

論文 コンクリートの表層と内部の湿度の相違が乾燥収縮と耐久性に与える影響

井ノ口 公寛*1・歌川 紀之*2・伊代田 岳史*3

要旨：トンネルの覆工コンクリートに発生しているひび割れの原因はさまざまであると考えられるが、養生不足や貫通前後における急激な湿度低下による乾燥収縮量の増大も一つの要因であると考えられる。そこで、本研究では脱型時期を変化させた中型試験体を用いて表層と内部の乾燥収縮量を測定し、また同時にコンクリート内部湿度を測定することで乾燥収縮量との関係を評価した。その結果表層と内部では乾燥収縮量に大きな違いがみられた。また、脱型時期を遅らせることで表層の乾燥収縮量が低減できることが確認できた。

キーワード：乾燥収縮ひずみ、表層と内部、脱型時期、内部湿度、真空吸水実験

1. はじめに

従来、トンネルの覆工コンクリートでは、他の構造物に比べて日照作用や雨などの環境作用を受けにくいこと、トンネル坑内環境は 80%RH 以上という安定した環境であることといった理由から養生はあまり重要視されていなかった。しかし、山陽新幹線の福岡トンネル剥落事故やトンネル坑内のコンクリート塊剥落事故などが多発し社会的にクローズアップされ、性能照査型設計へ移行した現在、トンネルの覆工コンクリートに求められる性能が増加してきた。従来同様に脱枠までの初期強度に加え、耐久性の確保やコンクリート片剥落の引き金となりうると考えられる有害ひび割れの抑制が着目されてきている^{1,2)}。トンネルにおける有害ひび割れの発生原因として、(1)乾燥収縮などに代表される体積変化がインバート等からの外部拘束を受けて発生する場合、(2)トンネルの貫通前後に伴う急激な湿度変化や風等によるトンネル坑内の環境変化に伴う乾燥収縮による場合、(3)初期強度発現が不十分であるために脱型時のだれやたわみ量増加による場合などに大別されると考えられる。近年、環境負荷低減が叫ばれる中、従来普通ポルトランドセメントを利用してきた覆工コンクリートに高炉セメント B 種などの硬化が普通ポルトランドセメントに比べて若干遅延する材料を利用することが提案されつつあるが、材料のみの変更にとどまり施工方法を考慮してこなかったため、初期強度が不足し(1)や(3)のひび割れが発生していると考えられる。一方、トンネル坑内環境の変化に起因するひび割れについては、材料特性もさることながら坑内環境が大きく影響すると考えられるため、周囲環境の変化と乾燥収縮挙動を明確にする必要があると考えられる。このような現状において、現在取り組まれているトンネル覆工コンクリートのひび割れ

ひび割れ対策としては材料対策として、混合セメントを普通セメントに変更したり、収縮低減効果の得られる乾燥収縮低減剤や石灰石骨材などを積極的に利用したり、繊維補強コンクリート等を採用してコンクリートに剥落防止機能を付与したりする工法を行っている。また、従来 18 時間で脱型を行っていたが、近年、脱型までの時間の増加や養生方法の提案など、以前と比べると近年の覆工コンクリートでは有害ひび割れの発生事例は減少している傾向がある。しかし、このような対策においても、型枠存置や養生方法の改善等の養生効果と貫通前後の坑内環境変化の最小化のいずれが大きな効果を生んでいるのかは不明である。

著者らは既往の研究^{3,4)}より、乾燥収縮ひずみと内部湿度には相関関係があることを確認している。また、コンクリートの深さ方向に内部湿度を測定し、表層部と内部では内部湿度に差が生じており、乾燥収縮ひずみと相関関係があることによって、ひび割れが生じる可能性があると考えられる。しかし、内部湿度が深さ方向の乾燥収縮ひずみにどの程度影響を及ぼすかは明確ではない。

そこで本研究では、脱型時期による養生の効果を真空吸水試験⁵⁾により定量的に評価したうえで、コンクリート表層部と内部の乾燥収縮ひずみと内部湿度の測定を実施した。

2. 実験概要

2.1 真空吸水実験(Step1)

(1)コンクリート供試体の概要

実験に使用した供試体のセメント種類は、普通ポルトランドセメント[N]と高炉スラグ微粉末が 50%置換した試製セメント[BB]を用いたコンクリートとし、W/C=45、

*1 芝浦工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 佐藤工業(株) 技術研究所 主任研究員材料チームリーダー 博士 (工学)

*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)

60%で実験を実施した。実験に使用した配合を表-1に示す。また、供試体は構造物からのコア供試体を模擬するため、寸法をφ100×200mmとし、脱型時期を1日、3日、5日、7日後とし、外部環境の影響を受けるように上面と底面を解放させた。脱型後は恒温恒湿槽(20℃, 60%RH)で暴露し、19日経過後に実験を実施した。

(2)実験方法

実験の前処理として、供試体を実験材齢時に40℃の乾燥炉で5日間乾燥させた。実験は供試体側面からの水の浸入を防ぐため、側面にアルミテープを張り、水を張ったバットに浸けデシケーターに設置した。その後、デシケーター内を真空状態で3時間吸引した後、供試体を割裂し、水の吸い上げられた領域と実験前後の重量変化を確認した。

本研究では、全断面積に対する吸水面積割合を画像解析で算出し、真空吸水面積率と定義した。また、1cmごとで真空吸水面積率を算出し、深さ方向の影響を確認した。真空吸水実験概要と割裂後の供試体断面の一例を図-1に示す。

表-1 コンクリート配合表

	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	N	BFS	S	G
Step1	45	48	168	373	187	799	957
	45	47	168	187	187	799	957
	60	51	168	280	140	924	945
	60	50	168	140	140	924	945
Step2	60	51	168	280	140	924	931
	60	50	168	140	140	924	945

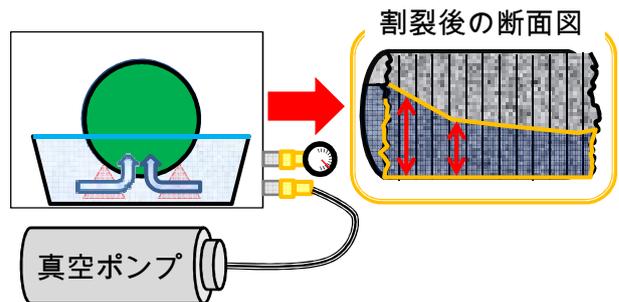


図-1 真空吸水実験概要と実験結果の一例

2.2 表層と内部の湿度の違いが乾燥収縮に与える影響

(Step2)

(1)コンクリート供試体の概要

実験に使用した供試体は、W/C=60%、W=168kg/m³の普通ポルトランドセメント[N]と高炉スラグ微粉末を50%置換した試製セメント[BB]を用いたコンクリートとし、表-1に示す配合で実験を行った。

(2)実験方法

表層と内部の内部湿度の相違が乾燥収縮に与える影響を調査するため、実験に使用した供試体(900×400×300mm)は打設後上面をラップし、翌日に片面(600×400mm)のみ脱型し、7日間後に脱型した面と反対側の型枠を脱型し、残りの面は型枠を存置した。内部の乾燥収縮ひずみの測定を埋め込み型ひずみゲージを使用し、表面の乾燥収縮ひずみは表面ひずみゲージとJIS A 1129のコンタクトゲージ法を使用した。測定機器設置位置を図-2、供試体を図-3に示す。コンクリート打設時に埋め込み型ひずみゲージを表面から30mm, 150mmに設置した。内部湿度は供試体の側面(300×400mm)に小型温湿度センサーを用いて実験を行った。センサーがコンクリートに直接接触することを避けるため二重構造の直径13mmの亚克力パイプをコンクリート打込み時に埋設した。センサーの埋設深さは供試体中央の一律50mmとし、打ち込み後、打設面が吸水しないベニヤ板にて封緘し亚克力パイプの内部を空洞にしたうえでゴム栓とゴム製のキャップで密閉して計測を開始した。表面ひずみゲージは側面を脱型後取り付け、測定を開始した。

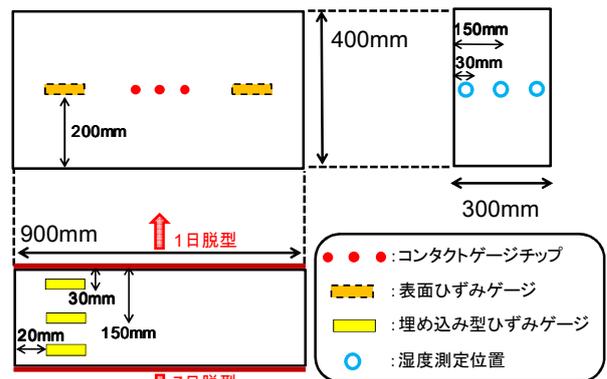


図-2 測定機器設置位置



図-3 乾燥収縮ひずみ供試体

3. 実験結果

3.1 真空吸水実験結果(Step1)

(1)セメント種類と脱型時期が吸水性に与える影響

セメント種類及び脱型時期が真空吸水面積率に与える影響を図-4に示す。真空吸水面積率は大きいほど残存している空隙量が多く、物質移動抵抗性が低下すると考えられる。真空吸水面積率(断面積に対する吸水面積割合)は、セメントの種類によらず、脱型時期が遅いほど真空吸水面積率が低下する傾向を示した。これは脱型時期の相違が、水和反応の過程で空隙組織に影響を与えたことによるものだと考えられる。セメントの種類に着目すると、BBはNに比べ脱型時期が早いほど真空吸水面積率が大きく、特に1日で脱型したときに顕著に影響を受けていることが確認できた。脱型時期が3日以降ではNよりも真空吸水面積率が低い傾向を示していることが確認できた。

(2)W/Cが深さ方向の吸水性に与える影響

W/Cが真空吸水面積率に与える影響を図-5示す。真空吸水面積率(コンクリート深さ1cmごとの真空吸水面積率)は、W/Cの増加に伴い増加する傾向が確認できた。セメント種類に着目すると、W/CによらずBBのほうがNよりも真空吸水面積が大きい傾向を示した。また、どちらのセメント種類でも、表層部では真空吸水面積率が大きくなり、内部では小さくなる傾向を示していた。その理由としては脱型時期が1日と早い場合、表層部では乾燥の影響を受けたためだと考えられ、セメント種類の差は、BBはNに比べてセメントの反応速度が遅いためだと考えられる。

(3)脱型時期が深さ方向の吸水性に与える影響

脱型時期が深さ方向の真空吸水面積率に与える影響を図-6、7に示す。(1)の結果と同様に、脱型時期が遅いほど、深さ方向の真空吸水面積率が低下する傾向を示した。深さ方向の影響に着目すると、影響範囲はNでは3cm程度であり、BBでは、脱型時期が1日の場合は4~5cm程度まで影響を受けていたが、それ以降に脱型したものについてはNと同様の傾向を示していることが確認できた。また、BBでは脱型時期が1日のものでは表層部で大きく環境の影響を受けており、乾燥の影響のないコンクリート内部においても吸水性が高いことを確認した。この理由としては、脱型時期が1日と早く、コンクリート内部での水和反応が十分進行していなかったためと考えられる。

3.2 表層と内部の湿度の違いが乾燥収縮に与える影響(Step2)

(1)乾燥収縮ひずみ実験結果

Step1と既往の研究³⁾より、乾燥収縮ひずみの測定位置

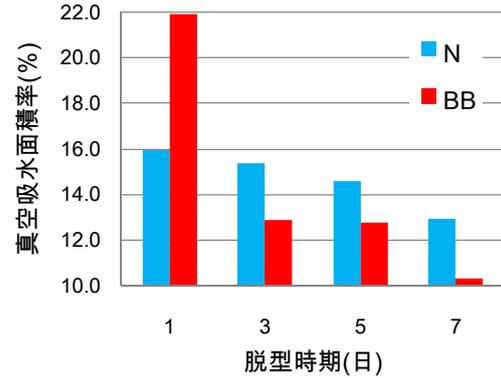


図-4 脱型時期と真空吸水面積率の関係(材齢19日)

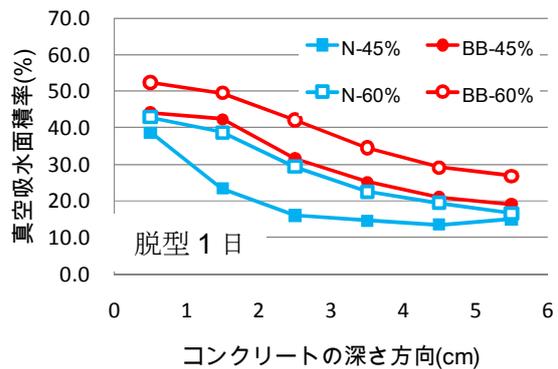


図-5 W/Cと深さ方向の真空吸水面積率の関係

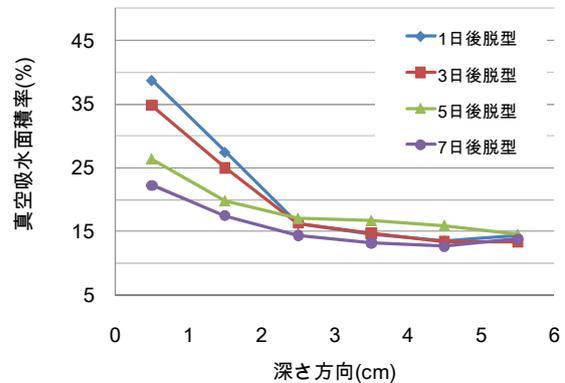


図-6 脱型時期と深さ方向の真空吸水面積率の関係(N)

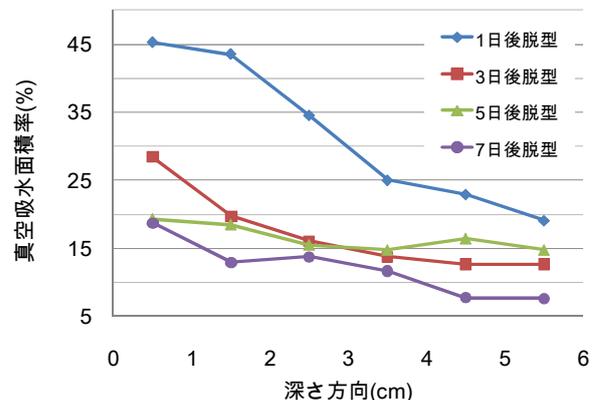


図-7 脱型時期と深さ方向の真空吸水面積率の関係(BB)

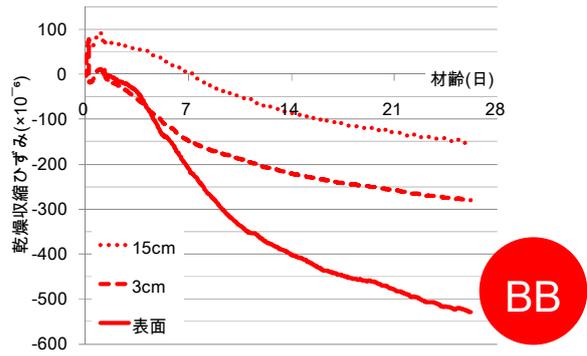
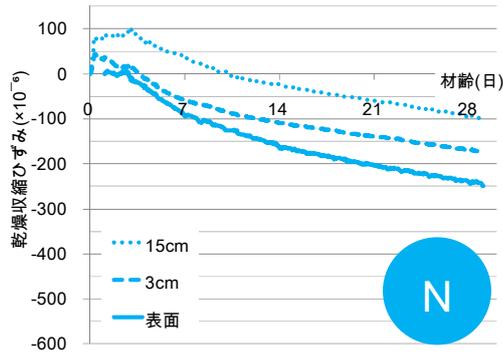


図-8 深さ方向における乾燥収縮ひずみ実験結果

(左:N使用, 右:BB使用, 脱型1日)

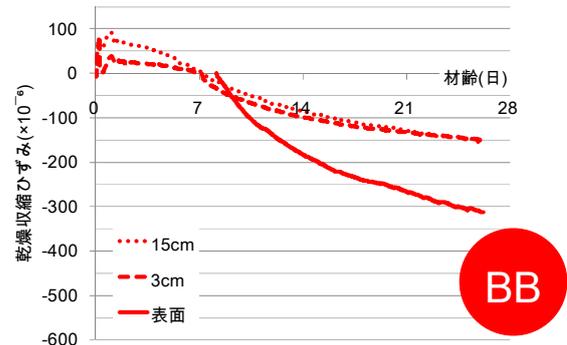
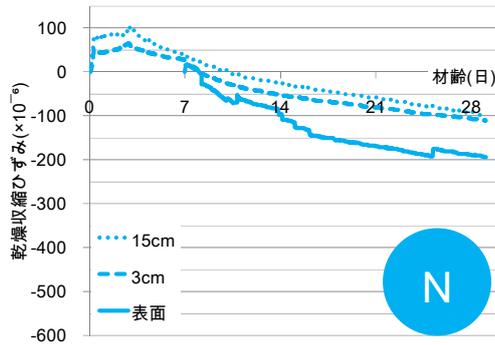


図-9 深さ方向における乾燥収縮ひずみ実験結果

(左:N使用, 右:BB使用, 脱型7日)

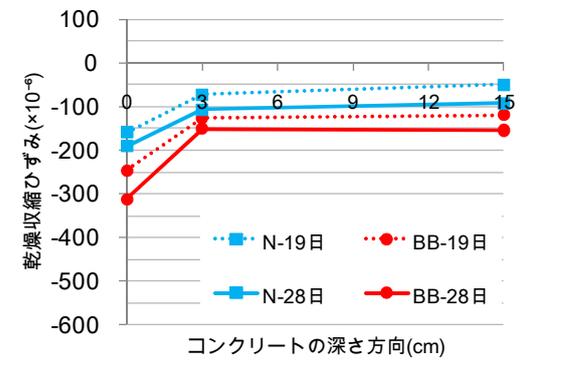
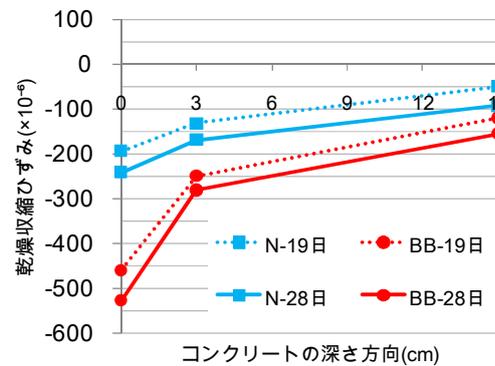


図-10 深さ方向と乾燥収縮ひずみの関係

(左:脱型1日, 右:脱型7日)

を表層部では3cm, 内部では15cmとして測定を行った。セメント種類と脱型時期の違いが深さ方向の乾燥収縮ひずみに与える影響を図-8, 9に示す。セメント種類によらず, 脱型1日のものは表面と3cm位置での乾燥収縮ひずみが増加していく傾向を示した。7日後に脱型したものは, セメント種類によらず, 乾燥収縮ひずみが低減していたが, BBのほうがNに比べて顕著に低減する傾向が確認できた。次に, セメント種類が深さ方向の乾燥収縮ひずみに与える影響を図-10に示す。深さ方向に着目すると, セメント種類によらず, 表面から近い距離ほど乾燥収縮ひずみが大きくなっていくことを確認した。また, 脱型時期が7日のものはセメント種類によらず3cm以降では内部の乾燥収縮ひずみと同程度の値と

なっていることが確認できた。BBはNに比べて脱型時期が早くなると, 表層部分での乾燥収縮ひずみが増大し, 脱型時期の影響を顕著に受けていることが確認できた。この理由として, 脱型時期が早いことで, 養生が十分行われず, 表層で乾燥の影響を大きく受けたと考えられ, 脱型時期を遅くすることで水分の逸散を防ぎ, 水和反応が進行したことで空隙組織が緻密化し表層での乾燥収縮ひずみが低減されたと考えられる。今後, 乾燥収縮と大きく関係していると考えられる空隙量や空隙分布を調査し, 表層と内部の組織の違いを検証していくことが必要だと考えている。

(2)内部湿度測定結果

セメント種類と脱型時期の違いが深さ方向の内部湿

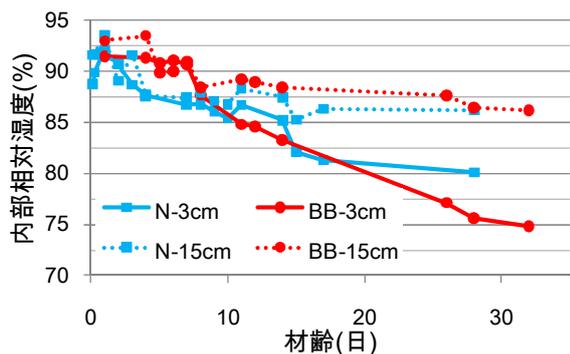


図-11 深さ方向における内部湿度実験結果(脱型 1 日)

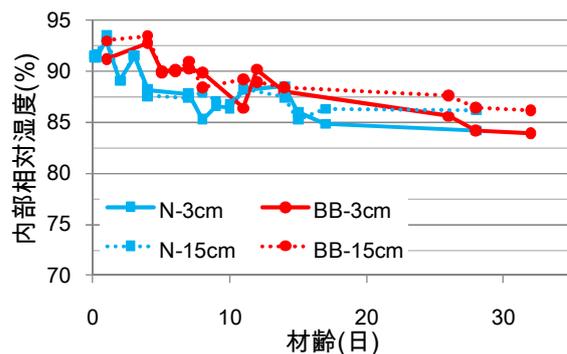


図-12 深さ方向における内部湿度実験結果(脱型 7 日)

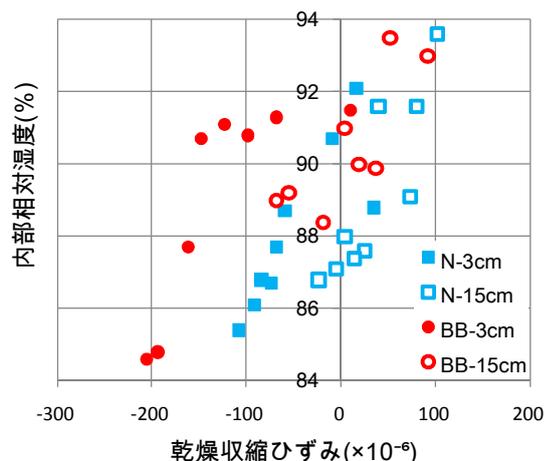


図-13 内部湿度と乾燥収縮ひずみの関係(脱型 1 日)

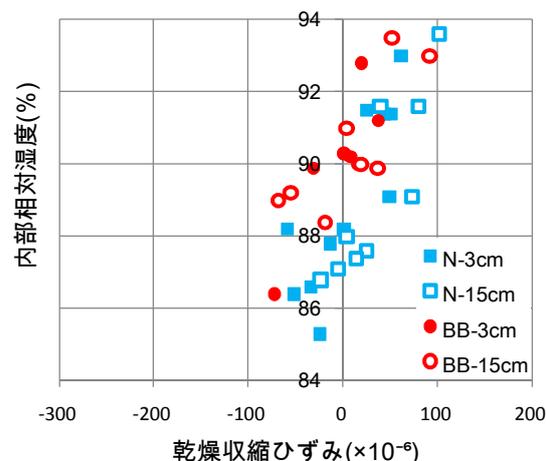


図-14 内部湿度と乾燥収縮ひずみの関係(脱型 7 日)

度に与える影響を図-11, 12に示す。セメント種類によらず、脱型時期が早いほど内部湿度の低下が大きくなる傾向を示した。深さ方向に着目すると、乾燥収縮ひずみと同様に表面から近い距離ほど内部湿度の低下が大きいことが確認できた。また、BBではNに比べて脱型1日の表層での湿度の低下が大きい傾向を示していた。脱型7日のものでは3cmと15cmの内部湿度はほとんど変化がみられなかった。よって、これらの結果からもBBでは脱型時期の影響を顕著に受ける傾向を示していることが確認できた。

(3)乾燥収縮ひずみと内部湿度の関係

図-13, 14に乾燥収縮ひずみと内部湿度の関係を示す。脱型時期によらず、内部湿度が低下することで、乾燥収縮ひずみが増加している傾向が確認できた。脱型時期に着目すると、脱型7日の場合には、深さ位置やセメント種類によらず、湿度低下に対する乾燥収縮ひずみの増加量はほぼ一定の傾向を示すことが確認できた。一方で脱型1日の場合、同一湿度下でNに比べてBBの乾燥収縮ひずみが大きくなっていることが確認できた。よって、BBは脱型1日のように養生が十分でないとき内部湿度に敏感であると考えられ、乾燥収縮ひずみが増加する傾向を示したものだと考えられる。

4. 深さ方向の相違による乾燥収縮ひずみと耐久性の関係

これまでの結果を基に、真空吸水実験と乾燥収縮の関係を示す。図-10のグラフより、材齢19日のデータを用い、直線近似を行い、深さ方向の乾燥収縮ひずみを推定した値と深さ方向の真空吸水実験の関係を図-15に示す。脱型時期が真空吸水面積率と乾燥収縮ひずみに与える影響は、BBの場合、脱型時期が早くなると、コンクリート表層部での真空吸水面積率が大きくなるにしたがって乾燥収縮ひずみも増大する結果となっている。よって、グラフではプロットした点が横に広がるにつれて表層と内部での乾燥収縮ひずみのバラツキが大きくなる傾向を示しており、脱気時期が遅くなり養生されることで表層と内部のバラツキが小さくなる傾向を確認できた。セメント種類に着目するとBBでは脱型1日の場合、Nに比べて表層部で内部湿度が大きく低下することで、粗大な空隙が増加し、水分が逸散しやすくなったことから乾燥収縮ひずみが増加したと考えられる。

真空吸水実験結果から脱型時期が早いものでは表層部で粗大な空隙が残存していると考えられ、内部では微小な空隙が増加し緻密化していると考えられる。今回測

定した乾燥収縮ひずみも同様に表層部では乾燥収縮ひずみが増加しており内部に行くにしたがって減少していくことが確認できた。よって、真空吸水実験から深さ方向の乾燥収縮ひずみが把握できる可能性があると考えられる。そこで今後は、真空吸水実験ではどの径の空隙径までに影響があるのかを把握した上で、今回測定した乾燥収縮ひずみの深さ方向の空隙径と空隙量の分布を実験予定である。課題としては、真空吸水試験では水の吸水を測定しているのに対して、乾燥収縮では水の逸散が関係するためその関係を明らかにする必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究により得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 脱型時期がコンクリートの吸水性に与える影響はセメント種類によらず、脱型時期が遅いほど真空吸水面積率が低下する傾向が確認できた。また、BBはNに比べ脱型時期が早いほど真空吸水面積率が大きく、特に1日で脱型したときに顕著に影響を受けていることが確認できた。
- (2) W/Cが真空吸水面積率に与える影響はW/Cの増加に伴い、真空吸水面積率が増加する傾向が確認できた。セメント種類に着目すると、W/CによらずBBのほうがNよりも真空吸水面積が大きい傾向を示した。また、どちらのセメント種類でも、表層部では真空吸水面積率が大きくなり、内部では小さくなる傾向を示していた。
- (3) 脱型時期が深さ方向の吸水性に与える影響範囲はNでは3cm程度であり、BBでは、脱型時期が1日の場合は4~5cm程度まで影響を受けていたが、それ以降に脱型したものについてはNと同様の傾向を示していることが確認できた。また、BBでは脱型時期が1日のものでは表層部で大きく環境の影響を受けており、環境の影響のないコンクリート内部においても吸水性が高いことを確認した。
- (4) セメント種類と脱型時期が深さ方向の乾燥収縮ひずみに与える影響は、セメント種類によらず脱型時期が短いほど、表層部での乾燥収縮ひずみが増加する傾向が確認できた。また脱型時期が7日の場合、表層部での乾燥収縮ひずみが低減され、内部のひずみと同程度の値となる傾向を示していた。セメント種類に着目すると、BBは脱型時期の影響を顕著に受けていることが確認できた。
- (5) セメント種類と脱型時期が深さ方向の内部湿度に与える影響は、セメント種類によらず脱型時期が早いほど、表層部での内部湿度変化が大きくなる傾向を示すことが確認できた。

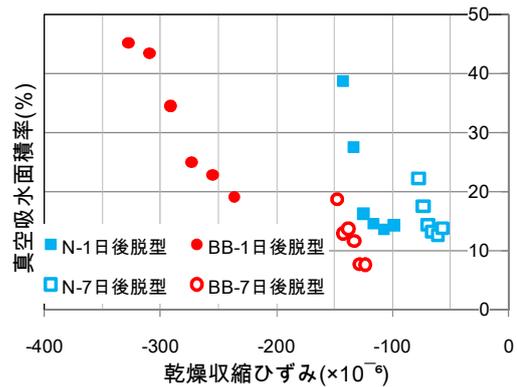


図-15 真空吸水面積率と乾燥収縮ひずみの関係

- (6) 乾燥収縮ひずみと内部湿度の関係から、脱型時期によらず、内部湿度が低下することで、乾燥収縮ひずみが増加している傾向が確認できた。脱型時期に着目すると、脱型7日の場合、深さ位置やセメント種類によらず、湿度低下に対する乾燥収縮ひずみの増加量はほぼ一定の傾向を示すことが確認できた。一方で脱型1日の場合、同一湿度下でNに比べてBBの乾燥収縮ひずみが大きくなっていることが確認できた。
- (7) 乾燥収縮ひずみと真空吸水面積率の関係は、表層部では真空吸水面積率が大きくなるにつれて乾燥収縮ひずみが増加する傾向がみられた。また、その傾向はBBのほうが顕著に表れていた。

参考文献

- 1) 佐川康貴, 濱田秀則, 今田一典, 原秀利, 坂口伸也: トンネル覆工コンクリートにおけるひび割れ抑制効果の評価に関する一考察, 土木学会コンクリート技術シリーズ 87, pp.85-90, 2009
- 2) 岩城圭介, 平間昭信, 加藤淳司, 寺澤正人: コンクリート内部の相対湿度計測による湿潤養生管理の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.211-216, 2008
- 3) 伊代田 岳史, 松崎 晋一郎, 井ノ口 公寛, 歌川 紀之: 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, 2010
- 4) 井ノ口 公寛, 佐藤 健太郎, 歌川 紀之, 伊代田 岳史: 初期養生方法と養生後の環境変化が乾燥収縮に与える影響, 第64回土木学会年次学術講演会, V-128, 2010
- 5) 松崎 晋一郎, 鈴木 肇, 伊代田 岳史: 養生期間がコンクリート表層から深さ方向への吸水性に与える影響, 第64回土木学会年次学術講演会, V-580, 2010