

論文 締固めの影響を考慮したポーラスコンクリートの空隙率に関する基礎的研究

山本 貴正*1・山田 将也*2・河野 伊知郎*3・小池 狭千朗*4

要旨: 本研究では、ポーラスコンクリートの設計空隙率と実測空隙率の関係を明らかにすることを目的として、締固めによる沈下量および単位容積当りの骨材容積（骨材率）に着目し、その関係について、実験的に検討を行った。その結果、i) 締固めを施す場合は、実測骨材率が低いほど、沈下量が大きくなる、ii) フロー値が小さいほど、実測骨材率が低下し、実測空隙率が高くなる、iii) フロー値が小さい場合は、設計空隙率が低いほど、実測骨材率が低下しやすい、iv) 設計空隙率が低いほど、実測骨材率に対する実測結合材率の比が高くなる、などの知見を得た。

キーワード: 沈下量, ランマー, 骨材容積, 結合材, フロー値, 標準供試体

1. はじめに

近年、ポーラスコンクリートの物性および適用性などに関する様々な実験的研究が行われ、透水性、吸音性などそれぞれの機能を十分に活かすための各用途に適したその空隙率および強度に関する研究成果が蓄積されている。しかし、これらの研究では調合設計で目標とした空隙率（以下、設計空隙率）と空隙率試験で得られた空隙率（以下、実測空隙率）に、顕著な差が認められており、例えば、i) 結合材のフロー値が大きいほど、実測空隙率が低くなる¹⁾、ii) 設計空隙率が低いほど、実測空隙率は、それと比較し高くなる²⁾、iii) 振動締固めの場合、締固め時間が長いほど、実測空隙率の変動係数が大きくなる³⁾、iv) 設計空隙率が低いほど、実測空隙率の変動係数が大きくなる³⁾、などの実験結果が得られている。

ポーラスコンクリートの調合設計では、一般に、単位容積当りの骨材容積（以下、骨材率）を実積率とし、次に空隙率が設計空隙率と等しくなるように、セメントペースト（以下、結合材）を割り当て、使用するそれぞれの材料の調合が定められる（図-1(a)）。一方、実施工されたポーラスコンクリートは、骨材表面を覆う結合材（以下、結合材の膜）が互いに接触している。よって、骨材率が、実積率より低くなり、実測空隙率が高くなると考えられている（図-1(b)）^{1,4)}。なお、締固めを施すと、層の沈下が生じ、かつ、結合材の膜の接触面積が大きくなるため、これにより重複する結合材の膜が流動し、隣り合う骨材間の平均距離（以下、骨材間の距離）が短くなり、実測空隙率が低くなると推察されている⁵⁻⁷⁾（図-2）。さらに、骨材と型枠の接触面で骨材配列が乱れ、その箇所の実積率が低下する壁効果⁴⁾や結合材がミキサの壁面に付着すること⁸⁾、なども実測空隙

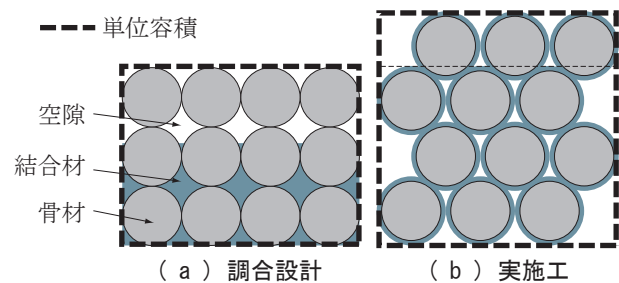
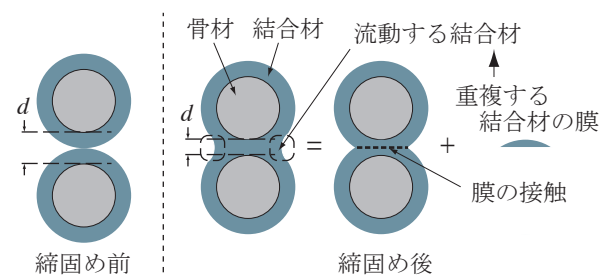


図-1 ポーラスコンクリートの構成（概念図）^{1,4)}



d : 骨材間の距離

図-2 骨材間の結合状態と締固めの関係（概念図）⁵⁻⁷⁾

率に影響すると考えられている。しかし、これらについて、空隙率に影響を与えると考えられる締固めによる沈下量および骨材率の観点から吟味した研究は筆者らが知る限りほとんどなく、未だポーラスコンクリートの設計空隙率と実測空隙率の関係については、明らかにされていない。ポーラスコンクリートの機能、また力学特性には空隙率が大きく影響するため、今後、信頼性のある実施設計を確立するためには、この設計空隙率と実測空隙率の関係を明らかにしておく必要がある。

そこで、本研究では、ポーラスコンクリートの設計空隙率と実測空隙率の関係を明らかにすることを目的とし

*1 豊田工業高等専門学校 建築学科講師 博士（工学）（正会員）

*2 名古屋市職員（元豊田工業高等専門学校専攻科生）

*3 豊田工業高等専門学校 環境都市工学科准教授 博士（工学）（正会員）

*4 愛知工業大学 工学部都市環境学科建築学専攻教授 博士（工学）（正会員）

て、締固めによる沈下量および骨材率に着目し、その関係について、実験的に検討を行った。

2. 実験概要

本実験では、壁効果を考慮するために骨材の実積率試験、ポーラスコンクリートの締固めによる沈下量を測定するための試験（以下、沈下量測定試験）、骨材率を考慮するために洗い試験、および空隙率試験を実施した。なお、供試体は、一般に使用されている直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体（以下、標準供試体）とした。

2.1 実験要因・水準

表-1 に、実験要因および水準をそれぞれ示す。同表に示すように、実験要因として、骨材の実積率試験では、突き棒などによる締固め方法、ポーラスコンクリートの沈下量測定試験、洗い試験および空隙率試験は、設計空隙率および結合材の設計フロー値を取り上げた。締固め方法は、試料 3 層詰め各層突き棒 25 回突き（以下、3 層 25 回突き棒）、試料 2 層詰め各層突き棒 15 回突き（以下、2 層 15 回突き棒）および締固めなしの 3 種類、設計空隙率は、20 および 30% の 2 種類、設計フロー値は、170、230 および 290mm の 3 種類である。

2.2 使用材料

表-2 に調合表一覧を、表-3 に使用材料一覧を示す。水は水道水、セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。骨材は JIS 6 号砕石（粒径：5-13mm）とし、微粒分を水洗いして取り除き、表乾状態としたものを用いた。混和剤は、高性能 AE 減水剤である。

2.3 供試体製造

ポーラスコンクリートの練混ぜ方法は、ペースト先練りとし、セメントおよび水を投入後 270 秒まで練り混ぜ

表-1 実験要因・水準

骨材の実積率試験	
締固め方法	3層25回突き棒, 2層15回突き棒, なし
沈下量測定試験, 洗い試験, 空隙率試験	
設計空隙率	20%, 30%
設計フロー値	170mm, 230mm, 290mm

表-2 調合表一覧

W/C	P_{cal}	B_{cal}	G_{cal}	FL	W	C	G	HAE/C
(wt.%)	(wt.%)	(vol.%)	(wt.%)	(mm)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(wt.%)
				170				-
	20	21		230	102	340		0.7
			59	290			1605	1.0
				170				-
	30	11		230	78	259		0.7
				290				1.0

[註] W/C：水セメント比， P_{cal} ：設計空隙率
 B_{cal} ：設計結合材率， G_{cal} ：設計骨材率
 FL：結合材の設計フロー値，W：水
 C：セメント，G：骨材，HAE：混和剤

た後、骨材を投入してさらに 90 秒間練り混ぜた⁵⁾。なお、ポーラスコンクリートの混練には、容量 60l の強制攪拌ミキサーを使用した。練り上がったポーラスコンクリート試料を、直径 100mm、高さ 200mm の標準供試体用鋼製型枠（以下、標準供試体用型枠）に 2 層で詰め、各層を突き棒で 15 回突き（後述 3.1 参照）、さらに型枠の内高まで詰め、表面を軽くコテで押えて平滑にした。その後、4.5kg ランマーを用いた加圧による締固めを施した。ランマーの落下高さは 100mm とし、その落下回数は 18 回である。標本数は各試験ともに 3 体である。

2.4 実験方法

骨材の実積率試験は JIS A 1104、洗い試験は JIS A 1112 に準拠して行った。ここでは、双方ともに、標準供試体用型枠を使用した。沈下量測定試験は図-3 に示すように相対する 2 台の変位計でランマー落下による試験体の沈下深さを計測した。従来の振動機による締固めでは、その締固めの程度による沈下量の計測が困難であるため、ここでは、簡単にランマーを用いて、ランマー落下毎の沈下量を計測した。空隙率は文献 9) に示されている容積法を用いて計測した。なお、本報に示す空隙率とは、全空隙率である。

3. 実験結果・考察

3.1 骨材の実積率

表-4 に骨材の実積率試験の結果一覧を示す。同表より、JIS A 1104 と同様の 3 層 30 回突き棒を施した実積率は、JIS 規定のそれと比較して 3.2% 程度高く、壁効果

表-3 使用材料

水	水道水
セメント	普通ポルトランドセメント 密度：3.16g/cm ³
骨材	JIS6号砕石(粒径：5-13mm) 表乾密度：2.72g/cm ³ ，実積率：59.0%
混和剤	高性能AE減水剤 密度：1.09g/cm ³

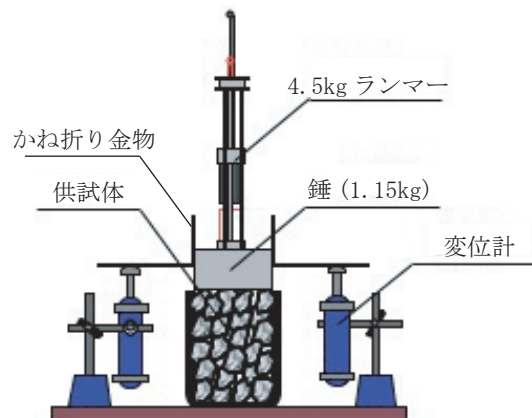


図-3 沈下量計測試験

表-4 実積率試験結果一覧

締固め方法	3層30回突き棒	2層15回突き棒	なし
実積率 (vol.%)	62.2	59.4	52.9
実積率 - JIS (vol.%)	-3.2	-0.4	6.1

[註] JIS : JIS A 1104 に準拠して求めた実積率

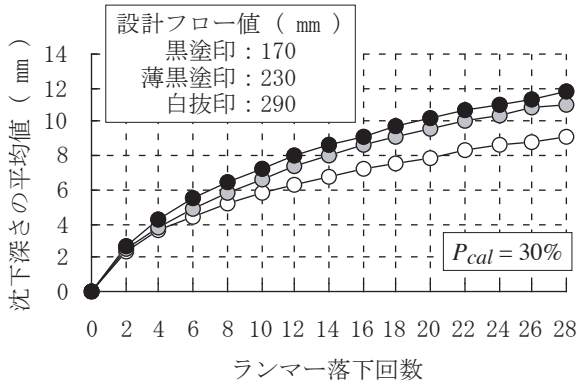
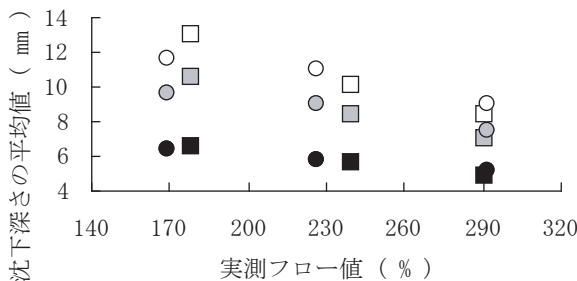


図-4 沈下深さとランマー落下回数との関係の例



設計空隙率 四角印：20% 円印：30%
ランマー落下回数 黒塗印：8 薄黒塗印：18 白抜印：28

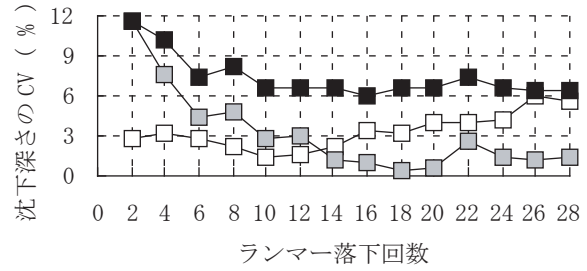
図-5 沈下深さとフロー値の関係

が認められる。なお、2層15回突き棒から得られた実積率は、JIS規定のそれと比較してほぼ等しいことがわかる。これらの結果より、本実験では、練り上がったポーラスコンクリートを、標準供試体用型枠に打設する際、壁効果を取り除くため、締固め方法を2層15回突き棒とした。

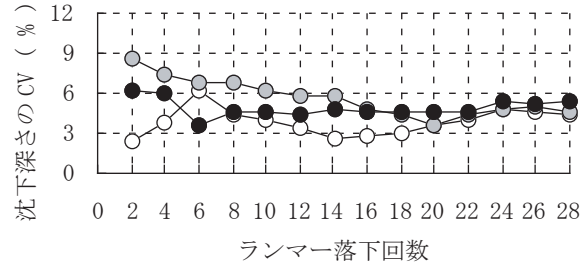
3.2 締固めによる供試体の沈下量・骨材率

図-4に設計空隙率30%のポーラスコンクリートの突固めによる沈下量とランマーの落下回数との関係を示す。図の縦軸は、ランマーによる締固めで生じる供試体の沈下深さの平均値である。図中の黒塗印、薄黒塗印および白抜印は、それぞれ設計フロー値170、230および290mmを表している。同図より、設計フロー値が小さいほど、沈下深さが大きいことがわかる。従って、締固めを施すと、フロー値が小さいほど、沈下深さが大きくなり、空隙が失われると言える。

図-5にランマー落下回数8、18および28のポーラスコンクリートの沈下深さの平均値と実測フロー値との関係をそれぞれ併せて示す。図中の四角印および円印は、設計空隙率20および30%を、黒塗印、薄黒塗印および



(a) 設計空隙率 20%



(b) 設計空隙率 30%

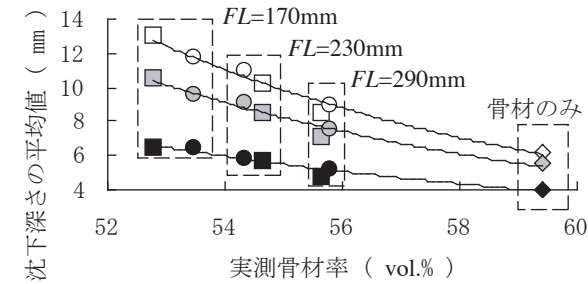
設計フロー値 (mm)
黒塗印：170 薄黒塗印：230 白抜印：290

図-6 沈下深さの変動係数とランマー落下回数との関係

白抜印は、ランマー落下回数8、18および28を、それぞれ表している。同図より、各ランマー落下回数とともに、沈下深さと実測フロー値の間に及ぼす設計空隙率の影響が小さいことがわかる。なお、実測フロー値170mm程度は、各ランマー落下回数とともに、設計空隙率が低い方が、沈下深さが大きいことが認められる。これは骨材率が影響していると考えられる(後述図-10参照)。

図-6(a)(b)に設計空隙率20および30%のポーラスコンクリートの沈下深さの変動係数CVとランマーの落下回数との関係をそれぞれ示す。図中の記号は前掲図-4と同様である。図-6(a)(b)より、標本数が少ないため、単純比較できないが、各設計空隙率とともに、沈下深さの変動係数とランマー落下回数との間に及ぼす設計フロー値の影響がほとんどないことが認められる。また沈下深さの変動係数は、ランマー落下回数が増えても著しく変わらないことがわかる。従って、ランマーによる締固めで、沈下深さが大きくなっても、実測空隙率の変動係数は、大きくならないと言える。なお、既報3)では、振動締固めの場合、締固め時間が長いほど、実測空隙率の変動係数が大きくなる結果を得ている。よって、振動締固めを施す場合は、ランマーによる締固めと異なり、締固め時間の制御などで、入力された締固めエネルギーによる影響の程度が変動しやすく、空隙率の変動係数が大きくなりやすいと考えられる。

図-7にランマー落下回数8、18および28の沈下深さの平均値と骨材量との関係を併せて示す。なお、比較のため、骨材のみの供試体を併せて示してある。図の横軸は、標準供試体用型枠の容積に占める洗ひ試験で得られ



設計空隙率 四角印：20% 円印：30% 菱印：骨材のみ
 点線 各ランマー落下回数 累乗近似
 ランマー落下回数 黒塗印：8 薄黒塗印：18 白抜印：28

図-7 沈下深さと骨材率の関係

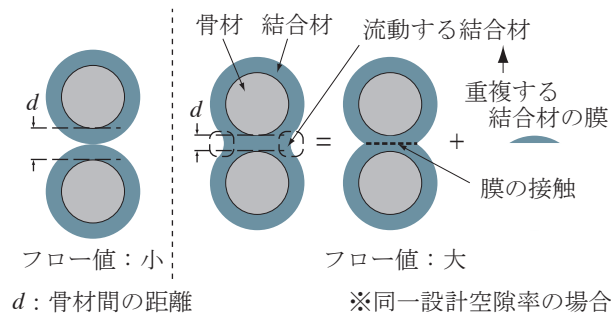


図-8 骨材間の結合状態とフロー値の関係 (概念図)

た骨材の粒子容積 (以下、実測骨材率) である。図中の記号は前掲図-5と同様であるが、菱印は骨材のみ、点線は累乗近似を表している。図-7より、各ランマー落下回数ともに、実測骨材率が低いほど、沈下深さが大きくなり、この関係に及ぼす設計空隙率の影響がほとんどないことがわかる。これにより、前掲図-5を踏まえ、フロー値が小さいほど、骨材率が低下し、締めによる沈下深さが大きくなると推察される。従って、結合材の膜の平均厚さに及ぼすフロー値の影響がないと仮定すると (後述3.5参照)、図-8に示すように、フロー値が小さいほど、結合材の膜が重複しにくく、骨材間の距離が長くなるため、骨材容積率が低下し、これにより、沈下深さが大きくなると言える。

図-9にポーラスコンクリートの実測骨材率と実測フロー値の関係を示す。なお、比較のため、骨材のみの供試体を併せて示してある。図中の四角印および円印は、それぞれ設計空隙率20および30%を、破線は、骨材のみを表している。同図より、各設計空隙率ともに、実測フロー値が小さいほど、実測骨材率が低くなることわかる。また、実測フロー値170mm程度は、骨材のみの供試体の設計空隙率を考慮すると、設計空隙率が低いほど、実測骨材率が低下するが、実測フロー値230および290mm程度は、この傾向が顕著に表れないことが認められる。これは、フロー値が小さい場合は、図-8および図-10(a)に示すように、結合材の膜が重複しにくいいため、設計空隙率が低いほど、結合材の膜の平均厚さが大きく、骨材間の距離が長くなり、実測骨材率が低下しやすいと

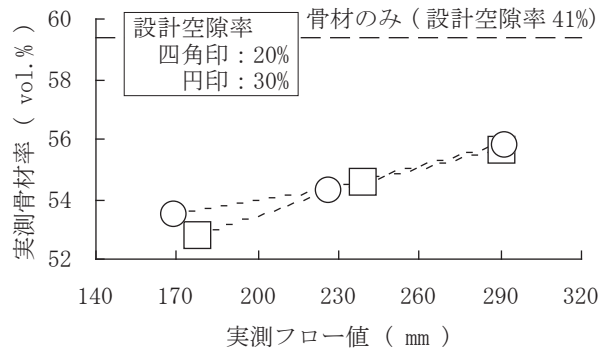


図-9 骨材率とフロー値の関係

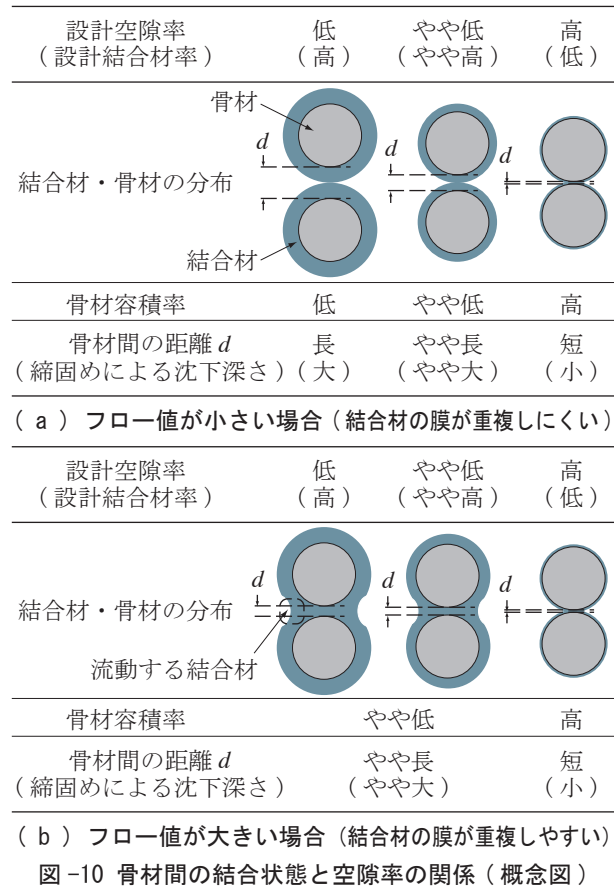


図-10 骨材間の結合状態と空隙率の関係 (概念図)

考えられる。一方、フロー値が比較的大きい場合は、図-8および図-10(b)に示すように、結合材の膜が重複しやすいため、設計空隙率が低下しても、骨材間の距離がフロー値が小さい場合のそれと比較して長ならず、実測骨材率とフロー値の関係に対し、設計空隙率の影響が表れにくくなると考えられる。

以上より、フロー値が小さい場合は、設計空隙率が低いほど、骨材率が低くなりやすく、沈下深さが大きくなる。一方、フロー値が比較的大きい場合は、結合材の膜が重複しやすいため、設計空隙率が低下しても、骨材率が顕著に低下せず、沈下深さが大きくなりにくい、と言えらる。

3.3 空隙率

図-11(a)(b)に実測空隙率と設計空隙率の比較を示す。

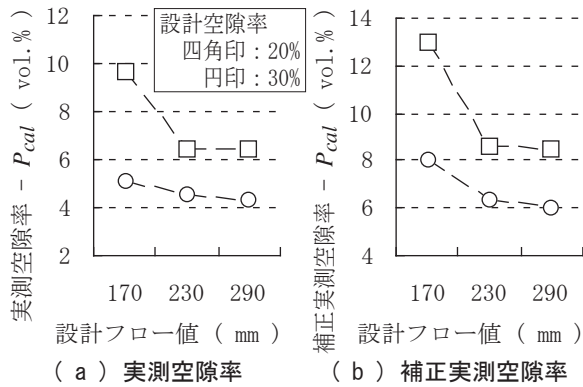


図-11 実測空隙率と設計空隙率の比較

図の縦軸は、実測空隙率と設計空隙率の差を表している。なお、同図(b)の実測空隙率は、締め固めによる沈下で失われた空隙を無視するために、供試体のかさ容積を標準供試体用型枠の容積として求めた実測空隙率(以下、補正実測空隙率)である。図の横軸は、設計フロー値である。図中の四角印および円印は、それぞれ設計空隙率20および30%を表している。同図(a)(b)より、各実測空隙率ともに、設計フロー値が小さいほど、実測空隙率と設計空隙率の差が大きくなり、設計空隙率が低いほど、この差は、大きいことが認められる。従って、前述3.2を踏まえ、設計フロー値が小さい、また設計空隙率が低いほど、骨材率が低下し、実測空隙率と設計空隙率の差が大きくなると言える。

3.4 結合材率

図-12に実測結合材率と設計結合材率の比較を示す。図の縦軸は、実測結合材率と設計結合材率の差を、横軸は、設計フロー値を表している。なお、実測結合材率 B_{exp} は下式より算出した。

$$B_{exp} = 1.0 - (P_{exp} + G_{exp}) \quad (1)$$

ここに、 P_{exp} : 補正実測空隙率、 G_{exp} : 実測骨材率

図中の記号は、図-11と同様である。図-12より、各設計フロー値ともに、設計空隙率が低いほど、実測結合材率と設計結合材率の差は、大きいことが認められる。なお、その傾向に及ぼす設計フロー値の影響は小さいことがわかる。これは、設計空隙率が低いほど、結合材がミキサまたは練り板に付着しやすくなることが原因であると考えられる(後述図-14参照)⁸⁾。

3.5 骨材率と結合材率の関係

図-13に実測骨材率に対する実測結合材率の比と設計フロー値の関係を示す。図中の記号は、図-11と同様である。図-13より、各設計フロー値ともに、設計空隙率が小さいほど、実測骨材率に対する実測結合材率の比が高いことがわかる。なお、その比に及ぼす設計フロー値の影響はほとんどないことが認められる。従って、結合材の膜の平均厚さは、設計空隙率が低いほど大きくなり、フロー値の影響をほとんど受けないと言える。

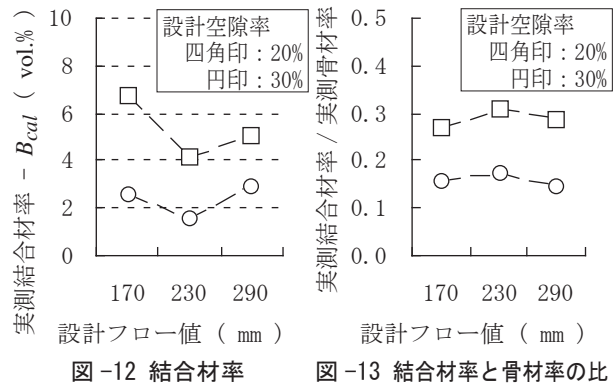


図-12 結合材率

図-13 結合材率と骨材率の比

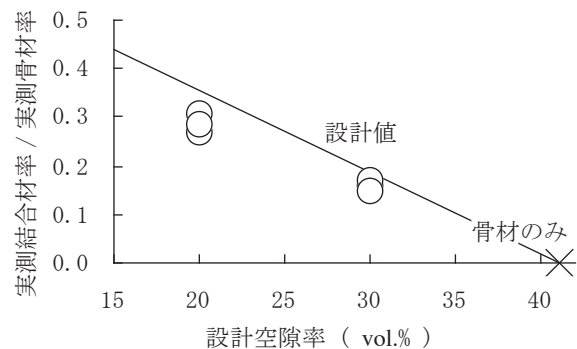


図-14 骨材率に対する結合材率と空隙率関係

図-14に実測骨材率に対する実測結合材率の比と設計空隙率の関係を示す。図の縦軸は、各設計空隙率の実測骨材率に対する実測結合材率の比の平均値である。図中の縦軸が0.0の場合の記号は、骨材のみを表している。図中の実線は、設計値である。同図より、設計空隙率が低いほど、実測骨材率に対する実測結合材率の比の平均値が、設計値より小さくなるのがわかる。従って、前述3.4を踏まえ、混練された全ての骨材が結合材に覆われていると仮定すると、設計空隙率が低いほど、試料の混練の際に使用したミキサまたは練り板の壁面および底面に結合材が付着しやすくなり、設計結合材率と実測結合材率の差が、大きくなると言える⁸⁾。なお、既報3)では、設計フロー値に関係なく、設計空隙率が低いほど、空隙率の変動係数が大きくなる実験結果を得ている。よって、設計空隙率が低いほど、結合材がミキサまたは練り板に付着しやすくなるため、空隙率の変動係数が大きくなると考えられる。

4. おわりに

本研究では、ポーラスコンクリートの締め固めによる沈下量および骨材率に着目し、その実測空隙率と設計空隙率の関係について、実験的に検討を行った。本研究の適用範囲内で得られた知見を以下に示す。

- 1) 締め固めを施す場合、実測骨材率が低いほど、沈下量が大きくなる。従って、締め固めを施すと、フロー値が小さいほど、沈下深さが大きくなり、空隙が失われ

ると言える

- 2) 締固めによる沈下量の変動係数は、ランマー落下回数が増えても、著しく変わらない。なお、既報4)では、振動締固めの場合、締固め時間が長いほど、空隙率の変動係数が大きくなる結果を得ている。よって、振動締固めを施す場合は、ランマーによる締固めと異なり、締固め時間の制御などで、入力されるエネルギーによる影響の程度が変動しやすく、空隙率の変動係数が大きくなりやすいと考えられる。
- 3) フロー値が小さいほど、実測骨材率が低下し、実測空隙率が高くなる。または、設計空隙率が低いほど、実測骨材率が低下し、実測空隙率とその差が大きくなる。なお、フロー値が大きい場合は、この傾向は小さい。従って、後述4)を踏まえ、結合材の膜の平均厚さに及ぼすフロー値の影響がないと仮定すると、フロー値が小さい場合は、結合材の膜が重複しにくいと、設計空隙率が低いほど、結合材の膜の平均厚さが大きく、骨材間の距離が長くなり、実測骨材率が低下すると言える。一方、フロー値が大きい場合は、結合材の膜が重複しやすいと、設計空隙率が低下しても、骨材間の距離が比較的長くならず、実測骨材率が低下しにくいと言える。
- 4) 設計空隙率が低いほど、実測骨材率に対する実測結合材率の比が高くなる。なお、これらの傾向に及ぼすフロー値の影響はほとんどない。従って、結合材の膜の厚さは、フロー値に関係なく、設計空隙率が低いほど大きくなると言える。
- 5) 設計空隙率が低いほど、実測骨材率に対する実測結合材率の比は、その設計値より小さくなる。従って、混練された全ての骨材が結合材に覆われていると仮定すると、設計空隙率が低いほど、試料の混練の際に使用したミキサまたは練り板の壁面および底面に結合材が付着しやすくなり、設計結合材率と実測結合材率の差が、大きくなると言える⁸⁾。

ポーラスコンクリートの空隙率に影響を与える要因として、施工方法¹⁰⁾、試験方法¹¹⁾などが挙げられる。また、標準供試験体とコア抜き供試験体の実測空隙率に、顕著な差が認められている¹²⁾。これらの影響および関係について明らかにすることが、今後の検討課題である。

謝辞

本研究では、平成20-21年度豊田工業高等専門学校建築学科山本研究室卒業生の御助力を得た。付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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
- 2) 吉森和人，岡本淳久，下山善秀，堀口剛：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，pp. 39-46, 1995. 11
- 3) 山本貴正，畑中重光，小池狭千朗，三島直生，湯浅幸久：ポーラスコンクリートの圧縮強度特性の変動変動に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No. 601, pp. 9-14, 2006. 3
- 4) 大谷俊浩，村上聖，佐藤嘉昭，三井宜之，平居孝之：ポーラスコンクリートの圧縮強度特性に及ぼす影響因子に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No. 585, pp. 31-37, 2004. 11
- 5) 湯浅幸久，畑中重光，三島直生，前川明弘，宮本高秀：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，日本建築学会構造系論文集，No. 552, pp. 37-44, 2002. 2
- 6) 畑中重光，三島直生，湯浅幸久：ポーラスコンクリートの圧縮強度-空隙率関係に及ぼす結合材強度および粗骨材粒径の影響に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No. 594, pp. 17-23, 2005. 8
- 7) 前川明弘，畑中重光，三島直生，湯浅幸久：ポーラスコンクリートの圧縮強度-空隙率関係に関する実験とそのモデル化，日本建築学会構造系論文集，No. 625, pp. 363-368, 2008. 3
- 8) 大谷俊浩，村上聖，佐藤嘉昭，三井宜之：結合材の分布状態がポーラスコンクリートの強度特性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 23, No. 1, pp. 139-144, 2001
- 9) 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
- 10) 湯浅幸久，村上和美，前川明弘，畑中重光：ポーラスコンクリートの製造方法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 21, No. 1, pp. 235-240, 1999
- 11) 中川武志，畑中重光，三島直生，湯浅幸久，前川明弘：空気室圧力法を応用したポーラスコンクリートの空隙率測定方法，日本建築学会構造系論文集，No. 629, pp. 1043-1050, 2008. 7
- 12) 越健，島崎磐，国枝稔，六郷恵哲：ポーラスコンクリートの空隙率と空隙分布の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 21, No. 1, pp. 259-264, 1999

- 1) 平岩陸，田中清人，谷川恭雄，森博嗣：ポーラ