論文　ブリーディング水がコンクリート表層部の品質に与える影響に関する実験的検討

三田　勝也*1・加藤　佳孝*2

要旨：現在コンクリート構造物の早期劣化への対策は，施工時に関してはほとんど検討されていない。特に，コンクリート製造から打込み・締固めまでの施工プロセスは非常に重要である。本論文では，コンクリート構造物の表層品質が劣化要因の侵入に関与すると考え，表層部の品質を低下させる要因として，コンクリートの材料分離によって生じるブリーディング水が硬化後のコンクリート表層部に与える影響を実験的に検討した。その結果，ブリーディング水が型枠境界面に急激に生じる場合，目視確認可能な欠陥が生じること，目視確認できない場合でも，物質透過性の高い層が形成される可能性が高いことが明らかとなった。

キーワード：コンクリート，表層品質，ブリーディング水，砂すじ，塩分浸透深さ

1. はじめに

コンクリート構造物の早期劣化は，高度経済成長期を境にして，それ以後に建設された構造物に多く見受けられる。このような早期劣化に対して，現在は鉄筋腐食の原因となる海砂や化学混和剤中の塩化物イオン量の規制や，アルカリ骨材反応の引金となる反応性骨材を使用しないといった使用材料に関する対策は取られているため，コンクリート構造物の劣化の多くはコンクリート施工時の不具合に起因すると考えられる。

施工時の不具合の多くは，コンクリートの打込み・締固めや養生不足によって生じると考えられる。以前のコンクリートは，非常に固練りのコンクリートを入念に締め固めていたために耐久性が高く，メンテナンスフリーと言われていた。現在のように軟練りのコンクリートをコンクリートポンプで型枠へ送り，内部振動機によって締固めを行う急速大量施工へと施工方法が移り変わってから，不具合が発生しやすくなり早期劣化が増加したと推測される[1)]。

このような軟練りコンクリートを施工する場合，材料分離を起こさないことは大前提である。材料分離によって生じたブリーディング水は，硬化後のコンクリートに打込み高さによる水セメント比の変化を与え[2)]，内部鉄筋および粗骨材下部に空隙を形成させることがこれまでに知られている[3)]。

コンクリートの打込み・締固め時においてブリーディング水は直ちに型枠との境界面に生じることは経験的にも知られている[4)]。その場合，硬化後の表層部で品質低下が生じる可能性が高い。さらに，鉄筋コンクリート構造物の劣化機構（塩害，中性化等）のほとんどは，コンクリート中への外環境からの劣化要因（塩化物イオン，二酸化炭素等）の侵入によるものである。一般的な土木構造物の場合，コンクリート表面が直接外環境と接する場合が多く，コンクリート表層部の品質は，構造物の耐久性を考える上で無視できない重要な要因と考えられる。

このように表層品質に影響を及ぼす可能性があるにもかかわらず，材料分離によって発生するブリーディング水がコンクリート表層の品質に与える影響は未だ明確になっていない。特に打込み締固め時の型枠境界面では，ブリーディング水の挙動は複雑になると考えられる。この時，ブリーディング水の挙動によっては，硬化コンクリートの表層に，目視で確認可能な欠陥が生じる場合も想定される。

本論文では，ブリーディング水がコンクリート表層部の品質に与える影響を検討することを目的として実験を行った。まず，コンクリート打込み締固め時のブリーディング水の挙動を観察し，硬化後の表面性状について検討した。次に，型枠境界面にブリーディング水が滞留されたことによる，コンクリート表層部の物質透過性を塩化物イオンの浸透を対象として検討した。

2. ブリーディング水の挙動観察[5),6)]

本章では透明な型枠を用いて，型枠との境界面に生じたブリーディング水の挙動を観察する。なお，ここでは施工時のブリーディング水の挙動を検討する目的で，打重ねを行った場合および打重ねを行わず通常通り打込み，単位水量を変化させた場合を想定し実験を行った。

2.1 打重ねの影響

(1) 使用材料および型枠概要

本実験で使用したセメントは，普通ポルトランドセメントおよび白色セメントであり，骨材には鬼怒川産川砂および山梨産砕石を用いた。また，混和剤にはリグニンスルホン酸系 AE 減水剤およびアルキルエーテル系 AE 剤を用いた。

*1　東京理科大学　　理工学部土木工学科　助教　　博士（工学）（正会員）
*2　東京大学　　生産技術研究所　准教授　　博士（工学）（正会員）

(a) 締固め開始直前　　(b) 締固め開始直後　　(c) 締固め終了直後

図－1　締固めの様子（打重ね時間間隔 90 分）

表－1　コンクリートの示方配合

Gmax (mm)	SL (cm)	Air (%)	W/C (%)	単位量(kg/m^3)				(g/m^3)	
				W	C	S	G	Ad_1	Ad_2
20	12.0	4.5	55	180	327	773	1008	1047	3.27

※Ad_1：AE 減水剤，Ad_2：AE 剤

コンクリートの配合は**表－1** に示す通りである。なお，ブリーディング量は 0.25(cm^3/cm^2)であった。使用した型枠は，縦 500mm，横 500mm，高さ 450mm のアクリルケースの撮影面を除く全面にコンクリート型枠用合板（耐水ラワンベニヤ）を貼り付け補強したものである。

(2) 観察方法

撮影は市販のデジタルビデオカメラを用いて行った。ビデオカメラのレンズの中心を型枠の高さ 120mm の位置に合わせ，型枠から約 300mm 離れた位置より撮影を行った。なお，撮影する箇所は型枠表面の中心 1 箇所とした。

(3) 打重ね方法

コンクリートの打込みは 2 層に分けて行った。まず下層は白色セメントを用いたコンクリートを高さ 120mm の位置まで打ち込み，締め固めた。次に上層は，下層を所定の時間静置させて，ブリーディング水の除去を行わずに下層と同一配合の普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートを高さ 240mm の位置まで打ち込み，締め固める方法とした。締固めは内部振動機を用いて行い，下層コンクリートを締め固めた後，所定の打重ね時間間隔で上層コンクリートのみ締め固める方法と上層コンクリートを打込む直前に下層コンクリートを再振動し，その後上層を打ち込み，下層まで締め固める方法とした。また，コンクリートの打重ね時間間隔は，2007 年制定土木学会コンクリート標準示方書[施工編] [7]における許容打重ね時間間隔に関する記述を参考に 30 分，90 分および 150 分の計 3 通りとし，再振動締固めは打重ね時間間隔 150 分のみ行った。なお，締固め箇所は断面の大きさを考慮し，断面の隅角部 4 箇所とした。内部振動機は上層および下層ともに打込み面から深さ 80 ㎜位置まで挿入し，締固め時間は 1 回の締固めにかかる合計時間が 15 秒[7]以下となるように 1 箇所あたり 3 秒程度とした。

(a) 上層のみ締固め

(b) 再振動締固め

図－2　再振動締固めの影響
（打重ね時間間隔 150 分）

(4) 実験結果

図－1 は打重ね時間間隔が 90 分かつ上層のみ締め固めた場合を例にとり，締固め開始直前，開始直後および終了直後のブリーディング水の挙動を示している。画像(a)は，締固め開始直前の様子であり，この時点では○を付けた箇所にブリーディング水が溜まっていることが分かる。画像(b) に示したように，締固めを開始した直後，下層上面に溜まっていたブリーディング水が型枠側面に押し出され，型枠側面を沿って瞬時に上昇していく様子が確認された。その様子は締固め終了まで継続され，画像(c)のようにブリーディング水が表面のセメントペースト成分を洗い流した形跡が拡大され砂すじが発生した。程度の差はあるものの，この様子は上層のみ締め固めたもの全てにおいて確認された。

一方，再振動締固めを行った打重ね時間間隔 150 分に関して，このような挙動は見られなかった。**図－2** に示す画像を用いて両者を比較すると，上層のみ締め固めた場合は上層コンクリートの広範囲において砂すじが発生し，また，打重ね面を境に上下層のコンクリートが不

表－2　打重ね時間間隔別砂すじ発生面積率比
（上層のみ締固め）

打重ね時間間隔	砂すじ発生面積率比
30分	1
90分	1.79
150分	3.02

表－3　締固め方法別砂すじ発生面積率比
（打重ね時間間隔 150 分）

締固め方法	砂すじ発生面積率比
上層のみ	1
再振動	0.008

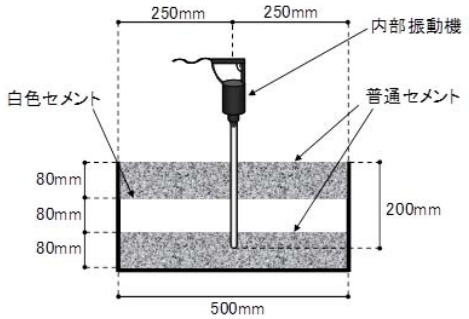
連続的になっている様子が確認された。しかし再振動締固めを行った場合，砂すじはほとんど発生することなく，下層コンクリートのセメントペースト成分が上層コンクリートに混合されて上下層が連続的となっている様子が確認された。このことから，上層のみ締め固めた場合，下層上面に溜まっていたブリーディング水が型枠側面に押し出され，表面のセメントペースト成分を洗い流しながら型枠側面を上昇し，洗い流された表面付近に大きな水みちが形成され，その付近に砂すじが発生すると考えられる。一方，再振動締固めを行った場合，下層コンクリートのこわばりが解消され上下層の一体化が容易となることでブリーディング水が軟らかくなったコンクリート中に均一に分散され，砂すじが発生しにくくなるとともに，上下層の一体性も確保されたと考えられる。

表－2 および**表－3** は，砂すじ発生後のアクリルケース側面をデジタルカメラで撮影し，画像計測ソフトで測定した砂すじの面積を撮影面の面積に対する割合（砂すじ発生面積率）で表した結果である。なお，撮影面に生じた砂すじは画像データから目視によって検出した。**表－2** では打重ね時間間隔 30 分，**表－3** では上層のみ締め固めた場合をそれぞれ基準とした比で表してある。上層のみ締め固めた場合，打重ね時間間隔が長くなるほど砂すじの発生面積率の比も大きくなる傾向となった。一方，打重ね時間間隔 150 分以内では，下層に生じるブリーディング量は打重ね時間間隔が 30 分では 0.04(cm^3/cm^2)，90 分では 0.13(cm^3/cm^2)，150 分では 0.21(cm^3/cm^2)と増大していくことから，許容打重ね時間間隔以内かつ上下層が一体とならない打重ねが生じた場合において，砂すじの発生には継目部に存在しているブリーディング水の量に大きく左右されると考えられる。打重ね時間間隔 150 分の場合に着目すると，再振動締固めを行ったものの砂すじ発生面積率の比は，上層のみ締め固めたものと比較して 0.008 となっており，上層のみの場合と比較して 0 に近い値となっており，ほぼ砂すじが発生していないことが分かる。このことから打重ね時間間隔がある程度長くなっても，次のコンクリートを打ち込む直前に下層コンクリートを再振動させ上下層が一体となるよう締め固めることは，表層部に生じる砂すじの発生防止および上下層の一体性確保のための有効な手段となると考えられる。

表－4　コンクリートの示方配合

Gmax (mm)	SL (cm)	Air (%)	W/C (%)	単位量(kg/m³) W	C	S	G	(g/m³) Ad_1	Ad_2
20	8.0	4.5	55	172	313	787	1027	1002	3.13
	12.0			180	327	773	1008	1047	3.27
	16.0			188	342	758	989	1094	3.42

※Ad_1：AE 減水剤，Ad_2：AE 剤



図－3　締固め方法（過剰締固めの場合）

2.2 単位水量の影響

使用材料，型枠および観察方法は 2.1 と同様である。

(1) コンクリートの配合

本実験の配合は**表－4** に示す通りである。単位水量の影響を評価するため，目標スランプを 8cm，12cm，16cm と 4cm ずつ変化させ単位水量を 172, 180 および 188kg/m³ の 3 種類とした。なお, ブリーディング量はそれぞれ 0.22, 0.25 および 0.28(cm^3/cm^2)であった。

(2) コンクリートの打込み締固め

コンクリートの打込みは時間を空けずに 3 層に分けて行い，**図－3** のように 1 層目および 3 層目に普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート，2 層目に同一配合の白色セメントを使用したコンクリートを各層 80mm ずつ打ち込む方法とした。なお，本実験で打込みを 3 層としたのは 2 層目に白色セメントを用いたコンクリートを打込むことで，締固め時の挙動を把握しやすくするためである。締固めは内部振動機を用いて行い，3 層目を打込み後，断面の中心 1 箇所に底面からの高さが 40mm の位置まで挿入し, 50 秒間締め固める方法とした。50 秒間の過剰な締固めとしたのは，単位水量の影響を顕著にするためであり，内部振動機を用いた時の平均的な

(a) 締固め開始直前　　(b) 締固め開始より 10 秒後　　(c)締固め終了直後

図－4　締固めの様子の経時変化（単位水量 180kg/m^3）

(a) 172kg/m^3　　(b) 180kg/m^3　　(c) 188kg/m^3

図－5　過剰締固め終了後の様子（単位水量別，囲み部分に砂すじ発生）

締固め時間を 5 秒間と仮定し，その 10 倍の締固め時間に設定した。また，打込みから締固めまでの時間は 5 分以内に行った。

(3) 実験結果

図－4 は，単位水量が 180kg/m^3 の配合を例にとり，締固め開始直前，開始から 10 秒経過後および終了直前のブリーディング水の挙動を示している。なお，観察の結果振動によって分離したセメントペーストの中でも，ブリーディング水と共に挙動するものも認められたため，ここではそのようなペーストも合わせて「ブリーディング水」と表現している。画像(a)は，締固め開始直前の様子であり，この時点では水分の移動は起きておらず，表面に気泡が多く残存していることが分かる。画像(b)に示したように，締固めを開始した直後，内部振動機によって生じた振動により，気泡およびコンクリート中より引き出されたブリーディング水が型枠側面に押し出され，型枠側面を沿って上昇する様子が確認された。その様子は締固め終了まで継続され，画像(c)のように表面の気泡はほぼ全て追い出され，ブリーディング水が表面のセメントペースト成分を洗い流すことで型枠境界面に空隙が生じ砂すじが形成された。

図－5 は，過剰締固め後のコンクリート表層部の画像を単位水量別に比較したものである。一般的に砂すじは単位水量が大きい配合で発生しやすいとされているが，本実験の結果，単位水量が小さい配合で最も砂すじの発生が顕著となり，逆に単位水量が大きい配合で発生しにくい傾向が得られた。これは締固め時の振動がコンクリートに伝わる際に，単位水量が少なく硬練りとなる場合，振動が伝わりやすくコンクリート中からブリーディング水が引き出されやすくなるためだと考えられる。すなわちフレッシュコンクリート中の自由水が少なく流動性が小さいため，水以外の構成材料が振動し易くなることで，ブリーディング水が引き出される勢いが強くなり，

表－5　単位水量別砂すじ発生面積率比

単位水量	砂すじ発生面積率比
172kg/m^3	1
180kg/m^3	0.60
188kg/m^3	0.18

その後ブリーディング水が型枠側面を移動し，セメントペースト成分を洗い流しながら勢いよく上昇する際に大きな水みちが形成されている可能性が高いと考えられる。逆に，単位水量が多く軟練りとなる場合は，流動性が大きくなるため，硬練りコンクリートと比較して水以外の構成材料に締固め時の振動がしにくく，ブリーディング水が引き出される勢いが弱くなるので，ブリーディング水が型枠側面に停滞すると考えられる。

表－5 は，過剰締固めを行った場合について，2.1 と同様に測定した砂すじ発生面積率の比を示している。なお，表は単位水量 172 kg/m^3 の場合を基準としている。時間を空けず連続的に打ち込み，過剰締固めを行った場合，単位水量が大きくなるほど砂すじの発生面積率の比は逆に小さくなる傾向になった。

3. 硬化後のコンクリート表層部に及ぼす影響 [8)]

砂すじのような欠陥を生じない場合であっても，型枠境界面にブリーディング水が滞留されることで，表層部の水セメント比が上昇し組織が粗になっている可能性がある。本章では欠陥が目視確認できない場合に，ブリーディング水が硬化コンクリートの表層品質に及ぼす影響を検討することを目的に実験を行った。

3.1 ブリーディング水がコンクリートの塩分浸透性に及ぼす影響

(1) 使用材料および示方配合

使用したセメントは普通ポルトランドセメントであり，骨材には鬼怒川産川砂および山梨産砕石を用いた。

表－6　コンクリートの示方配合

Gmax (mm)	SL (cm)	Air (%)	W/C (%)	単位量(kg/m^3)				(g/m^3)
				W	C	S	G	Ad
20	8.0	4.5	45	180	400	701	1025	60
			55		327	760	1025	49
			65		277	814	1012	42

また，混和剤には天然樹脂酸塩系の AE 剤を用いた。示方配合は**表－6** の W/C55%を用いた。なお，供試体寸法はφ150×300mm であり，内部振動機で 10 秒間締め固めた。養生は水中養生で材齢 28 日目まで行った。また，ブリーディング量は 0.25(cm^3/cm^2)であった。

(2) 塩水浸せき試験

養生終了後，供試体は直ちに塩化ナトリウム濃度 10%の水槽中に浸せきした。浸せき期間は 1 ヶ月，2 ヶ月，3 ヶ月および 6 ヶ月間とした。

塩分浸せき期間終了後，供試体を打ち込み面と垂直な方向に割裂した後，割裂面に 0.1mol/l の硝酸銀水溶液を噴霧，白く呈色した部分を塩分浸透領域とし，ノギスを用いて測定する割裂面の塩分浸透深さを測定した。

(3) 実験結果

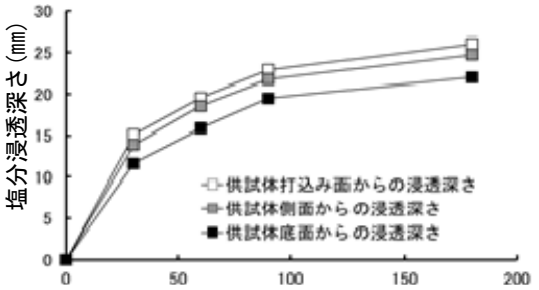
図－6 は塩水浸せき試験の結果である。 (a)は供試体の打込み面，側面および底面の塩分浸透深さの結果である。供試体各面の塩分浸透深さは，底面，側面および打込み面の順に大きくなっており，ブリーディング水が溜まりやすい面の塩分浸透深さが大きくなる傾向にあった。それぞれの面における塩分浸透深さの差は，塩水浸せき期間が長くなってもほぼ一定であった。また，(b)は供試体側面の上部，中部および下部の塩分浸透深さと塩水浸せき期間との関係を示している。側面を上部，中部および下部と分けた場合，塩水浸せき期間が長期に渡っても，塩分浸透深さは下部，中部および上部の順に大きくなっている。また，浸漬期間 180 日の側面上部で打込み面からの塩化物イオンの影響を受け，浸透深さが増加してはいるが，各部位における塩分浸透深さの差は浸せき期間によらずほぼ一定であった。

各測定面の塩分浸透深さは同傾向を示しているが差が生じていたのは，ブリーディング水の影響によって品質が低下し，塩分が浸透しやすくなるのは表層部のみであり，内部ではほとんどブリーディング水の影響が表れないことを示していると考えられる。

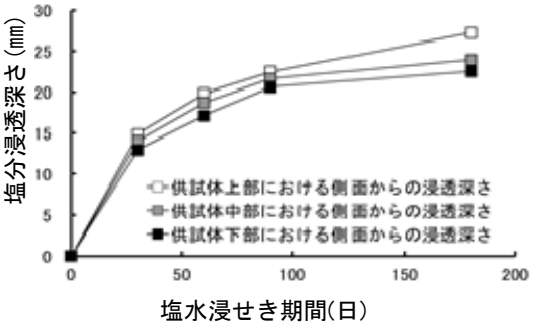
3.2 ブリーディング水の除去がコンクリート表層部からの塩分浸透性に及ぼす影響

(1) 使用材料および示方配合

使用材料は 3.1 と同様のものを用いた。コンクリートの配合は，**表－6** の全配合である。目標スランプおよび



(a) 供試体打込み面・側面・底面からの塩分浸透深さ



(b) 側面の上部・中部・下部における塩分浸透深さ

図－6　供試体各面からの塩分浸透深さ(W/C55%)

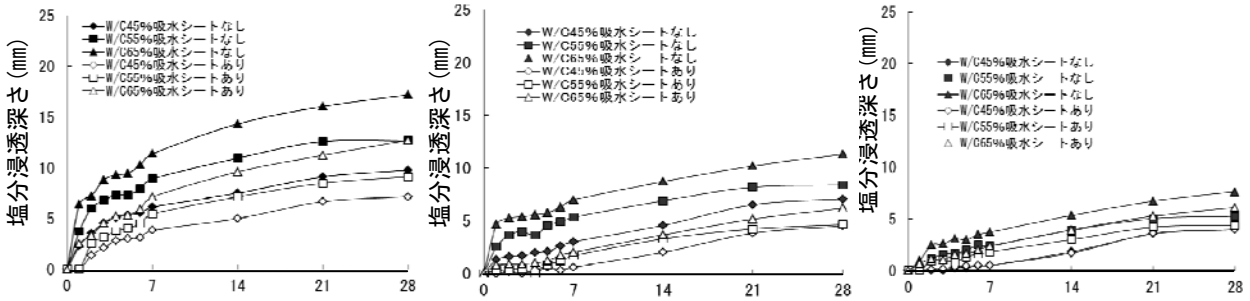
目標空気量はそれぞれ 8±2.5cm および 4.5±1.5%とした。コンクリートの打込み締固め方法は内部振動機によっておよそ 10 秒間締め固めた。供試体寸法はφ100×200mm の円柱供試体とし，脱型後材齢 28 日目まで水中養生を行った。また，型枠境界面のブリーディング水を除去する目的で，型枠側面のみに高分子吸水ポリマーシートを貼り付けた吸水型枠を用いて実験を行った。なお，本実験でのブリーディング量は W/C45%, 55%および 65%でそれぞれ 0.16，0.21 および 0.30(cm^3/cm^2)であり，吸水性シートを用いた場合はいずれの水セメント比でもブリーディング水は生じなかった。

(2) 塩水浸せき試験

3.1(2) と同様の方法とした。なお，浸せき期間は 1,2,3,4,5,6,7,14,21 および 28 日間とした。

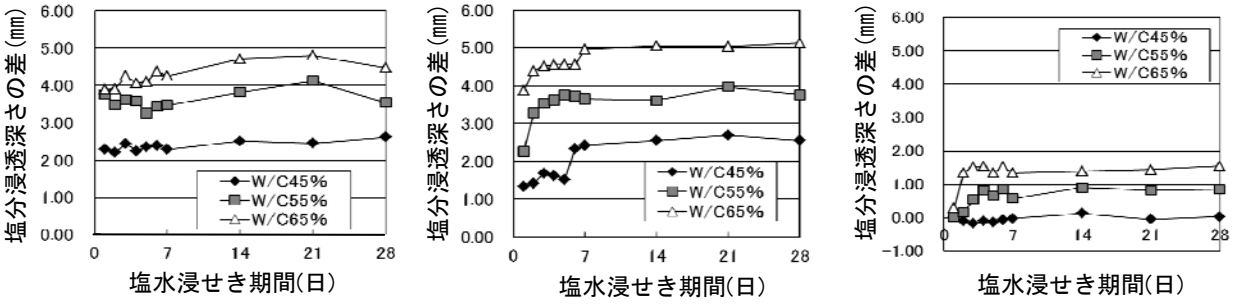
(3) 実験結果

図－7 は，打込み面，側面および底面からの塩分浸透深さを，水セメント比および吸水性シートの有無別に示したものである。なお，吸水型枠の打込み面および底面には吸水性シートは貼り付けていないが，(a)および(c)のグラフ中の凡例には「吸水シートあり」とした。吸水型枠を用いた供試体の塩分浸透深さは，鋼製型枠を用いた供試体に比べて，全ての面で小さくなる傾向にある。特にブリーディング水の溜まりやすい打込み面および側面は減少量が大きくなっている。底面については，水セメント比が小さくなる程吸水型枠による影響は小さくなり，W/C が 45%の時にはほとんど差は見られなくなっていた。また，吸水型枠を用いた場合の側面からの塩分浸透深さと，鋼製型枠を用いた場合の底面からの浸透



(a) 供試体打込み面からの塩分浸透深さ　(b) 供試体側面からの塩分浸透深さ (c) 供試体底面からの塩分浸透深さ

図－7　供試体各面からの塩分浸透深さ(水セメント比別)



(a) 打込み面からの塩分浸透深さの差　(b) 側面からの塩分浸透深さの差　(c)底面からの塩分浸透深さの差

図－8　円柱供試体各面からの塩分浸透深さの差(鋼製型枠－吸水型枠)

深さがほぼ同程度となっていた。これはブリーディング水がコンクリートと型枠との境界面に生じたため，物質透過性の高い脆弱な層が形成されたと考えられる。

図－8 は，通常型枠と吸水型枠を用いた場合において，供試体各面からの塩分浸透深さの差を表したグラフである。打込み面では水セメント比 55%および 65%で浸漬期間 21 日から 28 日の間で差が低下しているものの，側面および底面では浸せき期間と共に塩分浸透深さの差が全ての水セメント比で一定の値に収束していく傾向にあり，この一定値は吸水性シートの影響と考えられる。すなわち側面に形成される脆弱層は，ブリーディング水の影響によって生じたことを表していると考えられる。

4. まとめ

ブリーディング水がコンクリート表層に与える影響を検討した結果，以下のことがわかった。

(1)打込み締固めの際に過剰にブリーディング水が生じる場合，ブリーディング水は急激に型枠とコンクリートの境界面を急上昇し，硬化後の表面に目視で確認可能な欠陥を生じさせる。

(2)欠陥が目視確認できない場合でも，ブリーディング水が型枠境界面に滞留されることによって，硬化後のコンクリート表面から内部へ数㎜の範囲で物質移動が顕著になる領域(脆弱層)が形成される可能性がある。この領域では，物質透過性が著しく低下していることが考えられる。

参考文献

1) 小野紘一，松崎育弘：コンクリート施工基本問題検討委員会報告，コンクリート工学，Vol.40，No.3，pp.77-84，2002.3

2) 神田衛，吉田八郎：コンクリート打込み後の柱断面における水セメント比の分布性状，セメント・コンクリート，No.342，pp.27-32，1975

3) 十和田知三：コンクリートの引張異方性におよぼす調合および粗骨材の影響，日本建築学会論文報告集，No.235，pp.1-7，1975

4) 辻正哲，坂井秀紀：ブリージング水の発生機構に関する基礎的研究，セメント技術年報，No.37，pp.229-232，1983

5) 中島裕幸，辻正哲，三田勝也，田口哲平：コンクリートの打重ねにともなう砂すじの発生機構に関する実験的研究，土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集，V-317，2009.9

6) 中島裕幸，三田勝也，赤津雅之：砂すじの発生機構に関する実験的研究，日本材料学会第 58 期学術講演会論文集，pp.195-196，2009.5

7) コンクリート標準示方書改訂小委員会：2007 年制定土木学会コンクリート標準示方書[施工編]，(社)土木学会，2008.3

8) 三田勝也，辻正哲，小林浩平，山路祐美，日浦望：コンクリートの塩分浸透深さに及ぼすブリーディング水の影響範囲に関する実験的研究，土木学科関東支部第 36 回技術研究発表会講演概要集，　V-37，2009.