

論文 遠心成形高強度コンクリートの塩分浸透性に関する実験

菅 一雅^{*1}・榎田 佳寛^{*2}・大谷 美穂^{*3}

要旨：超硬練りコンクリートを使用した遠心成形高強度コンクリートに関する塩水浸漬試験を行った。コンクリート中に浸透した塩素イオン量や測定値から逆解析して求めた拡散係数は遠心成形コンクリートが振動成形に比べ小さくなる傾向を示した。浸透する塩素イオン量や拡散係数は、細孔直径0.003～60 μ mの全細孔容積が少なくなるほど小さくなる傾向を示し、遠心成形や水結合材の低減による内部微細空隙構造の緻密化が塩素イオン浸透に対して影響を及ぼしていることを確認した。

キーワード：遠心成形, 高強度コンクリート, 塩化物イオン, 拡散係数, 細孔容積

1. はじめに

遠心成形コンクリートに関する耐久性については、既往の研究で中性化抑制効果や凍結融解抵抗性向上に関する報告^{1),2)}はされているが、塩分浸透性に関する研究報告³⁾は少なく、遠心成形効果による塩分抑制効果について検討した報告はされていない。しかし、海岸付近の構造物に遠心成形コンクリートが使用される場合もあり、塩分浸透性についても検討する必要がある。

筆者らは、圧縮強度120N/mm²以上の遠心成形杭を製造するにあたり、超硬練りコンクリートを適用することが材料分離抑制、力学特性向上に有効であることを報告^{4),5)}しており、さらに塩分の浸透性についても検討を行うこととした。

そこで、本研究は超硬練りコンクリートを用いた120N/mm²以上の遠心成形高強度コンクリートや80N/mm²級の従来遠心成形杭調合に関する塩水浸漬試験を行い、振動成形したコンクリートと比較することにより、塩分浸透性に対する遠心成形効果を検討した。

2. 実験概要

2.1 実験条件

表-1に実験の要因と水準、表-2に使用材

表-1 要因と水準

要因	水準
W/B(%)	17, 23, 33
成形条件	遠心成形, 振動成形
塩水濃度(%)	12
試験材齢(日)	28, 56, 91, 182
測定深さ(mm)	0～5, 5～10, 10～20, 20～30

表-2 使用材料

セメント	早強ポルトランドセメント 密度 3.14 (g/cm ³)
細骨材	安山岩系砕砂 表乾密度 2.64 (g/cm ³), 粗粒率 2.66
粗骨材	安山岩系砕石 表乾密度 2.62 (g/cm ³), 粗粒率 6.32
混和材 1	エトリンガイト系高強度混和材 密度 2.90 (g/cm ³)
混和材 2	シリカフューム 密度 2.20 (g/cm ³)
混和剤 1	ポリカルボン酸系高性能減水剤
混和剤 2	ナフタリン系高性能減水剤

料を示す。

セメントは早強ポルトランドセメントとし、混和材としてエトリンガイト系高強度混和材とシリカフュームを用いた。また、混和剤としては、W/B=17,23%にはポリカルボン酸系高性能減水剤、W/B=33%にはナフタリン系高性能減水剤を用いた。

*1 ジャパンパイル（株） 技術開発部（正会員）

*2 宇都宮大学教授 工学部建設学科 工博（正会員）

*3 ジャパンパイル製造（株）

表－3 調合条件

調合 記号	W/B %	s/a %	単位量 kg/m ³						B×%		スラブ [*] cm	遠心成形 材齢 7 日 圧縮強度 N/mm ²
			W	C	混和材 1	混和材 2	S	G	混和剤 1	混和剤 2		
17+S	17	44	110	518	65	65	782	988	1.2	—	0	172
23+S	23	44	110	383	48	48	848	1071	0.8	—	0	154
23	23	44	110	430	48	—	855	1080	0.8	—	0	126
33	33	44	140	382	42	—	841	1062	—	2.2	0.5	87

[注]B：結合材（C+混和材）

調合条件は、表－3に示す4種類の調合とし、スラブは 0～0.5cm、遠心成形コンクリートの材齢 7 日圧縮強度は 87～172N/mm²であった。

成形条件および養生条件を表－4に示す。

遠心成形は最大遠心力を 30G とし、試験体形状を $\phi 200 \times h300 \times t40(\text{mm})$ とした。遠心成形効果との比較用として振動成形で同一円筒形状試験体を作成した。振動成形試験体は、型枠内部に鋼管を埋め込み、コンクリートが自立できる状態になった時点で引き抜いて成形した。常圧蒸気養生は最高温度 70℃ とし、養生後 2～3 時間自然冷却し、その後脱型を行った。そして、材齢 7 日まで 20℃60%RH の室内に保存した。

2.2 試験項目

試験は、表－5に示すように塩水浸漬試験、細孔径分布試験を行った。

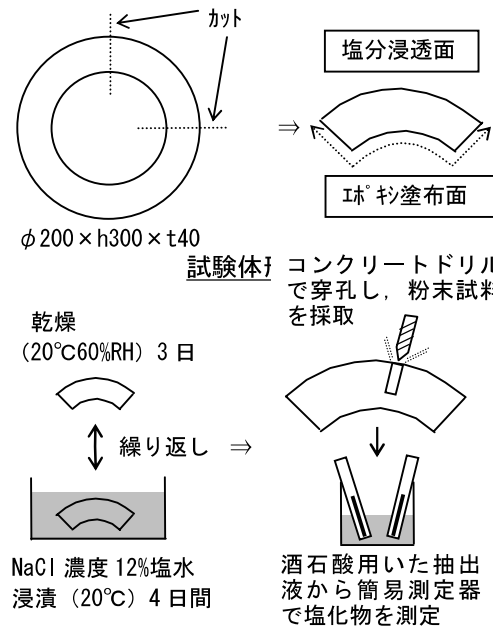
塩水浸漬試験に用いる試験体は、円筒試験体を 4 等分に切断し、外周面以外の 5 面についてエポキシ樹脂を塗布した。塩水浸漬試験は、試験体を濃度 12% の NaCl 水溶液に 4 日間浸漬し、その後 20℃60%RH の室内で 3 日間乾燥させることを繰り返し行った。コンクリート中に浸透した塩素イオンは、コンクリートドリル $\phi 10\text{mm}$ により外周面から所定の測定深さまで穿孔し、その粉末試料を用いて酒石酸による簡易測定方法⁶⁾で測定した。試料を採取する穿孔箇所は 10 箇所以上とし、粉末試料を 10g 程度採取した。

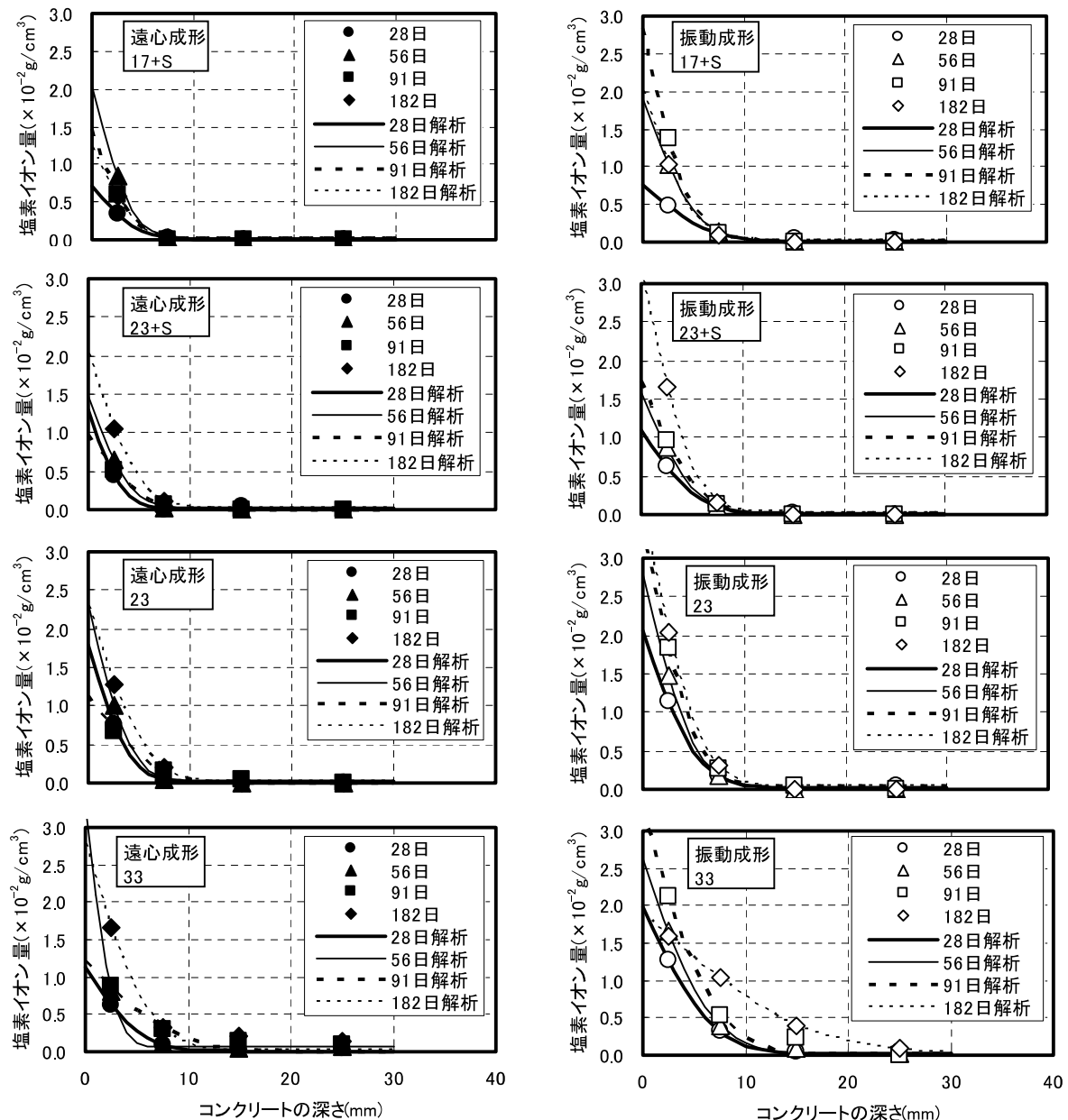
細孔径分布試験は、遠心成形における内側と外側の細孔容積の差が小さいこと⁵⁾から、遠心成形は外側、振動成形は中央部から採取した試料で水銀圧入式ポロシメータにより細孔直径 0.003～60 μm の範囲の細孔容積を測定した。

表－4 成形条件および養生条件

項目		条件
成形	遠心	1G 420s⇒6G 120s⇒10G 60s⇒30G 120s 試験体形状： $\phi 200\text{mm} \times h300\text{mm} \times t=40\text{mm}$
	振動	4G 振動台： 調合 17+S 3 層 各 120s 調合 23+S, 23, 33 3 層 各 60s 試験体形状： $\phi 200\text{mm} \times h300\text{mm} \times t=40\text{mm}$
養生	常圧 蒸気	前置き 上昇 高温 自然徐冷 30℃3h ⇒10℃/h4h ⇒70℃7h ⇒20℃60%RH

表－5 試験項目

(1) 塩水浸漬試験	
試験開始材齢：材齢 7 日	
 試験体 $\phi 200 \times h300 \times t40$ 乾燥 (20℃60%RH) 3 日 NaCl 濃度 12% 塩水 浸漬 (20℃) 4 日間 酒石酸用いた抽出液から簡易測定器で塩化物を測定	
試験方法	
測定深さ：0～5mm, 5～10mm, 10～20mm, 20～30mm	
試験材齢：28 日, 56 日, 91 日, 182 日	
(2) 細孔径分布試験	
試料採取位置：	
遠心成形 厚さ方向に 2 分した外側から採取	
振動成形 中央部から採取	
試験方法：水銀圧入式ポロシメータによる計測	
試験材齢：7 日	



図ー１ 各材齢時の深さ方向の塩素イオン量分布

3 実験結果および考察

3.1 深さ方向の塩素イオン分布

各材齢時における深さ方向の塩素イオン量測定結果を図ー１に示す。

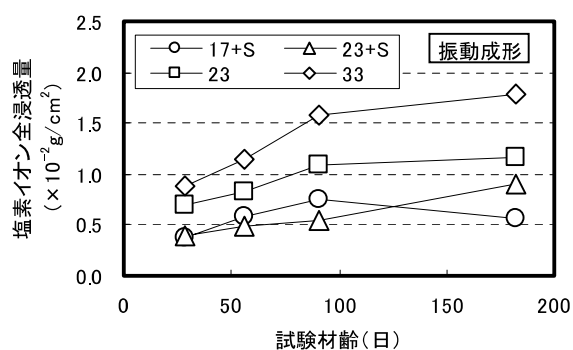
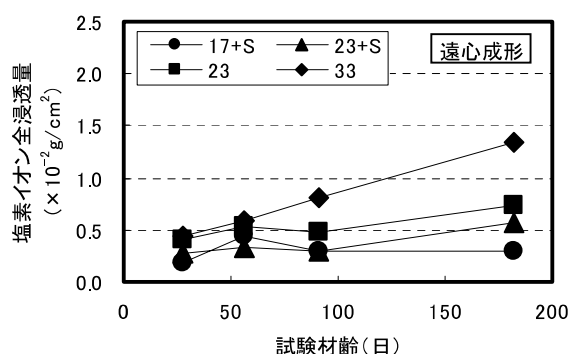
成形条件の違いによる影響をみると、各調合とも振動成形に比べ、遠心成形の塩素イオン量が少なくなる傾向を示した。特に材齢が経過するほど、また W/B が大きくなるほど遠心成形と振動成形による浸透状態の差が顕著となる傾向を示した。

調合の違いによる影響をみると、ばらつきはあ

るものの W/B が小さいほどかつシリカフュームを添加した調合ほど塩素イオン量が少なくなる傾向を示した。W/B=23%以下の調合は試験材齢 182 日の時点でも深さ 0～10mm の範囲の極表層部のみに浸透しているのに対し、W/B=33%の振動成形では深さ 20～30mm まで浸透した結果となった。

3.2 塩素イオン全浸透量

単位面積あたりの深さ 30mm までに浸透した各試験材齢の塩素イオン全浸透量を図ー２に示す。



図－２ 各調合における各材齢時の塩素イオン全浸透量

各試験材齢時の塩素イオン全浸透量は、いずれの調合においても振動成形に比べ遠心成形が少なくなる傾向を示した。また、水結合材が小さいほど塩素イオン全浸透量が少なくなる傾向を示し、同一 W/B でもシリカフュームを混入した調合が少なくなる傾向を示した。

既往の研究では、W/C の差が大きい調合の研究が多く、全浸透量も顕著に差が認められる報告が多い。しかし、本研究の調合の W/B は、17～33%と W/B の範囲も小さく、かつ超高強度領域であることから、顕著な差が表れなかったものと考えられる。ただし、W/B=33%の塩素イオン全浸透量は W/B=23%以下の調合に比べ、大きい値を示した。

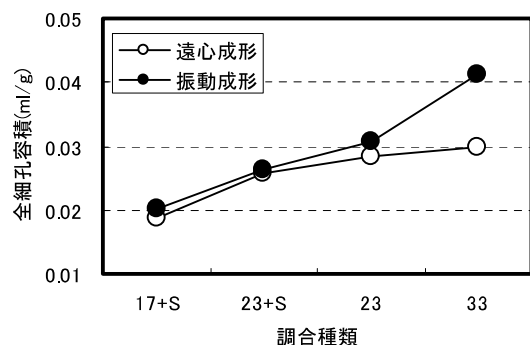
3.4 細孔容積と塩素イオン浸透性の関係

各調合の材齢 7 日に測定した細孔直径 0.003～60μm の全細孔容積を図－３に示す。

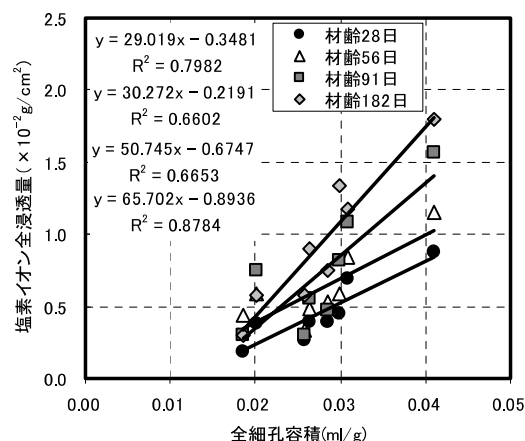
全細孔容積は、いずれの調合も振動成形に比べ遠心成形したものほど少なくなる傾向を示し、W/B が小さく、シリカフュームを混入した調合ほど少なくなる傾向を示した。

全細孔容積と塩素イオン全浸透量の関係を図－４に示す。

塩素イオン全浸透量は、全細孔容積が少なくなるほど少なくなる傾向を示した。また、全細孔容積が多い調合ほど材齢が経過すると全浸透量が増加する傾向を示した。このことから、高強度領域の調合においても遠心成形や W/B の影響による細孔容積の変化が塩素イオン全浸透量に影響を及ぼしていることが判った。



図－３ 各調合における全細孔容積



図－４ 全細孔容積と塩素イオン全浸透量の関係

3.5 拡散方程式による検討

ペースト、モルタル、コンクリート中への塩化物の浸透過程は、既往の研究でもフィックの拡散方程式(1)で検討されている⁷⁾。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

ここで、C：塩化物量 ($\times 10^{-2} \text{g/cm}^3$)

D：拡散係数 ($\times 10^{-2} \text{g/cm}^3$)

t：試験材齢 (day)

x：表面からの深さ (mm)

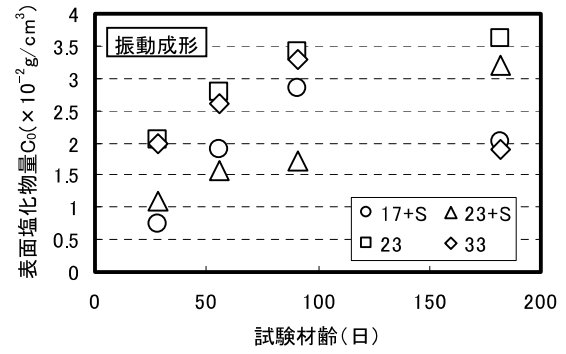
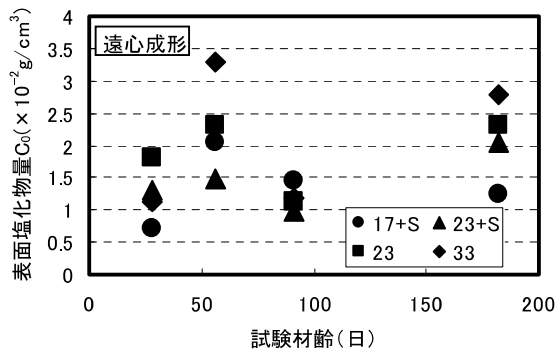


図-5 各調合における各材齢時の表面塩化物量 C_0

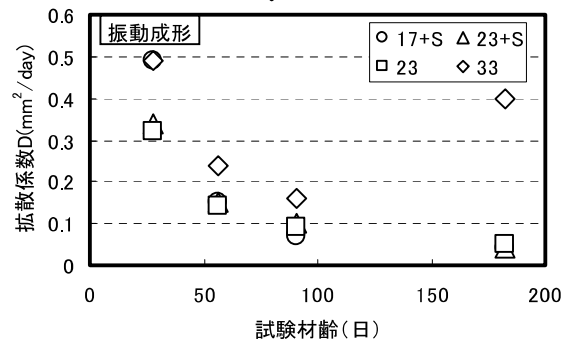
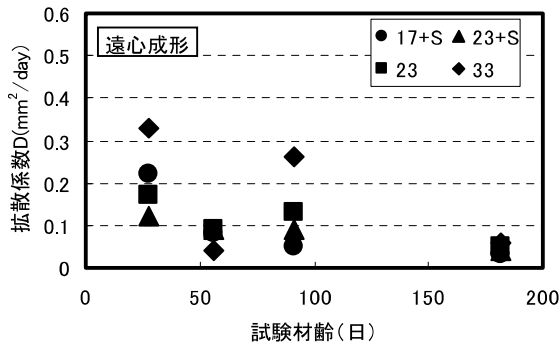


図-6 各調合における各材齢時の拡散係数 D

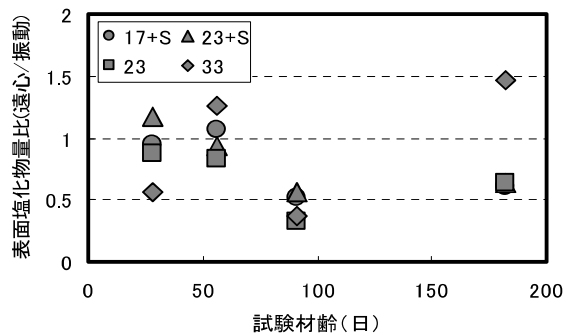


図-7 C_0 値の遠心成形／振動成形比

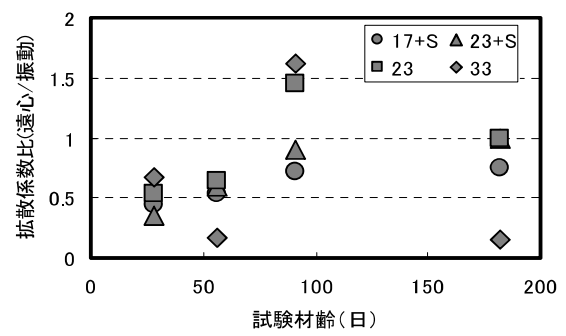


図-8 D 値の遠心成形／振動成形比

境界および初期条件として、

$$t=0: C=0, \quad x=0: C=C_0, \quad x=\infty: C=0$$

を与えると式(1)の解は式(2)で表させる。

$$C = C_0 \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\xi} \exp(-\xi^2) d\xi \right) \quad (2)$$

$$\xi = \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$$

ここで、 C_0 : 表面の塩化物量 ($\times 10^{-2} \text{g/cm}^3$)
式(2)を用いて、試験材齢ごとの測定結果をあてはめ、図-1のように逆解析し、測定値と方程式の差がもっとも小さくなる表面の塩化物量 C_0 と拡散係数 D を求め、遠心成形や調合条件の塩素イオン浸透性について検討を行なった。各材齢時における各値の変化を図-5、図-6に、

各値の遠心成形と振動成形の比を図-7、図-8に示す。

表面の塩化物量 C_0 は、試験材齢とともに収束する傾向を示すが、材齢 91 日以降は $W/B=23$ 以下の遠心成形が振動成形の約 1/2 の値を示し、遠心成形したものほど、かつ W/B が小さいほど C_0 が小さくなる傾向を示した。

一方、拡散係数 D は、既往の研究⁷⁾と同様にいずれの成形条件でも試験材齢とともに減少し、収束する傾向を示した。また、拡散係数 D は、試験材齢 56 日までは遠心成形が振動成形に比べ約 1/2 の値を示すが、試験材齢 91 日以降は収束することにより両成形の差が小さくなる傾向を示した。

全細孔容積と解析で求めた拡散係数 D の関係を図-9に示す。

全細孔容積が少ないほど拡散係数は小さくなる傾向を示すが、 W/B が 17~33%の狭い範囲の超高強度調合であることから、材齢とともに拡散係数 D の差が小さくなる傾向を示した。

このことから、前述したような遠心成形や調合条件による材齢 182 日における塩素イオン全浸透量を評価する値としては、表面の塩化物量 C_0 の値が評価しやすい結果となった。この要因としては、コンクリート表層部分での拡散以外の塩素イオンの濃縮作用や固定化現象⁸⁾が、遠心成形した場合や W/B が小さい調合になるほど抑制されることが考えられるが、今回の試験結果だけではそのメカニズムを把握することはできなかった。今後の課題としたい。

4. まとめ

- (1) 遠心成形コンクリートに浸透する塩素イオン量は、振動成形に比べ少なくなる傾向を示した。また、浸透深さは $W/B=23\%$ 以下の調合においては、いずれの成形においても試験材齢 182 日で 0~10mm の極表層であった。
- (2) 試験材齢 182 日での深さ 30mm までの塩素イオン全浸透量は、遠心成形の浸透量が振動成形の浸透量に比べ 52~75%の値となる傾向を示し、細孔直径 0.003~60 μm の全細孔容積が少ないほど小さくなる傾向を示した。
- (3) 遠心成形したものは振動成形に比べ、表面の塩化物量 C_0 が試験材齢 91 日以降から約 1/2 の値を示し、拡散係数 D が試験材齢 56 日までは約 1/2 の値を示し、それ以降は差が小さくなった。そのため、表面の塩化物量 C_0 の値が長期試験材齢での塩素イオン全浸透量を評価しやすい値となった。

参考文献

- 1) 丸山武彦，土田伸治，河野清：シリカフェームコンクリートの諸性質に関する実験的研究，コンクリート工学年次大会論文集

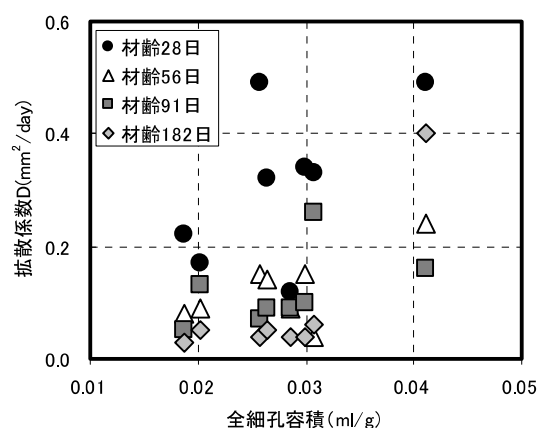


図-9 全細孔容積と拡散係数 D の関係

VOL.12 NO.1, pp105-110, 1990

- 2) 小澤貴史，西田朗，黒瀬行信：高強度遠心成形 PCa 型枠の品質に関する研究，コンクリート工学年次大会論文集 VOL.23, NO.2, pp1081-1086, 2001
- 3) 小野寺収，坪田則行：高炉スラグ組成物を利用したコンクリートの耐塩害性，コンクリート工学年次大会論文集 VOL.10-2, pp421-424, 1988
- 4) 菅 一雅，榊田佳寛：高強度コンクリートの遠心成形性に及ぼす調合の影響に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.606, pp.29-34, 2006.8
- 5) 菅 一雅，榊田佳寛：遠心成形高強度コンクリートの力学特性に及ぼす微細空隙の影響に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.610, pp.7-12, 2006.12
- 6) 太田達見，榊田佳寛，松林裕二，長井義徳：酒石酸を用いた硬化コンクリート中の塩化物量簡易測定法，コンクリート工学年次大会論文集 VOL.26-1, pp2001-2006, 2004
- 7) 竹田祐二，榊田佳寛，中村成春，吉瀬健二：セメントペーストの塩化物イオン浸透メカニズムに関する実験，コンクリート工学年次大会論文集 VOL.23-2, pp505-510, 2001
- 8) 染谷健司，大即信明，Ting-Huan Wee，長滝重義：セメント硬化体中における塩素イオンの固定化性状，コンクリート工学年次大会論文集 VOL.11-1, pp603-608, 1989