

# 論文 非定常状態電気泳動試験を用いた養生方法および期間の違いによる塩分浸透の評価

亀山 敬宏\*1・黒田 伸吾\*2・伊代田 岳史\*3

**要旨:** 塩分浸透に及ぼす影響としてセメント種類や養生方法などがある。そのため塩害を評価する上で、養生の影響を捉えることは重要である。しかし塩分浸透に対する養生の影響を捉えている研究は少なく、塩水浸漬試験においては未水和セメントの影響を受けるという報告がある。これでは養生の影響を正しく評価できない可能性がある。そこで本研究は、非定常状態電気泳動試験を用いて試験期間を短縮し、未水和セメントの再水和の影響を低減させ、養生方法および期間の違いによる塩分の浸透を把握することを目的とした。その結果、非定常状態電気泳動試験による養生が塩分浸透に及ぼす影響を把握できることが示唆された。

**キーワード:** 非定常状態電気泳動試験, 塩水浸漬試験, 養生方法, 塩分浸透

## 1. はじめに

コンクリートの劣化の原因の一つに塩害がある。この塩害は鋼材の腐食に寄与し、耐久性や構造性能を低下させる要因とされている。この塩害に対する劣化予測における塩化物イオンの浸透予測が Fick の拡散方程式を用いて行われている。この劣化予測は各種試験から得られる拡散係数から求められるが、その拡散係数は試験方法により異なることから、コンクリートの劣化予測を正しく判断できていない可能性がある。また、コンクリート標準示方書〔設計編〕<sup>1)</sup>に拡散係数の予測式が記載されているが水セメント比、セメント種類のみ考慮されているが水セメント比、セメント種類のみ考慮されているが、養生条件は考慮されていない。しかし、環境条件や養生条件により塩化物イオンの浸透特性は変化し、予測精度は大きく低下する可能性がある。この要因としては、養生による空隙の違いや内部の乾燥状態の違い等が考えられる。また、養生はコンクリート構造物が所要の耐久性を保持するために必要なことである。しかしながら、塩化物イオン浸透に対する養生の影響を明確に捉えている研究は少ない。

養生の影響を捉えている報告として、著者らの研究<sup>2)</sup>では、水セメント比 45%、セメント種類は普通ポルトランドセメント、高炉セメント B 種、とし、養生方法は気中、封緘、水中養生で、浸漬試験および乾湿繰返し試験が行われている。その結果を図-1, 2 に示す。N, BB ともに試験方法によらず、概ね気中、封緘、水中の順に浸透深さが大きくなったが、N の浸漬試験の結果においては、浸透深さが封緘よりも気中養生の方が小さいという結果になったと報告している。この結果の初期と長期に着目すると、初期では封緘養生の方が塩分浸透深さが小さいという結果になっていることから、気中養生は水和

が進行しておらず、未水和セメントが残存しており、この未水和セメントと塩水が再水和し劣化期間が経つにつれ、緻密化したため塩分浸透しにくくなったと考えられる。しかし、劣化期間の間に水和の進行が起きると正しく養生を評価できていないと考えられる。また、このような結果になった要因としては供試体の影響も考えられる。この実験では供試体の開放面を 2 面設けていて、片側気中、片側封緘養生とし、同一供試体で測定を行っている。そのため内部の養生状態や乾燥状態が変化していることが予想され、この影響により、このような結果が得られた可能性も考えられる。

そこで本研究では、非定常状態電気泳動試験<sup>3,4)</sup>を用いて、試験期間を短縮することで、未水和セメントの再水和の影響を低減させ、さらに養生方法の違い、養生期間の違いによる塩分の浸透を把握し、評価することを目的とした。また、浸漬試験も行い試験方法、供試体条件の比較、検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体諸元

使用したセメントは普通ポルトランドセメント（以後 N と示す）と高炉セメント B 種（以後 BB と示す）の 2 種類とした。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。コンクリートの計画配合を表-1 に示す。

#### (1) 非定常状態電気泳動試験に用いた供試体

一般には電気泳動法に用いる供試体は φ 100mm × 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 φ 100mm × 50mm の部分

\*1 芝浦工業大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (学生会員)

\*2 芝浦工業大学 工学部土木工学科

\*3 芝浦工業大学 工学部土木工学科 准教授 博士 (工学) (正会員)

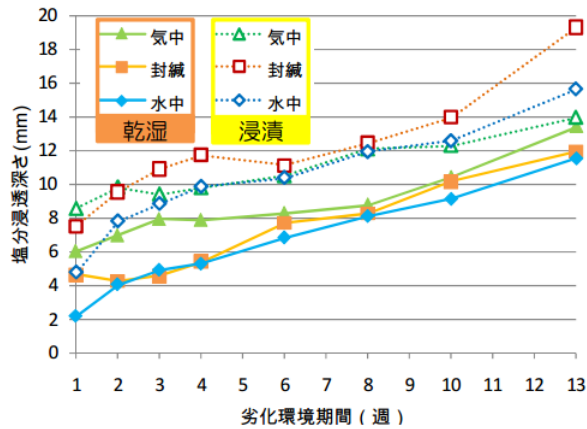


図-1 養生方法と塩分浸透深さの関係 (N) <sup>2)</sup>

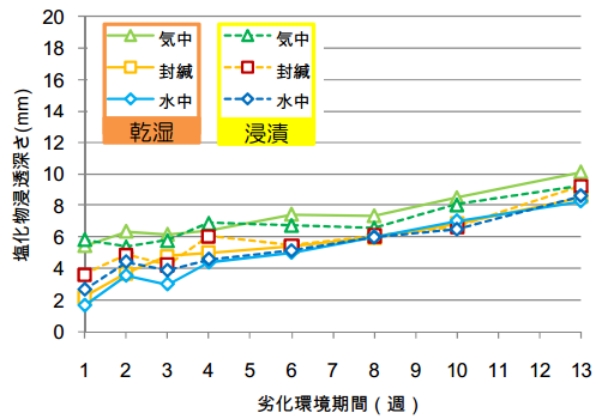


図-2 養生方法と塩分浸透深さの関係 (BB) <sup>2)</sup>

表-1 コンクリートの計画配合

略記	W/C(%)	s/a(%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					SL (cm)	Air (%)
			W	OPC	BFS	S	G		
N30	30	50	165	550	-	804	838	8.5	4.5
BB30				275	275	794	828	11.5	3.8
N60	60		175	292	-	897	935	9.5	4.8
BB60				146	146	892	930	11.0	4.9

を用いる。しかし、既往の研究<sup>5)</sup>から乾燥の影響は表層から50mm程度しか受けないとされているため、養生後にカットし、作製する方法では乾燥の影響を全断面で受けないと考えられる。そこで写真-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。

(2) 塩水浸漬試験に用いた供試体

供試体の概要を図-3に示す。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。



写真-1 供試体作製

2.2 試験条件

養生条件は表-2に示すように、打設後一日で脱型をし、材齢28日まで気中(20℃, RH60%), 封緘(型枠存置), 水中養生した。これに加え、脱型日を3, 5, 7日としそれぞれまで封緘養生し、その後、材齢28日まで気中養生したものについても検討した。これは内部の空隙構造の違いや水和条件の違いを作り出すために行った。電気泳動試験に用いる供試体は養生終了後に、前処理として、各供試体に飽和水酸化カルシウム水溶液を用いて真空飽水処理を行った。

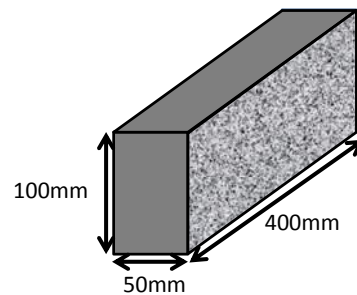


図-3 浸漬試験用供試体概要図

2.3 非定常状態電気泳動試験

実験装置と測定点を図-4に示す。電気泳動装置に前処理をした供試体を設置した後、陽極側にNaOH水溶液(0.3N), 陽極側に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>6)</sup>に通電時間と塩

表-2 養生条件

記号	脱型日	養生条件					
		1	3	5	7	...	28
気中	1日	気中養生(20℃, RH60%)					
封緘-3	3日	封緘養生(型枠存置)		気中養生			
封緘-5	5日	封緘養生(型枠存置)			気中養生		
封緘-7	7日	封緘養生(型枠存置)					気中養生
封緘	1日	封緘養生(型枠存置)					
水中	1日	水中養生					

塩化物イオン浸透深さと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で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、6 点の時間を測定時間と設定した。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、養生ごとに一定ではない。それぞれの通電が終了後、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。

### 2.4 塩水浸漬試験

養生し終えた供試体を、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、2.3 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。

### 2.5 圧縮強度試験

圧縮強度も養生方法などに応じて変化する。耐久性に関しても、同様に変化することを考えると強度と塩化物イオン浸透深さに高い相関関係が確認できれば、簡易的に求められる強度から浸透深さが推測できる可能性があるため圧縮強度試験を実施した。圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準拠し行った。材齢は 28 日とし、強度は 3 本の平均から求めた。

## 3. 試験結果および考察

### 3.1 非定常状態電気泳動試験

#### (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関係を図-5 に示す。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、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と考えられる。そこで図-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。この要

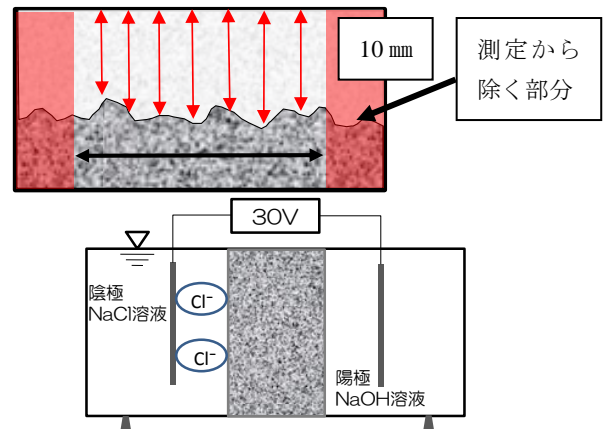


図-4 実験装置, 測定点図

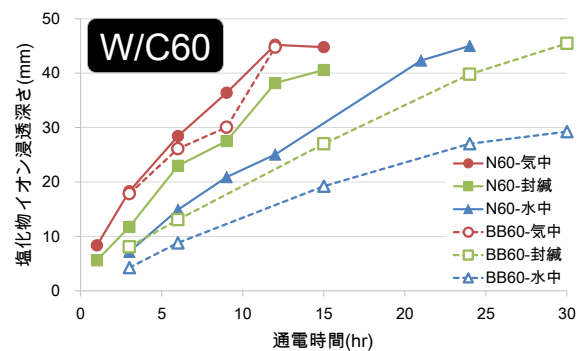


図-5 塩化物イオン浸透深さ (W/C60%)

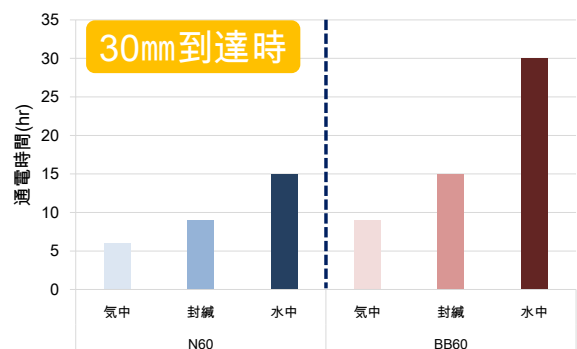


図-6 同一深さ到達における通电時間の違い (N)

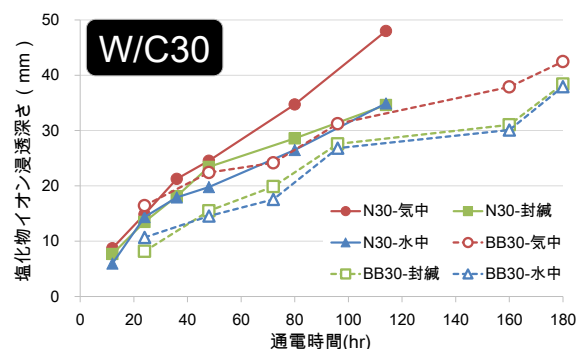


図-7 塩化物イオン浸透深さ (W/C30%)

因としては、N よりも BB の方が緻密になるため、塩化物イオンが浸透しにくいことや従来言われている高炉セメントの高い塩分固定化能力によるもの<sup>8)</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

関係を図-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水セメント比 30%では養生の有無に関係なく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) 養生期間の違いと塩化物イオン浸透深さの関係

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図-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短期間でも延ばすことにより、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。

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図-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。今後、60%と 30%の間でどこまで養生期間の違いによる変化があるかを検討することが必要である。

### 3.2 塩水浸漬試験

塩水浸漬試験の結果を図-10 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、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>9)</sup>によると放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

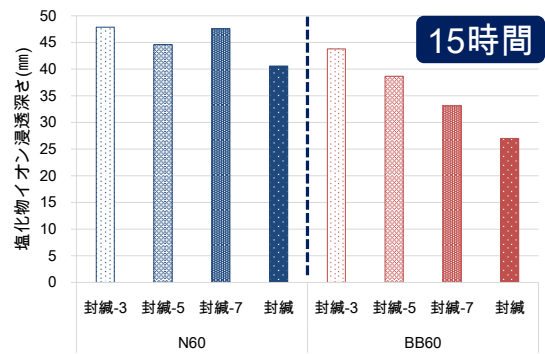


図-8 養生期間の違いによる塩化物イオン浸透深さ (W/C60%)

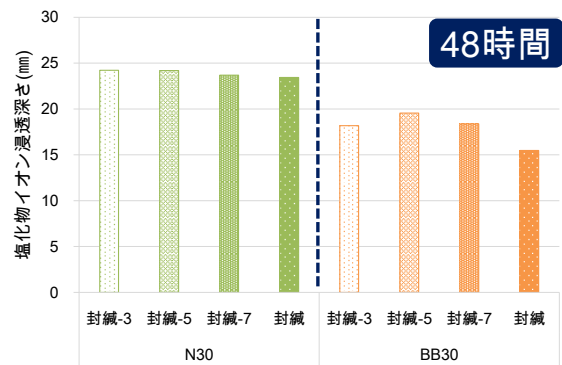


図-9 養生期間の違いによる塩化物イオン浸透深さ (W/C30%)

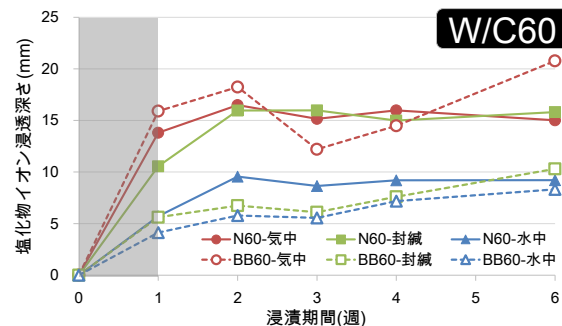


図-10 浸漬試験における塩化物イオン浸透深さ

が低いと考えられ、浸漬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図-11、12 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に、N より BB の方が養生の影響を受けることが示された。

### 3.3 非定常状態電気泳動試験による塩分浸透の評価

非定常状態電気泳動試験と塩水浸漬試験を比較する

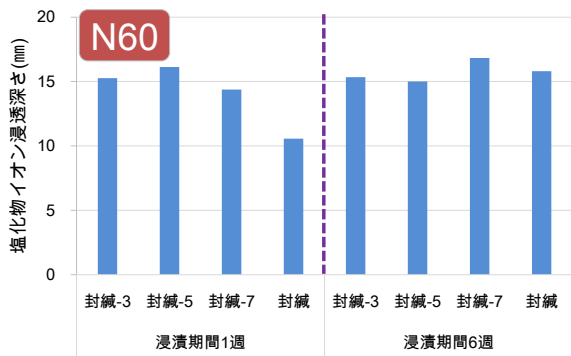


図-11 養生期間の違いによる塩化物イオン浸透深さ(N)

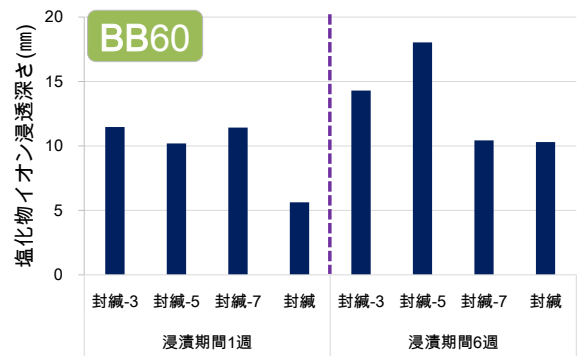


図-12 養生期間の違いによる塩化物イオン浸透深さ(B)

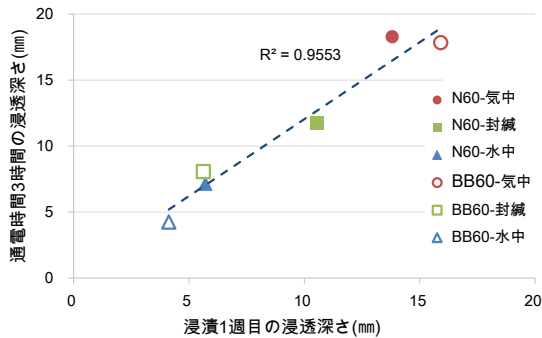


図-13 電気泳動試験と塩水浸漬試験の関係性

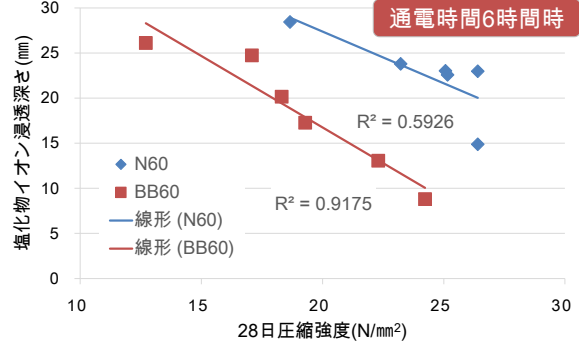


図-14 塩化物イオン浸透深さと圧縮強度の関係 (W/C60%)

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3.2で記述したような結果にならなかったことから、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。

図-10 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がちになり、内部との養生度合いが異なり、浸漬初期では急激に浸透していて、その後緩やかに浸透したものだと考えられる。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図-13に示す。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ある。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。

### 3.4 圧縮強度試験

水セメント比60%の通電時間6時間時における塩化物イオン浸透深さと28日圧縮強度の関係を図-14に示す。BBにおいては、強度と浸透深さとの相関が見られたが、一方、Nでは相関性は見られなかった。水セメント比30%の通電時間48時間時における塩化物イオン浸透深さと28日圧縮強度の関係を図-15に示す。この結果から、水セメント比60%と同様な相関性は確認できなかった。こ

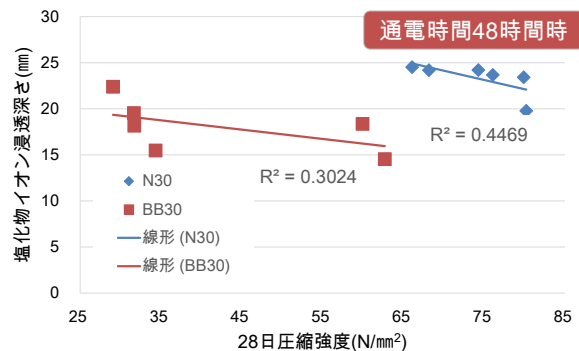


図-15 塩化物イオン浸透深さと圧縮強度の関係 (W/C30%)

のことから既往の研究<sup>10)</sup>で言われているように、強度を物質移動抵抗性(塩化物イオン浸透)の指標に見なすことは適切でないと考えられる。

## 4. まとめ

本研究の結果から得られた知見を以下に示す。

- (1) 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。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。また、塩水浸漬試験からも概ね同様な傾向を示したが、封緘養生より気中養生の方が浸透しにくいという結果が得られた。
- (2) 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。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。

- (3) 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結果に同様な傾向があることから、養生の影響を正しく把握できている可能性が示唆された。さらに、非定常状態電気泳動試験を用いることで未水和セメントの影響を低減できていると考えられる。
- (4) 強度と塩化物イオン浸透深さに一概に相関関係が見られるわけではないため、強度による物質移動抵抗性の評価は困難である。

#### 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) 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
- 3) 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，pp27-32，2013
- 4) Nordtest NT BUILD 492, “Chloride Migration Coefficient from Non-steady State Migration Experiment”, Nordtest, Finland, 1999
- 5) 佐藤幸恵，丸山一平，伊代田岳史，壇康弘：脱型時期の違いがコンクリートの乾燥と品質に及ぼす影響に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp531-536，2008
- 6) 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
- 7) 壇康弘，伊代田岳史，大塚勇介，佐川康貴，濱田秀則：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，pp431-441，2009.10
- 8) 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，pp431-432，2011
- 9) 小池賢太郎，中田拓磨，山口明伸，武若耕司：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-130，2012.9
- 10) 岡崎慎一郎，八木翼，岸利治，矢島哲司：養生が強度と物質移動抵抗性に及ぼす影響感度の相違に関する研究，セメント・コンクリート論文集，V60/227-234.2006