

論文 ブリーディングによる空隙構造の違いが物質透過性に及ぼす影響

田籠 滉貴*1, 伊代田 岳史*2

Effect of Permeability on differences of Pore Structure by Bleeding Ratio

Koki TAGOMORI*1, Takeshi IYODA*2

要旨： コンクリート中の骨材相とペースト相の間には遷移帯と呼ばれる界面領域があり，連続した空隙が形成されることで耐久性に影響を及ぼすとされている．遷移帯量や厚さは，ブリーディングや粗骨材量などに依存することから，本研究では，モルタルの材料構成比を一定とし，コンクリート中の粗骨材体積割合のみを変化させたコンクリートを作製し，空隙率と物質透過性に及ぼす影響を把握した．その結果，粗骨材量が多いコンクリートほど空隙が大きくなり，中性化深さと吸水深さが大きくなったが，塩分浸透深さに対しての相関性は確認できなかった．

キーワード： ブリーディング，骨材，空隙率，遷移帯，物質透過性

1. はじめに

二酸化炭素や塩化物イオン等の中性化や塩害を引き起こす劣化因子は，コンクリート表層から浸透し，鉄筋コンクリート構造物の鉄筋まで到達することで，鉄筋の不動態被膜が破壊する．これにより，鉄筋が膨張することでひび割れや剥離を生じることが懸念される．コンクリートの耐久性を決定するものとして，さまざまな物質がコンクリート中の空隙を経由し移動することから，空隙の大きさや連結性に依存しているといえる．コンクリート内の骨材自体はほとんど劣化因子を通さないが，骨材相とペースト相の間には図-1 に示す遷移帯と呼ばれる 50nm 以上の空隙に富んだ界面領域が存在し，連続した空隙を形成する．遷移帯はモルタルおよびコンクリートのいずれも材齢 1 日ではほとんど形成されず，1～3 日の内に形成され始め，温度 20℃材齢 7 日で最大厚さとなる．遷移帯の空隙径は，セメントの水和が進むにつれ小径側に移行するが，いったん形成された遷移帯厚さを埋めるまで密実化されないことから，劣化因子を含むさまざまな物質の移動経路となりえることから耐久性に影響を及ぼすといわれている¹⁾．

骨材の有無による物質透過性を比較した既往の研究では，水セメント比を変えたモルタルとコンクリートを作製し，中性化や塩化物イオンの浸透に差が生じることが確認されている．モルタルとコンクリートで大きく異なる点として粗骨材の有無があげられ，物質透過性に違いが生ずる要因の一つとして，骨材界面に生成される遷移帯によるものだと考えら

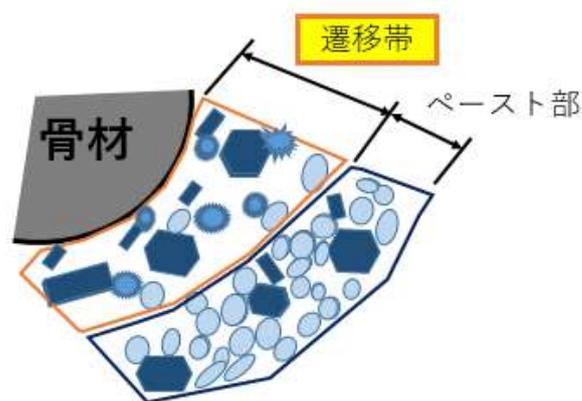


図-1 遷移帯モデル

れる²⁾．

本研究では，遷移帯の発生要因となる，フレッシュ時にコンクリートの構成材料の中で，密度の最も小さい水の一部が遊離し上昇してくるブリーディング現象や骨材体積割合に着目した．モルタル部分の材料構成比を一定とし粗骨材量のみを増減することで，空隙構造が異なるコンクリートを作製し，空隙率と気体や水，イオンなどの物質の透過性にどのような影響を与えるかを検討した．

2. 実験概要

2.1 使用材料及び配合

本研究では，粗骨材がブリーディングや物質透過性に与える影響を比較するために，同一水セメント比で空気量を含むモルタル部分の材料構成比を一定とすることで，モルタルの性能を同等とした．一般

*1 芝浦工業大学大学院理工学研究科建設工学専攻 修士課程

*2 芝浦工業大学工学部土木工学科 教授

表-1 コンクリート配合とフレッシュ性状

セメント種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					AE剤 (%)	減水剤 (%)	フレッシュ性状				
			W	OPC	BFS	S	G			スランブ (cm)	フロー値 (cm)		空気量 (%)	練上温度 (°C)
N	65	44	160	246	1370	820	1085	0.75A	0.8%	8.5	23.7	22.2	4.7	25.0
		48	170	262		870	986			16.5			5.4	25.7
		58	194	299		995	739			20.5			5.6	25.2
		70	219	337		1120	493			22.5			4.9	25.3
		100	268	412		1370							5.5	25.1
BB	65	44	160	136	111	816	1080	3.0A	0.3%	10.0	42.0	38.0	4.6	24.8
		48	170	144	118	866	981			19.0			5.0	24.2
		58	194	164	134	989	736			22.0			3.8	24.7
		70	219	185	151	1113	491			22.5			2.9	24.8
		100	268	226	185	1360				25.4			24.2	4.9

的なコンクリート配合に近い空気量 4.5%に設定した体積割合 (s/a:48%)を基本配合とし、粗骨材体積割合を 10%増加(s/a:44%), 25%減少(s/a:58%), 50%減少 (s/a:70%)のコンクリートとモルタル (s/a:100%)の 5 配合を作製した。使用したセメント種類は、普通ポルトランドセメント(N)と、混和材を用いた場合との比較をするために、高炉スラグ微粉末を 45%置換した、高炉セメント B 種(BB)の 2 種類とした。細骨材は千葉県君津産の山砂を、粗骨材は大分県津久見産の砕石で最大寸法 20mm を使用した。コンクリートの体積割合を図-2, 3 に示す。同一配合のコンクリート、モルタル供試体を同日に作製し、翌日脱型した。その後、温度 20°C 一定の恒温恒湿室内で 28 日間封緘養生を行った。

表-2 に各試験で使用した供試体の概要を示す。

2. 2 ブリーディング試験

ブリーディング試験は JIS A 1123 を参考にして各配合 n-1 で試験を行った。モルタルについてはブリーディングが大きいいため、コンクリートよりも一回り小さい容器を使用した。打込みから 60 分間は 10 分毎に、以後 30 分おきにコンクリート上面に浸み出した水を計測し、ブリーディングが終了するまで累計したブリーディング水の容積からブリーディング率を算出した。

2. 3 空隙率試験

図-4 に空隙率試験の供試体概要を示す。円柱供試体を φ100×50mm で 4 つに切断し、骨材のばらつきを加味し、さらに 2 つに割裂したものを使用することで平均をとることとした。各供試体の表乾重量、絶乾重量、水中重量を計測し、アルキメデス法で 2 本の平均より各層の空隙率を算出した。

2. 4 促進中性化試験

CO₂の浸透に対する透過性を評価するため、JIS A 1153 に準拠し各配合 n-1 で促進中性化試験を行った。養生終了後、打込み側面の一面を開放し、促進中性化試験装置(CO₂濃度: 5%, 温度: 20°C, 湿度: 60%)に静置した。割裂断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、中性化深さは JIS A 1152

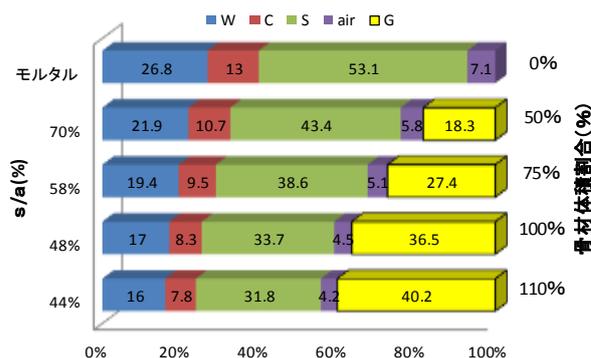


図-2 コンクリート (N) の体積割合

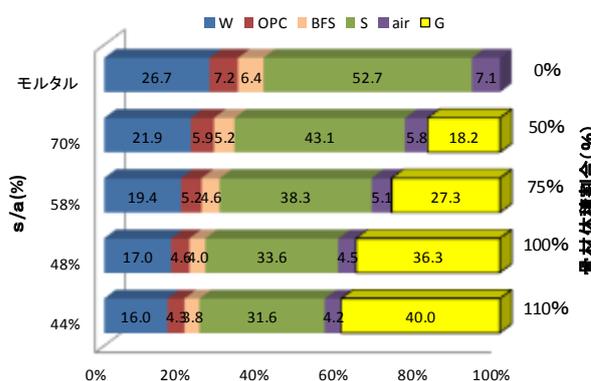


図-3 コンクリート (BB) の体積割合

表-2 供試体概要

	コンクリート	モルタル
ブリーディング試験	φ 270 × 300(mm)	φ 140 × 130(mm)
空隙率試験	φ 100 × 50(mm)	φ 100 × 50(mm)
促進中性化試験	100 × 100 × 400(mm)	40 × 40 × 160(mm)
真空吸水試験	φ 100 × 200(mm)	φ 100 × 200(mm)
塩水浸漬試験	100 × 100 × 400(mm)	100 × 100 × 40(mm)

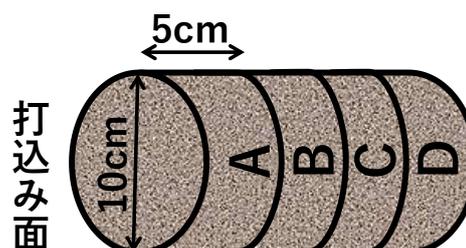


図-4 空隙率試験供試体概要

に準拠して計測した。中性化深さから \sqrt{t} 則を用いて、中性化速度係数を算出した。

2. 5 真空吸水試験

養生終了後に40℃で5日間乾燥させた円柱供試体を各配合 n-1 で使用した。供試体側面の一部を開放し、その部分以外からの吸水を防ぐために、アルミテープでシールした。供試体を横にし、供試体底面から3cmまで浸るよう水を張った容器に入れ、真空デシケーター内に静置した。真空吸引・保持した後、供試体を割裂し水の吸い上げられた深さを7点計測した平均を真空吸水深さとした。

2. 6 塩水浸漬試験

塩化物イオンの浸透に対する透過性を評価するため、JSCE-G 572-2013 に準拠し、各配合 n-1 で試験を行った。養生終了後、打込み側面の一面を開放し、その他の面をエポキシ樹脂塗料で被覆した。その後、24時間水中(温度 20±2℃)で保存し、濃度10%の塩水に浸漬させた。浸漬から1,2,4,8週で割裂し、割裂断面に硝酸銀溶液を噴霧させ、中性化深さと同様に7点計測したものを塩分浸透深さとした。

3. 試験結果及び考察

3. 1 ブリーディング試験

図-5 にブリーディング試験で得られた結果からブリーディング率を式(1)にて算出した結果を示す。

$$Br = \frac{V \times \rho_w}{W_s} \times 100 \quad (1)$$

Br : ブリーディング率(%)

V : 最終時まで累計したブリーディングによる水の容積 (cm³)

ρ_w : 試験温度における水の密度 (g/cm³)

W_s : 試料中の水の質量 (g)

モルタルは、打設後2時間程度、コンクリートでは4時間程度でブリーディングが終了することを確認した。その結果コンクリート中の骨材量の違いにより、ブリーディング率が変化した。s/a58%よりも小さい、つまり骨材量が多いコンクリートに対してブリーディング率が小さくなる傾向があるが、骨材量が少ないコンクリートは、モルタルよりもブリーディング率が大きくなった。骨材が多くなるほど、密度の小さい水が上昇するブリーディング現象によって骨材の下面に水が拘束され、表層までブリーディング水が上昇してこなかった

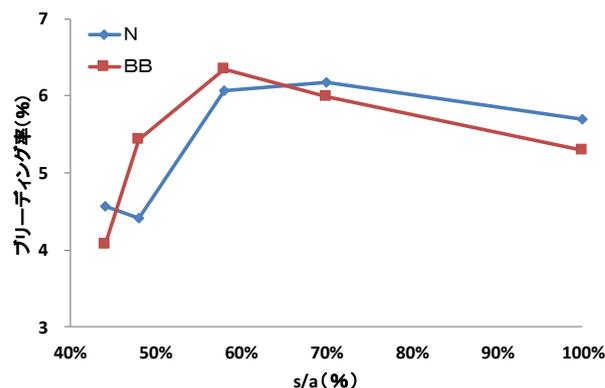


図-5 ブリーディング率

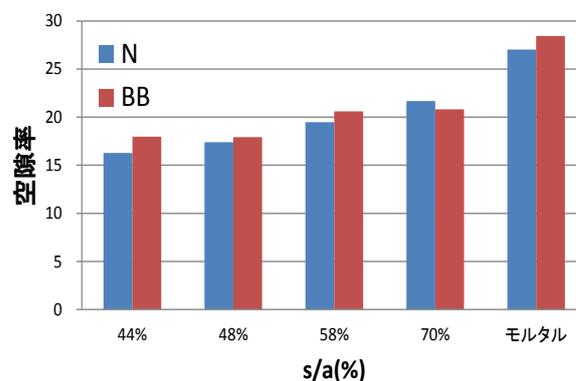


図-6 空隙率

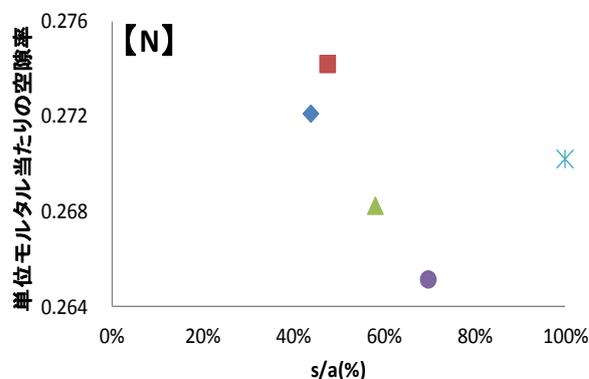


図-7 単位モルタル当たりの空隙率 (N)

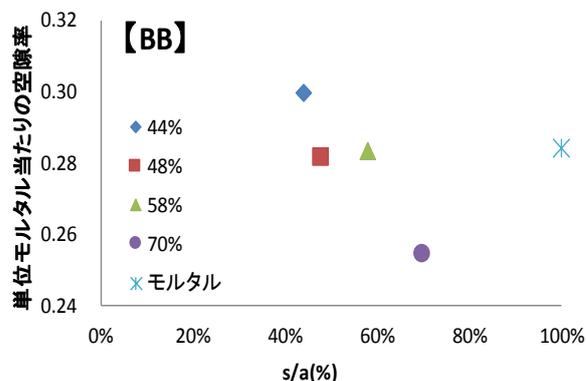


図-8 単位モルタル当たりの空隙率 (BB)

と考えられる。

3. 2 空隙率試験

図-6 にアルキメデス法により算出した、円柱供試体の B, C 層の平均空隙率の結果を示す。A 層と D 層では空隙率に大幅な差があることから、円柱供試体の真ん中に当たる B, C 層の平均を円柱供試体の平均空隙率とした。s/a が小さくなるに従い、空隙率も小さくなった。空隙は主にペースト部に存在し、s/a の違うコンクリートでは、ペースト部の体積割合も異なる。従って、ペースト部の体積割合の大きなモルタルの空隙率が一番大きくなった。

そこで、骨材自体には空隙がないと仮定し、空隙率を、骨材体積を除いた単位モルタル当たりの空隙率で整理した結果を図-7, 8 に示す。モルタルの性能が同等であり、モルタルには遷移帯がなく、モルタルの空隙率との差が骨材界面による空隙だと仮定すると、s/a が小さいほど骨材界面の空隙が多く生成されていることが分かる。セメント種の違いに注目すると、BB は N よりも水和反応が遅延するため、養生 28 日では N よりも BB の空隙が大きい傾向を示している。

3. 3 ブリーディング率と空隙の関係

図-9, 10 にブリーディング率と単位モルタル当たりの空隙率との関係を示す。ブリーディング率の小さいコンクリートほど、単位モルタル当たりの空隙率が大きくなる傾向が見られる。ブリーディングにより骨材下面に拘束されていた水が乾燥後、骨材界面における空隙の増加につながっていると考えられる。骨材下面に拘束された水が多いコンクリートほど、骨材界面に生成される空隙が大きくなることから、ブリーディングが骨材界面の空隙を決定していると考えられる。

3. 4 各層でのブリーディングと空隙の関係

図-11, 12 にモルタルのブリーディング率を基準とし各コンクリートのブリーディング率の大小差を横軸に、モルタルと各コンクリートによる単位モルタル当たりの空隙率との差を縦軸にとった N と BB のグラフの結果を示す。円柱供試体を高さ 5cm ごとに切断することで、打込み面から A, B, C, D の 4 層に分けられ、各層の空隙率を算出し、供試体上下の空隙の変化を確認した。N の s/a:58% の場合を除き N と BB とともに打込み面に近い上層の A, B 層の空隙が大きい値を示した。これはブリーディングにより水が打込み面に上昇してくることで、W/C が高くなったことと、ブリーディング水が骨材下面に拘束されやすいため空隙率が高くなったと考える。逆に下層の C, D 層では、

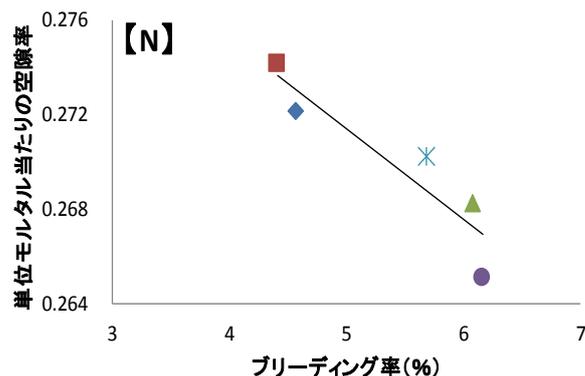


図-9 ブリーディング率と空隙率との関係 (N)

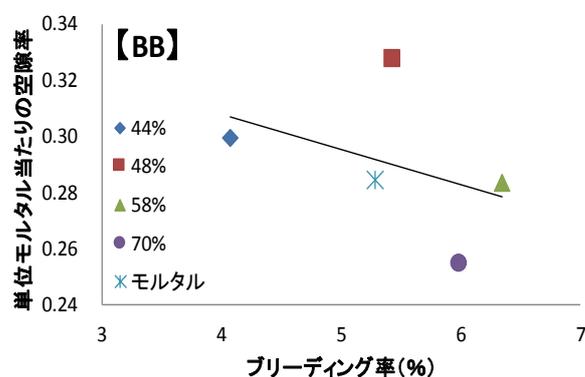


図-10 ブリーディング率と空隙率との関係 (BB)

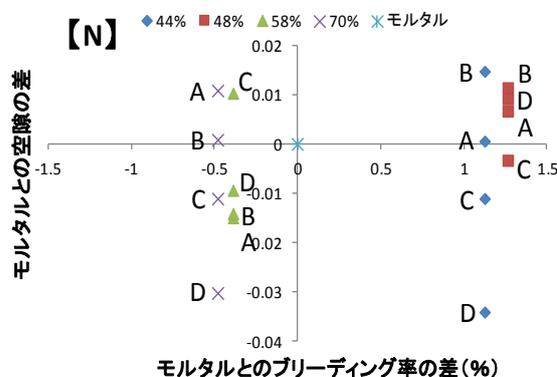


図-11 各層でのブリーディング率と空隙の関係 (N)

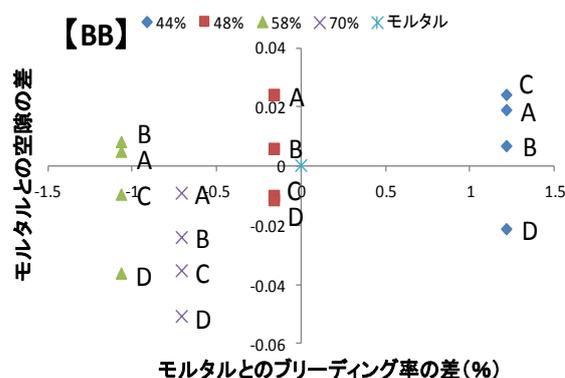


図-12 各層でのブリーディング率と空隙の関係 (BB)

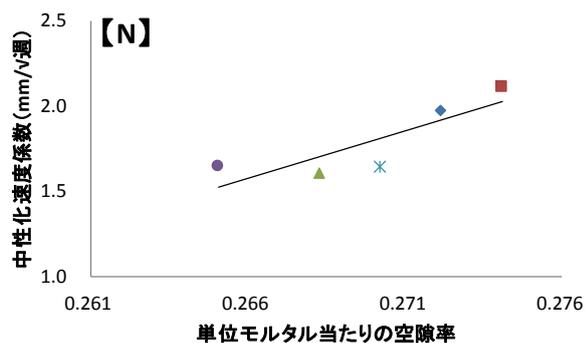


図-13 中性化速度係数と空隙の関係 (N)

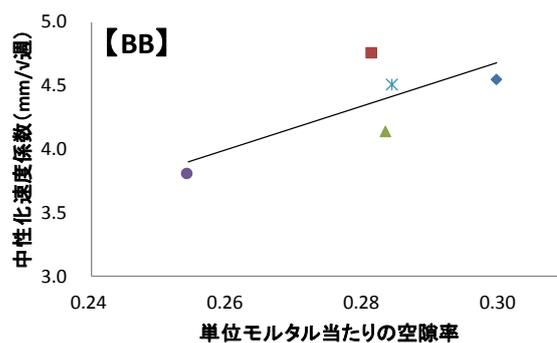


図-14 中性化速度係数と空隙の関係 (BB)

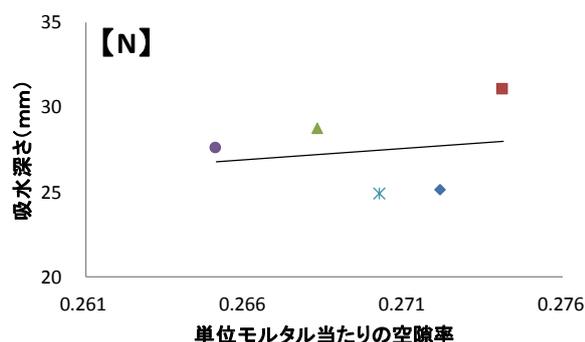


図-15 吸水深さと空隙の関係 (N)

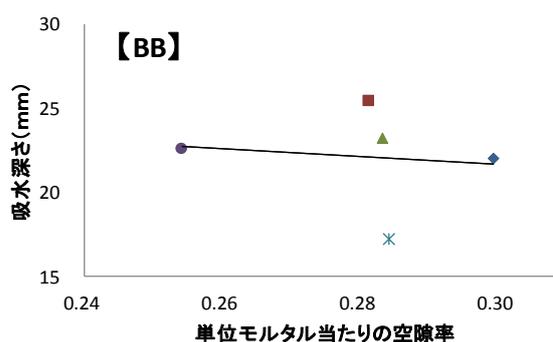


図-16 吸水深さと空隙の関係 (BB)

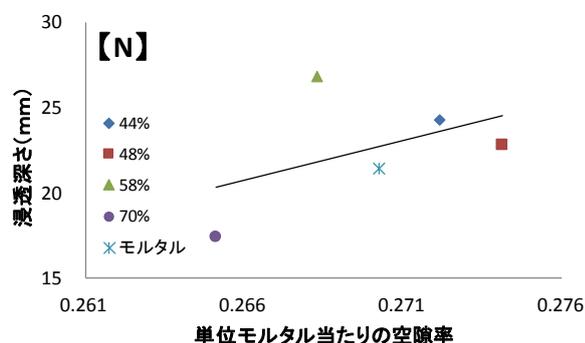


図-17 塩分浸透深さと空隙の関係 (N)

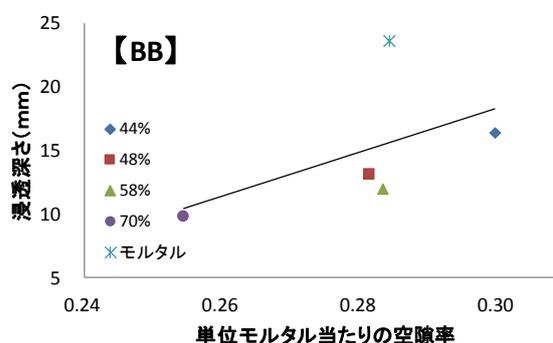


図-18 塩分浸透深さと空隙の関係 (BB)

ブリーディングにより水が上昇するため、上層に水が移動し W/C が低くなりモルタル部の空隙が緻密化し、空隙率が低くなつたと考えられる。

3. 5 空隙と物質透過性との関係

図-13, 14 に単位モルタル当たりの空隙率と促進中性化試験により算出した中性化速度係数との関係を示す。空隙率が大きいほど、中性化速度係数が高くなっている。N よりも BB の中性化速度係数が高くなっているのは、高炉スラグ微粉末をセメントに置換しているため、セメント粉体量が少なくなり、アルカリ性が低減しているためである。骨材の多いコンクリートは骨材がブリーディング水を拘束し、骨材界面の空隙を大きくすることで、CO₂ ガスが透過しやすくなると考えられる。

図-15, 16 に単位モルタル当たりの空隙率と真空吸水試験における吸水深さとの関係を示す。空隙率に関わらず、コンクリートはモルタルよりも吸水深さが大きい。

図-17, 18 に単位モルタル当たりの空隙率と塩水浸漬試験における塩分浸透深さとの関係を示す。N ではモルタルよりも空隙が小さいコンクリートが塩分浸透深さで高い値を示している。また、BB ではモルタルよりも空隙が大きいコンクリートの塩分浸透深さが、モルタルよりも低い値を示しているのが確認できることから、促進中性化試験や真空吸水試験の結果と同様の傾向を示さなかった。コンクリートへの塩化物イオンの浸透が、自由塩化物イオンの拡散のみならず塩分の固定化などの

影響を受け、浸透メカニズムが複雑であるため骨材界面による影響のみで整理することが困難であるためと考える。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 同一モルタルを用い、骨材体積割合を増減させたコンクリートを作製することにより、ブリーディング率に違いがみられた。骨材量の多いコンクリートはブリーディング率が小さくなる傾向を確認できた。
- (2) 骨材自体に空隙がないと仮定し、アルキメデス法により算出した空隙率を単位モルタル当たりの空隙率で整理した結果より、モルタルの空隙率との差が骨材界面による空隙だと仮定すると、骨材量が多いコンクリートほど骨材界面の空隙が多く生成されている。
- (3) ブリーディングと単位モルタル当たりの空隙率との関係より、試験体上面にブリーディングが上昇しない、つまり骨材下面に拘束される水が多いコンクリートほど、骨材界面に生成される空隙が大きくなることから、ブリーディングが遷移帯の空隙を決定していると考えられる。
- (4) ブリーディングの影響を高さ方向に見たときに、打込み面に近い層ほどブリーディングの影響を受け空隙が大きくなりやすく、逆に下面に近い層は、上層へ水が抜けることによりW/Cが小さくなり緻密化することで空隙が小さくなる。

- (5) 炭酸ガスや水は骨材界面の空隙の大きいコンクリートほど透過性が高いことから、ブリーディングにより増加した遷移帯の影響を受けやすいが、塩化物イオンに対しては、浸透メカニズムの複雑やより遷移帯の影響であると判断できない。

参考文献

- 1) 内川浩:セメントペーストと骨材の界面の構造・組織がコンクリートの品質に及ぼす影響, コンクリート工学, Vol.33 , p.5-17, 1995
- 2) 本名英理香ほか:骨材の有無が物質透過性に与える影響, 土木学会, Vol.70 , p. 521, 2015
- 3) 内川浩, 羽原俊裕, 沢木大介:硬化モルタル及びコンクリート中の遷移帯厚さの評価並びに遷移帯厚さと強度との関係の検討, コンクリート工学論文集, 第4巻第2号, 1993
- 4) 加藤佳孝, 魚本健人:数値解析による骨材表面に存在する遷移帯特性の評価に関する研究, 土木学会論文集, Vol.2000, No.641, P77-86
- 5) 古澤靖彦:コンクリート中の物質移動評価に関する研究の現状, コンクリート工学, Vol.37, No.4, p3-11, 1999