

論文 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

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

要旨：ポーラスコンクリートは、エココンクリートとして優れた性質を持っているが、その製作方法については十分に合理化されていない。本研究では、ポーラスコンクリートの調合設計法の確立を目的として、要求性能に合ったポーラスコンクリートを製作できるペーストのフロー値を設定するとともに、粗骨材の実積率と調合上の粗骨材量を結びつける補正係数を導入し、粗骨材粒径別にこの補正係数を設定することで、目標空隙率が得られることを実験的に示した。

キーワード：ポーラスコンクリート、調合設計法、空隙率、ペーストフロー値、補正係数

1. まえがき

コンクリートは、ダムや河川の護岸、建築物の建設などにはなくてはならない材料であり、社会基盤を整備する上で重要な役割を果たしてきた。しかし、その立地条件上、自然環境を破壊してきたことも事実である。近年の環境破壊に対する危機意識の高まりは、自然と調和・共生する技術を模索しており、建設材料に対する要求も高まっている。このため、環境と共存できるコンクリートが求められている¹⁾。

このような背景から、エココンクリートの開発が進められており、環境対策を考慮に入れたコンクリートとして、環境負荷低減型エココンクリートと、生物対応型エココンクリートの2種類の方向性が示されている²⁾。本研究で取り扱うポーラスコンクリートは、両者の機能を併せ持ち、エココンクリートとして優れた特性を有しているため、各研究機関で開発が進められている^{3,4)}。しかし、ポーラスコンクリートは、連続空隙を持たせた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、各研究者が独自の方法でポーラスコンクリートを製作しているのが現状であり、調合および施工法について、合理的な技術の確立が望まれている。

本研究では、ペーストおよび骨材の各性質とポーラスコンクリートの基本性能を実験的に関連づけることによって、ポーラスコンクリートの調合設計に関する基礎的な検討を行った。

2. 使用材料および測定項目

使用材料を表-1に示す。普通ポルトランドセメントを使用し、骨材は、単粒度碎石で粒径の異なるJIS5～7号を、水で微粒分を取り除き、表乾状態として使用した。

ポーラスコンクリートの供試体製作には、

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント (比重：3.15)
骨材	JIS5号碎石 (表乾比重：2.65、実積率57.0%、粒径：13mm～20mm)
	JIS6号碎石 (表乾比重：2.62、実積率56.7%、粒径：5mm～13mm)
	JIS7号碎石 (表乾比重：2.63、実積率57.0%、粒径：2.5mm～5mm)
混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤

- | | | |
|------------------|------------|----------|
| *1 豊田工業高等専門学校助手 | 建築学科 | 工修 (正会員) |
| *2 豊田工業高等専門学校助教授 | 建築学科 | (正会員) |
| *3 名古屋大学大学院教授 | 工学研究科建築学専攻 | 工博 (正会員) |
| *4 名古屋大学大学院助教授 | 工学研究科建築学専攻 | 工博 (正会員) |

φ 10×20の円柱供試体を用いた。水とセメントの混練を良くするために、ペーストを先練りし、その後骨材を混入した。打設時は、突き棒を用いて2層に分けて突き固め、翌日脱型ののちに水中養生を行った。また、ポーラスコンクリートの性質は、目視、圧縮強度、空隙率および透水係数によって評価した。これらの試験方法は、ポーラスコンクリートの物性試験方法(案)²⁾によった。なお、空隙率試験については容積法を用い、本文中には全空隙率の値を示した。

3. フロー値の影響に関する実験

3.1 実験方法

フロー値がポーラスコンクリートの物性に与える要因を検討し、ポーラスコンクリートの製作に必要なフロー値の範囲を決定するために、フロー値を160, 190, 230, 270と変化させて(混和剤量はそれぞれセメント質量比で0.8, 1.2, 1.6, 2.0%)打設を行った。ポーラスコンクリートを製作するのに必要なフロー値の下限としては、練混ぜ不良が生じず、性能の低下が起きないことを、また、上限としてはペーストが供試体下部にたまらないことを目安とした。なお、本実験では目標空隙率20%で調合したものを用いている。調合表を表-2に示す。

3.2 実験結果および考察

図-1, および2に、JIS5号およびJIS7号碎石を用いた場合の、フロー

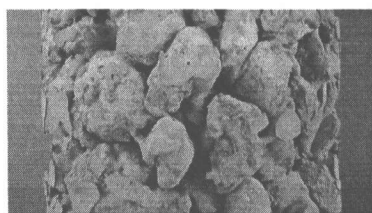
表-2 ポーラスコンクリートの調合表1

	W/C (%)	Air (%)	p/g	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	G (kg/m ³)	HAE/C (%)
JIS5号	25	20	0.40	101	405	1511	0.8~2.0
JIS6号	25	20	0.41	103	411	1486	
JIS7号	25	20	0.40	101	405	1499	

[Note] W/C: Water-cement ratio, Air: Calculated volumetric air content, p/g: Volumetric paste-aggregate ratio, W: Water, C: Cement, G: Aggregate, HAE: High-range water-reducing AE agent

値160ならびに230で製作したポーラスコンクリートの状態を示す。粒径にかかわらず、フロー値が小さい場合は表面状態が粗くなり、フロー値が上昇すると表面状態が滑らかになる。また、粒径の小さいJIS7号では、フロー値160でペーストと骨材が玉になっている。これは、ペーストと骨材が完全に均一には混ざらなかったためであり、練混ぜ不良が生じていると判断できる。

図-3は、空隙率とフロー値の関係を骨材粒径別に示したものである。この図によれば、フロー値が大きくなるにつれて空隙率が減少していることがわかる。これは、ペーストの流動性が増すことで、骨材間の隙間にペーストが入り

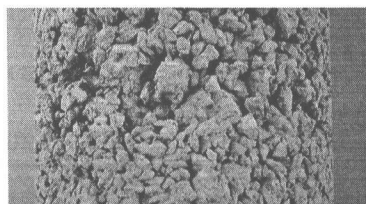


(a) フロー値 160

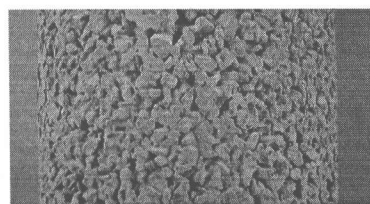


(b) フロー値 230

図-1 ポーラスコンクリートの表面状態 (JIS5号碎石)



(a) フロー値 160



(b) フロー値 230

図-2 ポーラスコンクリートの表面状態 (JIS7号碎石)

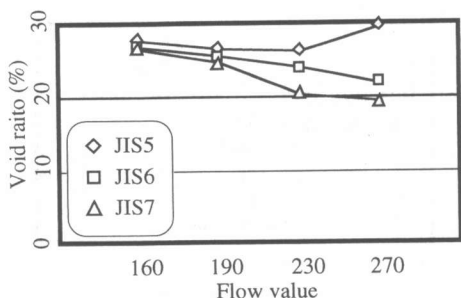


図-3 空隙率とフロー値の関係

込みやすくなるためである。また、骨材粒径に着目すると、JIS5号碎石では、フロー値270で空隙率が上昇している。これは、ペーストの流動性が高くなり過ぎて、供試体下部にペーストがたまっただためであるが、空隙径の小さいJIS6号およびJIS7号碎石においては、このフロー値では下部へのペーストの流出は生じない。また、図-2に示したような、フロー値が小さい場合のJIS7号碎石における練混ぜ不良は、空隙率の関係からは読みとれなかった。

図-4は、圧縮強度とフロー値の関係を示したものである。同図によれば、一部を除いて、フロー値の増大により圧縮強度は増加する傾向があることがわかる。ただし、その傾向は骨材粒径によって異なり、JIS5号碎石では、フロー値270で強度低下を示す。これは前述したように、供試体下部にペーストが流下し、それ以外の部分のペースト分が不足したためである。また、JIS7号碎石では、フロー値190以下で大きく圧縮強度の低下が生じるが、これは、図-2で示したように、小さいフロー値における練混ぜ不良によるものと考えられる。

図-5は、水頭差10cmにおける透水係数とフロー値の関係を示したものである。この図によれば、JIS5号碎石を除けば、フロー値が増加するに従って透水係数が減少している。一般に、空隙率が減少すると透水係数も減少するという結果が得られている³⁾。本実験の結果でも、フロー値が与える影響は、図-3の空隙率および図-5の透水係数の変化で同様の傾向を示した。た

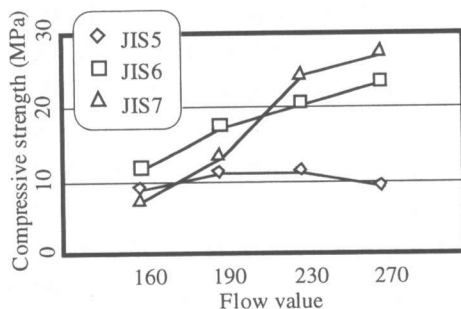


図-4 圧縮強度とフロー値の関係

だし、透水係数の方が変化が少ない。これは、フロー値が小さい場合、一般的に空隙率が大きく、透水係数も増加する傾向が生じるものの、同時に骨材の表面状態が粗く、水が流れにくくなるため、透水係数が低下する傾向も現れ、両者が相殺して透水係数が大きく変化しない結果が観察されたものと考えられる。また、フロー値の変化によって、JIS7号の空隙率がJIS6号の空隙率よりも大きくなることもあるが、透水係数は、どのフロー値による結果を比較しても、JIS5号>JIS6号>JIS7号である。これは、透水係数が空隙径の大きさに強く依存するためと考えられる。これらのことから、透水係数の目標を定めて調合設計を行う場合には、表面状態や粒径に配慮する必要がある。

図-6は、圧縮強度と空隙率の関係を示したものである。従来の結果と同じく、空隙率の増加によって圧縮強度が減少する顕著な傾向が認められる。

以上の結果から、骨材粒径によって適切な

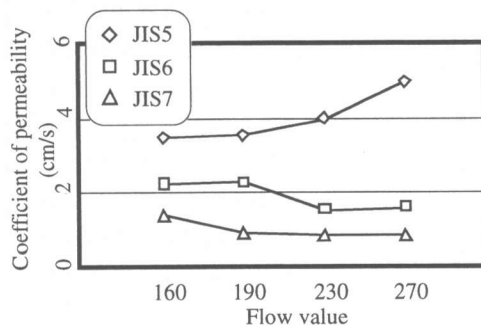


図-5 透水係数とフロー値の関係 (水頭差10cm)

フロー値は異なることがわかった。骨材粒径にかかわらず、フロー値が大きい場合には、表面状態は滑らかで良好となり、練混ぜ不良も生じにくい。しかし、フロー値が過大となると供試体の下部にペーストがたまることになる。適切なフロー値は骨材粒径によってもわずかに異なると考えられるが、今回行った実験の範囲では、JIS5号～7号碎石に対しては、フロー値230程度のペーストを用いると、表面性状が良好で、ペーストが下部に垂れないポーラスコンクリートが製作できると結論づけられる。

したがって、以降の実験では、フロー値230のペーストを用いて検討を行った。

4. 補正係数に関する実験

4.1 実験方法

一般に、ポーラスコンクリートの調合は、実積率を基に骨材の単位容積を求め、目標空隙率が得られるように、必要なペースト量を計算しており、前述の実験でも同様の手順をとった。しかし、図-3からもわかるように、目標空隙率と、実際に得られるポーラスコンクリートの空隙率は異なり、ほとんどが目標空隙率を上回った値となる。これは、図-7に示されるように、ペーストを混入して打設した場合、粗骨材の単位容積が減少するためである。普通コンクリートの調合設計では、最適な調合を行うための粗骨材単位容積を得るために、かさ容積を規定し、これを実積率に乘じることによって、調合上の骨材の単位容積を算定している。ポーラスコンクリートにおいても、目標空隙率がある範囲の誤差で得るためには、粗骨材の実積率と、調合上の粗骨材量を結びつけるパラメータを用いて調合設計を行うことが必要であると考えられる。本研究では、このパラメータを粗骨材の補正係数として設定し、ペースト・骨材比(p/g)や粗骨材粒径によってこの補正係数がどのように変化するか検討した。

本章では、目標空隙率を10, 20, 30%に設

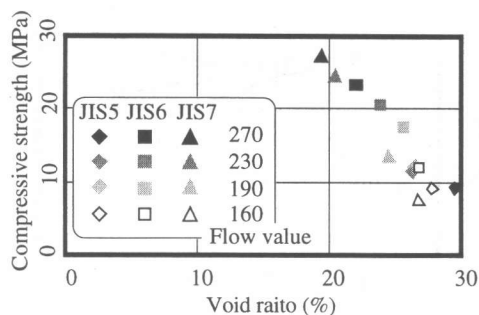
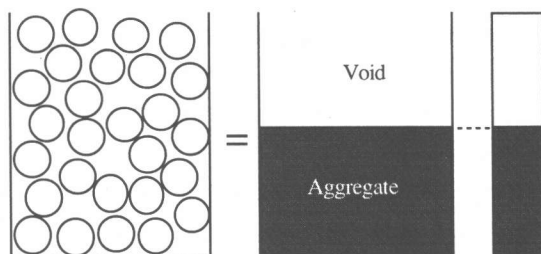


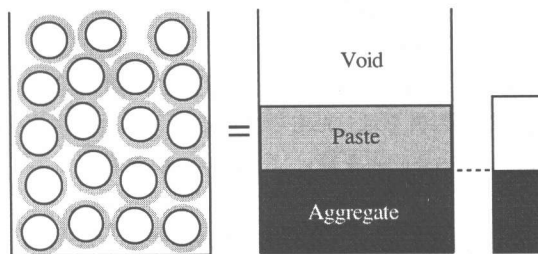
図-6 圧縮強度と空隙率の関係

定したφ10×20の円柱供試体の、目標空隙率と実際に得られた空隙率を比較し、各条件下におけるポーラスコンクリートの粗骨材の補正係数の概略値を逆算した。補正係数を計算するときの仮定として、製作した供試体中のペーストと粗骨材の比率が、調合と同一と考え、ポーラスコンクリートの実積部分の比を計算することで、粗骨材の補正係数を求めた。結果的に、補正係数の計算式は以下ようになる。



(a) 骨材のみの場合

粗骨材の容積率(実積率) = 骨材の体積 / 全体の体積



(b) 骨材＋ペースト

コンクリート中の粗骨材の単位容積
= 補正係数 × 実積率

図-7 供試体中に占める骨材量の変化

補正係数 = $(100 - A_e) / (100 - A_c)$ (1)
 ここに、 A_e ：実験による空隙率 (%)
 A_c ：調合上の空隙率 (%)

この実験の調合表を表-3に示す。

さらに、補正係数を乗じた調合設計を行い、目標空隙率と実際に得られる空隙率を比較することで各粒径における補正係数の値の妥当性を検討した。この実験の調合表を表-4に示す。

4.2 実験結果および考察

図-8は、実験によって得られた空隙率と調合上の目標空隙率の関係を骨材粒径ごとに示したものである。すべての調合で、目標空隙率よりも実際の空隙率が大きくなった。これは、前述のように、ペーストが加わることで実積率相当分の粗骨材が入らないためである。図-7にも示したように、骨材表面をペーストが覆うため、骨材間の平均距離が大きくなり、単位体積当たりの骨材容積が減少すると考えることができる。これは、骨材粒径が大きくなるに従って、目標空隙率と実際の空隙率の差が大きくなることからわかる。つまり、粒径が大きいため骨材の表面積が小さく、骨材表面を覆うペーストが厚くなるため、骨材がより充填しにくくなると考えられる。

図-9は、式(1)によって各調合における補正係数を計算した結果である。この図によれば、粒径が小さいほど補正係数が大きくなっている。一方、目標空隙率10%の結果を除けば、目標空隙率が増加するに従って、補正係数も増加していることがわかる。これは、目標空隙率が増加すると、骨材表面のペーストが相対的に少なくなるためである。目標空隙率10%で補正係数が大

表-3 ポーラスコンクリートの調合表2

	W/C (%)	Air (%)	p/g	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	G (kg/m ³)	HAE/C (%)
JIS5号	25	10	0.58	145	582	1511	1.6
		20	0.40	101	405	1511	
		30	0.23	57	229	1511	
JIS6号	25	10	0.59	147	587	1486	1.6
		20	0.41	103	411	1486	
		30	0.23	59	234	1486	
JIS7号	25	10	0.58	145	582	1499	1.6
		20	0.40	101	405	1499	
		30	0.23	57	229	1499	

[Note] W/C: Water-cement ratio, Air: Calculated volumetric air content, p/g: Volumetric paste-aggregate ratio, W: Water, C: Cement, G: Aggregate, HAE: High-range water-reducing AE agent

表-4 ポーラスコンクリートの調合表3

	W/C (%)	Air (%)	k	p/g	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	G (kg/m ³)	HAE/C (%)
JIS 5号	25	20	1.00	0.40	101	405	1511	1.6
			0.95	0.48	114	456	1435	
			0.90	0.56	126	506	1359	
		30	1.00	0.23	57	229	1511	
			0.95	0.29	70	279	1435	
			0.90	0.36	82	330	1359	
JIS 6号	25	20	1.00	0.41	103	411	1486	1.6
			0.95	0.48	115	461	1411	
			0.90	0.57	128	511	1337	
		30	1.00	0.23	59	234	1486	
			0.95	0.30	71	284	1411	
			0.90	0.37	84	334	1337	
JIS 7号	25	20	1.00	0.40	101	405	1499	1.6
			0.95	0.48	114	456	1424	
			0.90	0.56	126	506	1349	
		30	1.00	0.23	57	229	1499	
			0.95	0.29	70	279	1424	

[Note] W/C: Water-cement ratio, Air: Calculated volumetric air content, k : Correcting modulus, p/g: Volumetric paste-aggregate ratio, W: Water, C: Cement, G: Aggregate, HAE: High-range water-reducing AE agent

きくなるのは、ペースト量が多過ぎて、打設の際にペースト分が多く入り、供試体中のp/gが変化したためと考えられ、式(1)で補正係数を算出することができなかったものと考えられる。

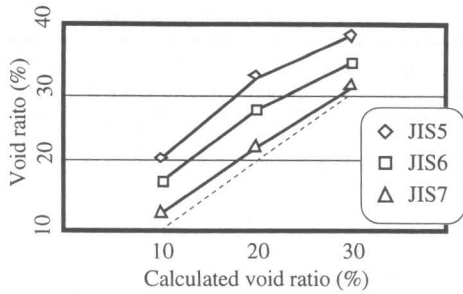


図-8 実際に得られた空隙率と目標空隙率の関係

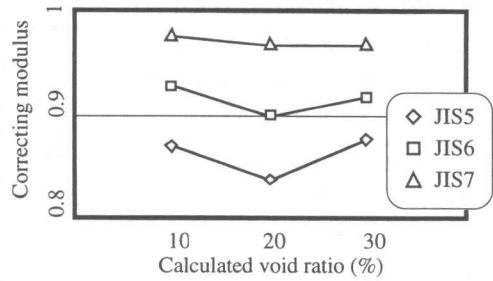
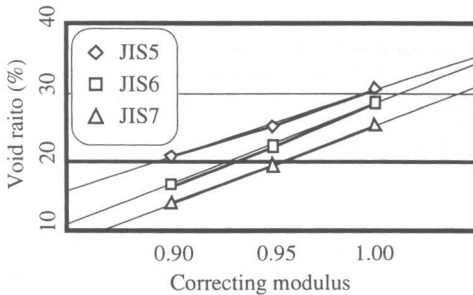
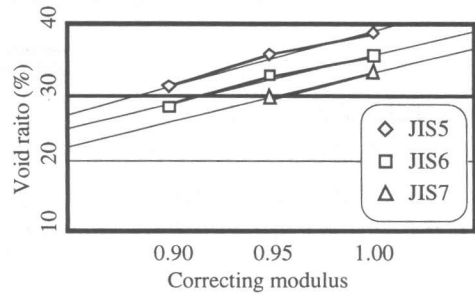


図-9 補正係数と目標空隙率の関係



(a) 目標空隙率20%



(b) 目標空隙率30%

図-10 空隙率と補正係数の関係

以上の結果から、補正係数を乗じて実際に調査設計を行った実験では、目標空隙率を20%と30%の2つに限定した。その結果を図-10に示す。最小二乗法による近似曲線も併示した。この近似曲線と目標空隙率との交点がそれぞれの補正係数である。同図によると、目標空隙率が変化しても補正係数はほとんど変化しなかった。目標空隙率20%、30%の補正係数を平均すると、JIS5号で0.89、JIS6号で0.93、JIS7号で0.96となった。これらの値は、図-9による値よりも若干大きい。調合時に補正係数を乗じる方法では、目標空隙率を一定にするとペースト量が増えるため、流動性が高まり型枠内に詰まりやすくなる。これによって空隙率が逆に減少する傾向があるため、補正係数が大きく見積もられたものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、ポーラスコンクリートの調査設計のための基礎的なデータを得ることを目的として、フロー値、目標空隙率および補正係数

がポーラスコンクリートの物性、特に空隙率に与える影響を検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 本研究の打設条件では、フロー値230程度のペーストを用いることによって、JIS5～7号碎石のいずれにおいても、表面性状が良好で下部にペーストが垂れることのないポーラスコンクリートを製作することができる。
- 2) $\phi 10 \times 20$ の円柱供試体を用いた実験結果より、目標空隙率を得るための、各粗骨材の調査上の補正係数を算出した。

参考文献

- 1) 梅干野晃：都市・建築環境におけるコンクリートと緑の融合、コンクリート工学、Vol.32, No.11, pp.9-14, 1994.11
- 2) 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
- 3) 柳橋邦生・米澤敏男・佐久間護・池尾陽作：緑化コンクリートの研究, 日本建築学科技術報告集, No.1, pp.61-66, 1995.12
- 4) 福手勤：透水性による負荷低減, コンクリート工学, Vol.36, No.3, pp.16-18, 1999.3