## 論文 透過抵抗を代表する空隙指標によるコンクリート中の透気・透水・ 浸潤現象の整理

酒井 雄也\*1·中村 兆治\*2·岸 利治\*3

要旨:各種物質移動抵抗性を代表する空隙指標の同定に向けた検討を進めている。筆者らは透過挙動の指標 として閾細孔径に着目し, 閾細孔径を明確に抽出する方法を提案し,種々の配合や養生を与えたコンクリー トの透水係数と高い相関を有することを確認している。本論文ではまず,表層透気係数との比較ならびに実 構造物から採取されたコアの分析により,上記手法の適用性を検討した。また物質がある厚さを透過する際 に通らざるを得ない最小空隙径を「透過抵抗代表径」と定義し,厚さの異なるコンクリート試験体を液状水 が貫通するまでの時間と,表層透気係数から算出された透過抵抗代表径が高い相関を示すことを確認した。 キーワード:閾細孔径,透過抵抗代表径,透気係数,透水係数,液状水浸潤,表層透気係数

## 1. はじめに

内部の鉄筋を腐食させるなどコンクリート構造物劣化 の原因となる有害因子は、コンクリートの空隙を移動経 路として侵入する。このため、有害因子の侵入に対する 抵抗性は、コンクリートの空隙構造に基づき定量的に評 価できると考えられるが,様々な配合ならびに養生条件 を与えられたコンクリートの物質移動抵抗性と空隙構造 指標との対応に関しては、未だに統一的な見解が得られ ていないのが現状である。筆者ら<sup>1)</sup>はこれまでに、「闌細 孔径」と呼ばれる空隙に注目して検討を進めてきた。本 論文ではまず、室内で作製した供試体および実構造物か ら採取されたコンクリートコアを対象として透水試験, 表層透気試験を実施し、閾細孔径との比較検討を行う。 次に、厚さの異なる供試体を対象に、液状水の貫通に要 する時間を測定する。ここで本論文では、物質がある厚 さを透過する際に通らざるを得ない最小の空隙径を「透 過抵抗代表径」と呼ぶ。透過抵抗代表径はその定義上, ある程度薄い供試体の場合,粗骨材の遷移帯等の影響に より増加する。粗骨材の遷移帯の影響が排除された MIP (水銀圧入法)で測定される透過抵抗代表径が、供試体 厚さに依存しない空隙指標である閾細孔径に相当する。 上記のように,透過抵抗代表径と閾細孔径はいずれも, 連続した物質移動経路の最小径に相当する空隙指標であ る。このような、供試体厚さにより変化する透過抵抗代 表径を表層透気試験により評価し、液状水の貫通に要し た時間と比較することで両者の対応を検討する。

## 2. 閾細孔径と物質移動抵抗性指標との関係

これまでの多くの研究者が、閾細孔径に着目して物質 移動抵抗性を論じている。例えばセメントペーストを用 いた検討により, Powers<sup>2)</sup>は毛細管空隙量と透水係数の間

\*1 東京大学 生產技術研究所 助教 博(工) (正会員)
\*2 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 (学生会員)
\*3 東京大学 生産技術研究所 教授 博(工) (正会員)

に相関があることを、Metha<sup>3)</sup>は闌細孔径と透水係数の間 により強い相関があることを報告している。ここで闌細 孔径とは、研究者により多少定義が異なるものの、一般 的には水銀圧入法(以下 MIP)による空隙構造の測定に おいて、急激な圧入が生じる時点圧力に対応する細孔径 とされている。しかしながら、いずれの手法によっても、 配合や養生を変えた様々な試験体に対して高い相関が得 られてはいない。閾細孔径は、圧入水銀量の増加開始時 点<sup>4)</sup>や増加率が最大となる時点<sup>5)</sup>として評価される例が 多いが、セメントペースト試料と比較して、モルタルや コンクリートから採取された試料では圧入水銀量の増加 が緩慢、すなわち急激な圧入が生じないため、閾細孔径 を同定することが困難である。閾細孔径は物質移動抵抗 性の指標としての可能性は有するものの、その有用性は 十分に確認されていないのが現状である。

## 3. 閾細孔径の評価方法について

#### 3.1 評価手法概要

2 章で述べたように、モルタルやコンクリートから採 取された試料では骨材周りの遷移帯の影響により、MIP における圧入水銀量の増加挙動が緩慢になり、その結果、 閾細孔径の抽出が困難となる。これまでに筆者ら<sup>1)</sup>は、 コンクリート試料の閾細孔径をより明確に抽出する手法 を提案している。ここで本論文では閾細孔径を、MIP 測 定において試料内部まで圧入する際に通らざるをえない 最小の空隙径と定義し、Winslow ら<sup>5)</sup>の報告を参考とし て、MIP により得られる空隙径分布の傾きが最大になる 時点の空隙径がこれに対応するものとする。上記定義よ り、圧力が閾細孔径に到達した時点で試料内部まで水銀 が圧入可能になるため、急激な水銀の圧入が生じる。し かしながらこの際、通常の MIP 測定では 3 次元的に水銀



図-4 図-3の接線の傾き

が圧入され、また試料も1辺が約5mmの立方体と小さ いため、図-1(a)に示すように、闘空隙径に達した時点 での残りの圧入領域は大きくないと考えられる。その結 果,図-2に破線で示すように、傾きが最大になる地点 の判定が困難になるものと考えられる。著者らの提案す る手法では、通常 MIP で使用する 5mm 角の試料を、約 4mm<sup>2</sup>を残してエポキシ樹脂(2液溶剤型エポキシ樹脂系 パテ材)でコーティングし、この試料(写真-1)を対象 に MIP 測定を行う。これにより図-1(b)に示すように, 闘空隙径に達した時点での未圧入領域が大きくなるため, より明確に圧入曲線の急増、すなわち閾空隙径を捉えら れることを期待している (図-2の実線)。本論文で使用 したエポキシ樹脂は、塗布後 20℃60%の条件下で 72 時 間以上乾燥させた場合, MIP において半径 10nm の空隙 への圧入に相当する圧力をかけた場合でも、試験結果に 与える影響は小さいことを確認している。次節では、本 手法により、閾細孔径において急激な圧入が生じている ことの確認を行う。

エボキシューティングにより閾細孔径が的確に抽出さ れていることを確認するため、モルタル試料を対象に水 銀圧入法による測定を実施した。測定ではエポキシの有 無による圧入曲線の変化と、各圧入段階における試料内 部への水銀圧入状況の確認を行った。測定の対象は W/C=55%、C/S=30%のモルタル試料である。打設後24時 間で脱型し、28日間水中養生した後に気中で約半年乾燥 させた供試体である。ここから5mm角の試料を採取し、 24時間アセトンに浸漬し、24時間 D-Dry 処理を行った 後にエポキシを塗布し、3日後に測定を行った。圧入段 階ごとの水銀圧入状況の確認では、8.58MPa(164nm)、 12.8MPa(100nm)、43.5MPa(30nm)の3段階に達した 時点で試料を割裂し、内部を観察した。ここで、上記括 弧内の数字は対応する空隙半径を示している。

まず,エポキシの有無による圧入曲線の変化の比較を 図-3に示す。それぞれ2つの試料を用いているものの, 曲線形状はほぼ等しいことから,測定は再現性を有して いるものと考えられる。図-3の曲線の傾きを図-4に示 すが,普通試料では120nm付近に,エポキシコーティン グした試料では45nm程度にピークが生じていることが 確認できる。この45nmが,本手法の定義における閾細 孔径となる。写真-2は圧入された試料を割裂し,内部 を観察した結果である。図より,通常の試料(a)では圧入 により,164nmから徐々に試料の色が全体的に暗く変化 していることが確認できるが,エポキシコーティングし た場合(b)には100nmまでほとんど変化は生じておらず, 30nmから急激に色が変化する結果となった。セメント ペーストを対象とした場合は,通常試料でも閾細孔径の 抽出は容易であり,圧力が閾細孔径に達した時点で試料 が変色することが報告されている<sup>5)</sup>。よって,上記の結 果は100nmから30nmの間に閾細孔径が存在することを 示していると解釈できるが,この結果は圧入曲線の傾き のピークから求めた45nmという閾細孔径と一致する。 以上の結果は、エポキシコーティングした試料を水銀圧 入法で測定し、その曲線の最大値を求めるという方法で、 急激な圧入の生じる閾細孔径が求められていることを示 していると考えられる。次章では、様々な配合および養 生条件により作製したコンクリート供試体を用いて、閾 細孔径と各種物質移動抵抗性との対応を検討する。

# 室内作製供試体および実構造物から採取されたコアの闘細孔径および表層透気係数,透水係数の測定

室内供試体の材料の諸元を表-1 に、配合を表-2 に

表一1 使用材料の諸元							
セメント	普通セメント(密度:3.15g/cm <sup>3</sup> ),低熱セメント(密度:3.24g/cm <sup>3</sup> ),中庸熱セメント(密度:3.21g/cm <sup>3</sup> )						
細骨材	富士川産川砂(密度:2.62g/cm <sup>3</sup> ,吸水率2.1%)						
粗骨材	秩父両神産砕石(密度:2.72g/cm <sup>3</sup> ,吸水率0.5%,最大寸法20mm)						
混和材	フライアッシュ(ブレーン値:3400cm²/g),高炉スラグ微粉末(ブレーン値:4250cm²/g)						
混和剤	AE 減水剤(リグニンスルホン酸系,密度 1.25g/cm <sup>3</sup> ),AE 剤(アルキルエーテル系密度 1.04g/cm <sup>3</sup> )						

			単位体積重量(kg/m <sup>3</sup> )				3)			丰岡添与		<b>巴思 公田</b>
供試体 名	W/B (%)	養生	W	С	FA or BFS	S	G	AE 減水剤	AE 剤	表層透入 係数 (10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> )	透水係数 (10 <sup>-9</sup> cm/s)	國和 孔径 (nm)
N40-1	40	水中	180	450	-	708	978	C×0.20%	C×0.004%	0.83	2.50	52.5
N55-1	55	水中	180	327	-	805	984	C×0.20%	C×0.004%	1.80	2.47	52.5
N70-1	70	水中	180	257	-	886	960	C×0.20%	C×0.004%	1.65	10.3	52.7
FB55-1	55	水中	172	251	62	791	1007	C×0.20%	C×0.004%	0.665	2.77	15.7
FC55-1	55	水中	169	216	92	783	1017	C×0.20%	C×0.004%	1.40	6.50	42.2
BA55-1	55	水中	179	260	65	787	1002	C×0.20%	C×0.004%	3.80	18.1	126
BB55-1	55	水中	174	159	159	792	1008	C×0.20%	C×0.004%	2.40	25.0	99.3
N70-3	70	送風	180	257	-	886	960	C×0.20%	C×0.004%	53.0	169	301
FB40-1	40	水中	172	345	86	694	998	C×0.20%	C×0.004%	0.335	1.71	23.7
FB70-3	70	送風	172	197	49	873	985	C×0.20%	C×0.004%	142	470	866
BB40-1	40	水中	174	218	218	695	1001	C×0.20%	C×0.004%	0.355	2.05	52.4
BB70-3	70	送風	174	124	124	873	985	C×0.20%	C×0.004%	493	356	577
L55-2	55	封緘	180	327	-	807	987	C×0.15%	C×0.006%	29.0	27.5	437
M55-2	55	封緘	180	327	-	807	987	C×0.15%	C×0.006%	11.5	18.6	67.3
H55-2	55	封緘	180	327	-	804	984	C×0.25%	C×0.002%	4.35	5.34	99.3

## 表-2 供試体配合および養生条件

## 表-3 実構造物におけるコンクリートの仕様

部材	設計 強度 (MPa)	W/C (%)		単位	体積重	量(kg/m <sup>3</sup> )	)	表層透気係数 (×10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> )	透水係数 (×10 <sup>-9</sup> cm/s)	閾細孔径 (nm)
			W	С	S	G	減水剤 (%/C)			
高欄	24	48	165	348	851	936	0.22	0.169, 0.034	4.77, 5.57	23.7, 31.2
橋台	24	50	175	353	757	1025	0.30	17.6	6.57	42.0
橋脚	24	50	175	353	757	1025	0.30	2.31, 23.5	5.25, 4.63	31.4, 67.6
舗装	27-30	42	144	340	682	1192	0.15	0.241	0.494	10.4

示す。供試体名の最初はセメント種類(普通 N,中庸熱 M,低熱 L) もしくは混和材の使用(フライアッシュ:B 種(FB), C 種(FC), 高炉スラグ微粉末: A 種(BA), B 種(BB)) を示しており、次が水粉体比(40~70%)、最後が養生条 件(水中養生(1), 封緘養生(2), 送風養生(3)) を示してい る。普通コンクリート(N)は打設から1日後に、中庸熱セ メント(M)と低熱セメント(L)を用いた供試体は3日後に 脱型し、その後、上記の3種類の養生を各々の供試体に 材齢28日まで与えた後に気中養生とした。ここで送風養 生とは、工場扇により供試体に風を当てることで乾燥を 促進させた養生方法である。測定は材齢2.75年において 実施しており、コンクリートは十分に乾燥した状態であ ると考えられる。MIP で用いる試料は 5mm 角の立方体 とし,3章で述べた方法により闌細孔径を測定した。表 層透気係数はトレント法により、φ15cm×30cmの円柱 供試体を対象に実施した。透水試験は o 10cm の円柱供試 体を厚さ 3.8cm に切断し, 試験開始前に 24 時間の真空飽 和処理を施した後,脱気水を用いて約 2.5MPa の圧力で アウトプット法により実施した。また、韓国の実構造物 を対象に表層透気試験を、またそこから採取されたコア を対象に、MIP による空隙構造分析およびアウトプット 法による透水試験を実施している。実構造物のコンクリ ートの情報を表-3に示す。

まず表層透気係数と閾細孔径との関係を図-5 に示す。 個々の測定結果は,表-2,表-3に示している。ひし形 とアスタリスクのプロットはそれぞれ室内試験体と,現 場で測定された実構造物の結果である。室内試験体の結







写真-3 測定の様子



写真-4 水分による塩化コバルト 紙の変色

果に着目すると、表層透気係数と閾細孔径の間には、配 合や養生にかかわらず、高い相関を有することが確認で きる。実構造物から採取したサンプルの閾細孔径は10.4 ~67.6nm と比較的狭い範囲に分布しているが、これらの 表層透気係数は0.034~23.5×10<sup>-16</sup>m<sup>2</sup>と、3 桁程度異なる 結果となっている。これは、雨掛かりの影響ならびに室 内供試体と異なる装置を用いて測定を行った結果,表層 透気係数に影響が生じたためと考えられる。一方、図-6 に透水係数と閾細孔径との関係をプロットしたものを示 すが,実構造物のデータを併せても両者は高い相関を示 していることが確認できる。上記は、エポキシコーティ ングした試料を用いた MIP により得られた閾細孔径は, 配合や養生の違いのみならず、施工や環境作用の影響を 受けたコンクリートに対しても,透過挙動の指標となり うることを示唆している。以上、閾細孔径と透水係数な らびにある程度乾燥したコンクリートの表層透気係数と の高い相関を確認した。この結果は、透気・透水挙動と もに閾細孔径が支配的な空隙構造指標であること、また 今回の測定条件においては、気体と液状水の透過挙動に 対する化学的な影響は小さいことを示していると考えら れる。

## 5. 浸潤による液状水の貫通挙動に関する検討

液状水の浸潤挙動と空隙構造との関係を検討するため, 表-2に示した配合・養生の円柱供試体(φ10cm×20cm) を切断し,様々な厚さとした試料を液状水が貫通するま での時間を測定した(写真-3)。供試体厚さは1cm~4cm



図-6 透水係数と閾細孔径との関係 (ひし形:室内試験体,アスタリスク:採取コア)



であり、水冷式カッターで切断後、3ヶ月以上、40度の 条件下で乾燥させている。測定材齢は3年である。測定 では、切断面の上面から水道水を供給し、下面に塩化コ バルト紙を張り付け、コンクリート中を貫通した水分に より塩化コバルト紙の色が変化(写真-4)するまでの時 間を測定した。試料の側面はアルミテープで覆い、また 下面は塩化コバルト紙上から透明のセロハンテープで覆 っている。また上面の縁にはラテックス材料により堰を 作製することで、側面からの回り込みを防止した。供試 体数の制限上、表-2の供試体全ての測定は行っていな い。

図-7 に供試体厚さと貫通に要した時間との関係を示 す。ただし、N70-2 は表-2 に示す供試体と同時期に作 製したもので、W/C=70%、28 日まで封緘養生を与えた 供試体であり、MIP によって測定された闌細孔径は42nm である。図より、同様の試験体であれば厚さの増加によ り指数関数的に貫通に要する時間が増加すること、また 試験体により、貫通に要する時間が大きく異なることが 確認できる。厚さの増加による貫通時間の増加は、 BB40-1 と FB40-1 において特に著しい。ここで、液状水 が毛管張力と摩擦抵抗により支配された状態で円管中に 浸潤する場合、式(1)のように表される。

$x = \sqrt{2r\gamma t \cos\theta/3\mu}$	(1)
---	-----

ただし, x:浸潤距離, r:管半径, y:界面張力, t:浸潤に 要する時間, θ:接触角, μ:粘性係数である。すなわち 界面張力,接触角,粘性係数は定数であるとすると,浸 潤に要する時間は浸潤距離の2乗に比例し,管半径に反 比例する。そこで供試体厚さの2乗を,**表-2**に示した 閾細孔径で割った値を指標として,貫通に要する時間と の関係を示したのが図-8 である。また厚さ 3.5cm の N55-1 のデータもプロットしている。決定係数 R<sup>2</sup>は 0.67 程度であり,また供試体ごとに傾き・切片の異なる直線 上に分布する結果となっている。MIPにより測定される 閾細孔径は1章で述べたように,粗骨材の遷移帯の影響 が除外された条件下において,物質が透過する際に通ら ざるを得ない最小の空隙径に相当する。実際には供試体 の厚さが粗骨材の遷移帯程度であれば,その影響により



透過に際して通らざるを得ない最小の空隙径(透過抵抗 代表径)は増加すると考えられるが、厚さにかかわらず **表-2**に示す閾細孔径を一律に用いたことが乖離の原因 であると考えられる。次章では表層透気試験により、供 試体厚さに伴い変化する透過抵抗代表径の評価を試みる。

## 6. 厚さの異なる供試体の表層透気試験

供試体厚さに伴い変化する透過抵抗代表径を検討する ため、表層透気係数と透過抵抗代表径には図-5 に示す ような線形関係が成り立つとの仮定に基づき、厚さの異 なる供試体を対象に表層透気試験を実施した。表-2に 示した配合の円柱供試体 ( φ 10cm×20cm) を水冷式カッ ターにより切断し、40℃に設定した環境試験機で3ヶ月 乾燥した試料の表層透気係数をトレント法により測定し た。ここで供試体が薄い場合、トレント法における測定 深さとされる「影響深さ」を供試体厚さが下回ることに なる。しかしながら「影響深さ」は、表層透気係数から 算出される値であり,物理的な意味は有していない。ま た表層透気係数自体も、測定時間と圧力変化から算出さ れており,試験体の厚さに関する情報は考慮されていな い。上記の解釈に基づき、供試体厚さが影響深さを下回 る場合にも、測定された表層透気係数は有効であると判 断した。また流体の圧力損失には距離と管径が影響する が、コンクリートのように極端に大小の異なる空隙を有 する多孔質材料では,各空隙径の長さを把握することは 不可能である。そこで圧力損失に対して距離は1乗,管 径は2乗で影響することから,空隙径の影響が支配的で あると考え、供試体厚さによる測定値の補正は行ってい ない。測定結果を図-9に示す。図より、供試体厚さが 約25mm以下の場合,薄くなるにつれて表層透気係数が 急増していることが確認できる。これは、最大粒径 20mm の粗骨材を使用しているため、厚さが 25mm 以下の場合 には粗骨材周囲の遷移帯等の粗大空隙の影響により、透 過抵抗代表径が増加するためであると考えられる。一方, 供試体厚さが約25mm以上になるとほぼ一定値に収束し ていることが確認できる。これは定義上、闘細孔径以上 の空隙により貫通した空隙ネットワークが形成されてお



図-9 厚さによる表層透気係数の変化

り、供試体厚さが増加しても、物質はその距離を貫通す る際に閾空隙径以下の空隙を通過する必要が無い。この 厚さの境界値が、今回測定した 25mm に相当するためと 考えられる。いずれの試験体においても約 25mm が境界 となっていることは、コンクリートの緻密さにより変化 する「影響深さ」が原因ではないことを示している。図 -5 の室内供試体の結果から得られた以下の回帰式によ り、図-9の表層透気係数を透過抵抗代表径に換算した。

透過抵抗代表径  $(nm) = 46 \times \sqrt{\overline{\overline{x}}} \overline{\overline{x}} \overline{\overline{x}} (\times 10^{-16} m^2)$  (2) 得られた透過抵抗代表径を指標として、図-8と同様 に貫通に要する時間との関係を整理したものを図-10 に示す。図には、フライアッシュを用いたコンクリート 護岸構造物(W/B=46, 47%)から採取された2つのコア <sup>6)</sup>の分析結果(いずれも厚さ15mm, 表層透気係数は0.53 ×10<sup>-16</sup>m<sup>2</sup> と  $5.4 \times 10^{-16}$ m<sup>2</sup>) も併せて示している。図より、 厚さにより変化する表層透気係数から求められた透過抵 抗代表径により、配合や養生にかかわらず、また実構造 物のデータを含めても非常に高い相関が得られているこ とが確認できる。上記の結果は、ある程度乾燥したコン クリートへの浸潤挙動には透過抵抗代表径という空隙構 造指標が支配的であること、厚さにより変化する透過抵 抗代表径が表層透気試験により適切に評価されているこ とを示していると考えられる。式(1)を増分形式で書き直 すと式(3)となり、 △xの浸潤に要する時間 △t はそれまで の経過時間 t と空隙径 r に依存する。

$$\Delta t = \sqrt{6\,\mu t/\gamma\,\cos\,\theta\,r}\,\Delta x \tag{3}$$

すなわち,一旦微細な空隙を通過すると,その際に生 じた通過時間の大幅な増大がその後の浸潤にも影響する。 これにより,連続空隙の最小径である透過抵抗代表径に よって浸潤挙動が整理されたものと考えられる。今回の 結果はその方法上,液状水の浸潤フロントの最深値,す なわち最も迅速に浸潤した部分を測定したものであり, 貫通時点において試験体は飽和されているわけではない。 実際,今回検討した試料を水中に浸漬した場合,吸水に より数カ月にわたって重量が増加し続ける<sup>6)</sup>。今後は透 過抵抗代表径を非破壊で評価する手法の開発や,拡散な ど他の現象を支配する空隙指標の検討を行う。

## 7. まとめ

本論文で得られた結論を以下にまとめる。

(1) エポキシコーティングした試料を用いた MIP により 得られた閾細孔径は、コンクリートの配合や養生お よび施工や環境条件が異なっても、透水係数と高い 相関を示した。コンクリートが十分乾燥している場 合、表層透気係数と液状水の貫通に要する時間は、 透過抵抗代表径(透過の際に通らざるを得ない最小 空隙径)と高い相関を示した。以上より、今回の検



図-10 貫通に要する時間と指標との関係 (透過抵抗代表径は表層透気係数から換算)

討条件においては、上記現象に対する化学的要因の 影響は小さく、またその挙動は透過抵抗代表径によ り統一的に評価可能であると考えられる。

(2)供試体が薄くなるほど表層透気係数が増加し、また そこから換算された透過抵抗代表径により浸潤挙動 が整理されたことは、物質の侵入距離によって透過 抵抗代表径が変化することを示唆していると考えら れる。

謝辞:本研究は文部科学省科学研究費若手研究(スター トアップ)を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- Yuya SAKAI, et al. : Interpretation of Non-Destructive Test Results for Evaluation of Mass Transfer Resistance of Concrete Members, the 5th International Conference of ACF, 2012
- T. Powers : The Physical Structure and Engineering Properties of Concrete, Research and Development, Bulletin of Portland Cement Association, No. 90, 1958
- P. Mehta and D. Manmohan : Pore size distribution and permeability of hardened cement paste, 7th International Congress Chemistry of Cement, Vol. 3, pp.71-75, 1980
- 4) 後藤孝治,魚本健人:ポルトランドセメントの水和 反応による硬化体細孔構造発達のモデル化,土木学 会論文集, Vol.520, pp.203-211, 1995
- D. Winslow and S. Diamond, "A mercury porosimetry study of the evolution of porosity in Portland cement", Journal of Materials, Vol. 5, pp. 564-585, 1970
- 6) Takahashi, Y., et al. : Chloride ion ingress and its dependence on liquid water penetration in fly-ash concrete, Proceedings of the 2nd International Conference on Durability of Concrete Structures ICDCS2010, pp.285-292, Sapporo, 2010.