

## 結合材種類の異なるコンクリートの水分浸透挙動に及ぼす炭酸化の影響

広島大学 非会員 ○厚朴 璃子  
 広島大学 学生会員 山本 大貴 吉栖 佑香  
 広島大学 正会員 半井 健一郎

### 1. 背景・目的

近年, 既設コンクリート構造物からのコンクリート片の剥落が社会問題となっている. コンクリート片の剥落原因は, 主にかぶり厚さ不足箇所における鉄筋の腐食膨張圧であり, 炭酸化の進行に加えて雨水の影響を著しく受ける部位で剥落が多く生じている<sup>1)</sup>. よって, 炭酸化による鉄筋腐食の評価においては, 水分浸透との関係を明らかにする必要がある.

コンクリートへの水の浸透については数多くの研究があり, 水セメント比や養生期間, 混和材の置換率による影響が明らかとなっている<sup>2)</sup>. しかし, 水分浸透に関する試験は試験体を水に浸漬させる方法がほとんどであり, 実構造物における水分浸透挙動を十分に再現できていない可能性がある.

炭酸化については, 中性化速度係数に加え, 空隙構造の変化がコンクリートの物性に与える影響について研究が行われている. 水野ら<sup>3)</sup>は, 普通ポルトランドセメントを使用した場合の炭酸化後の水分浸透抵抗性は炭酸化前に対して増加したが, 高炉セメントを用いた場合は低下したと報告している. しかし, 現段階では炭酸化と水分浸透の関係性は統一的な理解に至っていない. また, 近年はひび割れ対策として膨張材を添加したコンクリートも使用されているため, 様々な結合材を使用した場合の水分浸透挙動を明らかにする必要がある.

よって本研究では, 異なるコンクリートにおける炭酸化促進の有無が水分浸透挙動に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする.

### 2. 試験概要

結合材種類による水分浸透挙動の違いについて検討するため, 表1に示すように普通ポルトランドセメントのみを使用したコンクリート(以下, N)に加え, 普通ポルトランドセメント OPC を高炉スラグ微粉末 BFS

で50%質量置換したもの(以下, BS), 膨張材で60kg/m<sup>3</sup>質量置換したもの(以下, Ex)の3種類のコンクリートを用いた. 水結合材比55.0%と単位水量175 kg/m<sup>3</sup>で統一して円柱試験体(φ100×200mm)を作製し, 7日間封緘養生を行った. 促進炭酸化の有無による水分浸透挙動の変化について検討するため, 試験体を温度20±2°C, 湿度60±5%RHの室内環境(以下, 供試体名に-nを付与)と同温湿度, CO<sub>2</sub>濃度5±0.2%の炭酸化促進環境(以下, -c)にて91日間乾燥させるとともに, 条件-cではうち70日間は促進炭酸化させた. 鋼製型枠によるExの膨張拘束を維持するため, 養生後の脱枠は行わないこととした. また, N, BSについても乾燥条件を揃えるため, 養生後の脱枠は行わないこととした.

表1 コンクリートの配合

	W/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
		W	OPC	膨張材	BFS
N	55.0	175	318	0	0
Ex			258	60	0
BS			159	0	159

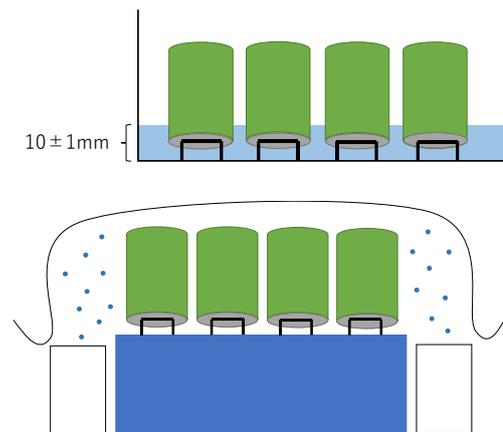


図1 水分供給試験模式図  
(上: 吸水試験, 下: 吸湿試験)

キーワード 炭酸化, 吸水性, 空隙構造, 高炉スラグ微粉末, 膨張材

連絡先 〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1 広島大学大学院先進理工系科学研究科 先進理工系科学専攻  
 社会基盤環境工学プログラム 事務室 TEL: 082-424-7819

その後、JSCE-G 582-2018<sup>4)</sup>と ASTM C1585-13<sup>5)</sup>を参考に、一面からの水分供給試験を行った。図1に示すように水分供給試験として試験体下部 10±1mm が水に浸るようにして吸水させる吸水試験と、95%RH以上の環境に試験体を静置させ水蒸気を吸収させる吸湿試験を行った。試験期間は8日間とし、経時的に重量変化を測定し、測定した重量を時間の平方根で除して吸水速度係数を算出した。吸水試験については吸水開始から6時間、吸湿試験については吸水終了までの重量変化を用いて吸水速度係数を算出した。水分供給試験終了後にフェノールフタレイン溶液 1%を用いて炭酸化深さを測定した。結合材種類による水和・炭酸化生成物の違いを見るため、厚さ 1cm ごとに試験体を切断し、粉末試料にして熱分析と X 線回折分析を実施した。

### 3. 試験結果と考察

図2に吸水速度係数、図3、図4に炭酸化深さおよび X 線回折分析の結果をそれぞれ示す。

#### (1) 結合材種類による水分浸透挙動の違い

図2より、Ex-nとN-nの吸水速度係数は同程度で、BS-nの吸水速度係数はそれらの約2.4倍であった。Saekiらの研究では、高炉スラグ微粉末を50~70%置換したコンクリートを7日未満の水中養生を行った場合、普通コンクリートに対して総細孔量が多くなり、塩分浸透抵抗性が低くなることが報告されている<sup>6)</sup>。本試験においてBS-nは普通ポルトランドセメントの50%を高炉スラグ微粉末で質量置換し、7日間封緘養生を行ったため、N-nに対して吸水性が高くなったと考えられる。また、膨張材を使用したコンクリートを膨張拘束すると、ケミカルプレストレスによって径の大きな空隙が減少する一方で、膨張材を8~10%添加すると膨張拘束を行っても炭酸化や水分浸透に影響を与える径40nm以上の空隙量はやや増加することが報告されている<sup>7)</sup>。本試験では普通ポルトランドセメントの約20%を膨張材で質量置換して膨張拘束を行っており、2つの効果が相殺されたため空隙構造に大きな変化が生じず、N-nと同程度の吸水速度係数になったと考えられる。

#### (2) 炭酸化が水分浸透挙動に与える影響

N-cの炭酸化深さはN-nに対して約1cm大きくなった。図2より、N-cの吸水速度係数はN-nの約0.8倍となり、炭酸化によって吸水性が低くなった。これはCa(OH)<sub>2</sub>の炭酸化による空隙構造の緻密化<sup>6)</sup>によるもの

と考えられる。

Ex-cの炭酸化深さはEx-nに対して約1cm大きくなった。図2より、Ex-cの吸水速度係数はEx-nの約1.6倍となり、炭酸化によって吸水性が高くなった。Ex-cでは、膨張材を用いた際の主な水和生成物であるEttringite

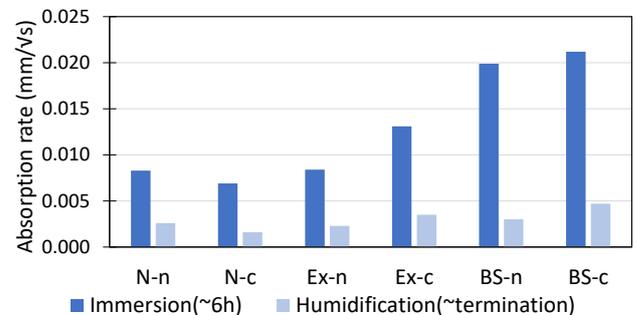


図2 吸水速度係数

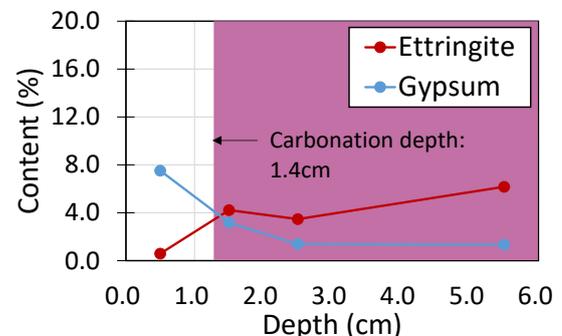


図3 炭酸化深さと X 線回折分析結果 (Ex-c)

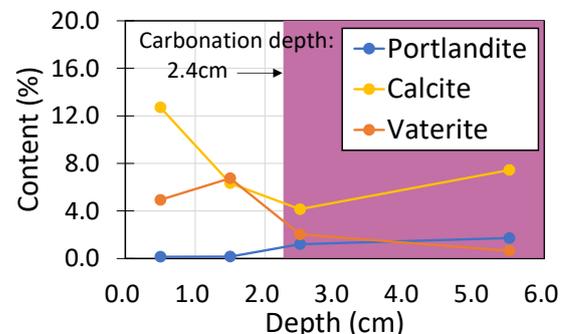


図4 炭酸化深さと X 線回折分析結果 (BS-c)

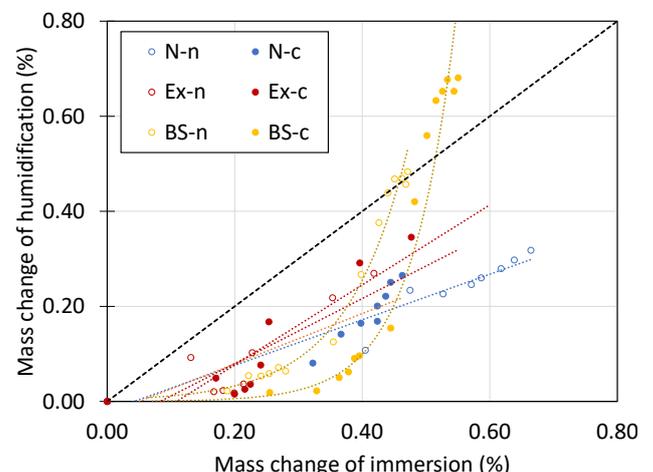


図5 吸水試験と吸湿試験における吸水量の比較

が 60~80%RH で炭酸化すると、その炭酸化生成物である Gypsum の比表面積が増大し空隙構造が粗大化する<sup>8)</sup>。図 3 より、Ex-c の炭酸化範囲では Ettringite は存在せず、Gypsum が 7.5%程度存在しており、Ettringite の炭酸化によって Gypsum が生成したことが考えられる。本試験では試験体を 60%RH の環境にて乾燥・促進炭酸化を行ったため、生成した Gypsum の比表面積が大きくなることにより空隙構造が粗大化し Ex-c の吸水速度係数が大きくなったと考えられる。

BS-c の炭酸化深さは BS-n に対して約 2cm 大きくなった。図 2 より BS-c の吸水速度係数は BS-n の約 1.1 倍になり、炭酸化によって吸水性が高くなった。高炉スラグ微粉末を置換すると潜在水硬性によって  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の消費が増加し、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の炭酸化による  $\text{CaCO}_3$  (Calcite) の生成量が減少し、空隙構造が緻密化しにくくなる。さらに、低 Ca/Si 比の C-S-H が生成され、これが炭酸化すると空隙構造が粗になることが報告されている<sup>6)</sup>。図 4 より、炭酸化範囲において Calcite が約 6~13%、C-S-H の炭酸化による  $\text{CaCO}_3$  (Vaterite) が約 5~7%生成しており、C-S-H の炭酸化が大きな割合で生じたことにより、BS-c は BS-n に対して空隙構造が粗となり、吸水速度係数が大きくなったと考えられる。

これらの結果より、促進炭酸化によってコンクリートの空隙構造の変化が水分浸透挙動に大きな影響を与えることが推測されるが、本試験では空隙構造の測定を行っていないため今後検討を行う必要がある。

### (3) 水分供給方法による水分浸透挙動の違い

図 2 より、吸湿試験は吸水試験に対して吸水速度係数が極めて小さく、吸湿試験は吸水試験に対して水の浸透量が少ないことが明らかとなった。また、吸湿試験における結合材種類や炭酸化促進による水分浸透挙動の変化は、吸水試験と同様の傾向が見られた。

図 5 より、吸湿試験は吸水試験に対して吸水量が少ないことが明らかとなった。これに加えて、吸水試験と吸湿試験の水分浸透挙動の間には相関があり、N と Ex では線形的、BS では指数関数的な関係があることが明らかとなった。吸湿試験においてコンクリートへの水の浸透量が少ないことは、吸水試験に対して水分供給量が少ないためであると考えられる。また、各結合材種類の吸水試験と吸湿試験における吸水量の相関関係が線形的・指数関数的になる原因については今後検討する必要がある。

## 4. 結論と今後の課題

異なるコンクリートを用いて炭酸化促進の有無が水分浸透挙動に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、水分供給試験を行った。その結果、混和材を使用すると普通コンクリートよりも吸水性が高くなった。また、促進炭酸化させた場合、混和材を使用したコンクリートでは吸水性がより高くなり、炭酸化に伴う空隙構造の変化によるものと推測された。また、吸湿試験は吸水試験に対して水の浸透量が少ないが、結合材種類や炭酸化促進による水分浸透挙動の変化は吸水試験と同様の傾向を示した。今後は空隙構造の測定を行い、炭酸化前後の空隙構造の変化を明らかにすることで、炭酸化と水分浸透の関係性について詳細な分析を行う。

## 参考文献

- 1) 石橋忠良ら：高架橋等からのコンクリート片剥落に関する調査研究, 土木学会論文集, Vol.56, No.711, pp. 125-134, 2002.
- 2) L.J. Parrott: Water Absorption in Cover Concrete, *Materials and Structures*, 25, pp.284-292, 1992.
- 3) 水野博貴ら：炭酸化した高炉セメント硬化体の空隙構造変化が水分浸透性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.665-670, 2019.
- 4) 土木学会コンクリート委員会・基準関連小委員会：土木学会基準「短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法(案)(JSCE-G 582-2018)」の制定, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.74, No.4, pp.256-259, 2018.
- 5) ASTM International: ASTM C1585: Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, 2013.
- 6) T. Saeki et al.: Estimation of Chloride Coefficient of Concrete Using Mineral Admixtures, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.4, No.3, pp.385-394, 2006.
- 7) 李春鶴ら：膨張モルタルの細孔構造および酸素拡散係数に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, No.65, pp.111-117, 2011.
- 8) 吉良 欣一ら：エトリンタイトの炭酸化, 石膏と石灰, No.159, pp.48-53, 1979.