論文 水分逸散に基づく各種混和材を用いたコンクリートの空隙構造連続 性評価に関する基礎的検討

佐々木 謙二*1

要旨:本研究では,長期材齢のおける拡散係数の低下や塩化物イオンの浸透停滞現象にも関連していると考 えられる空隙構造連続性に及ぼす材料,配合の影響を定量的に評価することを目的として,50℃乾燥環境下 において水分逸散させたモルタル試験体の水分残存量より空隙構造連続性を評価することを試みた。その結 果,フライアッシュ混合系においては材齢の影響を大きく受け,空隙構造連続性は材齢の経過とともに明確 に小さくなること,高炉スラグ微粉末混合系においては置換率の影響が明確であり,置換率が大きいほど空 隙構造連続性が小さくなること,等が確認された。

キーワード:空隙構造,連続性,高炉スラグ微粉末,フライアッシュ

1. はじめに

高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を用 いたコンクリートにおいては、長期材齢において拡散係 数が大きく低下することや塩化物イオンの浸透がある深 さ以上には進まず停滞する現象が、室内試験、実構造物 調査いずれにおいても確認された事例が数多く報告され るようになってきた^{1)~3)}。停滞のメカニズムについては 未解明であるが、空隙構造の連続性に依存していると考 えられる。空隙構造は水銀圧入法やガス吸着法等による 細孔径分布、空隙量・屈曲度・収斂度等の空隙構造パラ メータによって評価されることが一般的であるが、本研 究においては、表面開放状態で深部に貫通連続している 空隙の深さ方向の存在程度、すなわち空隙構造連続性に 着目した。

そのような状況下において、「コンクリート中の水分 が外部環境に逸散するにも、水分、二酸化炭素、塩化物 イオンなどが外部環境からコンクリート内部に浸透する にも、コンクリート表面と内部の着目位置とが「貫通連 続空隙」によりつながっている必要があり、実際には表 面から深くなればなるほど表面と連続した貫通連続空隙 の存在確率は低くなり、表面から浸透可能な物質量は小 さくなる」という仮説を立てた。この仮説に基づけば、 長期材齢のおける拡散係数の低下や塩化物イオンの浸透 停滞現象について合理的に説明可能であると考えらえる。

本研究では,空隙構造連続性に及ぼす材料,配合の影響を定量的に評価することを目的として,実験的検討を 行った。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

(1) 使用材料

表-1に使用材料の概要を示す。実験に用いた結合材 は,普通ポルトランドセメント[N],高炉スラグ微粉末 4000 (JIS A 6206) [BFS],フライアッシュ (JIS A 6201 II 種) [FA]である。細骨材は海砂,粗骨材は砕石を用いた。 混和剤として,一部の配合において高性能減水剤,増粘 剤を用いた。

(2) 配合

表-2 に、試験体の配合の概要を示す。実験にはモル タルを用い、各配合の水結合材比は、30、50、70%とし た。混和材置換率(質量比)は、高炉スラグ微粉末におい ては30、50、70%、フライアッシュにおいては10、20、 30%とした。また、高炉スラグ微粉末とフライアッシュ を併用した三成分系についても検討を行った。細骨材容

項目	種類	品質		
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.15g/cm ³ ,比表面積 3240cm ² /g		
混和材	高炉スラグ微粉末	密度 2.91g/cm ³ ,比表面積 4010cm ² /g		
	フライアッシュ	密度 2.26g/cm ³ , 比表面積 3960cm ² /g		
細骨材	海砂	密度 2.56g/cm ³ ,吸水率 1.87%,粗粒率 2.47		
混和剤	高性能減水剤	カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物		
	増粘剤	水溶性セルロースエーテル		

表—1 使用材料

*1 長崎大学大学院 工学研究科システム科学部門准教授 博士(工学) (正会員)

表-2 配合

配合名	混和材種類	配合(%)					
		置換率	水結合材比	細骨材容積率	SP 添加率	増粘剤添加率	
mN30		0	30	50	0.5	0.0	
mN50			50		0.0	0.0	
mN70			70		0.0	0.2	
mNB3050	BFS	50	30		0.5	0.0	
mNB5030		30	50		0.0	0.0	
mNB5050		50			0.0	0.0	
mNB5070		70			0.0	0.0	
mNB7050		50	70		0.0	0.2	
mNF3020	FA	20	30		0.5	0.0	
mNF5010		10	50		0.0	0.0	
mNF5020		20			0.0	0.0	
mNF5030		30			0.0	0.0	
mNF7020		20	70		0.0	0.2	
mNBF504510	BFS/FA	45/10	50		0.0	0.0	
mNBF504020		40/20			0.0	0.0	

積率は50%とした。水結合材比30%の試験体においては、 高性能減水剤を、水結合材比70%の試験体においては増 粘剤を用いた。

(3) 養生方法

養生方法は,20℃, R.H.60%の養生室内において封緘 養生とした。養生期間は,7,28,91日とした。

2.2 水分逸散試験

直径 10cm,高さ 20cm の円柱試験体を作製し,養生終 了の4日前に,図-1に示したように 0.5cm,5cm,10cm, 15cm 厚さに水冷式コンクリートカッターで切断した。な お,試験体の均質性が乏しいと考えられる上下端部を廃 棄するとともに,試験体の開放面を切断面に統一するた めに,図-1に示す位置において切断した。

5cm, 10cm, 15cm 厚さの試験体には,底面と側面にエ ポキシ樹脂を2層塗布し,3日間硬化させた。エポキシ 樹脂を塗布した試験体を1日間浸水させた後,**写真-1** に示したように50℃環境下で乾燥させた。経時的に質量 を測定し,水分逸散量を算出した。なお,本研究におい て50℃乾燥としているのは,既往の研究⁴⁾において,50℃ 乾燥条件下で逸散する水分は毛細管空隙水であり,50℃ 乾燥条件下における毛細管空隙からの水分逸散により空 隙構造連続性を評価することを考えたためである。

0.5cm 厚さの試験体は、切断後は封緘状態で3日間保



図-1 水分逸散試験体の切出し概要



写真-1 水分逸散試験

管し,養生終了の前日より1日間浸水させた後,全面開 放の状態で,50℃環境下で乾燥させた。乾燥前の試験体



体積、乾燥前後の質量差より空隙率を算出した。

50℃乾燥を継続した 15cm 厚さ試験体の質量変化が一 定になったところで,エポキシ樹脂をはがし,表面から 約 0.5cm 幅ごとに切断して薄片試料を採取した。なお, 本研究においては,緩慢な水分逸散は継続的に生じてい るものの,全ての試験体において乾燥期間 91 日において 質量変化が一定になったものとみなして検討を行った。 この薄片試料をさらに恒量となるまで 50℃乾燥し,その 質量変化,すなわち水分残存量により空隙構造連続性を 以下の式で算出した。

連続性指標(%)=
$$\left(1 - \frac{ x 分残存 \pm (ml)}{ 空隙 \pm (ml)}\right) \times 100$$

3. 実験結果および考察

3.1 水分逸散

(1) 試験体高さの影響

図-2 に、水分逸散量に及ぼす試験体高さの影響を示 す。なお、水分逸散量は単位暴露面面積当たりの水分逸 散量として示している。N50 においては、試験体高さが 大きくなるとともに水分逸散量は増加し、乾燥期間の初 期から 5cm や 10cm 以深からも水分移動が生じ,水分逸 散しているものと考えられる。NB5050,NF5020 におい ては,試験体高さが大きくなるとともに水分逸散量は増 加しているものの,その差はN50 に比べると小さく,特 に乾燥期間初期においてはその差は小さく,5cm や 10cm 以深からの水分移動による水分逸散量は相対的に少ない ものと推察される。

(2) 材齢の影響

図-3に、水分逸散量に及ぼす材齢の影響を示す。N50 においては、材齢7日と28日の試験体とで水分逸散挙動 に大きな違いは見られなかったが、材齢91日の試験体に おいては材齢7日,28日の試験体に比べて、水分逸散量 が小さくなることが確認された。NB5050においては、 材齢7日の試験体と比較して、材齢28日,91日の試験 体は水分逸散量が小さくなったが、ほぼ同程度の挙動を 示した。これは、本研究においては養生方法を封緘養生 としており、養生期間中に外部からの水分供給がなかっ たことから、試験体内部の自己乾燥により高炉スラグ微 粉末の潜在水硬性による反応が十分に進行しなかったた めと考えらえる。NF5020においては、材齢の経過とと



図-5 水分逸散量に及ぼす水結合材比の影響

もに水分逸散量が小さくなることが明確である。これは, フライアッシュのポゾラン反応が順調に進行した影響に よるものと考えられる。

(3) 結合材種類の影響

図-4 に、水分逸散量に及ぼす結合材種類の影響を示 す。高炉スラグ微粉末混合系においては、置換率が大き いほど水分逸散量が小さくなり、置換率 50%と 70%にお いてはほぼ同程度の水分逸散挙動となった。フライアッ シュ混合系においては、置換率の影響が明確であり、置 換率が大きいほど水分逸散量が小さくなった。三成分系 においては、NBF504510、NBF504020 ともに同程度の水 分逸散挙動となった。いずれの場合においては高炉スラ グ微粉末やフライアッシュを単独で同程度の置換率で用 いた場合よりも、水分逸散量は小さくなっており、高炉 スラグ微粉末とフライアッシュを併用することにより更 なる水分逸散量の減少効果があることが確認された。

(4) 水結合材比の影響

図-5 に、水分逸散量に及ぼす水結合材比の影響を示 す。いずれの結合材種類においても、水結合材比による 水分逸散量の相違は明確であり、水結合材比が小さいほ ど水分逸散量が小さいことが分かる。

3.2 空隙構造連続性

(1) 材齢の影響

図-6に、空隙構造連続性に及ぼす材齢の影響を示す。 なお,1 面開放の状態で 50℃環境下で 91 日間乾燥させて いる過程で、試験体深部においては残存水による水和反 応が進み、空隙構造が表層部と深部で異なると考えられ るが、その後に採取した薄片試料の空隙率は材齢7日の 試験体であっても表層部と深部とで最大でも1割程度の 違いであったため、本研究では50℃乾燥過程における水 和進行による空隙構造の変化の影響はそれほど大きくな いものと考えて検討を行った。N50においては、材齢の 経過とともに空隙構造連続性が幾分低下する傾向が確認 される。NB5050 においては、N50 と同様に、材齢の経 過とともに空隙構造連続性が幾分低下する傾向が確認さ れる。表面から 20~40mm 程度の領域においては最大で 20%程度の相違が確認される。NF5020においては、N50 や NB5050 とは異なり、材齢の経過とともに空隙構造連 続性が明確に低下する傾向が確認される.特に、表面か ら 60mm 程度までに領域においては、著しい空隙構造連



図-8 空隙構造連続性に及ぼす水結合材比の影響

続性の低下が確認される。これは、材齢初期においては 表面とつながっていた連続空隙が、フライアッシュのポ ゾラン反応により生成した水和物によって連続空隙の途 中において分断されるようになり、連続空隙の数,深さ が小さくなったためと考えられる。

(2) 結合材種類の影響

図-7 に、空隙構造連続性に及ぼす結合材種類の影響

を示す。高炉スラグ微粉末混合系においては、置換率の 影響が明確であり、置換率が大きいほど空隙構造連続性 が小さくなった。フライアッシュ混合系においても、置 換率の影響が明確であるが、本研究の置換率の範囲内に おいては、高炉スラグ微粉末混合系の方が置換率の影響 が顕著である。三成分系においては、フライアッシュ置 換率の大きい NBF504020 の方が NBF504510 よりも空隙

構造連続性が低いことが分かる。

(3) 水結合材比の影響

図-8 に、空隙構造連続性に及ぼす水結合材比の影響 を示す。いずれの結合材種類においても、水結合材比50% と70%を比較すると、水結合材比の小さい50%の方が、 いずれの深さにおいても空隙構造連続性は低下しており、 合理的な結果と判断される。しかしながら、水結合材比 30%の試験体においては、表面から30mm程度までの領 域においては最も空隙構造連続性が小さくなっているが、 深部においては水結合材比70%の場合と同程度の空隙構 造連続性となった。水結合材比30%の試験体は、フレッ シュ時の粘性が大きく、目視でも確認できるような粗大 な気泡が多く含まれたことや、自己収縮等によるマイク ロクラックの影響等が関連している可能性が考えられる が、詳細については今後検討する予定である。

4. まとめ

本研究では、長期材齢のおける拡散係数の低下や塩化 物イオンの浸透停滞現象にも関連していると考えられる 空隙構造連続性に及ぼす材料,配合の影響を定量的に評 価することを目的として、50℃乾燥環境下において水分 逸散させたモルタル試験体の水分残存量より空隙構造連 続性を評価することを試みた。その結果、フライアッシ ュ混合系においては材齢の影響を大きく受け、空隙構造 連続性は材齢の経過とともに明確に小さくなること、高 炉スラグ微粉末混合系においては置換率の影響が明確で あり、置換率が大きいほど空隙構造連続性が小さくなる こと、等が確認された。

謝辞

本研究は,JSPS 科研費(課題番号 19K04557)の助成 および 2018 年度日本コンクリート工学会研究助成によ り実施した研究成果の一部である。ここに記して謝意を 示す。

参考文献

- 高橋佑弥,井上翔,秋山仁志,岸利治:実構造物中のフライアッシュコンクリートへの塩分浸透性状と調査時材齢の影響に関する研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.32,No.1, pp.803-808,2010.7
- 鎌田知久,岸利治:実構造物コアを用いた室内塩水 浸せき試験による各種混和材の塩分浸透抵抗性の 評価,コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.787-792, 2015.7
- 3) 中山大誠,佐々木謙二,原田哲夫:高炉セメントコンクリートの耐久性に及ぼすフライアッシュ混合の影響,コンクリート構造物の補修,補強,アップグレード論文報告集,Vol.18, pp.701-706, 2018.10
- Lothenbach, B., Matschei, T., Möschner, G. and Glasser, F. P.: Thermodynamic modelling of the effect of temperature on the hydration and porosity of Portland cement, Cement and Concrete Research, Vol.38, pp.1-18, 2008.