

## 本研究の背景

近年、コンクリート構造物の早期劣化が問題

その原因の一つに  
**炭酸化**  
が挙げられる

解析的研究  
として水酸化カルシウム  
に着目した研究

水酸化カルシウムと炭酸との反応によるもの  
のみで評価され、細孔溶液中の**水酸化アルカリ**  
を考慮に入れた**実際の炭酸化**を表したも  
のではない

細孔溶液中の各化学種を考慮に入れたコン  
クリートの炭酸化の評価が必要となる

炭酸化養生を利用したコンクリートの  
研究・開発が行われている

炭酸化により、  
**コンクリートは収縮  
強度は増加**

炭酸化による  
**コンクリートの物性変化  
は未解明**

炭酸化による収縮、強度を考慮する上で重要  
となる**空隙率変化**の定量的なモデルは皆無

細孔溶液中の各化学種を考慮に入れた  
コンクリートの炭酸化による空隙率変化  
に関する検討が必要

## 本研究の目的

分析化学的手法に基づき細孔溶液中の  
各化学種を考慮に入れた炭酸化に関する  
詳細なモデルの構築

分析化学を踏まえたコンクリートの  
詳細な炭酸化メカニズムに対する検討

炭酸化による空隙率予測モデルの構築

## モデルの構築

モデル構築までのフロー

細孔溶液中の水酸化アルカリを含む各化学  
種の物質収支則、プロトン収支則、質量作用  
の法則の定式化

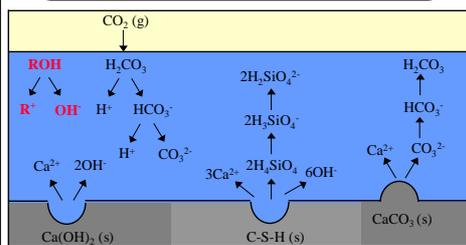
細孔溶液全体のプロトン収支式の定式化

共通イオン効果  $\rightarrow$  炭酸、珪酸の解離  
分率

細孔溶液のpHおよび各化学種の  
平衡濃度の同定

炭酸化による空隙率の算出

細孔溶液中の各化学種のイオン平衡  
の模式図



水酸化カルシウム存在下におけるイオン  
平衡式

細孔溶液中の全体のプロトン収支式は各系の寄与を相加すると...

$$[H^+] + [Na^+]_{non} + [K^+]_{non} + 2[Ca^{2+}]_{Ca(OH)_2} + 2[Ca^{2+}]_{C-S-H} + 2[H_2CO_3]_{CaCO_3} + [HCO_3^-]_{CaCO_3} = [OH^-] + [HCO_3^-]_{H_2CO_3} + 2[CO_3^{2-}]_{H_2CO_3} + [H_3SiO_4^-]_{H_2SiO_4} + 2[H_2SiO_4^2-]_{H_2SiO_4}$$

$$[H^+] + C_1 + C_2 + 2S_1 + 6S_2 + 2\alpha_1 S_3 + \alpha_2 S_4 = K_w / [H^+] + \alpha_0 C_0 + 2\alpha_2 C_0 + 2\alpha_1 S_3 + 4\alpha_2 S_4$$

共通イオン効果  $S_1, S_2, S_3$

$$K_w(CaCO_3) = (S_1 + S_2 + 3S_3) \cdot \alpha_2 (C_0 + S_1)$$

$$K_w(Ca(OH)_2) = (S_1 + S_2 + 3S_3) \cdot [OH^-]$$

$$K_w(CSH) = (S_1 + S_2 + 3S_3) \cdot [2\alpha_1 S_3] \cdot [OH^-]$$

小等による高圧抽出試験結果から...

水酸化ナトリウム濃度  $C_1$

水酸化カルシウム濃度  $C_2$

炭酸、ケイ酸の解離分率  $\alpha_{0,1,2}, \alpha'_{0,1,2}$

任意の二酸化炭素濃度  $C_0$

水酸化カルシウム消失後におけるイオン  
平衡式

全体のプロトン収支式は水酸化カルシウムの寄与を除くことで...

$$[H^+] + [Na^+]_{non} + [K^+]_{non} + 2[Ca^{2+}]_{C-S-H} + 2[H_2CO_3]_{CaCO_3} + [HCO_3^-]_{CaCO_3} = [OH^-] + [HCO_3^-]_{H_2CO_3} + 2[CO_3^{2-}]_{H_2CO_3} + [H_3SiO_4^-]_{H_2SiO_4} + 2[H_2SiO_4^2-]_{H_2SiO_4}$$

$$[H^+] + C_1 + C_2 + 6S_2 + 2\alpha_1 S_3 + \alpha_2 S_4 = K_w / [H^+] + \alpha_0 C_0 + 2\alpha_2 C_0 + 2\alpha_1 S_3 + 4\alpha_2 S_4$$

共通イオン効果  $S_1, S_2, S_3$

$$K_w(CaCO_3) = (S_1 + 3S_2) \cdot \alpha_2 (C_0 + S_1)$$

$$K_w(CSH) = (S_1 + 3S_2) \cdot [2\alpha_1 S_3] \cdot [OH^-]$$

炭酸、ケイ酸の解離分率  $\alpha_{0,1,2}, \alpha'_{0,1,2}$

任意の二酸化炭素濃度  $C_0$

小等による高圧抽出試験結果から...

水酸化ナトリウム濃度  $C_1$

水酸化カルシウム濃度  $C_2$

炭酸、ケイ酸の解離分率  $\alpha_{0,1,2}, \alpha'_{0,1,2}$

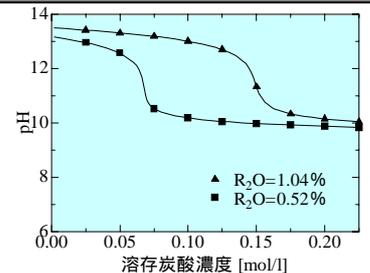
任意の二酸化炭素濃度  $C_0$

炭酸化による空隙率の予測

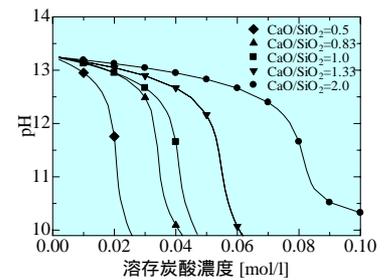
$$\Delta \varepsilon_c = [Ca(OH)_2] \cdot \Delta \bar{V}_{CH} + [CSH] \cdot (\Delta \bar{V}_{CSH \rightarrow \text{溶解}} + \Delta \bar{V}_{CSH \rightarrow CaCO_3} + \Delta \bar{V}_{CSH \rightarrow SiO_2} + \Delta \bar{V}_{CSH \rightarrow CaCO_3, SiO_2})$$

## 炭酸化メカニズムと空隙率予測

水酸化カルシウム消失後でのpHと溶存  
二酸化炭素濃度の関係



各R<sub>2</sub>OにおけるpHと溶存炭酸濃度の関係



各CaO/SiO<sub>2</sub>におけるpHと溶存炭酸濃度

空隙率の予測 (ml/l-mortar)

	W/C=0.5		
	R <sub>2</sub> O=0.56	R <sub>2</sub> O=0.83	R <sub>2</sub> O=1.16
炭酸化前 : 実験値	12.5	13.4	15.2
炭酸化後 : 実験値	8.7	8.8	9.0
水酸化カルシウム 消失時: 解析値	9.2	10.2	12.7
炭酸化後 : 解析値	7.4	8.2	10.4

CaO/SiO<sub>2</sub>比に依存した空隙率予測モデル

0.5 CaO/SiO<sub>2</sub>比 1.0

$$\Delta \varepsilon_c(CSH) = -2.55 \times 10^{-3} \times R_2O$$

1.0 CaO/SiO<sub>2</sub>比 1.33

$$\Delta \varepsilon_c(CSH) = (7.98 \times 10^{-3} \times R_2O - 2.82 \times 10^{-3}) \times (CaO/SiO_2 - 1.0) - 2.55 \times 10^{-3} \times R_2O$$

1.33 CaO/SiO<sub>2</sub>比 2.0

$$\Delta \varepsilon_c(CSH) = (3.14 \times 10^{-2} \times R_2O - 1.18 \times 10^{-2}) \times (CaO/SiO_2 - 1.33) + 8.5 \times 10^{-4}$$