論文　鉄筋コンクリートの鉄筋界面における塩化物イオン浸透性に関する研究

日浦　望[*1]・荒木　大智[*2]・三田　勝也[*3]・加藤　佳孝[*4]

要旨：鉄筋コンクリートの鉄筋の腐食は鉄筋界面のコンクリートの不均質性に支配される。本研究では，鉄筋界面の不均質性の原因となる鉄筋下部に溜まるブリーディング水によって形成される脆弱な組織の塩化物イオン浸透深さを配合，練混ぜ方法および鉄筋の配筋位置を実験パラメータとし検討した。その結果，ブリーディングが出る配合では鉄筋下部においてかぶり 20mm とかぶり 50mm に鉄筋を配筋した場合，塩分浸透深さに差があり，ブリーディング率 0%の配合の場合はかぶりが違う場合でも鉄筋下部の塩分浸透深さの差が小さくなることが明らかとなった。

キーワード：ブリーディング，材料分離，鉄筋界面，塩分浸透性，高炉スラグ微粉末

1. はじめに

近年，鉄筋コンクリートの早期劣化が問題視され長寿命化が課題となっている。特に，鉄筋の腐食は塩害環境下など過酷な状態においては早期に生じる可能性のある劣化である。塩害による鉄筋の腐食は概ねマクロセル電池作用による腐食形態をとる。マクロセル腐食は鉄筋周辺のコンクリートの不均質性に支配される。[1)]コンクリートの不均質性の要因の一つとしてコンクリートは複合材料であるため材料分離が生じた場合があげられる。**写真-1** のようにコンクリートの材料分離に伴って，水平鉄筋下部に溜まるブリーディング水によって空隙（脆弱層）が形成された場合は水平鉄筋下部と上部の鉄筋表面との間に腐食電池が形成される。このような鉄筋とコンクリートの境界面に材料分離に伴って形成される脆弱層の形成および物質透過性を定量的に評価することは重要である。

そこで本研究では，鉄筋とコンクリートの境界面における塩化物イオンの浸透性によって鉄筋界面の脆弱層の物質透過性を評価することを目的とし，鉄筋の配筋位置，水セメント比，混和材料および練混ぜ方法等の施工方法を変化させ評価した。

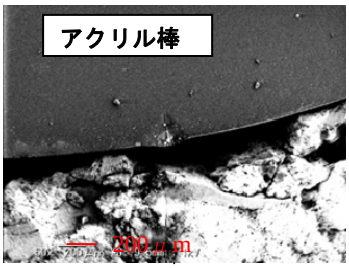

写真-1　コンクリートとアクリル棒の界面の様子

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント(密度:3.15 g/cm^3，比表面積:3320，3440cm^2/g)，混和材として比表面積の違う 2 種類の高炉スラグ微粉末(比表面積:2900，4300cm^2/g)，細骨材は富士川産川砂(表乾密度:2.61，2.63g/cm^3，吸水率:1.63，1.79，1.95%，F.M.:2.59，2.82，2.92)，粗骨材は両神産砕石(表乾密度:2.72, 2.73g/cm^3, 吸水率:0.44, 0.47%, F.M.:6.67，6.78，6.85)を使用した。

2.2 試験体概要

試験体概要を**図-1** に示す。型枠には鋼製型枠とコンクリート型枠用合板を組み合わせたものを使用し 150×150×200mm の型枠を作製した。型枠にコンクリートを打込み，24 時間後に脱型して材齢 28 日まで 20℃水中養生を行った。鉄筋は打込み底面からかぶり 20，50mm となるようにコンクリート型枠用合板を加工し配筋した。鉄筋は D19 を使用し，鉄筋の向きによる誤差を考慮し全ての試験体でリブを縦向きに配筋した。コンクリートの締め固めには棒状の内部振動機を用いた。

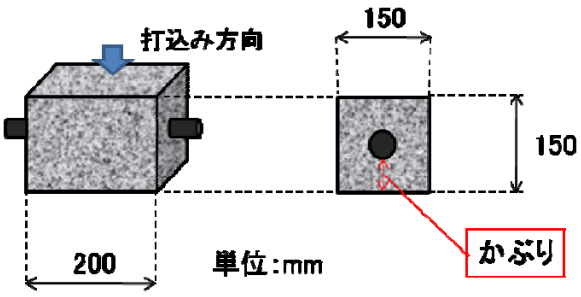

図-1　試験体概要

*1 東京理科大学大学院　理工学研究科土木工学専攻　(正会員)
*2 東京理科大学大学院　理工学研究科土木工学専攻　(非会員)
*3 東京理科大学　理工学部土木工学科　助教　博士（工学）　(正会員)
*4 東京大学　生産技術研究所　准教授　工博　(正会員)

表-1　コンクリートの配合および品質試験結果

種類	W/B[%]	s/a[%]	単位量[kg/m³]								品質試験結果		
			W	C	BFS	S	G	AE剤	高性能AE減水剤	増粘剤	スランプ[cm]	空気量[%]	圧縮強度[N/mm²]
N-30	30	44	175	583	-	683	910	C×0.003%	C×0.5%	-	10.0	4.1	81.9
N-45	45	44		389	-	754	1004	C×0.020%	-	-	5.5	3.1	57.2
N-55	55	46		318	-	815	1001		-	-	9.5	4.3	45.2
N-65	65	48		269	-	870	986		-	-	8.5	3.9	33.3
分割-55	55	46		318	-	815	997		-	-	7.5	2.7	46.1
増-55				318	-	822	1001	-	C×1.0%	W×0.2%	21.5	2.1	50.9
B2-55				175	143	810	991	C×0.020%	-	-	17	3.1	31.9
B4-55						810	995		-	-	8	3.1	42.3

2.3 配合

コンクリートの配合および品質試験結果を表-1 に示す（表中の種類は[種類]-[水結合材比]を表している）。コンクリートの品質試験はスランプ試験に関しては JIS A 1101「コンクリートのスランプ試験方法」[2)]，空気量試験に関しては JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法-空気室圧力方法」[2)]，圧縮強度試験に関しては JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」[2)]に準じて行った。単位水量は全ての配合において 175kg/m³ とし単位水量以外の要因で検討を行った。N-30，N-45，N-55 および N-65 はコンクリートの水セメント比を変化させ，分割-55 は水セメント比 55%の配合の練混ぜ方法を分割練混ぜ方法とし，増-55 は水セメント比 55%の配合で材料分離抑制効果のあるセルロース系増粘剤を練混ぜ水の質量の 0.2%添加した。B2-55(比表面積:2900cm²/g)および B4-55(比表面積:4300cm²/g)は水結合材比 55%で遮塩性の高い高炉スラグ微粉末を混和材として使用し，比表面積の違う 2 種類の高炉スラグ微粉末をそれぞれセメント質量の 45%置換した。

2.4 コンクリートの練混ぜ

コンクリートの練混ぜに関しては強制練りパン型ミキサを使用し，分割-55 以外は一括練混ぜ方法（細骨材，セメント，粗骨材を投入後 30 秒間練り混ぜた後に，練混ぜ水を投入し 120 秒間練り混ぜる）で練り混ぜ，分割-55 に関しては既往の研究 [3), 4)]を参考にし，材料分離を抑制しブリーディング率が小さくなる分割練混ぜ方法（細骨材，粗骨材を投入後 15 秒間，セメント質量の 25%の一次水を投入後 60 秒間，セメントを投入後 120 秒間，残りの練混ぜ水を投入後 120 秒間練り混ぜる）で練り混ぜた。

2.5 ブリーディング試験

ブリーディング試験は試験体を作製した全ての配合において JIS A 1123「コンクリートのブリーディング試験方法」[2)]に準じて行った。

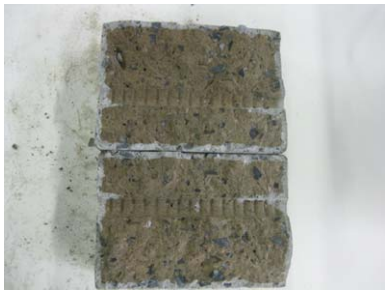

写真-2　硝酸銀水溶液噴霧後の試験体

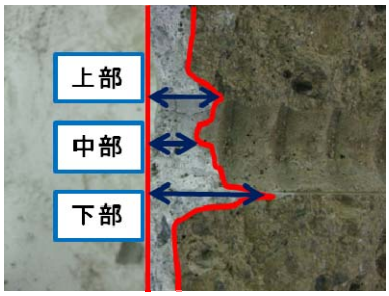

写真-3　鉄筋部の測定箇所

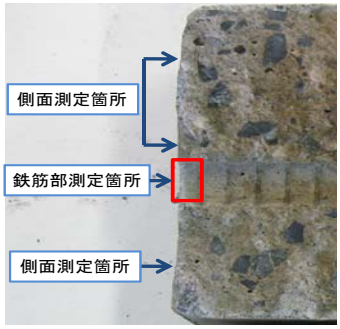

写真-4　試験体側面の測定箇所

2.6 塩水浸せき試験

材齢 28 日まで 20℃水中養生後，直ちに試験体を 10%濃度の食塩水中に浸せきさせた。浸せき期間は 1，4，7，28 日間とした。浸せき後，試験体を取り出し水洗いをした後に割裂し，鉄筋を取り除き割裂面を十分乾燥させ 0.1mol/l の硝酸銀水溶液を噴霧し，白く呈色した部分をノギスで測定し塩分浸透深さとした。試験体を割裂後に

硝酸銀水溶液を噴霧した例を**写真-2** および**写真-3** に示す。測定点は**写真-3** のように打込み面を上部とし鉄筋上部，中部，下部とした。また，試験体側面（鉄筋を配筋した箇所を除いた面）の測定点は写真**-4 のように 3 箇所とした**。それぞれの浸せき期間で試験体を 3 体ずつ作製し，3 体の割裂面両面の塩分浸透深さを測定しその平均値を実験結果とした。

3. 実験結果

3.1 ブリーディング試験

ブリーディング試験結果を**図-2** に示す。水セメント比を変化させた N-30，N-45，N-55，N-65 においては水セメント比が小さくなるほどブリーディング率は小さくなり N-30 では 0%となった。セルロース系増粘剤を添加した増-55 においてはブリーディング率が 0%という結果となった。分割練混ぜ方法で練り混ぜた分割-55 はブリーディング率が 1.2%となり一括練混ぜ方法で練り混ぜた N-55 の結果と比べるとブリーディング率が約 3 分の 1 になった。比表面積の違う高炉スラグ微粉末をセメント質量の 45%置換した B2-55，B4-55 の場合は N-55 に比べ B2-55 の方がブリーディング率は大きくなり，比表面積が大きい B4-55 はブリーディング率が N-55 に比べ小さくなった。

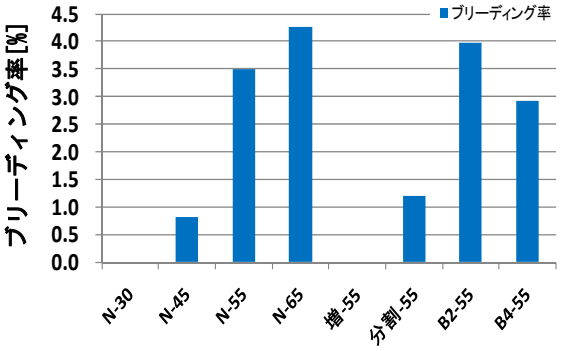

図-2　ブリーディング試験結果

3.2 塩水浸せき試験

(1)水セメント比を変化させた場合

水セメント比を 30%，45%，55%および 65%と変化させた N-30，N-45，N-55 および N-65 の塩分浸透深さの浸漬期間による経時変化の結果を**図-3**，**図-4**，**図-5** および**図-6** に示す（図中の凡例は[種類]-[W/C]-[かぶり]-[測定箇所]を表している）。全ての測定点の結果において水セメント比が大きくなるほど塩分浸透深さが大きくなる傾向にあった。鉄筋部と側面の塩分浸透深さを比較すると，差がないかもしくは鉄筋部の方が大きくなった。鉄筋部の中でも鉄筋下部においては N-45，N-55 および N-65 の試験体での塩分浸透深さはかぶり 20mm の試験体と比較してかぶり 50mm の試験体の塩分浸透深さの方が大きくなる傾向にあった。N-30 の試験体では側面に比べて塩分

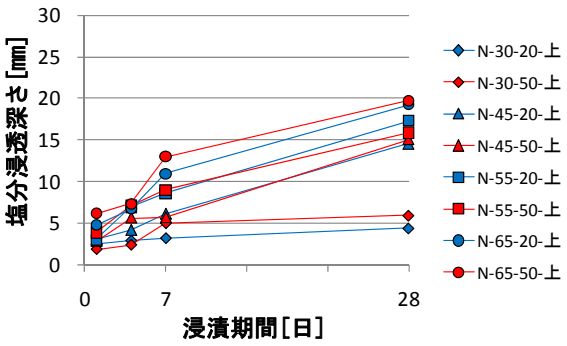

図-3　塩分浸透深さ結果　鉄筋上部

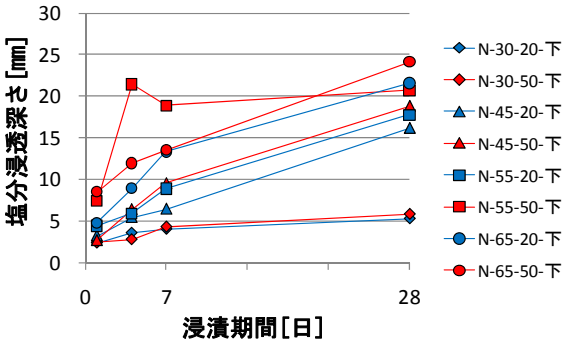

図-5　塩分浸透深さ結果　鉄筋下部

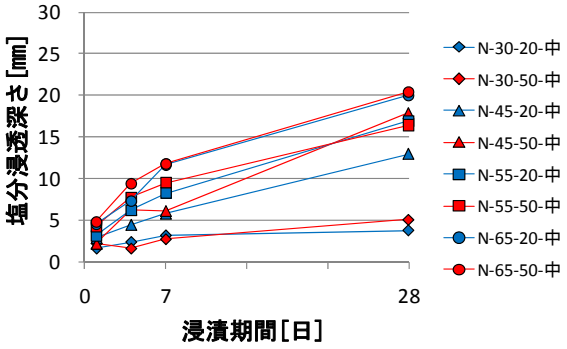

図-4　塩分浸透深さ結果　鉄筋中部

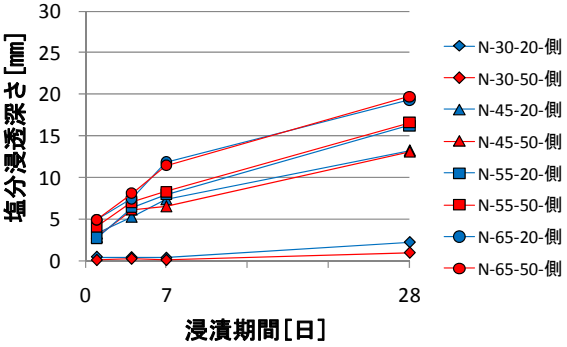

図-6　塩分浸透深さ結果　試験体側面

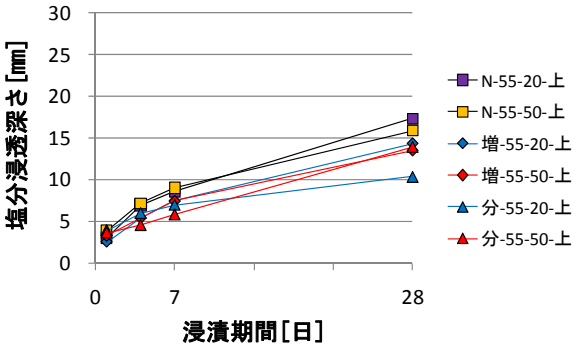

図-7　塩分浸透深さ結果　鉄筋上部

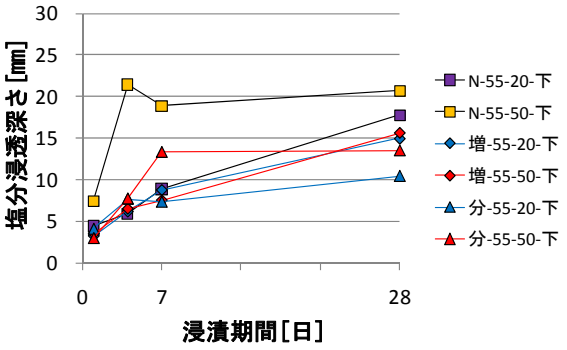

図-9　塩分浸透深さ結果　鉄筋下部

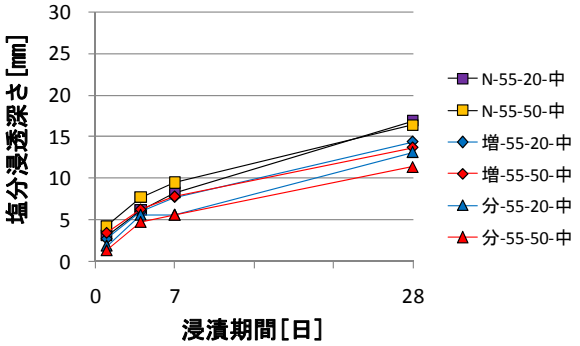

図-8　塩分浸透深さ結果　鉄筋中部

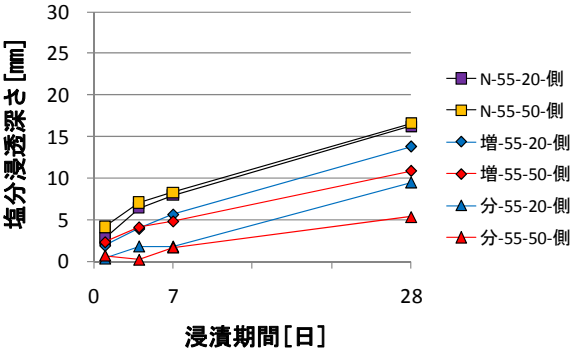

図-10　塩分浸透深さ結果　試験体側面

浸透深さが大きくなっているもののかぶりの違いによる塩分浸透深さの差は小さかった。ブリーディング率0%の N-30 ではかぶりの違いによる塩分浸透深さの差が小さく，ブリーディング率が 0%ではない N-45，N-55 および N-65 でかぶりの違いによる塩分浸透深さに差があったということから，かぶり 50mm の方がかぶり 20mm に鉄筋を配筋した場合に比べ鉄筋が上部に配筋されておりブリーディング水が鉄筋下部に溜まりやすくコンクリートの組織が疎になっているために塩化物イオンが浸透しやすくなったと考えられるが，ブリーディング率が大きい N-65 とブリーディング率が小さい N-45 を比較した場合にかぶり 50mm とかぶり 20mm の塩分浸透深さの差はどちらとも 2～3mm 程度でありブリーディング率による違いは見られなかった。

(2)増粘剤添加および分割練混ぜ方法の場合

水セメント比 55%で増粘剤を添加した増-55 と分割練混ぜ方法で練り混ぜた分割-55 の塩分浸透深さの浸漬期間による経時変化の結果を図-7，図-8，図-9 および図-10 に示す。全ての測定点において N-55 と比較して塩分浸透深さが小さくなる傾向にあった。鉄筋部と側面の塩分浸透深さを比較すると差がないかもしくは大きくなった。鉄筋下部におけるかぶり 20mm とかぶり 50mm の塩分浸透深さを比較すると増-55 に関しては差がほぼなかった。分割-55 では塩分浸透深さは N-55 と比較して小さくなっているもののかぶりによる差は浸せき期間 28 日では N-55 とほぼ同等となった。ブリーディング率 0%の増-55 とブリーディング率 1.2%の分割-55 の塩分浸透深さを比較すると分割-55 の塩分浸透深さの方が小さくなる傾向にあったが，分割-55 はかぶりの違いによる塩分浸透深さに差があることから多少でもブリーディングが生じる場合には鉄筋下部にブリーディング水が溜まることでコンクリートの組織が疎になり，塩分が浸透しやすくなると考えられる。

(3)高炉スラグ微粉末を混和材として用いた場合

水結合材比 55%で高炉スラグ微粉末を混和材として用いた場合の塩分浸透深さの浸漬期間による経時変化の結果を図-11，図-12，図-13 および図-14 に示す。側面の塩分浸透深さは B2-55，B4-55 ともに N-55 よりも小さくなり高炉スラグ微粉末の遮塩性が確認された。鉄筋部の塩分浸透深さは鉄筋上部および鉄筋中部では B2-55 および B4-55 ともに側面と差がないかもしくは大きくなっており，特に比表面積の小さい B2-55 は鉄筋中部のかぶり 50mm の試験体において塩分浸透深さが大きくなった。鉄筋下部では比表面積に関係なく，B4-55 および B2-55 ともにかぶり 20 mm と比較してかぶり 50mm の試験体の塩分浸透深さが著しく大きくなった。高炉スラグ微粉末を用いた場合は側面では十分な遮塩性が確認できたものの鉄筋下部のかぶり 50mm の塩分浸透深さは N-55 のかぶり 50mm の試験体よりも大きくなっている原因としてブリーディング水が鉄筋下部に溜まりコンクリート

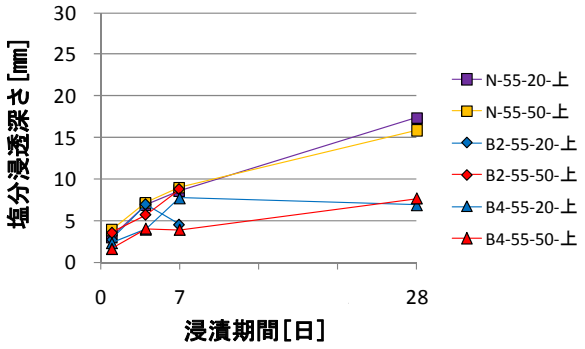

図-11　塩分浸透深さ結果　鉄筋上部

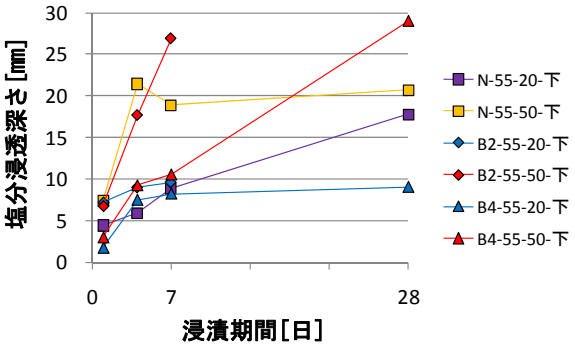

図-13　塩分浸透深さ結果　鉄筋下部

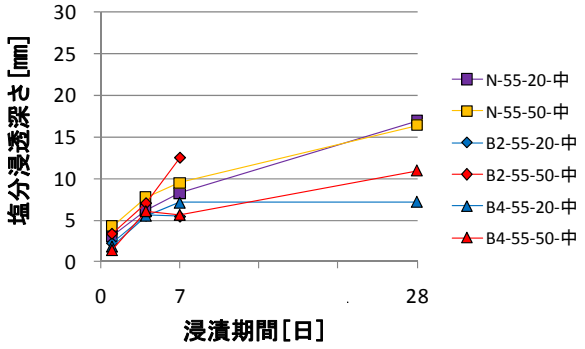

図-12　塩分浸透深さ結果　鉄筋中部

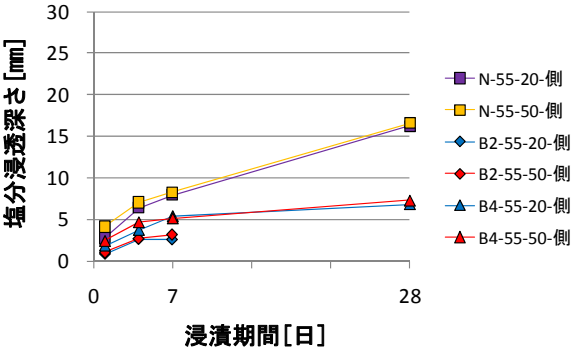

図-14　塩分浸透深さ結果　試験体側面

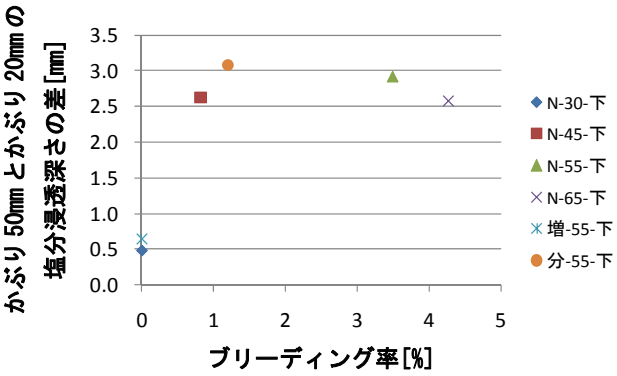

図-15　かぶりの違いによる鉄筋下部の塩分浸透深さの差とブリーディング率の関係

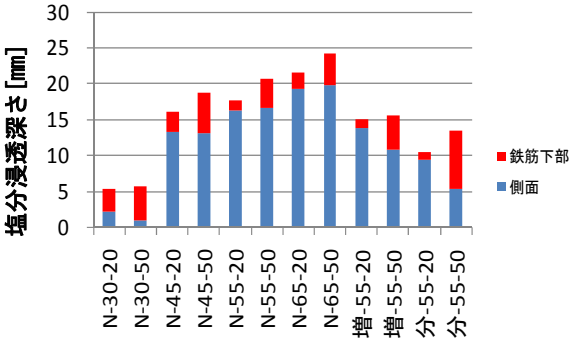

図-16　鉄筋下部と側面の浸せき 28 日における塩分浸透深さの差

の組織が疎になったと考えられる。その結果鉄筋下部は側面と比較して，塩化物イオンを固定化する能力が低下したと考えられる。このことから高炉スラグ微粉末に関しては，比表面積がさらに大きい高炉スラグ微粉末を用いた場合でも同様に検討する必要があると考えられる。

(4) ブリーディング率と塩分浸透深さの関係

かぶりの違いによる鉄筋下部の浸せき 28 日の塩分浸透深さの差とブリーディング率の関係を図-15 に示す。ブリーディング率が大きくなると塩分浸透深さは大きくなるがかぶり 50mm とかぶり 20mm の差はブリーディング率 0%ではない試験体ではほぼ変わらずブリーディング率との関係性は見られなかった。このことからブリーディングが出る場合はかぶりの大小によって鉄筋下部の塩分浸透性に差が出る可能性が示された。

(5) ブリーディング率と塩分浸透深さの関係

鉄筋下部と側面の浸せき 28 日における塩分浸透深さの差を図-16 に示す。側面と鉄筋下部の塩分浸透深さの関係をみると配合に関係なく鉄筋下部では塩分浸透深さが大きくなっている。このことから鉄筋部では施工方法に関係なく塩分が浸透しやすいことが明らかとなった。

4. まとめ

本実験で得られた知見は以下の通りである。

・水セメント比を変化させ，ブリーディング率が大きくなると塩分浸透深さは大きくなる。

・ブリーディングが出る場合、かぶりの大小により鉄筋下部の塩分浸透性に差が出る可能性が示された。

・側面では高炉スラグ微粉末の遮塩性が確認されたがかぶり 50mm の鉄筋下部での塩分浸透深さは著しく大きくなった。

・鉄筋下部ではブリーディング水により組織が粗になり塩化物イオンを固定化する能力が低下した可能性が考えられる。

・かぶり 50mm とかぶり 20mm の差はブリーディング率 0%ではない試験体ではほぼ変わらずブリーディング率との関係性は見られなかった。

・側面と鉄筋下部の塩分浸透深さは配合に関係なく鉄筋下部では塩分浸透深さが大きくなる。

・鉄筋部では施工方法に関係なく塩分が浸透しやすいことが明らかとなった。

謝辞

本研究を発表するにあたり，実験を共に行い尽力してくださった東京理科大学 4 年生小林荘太氏には心より感謝の意を表します。

参考文献

1) 小林一輔，和泉意登志，出頭圭三，睦好宏史　共編:図解コンクリート事典, オーム社, pp.9, 2001.12
2) 土木学会編：コンクリート標準示方書（規準編），日本規格協会，2007.5
3) 魚本健人，西村次男，渡部正，加藤佳孝：新しいコンクリートの製造管理システムに関する研究，生産技術研究所報告，Vol.39，No.1，1997.3
4) 伊東靖朗，辻正哲，加賀秀治，山本康弘：S.E.C. コンクリートの特性と展望，セメント・コンクリート論文集，No.410，1981.4