

論文 ポーラスコンクリートの製造方法に関する基礎的研究

湯浅幸久^{*1}・村上和美^{*2}・前川明弘^{*2}・畑中重光^{*3}

要旨：ポーラスコンクリートの強度特性を改善するための基礎的実験として、ミキサの種類、練混ぜ方法および結合材ペーストの流動特性が、ポーラスコンクリートの性状に与える影響について検討した。その結果、ミキサの練混ぜ機構の違いが結合材ペーストのフレッシュ性状に大きく影響するとともに圧縮強度に違いが生じること、結合材ペーストのフレッシュ性状は練混ぜ時間の影響を受けるとともにポーラスコンクリートの圧縮強度に影響を及ぼすことがわかった。また、結合材ペーストの性状の評価には、フロー値およびビカー針による軟度測定を指標とするのが有効であることがわかった。

キーワード：ポーラスコンクリート、ミキサ、練混ぜ、圧縮強度、フロー値、貫入量

1. はじめに

近年、ポーラスコンクリートの利用分野が広がり、透水性・水質浄化・緑化などの機能を活用した様々な資材の開発が進んでいる。なかでも河川法の一部改正に伴い、ポーラスコンクリートによる緑化護岸工法が、これまで以上に注目されるようになった。

しかしながら、緑化機能と護岸としての機能を両立するためには、いくつかの問題点も残されている。たとえばポーラスコンクリートは比較的大きな空隙構造と必要強度の確保という、調査上では一見相反する二つの機能を同時に満足する必要がある。このため、既往の研究で、は連続空隙形成の条件¹⁾、空隙率と強度に関する基礎物性^{2) 3)}、レオロジー性質と強度の関係^{4) 5)}、強度改善⁶⁾などについて検討されている。また、緑化の実験も盛んに行われ、一部河川で試験施工されている。これらの調査結果では、緑化基盤としての機能を発揮するためには、空隙率が重要な要素であることが確認されている⁷⁾。また緑化を達成した基盤の圧縮強度は、従来のコンクリートブロックに比べて相当低くな

る傾向にあることも明らかになっている。したがって、施工箇所にもよるが、護岸としての性能と緑化基盤としての機能を満足するためには、より高強度なポーラスコンクリートの製造技術の確立が望まれる。

本研究では、ポーラスコンクリートの製造技術の向上を目的に、以下の疑問点に注目して実験を行った。

- ①ミキサの性能がポーラスコンクリートの性状に与える影響
- ②結合材ペーストのフレッシュ性状と骨材への付着性状の関係

2. 実験方法

2. 1 使用材料および実験条件

セメントには普通ポルトランドセメントを、骨材には単粒度碎石（6号）を、混和剤には高性能AE減水剤を使用した。実験条件を表-1に、調査条件を表-2に示す。

2. 2 練混ぜ条件

ポーラスコンクリートの製造に使用したミキサは、パン型ミキサ、強制二軸型ミキサ、モル

*1 三重大学大学院 工学研究科システム工学専攻 (正会員)

*2 三重県工業技術総合研究所 応用材料グループ

*3 三重大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

タル専用ミキサと強制二軸型ミキサを組み合わせた二段式ミキサ、および揺動攪拌型ミキサの4種類とした。これらのミキサは、練混ぜ機構・性能が異なるため、結合材ペーストをポーラスコンクリートの製造に適した性状、すなわちFunicularの第1領域¹⁾周辺で評価できるように水結合材比を21～25%の範囲内から選択するものとした。

練混ぜ方法は、結合材ペーストの分散性の向上とその把握のため、ペースト先練りとした。ただしパン型ミキサはペースト先練りが困難であったため、骨材とセメントをから練りした後、水と混和剤を投入した。

練混ぜ時間は、パン型ミキサがセメントと骨材を投入して15秒間、から練りした後、水と混和剤（高性能AE減水剤）を投入して90秒間練り混ぜた。その他のミキサでは、セメントと水および混和剤（高性能AE減水剤）を投入して90、270、または450秒間練り混ぜた後、骨材を投入して90秒間練り混ぜた。ただし、揺動攪拌型ミキサは、油圧モーターにより回転数が可変するタイプであることから、結合材ペーストは最初の30秒間は50rpmで、その後所定の時間まで100、150、または200rpmで、骨材投入後は200rpmで、それぞれ練り混ぜた。

ミキサ容量は、パン型ミキサが100リットル、強制二軸型ミキサが50リットル、二段式ミキサが上段30リットル・下段50リットル、揺動攪拌型ミキサが30リットルで、練混ぜ容量を各ミキサ容量の50～60%とした。

2. 3 試験項目および試験体の作製

ポーラスコンクリートの特性は、圧縮強度および空隙率により評価した。試験体寸法はφ100mm×200mmとし、試験方法はJCI「エ

コンクリート研究委員会報告書」⁸⁾によった。また、試験体は2層に分けて投入し、VB試験機（パン型ミキサにより練り混ぜたもの）または電動ハンマーとタッピング治具（その他の3機種により練り混ぜたもの）により締め固めた。

3. 実験結果と考察

4種類のミキサによる同一条件での練混ぜが困難であったため、ここでは機種間の性能比較（特にフレッシュ性状）は行わなかった。

3. 1 フレッシュコンクリートの性状

パン型ミキサは、設定した調合のなかで最も大きい水結合材比＝25%であっても、結合材ペーストの流動性は良好なものではなかった。すなわち練混ぜ時の観察によれば、初期に骨材に付着した結合材は混練中も骨材に付着したままで、骨材周辺は攪拌による物理的外力をあまり受けることなく経過してしまうことがわかった。その結果、写真－1に示すように、硬化後に観察された試験体の骨材表面は、分散が不十分な結合材により覆われ、滑らかさがないものであった。

他の3機種は、一般に微粉末を含まない条件で高性能AE減水剤が効果を発揮する限界である水結合材比＝21%においても、練混ぜが可

表－1 実験条件

水結合材比	21～25%
セメント	普通ポルトランドセメント 比重 : 3.15
ペースト粗骨材比	30Vol%
粗骨材	単粒度碎石（6号） 表乾比重 : 2.70 吸水率 : 1.06 実績率 : 58.2%
細骨材	なし
混和剤	高性能AE減水剤（ポリカルボン酸系）
混和材	なし

表－2 コンクリートの調合

水結合材比	粗骨材の最大寸法 (mm)	単 位 量 (kg/m ³)			混 和 剤 (C×%)
		水	セメント	粗 骨 材	
21	13	68.9	328	1558	1.0
23		72.7	316		
25		76.3	305		

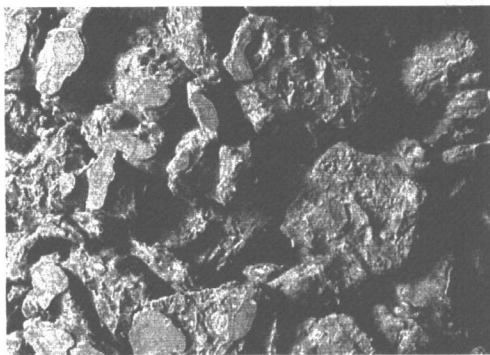


写真-1 パン型ミキサにより作製したポーラスコンクリートの性状 (W/B=25%)

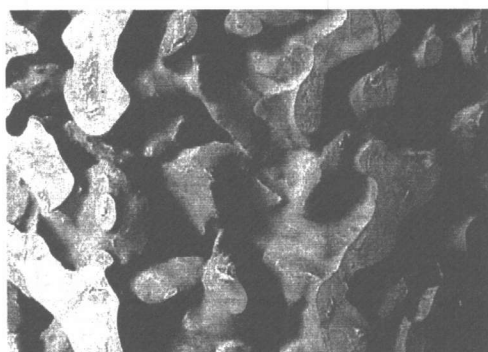


写真-2 強制二軸型ミキサにより作製したポーラスコンクリートの性状 (W/B=21%)

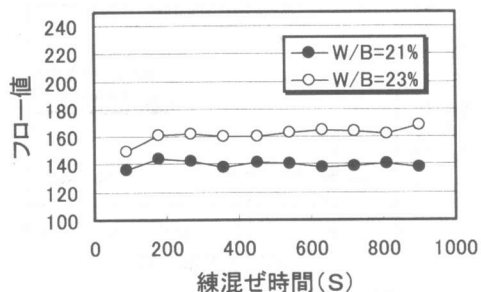
能であり、骨材への付着性状にも問題は見られなかった。このときの骨材表面を覆う結合材ペーストの性状を写真-2に示す。写真によれば、パン型ミキサを使用した場合の骨材表面（写真-1）に比べて、結合材ペーストが滑らかな性状をしており、骨材間の架橋は連続して行われていることがわかる。さらに骨材に付着した結合材に厚みがあり、より結合力が増していることが推測できる。

3. 2 結合材ペーストの評価

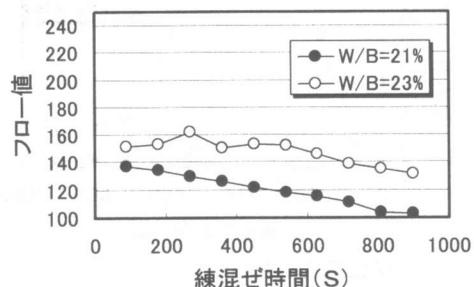
(1) フロー試験

既往の研究においても、ポーラスコンクリートの結合材に関するレオロジー性質の検討を行った事例はいくつかある^{4) 5)}。

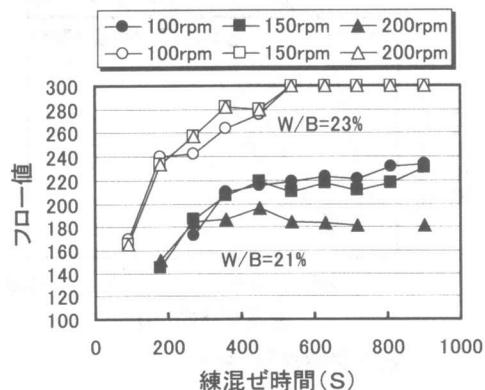
ここでは、ペースト先練りを行った3機種について、結合材ペーストのフレッシュ性状を、



(a) 強制二軸型ミキサ



(b) 二段式ミキサ

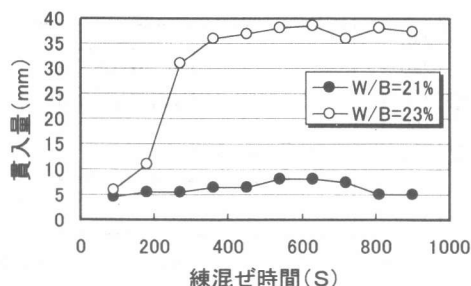


(c) 揺動攪拌型ミキサ

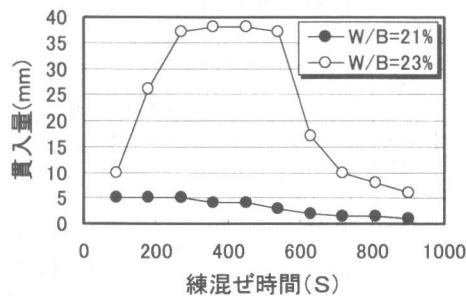
図-1 各種ミキサで練り混ぜた結合材ペーストのフロー値

JIS R 5201（セメントの物理試験方法）のフロー試験により調べた。

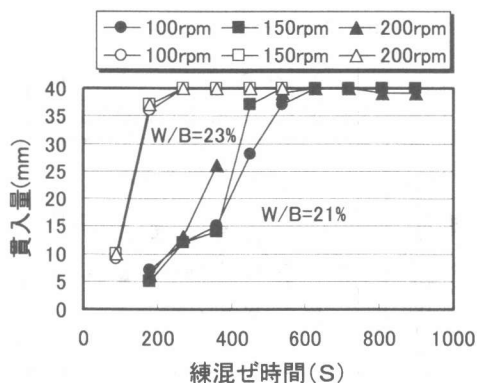
フロー試験の結果を図-1に示す。これらの図によれば、いずれのミキサで混練した場合も水結合材比が大きい方がフロー値も大きくなる傾向を示した。強制二軸型ミキサで混練した場合、結合材ペーストは、練混ぜ初期の90秒を



(a) 強制二軸型ミキサ



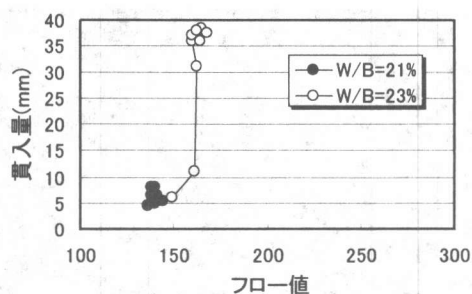
(b) 二段式ミキサ



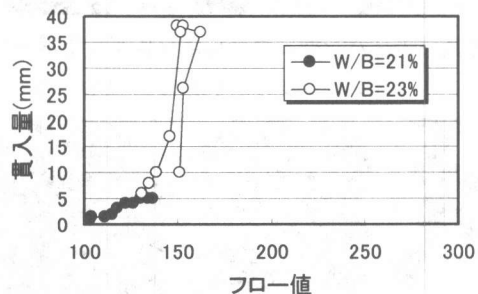
(c) 揺動攪拌型ミキサ

図-2 各種ミキサで練り混ぜた結合材ペーストへのピカー針の貫入量

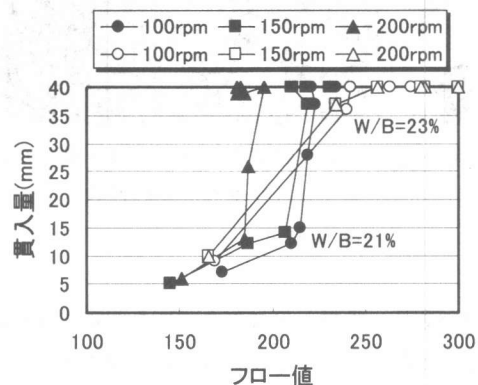
越えた頃から、15分後まで安定した軟らかさを保った。二段式ミキサで混練した場合、水結合材比(W/B)=21%では練混ぜ初期に、23%では270秒付近にフロー値の最大値が現れ、その後、徐々に低下する傾向を示した。揺動攪拌型ミキサで混練した場合、強制二軸型ミキサと比べて、フロー値の増加に多少時間がかかるが、最終的には極めて高い値が得られた。また、水結合材比=21%の場合には、200rpmの



(a) 強制二軸型ミキサ



(b) 二段式ミキサ



(c) 揺動攪拌型ミキサ

図-3 フロー値とピカー針の貫入量の関係

ときよりむしろ100および150rpmのときにフロー値が大きくなった。これは200rpmの高回転では、ペーストが攪拌棒の周辺でホッピングしてミキサの動きに追従できなくなり練混ぜエネルギーが十分に伝わらなかったため、あるいは衝撃エネルギーにより締固め作用が働いたためと考えられる。

(2) ピカー針試験

結合材ペーストの軟らかさを評価する場合、フロー試験では衝撃力を与えるのに対し、ピカ

一針による軟度測定では静的な力で塑性変形を生じさせる。したがって、ペーストの降伏値を推測する手がかりになると考えた。

ビカー針試験の結果を図-2に示す。図のたて軸には貫入量(=40mm-軟度)を、横軸には練混ぜ時間をとってある。これらの図によれば、水結合材比=23%の場合には、強制二軸型ミキサおよび揺動攪拌型ミキサでは、練混ぜ時間の経過とともに貫入量が増加する傾向を示したが、二段式ミキサでは10分後から減少する傾向を示した。この傾向は図-1(b)に示したフロー値にも現れているが、貫入量ほど明確ではない。また水結合材比=21%では、図(a), (b), (c)の順に、3機種がそれぞれ安定・減少・増加と傾向が分かれた。この関係についてはフロー値でも同様の傾向が得られているが、両者に良い相関が見られるのは、図(c)の揺動攪拌型ミキサの場合だけである。

また、ビカー針試験で貫入量が10mm以下の場合には弾性変形を伴っており、応力を除くことで元の平面に復帰した。これに対して貫入量が10mm以上の値を示したものは塑性変形を生じた。すなわち、ビカー針試験による測定値は、結合材ペーストの流動性をより直接的に表しているといえよう。

図-3に各ミキサにより測定したフロー値と貫入量の関係を示す。これらの図によれば、フロー値が一定の値(約150)を越えると、貫入量は急激に増加する傾向を示している。このことから、ビカー針試験は、結合材ペーストの流動性を鋭敏に測定することができる方法と考えられる。ここで、貫入量が増加し最大値に

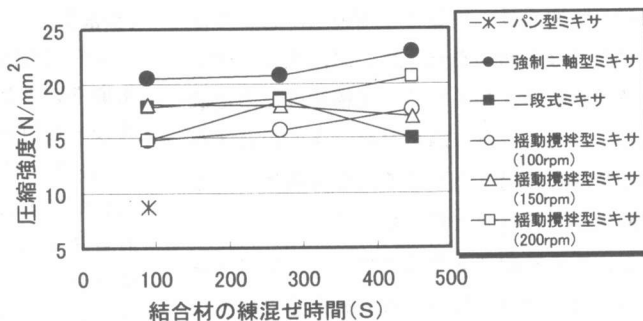


図-4 結合材の練混ぜ時間を変えたポラスコンクリートの圧縮強度

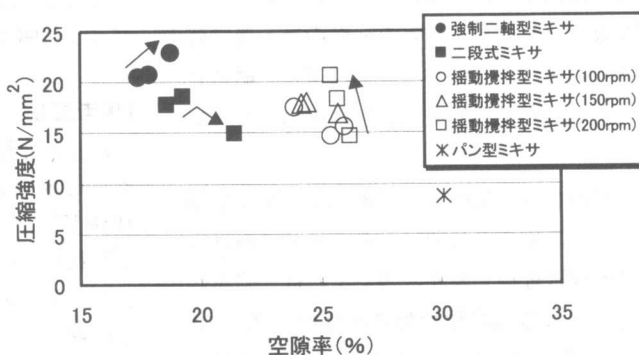


図-5 ミキサ別に見た空隙率と圧縮強度の関係

近づいたときのフロー値は、ミキサの種類および水結合材比の違いにより異なっている。たとえば、強制二軸型ミキサは160付近であり、二段式ミキサは150~160、揺動攪拌型ミキサは回転数および水結合材比により180~250の幅を持っていた。さらに、揺動攪拌型ミキサによる練混ぜ条件のなかで水結合材比=21%、200rpmのものは、貫入量の変化が他の回転数のときとさほど変わらないにもかかわらず、最終的なフロー値は小さくなった。

これらの結果から、ビカー針試験は、ペーストに振動を与えて測定するフロー試験とは異なった情報を提供しているものと考えられる。

3.3 硬化コンクリートの性状

ペースト練混ぜ時間を90, 270, 450秒としたときの圧縮強度を図-4に示す。図によれば、強制二軸型ミキサおよび揺動攪拌型ミキサにより作製した試験体は、結合材ペースト

の練混ぜ時間を長くすると圧縮強度が若干ではあるが高くなる傾向を示した。二段式ミキサでは、練混ぜ時間を長くすると圧縮強度は逆に低下した。このことは、結合材ペーストの性状が練混ぜ時間の経過とともに流動性を喪失したことと関係があるものと考えられる。

また、揺動攪拌型ミキサにおいて、フロー値は小さくなったが、ピカー針の貫入量で軟らかさが確認された条件（水セメント比＝21%，200rpm）では、練混ぜ時間を長くすると圧縮強度が増加した。すなわち、フロー値では把握できなかった性状を、ピカー針の貫入量で確認でき、ポーラスコンクリートに適した結合材ペーストの流動性を的確に評価していたことになる。

ミキサ別に見た空隙率と圧縮強度の関係を図一5に示す。図中の矢印は、各ミキサにおける練混ぜ時間の経過を表す。図によれば、強制二軸型ミキサ及び揺動攪拌型ミキサの一部（200rpm）では、結合材ペーストの練混ぜ時間の経過とともに圧縮強度が改善されて、圧縮強度が20N/mm²以上の強度となっている。このことから、ミキサの練混ぜ機構及び結合材ペーストの練混ぜ時間が、結合材の流動性とともにポーラスコンクリートの性能向上に極めて重要なファクターであることがわかった。

4. まとめ

（1）ミキサの練混ぜ性能は、ポーラスコンクリートに適した流動性を有する結合材ペーストの製造において重要なファクターである。

（2）結合材ペースト中の粉体を分散させることで、良好な強度発現が期待できる。また、分散性の低下は骨材間の結合力を低下させる。

（3）ポーラスコンクリートに用いる結合材ペーストに求められる流動性の評価にはフロー試験が一般に使用されているが、フロー値だけでなくピカー針試験を行うことで、流動性をより正確に把握することができる。

【謝辞】

本研究を進めるにあたり、流動性に関するご指導をいただいた名古屋大学大学院工学研究科教授・谷川恭雄先生、同助教授・森博嗣先生に深謝いたします。また、実験に際して協力いただいた三重大学大学院・石黒哲君、4年生・別府智子さん、三重アサノコンクリート（株）、東亜コンクリート（株）並びに三重県土木コンクリートブロック協会の諸氏に深謝いたします。

なお、本研究費の一部は平成10年度・熊谷科学技術助成金（代表者：畑中重光）および三重県科学技術振興センター事業「多自然型河川づくりに関する研究」によったことを付記する。

【参考文献】

- 1）玉井元治：連続空隙を有する固化体の透水性，セメント技術年報，42巻，pp.487-490，1988.12
- 2）松川 徹ほか：連続空隙を有する緑化コンクリートの配合と空隙に関する研究，自然環境との調和を考慮したエココンクリートの現状と将来展望に関するシンポジウム論文報告集，pp.25-30，1995.11
- 3）水口裕之ほか：ポーラスコンクリートの配合要因と強度との関係，自然環境との調和を考慮したエココンクリートの現状と将来展望に関するシンポジウム論文報告集，pp.31-38，1995.11
- 4）柳橋邦生ほか：緑化コンクリートに関する研究および施工，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，pp.871-876，1994.6
- 5）小椋伸司ほか：ポーラスコンクリートの強度改善，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.499-504，1997.6
- 6）吉森和人ほか：ポーラスコンクリートの強度と耐久性に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.49，pp.650-655，1995
- 7）浦上将人ほか：ポーラスコンクリートの河川護岸における構成諸要素と植生状況に関する分析，第4回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム，pp.71-76，1998.6
- 8）エココンクリート研究委員会報告，日本コンクリート工学協会，pp.53-58，1995.11