

# 非定常状態電気泳動試験を用いた高炉コンクリートの養生影響評価

伊代田岳史<sup>\*1</sup> 原沢蓉子<sup>\*2</sup> 亀山敬宏<sup>\*2</sup>

\*1 芝浦工業大学 工学部土木工学科(〒153-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5)

\*2 芝浦工業大学 大学院工学研究科建設工学専攻(〒153-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5)

**要旨：**塩分浸透を予測することは塩害劣化の耐久性照査を検討する上で非常に重要である。本研究ではそのために必要な拡散係数を近年 NORDTEST で規格化された非定常状態電気泳動試験を用いて算出し簡素化することで、セメント種類の相違を比較した。さらに、異なった養生条件での拡散係数の算出を行い、塩分浸透予測における養生影響部の取り扱いについて提案した。非定常状態電気泳動試験は試験時間を短縮することができるため、再水和の影響などを排除することができ、塩分遮蔽性の高いセメントや W/C、養生などの影響により空隙組織の異なるコンクリートにも適用可能であることが示唆できた。

**キーワード：**非定常状態電気泳動試験、拡散係数、高炉セメント、養生、塩分浸透予測

## 1. はじめに

コンクリート構造物の塩害に対する照査において、フィックの拡散則に基づいて塩分浸透を予測し、鋼材腐食の発錆限界を評価するには、塩化物イオン拡散係数の把握が必要である。コンクリート標準示方書では、拡散係数を算出するための予測式および試験方法が提示されている<sup>1)</sup>。実験から拡散係数を算出する方法としては、塩水浸漬試験や電気泳動試験がある。これらの方法は、セメント種類が限られる、試験期間が長期にわたるといった特徴が挙げられる。さらには、従来の電気泳動試験は定常状態での試験のため、実際の構造物中への塩化物イオンの浸透とは異なると考えられる。一方で、NORDTEST では NT BUILD 492<sup>2)</sup>として、所定の時間通電し、非定常状態の電気泳動試験で拡散係数を算出する試験が規格化されている。また、国内においても、塩化物イオンの浸透速度より拡散係数を算出する方法<sup>3,4)</sup>(以下、土研法と記す)が提案されている。これらの方法は、従来の定常状態の電気泳動試験と比較すると試験期間が短く、かつ省力化された試験方法である。

そこでまず本研究では、従来の電気泳動試験と同じ電気泳動試験装置を用いて非定常状態電気泳動試験を行い、通電時間およびセメント種類が、NT BUILD 492 および土研法の算出式より求められる拡散係数に及ぼす影響について把握することを目的とした。種々のセメントに対するこれらの算出式の適用性および、より短時間での通電が拡散係数算出に適用可能か検討した。その結果をもとに、本研究の非定常状態電気泳動試験から得られる拡散係数算出方法を、従来の算出方法では算出が困難である塩分遮蔽性の高い、高置換高炉セメントを用いたコンクリートへの適用を試みた。

一方で、塩害の進行には使用材料や配合、環境条件、施工上の要因が複雑に影響している。塩害の進行を把握する上で、養生の相違によるコンクリート中の塩化物イオン浸透の把握は重要である。青山ら<sup>5)</sup>は異なった養生を施したコンクリートに海水環境を模擬した塩水浸漬試験により塩分浸透深さの把握を行った。結果として長期において気中養生したものに比べ、水中養生したものの塩分浸透深さが大きくなり、養生方法の違いを明確にできなかった。これは試験期間が長期間に及ぶため未水和セメントが塩水と反応して再水和し、空隙が緻密化することで塩分浸透が抑制された可能性が考えられる。そこで二つ目の目的として、未水和セメントの再水和の影響をできるだけ排除すべく、前述した非定常状態での電気泳動試験により、養生条件の違い及び養生期間の相違による塩分浸透について評価した。

## 2. 試験方法の概要

### 2.1 非定常状態電気泳動試験

試験は従来の電気泳動試験<sup>4)</sup>と同じ装置を用いた。試験体は前処理として飽和水酸化カルシウムを用いて真空放水処理をし、電気泳動試験装置に設置した。その後、陽極側に NaOH 水溶液(0.3N)、陰極側に NaCl 水溶液(3%)をそれぞれ注入した。通電時間はコンクリート技術シリーズ<sup>4)</sup>に通電時間と塩化物イオン浸透深さの間には明確な線形性が認められ、通電時のコンクリート中の塩化物イオンの浸透速度は一定であると記載されているため、これを参考に塩化物イオンが供試体を全通過する前、3、6、12、18、24、36 時間を通電時間と設定した。セメント種類や水セメント比の違いにより塩化物イオンの浸透しやすさが異なるため、通電時間は配合、

Table 1 Mix Proportion for different kind of cements

Cement Type	W/C (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )					SL (cm)	Air (%)		
			W	C	BFS	FA	S			G	
N	55	48	172	313	—	—	869	968	14.5	5.8	
H				313	—	—	869	967	14.5	4.5	
L				313	—	—	872	971	13.5	6.0	
BA				219	94	—	866	963	9.0	4.3	
BB		50	172	188	125	—	868	965	13.0	3.7	
BC					92	219	—	903	927	10.0	3.6
FB					250	—	63	896	919	16.5	4.0

養生ごとに一定ではない。それぞれの通電が終了した後、供試体を電気泳動装置から取り出し、割裂した。割裂後、割裂面に硝酸銀溶液(0.1N)を噴霧し、白色に呈色した部分の両側 10mm を除いた部分を 10mm ごとに 7 点測定し、その平均値を塩化物イオン浸透深さとした。両側 10mm 付近は水漏れしている恐れがあり、浸透深さが大きくなることが考えられるため、供試体の両側 10mm を測定範囲から除いた。また、印加電圧は塩分遮蔽性によらず 30V と一定にした。

## 2.2 拡散係数の算出方法

2.1 で得られた結果をもとに NT BUILD 492 の式 [1]<sup>2)</sup> および土研法の式 [4]<sup>3)</sup> より拡散係数を算出した。以下にそれぞれの拡散係数算出式を示す。NT BUILD 492 では、呈色部分における塩化物イオン濃度  $C_d \approx 0.07N$  (以下、 $C_d$ ) は、普通ポルトランドセメントを使用した場合とされており、セメント種類が限定されていると考えられる。本研究ではこの  $C_d$  値を他のセメントにもあてはめて拡散係数を算出し、土研法より求められた拡散係数と比較することとした。

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{X_d - \alpha \sqrt{X_d}}{t} \quad [1]$$

$$E = \frac{U-2}{L} \quad [2]$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left( 1 - \frac{2C_d}{C_0} \right) \quad [3]$$

ただし、 $D_{nssm}$  : 拡散係数 (m<sup>2</sup>/s)

$z$  : 塩化物イオンの価数の絶対値  
 $z=1$

$F$  : ファラデー定数

$F=9.648 \times 10^4$  (J/(V · mol))

$R$  : 気体定数

$R=8.314$  (J/(K · mol))

$T$  : 絶対温度 (K)

$U$  : 印加電圧 (V)

$L$  : 試験体厚さ (mm)

$X_d$  : 浸透深さ (m)

$t$  : 試験時間 (s)

$C_d$  : 呈色領域での塩化物イオン濃度  
 $\approx 0.07(N)$

$C_0$  : 陰極側溶液の塩化物イオン濃度  
 $\approx 2(N)$

$\operatorname{erf}^{-1}$  : 誤差関数

$$D = k \cdot \frac{RT}{zF} \cdot \frac{L}{\Delta\phi} \quad [4]$$

なお、浸透速度  $k$  は通電時間における塩分浸透深さの関係において、原点を通る近似直線の傾きより算出した。また  $\Delta\phi$  は試験体にかけた電圧を表す。

## 2.3 塩水浸漬試験

養生し終えた 100×100×400mm の角柱試験体を、飽水処理を行わずにアルミテープとシーリング材を用いて打設面を含む 4 面と側面の片側をシールし、1 面開放とした。その後、濃度 3.0% の塩水に浸漬させ、所定の期間において供試体を割裂し、2.1 と同様に硝酸銀溶液(0.1N)を噴霧し、白色に呈色した部分を 10mm ごとに 9 点測定し、その平均値を塩化物イオン浸透深さと定義した。

## 3. 非定常状態電気泳動試験適用性実験

### 3.1 試験体の概要

試験体配合を Table 1 に示す。配合は水セメント比、単位水量を一定とした。セメントは普通ポルトランドセメント(N)、早強ポルトランドセメント(H)、低熱ポルトランドセメント(L)、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を 30%、40%、70% 質量置換して試製した高炉セメント A、B、C 種相当(BA、BB、BC)、フライアッシュを 20% 質量置換したフライアッシュセメント B 種相当(FB)を使用した。また、骨材には千葉県君津産・山砂(記号：S、密度 2.61g/cm<sup>3</sup>)および、埼玉県秩父産・砕石(記号：G、密度 2.72g/cm<sup>3</sup>)を用いた。コンクリートを  $\phi 100 \times 200$ mm の円柱型枠に打込み、翌日に脱型を行い、材齢 28 日まで水中養生した。養生終了後、中央部の 100mm を二分割に切り出し、 $\phi 100 \times 50$ mm を試験体として使用した。

### 3.2 実験結果

セメント種類ごとの各通電時間と塩化物イオン浸透深さの関係<sup>6)</sup>を Fig. 1 に示す。セメント種類によらず、通電時間が長くなるほど浸透深さは大きくなった。同一通電時間での浸透深さは、L、FB、N、H、BA、BB、BC の順に大きい。N と H に関しては、どの通電時間においてもほぼ同程度の浸透深さとなった。L と FB はそれぞれ 18 時間、36 時間までの通電を終了した時点で、割裂面に硝酸銀溶液を噴霧すると割裂面全体が白色に呈色したため、浸透深さはそれぞれ 12 時間、24 時間通電した試験体までを測定した。L および FB は水和の進行が遅いため、28 日水中養生後でも浸透深さが大きくなったと考えられる。他のセメントでは、通電 36 時間の時点で

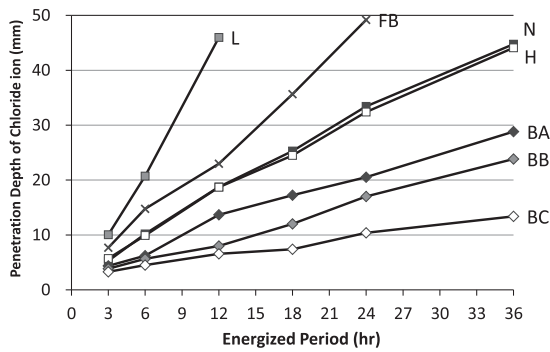


Fig. 1 Results of Chloride penetration depth

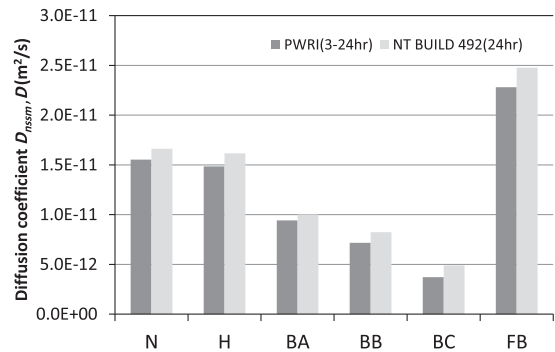


Fig. 2 Diffusion coefficient on different cement

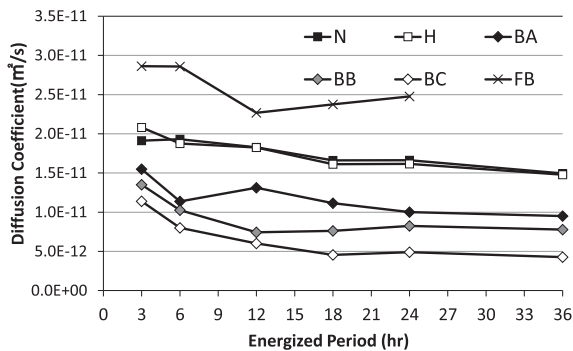


Fig. 3 Diffusion coefficient on each period

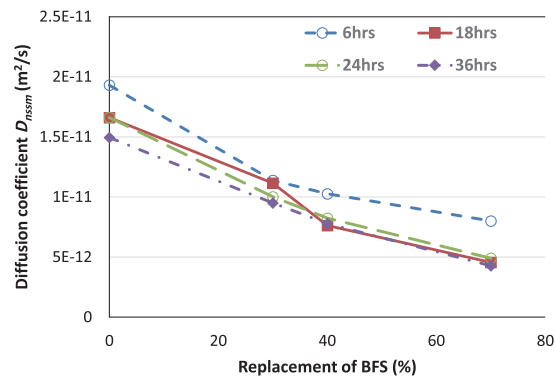


Fig. 4 Effect on different replacement ratio of BFS

においても白色に呈色した部分は 50mm に達しなかった。

### 3.3 拡散係数の比較

#### (1) 拡散係数算出式の影響

まず、拡散係数算出式の影響を捉えるため、一般的に使用頻度の高い N において、各算出式による拡散係数の比較を Fig. 2 に示す。式[1]および式[4]を用いて、それぞれ 24 時間通電した時点の浸透深さより  $D_{nssm}$  を、3 時間から 24 時間の浸透速度より  $D$  を算出し比較した。比較した結果、各算出式による拡散係数の差は小さい。したがって、一定電圧下で所定時間通電した試験体のうち、NT BUILD 492 を用いて 1 通電時間で得られた浸透深さから算出した拡散係数と、土研法より浸透速度から算出した拡散係数に大差はないといえる。

#### (2) セメント種類の影響

(1)に記した通り、各拡散係数算出式の差は N においてそれぞれ小さく同程度であった。そこで、NT BUILD 492 で N のみに限定されていた  $Cd \approx 0.07N$  を N 以外のセメントにも適用して検討した。Fig. 2 にはさらにセメント種類ごとに各拡散係数算出式を比較したグラフを示す。いずれのセメントにおいても拡散係数の差は小さく、N および BB のそれぞれの差とほぼ同じくらいとなった。したがって、NT BUILD 492 による拡散係数の算出方法は、N 以外のセメントにおいても土研法から得られる拡散係数と大差ないことを確認した。

#### (3) 通電時間の影響

Fig. 3 に NT BUILD 492 よりそれぞれの通電時間時

の浸透深さをを用いて算出した拡散係数をセメント種類ごとに示す。FB は通電時間 24 時間までの拡散係数のみ算出した。いずれのセメントでも通電時間 18 時間までは通電時間が長くなるほど拡散係数は小さくなり、その後は概ね横ばいになる傾向が示された。また、いずれのセメントも通電時間の経過に伴い浸透深さが増加する傾向にあるのに対し、浸透深さから算出した拡散係数は、ある一定の時間までは通電時間が長くなるほど低下した。電圧をかけていても拡散係数が低下したのは、塩分固定化や空隙構造の緻密化による影響が考えられるが、今後検討をする必要がある。

### 3.4 非定常電気泳動試験の有用性

以上の結果よりセメントの種類が異なった場合においても、非定常状態電気泳動法により塩分遮蔽性を評価することが可能であり、1 通電時間より拡散係数  $D_{nssm}$  を算出することができた。ここで、従来の試験方法では、拡散係数の算出が困難であると考えられる高置換率の高炉セメントに対して、非定常状態電気泳動試験が適用可能かどうかを検討する。Fig. 4 に NT BUILD 492 より算出した拡散係数と高炉スラグ微粉末の置換率の関係を示す。高炉スラグ微粉末の置換率は 0、30、40、70 % とした。通電時間によって多少のばらつきは生じたものの通電時間が長くなるほど決定係数  $R^2$  は大きくなり、通電時間が 18 時間以上になると傾きと切片はほぼ同程度となった。これより高置換高炉セメントに対しても非定常状態電気泳動試験で 18 時間以上の通電を行うこと



Table 2 Mix Proportion for test of curing conditions

Cement type	W/C (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )					Fresh concrete		
			W	OPC	BFS	S	G	Slump (cm)	Air (%)	Temp. (°C)
N	30	50	165	550	/	804	838	8.5	4.5	25.2
BB				275	275	794	828	11.5	3.8	23.2
N	60		175	292	/	897	935	9.5	4.8	25.5
BB				146	146	892	930	11	4.9	25.8

Table 3 Curing conditions

condition	Curing days					
	1	3	5	7	...	28
Dry	Drying condition (20 °C, RH60 %)					
Seal-3	Sealed (not removed)			Water condition		
Seal-5	Sealed (not removed)				Water condition	
Seal-7	Sealed (not removed)					Water condition
Sealed	Water condition					
Water	Water condition					

により、拡散係数の算出が可能であることが示唆された。

#### 4. 養生の影響評価試験

##### 4.1 試験体の概要

3章においてセメントの種類が異なっても非定常状態電気泳動試験が適用可能であることを受け、ここでは養生の影響を評価可能か整理することとする。使用したセメントは前述した普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種の二種類とした。なお使用した骨材等は3.1と同様である。また、水セメント比を30%と60%の二種類設定し、Table 2のような配合のコンクリートを用いた。なお、配合の区別のためセメント種とW/Cを合わせてN30のように表記する。一般には電気泳動法に用いる供試体は3.1のようにφ100mm×200mmの円柱供試体をコンクリートカッター等で厚さ50mmずつにカットし、中央のφ100mm×50mmの部分を用いる。しかし、既往の研究<sup>7)</sup>から乾燥の影響は表層から30mm程度しか受けないことを考慮し、養生後にカットして試験体を作製する方法では乾燥の影響を全断面で受けず養生の影響を評価できないものと考えられる。そこでPhoto. 1のようにあらかじめ供試体をφ100mm×50mmで作製することで、乾燥の影響を受けやすくするようにした。養生条件はTable 3に示すように、気中および水中養生では打設後一日で脱型をし、全断面を開放して材齢28日まで気中(20°C, RH60%)および水中養生した。これに加え、脱型日を3、5、7、28日としそれぞれ封緘養生し、脱型後は全断面を気中に暴露して材齢28日まで気中養生したものについても検討した。このように内部の空隙構造の違いや水と状態が異なる試験体を作製し実験を行った。なお、電気泳動には打設面を陽極(NaCl)側に設置することで統一した。



Photo. 1 Testing Specimens

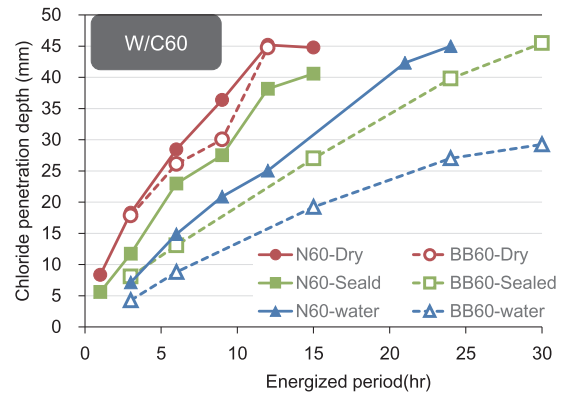


Fig. 5 Result of depth on different curing (60 %)

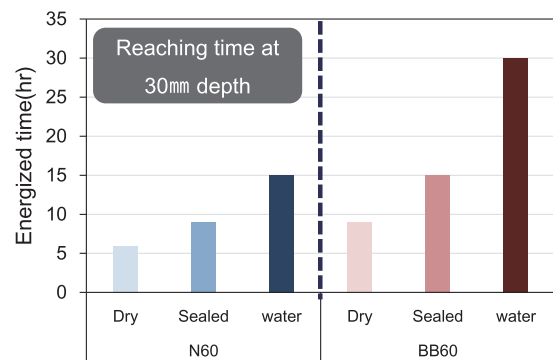


Fig. 6 Energized time of reaching 30mm depth

また塩水浸漬試験には、50×100×400mmの角柱を作製し、電気泳動試験に用いた供試体同様に乾燥の影響を受けやすくした。

##### 4.2 非定常電気泳動試験の実験結果

###### (1) 養生方法と塩化物イオン浸透深さの関係

N60とBB60の塩化物イオン浸透深さの測定結果を養生別にFig. 5に示す。Nは実線、BBは破線で表した。N、BBともに気中、封緘、水中の順に浸透深さは大きくなった。しかし、気中養生に関しては、N、BBに差が無いことから養生を十分に行わなければ、高炉セメントを使用しても塩分遮蔽性は得られないことが分かる。一方で、気中養生と比較して封緘養生、水中養生を行うことで塩化物イオン浸透深さが小さくなっていることから、養生を施すと高炉セメントの特徴である塩分遮蔽性を得ることができる。そこでFig. 6に塩化物イオン深さ30mmに浸透するまでの通電時間の関係を示す。各養生方法でNよりもBBの方が通電時間を要していることから、塩化物イオンが浸透しにくいことが分かる。こ

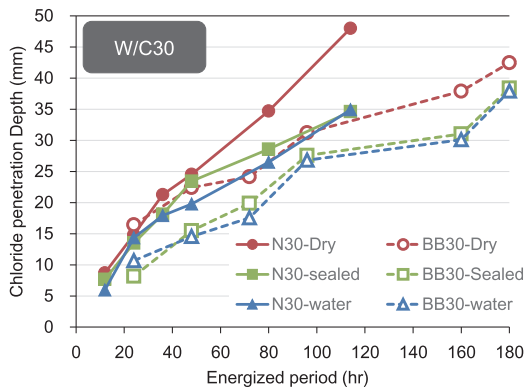


Fig. 7 Result of depth on different curing (30 %)

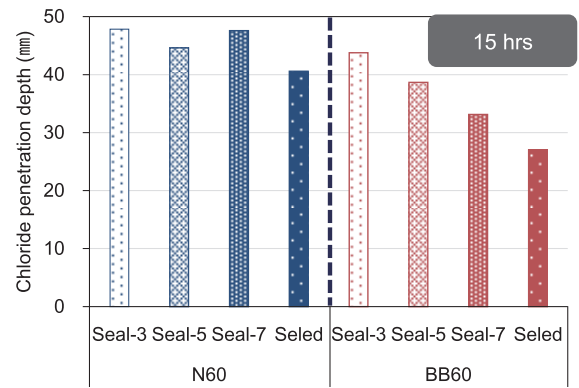


Fig. 8 Result of depth at 15 hrs energized

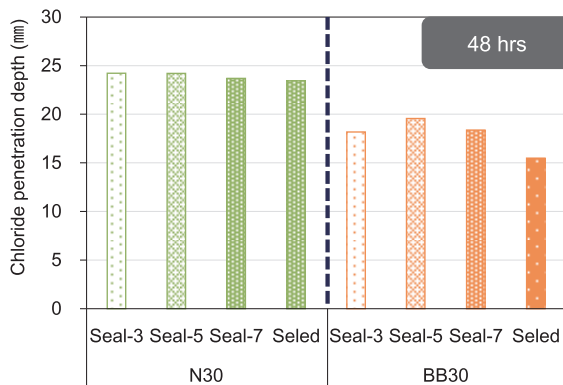


Fig. 9 Result of depth at 48 hrs energized

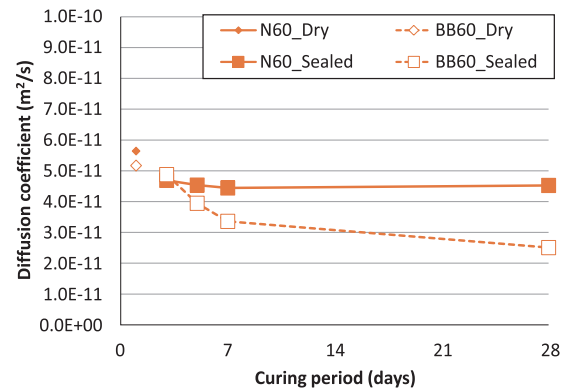


Fig. 10 Effect of curing period on Diffusion

の要因としては、N よりも BB の方が緻密になる<sup>8)</sup> こと、高炉セメントの高い塩分固定化能力によるもの<sup>9)</sup> であると考えられる。次に N30 と BB30 の塩化物イオン浸透深さの関係を Fig. 7 に示す。水セメント比 60 % 同様に、N、BB ともに気中、封緘、水中の順に浸透深さは大きくなり、BB における塩化物イオンが浸透しにくいことも同様である。しかし、水セメント比 60 % の BB は十分な養生をすることにより塩分遮蔽性が高くなっていたが、低水セメント比である 30 % では養生の有無によらず浸透深さの変化は小さいことが示された。さらに、封緘養生と水中養生の浸透深さが同程度であるという結果が得られた。これは水和反応の進行によるものではなく、元々低水セメント比のコンクリートは水の量が少なく、水和反応で結合水が消失したことにより形成される空隙が少ないため高い物質移動抵抗性を保持し、このような結果になったと考えられる。

(2) 養生期間と塩分浸透深さの関係

通電時間 15 時間時の N60、BB60 の養生期間の違いによる塩化物イオン浸透深さを Fig. 8 に示す。概ね N、BB ともに封緘養生の期間が増加すると浸透深さが小さくなる傾向を示した。しかし、N は封緘養生の期間が増加することによる浸透深さの違いは小さいが、BB は浸透深さの違いが顕著に表れている。このことから、BB においては養生期間を延ばすことにより、コンクリートの塩分遮蔽性が向上することが示唆された。よって、実

現場においても養生を延ばすことは重要であるといえる。

通電時間 48 時間時の N30、BB30 の養生期間の違いによる塩化物イオン浸透深さを Fig. 9 に示す。N30 に関してはほぼ養生期間による浸透深さの違いは見られなかった。同様に BB においても養生期間の違いによる浸透深さの違いがあまり見られなく、N と同様な結果が得られた。この結果から、低水セメント比の場合、セメント種類による浸透深さの違いは見られるが、養生期間の違いによる影響は小さいと考えられる。このように養生の影響は W/C により大きく変化するといえる。

(3) 拡散係数の比較

Fig. 10 は W/C 60 % のコンクリートにおける通電時間 48 時間時点での NT BUILD 492 を用いて算出した拡散係数  $D_{nssm}$  の結果を示したものである。この結果より養生期間が長くなるほど拡散係数は小さくなっていることが分かる。ただし、N においては、養生 3、5、7 日における差は大きくないが、BB では養生日数の増加とともに著しい拡散係数の減少が認められる。このことから、BB は養生に非常に敏感であり、養生を行えば塩分遮蔽性が向上するのに対し、怠ると著しく低下することが分かる。

4.3 塩水浸漬試験との相関

塩水浸漬試験の結果を Fig. 11 に示す。N、BB ともに電気泳動試験結果と同様に、概ね気中、封緘、水中の順に浸透深さが大きくなった。封緘養生に着目すると、

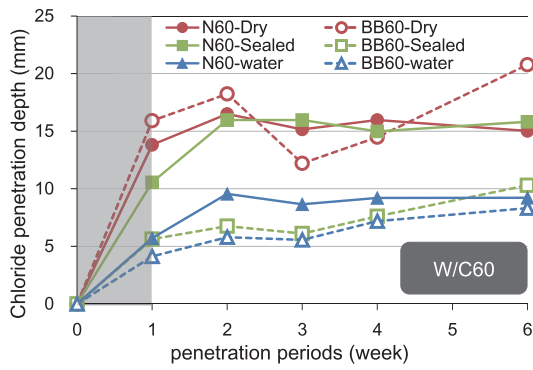


Fig. 11 Result of Depth on penetration test

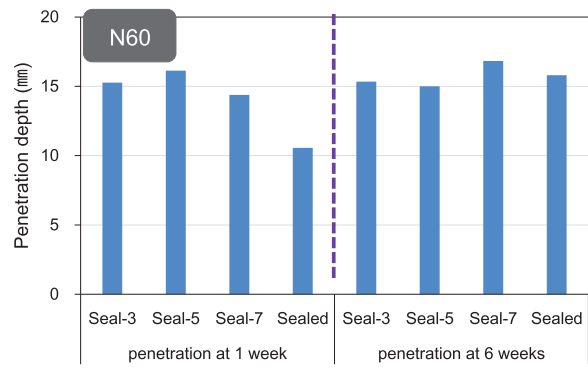


Fig. 12 Penetration Depth on N60

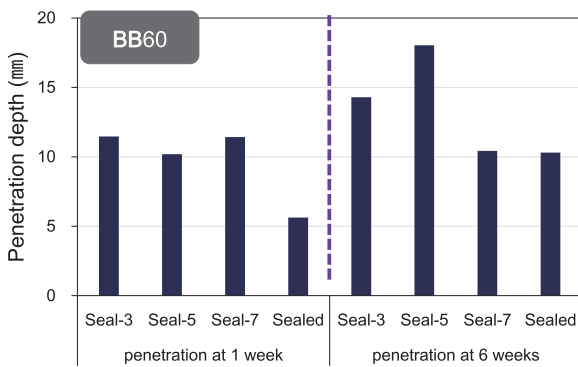


Fig. 13 Penetration Depth on BB60

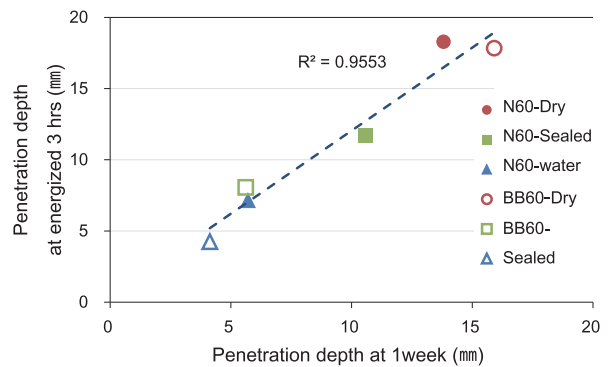


Fig. 14 Relationship with different testing method

BB においては水中養生と同程度の浸透深さであり一方、N においては気中養生と同程度であり、セメント種類に対して封緘養生の影響が異なることが示された。このような傾向が得られたことに対して考えられることは、供試体内部の水分量の違いによるものがある。小池ら<sup>10)</sup>によると飽水状態より絶乾状態の方が、塩分浸透深さが供試体の深部まで到達すると報告されている。これは水の浸透とともに塩化物イオンも浸透していることになる。さらに、N と BB の結合水量の違いを考慮すると、BB の封緘養生より N の方が水和進行しているため、内部の含水率が低いと考えられ、浸透させたことで内部に多く水分を供給し、それと同時に塩化物イオンの浸透も起こり、このような結果になったのではないかと考えられる。

水セメント比 60 % における養生期間の違いによる塩化物イオン浸透深さを Fig. 12 および Fig. 13 に示す。N は浸漬初期で養生期間の違いにおける浸透深さの変化が見られる。しかし、浸漬長期においては浸透深さに違いが見られないという結果が得られた。一方、BB では浸漬初期、長期においても養生期間の違いによる浸透深さの違いが見られた。このことより電気泳動試験の結果同様、N より BB の方が養生の影響を受けることが示された。

#### 4.4 非定常電気泳動試験の養生良否判定

非定常状態電気泳動試験と塩水浸漬試験を比較すると概ね養生方法の違いや期間による違いに同様な傾向があったため、塩分浸透を把握することは可能であると考

えられる。さらに、電気泳動試験では試験期間が短いため未水和セメントの影響を低減することができ、養生の影響を正しく把握できたと考えられる。

Fig. 11 から浸漬初期とその後では、塩化物イオンの浸透速度が異なっている。これはコンクリートの表層付近は養生が不十分になり、内部との養生度合いが異なるため、空隙構造等がことなると考えられる。そこで、浸漬初期では急激に塩分が浸透し、その後は緩やかに浸透したものと考えられる。これを踏まえ、塩水浸漬試験の浸漬 1 週目までの浸透深さと非定常状態電気泳動試験の通電時間 3 時間までの浸透深さとの関係を Fig. 14 に示す。これより電気泳動試験で得られた結果と塩水浸漬試験初期で得られた結果に相関性が認められた。このことから、電気泳動試験によって得られる結果はコンクリートの表層付近の塩化物イオンの浸透を評価していると考えられる。

#### 5. 養生条件と塩分浸透に関する考え方

Fig. 15 は養生における乾燥の影響範囲を模式的に表したものである。養生が不足すると、水和に必要な水分がコンクリート表層から逸散してしまうことから、十分な水和反応が継続できず、粗な空隙が残存してしまう<sup>11)</sup> こととなる。そのような状況では、4 章で述べたように拡散係数が比較的大きな状態となることが推測される。しかしながら、その影響範囲は表層から大きくても 30mm 程度であることから、30mm 以深では養生を施



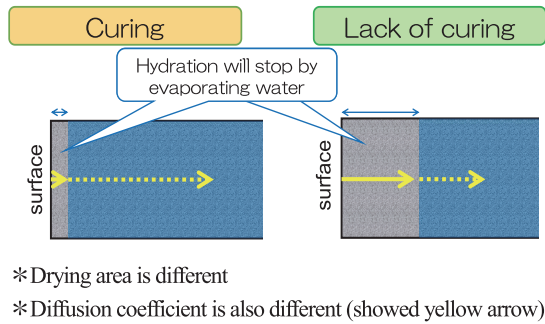


Fig. 15 Images for effect of curing

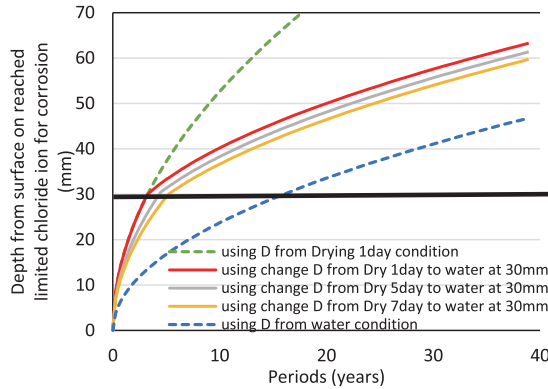


Fig. 17 Simulation of chloride penetration

されたコンクリートの拡散係数を保有することとなる。飛来塩分等により塩化物イオンが浸透する場合には、養生不足である場合、極表層コンクリートは大きな拡散係数をもつために早期に塩化物イオンが浸透する恐れが考えられ、水セメント比に応じた拡散係数を一様に与える現状では、塩分浸透速度を危険側に見積もる可能性がある。そのため表層部における拡散係数を養生の影響を考慮した設定とすることが必要であると考えられる。

そこで、ここでは 4.2(3) で得られている非定常状態電気泳動試験から得られた拡散係数  $D_{nssm}$  と示方書の算出式(2012)から得られる拡散係数を比較した結果を Fig. 16 に示す。数値に大きな乖離は存在しているが、両者には一定の関係にあると考えられる。Fig. 10 に示した養生条件の異なる場合に得られた非定常状態電気泳動試験から得られた拡散係数を Fig. 16 の関係式を用いて示方書の拡散係数に換算した。その換算した拡散係数を用いて、養生条件を考慮した塩分浸透予測を試みた。養生の影響範囲を 30mm と固定し、深さ 30mm までは養生の影響を受けた拡散係数を、一方 30mm 以深では水中養生の拡散係数を設定し、深さ 30mm 位置で鉄筋腐食限界塩分濃度に到達した時点で拡散係数を変更させる方法で、塩分浸透深さを経時的に予測した結果の一例(ここでは BB を用いた例)を Fig. 17 に示した。このように養生の影響部を塩分浸透予測に取り込めれば、養生の影響を考慮した鉄筋腐食開始時期の予測が可能であると考えられる。

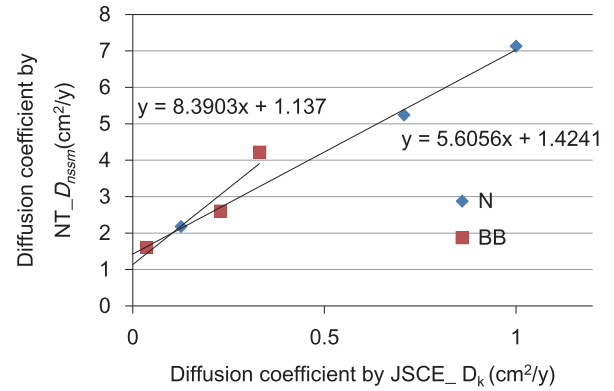


Fig. 16 Compared with diffusion coefficient

## 6. まとめ

本研究により得られた成果を以下にまとめる。

- 1) 非定常状態電気泳動試験において通電時間を変化させて試験を行った結果、いずれのセメント種類においても、通電時間が長くなるほど塩化物イオン浸透深さは大きくなった。
- 2) 非定常状態電気泳動試験から得られた塩分浸透深さならびに浸透速度を用いて NT BUILD 492 および土研法による拡散係数を比較した。その結果、拡散係数には差があまり生じなかった。したがって浸透深さ一点から算出する NT BUILD 492 と、浸透速度から算出する土研法では算出される拡散係数には大差がないといえる。
- 3) NT BUILD 492 より通電時間ごとに算出した拡散係数は、いずれのセメントにおいても 18 時間までは通電時間が長くなるほど低下し、次第に一定となる傾向がみられた。そのため、非定常状態電気泳動試験において 18 時間以上の通電をすることで通電時間 1 点から非定常状態における拡散係数  $D_{nssm}$  を算出できた。
- 4) 高置換率の高炉セメントに対して、NT BUILD 492 より通電時間ごとに算出した拡散係数は、いずれの通電時間においても高炉スラグ微粉末の置換率と相関関係にある。したがって、高置換高炉セメントにおいて、非定常状態電気泳動試験より拡散係数の算出が可能であることが示唆された。
- 5) 非定常状態電気泳動試験からは、気中、封緘、水中の順に塩化物イオン浸透深さは大きくなるという結果が得られた。通電時間を短くしたことで再水和の影響を小さくできたと考えられる。また、N よりも BB の方が浸透しにくいという結果が得られた。
- 6) 養生期間の違いによる塩化物イオン浸透深さの検討から、高水セメント比においては N より BB の方が養生の影響を受けやすく浸透深さに変化が見られた。N は封緘養生 3 日以降になると塩化物イオンに対する抵抗性に変化はみられず、BB は養生期間が長いほど塩化物イオンに対する抵抗性は向上した。一方、低水セメント比においては養生期間によ

る変化は小さく、養生の影響は少ないと考えられる。

- 7) 非定常状態電気泳動法により求めた拡散係数  $D_{nssm}$  を換算して用いることで、養生の影響を受けた領域を考慮した塩分浸透予測が可能となることが示唆できた。

#### 参考文献：

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕(2012)
- 2) Nordtest NT BUILD 492, "Chloride Migration Coefficient from Non-steady State Migration Experiment", Nordtest, Finland (1999)
- 3) 渡辺豊、河野広隆、渡辺博志：コンクリートの急速塩分浸透性試験による塩化物イオン拡散係数の算定について、コンクリート工学年次論文集、Vol. 24、No. 1、pp. 663-668 (2002)
- 4) 土木学会：コンクリートの塩化物イオン拡散係数試験方法の制定と規準化が望まれる試験方法の動向、コンクリート技術シリーズ 55 (2003)
- 5) 青山和樹、豊村恵理、伊代田岳史：養生方法および期間の相違が塩分浸透に及ぼす影響、第 39 回土木学会関東支部技術研究発表会、V-7 (2012)
- 6) 原沢蓉子、細川佳史、伊代田岳史：通電時間およびセメント種類が非定常状態電気泳動試験の拡散係数に与える影響、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、第 13 巻、pp. 27-32 (2013)
- 7) 伊代田岳史ほか：養生とその後の環境による内部湿度の相違が乾燥収縮に与える影響、コンクリート工学年次論文集 Vol. 32、No. 1、pp. 111-116 (2010)
- 8) 檀康弘ほか：高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの養生条件と耐久性の関係、土木学会論文集、E Vol. 65、No. 4、pp. 431-441 (2009)
- 9) 松崎晋一郎、伊代田岳史：高炉スラグ微粉末の置換率および水結合材比が塩化物イオンの拡散性状に与える影響、第 66 回土木学会年次学術講演会、V-216、pp. 431-432 (2011)
- 10) 小池賢太郎ほか：モルタルの含水状態と水分移動が塩分浸透特性に与える影響、土木学会年次学術講演会、V-130 (2012)
- 11) 伊代田岳史、魚本健人：若材齢時の水分履歴がセメント硬化体の内部組織構造形成と物理特性に及ぼす影響、コンクリート工学論文集 Vol. 15、No. 2、pp. 25-34 (2004)

## EVALUATION FOR CURING EFFECT ON BLAST FURNACE SLAG CONCRETE BY UNSTEADY-STATE ELECTROPHORESIS TEST

Takeshi IYODA<sup>\*1</sup>, Yoko HARASAWA<sup>\*2</sup> and Takahiro KAMEYAMA<sup>\*2</sup>

\*1 SHIBAURA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, Dept. of Civil Engineering (3-7-5, Toyosu, Koto-ku, Tokyo 153-8548, Japan)

\*2 SHIBAURA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, Graduate School of Engineering and Science, Division of Architecture and Civil Engineering (3-7-5, Toyosu, Koto-ku, Tokyo 153-8548, Japan)

**ABSTRACT** : It is very important to predict chloride penetration, when considering durability of deterioration by salt attacks. In this research, in order to calculate required diffusion coefficient, it use the unsteady-state electrophoresis test on standardized by NORDTEST for simplified test. It is discussed to compare with the difference of cement types. Furthermore it was calculated the diffusion coefficient in different curing condition and curing periods. It proposed the chloride penetration depth using this this on influence area of curing condition. Since the unsteady-state electrophoresis test ca shorten testing time, it can eliminate the influence of re-hydration. For this reason, the influence of cement type, low W/C and curing can be dealt with the prediction of chloride penetration.

**KEY WORDS** : Unsteady-state electrophoresis test, Diffusion coefficient, Blast furnace slag cement, curing, Prediction for chloride penetration