

論文 ポーラスコンクリートの調合設計におけるレオロジー的考察

平岩 陸^{*1}・田中清人^{*2}・谷川恭雄^{*3}・森博嗣^{*4}

要旨: 本研究では、ポーラスコンクリートの調合設計時に必要となるセメントペーストの流動性について、レオロジーの観点から考察するとともに、その検証を行った。まず、ポーラスコンクリートを適切に作製するために必要なセメントペーストの降伏値について、骨材径および空隙率別に、その上限値と下限値を理論的に導いた。その後、セメントペーストの各フロー値における降伏値を測定し、各フロー値を持ったポーラスコンクリートの状態から、本理論の適用性について考察した。

キーワード: ポーラスコンクリート、調合設計、フロー値、レオロジー、降伏値

1. まえがき

一般にコンクリート構造物は、河川の護岸など、人間環境と自然環境の境界に設置されることが多い。これは、人間の居住環境を保護するためであるが、同時に多くの自然環境の破壊をもたらしてきた。しかし、環境保全が注目される現在では、環境への配慮が必要不可欠となってきた。このため、コンクリート分野における環境対策の一つとして、エココンクリートの開発が進められている。その中でもポーラスコンクリートは、エココンクリートとして非常に優れた性質を持っている¹⁾。

しかし、ポーラスコンクリートは連続空隙を持つ多孔質なコンクリートであるため、従来のコンクリートの調合理論をそのまま適用することができない。このため、調合設計法および施工法について、合理的な技術の確立が望まれており、各研究者によって研究が進められている^{2~4)}。

本研究では、ポーラスコンクリートの調合設計時に必要と考えられるセメントペーストの流動性について、レオロジーの観点から考察するとともに、その検証を行った。

2. ペーストの流動性に関する理論的検討

2.1 考え方

図-1は、ペーストの流動性とポーラスコンクリートの各物性の関係を概念的に示したものである。この図に示すように、ペーストの流動性は、大きすぎても小さすぎても各物性に対して悪影響を与える。ペーストの流動性が大きすぎると、骨材間を流れて骨材下部にペーストが溜まる。逆に小さすぎると均一に混ぜることが不可能となる上に、骨材間にペーストが閉塞し、ポーラスにならない。このように、適切な性質を持つポーラスコンクリートを作成するには、ペーストに適切な流動性が求められる。さらに、この適切な流動性の範囲は、骨材粒径、打設方法およびペースト - 粗骨材比などによって変化すると考えられる。

セメントペーストの流動性は、塑性粘度および降伏値で表されるレオロジー定数で一般に評価される⁵⁾。ポーラスコンクリートの作製に必要なペーストの流動性を考えた場合、混練・打設時の流動性も重要であるが、打設後のペーストが流れ出すかどうかを判定することが最も重要

*1 豊田工業高等専門学校 建築学科助手 博士(工学) (正会員)

*2 豊田工業高等専門学校 建築学科助教授 (正会員)

*3 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻教授 工博 (正会員)

*4 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻助教授 工博 (正会員)

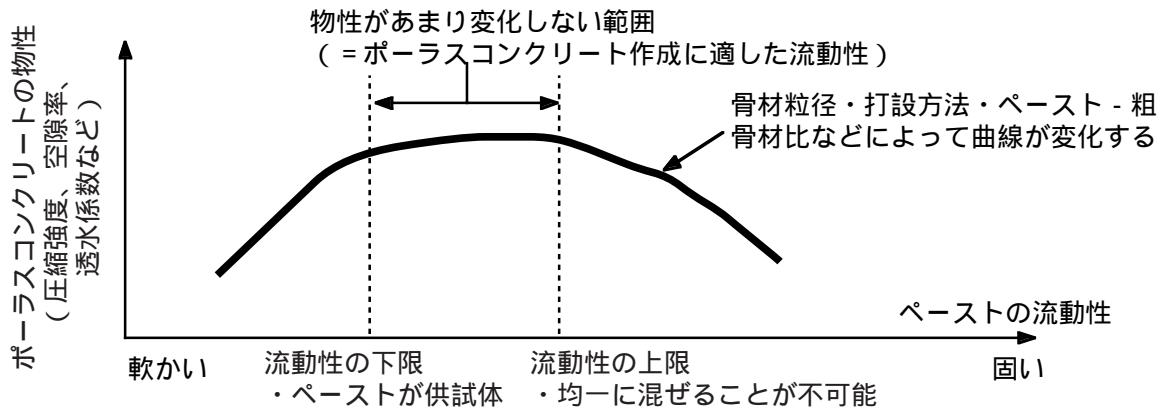


図-1 ペーストの流動性とポーラスコンクリートの各物性の関係の概念図

と考えられ、降伏値が主な判定要因となると考えられる。

本研究では、ペーストの降伏値の上限値と下限値を求めるために、それぞれの流動状態をモデル化した。まず、下限の降伏値は、骨材表面のペーストが流下しない値を、上限の降伏値は、骨材間でペーストが閉塞しない値とした。これらのモデルを用いて、ポーラスコンクリート作製に必要なペーストの降伏値について検討する。

2.2 ペーストの降伏値の下限値

ペーストの降伏値の下限値として、骨材表面における流下を考える。骨材表面にあるペーストが流下すると、下部にペーストが溜まり、不完全なポーラスコンクリートとなる。ここでは、単純化のために、骨材表面部を真下に流れる場合を考える。

図-2に示すように、ペーストの密度 ρ 、ペーストの厚さを t 、骨材の大きさを a とした場合、骨材面上に働く最大せん断力は $\rho t a^2$ となり、断面積 a^2 で割った最大せん断応力は、 ρt となる。この最大せん断応力よりも、ペーストの降伏値が大きい場合、ペーストは流下しない。また逆に、この最大せん断応力よりもペーストの降伏値が小さい場合、ペーストは流下する。ポーラスコンクリートを作製する際には、このような状況でも流下しないペーストが必要であるため、ペーストの降伏値は式(1)で表される。

$$\tau_y > \rho t \quad (1)$$

ここに、 τ_y ：ペーストの降伏値

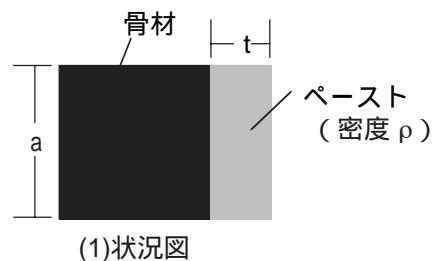
ρ ：ペーストの密度

t ：骨材表面のペーストの厚さ

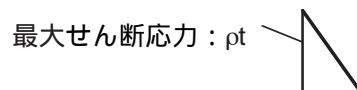
2.3 ペーストの降伏値の上限値

次に、ペーストの降伏値の上限値として、骨材間の流動を考える。ポーラスコンクリートは、骨材間をペーストが架橋することによって成立しているが、それは骨材間隔が狭い場所のみでなければならない。骨材間隔が広い場所で架橋している場合は、ペーストが閉塞している状況であり、ポーラスコンクリートではこのような状況は好ましくない。ここでは、閉塞しない降伏値を上限として考える。

2.1と同様に単純化するために、等間隔の骨材間を流れるペーストを考える。図-3に示すように、ペーストの密度を ρ 、骨材間隔を L 、骨材の



(1)状況図



(2)せん断応力図

図-2 骨材表面における流動

大きさを a とした場合、骨材面上に働く最大せん断力は $\rho La^2/2$ となり、最大せん断応力は、 $\rho L/2$ となる。ここで求められるペーストは、流動しなければならないため、その降伏値は、最大せん断応力よりも小さくなければならない。したがって、降伏値は式(2)で表される。

$$\tau_y < \rho L/2 \quad (2)$$

ここに、 τ_y ：ペーストの降伏値

ρ ：ペーストの密度

L ：骨材間隔

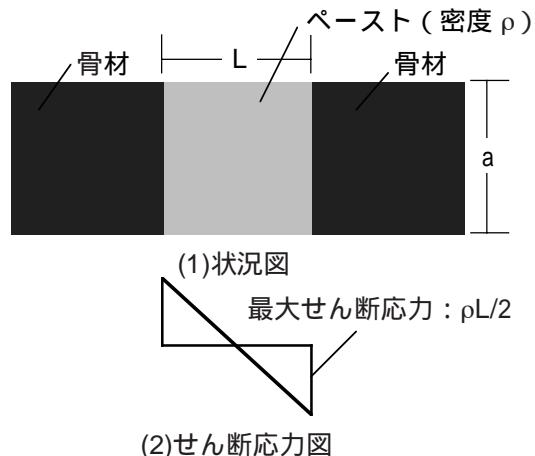


図-3 骨材間の流動

2.4 ペーストの降伏値の範囲

2.2および2.3より、ポーラスコンクリートを作製する際のペーストに求められる降伏値は、式(1)と(2)をまとめて、式(3)の範囲となる。

$$\rho t < \tau_y < \rho L/2 \quad (3)$$

ここに、 τ_y ：ペーストの降伏値

ρ ：ペーストの密度

t ：骨材表面のペーストの厚さ

L ：骨材間隔

この式によれば、ペーストの流動性を考える際に考慮する必要のある要因は、ペースト密度、骨材表面のペーストの厚さ、および骨材間隔である。ペースト密度についてはそれほど大きく変化しないため、他の2つの要因の影響が大きいと考えられる。ペーストの厚さは、骨材の表面積およびペースト量により変化し、骨材間隔は、骨材形状および骨材径によって変化する。以上に挙げた各要因が、ポーラスコンクリートを作製する際に必要なペーストの流動性を決定するものと考えられる。

3. 理論値の計算

ここでは、2.で得られた理論式の具体的な値を計算する。

まず、骨材については、道路用の単粒度碎石である骨材径13~20mmのJIS5号碎石、骨材径5

~13mmのJIS6号碎石、骨材径2.5~5mmのJIS7号碎石を用いることを想定して、平均径をそれぞれ16mm, 9mm, 4mmとして計算した。骨材の実積率は、骨材径にかかわらず60%とし、表面積の計算においては、骨材の形状を球と仮定した。また、ペースト量は、体積比率10, 20, 30%の3種類を設定した。この場合、空気量はそれぞれ30, 20, 10%となる。

以上のような条件を用いて、以下の計算を行った。

3.1 ペーストの降伏値の下限値

式(1)から考えると、流動性の下限は、骨材表面のペーストの厚さに依存する。これは、骨材径によって変化する粗骨材表面積と、ペースト量の2つの要因による。この考えに従って、前述の条件でポーラスコンクリートのペースト厚さを計算したものが、表-1である。骨材径が小さくなるに従って、またペースト量が少なくなるに従って骨材表面のペースト厚さは薄くなる。

この値を式(1)に当てはめ、各条件下の降伏値を求めた結果が表-2である。ここでは、水セメント比25%としてペーストの密度を計算し、 $\rho = 2.20\text{g/cm}^3$ とした。この表中の降伏値の値は、実際にポーラスコンクリートに用いられるペーストの降伏値をそれほど逸脱していない値である。

3.2 ペーストの降伏値の上限値

表-1 ペースト量および骨材別のペースト厚さ (mm)

	ペースト量		
	30%	20%	10%
JIS5号	1.33	0.89	0.44
JIS6号	0.75	0.5	0.25
JIS7号	0.33	0.22	0.11

表-2 ペーストの降伏値の下限値 (Pa)

	ペースト量		
	30%	20%	10%
JIS5号	29.4	19.6	9.8
JIS6号	16.5	11.0	5.5
JIS7号	7.3	4.9	2.4

式(2)から考えると、流動性の上限は、骨材間隔に依存しており、これは主として骨材径による。ここでは、図-4に示すように、骨材半径の半分の範囲まで骨材がペーストにより接着されるのが望ましいと仮定する。つまり、これより骨材間隔の広い部分では、ペーストは流動しなければならないという意味である。また、骨材表面にペーストがある場合、その分だけ骨材間隔が大きくなると考え、表-1に示すペースト厚さを加えた値を骨材間隔として設定した。このような条件で各骨材の骨材間隔を計算した結果が表-3である。この値を基にペーストの降伏値

表-3 骨材別の骨材間隔(含ペースト厚さ) (mm)

	ペースト量		
	30%	20%	10%
JIS5号	3.48	3.03	2.59
JIS6号	1.96	1.71	1.46
JIS7号	0.87	0.76	0.65

表-4 ペーストの降伏値の上限値 (Pa)

	ペースト量		
	30%	20%	10%
JIS5号	38.3	33.4	28.5
JIS6号	21.5	18.8	16.0
JIS7号	9.6	8.3	7.1

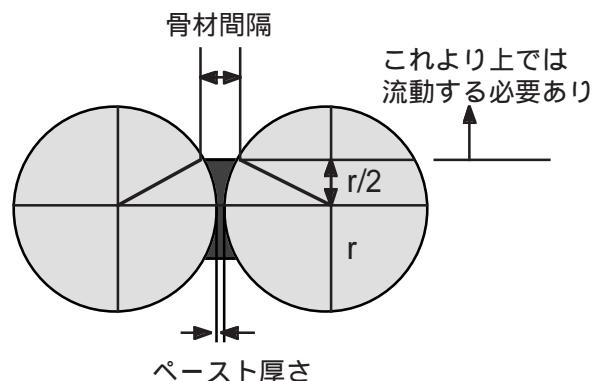


図-4 骨材間隔の設定

の上限値を求めたものが表-4である。この表中の値も、表-2と同様にペーストの降伏値としては従来の知見の範囲内である。

3.3 理論値に関する考察

図-5は、表-2および4で示したペーストの降伏値の下限および上限をまとめて示したものである。この図によればペースト量が多い場合、求められるペーストの降伏値の範囲が狭く、条件が厳しくなることがわかる。一方、ペースト量が少なくなると、降伏値の範囲が大きくなり、広い範囲のペーストでポーラスコンクリートが作製可能となる。また、いずれのペースト量でも、骨材径が小さくなるに従って、求められるペーストの降伏値の範囲が小さくなることがわかる。

以上より、今回の計算では、ペースト量が多く、骨材径が小さいものほど、ポーラスコンクリートを作製するときに必要なペーストの流動

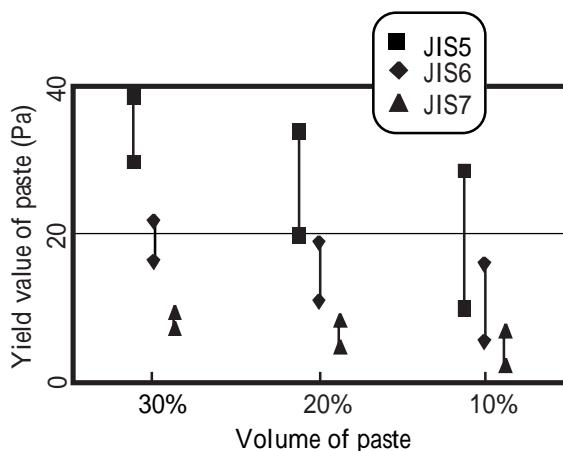


図-5 各条件下におけるペーストの降伏値の上限値および下限値

性の範囲が狭いことがわかった。この理由を以下に考察する。

まず、ペースト量が多い場合には、骨材表面のペースト厚さが厚くなり、骨材表面から垂れやすくなることが実験においても観察される。今回の計算においては、ペースト厚さは降伏値の下限値を決定するものであり、ペースト量の変化により降伏値の下限値が大きく変化するのは明らかである。一方、降伏値の上限値については、今回の計算では、骨材間隔と骨材径による値以外にペースト厚さを含めたため、ペースト量によって変化している。しかし、ペースト厚さによる影響は、骨材径による影響に比較して小さく、ペースト量による変化は、降伏値の上限についてあまり生じない。つまり、ペースト量の影響は、下限値については大きいが、上限値については小さい。この差が、ペースト量が変化した場合に、降伏値の範囲に差が生じる原因と考えられる。また、骨材間隔の仮定においてペースト厚さを含めなければ、上限の降伏値はペースト量にかかわらず同一となる。下限はペースト量によって大きく変化するため、ペースト厚さを含めないで計算した場合には、ペースト量による差がさらに広がることになる。

骨材径について考えると、実験においても、骨材径が小さくなると、骨材間隔が小さくなるため、閉塞しやすくなる傾向が観察される。今回の計算においては、骨材間隔は、骨材径にそのまま比例するが、ペースト厚さを決定する骨材表面積は骨材径の2乗に比例する。降伏値の下限はペースト厚さによって決定されるため、骨材径によって大きく変化するが、降伏値の上限は骨材間隔によって決定されるため、あまり変化しない。これが、骨材径が小さくなると降伏値の範囲の条件が厳しくなる要因である。

4. 実験値との比較・考察

4.1 実験方法

以上のような計算結果の検証のため、実験と

の比較を行った。まず、既往の実験⁴⁾と同じくフロー値を160, 190, 230, 270と変化させたペーストを作製し、回転粘度計を用いてそれぞれのレオロジー定数を測定した。さらに、それぞれのペーストを用いて作製されたポーラスコンクリートの性質について検討することで、理論値の妥当性を検討した。

4.2 実験結果との比較・考察

図-6は、フロー値を160, 190, 230, 270と変化させたペーストの降伏値を示したものである。フロー値が大きくなると降伏値が小さくなるのは既往の研究と一致する。

この結果と図-5を重ねたものを図-7に示す。この図によれば、ペースト量が同一であっても、粒径の異なる3種類の骨材に共通して使用できる降伏値はなく、また、同一粒径でもペースト量が変化すると、同様である。

筆者らの研究⁴⁾では、JIS5, 6, 7号碎石を用いて目標空隙率を20%，すなわちペースト量を20%

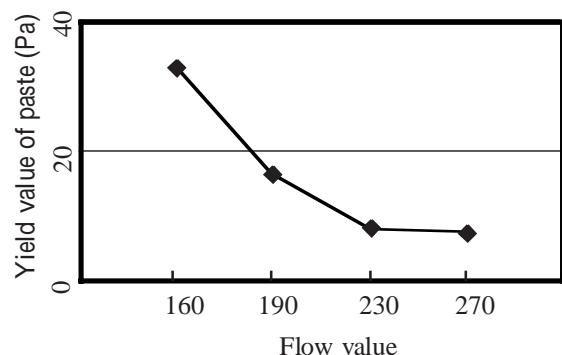


図-6 降伏値とフロー値の関係

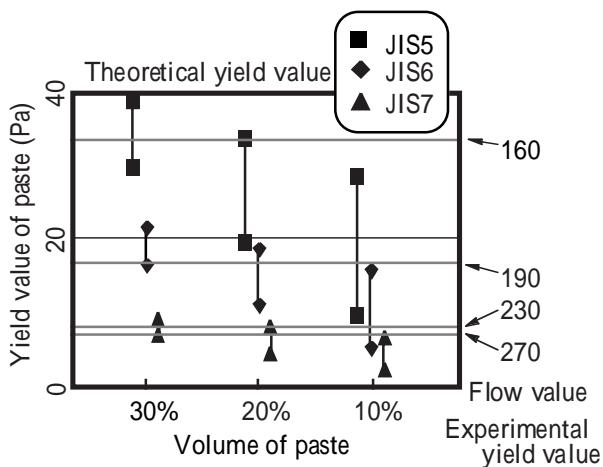


図-7 式(3)による理論値と実験値の比較

としてポーラスコンクリートを作製する際に適切なフロー値を、その表面状態や空隙率、圧縮強度などを総合して、230と結論づけている。しかし、図-7によれば、ペースト量20%，フロー値230のものでは、JIS7号しか今回の理論値の範囲にない。これは、今回の理論値の条件が厳しかったためと考えられる。以下では、降伏値の下限値について再考する。

降伏値の下限値の計算の際には、骨材表面を流下してはならないという条件で式(1)を導いたが、骨材間隔Lの最も短い場所がペースト厚さtであると仮定した図-4のように考えれば、この部分で流動しないためには、降伏値が $\rho t/2$ 以上であればよい。したがって、これを降伏値の下限値とすると、式(3)を入れ替えることによって、式(4)を導くことができる。

$$\rho t/2 < \tau_y < \rho L/2 \quad (4)$$

ここに、 τ_y ：ペーストの降伏値

ρ ：ペーストの密度

t：骨材表面のペーストの厚さ

L：骨材間隔

式(4)を用いて理論値を書き改め、実験値と比較したものが図-8である。この図によれば、ペースト量20%，フロー値230の条件においてJIS6, 7号がこの条件に合っており、JIS5号ではわずかに条件を下回っているが、この場合、理論値は実験値とよく適合していることがわかる。

5.まとめ

本研究では、ポーラスコンクリートを作製する際のペーストに必要な流動性について、レオロジー定数の一つである降伏値を用いて理論的に検討した。また、この値の妥当性を検討するために、実験結果との比較・検討を行った。本研究で得られた知見は、以下の通りである。

1) 降伏値の下限として、骨材間にペーストのみが存在する場合に、流下しない降伏値を計算によって求めた。

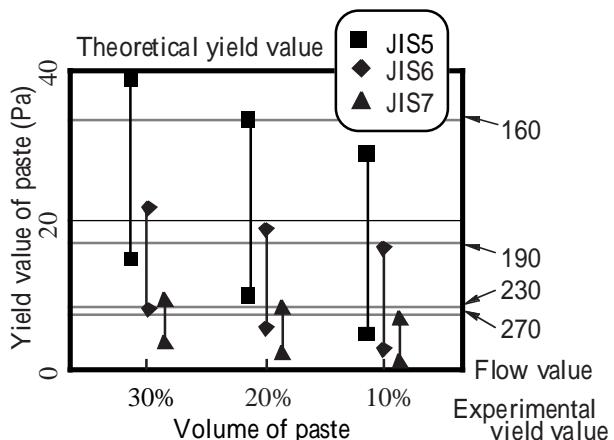


図-8 式(4)による理論値と実験値の比較

- 2) 降伏値の上限として、骨材半径の半分の範囲まで骨材がペーストにより接着されるのが望ましいと考え、それ以上の部分ではペーストが流動するものとして降伏値を計算によって求めた。
- 3) 以上のような条件で導いた理論値は、実験値と概ね適合した。

謝辞

本研究の研究費の一部は、財団法人日本科学協会平成15年度笹川科学研究助成によった。付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：エココンクリート研究委員会報告書, 1995.11
- 2) 日本コンクリート工学協会：ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書, 2003.5
- 3) 湯浅幸久・畠中重光・三島直生・前田明弘・宮本高秀：ポーラスコンクリートの振動締めに関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.552, pp.37-44, 2002.2
- 4) 平岩陸・田中清人・谷川恭雄・森博嗣：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集, Vol.23, No.1, pp.121-126, 2001.7
- 5) 日本コンクリート工学協会：フレッシュコンクリートの力学モデル研究委員会, 1996.4