

論文 粗骨材の容積比がコンクリートの中性化や透気係数に及ぼす影響に関する実験的研究

矢川凌雅^{*1}・中田善久^{*2}・大塚秀三^{*3}・唐沢智之^{*4}

要旨：中性化に影響を及ぼす因子として、セメントや骨材の種類、水セメント比および環境条件等が既存の中性化予測式に反映されているが、調査条件としての因子は、水セメント比のみであり、粗骨材量については考慮されていない。本研究は、粗骨材の容積比がコンクリートの中性化や透気係数に及ぼす影響を明らかにするために行った実験的研究である。その結果、粗骨材の容積比が大きくなる程、ブリーディング率と圧縮強度は小さくなり、中性化深さと透気係数は大きくなる傾向を示した。また、余剰ペースト量により中性化を評価すると、余剰ペーストが、骨材の界面に生成される遷移帯の空隙を充填していることが示唆された。

キーワード：粗骨材量、中性化、透気係数、ブリーディング、余剰ペースト量

1. はじめに

コンクリートの中性化は、コンクリート構造物における代表的な劣化現象の一つであり、二酸化炭素がコンクリート表面から内部へ拡散し、コンクリート中の水酸化カルシウムと反応して発生する。コンクリートの中性化深さの予測方法は、様々なものが提案されているが、代表的なものとして日本建築学会「鉄筋コンクリート造建造物の耐久設計施工指針(案)・同解説」¹⁾の中性化速度式がある。その中性化速度式において中性化深さは、中性化速度係数と材齢の平方根の積で表されている。さらに、式中の中性化速度係数は、セメントや骨材の種類、水セメント比および環境条件の係数の積で求められ、これらの係数は既往の研究において求められた実験値から成り立っている。中性化速度係数を決定付ける係数の中で調査条件としての因子は、水セメント比のみであり、粗骨材量については考慮されていない。

一方、上記の条件以外の因子が中性化速度に及ぼす影響を検討した事例として、田籠らによる研究²⁾があり、ブリーディング量が増加すると、骨材層とペースト層の間にある遷移帯と呼ばれる界面領域に大きな空隙が発生し、二酸化炭素が透過しやすくなることで中性化速度係数が大きくなることを報告している。遷移帯は、粗骨材

量に依存するため粗骨材量が多い程コンクリート内の空隙が増加し、中性化速度係数が大きくなると報告している。また、中田ら³⁾による研究では、余剰ペースト量(空気を含むセメントペーストの容積から最密充填された骨材中の空隙量を差し引いた容積)がブリーディング等に影響があることが報告されており、中性化速度係数においても余剰ペーストの影響があると考えられる。さらに、中性化速度は、コンクリートの緻密度を評価する透気係数とも関係があることが報告されており、非破壊試験により中性化の進行を評価する方法も検討されている⁴⁾。

本研究は、粗骨材量(粗骨材の容積比)の違いによる余剰ペースト量の違いがコンクリートの中性化深さや透気係数に及ぼす影響と傾向を明らかにするために、水セメント比を55%に一定として粗骨材の容積比を変えたコンクリートの性質について検討したものである。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの調合

コンクリートの調合を表-1に、使用材料を表-2に、コンクリート中における材料容積を図-1に示す。本研究では、粗骨材の容積比の変化が中性化速度および透気係数に及ぼす影響を明らかにするために、粗骨材の容積

表-1 コンクリートの調合

W/C (%)	粗骨材の種類	セメントの種類	粗骨材の容積比	s/a (%)	目標SF (cm)	目標空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				絶対容積 (L/m ³)				化学混和剤の使用率 (C×%)	フレッシュ性状	
							W	C	S	G	W	C	S	G		SF (cm)	空気量 (%)
55.0	石灰石	N	0.24	61.5	-	4.5 ± 1.5	210	382	1011	648	210	121	384	240	1.8	58.5	4.5
			0.36	47.0	45 ± 5		175	318	833	972	175	101	319	360	2.3	42.1	5.3
			0.41	41.6	-		160	291	763	1107	160	92	292	410	1.8	45.1	5.7

*1 日本大学 理工学部建築学科 学生 (学生会員)

*2 日本大学 理工学部建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

*3 ものつくり大学 建設学科 教授 博士(工学) (正会員)

*4 鉄建建設株式会社 博士(工学) (正会員)

比のみを 0.24, 0.36, 0.41 と変化させて、水セメント比は 55%に一定とした。セメントペーストの容積(V_C+V_W)と細骨材の容積(V_S)を含めたモルタルの構成割合($V_W : V_C : V_S$)は、全ての調査とも 1.7 : 1 : 3.2 で同一とした。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は陸砂、粗骨材は石灰岩砕石を使用した。粗骨材は、練混ぜバッチごとの誤差を極力小さくするためにふるい分けを行い、JIS A 5005 の砕石 2005 における粒度範囲の中心値となるように粒度調整した砕石を使用した。

2.2 試験項目と方法

試験項目および試験方法を表-3 に示す。試験項目は、簡易ブリーディング試験、圧縮強度試験、促進中性化試験、透気試験とした。簡易ブリーディング試験は、日本コンクリート工学会で提案されている内径 150mm×内高 300mm の容器を用いた試験方法により実施した⁵⁾。供試体作製後、60 分までは 10 分間隔で、その後はブリーディングが認められなくなるまで 30 分間隔でコンクリート上面に浸み出した水をスポイトで吸い取り、累計したブリーディングによる水の容積から、ブリーディング量およびブリーディング率を算出した。供試体数は 2 体とし、2 体のブリーディング量およびブリーディング率の平均値を試験値とした。

透気係数および中性化深さの測定方法を図-2 に示す。本実験に使用した調査の単位水量は、日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 鉄筋コンクリート工事」⁶⁾に規定されている上限値を超える値に設定していることから、ブリーディングが多く発生し供試体内で透気係数や中性化深さに差が生じることも予想されたため、100×100×400mm の縦型供試体を用い、測定材齢毎に供試体を 1 本として全測定材齢分の供試体を採取した。供試体は、型枠脱型後、材齢 4 週まで封かん養生を行い、その

後材齢 8 週まで温度 20℃、相対湿度 60%の環境で 4 週間乾燥養生した。その後、供試体の打込み面、底面および打込み方向に直交する 2 側面にエポキシ樹脂を用いてシールを行い、温度 20℃、相対湿度 60%、二酸化炭素濃度 5%の環境下で促進中性化試験を行った。透気係数および中性化深さの測定は、各測定材齢にて打ち込み面を上部とし、上、中、下の 3 箇所を実施した。透気係数の測定は、ダブルチャンバー法⁴⁾によりシール面以外の 2 面を測定面とし、その平均値を試験値とした。中性化深さの測定は、透気試験測定位置の中心で供試体を割裂し、割裂面に 1%フェノールフタレインエタノール溶液を噴霧して供試体表面から赤色部分までの距離を 10 点測定し、その平均値を試験値とした。透気係数および中性化深さの測定は、促進材齢 1 週および 4 週に実施した。その他、コンクリートの練上がり直後にスランプフロー、空気量の試験を行った。試験結果を表-1 に併せて示す。

本研究では、余剰ペースト量での考察を行うため、C. T. Kennedy が示した余剰ペーストの定義(空気を含むセメントペーストの容積から最密充填された骨材中の空隙量を差し引いた容積)⁷⁾の式(1)から求めた余剰セメントペースト(Surplus cement paste)量を算出した。余剰ペースト量を算出するための混合実積率は、細骨材率を 0%、20%、40%、47.5%、50%、55%、65%、80%および 100%として混合した試料を用いて実積率の試験を行い、細骨材率と混合実積率の関係を求め、実験結果の多項式近似結果より、本研究で用いた調査の混合実積率を算出した。また、粗骨材の有無による影響を検討するため、各調査

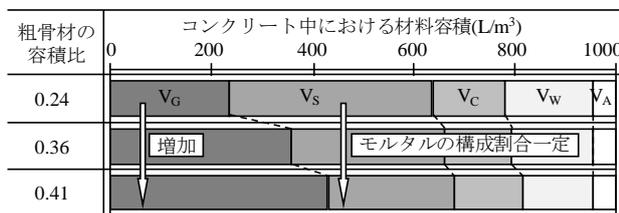


図-1 コンクリートの調合

表-2 コンクリートの使用材料

種類	記号	概要
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント (比表面積:3.290cm ² /g, 密度:3.16g/cm ³)
細骨材	S	栃木県栃木市尻内町産陸砂 (表乾密度:2.61g/cm ³ , 吸水率:2.30%, 粗粒率:2.75, 実積率:68.6%)
粗骨材	G	大分県津久見市産石灰岩砕石 (表乾密度: 2.70g/cm ³ , 吸水率:0.68%, 実積率:63.8%, 最大寸法:20mm)
化学混和剤	SP	高性能AE減水剤 (ポリカルボン酸系化合物)

表-3 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
簡易ブリーディング試験	コンクリートのブリーディング簡易試験方法 (試案) ⁵⁾
圧縮強度試験	JIS A 1108 : 2006 (材齢7日, 28日, 91日)
促進中性化試験	JIS A 1153 : 2012に一部準拠
透気試験	ダブルチャンバー法 ⁴⁾
中性化深さの測定	JIS A 1152 : 2011
実積率試験	JIS A 1104 : 2006

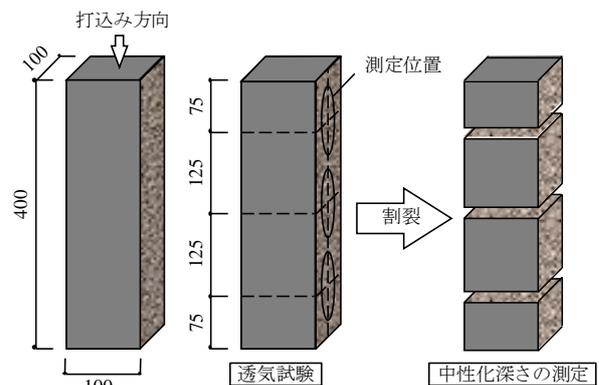


図-2 透気試験および中性化深さの測定

の練上がり直後のコンクリートを 5mm のふるいでふるい、ウェットスクリーニングモルタル(以下 W.S モルタルと表記する)を採取した。

$$\begin{aligned}
 P_{exc} &= (C + W + A) - B_v \times \left(1 - \frac{G}{100}\right) \\
 &= (1000 - G_a) - \frac{G_a}{G} \times 100 \times \left(1 - \frac{G}{100}\right) \\
 &= 1000 - \frac{G_a}{G} \times 100 \quad (1)
 \end{aligned}$$

ここで、 P_{exc} :コンクリート 1m³中の余剰セメントペースト量(L/m³), $C \cdot W \cdot A$:セメント・水・空気容積(L/m³), B_v :混合骨材(細骨材+粗骨材)のかさ容積(L/m³), G : JIS A 1104 に準拠する試験により求めた混合骨材(細骨材+粗骨材)の実積率(%), G_a :混合骨材(細骨材+粗骨材)の絶対容積(L/m³)

3. 実験結果と考察

3.1 ブリーディング率

粗骨材の容積比とブリーディング率の関係を図-3 に示す。なお、W.S モルタルについては、ウェットスクリーニングする前のコンクリートの粗骨材の容積比を示している(以下同様)。本研究では、調合により単位水量が異なるため、ブリーディング率の比較を行った。ブリー

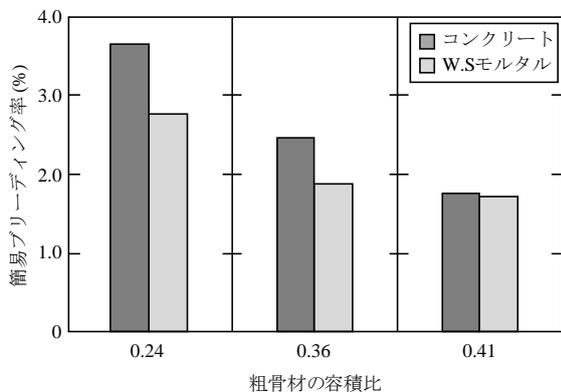


図-3 粗骨材の容積比とブリーディング率の関係

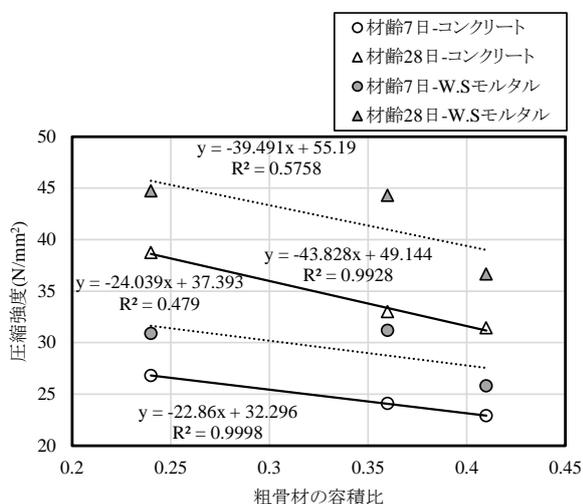


図-4 粗骨材の容積比と圧縮強度の関係

ディング率は、コンクリート、W.S モルタルとも粗骨材の容積比の大きい(粗骨材量の多い)調合程、小さい傾向を示した。本研究では、モルタルの構成割合を全ての調合とも同一としているので、理論上 W.S モルタルは全て同一のものとなるが、実際には粗骨材の表面に付着するモルタル分があるため、同一のモルタルとはならない。後述する余剰ペースト量が多い調合程、W.S モルタル中の水量が増えると考えられるので、ブリーディング率に差が生じているものと推察される。また、コンクリートと W.S モルタルのブリーディング率を比較すると、何れの調合とも W.S モルタルの方がブリーディング率が小さくなった。コンクリートのブリーディング率を見てみると、粗骨材の容積比が小さくなり、よりモルタルに近い調合になる程ブリーディング率は大きくなっているため、ある閾値を超えるとブリーディング率も小さくなると推察される。

3.2 圧縮強度

粗骨材の容積比と圧縮強度の関係を図-4 に示す。コンクリートの圧縮強度は、粗骨材の容積比の大きい(粗骨材量の多い)調合程、小さくなる傾向を示し、両者に高い相関が認められる。これは、粗骨材の容積比が大きくなる程、粗骨材の表面積が増え、遷移帯領域が増えるため、コンクリート強度が小さくなるものと考えられる。W.S モルタルの圧縮強度は、コンクリートと同様に粗骨材の容積比の大きい(粗骨材量の多い)調合程、小さくなる傾向が認められるものの、両者の相関は低い。

3.3 中性化深さ

促進材齢 28 日の測定結果を用いた測定位置の違いによる中性化深さの比較を図-5 に示す。本研究では、ブリーディングが多く発生し供試体内で中性化深さに差が生じることも予想されたため縦型供試体を用い、上、中、下の3箇所での中性化深さを測定したが、各供試体で測定位置の違いによる中性化深さの差は 1.0~1.6mm 程度であり、また、高さ方向で中性化深さに明確な傾向が認められなかった。そこで、以降の中性化深さの検討は、上、

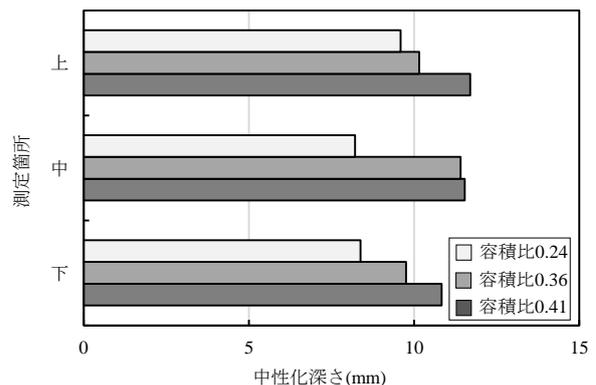


図-5 測定位置の違いによる中性化深さの比較

中, 下の3箇所の測定結果の平均値により考察を行った。

粗骨材の容積比と中性化深さの関係を図-6に, W.Sモルタルとコンクリートの中性化深さの比較を図-7に示す。中性化深さは, コンクリート, W.Sモルタルとも粗骨材の容積比の大きい(粗骨材量の多い)調合程, 大きくなる傾向を示した。また, コンクリートの中性化深さは, 平均するとW.Sモルタルの中性化深さよりも1.79mm小さかった。これは, 圧縮強度と同様に, 粗骨材の容積比が大きくなる程, 粗骨材の表面積が増え, 遷移帯領域が増えるため, 中性化深さが大きくなるものと考えられる。骨材量が多いコンクリート程, 骨材界面の空隙が多くなるため中性化深さが大きくなる傾向があるとする田籠ら²⁾による報告とも一致する。

ブリーディング率と中性化深さの関係を図-8に示す。中性化深さは, コンクリート, W.Sモルタルともブリーディング率が大きい程, 小さくなる傾向を示した。特に, 材齢28日のコンクリートについては, この傾向が顕著である。ここで, 図-3よりブリーディング率が小さい調合は, 粗骨材の容積比が大きくなっており, 図-6より粗骨材の容積比が大きい調合は, 中性化深さは大きく

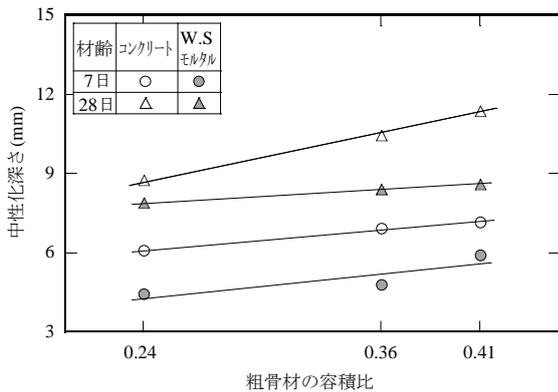


図-6 粗骨材の容積比と中性化深さの関係

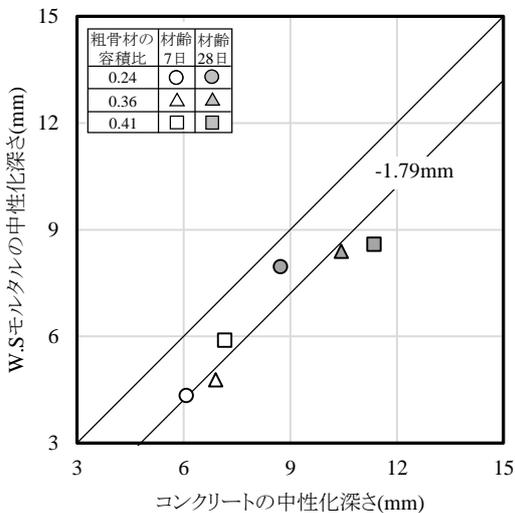


図-7 W.Sモルタルとコンクリートの中性化深さの比較

なっている。以上の結果から, 粗骨材の容積比が大きい調合ほど, ブリーディング率は小さくなるが, 中性化深さは大きくなる傾向を示すため, ブリーディング率の増減による影響よりも, 粗骨材量が増加したことによる遷移帯領域の増加による影響が大きいと考えられる。また, ブリーディングにより, 粗骨材界面の遷移帯の厚さおよび空隙率が変化することで, 中性化深さに影響を及ぼす可能性も一因として考えられる。

3.4 透気係数

粗骨材の容積比と透気係数の関係を図-9に示す。透気係数は, 一部例外もあるが, 全体的に見てみると, コンクリート, W.Sモルタルとも粗骨材の容積比の大きい(粗骨材量の多い)調合程, 大きくなる傾向を示した。これ

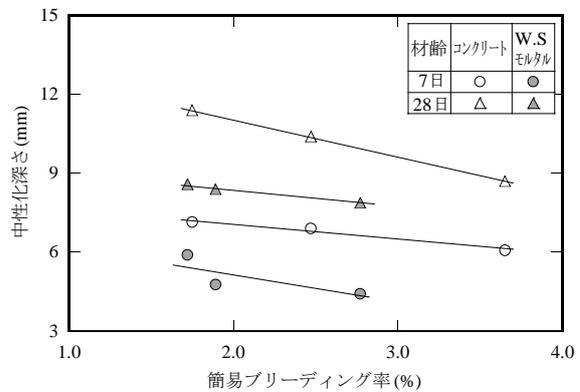


図-8 ブリーディング率と中性化深さの関係

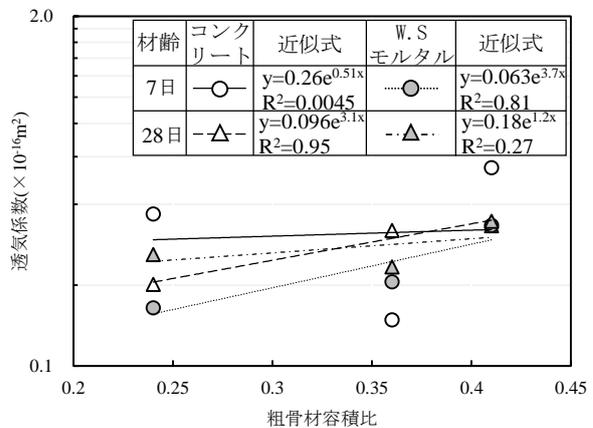


図-9 粗骨材の容積比と透気係数の関係

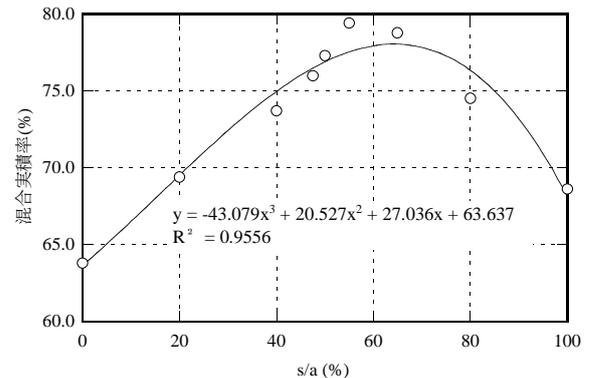


図-10 細骨材率 (s/a) と混合実積率の関係

は、粗骨材の容積比と中性化深さの関係と同様に、粗骨材の表面積が増え、遷移帯領域が増えるため、骨材界面に生成される空隙が大きくなり、透気係数が大きくなっていると考えられる。

3.5 余剰ペースト量

混合実積率は、設定した細骨材率になるように混合した試料を用いた実積率試験の結果より、細骨材率と混合実積率の3次近似式を求め、得られた近似式に本研究で用いた調合の細骨材率を代入し、混合実積率を算出した。設定細骨材率と混合実積率の関係を図-10に示す。細骨材率0%は粗骨材のみの実積率を示しており、細骨材率100%は細骨材のみの実積率を示している。粗骨材を標準粒度の中心値を用いた場合、細骨材率55%の時、最も混合実積率が大きくなっており、細骨材率55%以下では細骨材率が大きくなるにつれて混合実積率も大きくなるが、細骨材率55%以上では細骨材率が大きくなるにつれて逆に小さくなった。実験結果より求めた混合実積率を式(1)に代入して余剰セメントペースト量を算出した。

細骨材率と余剰ペースト量の関係を図-11に示す。細骨材率80%の時、最も余剰ペースト量が大きくなっており、本研究で用いた調合の範囲内では、細骨材率が大きくなるにつれて、言い換えれば粗骨材の容積比が小さくなると余剰ペースト量は大きくなった。一方、細骨材率が36.5%以下になると、余剰ペースト量が負の値となっており、粗骨材間の空隙にセメントペーストが満たされなくなることが伺える。

余剰ペースト量と中性化深さの関係を図-12に示す。余剰ペースト量が大きい調合程、中性化深さは小さくなる傾向を示した。中性化の進行は、セメントペースト中あるいは骨材の界面を炭酸ガスが拡散することで発生するため、余剰ペースト量が大きくなると中性化深さが大きくなると考えられるが、実験結果では余剰ペースト量が大きい程中性化深さは小さくなる傾向を示した。一方、前述の通り、粗骨材の容積比が大きくなると粗骨材の表面積が増え、遷移帯領域が増えるため、骨材界面に生成される空隙が大きくなり、中性化深さは大きくなっているため、余剰ペーストが、骨材の界面に生成される遷移帯の空隙を充填していると推察される。

余剰ペースト量と透気係数の関係を図-13に示す。材齢28日の結果を見てみると、余剰ペースト量が大きい調合ほど、透気係数は小さくなる傾向を示した。また、材齢7日において、余剰ペースト量が12.1(×10⁴cm³/m³)の点については、測定誤差により小さな値となっているが、その他の2点に関しては、材齢28日と同様の傾向を示した。以上より、余剰ペースト量と透気係数の関係は、余剰ペースト量と中性化深さの関係と同様の傾向であるといえる。

4. まとめ

本研究は、モルタルの構成割合を変化させずに、粗骨材の容積比を変化させた時にコンクリートの中性化や透気係数にどのような影響を及ぼすか明らかにするために行ったものである。本研究より得られた知見を以下に記す。

- (1) プリーディング率は、粗骨材の容積比の大きい調合程、小さくなる。
- (2) 圧縮強度は、粗骨材の容積比の大きい調合程、小さくなる。
- (3) 中性化深さは、粗骨材の容積比の大きい調合程、大きくなる。

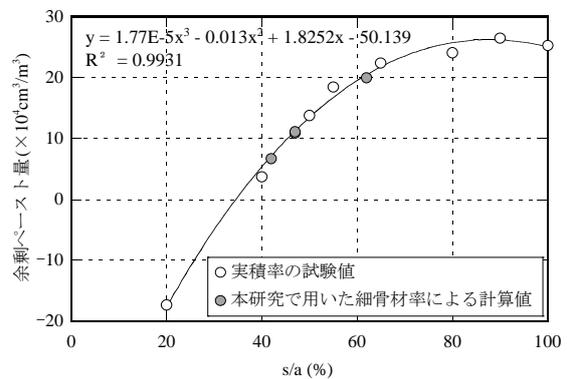


図-11 細骨材率(s/a)と余剰ペースト量の関係

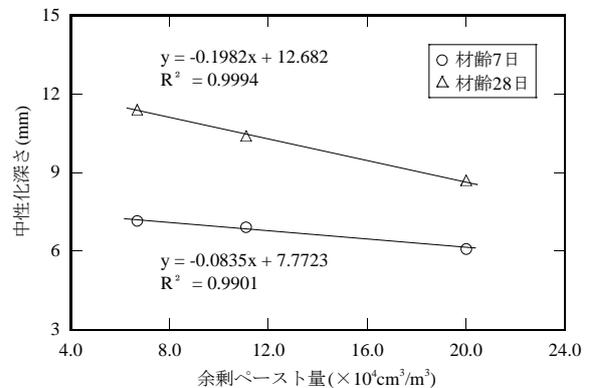


図-12 余剰ペースト量と中性化深さの関係

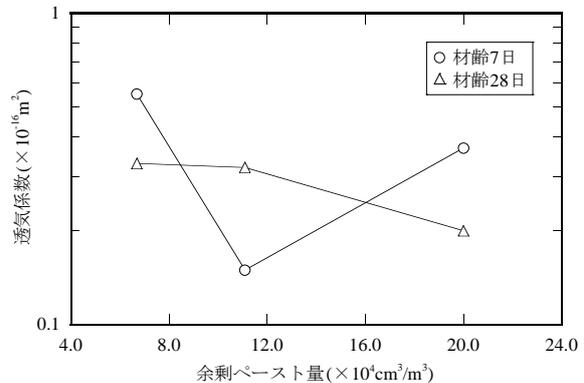


図-13 余剰ペースト量と透気係数の関係

- (4)透気係数は、粗骨材の容積比の大きい調合程、大きくなる。
- (5)粗骨材の容積比が大きくなる程、粗骨材の表面積が増え、遷移帯領域が増えるため、圧縮強度、中性化深さ、透気係数に影響を及ぼすと考えられる。
- (6)本研究で用いた調合の範囲内では、粗骨材の容積比が小さくなると余剰ペースト量は大きくなる。
- (7)余剰ペースト量が大きい調合程、中性化深さは小さくなる。
- (8)余剰ペーストが、骨材の界面に生成される遷移帯の空隙を充填していることが示唆された。

謝辞

本研究の実施にあたり、太平洋セメントおよび和田砂利商会のご協力を頂きました。ここに記して関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建造物の耐久設計施工指針(案)・同解説, 2004.3
- 2) 田籠滉貴, 伊代田岳史:ブリーディングによる骨材界面空隙の生成が物質透過性に与える影響, コンクリート建造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第16巻, pp189-194, 2016
- 3) 中田善久, 齊藤丈士, 梶田秀幸, 大塚秀三, 春山信人:同一水セメント比における細骨材率の変化が高強度コンクリートの性質に及ぼす影響の一考察, 日本建築学会構造系論文集, 第748号, pp751-761, 2018.6
- 4) 今本啓一, 山崎順二, 下澤和幸, 永山勝, 二村誠二:かぶりコンクリートの透気性に基づくRC建造物の耐久性能検証に向けた基礎的研究—各種試験方法における透気性の指標値と中性化深さの関係—, 日本建築学会構造系論文集, 第638号, pp.593-599, 2009.4
- 5) 日本コンクリート工学会:構造物の耐久性向上のためのブリーディング制御に関する研究委員会 報告書, 2017.6
- 6) 日本建築学会:建築工事標準仕様書・同解説 鉄筋コンクリート工事, 2018
- 7) Kennedy,C.T. : The Design of Concrete Mixtures, Proceeding of ACI, 36, pp.373-400, 1940