

令和 4 年 6 月 28 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04557

研究課題名（和文）コンクリートの空隙構造の連続性評価と物質移動予測の高精度化への応用

研究課題名（英文）Evaluation of Continuity of Pore Structure of Concrete and its Application to Accurate Prediction Method of Mass Transport

研究代表者

佐々木 謙二（SASAKI, Kenji）

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20575394

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、コンクリートの劣化に対する抵抗性を支配する物質移動現象を高精度に予測する手法の構築を目指し、水、気体、イオンの移動経路となる「空隙構造の“連続性”」を定量評価することを目指したものである。材料・配合・養生の異なるセメント系硬化体に対して、飽水状態の試験体を一次的に乾燥させ、乾燥後の深さ方向の水分残存量分布を測定して、空隙構造の連続性を評価したところ、水結合材比が小さくなるほど、混和材の置換率が大きくなるほど、空隙構造の連続性は低下し、また物質移動限界深さが小さくなることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の意義は、コンクリートの劣化に対する抵抗性を大きく左右する物質移動性状を対象として、その移動経路となる空隙構造を貫通・連続性の観点から評価し、物質移動に及ぼす影響を詳細に検討することによって、物質移動予測の高精度化に繋がることである。さらに、コンクリート構造物の高耐久化や耐久性確保対策の合理化につながるものと期待され、過酷な塩害環境下や、放射性廃棄物の地層処分に用いるコンクリート等の高い安定性が求められるコンクリートの開発にも応用ができると考えられる。

研究成果の概要（英文）：This study aims to develop a method for accurately predicting mass transport phenomena that control the resistance of concrete to deterioration, and to quantitatively evaluate the "continuity" of the pore structure, which is the pathway for water, gas, and ions to move through. The continuity of the pore structure was evaluated by measuring the distribution of residual water content in the depth direction after drying of one-dimensionally dried specimens of hardened cementitious materials with different materials, mix proportions, and curing conditions. The results showed that the pore structure continuity decreased with decreasing water-binder ratio and increasing admixture replacement ratio.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：コンクリート 空隙構造 連続性 物質移動

### 1. 研究開始当初の背景

コンクリートの空隙構造は、各種性能を大きく支配している主要因である。コンクリートの空隙構造は、セメントや混和材などの結合材の水和反応により練り混ぜ時に存在していた水の部分を水和物が徐々に充てんしていくことにより構築される。この空隙構造は、材料、配合、養生方法、環境条件、材齢などの影響を受け、非常に変化に富むものであり、コンクリート構造物中の鋼材腐食に関わる劣化因子（水分、酸素、二酸化炭素、塩化物イオン）の移動経路となる。これまでのコンクリート中における物質移動特性の評価においては、着目物質の移動のしやすさを表す拡散係数などの指標は、直接測定することにより得られた値や空隙構造をパラメータとして推定した値によって、コンクリートの深さ方向のどの位置においても一様な拡散係数を用いて物質移動の評価がなされてきた。例えば、塩化物イオンの浸透を予測する場合には、表面塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数が時間的にも空間的にも一定という仮定の下、Fick の拡散方程式の解を用いて半無限領域の塩化物イオン浸透を予測することが一般的である。

しかしながら、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（例えば、鋼材位置）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考えられる。すなわち、図 - 1 に示したように、練混ぜ時には結合材と水の混練物である(a)の状態が、水和反応の進行によって水の占めていた部分を水和物が充てんすることによって(b)または(c)の状態のような空隙構造が形成される。(b)は貫通連続空隙の多くが鉄筋位置まで到達しており、鋼材腐食の可能性が高い状態であり、(c)は貫通連続空隙の多くが表面付近で留まっており、鋼材腐食の可能性が低い状態を示している。また、(c)については、表面付近には表面とつながっている貫通連続空隙が多くあり物質が移動しやすい状態であるが、鋼材位置近くでは表面とつながっている貫通連続空隙はほとんどなく、表面から内部の着目位置までの距離の違いにより、その間の拡散係数は異なるものと考えられる。つまり、拡散係数は試験体厚さによって値が異なる可能性がある。特に、一般的に緻密と言われるコンクリートの場合にはその可能性が高いと推察される。さらに、表面とつながった貫通連続空隙が存在しなくなる「物質移動限界深さ」が存在すると考えられ、それより深い位置には劣化因子などの物質が到達できないと考えられる。

したがって、コンクリート中の物質移動を高精度に予測するには、表面とつながっている貫通連続空隙の深さ方向分布を捉え、さらには物質移動限界深さを考慮することが必要であると考えられる。

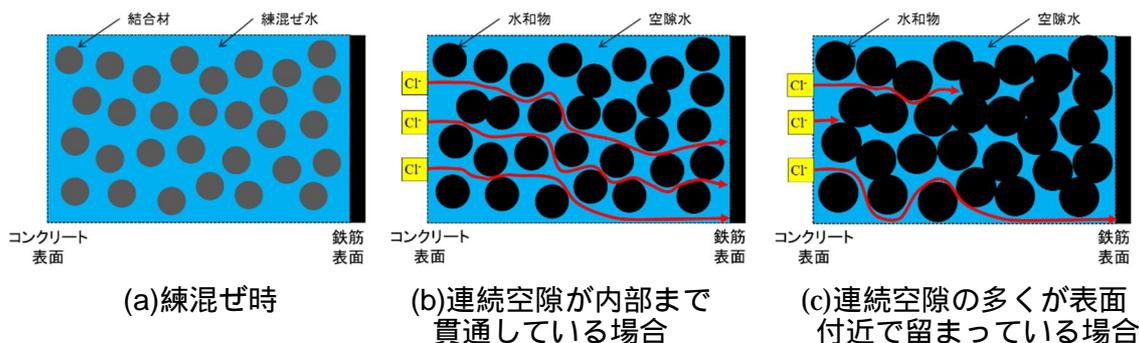


図 - 1 貫通連続空隙の模式図

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、コンクリートの劣化に対する抵抗性を支配する物質移動現象を高精度に予測する手法の構築を目指し、水、気体、イオンの移動経路となる「空隙構造の“連続性”」を定量評価することである。すなわち、「空隙構造の連続性」や表面とつながった貫通連続空隙が存在しなくなる「物質移動限界深さ」に及ぼす材料・配合・養生の影響を明らかにするとともに、「空隙構造の連続性」と「物質移動限界深さ」を考慮した物質移動推定手法を構築することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、上記の目的を達成するために、材料・配合・養生の異なるセメント系硬化体に対して、「空隙構造の連続性評価試験」を実施し、その結果をもとに「空隙構造の連続性、物質移動限界深さを考慮した物質移動推定手法」の構築について検討した。

#### (1) 試験体概要

##### 使用材料

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 種) [FA] である。細骨材は海砂, 粗骨材は碎石を用いた。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。

#### 配合

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。

#### 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) 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 - 2 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 - 2 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, 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, 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。

$$\text{連続性指標}(\%) = \left( 1 - \frac{\text{水分残存量}(\text{ml})}{\text{空隙量}(\text{ml})} \right) \times 100$$

## 4. 研究成果

### (1) 水分逸散

#### 結合材種類の影響

図 - 3 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。

#### 水結合材比の影響

図 - 4 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。

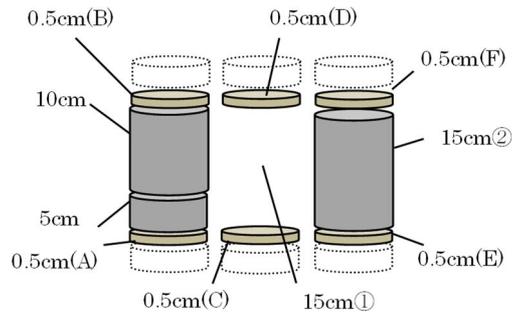


図 - 2 水分逸散試験体の切出し概要



写真 - 1 水分逸散試験

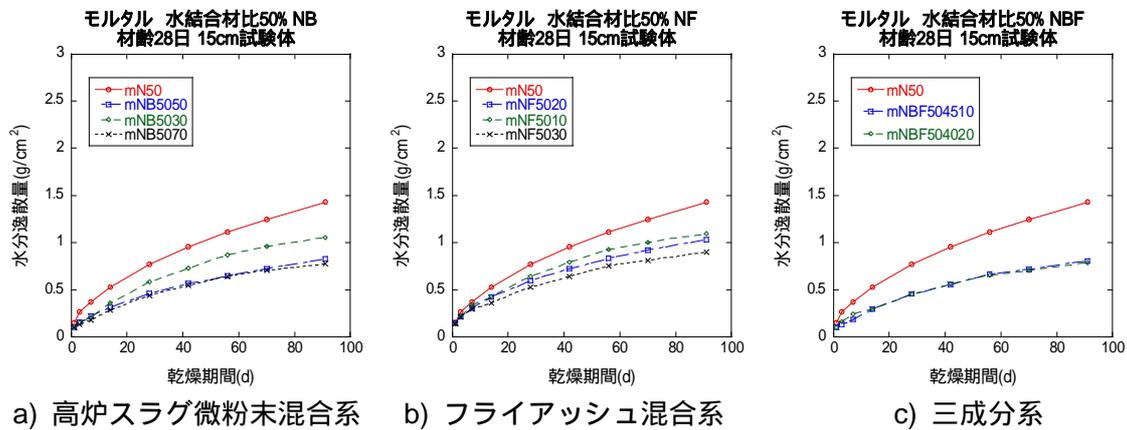


図 - 3 水分逸散量に及ぼす結合材種類の影響

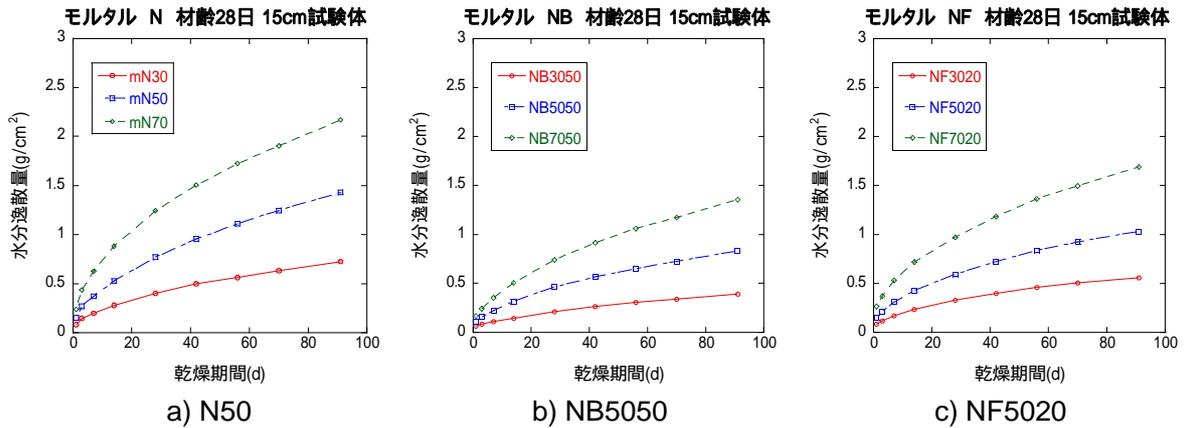


図 - 4 水分逸散量に及ぼす水結合材比の影響

## (2) 空隙構造の連続性 材齢の影響

図 - 5 に、空隙構造連続性に及ぼす材齢の影響を示す。なお、1 面開放の状態での 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 程度までの領域においては、著しい空隙構造連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。

### 結合材種類の影響

図 - 6 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。

### 水結合材比の影響

図 - 7 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。

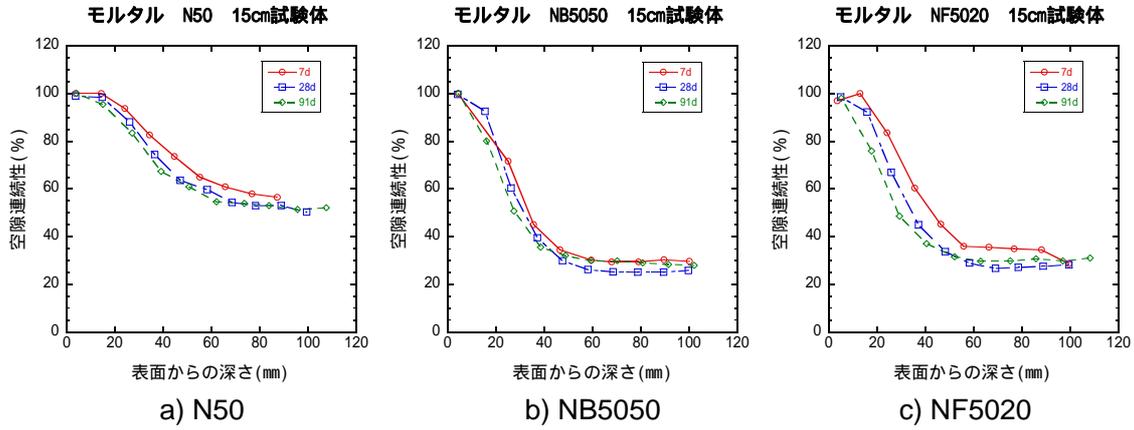


図 - 5 空隙構造連続性に及ぼす材齢の影響

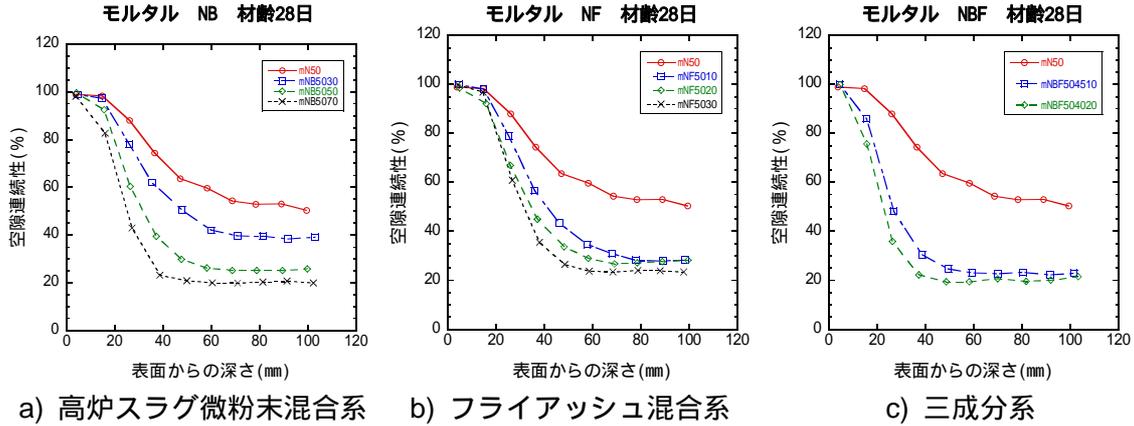


図 - 6 空隙構造連続性に及ぼす結合材種類の影響

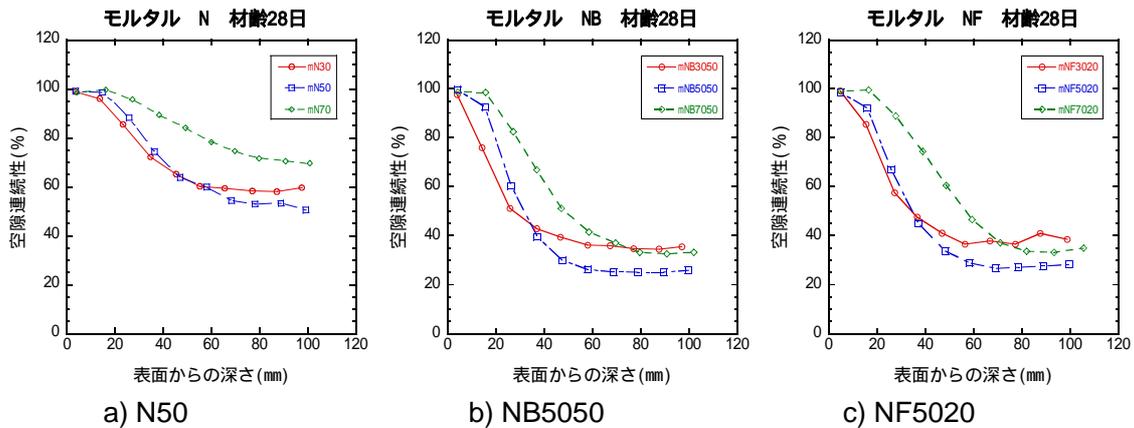


図 - 7 空隙構造連続性に及ぼす水結合材比の影響

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 佐々木謙二	4. 巻 43
2. 論文標題 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	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 347-352
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 佐々木謙二，本多南菜，王傑
2. 発表標題 水分逸散に基づくセメント系硬化体の空隙構造連続性に関する基礎的検討
3. 学会等名 第75回セメント技術大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------