (%)	圧縮強度 材齢7日 (kgf/cm ²)
分割	2.53	50	20.0	212	2.170	0.8	424
通常			18.5	206	2.116	1.3	396

2) 試験体の製造

供試体はモルタルの直接引張試験に用いられるブリケット供試体の型枠を用い、最小断面部分においてスリットにより二分し、鋼繊維はスリットに1.5cm間隔で正方形を構成するように設けられた4個の穴を横切って、引張応力方向に配置する。繊維の付着試験部分の長さは15mmとした。供試体の形状を図-7-2-2に示す。

打ち込むモルタルは、分割練混ぜによるものと、通常の一括練混ぜによるものの2種を用いた。分割練混ぜによるものは細骨材と一次投入水を30秒間練り混ぜた後、セメントを投入して120秒間、さらに二次投入水と混和剤を投入して90秒間練り混ぜて作成した。一括練混ぜによるものは、全材料投入後90秒間練り混ぜて作成した。一次投入水は細骨材の表面水とあわせてセメント質量の30%となるように調整した。用いたモルタルの性状を表-7-2-1に示す。

繊維は、練混ぜ直後の水セメント比24%のセメントペーストにつきさし、静かに引き抜いたものと、何も処置しないものの2種類とした。前者は一次練混ぜ時に繊維が存在する場合を模擬したものであり、セメントペースト処理した鋼繊維はただちに供試体型枠内に設置し、モルタルを打ち込んだ。

このように、モルタルを製造方法の違いから2種類、鋼繊維のペースト処理の有無で2種類、これをかけあわせ、合計4種類の供試体について試験を行った。供試体の数はそれぞれ4体とした。

作製した試験体は20℃の室内に1日おいたあと、20℃の水中に保管し、材齢7日で試験した。

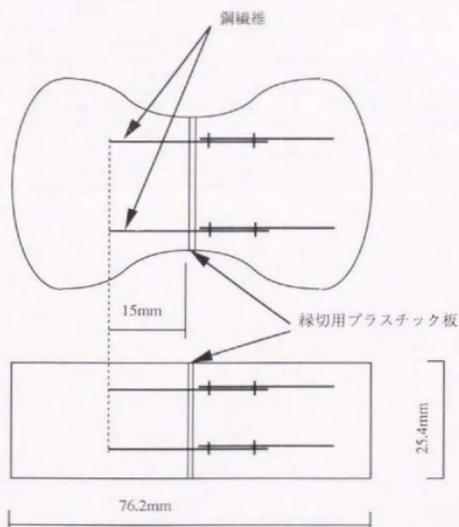


図-7-2-2 付着試験用供試体の形状 1)

3) 測定

付着試験は変位制御型の試験機を用い、1分間に1mmの速度で引張り、その時の荷重を測定した。

(3) 結果

各供試体の最大引抜き荷重の結果を表-7-2-2に、引張荷重-すべり曲線の代表例を図-7-2-3に示す。この結果では、鋼繊維の表面を水セメント比24%のまだ固

まらなセメントペーストに接触させたものの方が、無処理のものより付着強度が高いこと、および分割練混ぜによるモルタルを用いた方が一括練混ぜによるモルタルを用いたものより付着強度が高いことが示された。さらに付着強度が高くなる割合は、モルタルの製造方法よりも、繊維の表面処理の方が大きいことがわかった。モルタルの製造方法の差が付着強度に及ぼす影響は、その増加割合が20%程度であるが、表面処理がもたらす増加割合は100%程度となっている。このように、鋼繊維をW/C=24%のセメントペーストに一旦接触させることで付着強度が高くなることが示された。

表-7-2-2 付着試験結果

種類		最大引抜き強度 (kgf)	
モルタル	鋼繊維表面処理	平均	
分割練り混ぜ	無処理	32、32、39、37	35
	W/C24%のペーストに接触	77、60、65、69	68
通常法	無処理	33、30、28、27	30
	W/C24%のペーストに接触	51、40、64、-	52

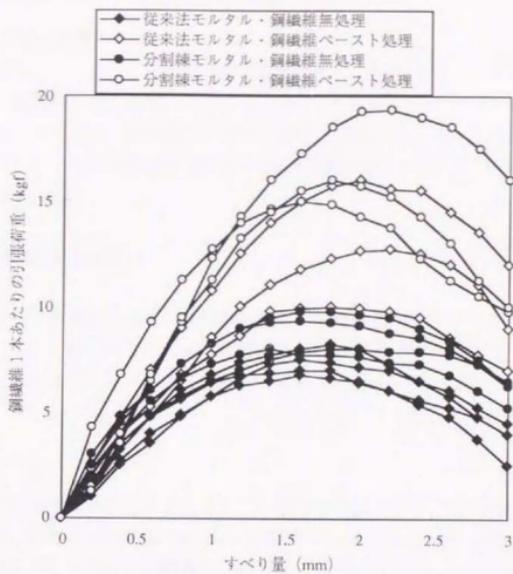


図-7-2-3 鋼繊維とモルタルの付着試験結果

7. 3 分割練混ぜにおける鋼繊維の投入時期の影響

7. 3. 1 実験の概要

鋼繊維補強コンクリートの製造に分割練混ぜ方法を用いる場合、骨材の投入時期と同様、鋼繊維の投入時期によってコンクリートの性質が変わってくるのが考えられる。ここでは、鋼繊維を一次練混ぜ前から投入しておく方法によるものと、コンクリートを分割練混ぜで製造した後に鋼繊維を投入する方法によるものを比較、試験した。

7. 3. 2 投入時期の影響

(1) 試験の目的

分割練混ぜで鋼繊維を投入する時期により、鋼繊維とマトリックスの付着性状に差が生じることが期待されるが、実際に曲げ強度など、鋼繊維補強コンクリートの性質に違いがあるかどうかを確認することを目的に、コンクリートの試験を行なった。

(2) 試験計画

1) 使用材料・調合

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は粗粒率2.80、比重2.60の相模川産川砂を、粗骨材は最大寸法15mm、粗粒率6.27、比重2.63の碎石を用いた。混和剤はリグニンスルホン酸塩を主成分とするAE減水剤を、水は上水道水を用いた。

鋼繊維は付着試験で用いたものと同じ、神戸製鋼社製で、インデント加工を施した異形のカットワイヤー（直径0.5mm、長さ30mm）を用いた。

コンクリートの計画調合を表-7-3-1に示す。

表-7-3-1 コンクリートの計画調合

鋼繊維 混入量 (%vol)	粗骨材 最大寸 法 (mm)	目標ス ランブ (cm)	目標空 気量 (%)	水セメ ント比 (%)	細骨材 率(%)	単位水 量 (kg/m ³)	単位量 (kg/m ³)				
							セメ ント	細骨材	粗骨材	鋼繊維	混和剤
1	15	10	5	50	55	200	400	876	726	79	1.00

2) コンクリートの製造

練混ぜにはバン型の強制練りミキサ（容量50リットル）を用いた。練混ぜ方法としては、マトリックスとなるコンクリートを練り混ぜた後に鋼繊維を投入する従来法、分割練混ぜにより製造したコンクリートに鋼繊維を投入するS-1法、お

よび鋼繊維を一次練混ぜ前から投入しておくS-2法の合計3種類の方法を比較した。従来法では細骨材、粗骨材、セメント、投入水、混和剤をミキサに投入して120秒間練り混ぜた後、ミキサを運転したまま鋼繊維をほぐしながら投入し、投入終了後さらに60秒間練り混ぜた。S-1法では細骨材、粗骨材、および一次投入水を30秒間練り混ぜ、セメントを投入し120秒間練り混ぜ、これに二次投入水と混和剤を投入して90秒間練り混ぜた後、ミキサを運転したまま鋼繊維をほぐしながら投入し、投入終了後さらに60秒間練り混ぜた。S-2法では細骨材、粗骨材、および一次投入水をミキサに投入して練混ぜを開始し、ミキサを運転したまま鋼繊維をほぐしながら投入し、投入終了後セメントを投入し120秒間練り混ぜ、これに二次投入水と混和剤を投入してさらに90秒間練り混ぜた。一次の水セメント比はS-1、S-2法ともに30%とした。

3) 測定

測定はフレッシュコンクリートについて、スランブ、空気量、温度、単位容積質量を試験した。硬化後の性状については、標準養生した供試体の材齢7日と28日の圧縮および曲げ試験を行った。圧縮試験はφ10cm×20cmの型枠、曲げ試験は10cm×10cm×40cmの型枠内にそれぞれ1層で試料を詰め、外部から振動機を用いて締固めた。曲げ試験はスパン30cmの3等分載荷で行い、中央部のたわみと、荷重の関係を記録した。

(3) 結果

コンクリートのスランブおよび強度の測定結果を表7-3-2に、練混ぜ方法と曲げタフネスの関係を図7-3-1に示す。混和剤の添加量を含めて同一調合で製造したため、分割練混ぜによるコンクリートの空気量は従来法に比べて小さな値となった。圧縮試験および曲げ試験の結果はいずれの場合も分割練混ぜによるものは従来法によるものに比べ高い強度を示し、分割練混ぜによるもののうちでは鋼繊維を一次練混ぜの前から投入するS-2法が高い強度とタフネスを示した。

表7-3-2 コンクリートの性状

練り混ぜ	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)	単位容積質量 (kg/l)	圧縮強度 (kgf/cm ²)		曲げ強度 (kgf/cm ²)		曲げタフネス (kgcm)
					材齢7日	28日	材齢7日	28日	
従来	11.2	4.3	14.5	2.303	306	448	54.1	75.2	64.1
S-1	10.8	1.9	15.5	2.361	329	478	62.1	79.3	69.2
S-2	10.7	2.1	16.0	2.361	356	500	69.9	93.5	79.6

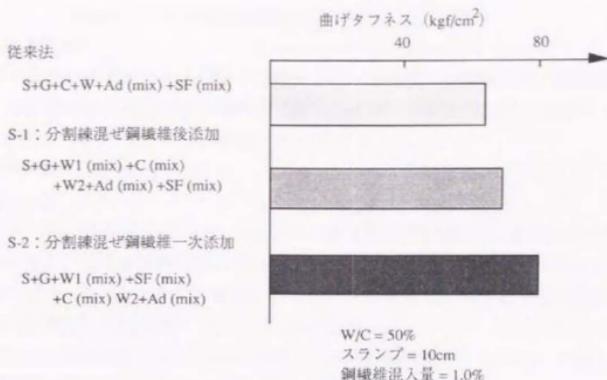


図-7-3-1 練混ぜ方法による曲げタフネスの違い

鋼繊維の付着特性と、鋼繊維補強コンクリートの曲げ性状との関係を調べた趙らの報告(1981)2)によれば、両者の間には密接な関係があり、付着試験による引張荷重—すべり曲線の仕事量が多い鋼繊維を用いた場合に、靱性の大きい鋼繊維補強コンクリートが得られたとしている。この報告においては鋼繊維の付着特性を鋼繊維の種類を変えることによって変化させているが、今回の実験では同じ鋼繊維を用いて、まだ固まらない水セメント比の小さいセメントペーストと接触させるという処理によって付着特性を変化させている。今回、S-2法が高い曲げ強度を示したことから、一次練混ぜ時に鋼繊維を入れておくことが、付着を改善し、高い曲げ強度と曲げタフネスをもたらしたものといえる。

7. 4 一次練混ぜ時に鋼繊維が存在する分割練混ぜによる鋼繊維補強コンクリート

7. 4. 1 実験の概要

曲げ強度や曲げタフネスの向上に効果が認められた一次練混ぜ時に鋼繊維が存在する分割練混ぜ方法について、鋼繊維の混入量を1、2%とした鋼繊維補強コンクリートのプリージング、圧縮強度と圧縮タフネス、曲げ強度と曲げタフネス、およびせん断強度を調査した。試験では通常の製造方法によるものと比較した。

7. 4. 2 分割練混ぜによる鋼繊維補強コンクリートの性質

(1) 試験の目的

曲げ強度や曲げタフネスの向上に効果が認められた一次練混ぜ時に鋼繊維が存在する分割練混ぜ方法による鋼繊維補強コンクリートの各種性状を調査することを目的に、コンクリートの試験を行なった。

(2) 試験計画

1) 使用材料・調査

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は粗粒率2.97、比重2.62の大井川産川砂を、粗骨材は最大寸法15mm、粗粒率6.27、比重2.63の砕石を用いた。

混和剤はリグニンスルホン酸塩とポリオール複合体を主成分とするAE減水剤と空気量調整用のAE剤を、水は上水道水を用いた。

鋼繊維は付着試験で用いたものと同じ、神戸製鋼社製で、インデント加工を施した異形のカットワイヤー（直径0.5mm、長さ30mm）を用いた。

コンクリートの計画調査を表-7-4-1に示す。鋼繊維の混入量は体積比で1%と2%の2水準とした。

表-7-4-1 コンクリートの計画調査

鋼繊維 混入量 (%vol)	練混ぜ	粗骨 材最 大寸 法 (mm)	目標 スラ ンプ (cm)	目標 空気 量 (%)	水セ メン ト比 (%)	細骨 材率 (%)	単位 水量 (kg/m ³)	単位量(kg/m ³)				混和剤 (ml/m ³)	
								セメ ント	細骨 材	粗骨 材	鋼繊 維	AE減 水剤	AE剤
0	分割	15	12	5.0	50	47	174	348	820	928	0	870	13.92
	従来												10.44
1	S-2	15	12	5.0	50	54	204	408	859	734	79	1020	8.16
	従来												0
2	S-2	15	12	5.0	50	74	224	448	1095	387	157	1120	0
	従来												0

2) コンクリートの製造

練混ぜには水平2軸形の強制練りミキサ（容量100リットル）を用い、練混ぜ量は80リットルとした。練混ぜ方法としては、マトリックスとなるコンクリートを練り混ぜた後に鋼繊維を投入する従来法と、分割練混ぜで鋼繊維を一次練混ぜ前から投入しておくS-2法の2方法を比較した。従来法では細骨材、粗骨材、セメント、投入水、混和剤をミキサに投入して120秒間練り混ぜた後、ミキサを運転したまま鋼繊維をほぐしながら投入し、投入終了後さらに60秒間練り混ぜた。S-2法では細骨材、粗骨材、および一次投入水をミキサに投入して練混ぜを開始

し、ミキサを運転したまま鋼繊維をほぐしながら投入し、投入終了後セメントを投入し120秒間練り混ぜ、これに二次投入水と混和剤を投入してさらに90秒間練り混ぜた。S-2法における一次の水セメント比は30%とした。また、鋼繊維を投入するのに要した時間は混入量2%の時で約1分間であった。

3) 測定

測定はフレッシュコンクリートについて、スランブ、空気量、温度、単位容積質量、およびブリーディングを試験した。硬化後の性状については、標準養生した供試体の材齢7日と28日に、圧縮試験、曲げ試験を、また材齢28日でせん断試験を実施した。圧縮試験供試体の製造はφ10cm×20cmの型枠、曲げ試験およびせん断試験供試体の製造は10cm×10cm×40cmの型枠内にそれぞれ1層で試料を詰め、外部から振動機を用いて締固めた。圧縮試験では応力-ひずみ関係を記録し、曲げ試験はスパン30cmの3等分載荷で行い、中央部のたわみと、荷重の関係を記録した。せん断強度は直接2面せん断試験方法により測定した。各試験方法は鋼繊維補強コンクリートに関する試験方法のJCI規準案に準拠した。

(3) 結果

1) 練り上がり性状

各コンクリートの練り上がり性状を表-7-4-2に示す。空気の連行量に関しては、使用したAE減水剤の基本タイプのみではS-2法のブレンおよび1%、従来法のブレンで目標に達しなかったため、AE剤を別に添加して調整した。空気は繊維量が増加するほど大きくなる傾向にあり、同じAE減水剤の使用量では、繊維の混入量が1%以下では従来法の方が、2%では分割練混ぜの方が空気量が大きくなる傾向が見られた。ブリーディングは分割練混ぜ方法を用いることにより、従来法に比べて3から4割の減少を示したが、この減少率は繊維の混入量が小さいほど大きかった。

表-7-4-2 練り上がり性状

鋼繊維 混入量 (vol%)	練混ぜ	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)	単位容積 質量(kg/l)	ブリーディング	
						量(ml/cm ³)	率(%)
0	分割	10.5	4.1	18	2.307	0.11	2.57
	従来	11.6	5.1	18	2.280	0.20	4.48
1	S-2	12.2	4.7	18	2.299	0.16	3.26
	従来	11.8	4.0	17	2.300	0.28	5.31
2	S-2	13.9	6.5	20	2.279	0.17	3.07
	従来	13.8	5.8	19	2.289	0.23	4.27

2) 強度およびタフネス

各試験結果を表-7-4-3および図-7-4-1~3に示す。圧縮強度は鋼繊維の混入によってもその値はほとんど変らなかつたが、圧縮タフネスは繊維混入量2%のものが1%のものに比べて高い値を示した。練混ぜ方法の違いでは、繊維混入量2%の材齢28日の結果を除き、分割練混ぜによるものの方が高い圧縮強度を示した。

曲げ強度は鋼繊維の混入量に大きく影響を受け、混入量の増加とともに最大強度、タフネスともにあきらかに上昇した。練混ぜ方法の違いでは、鋼繊維を混入したものでは分割練混ぜによるものの方が高い曲げ強度およびタフネスを示した。

せん断強度も曲げ強度と同様に、鋼繊維の混入によりその値が大きくなった。練混ぜ方法の違いも、鋼繊維を混入したものは分割練混ぜによるものが高いせん断強度を示した。

表-7-4-3 鋼繊維補強コンクリートの性状

鋼繊維 混入量 (vol%)	練混ぜ	圧縮強度 (kgf/cm ²)		圧縮タフネス (kgf/cm ²)		曲げ強度 (kgf/cm ²)		曲げタフネス (kgf/cm ²)		せん断 強度 (kgf/cm ²)
		材齢1週	4週	1週	4週	1週	4週	1週	4週	
		0	分割	300	400	-	-	56.3	62.2	
	従来	258	377	-	-	58.0	69.0	-	-	70.8
1	S-2	267	399	241	292	68.2	101.3	60.9	86.2	100.0
	従来	239	376	205	274	52.9	94.6	44.7	80.8	87.0
2	S-2	299	398	252	328	104.1	154.8	90.9	124.3	117.3
	従来	278	417	235	328	103.0	128.7	91.4	102.0	111.7

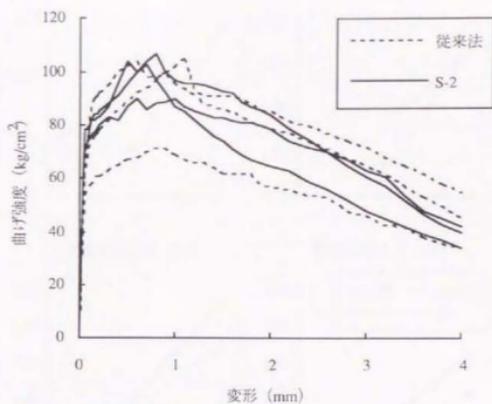


図-7-4-1 曲げ試験結果の例 (混入量1%、材齢28日)

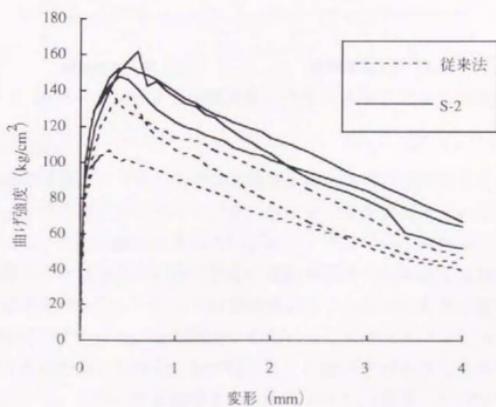


図-7-4-2 曲げ試験結果の例 (混入量2%、材齢28日)

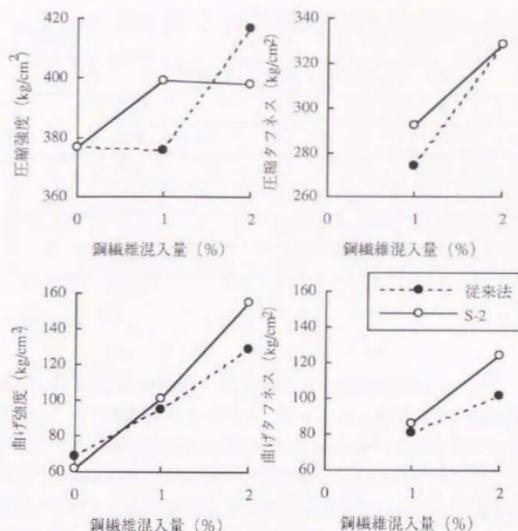


図-7-4-3 練混ぜ方法による鋼繊維量と強度およびタフネスの関係 1)

3) 試験結果の変動

一般に鋼繊維補強コンクリートでは各強度試験の変動係数が大きくなるといわれているが、今回の各試験について3本の供試体の変動係数を求めると表-7-4-4に示すようになった。鋼繊維の入らないプレーンではすべて10%以下であるのに比べ、鋼繊維の入った従来法の曲げ強度の変動係数は10%を超える場合が多く見られた。分割練混ぜを行ったものでは鋼繊維の入ったものでも曲げ強度の変動係数は常に10%以下であった。分割練混ぜを用いることでマトリックスの均質化、および鋼繊維との安定した付着性状が得られ、変動係数が小さくなる可能性も考えられる。しかし、このことを確認するためにはさらに数多くの試験が必要である。

表-7-4-4 各試験結果の変動係数（3本の供試体による%）

鋼繊維 混入量 (%vol)	練混ぜ	圧縮強度		曲げ強度		せん断強度
		材齢1週	4週	1週	4週	4週
0	分割	2.1	4.3	2.5	8.6	5.8
	従来	2.5	4.5	8.2	4.7	5.0
1	S-2	1.8	3.0	5.7	8.7	0.1
	従来	0.9	4.2	4.3	20.1	5.5
2	S-2	1.5	0.5	9.3	4.3	7.6
	従来	3.1	3.7	10.3	14.6	11.8

7. 5 まとめ

分割練混ぜによる界面改善効果の応用例として鋼繊維補強コンクリートについて検討を行なった。一次練混ぜを一次水、セメント、骨材および鋼繊維で行なう分割練混ぜによって、曲げ強度および曲げタフネスが大きくなることを確かめた。このことは、分割練混ぜで鋼繊維を一次練混ぜ時に入れておくことで、骨材と同様に繊維とマトリックスの間にも界面改善効果が生じるためであるといえる。

参考文献

- 1) 早川光敬、山本康弘、「鋼繊維補強コンクリートにおける練り混ぜ方法の影響について」、繊維補強コンクリートに関するシンポジウム論文集、日本コンクリート工学協会、1984年2月、pp33-38
- 2) 趙力采、小林一輔、西村次男、「鋼繊維の付着特性と鋼繊維補強コンクリートの曲げ性状との関係」、生産研究、33巻1号、1981年1月、pp22-25

第8章 品質改善効果の大きい分割練混ぜ方法の 建設工事への適用

8. 1 本章の概要

これまでに品質改善効果の大きい分割練混ぜ方法とは一次練混ぜ前に細粗骨材を投入しておき、一次の水セメント比はセメントのブリーディングを最小とするW1/Cを骨材の粒度や量に応じて増加させた値とする方法であることを示した。ここでは、この方法を実際の建設工事に適用した例を示す。

8. 2 発電所内建屋の建設工事 1)

8. 2. 1 工事概要

愛媛県内の原子力発電所の施設の一つである、地上3階、地下1階、延べ床面積2,633m²の鉄筋コンクリート構造による事務所棟の建設に、品質改善効果の大きい分割練混ぜ方法によるコンクリートを用いた。コンクリートの全打設量は2,510m³で、このうち1,900m³を分割練混ぜ方法によるコンクリートを用い、残りの610m³は通常のコンクリートを打ち込んだ。

8. 2. 2 事前の検討

一次練混ぜ時に骨材が存在する分割練混ぜ方法の採用に際して、ミキサの種類、調査条件などが現地の材料を用いたコンクリートの性状に与える影響を調査した。また、実機ミキサによる製造試験および、製造したコンクリートの施工性試験を行った。

(1) ミキサの検討

現地の材料を用いた場合に、用いるミキサと練混ぜ方法がコンクリートの品質に与える影響を調査した。

1) 使用材料・調査

普通ポルトランドセメントと中熱ポルトランドセメントを用いた。試験成績を表-8-2-1に示す。骨材は四国産の海砂および砕石を用いた。骨材の品質を表-8-2-2に示す。混和剤は遅延型のAE減水剤を用いた。

コンクリートの調査を表-8-2-3に示す。基本調査は水セメント比55%、細骨材

率41.2%、単位水量188kg/m³とした。

表-8-2-1 セメントの品質

種類	比重	比表面積 (cm ² /g)	凝結 (時一分)		安定性	圧縮強度 (kgf/cm ²)		
			始発	終結		3日	7日	28日
普通	3.15	3360	2-23	3-32	良	149	249	416
中庸熟	3.23	3020	2-35	3-58	良	116	153	301

表-8-2-2 骨材の品質

種類	通過百分率 (%)										粗粒率	表乾 比重	吸水率 (%)	単位容積 質量 (kg/m ³)
	0.15	0.3	0.6	1.2	2.5	5	10	15	20	25 mm				
海砂	5	22	46	84	96	100	-	-	-	-	2.48	2.56	2.89	1,604
碎石	-	-	-	-	0	3	23	51	63	99	7.12	2.98	0.96	1,776

表-8-2-3 コンクリートの基本調合

粗骨材最 大寸法 (mm)	目標スラ ンプ(cm)	目標空気 量 (%)	水セメン ト比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)
20	18	4.0	55.0	41.2	188

2) 試験方法

強制練りミキサ (アイリッヒ型、容量50リットル) と傾胴型ミキサ (容量30リットル) の2種類のミキサを用い、3種類の練混ぜ方法でコンクリートを製造した。練混ぜ方法は、分割練混ぜで細骨材と粗骨材を一次練混ぜ前に投入するSA法、分割練混ぜで細骨材のみを一次練混ぜ前に投入するSB法、細骨材、粗骨材、水、セメントの順に投入する従来法の3種類である。分割練混ぜの一次の水セメント比は23%とした。

3) 結果

各々のセメントについて、傾胴ミキサで従来法により製造したコンクリートを基準とした圧縮強度とブリーディングの結果を表-8-2-4に示す。普通ポルトランドセメントおよび中庸熟セメントのどちらのセメントを用いた場合も、分割練混ぜの効果を有効に生かすためには、ミキサは傾胴型よりも強制練りミキサを用いるほうがよいことが明らかになった。また、分割練混ぜのうちでも、細骨材と粗骨材の両方を一次練混ぜ前に投入しておく方法が、高い分割練混ぜ効果を得る方法であることが確認された。

表-8-2-4 傾胴型ミキサによる従来法を基準とした結果

ミキサ		強制			傾胴		
練混ぜ方法		SA	SB	従来	SA	SB	従来
普通 セメント	ブリーディング	0.1	0.3	0.3	0.65	0.85	1
	圧縮強度	1.41	1.33	1.21	1.12	1.20	1
中庸熟 セメント	ブリーディング	0.77	1.38	1.08	1.46	1.46	1
	圧縮強度	1.27	1.08	1.19	1.11	1.01	1

(2) 水セメント比と強度の関係の検討

現地の材料を用いた場合の、練混ぜ方法ごとの水セメント比と強度の関係を調査した。

1) 使用材料・調査

使用材料は (1) ミキサの検討で用いたものと同じである。セメントは普通ポルトランドセメントとした。コンクリートの調査を表-8-2-5に示す。水セメント比は55、58、61、64%の4点とした。

表-8-2-5 コンクリートの基本調査

粗骨材最大寸法 (mm)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)
20	18	4.0	55.0	44.5	187
			58.0	44.5	188
			61.0	44.5	188
			64.0	44.5	188

2) 試験方法

強制練りミキサ (アイリッヒ型、容量50リットル) を用いてコンクリートを製造した。練混ぜ方法は、分割練混ぜで細骨材と粗骨材を一次練混ぜ前に投入するSA法、および細骨材、粗骨材、水、セメントの順に投入する従来法の2種類である。SA法の一次の水セメント比は25%とした。

3) 結果

結果を表-8-2-6に示す。使用材料、練混ぜ方法ごとの水セメント比と強度の関係が得られた。水セメント比が大きいものほど、練混ぜ方法による強度の差が大きくなる傾向がみられた。

表-8-2-6 測定結果（水セメント比の検討）

水セメント比 (%)	練混ぜ	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)	ブリーディング率 (%)	圧縮強度(kg/cm ²)	
						材齢7日	材齢28日
55	分割練混ぜ	19.5	4.4	15.0	0.2	261	353
	従来法	18.0	4.2	15.0	0.7	257	351
58	分割練混ぜ	19.3	3.5	15.0	0.8	236	336
	従来法	18.3	4.0	15.0	1.0	239	326
61	分割練混ぜ	19.3	4.0	15.0	1.0	220	315
	従来法	19.0	3.8	15.0	1.3	207	299
64	分割練混ぜ	18.8	3.5	15.0	1.1	209	304
	従来法	19.1	4.3	15.0	1.5	180	265

(3) 大型ミキサによる製造の検討

発電所の敷地内にあるコンクリート製造プラントのミキサを、分割練混ぜに適していると考えられた強制練りミキサに置き換え、これにより練混ぜ実験を行った。ミキサの形式は水平軸型で容量は2m³である。あわせて細骨材の表面水調整装置を設置し、表面水量を調整した細骨材を使用した。

1) 材料・調合

使用した材料は、セメントは徳山社の普通ポルトランドセメント、細骨材は大分県鶴崎産山砂と福岡県志摩産山砂を混合したもの（FM=2.78）、粗骨材は最大寸法20mmの愛媛県大州産の碎石（FM=6.55）、混和剤は遅延型のAE減水剤（ボゾリス#8）である。コンクリートの調合は表-8-2-7に示したAである。

表-8-2-7 コンクリートの調合

記号	粗骨材の最大寸法 (mm)	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積(l/m ³)			単位量(kg/m ³)			混和剤 (kg/m ³)
							セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材	
A	20	18	5.5	60	45.6	190	100	299	356	317	765	1040	0.793
B	20	21	5.5	60	48.7	203	107	309	326	338	791	962	0.845

2) 試験方法

練混ぜ方法は分割練混ぜ方法と従来法の2種類とした。分割練混ぜ方法では細骨材、粗骨材および一次投入水を投入してから20秒後にセメントを放出し、90秒間練り混ぜ、二次水とAE減水剤を投入してさらに60秒間練り混ぜた。分割練混ぜ

ぜ方法の一次の水セメント比は23%とした。

3) 結果

表-8-2-8に練混ぜ実験の結果を示す。分割練混ぜを用いることでブリーディングが約3分の2に低減できること、材齢28日の圧縮強度は15%程度大きくなるという結果が得られた。

表-8-2-8 実プラントにおける製造試験結果

種類	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/l)	温度 (℃)	ブリーディング率 (%)	圧縮強度(kgf/cm ²)	
						材齢7日	材齢28日
分割練混ぜ	17.0	3.8	2.387	31	2.32	211	342
従来法	18.8	4.1	2.371	29	3.53	181	298

(4) 施工性の検討

打設高さが8mの壁試験体の打込み実験を行なった。

1) 材料・調合

使用した材料は、セメントは徳山社の普通ポルトランドセメント、細骨材は大分県鶴崎産山砂と福岡県志摩産山砂を混合したもの(FM=2.78)、粗骨材は最大寸法20mmの愛媛県大州産の碎石(FM=6.55)、混和剤は遅延型のAE減水剤(ボゾリス#8)である。コンクリートの調合は表-8-2-7に示したAである。

2) 試験方法

練混ぜ方法は分割練混ぜ方法と従来法の2種類とした。分割練混ぜ方法では細骨材、粗骨材および一次投入水を投入してから20秒後にセメントを放出し、90秒間練り混ぜ、二次投入水とAE減水剤を投入してさらに60秒間練り混ぜた。

この2種類の製造方法によるコンクリートを、それぞれ高さ8m、幅1m、厚さ40cmの2体の壁型枠内に打ち込んだ。試験体には、D16鉄筋を壁の厚さ方向の中央付近に縦横20cm間隔に配筋した。各コンクリートのそれぞれ1体の試験体には付着試験用の鉄筋D19を1.8m間隔に4段、各段3本埋設した。試験体付着長は6cmとし、他の部分はガムテープにより付着抵抗を取り除いた。コンクリートの打込みはブーム付きポンプ車を用い、配管の先端を型枠内に差込み、8mの高さを自由落下させ、棒状振動機を用いて締め固めた。打込みに要した時間は1体につき平均17分であった。

使用したコンクリートについて、練り上がり、荷卸し、筒先における各コンクリートのフレッシュ性状の試験、および圧縮強度を測定した。試験体に打ち込んだコンクリートについては高さごとのコア強度および付着強度を測定した。

3) 結果

まだ固まらないコンクリートの性状と強度試験の結果を表-8-2-9に示す。圧縮強度は標準養生した供試体の強度であるが、材齢28日の平均値は分割練混ぜによるもの297kgf/cm²、従来法によるもの289kgf/cm²で、分割練混ぜによるものの方が大きな値を示したが、大きな差は認められなかった。

表-8-2-9 壁試験体打込みコンクリートの測定結果

種類	試験体	プラント				荷卸し				圧縮強度 荷卸し採取 (kgf/cm ²)	
		スラン プ(cm)	空気量 (%)	単位容 積質量 (kg/l)	温度 (℃)	スラン プ(cm)	空気量 (%)	単位容 積質量 (kg/l)	温度 (℃)	材齢 7日	材齢 28日
分割練 混ぜ	A	18.9	3.7	2.36	17.0	19.4	4.2	2.37	17.5	189	302
	B	18.9	3.7	2.35	17.0	17.5	3.7	2.42	18.0	188	292
従来法	C	19.3	5.0	2.36	16.0	15.0	4.9	2.42	17.5	189	285
	D	17.2	4.7	2.37	17.0	14.0	4.5	2.41	18.0	191	293

これに対し、ブリーディングの結果は図-8-2-1に示すように分割練混ぜによるものが明らかに小さくなった。打込み20時間後に試験体の頂部を観察したところ、従来法によるものを打ち込んだ試験体では沈みキレットが観察されたが、分割練混ぜによるものでは沈みキレットは見られなかった。

図-8-2-2はコア供試体による試験体の高さ方向の圧縮強度の分布を示したもの

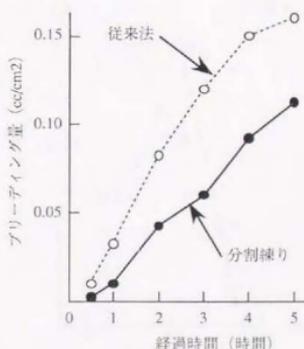


図-8-2-1 ブリーディング試験結果

である。従来法のコンクリートでは下部から頂部にかけてほぼ直線的に強度が低下しているが、分割練混ぜによるものでは最上部のみ強度が低くなっているが、他はほぼ等しい強度を示した。図-8-2-3は附着試験結果を示したもので、分割練混ぜによるものの方が上下の強度差が小さい結果となった。

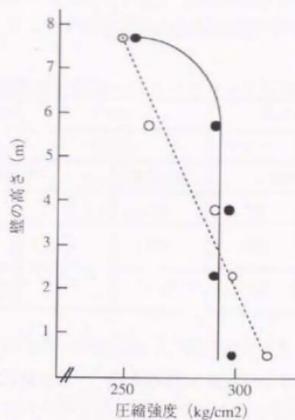


図-8-2-2 高さ方向の圧縮強度の分布

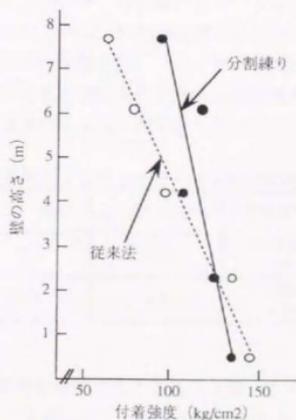


図-8-2-3 高さ方向の附着強度の分布

8. 2. 3 コンクリート工事

工事に使用したコンクリートの割合は表-8-2-7に示したものである。練り上がりスランブで18cmと21cmの2種類の割合を用意した。分割練混ぜで製造したコンクリートのプラントで採取し、標準養生した供試体の強度、荷卸し時に採取した試料で標準養生したものと現場水中養生した供試体の強度の結果を表-8-2-10に示す。これによれば、プラント採取試料の圧縮強度の平均値および標準偏差は、

表-8-2-10 分割練混ぜで製造したコンクリート圧縮強度試験結果 1)

試料	割合A (スランブ18cm)			割合B (スランブ21cm)		
	プラント	荷卸し		プラント	荷卸し	
養生	標準養生		現場水中	標準養生		現場水中
試料数	14	14	14	10	10	10
平均 (kgf/cm ²)	328	341	296	326	349	281
標準偏差 (kgf/cm ²)	21.0	20.7	24.3	14.4	14.5	11.9

スランブ18cmの割合Aで平均=328kgf/cm²、標準偏差=21.0kgf/cm²、スランブ21cmの割合Bで平均=326kgf/cm²、標準偏差14.4kgf/cm²であった。

スランブ18cmの割合Aについては、比較のために従来法によるコンクリートも製造して用いた。表-8-2-11は分割練混ぜによるコンクリートと従来法によるコンクリートの圧縮強度、スランブ、空気量、ブリーディングの試験結果の平均を比べたものである。これによれば、分割練混ぜによるコンクリートは従来法によるものと比べて圧縮強度で16%増大し、ブリーディングは44%減少した。このように実際の工事に於ても品質改善効果の大きい分割練混ぜ方法を採用することで、コンクリートの品質を改善できることが示された。

表-8-2-11 工事で使用したコンクリートの性状の平均値の比較 1)

種類	スランブ(cm)	空気量(%)	圧縮強度(kgf/cm ²)	ブリーディング量(cc/cm ³)
分割練混ぜ	18.2	3.9	328 (116)	0.14 (56)
従来法	17.1	4.3	282 (100)	0.25 (100)

8. 2. 4 まとめ

愛媛県内の原子力発電所の施設である、地上3階、地下1階、延べ床面積2,633m²の鉄筋コンクリート構造による事務所棟の建設に、品質改善効果の大き

い分割練混ぜ方法によるコンクリートを用いた。コンクリートの全打設量は2,510m³で、このうち1,900m³を分割練混ぜ方法によるコンクリートを用い、残りの610m³は通常のコンクリートを打ち込んだ。その結果、分割練混ぜによるコンクリートは従来法によるものと比べて圧縮強度で16%増大し、ブリーディングは44%減少した。実際の工事に於ても品質改善効果の大きい分割練混ぜ方法を採用することで、コンクリートの品質を改善できることが示された。

8. 3 寒冷地に建つホテルの建設工事 (2)

8. 3. 1 工事概要

本工事は北海道勇払郡の大規模リゾートホテルであり、地上3階、地下1階のRC造（一部型枠ブロック使用）で延べ床面積8,700m²である。品質改善効果の大きい分割練混ぜによるコンクリートは、昭和58年4月から7月までの4カ月間で、コンクリートの打設量は、12,000m³であった。

8. 3. 2 コンクリート工事

(1) コンクリートの製造

品質改善効果の大きい分割練混ぜによるコンクリートの製造は、現場から車で約90分程度離れた富良野市のレディーミクストコンクリート工場に、細骨材の表面水率調整装置を設置して行った。使用した細骨材の表面水率調整装置は時間あたり20m³の処理能力を有するものであった。練混ぜには容量1.5m³の水平2軸ミキサーを使用し、細骨材と粗骨材と一次投入水を15秒間練り混ぜた後、セメントを投入して60秒間練り混ぜ、さらに二次投入水と混和剤を加えて60秒間練り混ぜた。一次の水セメント比は30%とした。1バッチの練混ぜ量は1.25m³とした。

(2) コンクリートの調合

工事に用いた材料はセメントが日本セメント(株)製の普通ポルトランドセメント、細骨材は空知川産の川砂で比重2.64、粗粒率が2.90のもの、粗骨材は同じく空知川産の川砂利で最大寸法25mm、比重2.74、粗粒率6.91のものである。コンクリートの調合はスランプ15cm、設計基準強度210kgf/cm²、空気量4.5%で、現場到着後流動化剤によりスランプを18cmにして打込んだ。ベースコンクリートの調合を表-8-3-1に示す。

表-8-3-1 コンクリートの調合

呼び強度	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	表乾重量 (kg/m ³)		
							セメント	細骨材	粗骨材
210	25	15	4.5	55.6	42.6	163	293	808	1132

表-8-3-2に試し練りの試験結果を示す。分割練混ぜを用いることにより圧縮強度は6%増加し、ブリーディングは42%低減された。

表-8-3-2 試し練り試験結果

練混ぜ	スランブ (cm)	空気量 (%)	ブリーディング率 (%)	材齢28日圧縮強度 (kgf/cm ²)
従来法	18.0	4.8	4.00	268
分割練混ぜ	18.0	4.3	2.30	284

図-8-3-1は分割練混ぜにより製造したコンクリートの打設日ごとの試験結果の値である。コンクリートの圧縮強度の全体の平均値は274kgf/cm²、標準偏差は11.8kgf/cm²であり、このプラントの同一調合の従来法のコンクリートの実績に比べ8%の圧縮強度の向上が認められた。また、ブリーディングは従来法のコンクリートに比べて45%低減され、スラブの金ゴテ仕上げの短縮ができた。

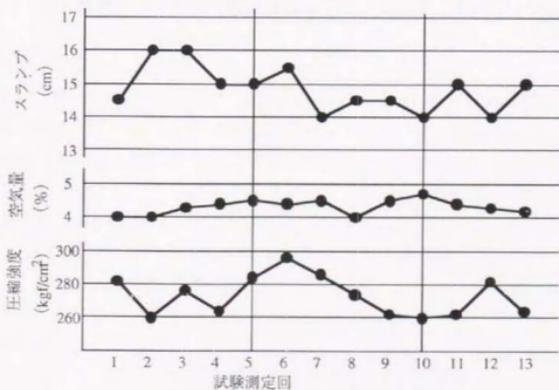


図-8-3-1 工事現場における試験測定結果

8. 4 まとめ

品質改善効果の大きい分割練混ぜ方法により製造したコンクリートを建設工事に適用した二つの例を紹介した。地上3階、地下1階、延べ床面積2,633m²の鉄筋コンクリート構造による事務所棟の建設に、品質改善効果の大きい分割練混ぜ方法によるコンクリートを用いた。コンクリートの全打設量は2,510m³で、このうち1,900m³を分割練混ぜ方法によるコンクリートを用い、残りの610m³は通常のコンクリートを打ち込んだ。その結果、分割練混ぜによるコンクリートは従来法によるものと比べて圧縮強度で16%増大し、ブリーディングは44%減少した。また、延べ床面積8,700m²のホテルに適用した例では、同じプラントの実績と比べて圧縮強度で8%、ブリーディングは45%の低減効果が認められた。このように提案した練混ぜ方法は実工事に於てコンクリートの品質向上に寄与するものであることが確認された。

参考文献

- 1) 山本康弘、服部高重、黒羽健嗣、丸嶋紀夫、鈴木明人、石井貴和、早川光敬、「SECコンクリートの実用化に関する研究」、大成建設技術研究所報、第15号、1982年、pp35-44
- 2) 早川光敬、石井貴和、林俊雄、黒羽健嗣、山本康弘、「SECコンクリートの特性と建築工事への適用」、大成建設技術研究所報、第17号、1985年、pp23-33

第9章 結論

水の添加を二回に分ける分割練混ぜ方法を用いてコンクリートを製造する場合、水の添加割合を適切に選ぶことにより、圧縮強度の増大、ブリーディングの減少など、コンクリートの品質を大幅に改善できる可能性がある。本研究の目的はコンクリートにおいて、分割練混ぜにより圧縮強度が増大する機構を検討し、圧縮強度の増大効果が得られる条件をあきらかにすることである。

研究の結果、分割練混ぜにより圧縮強度が増大する機構は、分割練混ぜでセメントペーストのブリーディングが減少することにより骨材下面にできる欠陥が小さくなること、および一次練混ぜを骨材を含めて行うことで骨材とマトリックスの付着が改善されるための二つであることをあきらかにした。

また、分割練混ぜにおける圧縮強度の増大効果が得られる条件としてあきらかになったことは、まず一次練混ぜ時に骨材が存在するように、骨材の投入を一次練混ぜ前に行うべきことである。つぎに、一次水セメント比はセメントペーストでブリーディングを最小にする値（普通ポルトランドセメントでは24%）を基準に、骨材の量および粒度に応じて調整すること、また、一次練混ぜ時間は60秒以上とするのがよいことを示した。さらに、分割練混ぜにより大きな品質改善効果が期待できるコンクリートの調合条件は、セメントは普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比が60%程度と高い場合であることをあきらかにした。

以上が本研究の主たる結論であるが、本研究の各章の内容および成果を要約すると以下ようになる。

第1章では分割練混ぜに関する研究の流れを紹介し、研究の目的について述べた。分割練混ぜについては各方面で進められてきたが、その原理の解明と、最適な練混ぜ方法の確立が、まだ十分できていないものと考えた。このため、分割練混ぜによりコンクリートの性質が変化する原因として、特に骨材とマトリックスの界面に着目し、組織の違い、付着特性を明らかにすることとした。そして、ブリーディングの減少、圧縮強度の増大効果の大きい分割練混ぜ方法を確立することにより、建設工事で用いられるコンクリートの品質を高めることをめざして研究を行うこととした。

第2章では分割練混ぜ方法の発見の経緯と、分割練混ぜの効果の例を示した。プレバッキングコンクリートの研究の中で、モルタルを製造する場合、セメントと骨材を空練りしてから水を加えてさらに練り混ぜる方法によると、使用する骨材の表面水率によってまだ固まらないモルタルの性質が変化することを見いだした。

この現象を利用した練混ぜ方法として、練混ぜ水の一部（一次投入水）を投入することにより骨材の表面水率を調整してセメントと空練り（一次練混ぜ）し、さらに残りの水（二次投入水）を加えてコンクリートを製造する方法を検討した。その中で一次練混ぜ時の水セメント比が15～30%となるようにしたコンクリートをSECコンクリートと名付け、その効果を実験によりあきらかにした。実験の結果から、SECコンクリートでは同一調合の従来の製造方法によるコンクリートに比べ、ブリーディングが顕著に減少すること、および10～20%圧縮強度が高くなることをあきらかにした。

第3章では分割練混ぜによる品質改善効果が得られる条件をあきらかにするため、水とセメントの系（セメントペースト）における分割練混ぜの特性を検討した。一次水とセメントを練り混ぜ（一次練混ぜ）、これに二次水を加えて再度練り混ぜ（二次練混ぜ）セメントペーストを製造する実験を行ない、分割練混ぜ方法の効果に与える一次の水セメント比、一次練混ぜ時間、混和剤の添加方法、セメント種類の影響などを調査し、分割練混ぜの特性をあきらかにした。その結果、以下の事項があきらかになった。

- ・普通ポルトランドセメントを用い、分割練混ぜでセメントペーストを製造する場合、ブリーディングが最小となるのは一次の水セメント比が23ないし24%の時である。

- ・分割練混ぜでセメントペーストを製造する場合、一次練混ぜ時間が短いほどブリーディングが多くなる。一次練混ぜが10秒では分割練混ぜ効果はほとんどみられないが、30秒以上あれば、ブリーディングを従来法によるものの半分以下にできる。

- ・分割練混ぜでセメントペーストを製造する場合、AE剤、AE減水剤の空気連行効果は、一次投入水とともに添加する場合と二次投入水とともに添加する場合で大きな差は認められないが、剤を後添加すると空気は連行されにくくなる。

- ・分割練混ぜでセメントペーストを製造する場合、AE減水剤、高性能減水剤では一次投入水とともに添加する場合のほうが二次投入水とともに添加する場合よりブリーディングは少なくなる。

- ・分割練混ぜでセメントペーストを製造する場合、混和剤の使用量は同じでも、その添加時期が遅いほど、ペーストの流動性は大きくなる。

- ・分割練混ぜでセメントペーストを製造する場合、混合セメントを用いると、普通ポルトランドセメントを用いた時に比べて分割練混ぜ効果が小さくなる。

以上のことは、ブリーディングが少なく、圧縮強度の高い練混ぜ方法を確立するための基礎資料となるものである。また文献調査により、分割練混ぜによりブ

リーディングが少なくなる機構について、分割練混ぜによると、いったん分散したセメント粒子が凝集して保水性の高い組織を形成しているためと考えるのが有力となっていることを示した。

第4章では水とセメントと骨材の系（モルタル・コンクリート）における分割練混ぜの特性を検討した。その結果、以下の事項をあきらかにした。

・分割練混ぜでコンクリートを製造する場合、一次練混ぜを骨材を含めて行なう方法によるものは、一次練混ぜを一次水とセメントで行ない骨材は一次練混ぜ終了後に投入する方法によるものに比べ、圧縮強度が高くなる。

つづいて、分割練混ぜによりコンクリートの圧縮強度が増加する原因を説明するモデルとして、SECモデルとGEMモデルをとりあげ、検討した。

GEMモデルは強度増加の原因を分割練混ぜによるブリーディングの減少による骨材下面の欠陥の減少によるものと説明するモデルであり、モデルの正しさは実験などで検証されている。しかしながら、先に示した骨材の投入順序による強度の差を説明するのに適したモデルとはなっていない。

SECモデルはモルタルまたはコンクリート中の骨材が水セメント比の小さいセメントペーストの皮殻で包まれた状態になっているというものである。このモデルは一次練混ぜによる骨材とマトリックスの付着性状の改善により強度増加がもたらされるといふものであり、この骨材の投入順序による効果の差をよく説明できる。しかし、粗骨材が一次練混ぜ時から存在する分割練混ぜ方法により、骨材とマトリックスの付着性状が改善されることを示す直接的なデータがこれまでに得られているわけでない。このため実際の骨材界面の組織と付着性状について第5章以降で検討していくことにした。

第5章では、分割練混ぜで一次練混ぜを骨材を含めて行なう方法によるとコンクリートの圧縮強度が高くなる理由として、骨材が一次練混ぜ時に水セメント比の小さいセメントペーストにまぶされることにより硬化後の骨材界面の組織が改善されるためというSECモデルを検証した。はじめに、文献調査から、骨材とマトリックスの付着性状および骨材周辺のマトリックスの組織はコンクリートの圧縮強度に明確に影響を与えることを示した。ついで岩石とセメントペーストによる試験体でX線回折法による分析および押し抜き付着試験を行ない、以下の事項をあきらかにした。

・X線回折法による分析では、岩石の表面をあらかじめ水セメント比の小さいセメントペーストにまぶした場合、通常の場合に比べて岩石付近のセメントペーストの水酸化カルシウムの結晶の配向度が小さくなり、配向度が最大を示す位置が岩石に近くなった。

・セメントペースト中に打ち込んだ岩石の押し抜き試験では、岩石の表面をあらかじめ水セメント比の小さいセメントペーストにまぶした場合、通常の場合に比べて押し抜き付着強度が大きくなった。この傾向は、水セメント比が大きいほど、また岩石表面が平滑なものより $20\mu\text{m}$ 程度の凹凸がある場合の方が明瞭である。

このように、骨材と水セメント比の小さいセメントペーストの練混ぜである一次練混ぜにより、骨材とセメントペーストの界面の組織が強固になり、界面の押し抜き付着が大きくなることを確認した。このことはSECモデルも強度増加の原因を説明するモデルとして有効であることを裏付けているものといえる。このようなことから、本論文では、実際に分割練混ぜでコンクリートの圧縮強度が増加するのは、分割練混ぜによるブリーディングの減少による骨材下面の欠陥の減少と、一次練混ぜによる骨材とマトリックスの付着性状の改善の両者の効果とするのが妥当であることを示した。

第6章では、品質改善効果の大きい分割練混ぜ方法を確立するために、品質が安定し、改善効果が大きくなる条件を検討した。一次練混ぜを骨材を含めて行なう分割練混ぜでモルタルの製造する場合、セメント種類、骨材の表面水率、一次水と骨材をあらかじめ練り混ぜる方法、骨材の粒度、骨材中の微粒分の量、および混和剤が与える影響を調査した。これらの実験から、以下の事項をあきらかにした。

・一次練混ぜを骨材を含めて行なう分割練混ぜでモルタルの製造する場合、結合材として普通ポルトランドセメントを用いた場合にブリーディングの減少効果が最も大きく、ついでフライアッシュ、中庸熱、高炉の順に小さくなる。実験ではいずれの場合も分割練混ぜによるブリーディング減少効果が認められた。

・一次練混ぜを骨材を含めて行なう分割練混ぜでモルタルの製造する場合、セメントに対する細骨材の比率が大きくなるとブリーディングを最小にする一次の水セメント比は大きくなる。この割合は水セメント比を%で表した時、砂セメント比の2倍の数値程度であった。

・一次練混ぜを骨材を含めて行なう分割練混ぜでモルタルの製造する場合、分割練混ぜによる強度の増加率は材齢1週の方が、4週より大きくなる。また、強度の増加は中庸熱セメントを用いた場合に最も大きい結果となった。

・細骨材の表面水率はモルタルの流動性やブリーディングに影響を与える。一次練混ぜを骨材を含めて行なう分割練混ぜはこの影響を最も小さくできる。

・一次練混ぜを骨材を含めて行なう分割練混ぜでモルタルの製造する場合、一次水と細骨材のみを練り混ぜて細骨材の表面水率の影響を小さくすることができる。この練混ぜ時間は長い方が効果があるが、その影響は練混ぜ方法の影響に比べて

大きいものではない。

- ・一次練混ぜを骨材を含めて行なう分割練混ぜでモルタルの製造する場合、細骨材の粒度が小さくなるとブリーディングを最小にする一次の水セメント比が大きくなる。

- ・一次練混ぜを骨材を含めて行なう分割練混ぜでモルタルの製造する場合、細骨材の微粒分量が大きくなるとブリーディングを最小にする一次の水セメント比が大きくなる。

- ・一次練混ぜを骨材を含めて行なう分割練混ぜでモルタルの製造する場合、混和剤の種類・添加時期はモルタルの性状に様々な影響を与える。特に高性能減水剤およびAE減水剤では添加時期が早いものはブリーディングが少なく、流動性が小さくなる。

さらに、これまでの検討結果をふまえ、品質の安定化および改善効果の大きいコンクリートの分割練混ぜ方法を提示した。これは、一次練混ぜは骨材を含めて行なうこと、また一次の水セメント比はセメントペーストの分割練混ぜでブリーディングを最小にする一次の水セメント比を基準に、これを骨材量および粒度に応じた量（[砂セメント比の2倍の数値]パーセント程度）大きくする方法である。このように、一次練混ぜを骨材を含めて行なう分割練混ぜによる界面改善効果を検証したこと、さらにこの界面改善効果を有効利用した練混ぜ方法を提案したことが本論文の特徴である。

第7章では分割練混ぜによる界面改善効果の応用例として鋼繊維補強コンクリートについて検討を行なった。その結果、以下の事項が明らかになった。

- ・モルタルと鋼繊維の付着試験では、鋼繊維をあらかじめ水セメント比の小さいセメントペーストにまぶすことで、付着強度が大きくなった。

- ・同じ試験では、モルタルを分割練混ぜで製造した方が、従来法によるものより付着強度が大きくなった。ただし、付着強度の大きくなる割合については、モルタルの練混ぜ方法より、鋼繊維をセメントペーストにまぶす処理の有無の影響の方が大きい。

- ・鋼繊維補強コンクリートを製造する場合、分割練混ぜ方法を用いると、曲げ強度、曲げタフネスが大きくなる。さらに、分割練混ぜ方法でも、鋼繊維を一次練混ぜから入れたものは、二次練混ぜ以降に入れたものに比べ、曲げ強度、曲げタフネスが大きくなる。

- ・一次練混ぜ時に鋼繊維が存在する分割練混ぜでコンクリートを製造した場合、従来法で製造したものに比べ、材齢4週で、曲げ強度は鋼繊維の混入量1.0%の時7%、2.0%の時20%増加した。また曲げタフネスは混入量1.0%の時7%、2.0%

の時22%、せん断強度は混入量1.0%の時15%、2.0%の時5%増加した。

第8章では提案した練混ぜ方法を実際の建設工事で使用した例を示した。愛媛県の事務所ビルの建設工事に1,900m³の品質改善効果の大きい分割練混ぜ方法によるコンクリートを使用した。ここでは、従来法によるコンクリート比べ、圧縮強度は16%増大し、ブリーディングは44%減少した。また、北海道のホテルの建設工事に12,000m³の品質改善効果の大きい分割練混ぜ方法によるコンクリートを使用した。ここでは、従来法によるコンクリート比べ、圧縮強度は8%増大し、ブリーディングは45%減少した。このように、提案した練混ぜ方法は実際の工事においてコンクリートの品質向上に寄与するものであることが確認された。

謝辞

本研究を論文にまとめるにあたり、東京大学大学院工学系研究科の友澤史紀教授には、懇切丁寧なご指導をいただきました。深く御礼申し上げます。また審査をして下さいました菅原進一教授、小谷俊介教授、魚本健人教授、野口貴文助教授には、論文の構成から今後の研究の方向にいたるまで、数々のご指導、貴重なご助言をいただきました。ありがとうございました。

本研究は筆者が大成建設(株)入社以来、技術研究所において長年にわたって行ってきた研究をとりまとめたものです。この間中心적으로ご指導下さった加賀秀治氏、山本康弘氏に深く感謝いたします。加賀秀治氏は筆者が材料研究室配属になった当時の室長で、研究の心構えから教えていただきました。山本康弘氏はこの分割練混ぜの研究プロジェクトのリーダーであり、研究の進め方などについて直接御指導いただきました。御両方には、論文をまとめるにあたり、終始はげましく多大の気遣いをいただきました。これなくしては、本論文をまとめることができなかつたものと感謝いたします。また、服部高重氏、黒羽健嗣氏、林俊雄氏、鈴木明人氏、石井貴和氏、丸嶋紀夫氏からも多くのことを教えていただくとともに、大変お世話になりました。深く感謝いたしております。

本研究の成果であるコンクリートを採用した作業所の方々、また研究にかかわって下さった方々にも御礼申し上げます。中でも、會田實氏にはX線回折法をはじめとする測定技術に不慣れな筆者が、ひとつお自分で測定できるようになるまで骨折りました。ありがとうございました。

本研究のかなりの部分はリブコンエンジニアリング(株)と共同で行ったものです。リブコンエンジニアリング(株)の皆様ありがとうございました。特に故人となられ、当時社長であった伊東靖郎氏には研究を進める上で多くの示唆をいただきました。

また、実験を手伝ってくださった大成サービス(株)や実習生の方々にも大変お世話になりました。感謝申し上げます。

