

多自然型河川づくりに関する研究

—ポーラスコンクリートの振動締固めに関する実験的研究—

湯浅幸久*, 村上和美*, 前川明弘*

Study on Nature Oriented River Works

-Experimental Study on the Compaction with Vibration for Porous Concrete-

by Yukihiisa YUASA, Kazumi MURAKAMI and Akihiro MAEGAWA

In the production of porous concrete, it was confirmed that the flowability of the cement paste is stabilized by mixing for more than 270 seconds irrespective of the kind of chemical admixture. However, the use of superplasticizer influences water cement ratio and compressive strength which is suitable for porous concrete. In the compaction by surface vibrator for porous concrete, there was a difference of about 10% of void ratio between the upper and lower layers. It became clear that a suitable flow value for optimum performance of porous concrete is influenced by the value of a designed void ratio. The compressive strength of porous concrete is able to be estimated by the void ratio and the compressive strength of concrete without void when same binder is used.

Key words: Porous concrete, Flowability, Compaction with vibration, Void ratio, Compressive strength

1. はじめに

コンクリート張りが主流であった河川護岸に環境への配慮が求められるようになって10年余りになる。この間、様々な材料や工法が提案されてきた。特に自然素材（石材や木材など）を用いた護岸工法も行われている。しかしながら、自然素材の中には採取場所への環境負荷が問題となる場合もあり、総合的に見て、必ずしも良好な結果が得られていないのが現状である。

このような状況のなかで、環境に配慮できるコンクリート材料として、構造部材の内部に多くの空隙を持つポーラスコンクリートの利用研究が進められている。特に緑化等を意識した比較的大型の空隙を有するポーラスコンクリートの研究が日本を中心に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（以下、とくにことわらない限りセメントペーストを指す）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⁾²⁾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、通常のコンクリートが水や空気を通さない密実な材料であるのに対して、ポーラスコンクリートは調合上の空気量（ここでは空隙率）を大きく設定することで連続した空隙を形成させることが大きな特徴となっており、その空隙構造の形成方法や強度保持のメカニズムが通常のコンクリートとは著しく異なるためである。

ポーラスコンクリートに求められる連続空隙量および十分な強度性能を確保するためには、ペースト部分が高強度であることはもちろんのこと、玉井³⁾や吉森ら⁴⁾が提唱するFunicularの第1領域

* 応用材料グループ

の確保，すなわち連続した空隙を保持した状態で，骨材間を架橋するペーストの連続性が確保されることが重要な条件となる．したがって，ペーストの流動性がポーラスコンクリートの性能を左右することは明らかである．筆者らが行った基礎実験では，ミキサの性能（練混ぜ機構の違い）や練混ぜ時間によってもポーラスコンクリートに適した低水セメント比におけるペーストの性状は異なることが分かっている⁹⁾．

ペーストの流動性に着目した既往の研究では，玉井⁹⁾がレオロジー量（降伏値および塑性粘度）について触れているものの，他の多くの研究者が，より簡易な試験方法であるフローテーブル試験機により測定したフロー値とポーラスコンクリートの強度の関係に着目しており，最適なフロー値として180⁹⁾，190⁷⁾，200⁸⁾，230⁹⁾，240¹⁰⁾，280¹¹⁾などが提案されている．しかしながら，減水剤の使用の有無や練混ぜ条件，締固め条件などが異なるため，これらの値を単純には比較できない．今後は，このように異なる条件下で提案されたペーストの流動性について，レオロジー量の変動を調べることで，ポーラスコンクリートに適したペーストのフレッシュ性状を系統的に把握する必要がある．さらに，施工による変動をも予測するため，締固めまでの一連の過程を考慮した検討が必要である．

そこで本研究では，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，まずポーラスコンクリートに適したペーストのフレッシュ性状を定量的に調べる．次にポーラスコンクリートの製造時の重要な要因となる振動締固め性状についてペーストのフレッシュ性状と関連づけて検討する．

2. 実験方法

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．セメントには，比表面積等の物理特性が安定して供給されるセメント協会製研究用セメント(記号：C)を使用した．粗骨材には，単粒度碎石6号(記号：G)を使用した．混和剤には，リグニンスルホン酸塩系減水剤(記号：A)およびポリカルボン酸系高性能AE減水剤(記号：Sp)を使用した．ここで，減水剤は通常AE剤とともに用いるが，多量の

気泡発生によるフロー値への影響を避けるため，AE剤は添加しないことにした．またポリカルボン酸系高性能AE減水剤は，減水剤そのものが骨材等の影響で練混ぜ時にエントレインドエアを発生させる働きがあるため，AE剤は添加せず，そのまま使用した．なお，このときのペースト中の空気量は1%程度であり，ポーラスコンクリートへの影響は小さいことを確認している．

2. 2 実験概要

2. 2. 1 セメントペーストの性状把握実験

ペーストの練混ぜ実験の概要を表2に示す．ペーストの流動性は，減水剤の使用条件や練混ぜ条件により異なるため，減水剤の種類・添加量および水セメント比を勘案し，振動締固めによる既往の文献⁷⁾⁸⁾を参考に，W/C=20~36(%)の範囲で，実用的と考えられるフロー値(150~230程度)となるよう設定した．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⁹⁾．練混ぜ方法は，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200rpmのミキサ回転数で混練した．

ペーストのフレッシュ性状を定量的に把握するため，フローテーブル試験機によりフロー値を，

表1 使用材料の種類と特性値

種類	特性値	記号
セメント	研究用セメント(普通ポルトランド)	C
	密度(g/cm ³) : 3.17	
	比表面積(cm ² /g) : 3150	
粗骨材	単粒度碎石6号(5~13mm 佐奈山産)	G
	表乾密度(g/cm ³) : 2.70	
	実積率(%) : 57.4	
混和剤	減水剤(リグニンスルホン酸塩系)	A
	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)	Sp

表2 ペースト練混ぜ実験の概要

項目	条件	記号
W/C(%)	20~36	—
混和剤使用条件 : 添加量(%) (対セメント量)	無添加	N
	減水剤(原液換算) : 0.25	R
	高性能AE減水剤 : 0.5	L
	高性能AE減水剤 : 1.0	S
練混ぜ時間(s)	90, 180, 270, 360, 450	—
測定項目	フロー値, 粘度	—

表3 ポーラスコンクリートの調合

減水剤の種類	添加量 (%)	記号	設計空隙率 (%)	ペースト粗骨材比 (vol%)	設定フロー値	W/C (%)	単体量 (kg/m³)			実測フロー値	
							水	セメント	粗骨材		
無添加	0	N25	25	29.7	150	28.1	80	286	1550	-	151
					190	31.1	85	273			190
					230	34.1	89	260			228
減水剤	0.25	R25			150	26.3	78	295		0.738	150
					190	31.0	85	273		0.682	189
					230	35.7	91	254		0.635	228
高性能AE減水剤	0.5	L25			150	23.6	73	310		1.548	151
					190	25.3	76	300		1.502	190
					230	26.9	79	292		1.460	227
高性能AE減水剤	1.0	S25			150	21.1	68	324		3.243	147
					190	22.0	70	319		3.188	188
					230	23.9	74	308		3.079	231

円柱形7号ロータ（高粘度用）を取り付けた内円筒回転型粘度計によって粘度をそれぞれ測定した。粘度測定の場合には、一般に硬練りペーストでは平板ブラストメータが、軟練りペーストでは球引上げ試験機や傾斜管試験機などが適している。しかしながら本実験で設定した流動性の範囲を同一条件で測定することは難しい。また最近の研究ではせん断ボックス試験¹²⁾も有効とされているが、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。回転粘度計は、塑性粘度が小さく降伏値が大きい場合に試料と円筒の境界面で滑りが発生するという指摘¹³⁾もあるが、筆者らの研究によれば、セメントの分散性が十分であれば、ペーストのフレッシュ性状の傾向を捉えることは可能である⁷⁾。

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. 2. 2 ポーラスコンクリートの作製実験

ポーラスコンクリートの作製に用いるペーストの水セメント比は、各減水剤の使用条件別の水セメント比とフロー値の関係(2.2.1 セメントペーストの性状把握実験により得られた結果)からフロー値が150, 190, 230となるよう設定した。練混ぜ方法は、ペースト先練りとし、セメントおよび水を投入後30秒間はミキサ回転数を50rpmで、その後200rpmにしてペーストの流動性が安定する270秒まで練り混ぜた後、骨材を投入してさらに90秒間練り混ぜ、供試体を作製した。調合を表3に、供試体の作製条件および測定項目を表4にそれぞれ示し、製造過程の説明に練混ぜフロー図を

表4 ポーラスコンクリートの作製条件および測定項目

練混ぜ方法	ミキサ回転数 (rpm) : 200 練混ぜ時間 (s) : ペースト 270 骨材投入後 90
供試体寸法	円柱供試体 (cm) : φ10×20
試料の投入方法	1層詰め
締固め方法	表面振動機 起振力 (N) : 0, 245, 735, 1225 締固め時間 (s) : 10
測定項目	空隙率、圧縮強度

《練混ぜフロー》

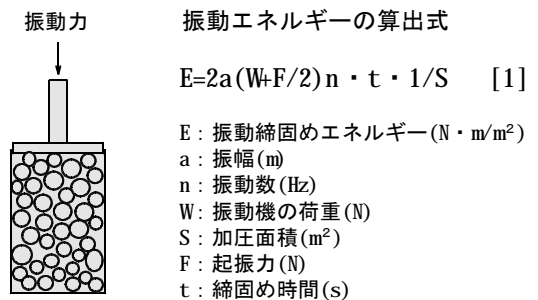
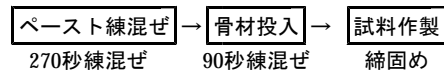


図1 ポーラスコンクリートの締固め方法
および振動エネルギーの算出式
(JCI超硬練りコンクリート研究委員会報告書¹⁴⁾の式)

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1に示す。空隙率の測定はエココンクリート研究委員会報告書「ポーラスコンクリートの空隙率試験方法(案)」¹⁴⁾によった。

3. 実験結果

3. 1 セメントペーストの性状

3. 1. 1 減水剤の使用条件とフロー値の関係

図2にペーストのフロー値と水セメント比の関係を減水剤の使用条件（種類と使用量）別に示す。また練混ぜ時間別に近似直線を付した。図によれば、いずれの減水剤使用条件においても水セメント比とフロー値のあいだに高い相関があることが分かった。また練混ぜ時間が概ね270秒以上で一定の関係になる。したがって本実験で用いたミキサの場合、ポーラスコンクリートに用いる低水セメント比ペーストの流動性を安定させるには、少なくとも5分程度の練混ぜ時間を確保することが重要である。

減水剤の使用条件の違いを比較するため、図3に練混ぜ時間270秒における水セメント比とフロー値の関係を示す。図によれば、減水剤無添加(N)と減水剤(R)の使用による差は認められなかった。これは通常使用される減水剤が本実験で設定した低水セメント比では効果がないことを意味している。一方、高性能AE減水剤では、添加量(L, S)に応じて、十分な減水効果が得られた。

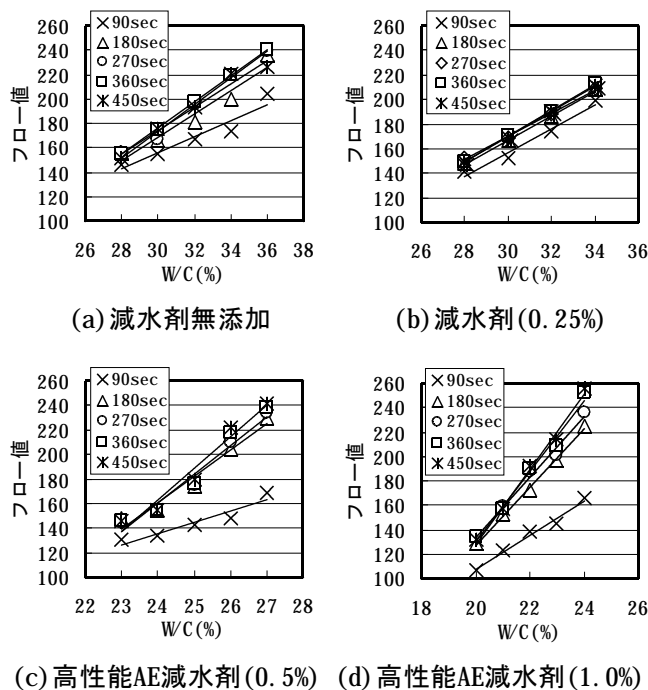


図2 減水剤の使用条件が異なるペーストの水セメント比とフロー値の関係

ただし、水量の変動に対しては敏感である。

3. 1. 2 減水剤の使用条件と粘性の関係

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。回転粘度計による測定結果をもとに算出した降伏値および塑性粘度とフロー値の関係を図4に示す。図によれば高性能AE減水剤を添加したペーストは、添加量の増加に伴い降伏値および塑性粘度が増大する傾向を示した。この傾向はフロー値が小さいほど顕著に現れた。ペーストのレオロジー量は、直接的には水セメント比の影響を大きく受けることから、高性能AE減水剤を用いて水セメント比を低下させたペーストのレオロジー量が大きくなることは予測される。しかし減水剤を用いたペーストおよび減水剤無添加のペーストでは、ともにフロー値の大小によるレオロジー量の変化は小さく、高性能AE減水剤の添加に比べて粘性の増大には効果的でないことが分かった。一般に、セメントは水の中で機械的に相当激しく攪拌しても十分には分散せず、数個から数十個の凝集体（フロック）を形成するとされている¹⁵⁾。これらのペーストでは、おそらく流体としての均質性に乏しい、すなわちセメント粒子の分散性が不十分である可能性が高い。さらに、この場合には十分な付着性が得られないため、回転粘度計による測定時にローターとペーストの境界面にすべりを生じた可能性もある。

したがって、本実験で設定したポーラスコンク

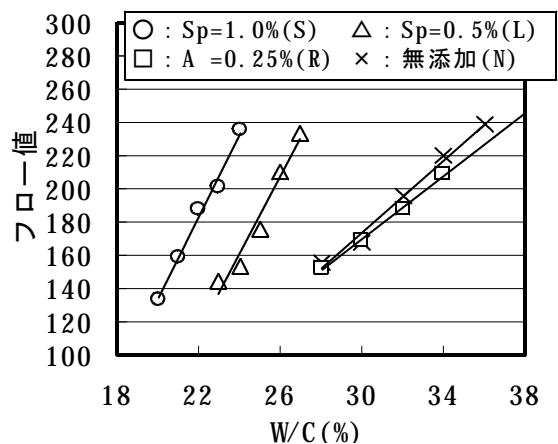


図3 練混ぜ時間270秒におけるW/Cとフロー値の関係

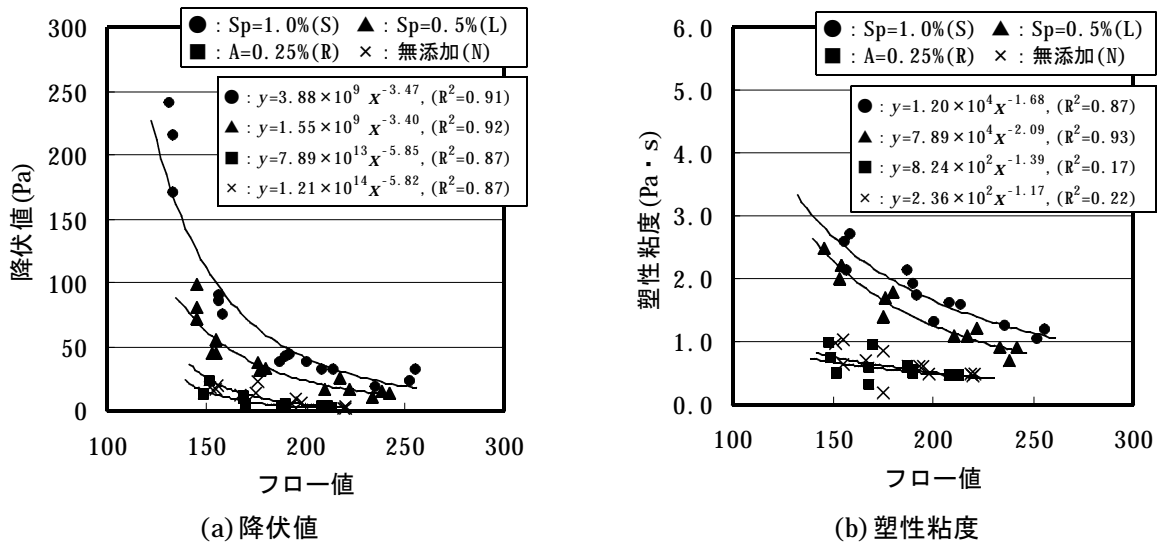


図4 フロー値とレオロジー定数（降伏値、塑性粘度）の関係

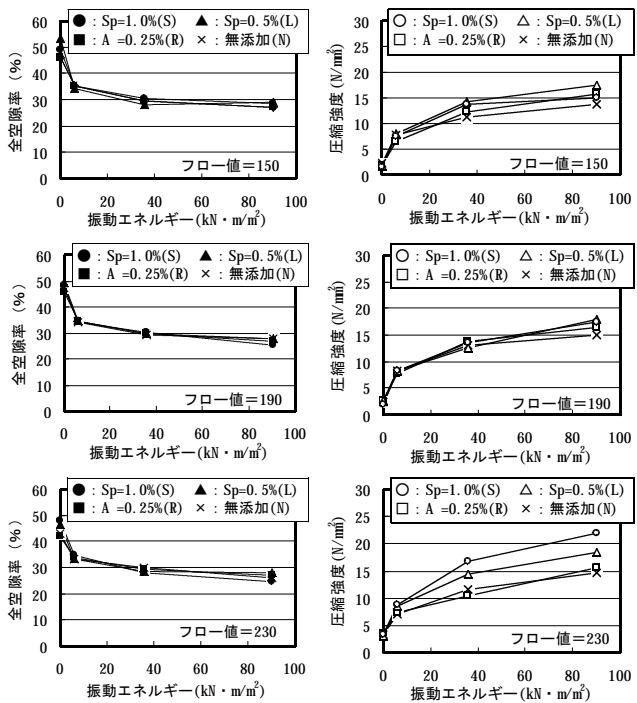


図5 振動エネルギーと空隙率の関係

図6 振動エネルギーと圧縮強度の関係

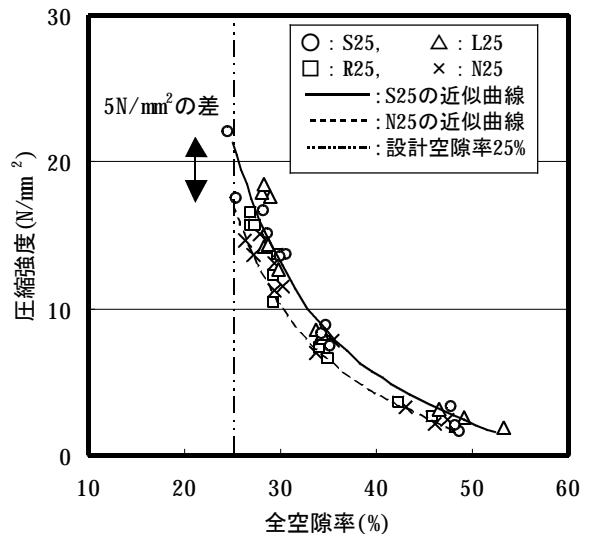


図7 空隙率と圧縮強度の関係（減水剤の使用条件別）

リートを対象とする低水セメン比領域では、セメント粒子を十分に分散させて安定した流動性を得るために、とくに高性能AE減水剤の添加が望ましいと考えられる。

3.2 ポーラスコンクリートの性状

ポーラスコンクリートに所定の空隙率を確保することにより、構造上の強度が低下することは避けられない。すなわち、骨材を実積率付近まで充

填する（締め固める）場合には、ペースト量を増加させて強度を確保するという手法は取ることができない。したがって効果的に強度を確保するためには、ペーストの高強度化や結合状態の最適化が必要になる。ペーストの高強度化は、通常水セメント比を下げることにより可能であるが、結合状態の最適化を図るためにはペーストをある程度流動化させ、かつFunicularの第1領域を確保す

る必要がある。ここではペーストの流動化および締固めを十分に行うため表面振動機を用いることを前提として、減水剤の使用条件およびペースト量が、全空隙率および空隙分布並びに圧縮強度に与える影響について検討した。

3. 2. 1 減水剤の影響

(1) 空隙率

減水剤の使用条件により、セメント粒子の分散性や粘性に違いが生じることが3.1ペースト実験により明らかになった。そこで、設定したフロー値(150, 190, 230)において振動締固めにより成形されるポーラスコンクリートの性状について調べる。設計空隙率(全空隙率)は、緑化コンクリートなどに適した空隙率である25%(表3)とした。

締固め時に与えた振動エネルギーと全空隙率の関係を図5に示す。図によれば、フロー値および減水剤条件に関わらず、加振初期に急激に空隙率が低下し、その後振動エネルギーが90kNm/m³にな

るまで徐々に締め固められ、設計空隙率(25%)に漸近した。

(2) 圧縮強度

振動エネルギーと圧縮強度の関係を図6に示す。図によれば、圧縮強度は振動締固めの進行に伴い増大する傾向を示した。これは図5に示した空隙率の低下と密接に関係するものである。設定したフロー値の範囲では、フロー値が230と大きい場合、減水剤の使用条件により圧縮強度には最大で7N/mm²程度の差が生じた。特に高性能AE減水剤を1%添加した調合(S25: Sp=1.0%)において強度発現が良好であった。本実験で設定した空隙率25%(ペースト粗骨材容量比:P/G=29.7vol%)では、比較的ペースト量が少なく、垂れによる影響はそれほど大きくないことから、この場合のポーラスコンクリートの圧縮強度の差はペーストの圧縮強度の差に起因するものと考えられる。

ポーラスコンクリートの強度性能は、また空隙率にも大きく左右される。そこで、図7に空隙率と圧縮強度の関係を示す。加振前の状態では概ね50%前後の空隙率を示し、圧縮強度も5N/mm²以下である。その後振動締固めの進行に伴い、空隙率は低下し、圧縮強度が増大する。このときの強度変化は、従来多くの研究で表現されていた直線的なものではなく、空隙率の低下に伴い急激に増大する傾向を示した。既往の研究で直線近似が行われた理由は、設計空隙率に達した時点での空隙率と強度の関係に関するデータが多く、設計空隙率の範囲も限られていたためである。また、高性能AE減水剤を用いることで水セメント比を小さく設定でき、所定の空隙率を要求されるポーラスコンクリートとして、強度面で極めて有利であることも判明した。なお図中には、設計空隙率25%において減水剤の使用条件により生じる圧縮強度の差(5N/mm²程度)を示してある。

(3) 空隙分布

表面振動機により締固めを行う場合、振動エネルギーの伝播は供試体の下層方向に減衰することが予測される。そこで硬化後の供試体を上下方向(締固め方向)に3等分し、空隙分布を調べた。実測例を図8に、試験体記号を図9に示す。図8によれば、上下方向の空隙分布は、振動エネルギーを与えない場合を除き、すべてにおいて同方向

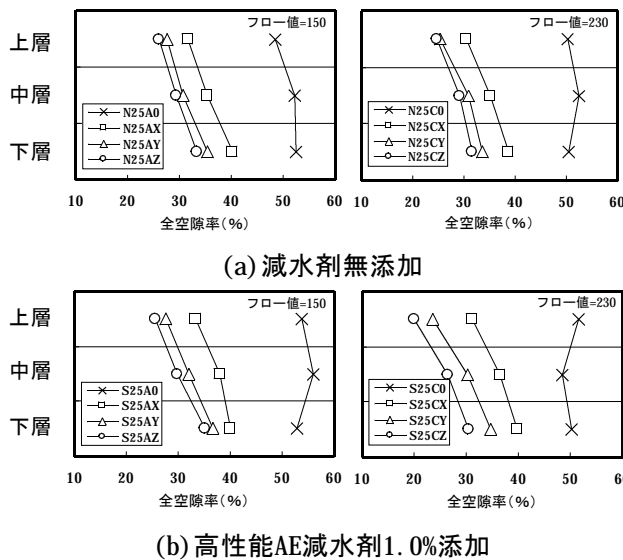


図8 空隙率分布の一例(設計空隙率25%)

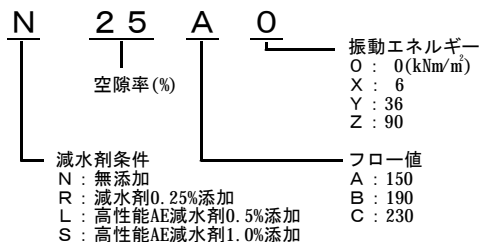


図9 ポーラスコンクリートの試験体設定(作製条件)の説明

に傾きを持つ傾向を示した。すなわち、空隙率は振動力を直接受ける上層が最も小さくなり、一定の傾斜を持って下層ほど大きくなった。そして振動エネルギーの増加に伴い全体に空隙率が小さくなる方向にシフトするが、締固め初期から終了（振動エネルギー：90kN・m/m²）まで上下層の空隙率の差が概ね10%程度に保たれたまま締固めが進行し、締固め終了時には、3層の平均値が所定の空隙率に近い値を示す傾向が見られた。高性能AE減水剤を用いた供試体((b)図)では、フロー値が大きいと振動を直接受ける上層では所定の空隙率より小さい値を示した。これはセメントの良好な分散性によりフロックが少なくなり、骨材同士が直接接触することで、骨材の一部が破壊したためと考えられる。

なお、設計空隙率：25%では、相対的にペースト量が少ない（ペースト粗骨材比：P/G=29.7vol%）ことから、フロー値：230においてもペースト

の垂れは生じなかった。

3. 2. 2 ペースト量の影響

ポーラスコンクリートの強度特性を支配するもう一つの要因として、結合材の量が考えられる。結合材の多少は空隙率の大小に直結し、既往の研究では空隙率と圧縮強度の関係は一定の傾きを持つ直線近似で表現されてきた。しかし、空隙率は上記のように締固めの程度によっても大きく変化する。

そこで、振動締固めの過程で、ペースト量の多少がポーラスコンクリートの諸物性に及ぼす影響について調べた。ここでは表3の調合から最もW/Cの小さいSシリーズを選択し、ペースト量を変化させることによって設計空隙率を15, 20, 25%（ペースト粗骨材比：P/G=29.7, 38.2, 46.6vol%）とし、振動締固めを行った場合の以下の性状について調べた。

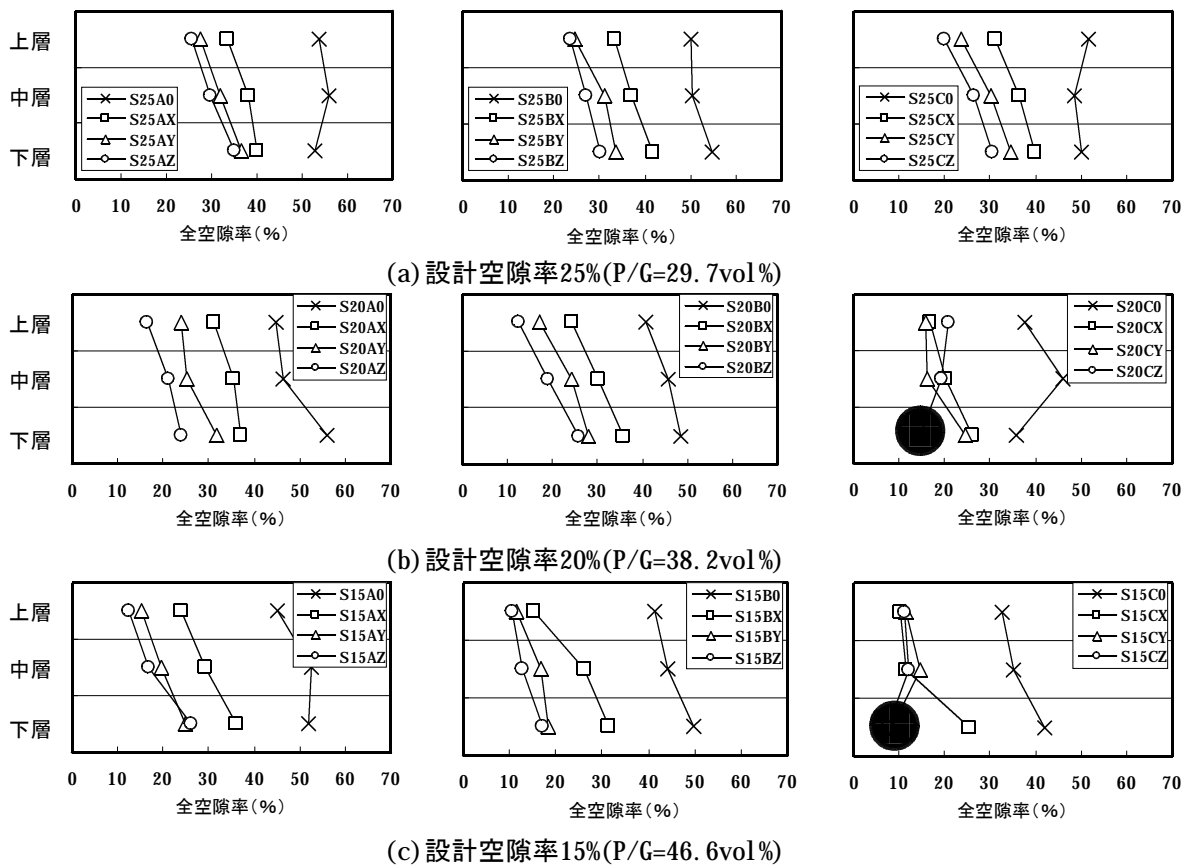


図10 設計空隙率が異なるポーラスコンクリートの空隙率分布
(図中の○囲いは、ペーストの垂れによる空隙率の低下を示す)

- ①ペースト量が空隙分布に与える影響
- ②ペーストの量と流動性がペーストの垂れと圧縮強度に与える影響
- ③ペースト量の違いが空隙率と圧縮強度の関係に与える影響

(1) ペースト量が空隙分布に与える影響

設計空隙率（ペースト量）の異なるポーラスコンクリートの空隙分布を図10に示す。設計空隙率25%((a)図, P/G=29.7vol%)の場合, 設定したフロー値の範囲では加えたエネルギー量に応じて一定の傾きを保ったまま締固めは進行するが, これよりペースト量が多い設計空隙率20%((b)図, P/G = 38.2 vol%)では, フロー値230において90kN・m/m²の振動エネルギーで下層部に空隙率の急激な低下と空隙分布の逆転が認められた(図中の○印)。さらにペースト量が多い設計空隙率15%((c)図, P/G = 46.6vol%)では, より小さい振動エネルギー(36kN・m/m²)レベルから下層部に空隙率の低下傾向が見られた。これは振動により流動化したペーストが下層部に移動したためである。実験で設定したフロー値の範囲では, 骨材表

面に付着したペーストは, 静止時には保持される程度の軟らかさである。しかし振動締固めにより, フロー値が大きい場合にはペースト量が多くなるほど流動化が激しくなり, 保持できるペースト量が低下する。すなわち, 骨材表面に保持できるペースト量は, ペーストの軟らかさと振動エネルギーの量によって大きく影響を受けることを意味している。

(2) ペーストの量と流動性がペーストの垂れが圧縮強度に与える影響

ペーストの量が多くフロー値が大きい場合には, 振動締固めエネルギー量が多くなるとペーストは垂れてしまう。そこで振動エネルギーを90kN・m/m²まで与えた供試体の底面に発生するペーストの垂れを, デジタルカメラに取り込み, 観察・分析した。

図11は, 縦方向をフロー値, 横方向を設計空隙率別に並べたペーストの垂れの状況である。設計空隙率15%ではフロー値190以上でペーストの垂れが著しく, 設計空隙率20%でもフロー値が大きい230では著しいペーストの垂れが観察された。表5は, 図11と同じ並びで供試体の圧縮強度を

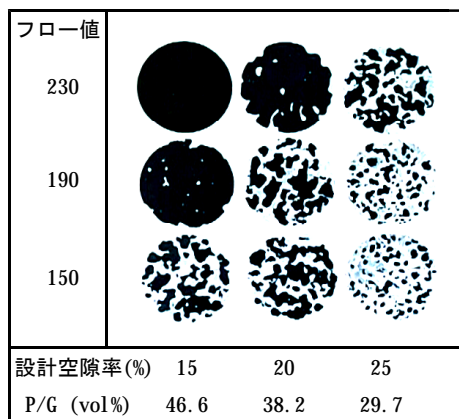


図11 供試体底面の様子

表5 空隙率別の圧縮強度

フロー値	圧縮強度(N/mm ²)		
230	3.8	3.1	2.2
190	4.4	3.5	1.8
150	3.9	2.9	1.5
設計空隙率(%)	15	20	25

破線内：最適な性状のポーラスコンクリート

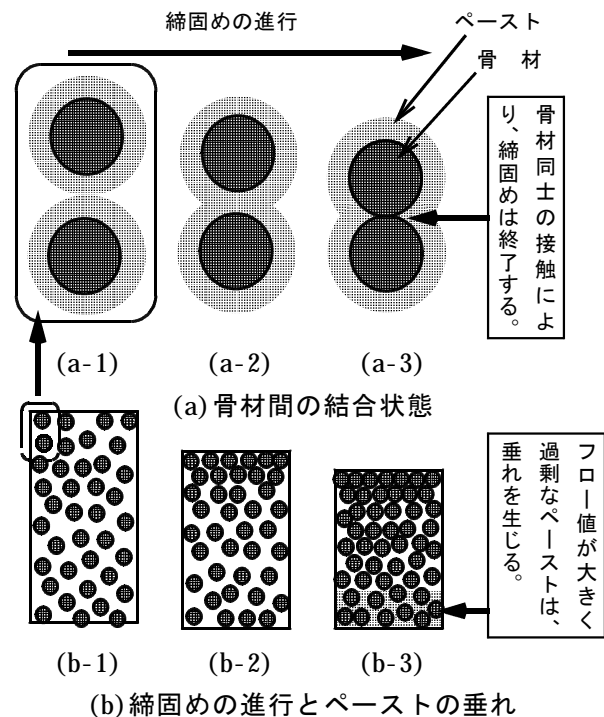


図12 振動締固めの進行状況のイメージ

配置したものである。圧縮強度に関してはペーストの垂れによる強度低下よりも、ペースト量が少なくフロー値が小さいことによる強度低下の方が顕著であった。この傾向は、筆者らの5号砕石を用いた締固め性状に関する実験⁷⁾においても同様に見られており、このことは、骨材間を架橋するペーストの連続性はペーストに垂れを生じる程度のほうが良好であることを示唆している。しかし、ポーラスコンクリートとしての機能に問題が生じる可能性が高くなるため、著しい垂れは避けなければならない。

以上のことから、ポーラスコンクリートの製造に最適なフロー値は、設計空隙率の違い（ペースト量の多少）によって異なることが分かった。すなわち、ポーラスコンクリートに用いるペーストの流動性に関して、種々の空隙率に適用できる唯一の条件は存在しないことになる。本実験の範囲では、具体的な流動性の最適値は、設計空隙率が15%ではフロー値で150程度、20%では190程度、25%では230程度であった（表5中の破線内）。

したがって、ポーラスコンクリートの製造に当たっては、その使用目的により設定される空隙率に応じてフロー値を決定することが肝要である。

なお、一連の締固め実験の結果から1層詰めによるポーラスコンクリートの振動締固めの過程を図12にまとめると、まず加振前の状態では骨材に巻き付いたペーストは互いに接触する程度で接

触面積も僅かである(図12 : a-1, b-1) が、振動開始とともに供試体の上層部から下層部にかけて順次締固めが進行し、ペーストの変形を伴いながら接触面積が徐々に増加する(図12 : a-2, b-2) 。そして最終的には上下層に空隙率差を保ちながら、隣り合う骨材同士が接触するまで締固めは進行する(図12 : a-3, b-3))。このときペースト量が多く垂れが著しい場合には、供試体の底部に垂れによって生じたペーストの密実な層が形成される。

(3) ペースト量の違いが空隙率と圧縮強度の関係に与える影響

図13に、設計空隙率(15, 20, 25%)別に空隙率と圧縮強度の関係を示す。各設計空隙率には3種類のフロー値(150, 190, 230)がすべて含まれている。図によれば、フロー値の違いによるバラツキは多少あるものの圧縮強度と空隙率の間にはある一定の関係があり、空隙率は締固めの程度に応じて最大50%程度から設計空隙率付近まで低下する傾向を示した。この傾向は減水剤の使用条件の異なる図7においてもほぼ同様である。ここで、図7の減水剤の使用条件の違いは、近似曲線を上下にシフトする、すなわち強度性能の高低に関わるものであるが、ペースト量の違いは、結局、最終的に到達する空隙率の違いであって、圧縮強度と空隙率の関係は、ひとつの近似曲線で表現されることが分かった。

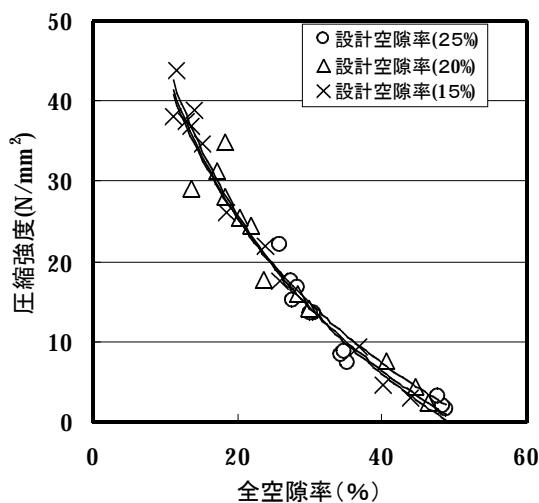


図13 設計空隙率（ペースト量）と圧縮強度の関係

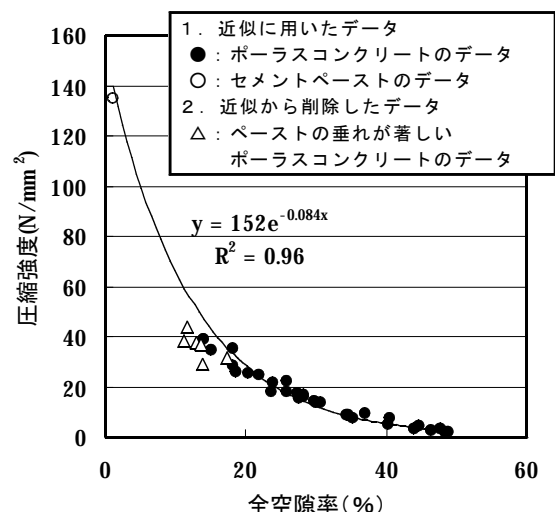


図14 全空隙率と圧縮強度の近似例

3. 2. 3 ポーラスコンクリートの圧縮強度と空隙率の関係式

ポーラスコンクリートの強度について、脆性多孔材料の空隙率と強度に関するRyshkewitch¹⁶⁾とDuckworth¹⁷⁾により提案された式[2]を参考に指数関数による数式表示を行った。

以下に脆性多孔材料の圧縮強度を表す一般式及び実験式を示す。

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-bP) \quad [2]$$

ここに、 σ : 多孔体の圧縮強度(N/mm²)

σ_0 : 空隙率が0の時の
圧縮強度(N/mm²)

P : 空隙率(%)

b : 実験定数

用いたデータは、図13の全データにペーストの強度(図14中の記号:○)を追加し、かつペーストの垂れが著しく均質性が確保されなかったポーラスコンクリートのデータを削除(図14中の記号:△)したものである。指数近似した結果、式[3]に示すように高い相関関係が得られた。用いたデータおよび近似線は図14に併列示してある。

$$y = 152 \exp(-0.084 x) \quad [3]$$

$$R^2 = 0.96$$

ここに、 y : ポーラスコンクリートの
圧縮強度(N/mm²)

x : 全空隙率(%)

ここで、ペースト強度を骨材を含むポーラスコンクリートと同じに取り扱うことは、一般には若干無理があると考えられる。しかしペーストの強度がおおよそ135N/mm²であるのに対して、用いた砕石の圧縮強度が150N/mm²程度であり、それほど大きな違いがないことや骨材とペーストの界面にブリージングが発生しないことなどから、極端な界面破壊や骨材の先行破壊はなかったと判断し、ここではペースト強度を加えて近似曲線を求めた。

ポーラスコンクリートの強度を表す実験式については、わずかに中澤¹⁸⁾がコンクリートの空気量と強度の関係から推定した例がある。筆者らの実験では、結合材強度も含めて近似し、脆性多孔材料一般に適用できる指数関数式により表現でき

ることを示した。

以上より、骨材の品質やペーストによる架橋が十分に確保されていれば、ペースト量と締めめの程度に関わらず、ポーラスコンクリートの強度特性を広い範囲の空隙率に対して表現・推定できる可能性が示唆されたといえる。

3. 2. 4 ポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす諸要因の影響

骨材条件を同一にした場合について、これらの結果をもとに、ポーラスコンクリートの圧縮強度に与える諸要因の影響についてまとめれば、図15のイメージ図のようになる。

したがって、ポーラスコンクリートの強度性能を向上させるためには、フロー値の最適化とペーストの高強度化が重要な要因となる。

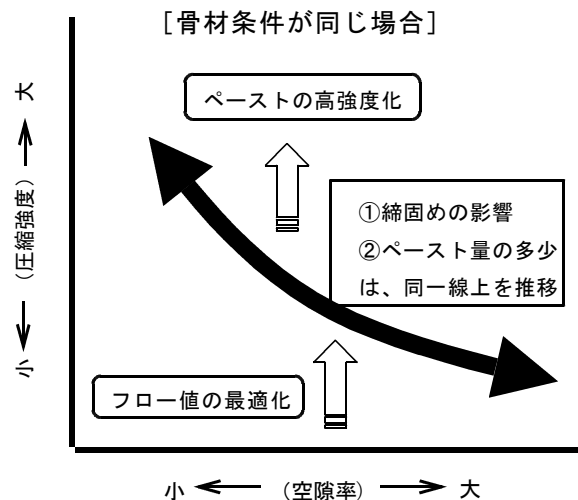


図15 ポーラスコンクリートの強度性能に与える諸要因の影響(イメージ図)

4. まとめ

ポーラスコンクリートの製造時に重要な要因となる振動締め性状について、ペーストのフレッシュ性状と関連づけて検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 減水剤の種類に関わらず、ペーストの流動性は、270秒以上の練混ぜにより安定することが分かった。

(2) ポーラスコンクリートに用いられる低水セメント比域(W/C=20~25%)のペーストでは、高性能AE減水剤を使用するのが効果的である。通常の減

水剤では十分な効果を期待できない。

(3)表面振動機により、直接締固め作用を受ける上層部と受けない下層部では概ね10%程度の空隙率の差を生じた。

(4)調合が同一の場合、ポーラスコンクリートの空隙率と圧縮強度の関係は、締固め程度に関わらず一つの曲線上に存在する。したがって所定の空隙率における強度性能の向上という点では、効果がないといえる。

(5)ペースト量および振動エネルギー量が多いほど垂れを生じやすいが、適切なフロー値を設定すれば垂れを発生させずに締固めが可能である。このとき圧縮強度は最も高くなる傾向にある。本実験では、設計空隙率15%ではフロー値を150程度に、20%では190に、25%では230に設定することでポーラスコンクリートとしての良好な強度が得られた。

(6)ポーラスコンクリートの圧縮強度は、空隙率と空隙率0の時の圧縮強度を説明変数とする多孔質材料の強度式により表現できる可能性が示唆された。

今後、製造条件が異なる場合のポーラスコンクリートの強度予測について、さらに検討するため、骨材粒径やペースト強度の影響などに関して、より広範な実験を行う予定である。

参考文献

- 1)玉井元治ほか編：“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)
- 2)玉井元治ほか編：“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，(1995)
- 3)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，p591-594(1988)
- 4)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，p39-46(1995)
- 5)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，21(1)，p235-240(1999)
- 6)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，37(2)，p30-34(1999)
- 7)湯浅幸久ほか：“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”。コンクリート工学年次論文報告集，23(1)，p133-138(2001)
- 8)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，20(2)，p1117-1122(1998)
- 9)平岩 睦ほか：“ポーラスコンクリートの調合設計法に関する基礎的研究”。コンクリート工学年次論文報告集，23(1)，p121-126(2001)
- 10)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，p2-7(2000)
- 11)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，16(1)，p871-876(1994)
- 12)三島直生ほか：“せん断ボックス試験による高濃度サスペンションのレオロジー性質に関する実験的研究”。日本建築学会構造系論文集，No.528，p13-19(2000)
- 13)フレッシュコンクリートの流動特性，コンクリートポンプ工法施工指針・同解説，p192-236(1994)
- 14)国府勝郎ほか編：“超硬練り研究委員会報告書”。日本コンクリート工学協会，p155-162(1998)
- 15)友澤史紀ほか編：“新・コンクリート用混和材料”。シーエムシー，(1989)
- 16)E.Ryshkewitch：“Compression Strength of Porous Sintered Alumina and Zilucoria.” *Jour. of the Amer. Ceramic Society*,36(2),(1953)
- 17)W.Duckworth：“Discussion of Ryshkewitch Paper.” *Jour. of the Amer. Ceramic Society*, 36(2),(1953)
- 18)張日紅ほか：“ポーラスコンクリートの空隙率が圧縮強度と応力-ひずみ関係に及ぼす影響”。セメント・コンクリート論文集，No.51，p864-869(1997)