

論文 セメントペーストの流動性がポーラスコンクリートの振動締固め性状に及ぼす影響

湯浅幸久*1・別府智子*2・宮本高秀*2・畑中重光*3

要旨: ポーラスコンクリートの強度性能を十分に発揮させるためには、骨材間を結合するセメントペーストの連続性を確保する必要がある。本研究では、セメントペーストの性状とポーラスコンクリートの成型時に要する振動エネルギーとの関係を検討した。その結果、ポーラスコンクリートの締固めには、骨材の充填性とセメントペーストの流動性という2つの要因の影響を把握しておく必要があること、およびセメントペーストのフロー値が分かればポーラスコンクリートの性能向上に最適な振動エネルギーの条件を推測できることが分かった。

キーワード: ポーラスコンクリート, 流動性, 締固めエネルギー, 圧縮強度, フロー値

1. はじめに

ポーラスコンクリートの研究が本格化して十数年になる。この間、ポーラスコンクリートの強度を支配する要因として、空隙率、水セメント比、ペースト粗骨材容量比、骨材粒径などの影響に関する基礎的情報¹⁾が提供された。しかし最適な製造条件が整理されるには至っていない。その理由は、ポーラスコンクリートに求められる所定の連続空隙および十分な強度性能を確保するために、玉井²⁾や吉森ら³⁾が提唱したFunicularの第1領域、すなわち骨材・セメントペースト・空気がそれぞれ連続した状態を形成させる製造条件が十分に把握されていないためである。

既往の研究では、セメントペーストの流動性の評価をフロー値で行い、これとポーラスコンクリートの強度の関係に言及した研究が行われており、最適なフロー値として180⁴⁾、200⁵⁾、240⁶⁾、280⁷⁾などが提案されている。しかしながら、練混ぜ条件や締固め条件が異なるため、これらの値を単純には比較できない。また筆者らが行った基礎実験では、ミキサの性能や練混ぜ時間によってもセメントペーストの性状は異なることが分かっている⁸⁾。

本報では、ポーラスコンクリートの製造に最適な材料・施工条件を整理することを目的とし

て、まず硬練りセメントペーストのフレッシュ性状を定量的に把握する方法を検討する。次にポーラスコンクリート製造時の振動締固め性状とも関連づけて検討する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用した材料の種類と特性値を表-1に示す。

2.2 調合条件および練混ぜ条件

(1)セメントペーストの練混ぜ実験

セメントペーストの練混ぜ実験の概要を表-2に示す。

セメントペーストの軟らかさは、ポーラスコンクリートに使用可能な範囲として、フロー値で約150~250とした。また、単位水量を減じ、水セメント比を小さく設定する(すなわち、粘性およびペースト強度の増大を図る)ため高性能AE減水剤をセメント量の1%添加した。ミキサには、硬練りに適した練混ぜ性能が得られ、かつ攪拌に伴う骨材の破壊が少ない揺動攪拌型ミキサ(30ℓ)を使用した⁸⁾。練混ぜは、セメントおよび水を投入後30秒間は50rpmで、その後所定の時間まで、100、150、200rpmのミキサ回転数でそれぞれ混練した。セメントペーストのフレッシュ性状は、フローテーブル試験機および円柱形7号ローター(高粘度用)を取り

*1 三重県科学技術振興センター工業研究部 (正会員)

*2 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻

*3 三重大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

付けた内円筒回転型粘度計によって測定した。粘度測定は、一般に硬練りペーストの場合、平板プラストメーターや直接せん断測定などが適

表一 使用材料の種類と特性値

種類	特性値
セメント	研究用普通ポルトランドセメント 密度 : 3.17g/cm ³ 比表面積 : 3150cm ² /g
粗骨材	単粒度碎石5号(13~20mm) 表乾密度 : 2.70g/cm ³ 実積率 : 57.6%
混和剤	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)

表二 ペースト練混ぜ実験の概要

W/C	21, 22, 24 (%)
混和剤	セメント量に対して1%添加
練混ぜ時間	90, 180, 270, 360, 450 (s)
測定項目	フロー値, 粘度, ビカー針貫入量

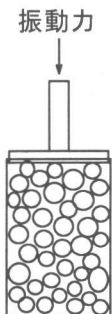
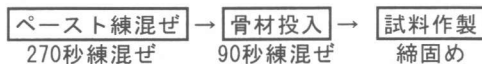
表三 ポーラスコンクリートの調査

W/C (%)	目標空隙率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
		W	C	G	Sp
21	20	87	411	1573	4.11
22		89	404	1573	4.04
24		95	396	1573	3.96

表四 ポーラスコンクリートの作製条件

練混ぜ方法	ミキサ回転数 : 200 (rpm) 練混ぜ時間 : ペースト270 (s), 骨材投入後90 (s)
供試体寸法	φ10×20cm (円柱供試体)
試料の投入方法	1層詰め
締固め方法	表面振動機 起振力 : 245, 735 (N)
締固め時間	5, 10 (秒)

《練混ぜフロー》



振動エネルギーの算出式

$$E = 2a(W+F/2)n \cdot t \cdot 1/S \quad [1] \\ (\text{N} \cdot \text{m}/\text{m}^2)$$

E : 振動締固めエネルギー
a : 振幅 (m)
n : 振動数 (Hz)
W : 振動機の荷重 (N)
S : 加圧面積 (m²)
F : 起振力 (N)
t : 締固め時間 (s)

図一 ポーラスコンクリートの締固め方法および振動エネルギーの算出式

(JCI超硬練りコンクリート研究委員会報告書⁹⁾の式)

当とされる。また軟練りの場合には、傾斜管なども適している。しかしながら本実験で設定した流動性の範囲(フロー値で約150~250)を同一条件で測定することは難しい。このため本実験では比較的適用範囲が広いと考えられる回転粘度計を採用することにした。

セメントペーストの練混ぜ時間は90, 180, 270, 360, 450秒の5段階とした。

(2) ポーラスコンクリートの作製条件

ポーラスコンクリート用セメントペーストは、

(1) で得られた試験結果を基に、分散性および流動性の安定する条件として、ミキサ回転数を200rpmに、練混ぜ時間を270秒にそれぞれ設定して製造した。製造したセメントペーストに骨材を投入後90秒間練り混ぜ、供試体を作製した。調査を表一3に、供試体の作製条件を表一4にそれぞれ示し、練混ぜフローを付記した。試料の投入方法を1層詰めとした理由は、表面振動機による締固めの程度を上下方向に評価するためである。振動エネルギーの算出式を図一に示す。

3. 実験結果

3.1 セメントペーストの性状

(1) フロー試験結果

セメントペーストの水セメント比とフロー値の関係を図二に示す。図によれば、各練混ぜ時間の範囲内では、水セメント比とフロー値に高い相関があることが分かった。この関係はミキサの回転数ごとに成立している。

練混ぜ時間とフロー値の関係をみると、練混ぜ初期(90秒)には高性能AE減水剤の効果が十分に発揮されないため、ミキサ回転数に関係なくフロー値は非常に小さいが、270秒以降は流動性を増し、一定の関係に落ち着く傾向を示した。このとき、練混ぜ時間の経過に伴うフロー値の伸びは、水セメント比が大きいほど顕著に現れ、逆に水セメント比が小さい21%では、高性能AE減水剤の標準添加量(C×1%)では効果はあまり期待できないことが分かった。

(2) 降伏値の測定結果

セメントペーストの軟らかさをレオロジー性質で見た場合、時間依存性を除けば、ビンガム流体として取り扱うことができる。図三に回

転粘度計による粘度測定結果から算出した降伏値とフロー値の関係を示す。図によれば、フロー値が大きい(およそ230以上)場合には、ミキサ回転数に関わらず安定した低い降伏値(10~20Pa)が得られた。一方フロー値が小さい場合(150付近)には、ミキサ回転数によって異なり、ミキサ回転数が200rpmでは、フロー値のわずかな低下に対して降伏値は大きく増加する傾向を示した。しかし、150および100rpmでは、フロー値が低下しても降伏値はそれほど大きく

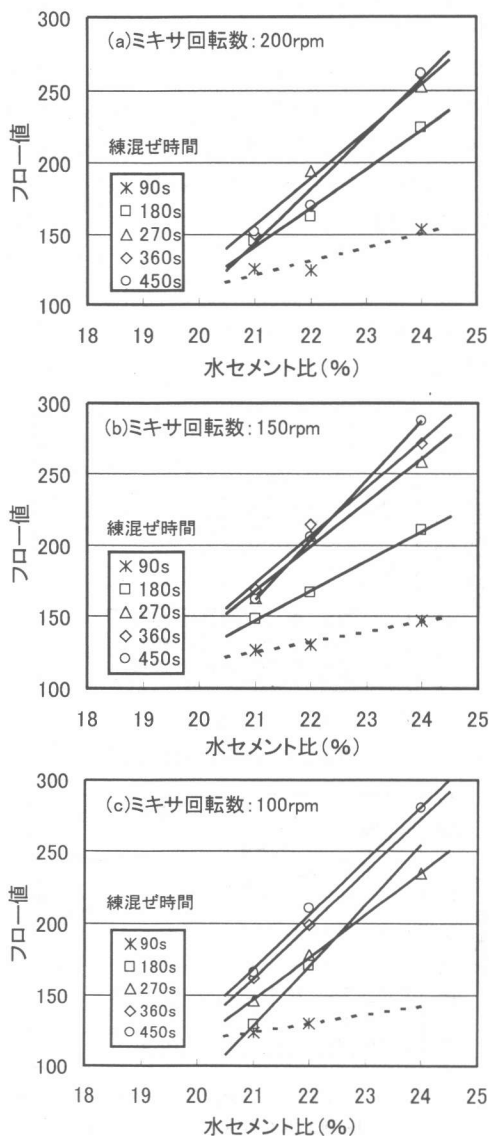


図-2 水セメント比とフロー値の関係 (ミキサ回転数および練混ぜ時間別)

ならなかった。

この理由としては、ミキサ回転数150rpmおよび100rpmでは十分な練混ぜが行われなかったため、回転粘度計のローター側面に滑りを生じたためと考えられる。

また、セメントペースト軟度の簡易測定法についても検討するため、セメントの物理試験における標準軟度測定用ビカー針(軟度測定用標準棒:直径10mmの円柱)を用いて貫入量を測定した。ビカー針試験では一定の静的荷重をセメントペーストに加え、標準棒の貫入の程度からセメントペーストの軟らかさを知ることができる。そこで、セメントペーストの静的な性質である降伏値との関係を調べた。結果を図-4に示す。図によれば、降伏値が70Pa付近を境に、ビカー針の貫入量が大きく変化することが分かる。このとき貫入量が15mm以下では、ビカー針はペースト内部に入り込むことなく載荷面と

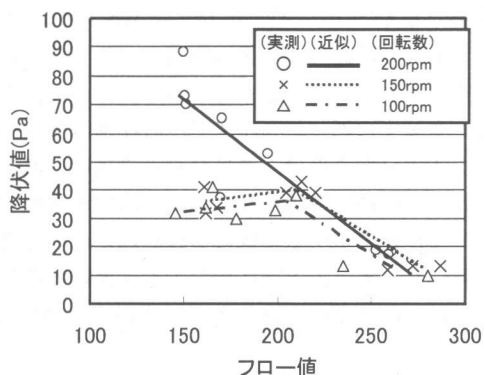


図-3 フロー値と降伏値の関係 (ミキサ回転数別)

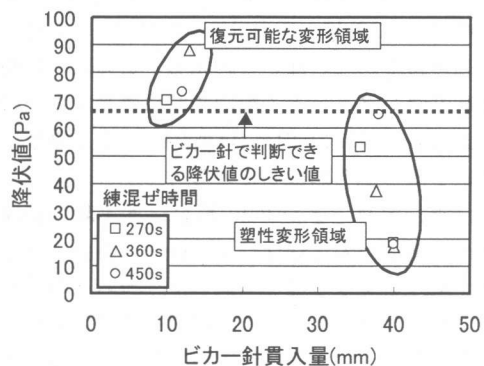


図-4 ビカー針貫入量と降伏値の関係 (標準棒を使用、ミキサ回転数:200rpm)

その周囲を押し下げる形で変形し、抜重後は荷跡を残さず元の平面に戻る復元可能な変形であった。一方、70Pa以下では急激に貫入量が増加し、ピカー針はペースト内部に貫入する塑性変形であった。このことから標準棒を用いることで降伏値が70Paより大きい小さいかを判断することができることになる。したがって、ピカー針の荷重量を連続的に変化させることができれば、セメントペーストの降伏値を簡易に測定することも可能になるとと思われる。

2. 2 ポーラスコンクリートの締固め条件とペースト性状の関係

(1) 空隙率

表面振動機を用いて振動締固めを行った供試体を上下2層に切断して、各層の空隙率を調べた結果を図-5に示す。なお、横軸は振動エネルギーで、要因として起振力と締固め時間を含んでいる。

フロー値が150および190の場合では、初期の振動（振動エネルギーがおよそ $5\text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^2$ 程度まで）で締固めが急激に進行し、その後徐々に締め固められることが分かった。この時、上層の空隙率は23~25%程度で、円柱供試体側面の空隙率（型枠面付近では骨材の実積率が低下する）の増加を考慮すれば、ほぼ所定の空隙率（20%）を満足する締固めが行われたものと考えられる。また、下層においても締固めの進行は上層と同じ傾向であったが、空隙率は30%にとどまった。

ここでおよそ $36\text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^2$ の振動エネルギーを与えた時点での上下層の空隙率の差を比較すると、表面振動機による骨材の充填効果は上層10cmまでであり、それより深い層では十分な効果が得られていないといえる。このことは超硬練りコンクリートの締固め時にエネルギーの伝達効率が深さ方向に10cmを越えると急激に低下することと類似している⁹⁾。

一方、フロー値が240の場合、本実験の範囲では空隙率の安定領域は見られず、振動エネルギーが大きくなるほどセメントペーストの垂れが著しくなる。そのため上層ではセメントペーストが少なくなって空隙率が上昇し、下層では逆にセメントペースト量の増加に伴う空隙率の低下が認められたといえる。

(2) セメントペーストの垂れ

振動締固めによるセメントペーストの垂れを左右する要因として、材料の性状ではセメントペーストの流動性が、施工条件では振動力、振動エネルギー、振動時間などが挙げられる。これまでに硬化体におけるペースト膜厚の測定結果¹⁰⁾などが報告されているものの、供試体作製時の垂れの程度を評価する方法は確立されていない。

本実験では、流動化により移動したペースト量を供試体の底面部におけるペーストの面積占有率で評価した。測定は以下の方法で行った。すなわち、予めCCDカメラにスケール画像を取り込み、長さの絶対値を入力した後に、底面部のペーストによる平滑部分に白色塗料を塗布し、画像に取り込んで2値化処理（図-6）および面積計算を行った。振動エネルギーとペースト占有率を図-7に示す。フロー値150のセメントペーストを用いた供試体の場合、実験で与えた振動エネルギーの範囲では、ほとんど垂れを生じていなかった。これに対して、フロー

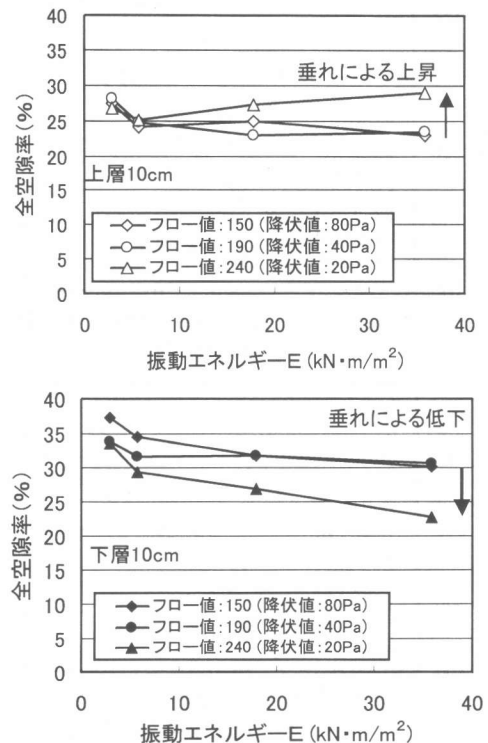


図-5 振動締固めエネルギーと空隙充填性の関係（目標空隙率20%）





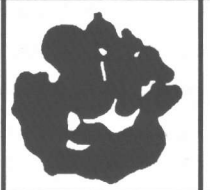
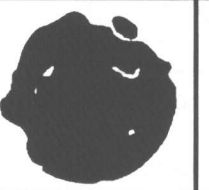
			締固めエネルギー 2.89 (kN · m/m ²)
			締固めエネルギー 17.9 (kN · m/m ²)
フロー値=150 (降伏値 : 80Pa)	フロー値=190 (降伏値 : 40Pa)	フロー値=240 (降伏値 : 20Pa)	

図-6 試験体底面におけるセメントペーストの垂れの様子
(CCDカメラで取り込み2値化した画像)

値190および240では振動エネルギーが大きくなるにつれて、ペースト占有率が高くなり、フロー値240ではおよそ36kN・m/m²で完全に閉塞した。本実験で設定した目標空隙率が20%であることから、ペースト占有率が80%以上になることは所定の性能(たとえば透水性等)を満足しない可能性が生じる。したがって、本実験で用いた5号碎石の場合、振動締固めによる垂れを考慮すると、フロー値240では10kN・m/m²以下に、フロー値190ではおよそ5~20kN・m/m²に、それぞれ抑えることが肝要であるといえる。

(3) 圧縮強度

大小2種類の振動エネルギーを加えて締め固めたポーラスコンクリートの圧縮強度とフロー値との関係を図-8に示す。なお、空隙率の差は各振動エネルギーの条件の範囲では±2%以内である。図によれば、加えた振動エネルギーの大きさに関係なくセメントペーストのフロー値が190で最も強度発現が良好であった。

フロー値が150および240において強度が低下した理由として以下のことが考えられる。すなわちフロー値150では流動性が乏しく、降伏値も高いことから、骨材に付着したセメントペーストが締固め時に与えた振動エネルギーでは十分に流動化しなかった。そのためセメントペーストの連続性が不十分であったと考えられる。

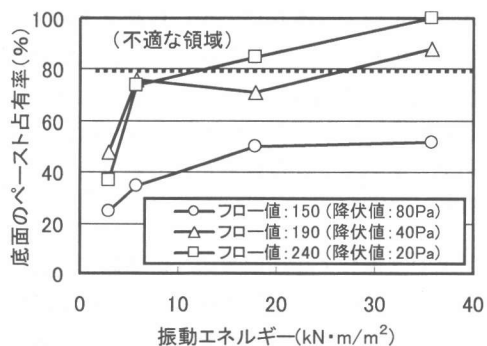


図-7 振動エネルギーとセメントペーストの垂れの関係

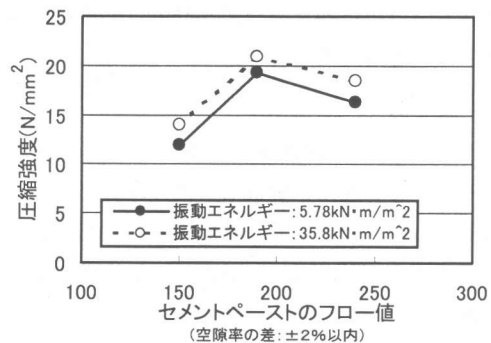


図-8 セメントペーストの性状とポーラスコンクリートの圧縮強度の関係

またフロー値240ではセメントペーストの流動性が高い(降伏値が小さい)ため、骨材が保

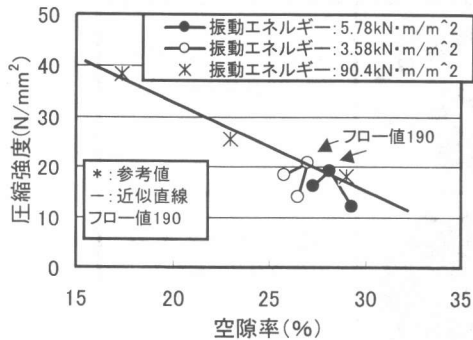


図-9 ポーラスコンクリートの圧縮強度と空隙率の関係

持できるセメントペースト量が少なくなったと考えられる。なお、強度の低下の傾向はフロー値が小さすぎる場合に顕著に現れた。

次に空隙率と圧縮強度の関係を図-9に示す。図には参考値としてフロー値190のセメントペーストを用いて、さらに大きい振動エネルギー（およそ90kN・m/m²）を与えて作製した結果を記した。図によれば、本実験で設定したフロー値190は、ポーラスコンクリート圧縮強度性能を十分に発揮できる軟らかさであると考えられる。

以上の結果および締固め条件が類似する他の実験結果^{4) 5)}を併せて考察すると、振動締固めを行ってポーラスコンクリートを製造する場合、所要の空隙率を確保したうえでより高い諸性能（ここでは圧縮強度）を得るためには、セメントペーストのフロー値を180~200程度に設定することが肝要である。

4. まとめ

(1) 高性能AE減水剤を添加したセメントペーストの流動性は、練混ぜ時間の経過とともに安定するので、少なくとも安定した状態が得られるまで十分な練混ぜを行うことが望ましい(図-2)。

(2) 表面振動機による振動締固めでは、骨材の充填効果が得られる深さは、表面から10cm程度までである。骨材の実積率に近い充填率を得るためには、多層詰めなどにより充填を行う必要がある(図-5)。

(3) ポーラスコンクリート製造時のセメントペーストの垂れを防止し、圧縮強度をより増大させるためには、セメントペーストの流動性と締固めエネルギーの最適値を把握することが重要である。本実験の範囲では、セメントペーストのフロー値は190程度で、締固め時の振動エネルギーは5~20kN・m/m²程度であった。

ポーラスコンクリートの製造条件の体系化を図るため、今後さらに骨材径や空隙率の違いによるセメントペーストの流動性と締固めの関係についても検討することが望まれる。

謝辞

本研究を進めるに当たり終始協力していただいた三重県科学技術振興センター工業研究部の皆様に深謝いたします。

なお本研究費の一部は、平成11年度文部省科学研究費補助金・基盤研究(B)(研究代表者：畑中重光)によったことを付記する。

参考文献

- 1) エココンクリート研究委員会報告書：日本コンクリート工学協会, 1995.11
- 2) 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, 第42巻, pp. 591-594, 1988.12
- 3) 吉森和人ほか：植生ポーラスコンクリートの製造と耐久性に関する実験的研究, 「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, 日本コンクリート工学協会, pp. 39-46, 1995.11
- 4) 柳橋邦生ほか：倉吉オケ崎護岸における緑化コンクリートの施工, コンクリート工学, Vol. 37, No. 2, pp. 30-34, 1999.2
- 5) 添田政司ほか：ポーラスコンクリートへの再生骨材の適用性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 2, pp. 1117-1122, 1998.6
- 6) 玉井元治：ポーラスコンクリート技術の現状と将来性, TAIHEIYO CEMENT TECHNICAL INFORMATION [CEM'S], No. 6, pp. 2-7, 2000.7
- 7) 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
- 8) 湯浅幸久ほか：ポーラスコンクリートの製造方法に関する基礎的実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 1, pp. 235-240, 1999.6
- 9) 超硬練り研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, pp. 155-162, 1998.6
- 10) 岡田正美ほか：ポーラスコンクリートの振動締固め方法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 1, pp. 241-246, 1999.6