

論文 ポーラスコンクリートの配合設計法の高度化に関する実験的検討

坪井 建斗*1・岩波 光保*2・中山 一秀*3

要旨: 都市型水害などの問題の解決策として期待されているポーラスコンクリートは、その性能に大きく影響する空隙率を作製時に管理することが困難であるという課題を抱えている。本研究では、この原因である骨材量の変化をポーラスコンクリート作製過程のモデルに基づき計算する手法に対して、ペーストの硬さと骨材径をパラメータとしてその精度の検証を行った。その結果、配合設計時の骨材量を補正する補正係数の値の精度に課題は残る一方で、壁効果やペーストの垂れを考慮すると各パラメータを変化させた際の相対的な関係は提案手法による計算結果と共通するため、本手法は今後の配合設計法の高度化の礎となりうる。

キーワード: ポーラスコンクリート, 配合設計法, 空隙率, 補正係数, 塑性粘度, 骨材径

1. はじめに

近年、都市化の進行とともにヒートアイランド現象や都市型洪水といった問題が生じており、これらの問題に対する解決策として、コンクリート分野においては透水性、保水性、緑化性等に優れたポーラスコンクリートの舗装や河川護岸への活用が期待されている。ポーラスコンクリートについては既往の研究からその性能と空隙率の間に相関関係があることがわかっている。透水性に関しては、月岡ら¹⁾により連続空隙率の増加とともに透水係数が大きくなることが示されている。また、ポーラスコンクリートを実環境に適用する際に重要な指標となる強度についても、曲げ、圧縮のどちらも空隙率の増加とともに低下することが藤木ら²⁾により報告されている。

一方、ポーラスコンクリートの作製時に空隙率を管理することは困難であるという課題が数多く報告されている^{3),4)}。これは骨材間にペーストが入ることによる骨材の単位体積量の減少が原因と考えられる。配合設計時には実積率分の骨材が入ると仮定しているが、施工時には骨材間に混入するペースト分配合設計時に比べて試験体中の骨材が減少する。その変化量については現状実験により求められていることが多いが、実験結果は条件に限られるため、求めた変化量の汎用性が低いという問題がある。ここで、この変化量が正確でない場合、設計通りの空隙率を得ることができず、ポーラスコンクリートの要求性能を満足できない可能性が生じる。このため、骨材変化量を条件に合わせて求められる方法が必要となる。

そこで筆者は以前⁵⁾、骨材変化量について様々な条件下でも統一的に求められる方法を確立することを目的として、ポーラスコンクリートの作製過程のモデル化を行うことで骨材変化量を求める手法を提案した。その概要は第2章に示す。また、それに併せて行った検証実験か

ら提案手法が実現象の特徴をとらえていることを確認した。一方で、検証実験では十分な数の測定が行われたとは言えず、また限られた条件下での検証であった。

そこで、本研究では様々なパラメータの下で作製されたポーラスコンクリートの骨材変化量の実測値と提案手法から計算された骨材変化量を比較することで、提案手法の妥当性についての評価を行った。

2. 提案手法の概要

提案手法では、3つのステップを通じて配合設計時と施工時での骨材変化量を求めている。まず1つ目のステップとして、ポーラスコンクリート中の骨材の間隔を求める。筆者は以前の研究において、図-1に示すようにポーラスコンクリートの作製過程のモデル化を行った。ここで、モデルでは骨材を球状であると仮定する。また、突固めによる締固めの場合を対象として、フレッシュコンクリートが自由落下した際のペーストの自重と骨材にかかる反発力の反力がペーストに加わることによるペーストの変形について考えている。このモデルにおいて、ペーストに作用する応力とその応力の作用下におけるペーストの挙動の関係を式で表すことで骨材間隔の理論式を提案した。式(1)にその理論式を示す。ただし、 $a_m(\text{mm})$ を平均的な骨材間隔、 $t(\text{mm})$ をペーストが骨材の周りに均等に配置された時のペーストの厚さ、 $m(\text{kg})$ を1つの骨材とその周囲のペーストの質量、 $h(\text{mm})$ を打込み時の落下高さ、 $\eta(\text{Pa}\cdot\text{s})$ をペーストの塑性粘度、 γ を骨材形状の違いによるペーストの接触面積の差異を修正する形状係数、 $A_r(\text{mm}^2)$ を球状骨材使用時のペーストの接触面積、 $\tau_y(\text{Pa})$ をペーストの降伏応力、 $j(\text{s})$ をペーストの変形時間、 $r(\text{mm})$ を骨材半径、 $a_h(\text{mm})$ を水平方向の骨材間隔とする。

*1 東京工業大学 環境・社会理工学院土木・環境工学系大学院生 (学生会員)

*2 東京工業大学 環境・社会理工学院土木・環境工学系教授 工博 (正会員)

*3 東京工業大学 環境・社会理工学院土木・環境工学系助教 工博 (正会員)

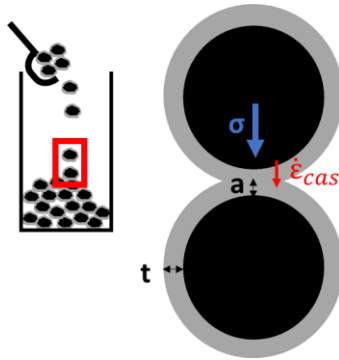


図-1 ポーラスコンクリート作製過程のモデル

$$a_m = \sqrt[3]{t \left(1 - \frac{m\sqrt{2gh}}{12\eta\gamma A_r} + \frac{4\tau_y j}{\eta} \right) + r} (a_h + r)^2 - r \quad (1)$$

次に、骨材間隔からペーストの充填状態を求める。ペーストの充填状態とは、ペーストを粗骨材を被覆する部分と空隙を部分的に充填する部分に分けた際のそれらのペーストの割合のことを指し、ポーラスコンクリート中では図-2のように定義される。ここで、粗骨材被覆部分のペーストの比率を β と定義すると、その定義から骨材間隔を用いて式(2)で表すことができる。

$$\beta = \frac{(r + a_m)^3 - r^3}{(r + t)^3 - r^3} \quad (2)$$

最後に、ペーストの充填状態を表す β を用いて、配合設計時と施工時での骨材変化量を求める。この変化量を表す指標として補正係数 α を導入する。補正係数とは配合設計時に対する施工時の骨材体積比のことで、実積率にかけることで骨材間にペーストが入ることによる単位体積当たりの骨材量の減少を補正することができる。ここで、梶尾ら⁶⁾により β を用いた補正係数の算出手法が提案されており、それによると、粗骨材被覆部分のペーストと骨材を合わせた体積が骨材の実積率分の体積と一致することを用いて式(3)の関係を導いた。ただし、 $G_g(\%)$ を骨材の実積率、 $V_v(\%)$ を目標空隙率とする。

$$\alpha = \frac{G_g}{\beta(100 - G_g - V_v) + G_g} \quad (3)$$

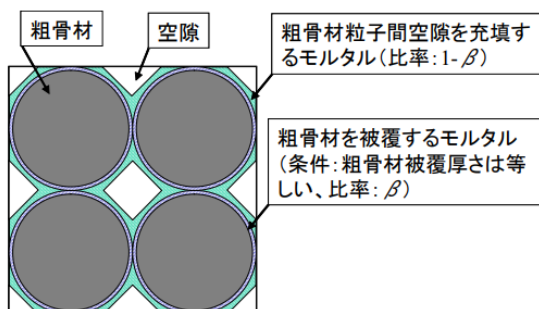


図-2 ペーストの充填状態⁶⁾

この式から算出された補正係数を実積率に乘じることによって計算される値が骨材間に入るペーストを加味した際の試験体内の骨材率であり、この値を用いて配合設計を行うことで目標空隙率を有するポーラスコンクリートを作製できる。

3. 実験概要

3.1 使用材料と試験体条件

使用材料を表-1に示す。骨材は使用する前に水で微粒分を洗い落としてから使用した。

作製する試験体は $\phi 100 \times 200$ mmの円柱試験体で、練混ぜはセメントペーストを先練りして骨材を後から混入した。締固めは突き棒を用いて行い、ペーストの変形が起らない程度の3層15回ずつとした。その後湿潤養生をした。

本実験では、以前の研究でパラメータとしたペーストの硬さ(塑性粘度)に加えて、ポーラスコンクリートの使用用途によって変えられる骨材径をパラメータとして選定した。ペーストの塑性粘度は混和剤量を変えることで変化させ、添加量はセメントとの質量比1.0, 1.5, 2.0%をベースとして、さらに以前の検証実験時⁵⁾に十分にデータが得られなかった高塑性粘度域のデータを得るために1.3%も加えて行った。一方で、骨材径については一般に河川護岸として用いられることの多い5号砕石と道路舗装として用いられることの多い6号砕石を使用した。

この実験における配合表を表-2にまとめる。本実験では目標空隙率を18%とし、各条件につき5体の試験体を作製した。

3.2 測定項目

作製した試験体に対して2種類の測定を行った。1つ目は試験体中の骨材体積の測定である。この値は、打設前に用意した全骨材の体積と打設後に残った骨材の体積をそれぞれ測定し、その差から求めた。ここで、同じ条件下での試験体中には同量の骨材が入ると仮定して、各

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント (密度: 3.16 g/cm ³)
骨材	JIS 5号砕石 (表乾密度: 2.66 g/cm ³ , 実積率: 58.6%, 粒径: 13~20 mm)
	JIS 6号砕石 (表乾密度: 2.64 g/cm ³ , 実積率: 56.7%, 粒径: 5~13 mm)
混和剤	ポリカルボン酸エーテル系 高性能 AE 減水剤

表-2 配合表

目標空隙率	骨材	SP/C (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	G (kg/m ³)	SP (kg/m ³)
18 %	JIS 5 号碎石	1.0	101	421	1558	4.21
		1.3				5.47
		1.5				6.32
		2.0				8.42
	JIS 6 号碎石	1.0	109	455	1496	4.55
		1.3				5.92
		1.5				6.83
		2.0				9.10

の全体積で割ることで骨材率，骨材の実積率で割ることで補正係数 α を求めた。本実験では，配合設計時と施工時の骨材変化量を表す指標であるこの補正係数を，提案手法による計算結果と比較することで提案手法の妥当性を評価することとした。

2 つ目は空隙率の測定である。空隙率の測定方法は，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⁷⁾により提案されている「空隙率試験方法(案)」に準じて測定を行った。ただし含水状態を考慮して，水中質量の測定までの時間を 24 時間程度，気中質量の測定までの時間を 72 時間程度とした。

最後に，ポーラスコンクリートは骨材とペースト，空隙から構成されるため，測定された骨材率 V_g と空隙率 V を用いてペーストが試験体中を占める割合であるペースト率 V_p を式(4)より計算した。

$$V_p = 100 - V_g - V \quad (4)$$

また，セメントペーストは一般にビンガム流体に分類される⁸⁾ことを利用して，各混和剤量のペーストに対して回転粘度計を用いて，セメントペーストの塑性粘度と降伏応力の測定を行った。

4. 実験結果と計算結果

まず，セメントペーストの塑性粘度と降伏応力の測定結果を表-3 にまとめる。また，試験体中のペーストの付着状況を確認すると，特に SP/C が 1.0%以外のものでペーストの垂れが多く確認できたが，これは打込み後ゆっくりと生じたものであり，本モデルの対象である落下した瞬間の力の作用にはほとんど影響しないと考えられ

表-3 レオロジー定数

SP/C (%)	塑性粘度(Pa・s)	降伏応力(Pa)
1.0	5.61	46
1.3	4.51	22
1.5	1.88	20
2.0	1.67	1.2

る。そのため，作製した試験体を理論検証に用いることは不適切ではないと考えられる。

次に提案手法の妥当性を検証するために，提案手法により計算された補正係数と実験結果から計算された補正

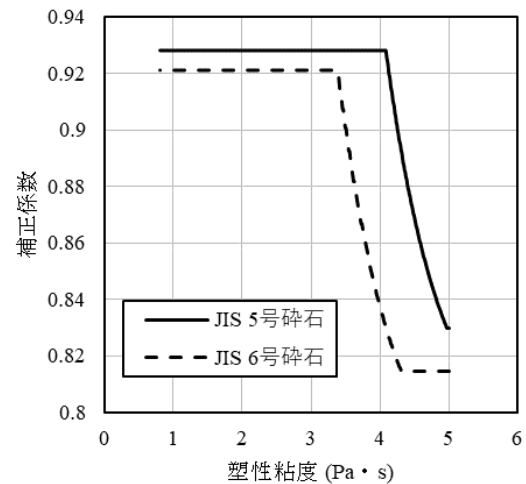


図-3 計算結果

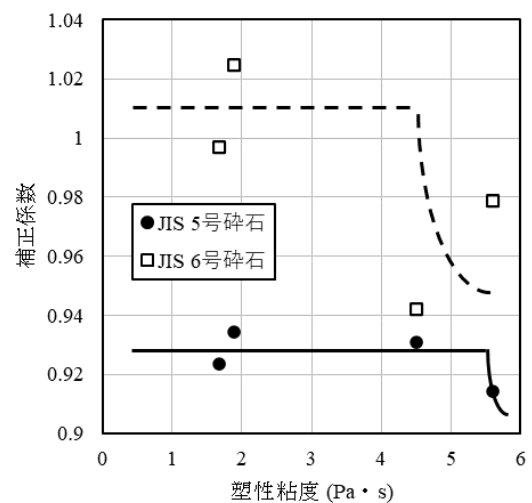


図-4 実験結果

係数を比較する。図-3 に提案手法を用いた計算結果、図-4 に実験結果を示す。ここで、計算に用いた入力値は実験に用いた材料の物性値や設定条件と同じとし、また打込み高さは試験体全体で平均すると半分の高さとなると仮定して 100 mm とする。また、図-4 中の線は実測値に近い値を通るよう推定したものである。

これらのグラフを比較することで、塑性粘度が大きくなる、つまりペーストが硬くなるにつれて補正係数の値が低下するという傾向が一致していることがわかる。一方で骨材径による違いに着目すると、計算結果では JIS 5 号砕石のほうが大きくなっているが、実験結果では JIS 6 号砕石のほうが大きくなっており反対の結果を示している。

5. 考察

5.1 ペーストの硬さの影響

ペーストが硬くなるにつれて同じ応力を受けた際に骨材間のペーストは変形しづらくなる。そのため、図-4 に示す実験結果において塑性粘度が大きくなるほど骨材間に存在するペーストが厚くなり補正係数が低下したと考えられる。

また、低塑性粘度域に着目すると補正係数は計算結果では一定の値をとっており、実験結果においても特に JIS 5 号砕石ではこの傾向が見られる。これはペーストが十分に柔らかく縦方向の骨材間隔がゼロに達して変化しなくなったためと思われる。ポーラスコンクリートの作製過程でペーストに働く応力は重力に起因する縦方向のものが支配的であるため、これが変化しなくなることで補正係数の値が一定になったと考えられる。また、図-3 と比較することで、提案手法ではこれらの現象を再現できていることも改めて確認できる。

5.2 骨材径

図-4 に示す実験結果に着目すると、骨材径が大きくなると補正係数の値は小さくなっている。平岩ら⁹⁾によって行われた既往の研究でも、骨材径を変化させた際の目標空隙率と実際の空隙率の差に関して同様の結果が得られており、この原因は骨材径が大きいほど骨材の比表面積が小さく、骨材表面を覆うペーストが厚くなり骨材体積が減少したためであると結論付けられている。しかしながら試験体全体の視点で見ると、骨材径が大きい場合は試験体内の骨材の数が少ない。そのため、骨材単体のペーストの厚さが大きくてもペーストの厚さの総和が大きくなるとは限らない。そこで、骨材表面を覆うペーストの厚さではなく単位骨材長さ当たりのペーストの厚さに着目すると、提案手法で用いたモデルにおいて骨材のみと骨材とペーストを合わせた部分の体積比を考えることで導出される式(5)より骨材の減少率を評価できる

と考えられる。

$$\frac{t}{r} = \sqrt[3]{\frac{100 - V_v}{G_g} - 1} \quad (5)$$

この式より、単位骨材長さ当たりのペーストの厚さは骨材の実積率と目標空隙率のみから決まる値であり骨材径に影響されないことがわかる。したがって、JIS 6 号砕石の補正係数が JIS 5 号砕石の値より大きかった原因はほかにあると考えられる。

この原因として 2 つ考えられる。1 つ目はペーストの厚さを含めた壁効果である。ポーラスコンクリートにおける壁効果による影響は、壁付近での骨材の減少とそれに伴う空隙率の増加である。特に本実験で作製した φ100 × 200 mm の円柱試験体に関しては、越らしにより壁効果の存在が指摘されている。ここで、骨材自体の壁効果についてはその影響は実積率に含まれているため考慮されているが、ペーストが加わると骨材を覆うことでさらにその径が大きくなるため、図-5 に示すように影響が大きくなる。ここで、前述の通り骨材径が大きくなると骨

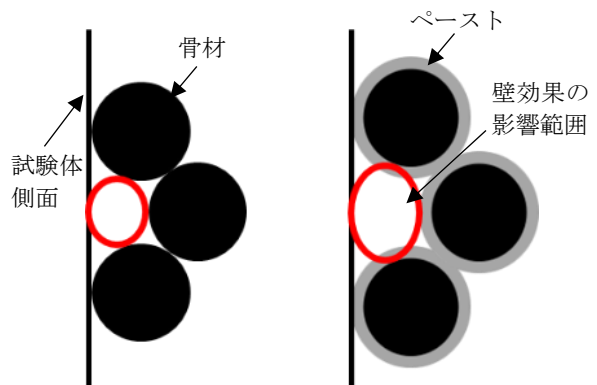


図-5 壁効果の影響範囲の大きさの違い

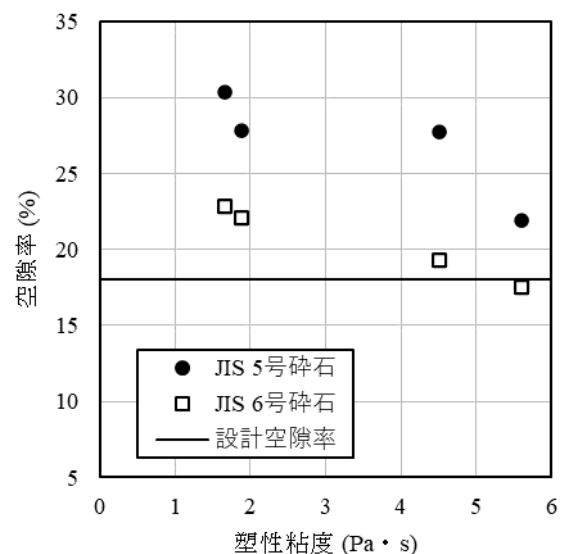


図-6 空隙率の実測値

材表面を覆うペーストは厚くなる。つまり、骨材径が大きい場合はペーストの厚さが厚い分の壁効果の影響が大きくなる。ここで、式(5)を用いて今回の条件の下での JIS 5号砕石と JIS 6号砕石のペーストの厚さを計算すると、それぞれ 0.98 mm と 0.59 mm となり、JIS 5号砕石のほうが大きくなっている。また、実際に壁効果の有無を見るために図-6 より空隙率についても確認すると、後述するペースト率の変化の影響がない高塑性粘度域で 4% 前後 JIS 5号砕石のほうが空隙率が大きく、このことから壁効果の影響がわかる。空隙率の増分のうち一部は減少した骨材に付着したペーストの減少に起因するものであるが、それ以外の 3%程度は壁効果による骨材体積の減少分であると推定される。

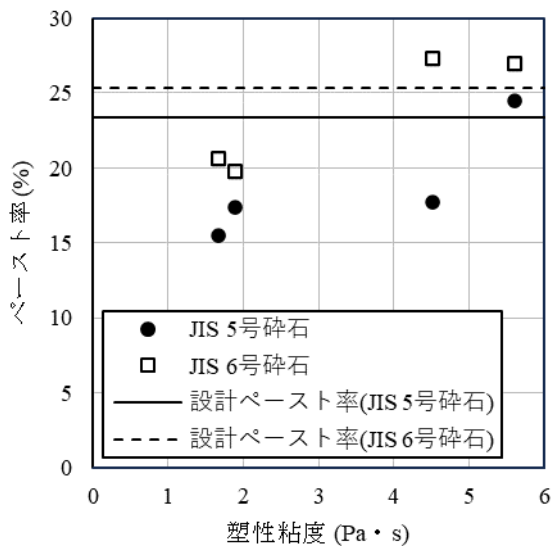


図-7 ペースト率の実測値

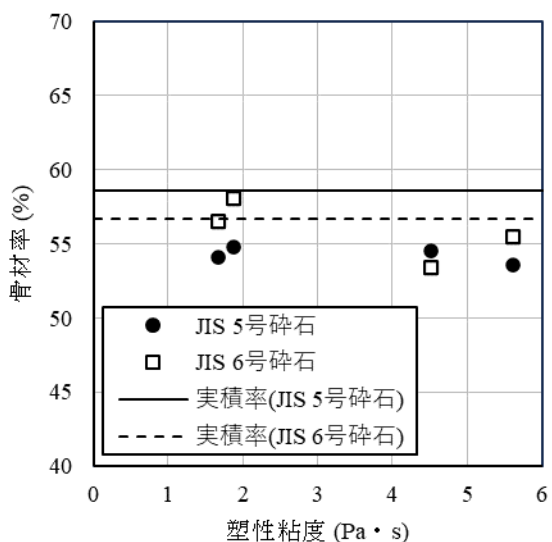


図-8 骨材率の実測値

2つ目の原因は試験体中のペースト率の変化である。低塑性粘度域ではペーストが柔らかいため、ペーストの垂れが著しい。そのため、打設中にはペーストが底に流れることで上部のペースト率が低下し、試験体中のペースト率も低下する。このことは図-7 に示す各条件の試験体のペースト率からも確認できる。このグラフより、JIS 5号砕石、JIS 6号砕石ともに低塑性粘度域ではペースト率が設計から 5%程度減少していることがわかる。

ここで、試験体内のペースト率が変化することで、他の相、つまり骨材と空隙の体積も変化する。各試験体における骨材率の実測値を図-8 に示す。このグラフより、ペースト率が減少している低塑性粘度域において、JIS 5号砕石では設計値を下回っているが、JIS 6号砕石ではほぼ設計値通りであることがわかる。このことから、JIS 5号砕石では減少したペーストの大半が空隙で置き換えられ、JIS 6号砕石ではそれが骨材で置き換えられたと考えられる。骨材径が小さいほどペーストが減少することで新たにできた空間に骨材が入りやすいことが原因と推測される。また、減少したペースト体積に相当する骨材数を比較することでも同じことが言える。減少したペーストの体積と骨材 1 個の体積の関係を考えると、減少したペーストは試験体 1 体当たり 78,540 mm²で、JIS 5号砕石 1 個の体積は 2,352 mm²、JIS 6号砕石 1 個の体積は 382 mm²である。ただし、骨材の体積は骨材がそれぞれの粒径の最大と最小の平均値の半径を持つ球と仮定して求める。これらより 1 試験体中で減少したペーストは JIS 5号砕石約 33 個分、JIS 6号砕石約 205 個分相当であることがわかる。ここで、ペーストの減少により生じた空間は試験体内で分散していることや、骨材の実積率について考慮に入れると JIS 5号砕石はほとんど骨材で置き換えられないと思われる。一方で、JIS 6号砕石の場合は減少したペースト体積に相当する骨材数が十分に多いためにペーストの減少により生じる空間の分散を考慮したうえでも多くが骨材に置換されたと考えられる。

ペースト率の変化による試験体内の骨材体積への影響の大きさを定量的に考えると、図-8 において、ペースト率が変化している低塑性粘度域での骨材率の結果と、あまり変化していない高塑性粘度域での骨材率の結果を比較した際、これらの間にはペースト率の変化の影響に加えペーストの硬さの違いによる骨材間隔の変化の影響も含まれているため、ペースト率の変化に起因する骨材率の変化のみを抽出することはできない。一方で、ペーストの減少率が 5%程度であることに着目すれば、JIS 6号砕石では最大で 5%程度多くの骨材が入っている可能性がある。

以上の議論より、ペーストの厚さを含めた壁効果と試験体内のペースト率の変化がなかった場合の実験結果は

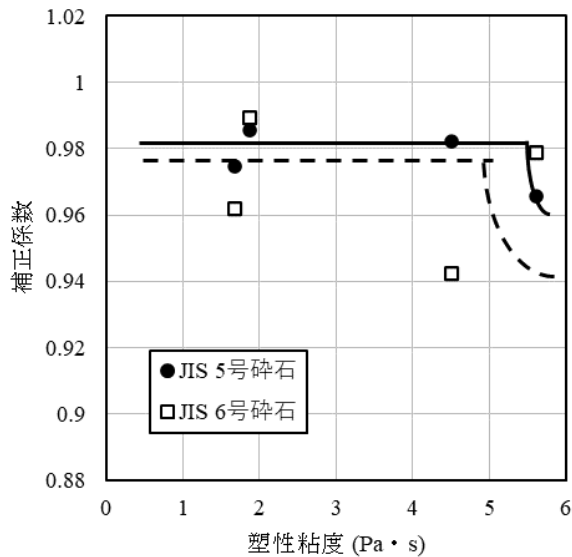


図-9 実験中の現象を考慮した修正実験値

図-9 のようになると推測される。ここで、このグラフは JIS 5 号碎石の骨材率の実験結果に壁効果で失われた推定量の 3%分を加えた値、JIS 6 号碎石の骨材率の実験結果のうち低塑性粘度域の 2 点のデータに対してペースト率の減少により余分に含まれている骨材分、ここでは仮にペーストの減少体積のおよそ半分が骨材に置き換わったと仮定して 2%分を差し引いた値からそれぞれ補正係数を計算している。この結果と図-3 の計算結果を比較すると絶対的な値に相違があるが、骨材径同士を比較した際の相対的な関係は共通する部分がある。したがって、実験と計算で異なる大小関係を示した原因はペーストの厚さを含めた壁効果と試験体中のペースト率の変化であると結論付けられる。一方で値の相違に関しては、ペースト率の減少による影響を正確に定量評価できていない点や提案手法における係数の精度などが原因と考えられ、今後追加の実験を通して明らかにして精度を向上させる必要がある。

6. まとめ

本研究では、以前筆者が提案した配合設計時と施工時の骨材変化量を計算する手法について、ペーストの硬さと骨材径をパラメータとして骨材変化量を表す係数である補正係数 α の実測値を測定して計算結果と比較することで、その手法の妥当性について検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) ペーストの硬さに対しては、低塑性粘度域では骨材間隔が最小となるため補正係数は一定の値をとった。一方で、塑性粘度が大きくなると骨材間のペーストの変形抵抗性が増加することで骨材間隔が増

加し、補正係数は小さくなった。提案手法ではこの現象を再現できていた。

- 2) 骨材径に対しては、実験においては骨材径が小さいもののほうが補正係数は大きくなった。ただし、これはペーストの厚さを含めた壁効果や試験体中のペースト率が増加した影響を含む結果であり、それらの影響を取り除くように修正すると、計算結果と同様の傾向を示した。
- 3) 計算結果と修正された後の実験結果の値を比較すると、その精度に課題があることがわかった。今後の実験を通して向上させていく必要はあるが、傾向は一致しているため本提案手法は今後の配合設計法の高度化の礎となりうる。

参考文献

- 1) 月岡存, 牧和雅: 再生骨材の緑化コンクリートへの利用に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1125-1130, 2002
- 2) 藤木諒将, エルドンオチル, 三島直生, 畑中重光: ポーラスコンクリートの曲げ強度と圧縮強度の関係に及ぼす細骨材の影響に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1719-1724, 2016
- 3) 武田浩二, 池崎智美, 出口更紗, 村上聖: 骨材の実積率を考慮したポーラスコンクリートの調査設計, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1707-1712, 2016
- 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査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
- 5) 坪井建斗, 岩波光保, 中山一秀: 空隙率に着目したポーラスコンクリートの配合設計法の高度化, 土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, 部門 V, 125, 2022
- 6) 梶尾聡, 國府勝郎, 宇治公隆: 所要の空隙量を有するポーラスコンクリートの配合設計法に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.1, pp.16-28, 2008
- 7) 玉井元治, 水口裕之, 畑中重光, 片平博, 国枝稔, 中澤隆雄, 柳橋邦夫: 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の活動, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.13-22, 2003
- 8) 松川徹, 玉井元治, 山林彰宏: ポーラスコンクリートに適用する結合材の性質に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1181-1186, 2003
- 9) 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