

論文 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

伊代田 岳史^{*1}・松崎 晋一朗^{*2}・井ノ口 公寛^{*3}・歌川 紀之^{*4}

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、本研究では養生方法を変化させた試験体を用いて一定乾燥環境ならびに乾湿繰り返し作用を与えた場合の乾燥収縮量を測定し、養生方法とその後の環境変化が乾燥収縮に与える影響について定量的に評価することを試みた。また同時に水分逸散量と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性を評価した。その結果内部湿度と乾燥収縮量の間には相関関係が認められた。

キーワード: 乾燥収縮, 養生方法, 環境変化, 内部湿度, スラッグ反応度

1. はじめに

トンネルの覆工コンクリートは、従来走行通路における化粧的な存在として考えられ多くの性能を求められることはなかった。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思わ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なひび割れとして考えるものとして、(1)乾燥収縮などに代表される体積変化がインパート等からの外部拘束を受けて発生するひび割れ、(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ひび割れ、(3)初期強度発現が不十分であるために脱枠時のだれやたわみ量増加による構造的なひび割れ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気運が高まりつつあるが、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、施工対策としてコンクリートの養生日数の増加、養生方法の提案や貫通後の坑内環境変化を最小限にするために開口部を閉口する等の方法が行われており、従来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。

しかしこのような対策においても、貫通以前のトンネル坑内では相対湿度がRH80%以上を保っているとの報告²⁾もあり、型枠存置や養生方法の改善等の養生効果³⁾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。

そこで本研究では、初期養生とその後の周囲環境の変化が乾燥収縮量に及ぼす影響を実験的に明らかにすることを目的とした。またそれに付随して初期養生後に環境変化を受けるコンクリート中の相対湿度の経時変化や水分逸散量を測定することで、乾燥収縮量との相関性について調査した。また、得られた相対湿度とセメントの水和反応を関連付けるためにセメント水和度の測定を実施した。

2. 研究ステップと実験概要

2.1 研究ステップ

本研究のフローを図-1に示した。まず、一定の環境に暴露された試験体の深さ方向における相対湿度を測定することで、周囲環境の影響がコンクリートのどの程度の深さまで及ぶかを計測する(Step1)。その結果に基づき決定した試験体サイズのコンクリートを作製し、初期の養生方法を変化させた試験体を一定環境ならびに乾湿繰り返し作用を与えて乾燥収縮挙動ならびに水分逸

*1 芝浦工業大学 工学部土木工学科助教 博士(工学) (正会員)

*2 芝浦工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*3 芝浦工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻

*4 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)

散量と試験体内の相対湿度を測定し、その関連性を調査する (Step2)。同時に周囲の湿度環境がセメントの水和度ならびにセメント中の高炉スラグ微粉末の反応に与える影響について調査を行う (Step3)。それらの結果をもとに拘束を伴う実際のトンネル現場での坑内環境とコンクリート表層ならびに内部での乾燥収縮挙動、さらに貫通前後での乾燥収縮挙動とひび割れ発生メカニズムの解明に資する情報を提供可能であると考えている。現場における測定は現在進行中であるが、本論文では室内試験結果 (Step1~3) をまとめたものを報告する。

2.2 実験概要

(1)コンクリート試験体の概要

Step1,2 の試験に供したコンクリートは、スランプ 12 ± 2.5cm, 空気量 4.5 ± 1.0% に設定した W/C55% の普通ポルトランドセメント[N]と高炉スラグ微粉末が 45% 置換された高炉セメント B 種[BB]を用いたコンクリートとし、表-1 に示す配合で試験を行った。なお、細骨材は砕砂 (密度: 2.66g/cm³, 吸水率: 1.02%), 粗骨材は砕石 (密度: 2.71g/cm³, 吸水率: 0.55%, F.M.6.62) を使い、市販の AE 減水剤により空気量の調整を行った。なお、試験体は 2 体ずつ作製した。

(2)周囲環境の深さ方向影響度調査 (Step1)

周囲環境条件が深さ方向にどの程度影響を与えるかを調査するために、小型温湿度センサーを用いて検討を行った。小型温湿度センサーとして Sensirion 社製の SHT75 を使い、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 のアクリルパイプをコンクリート打込み時に埋設した。試験体は図-2 に示すように 100×100×400mm の角柱試験体を用い、センサーの埋設深さは試験体中央の一律 50mm とし、埋設箇所は供試体端部からそれぞれ 15,20,50,70,100,200mm の位置とした。打込み後、打設面を吸水しないベニヤ板にて封緘し凝結が開始する打込み後 3 時間からアクリルパイプの内部を空洞にしたうえでセンサーを埋設しゴム栓とゴム製のキャップに密閉して計測を開始した。打込み後 18 時間で脱型したのち、ただちにアルミ箔テープにて側面 4 面を封緘し、100×100mm の断面 2 面だけを解放した状態で温度 20°C, RH40% に管理された試験槽に静置し継続的に材齢 56 日まで計測を行った。

(3)初期養生方法とその後の環境が乾燥収縮ならびに内部湿度に与える影響調査 (Step2)

Step1 の結果は後述するが、深さの影響度合いを考え試験体サイズを 100×100×400mm の角柱試験体と決定し、試験体の中心位置に内部湿度測定用にアクリルパイプを設置した。脱型までの 18 時間までの間は水分の逸散がないよう打込み面をベニヤ板で封じた。脱型後に試験体重量ならびに内部湿度を測定のもの、乾燥収縮試験

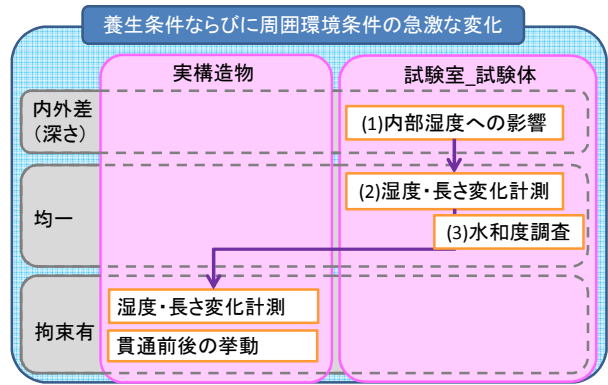


図-1 研究フロー

表-1 使用コンクリート配合表

	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)				フレッシュ性状		
			W	C	S	G	SL (cm)	Air (%)	温度 (°C)
N	55	47	172	313	855	982	9.5	3.5	21.4
BB					861	976	12	4.9	21.4

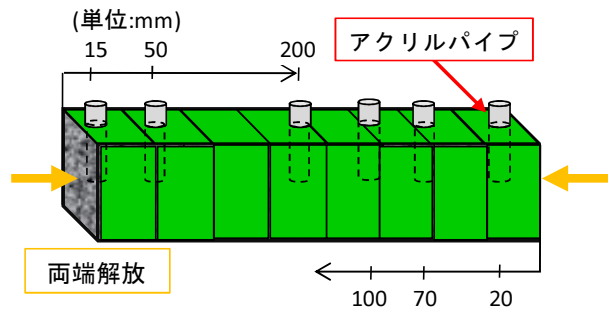


図-2 深さ方向影響度測定試験体 (Step1)

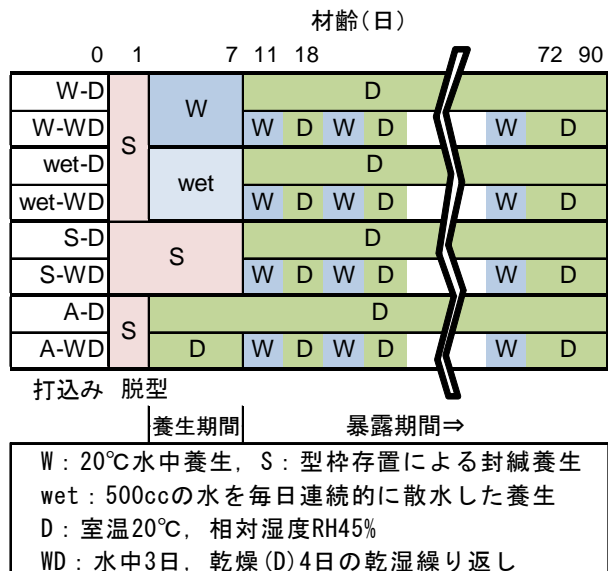


図-3 養生とその後の環境 (Step2)

用にコンタクトチップを 100mm ピッチで貼付け初長とした。試験体は養生・環境条件として図-3 に示した通りに養生ならびに連続乾燥及び乾湿繰り返し環境に暴露

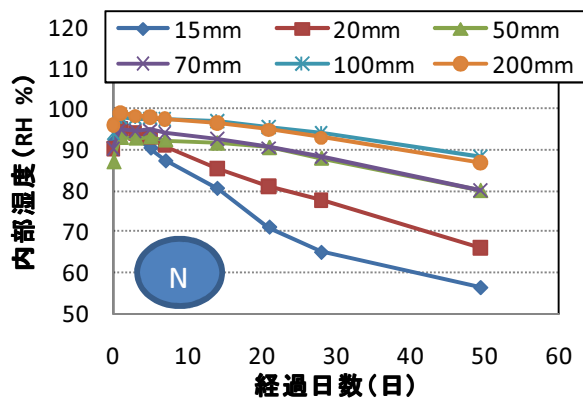
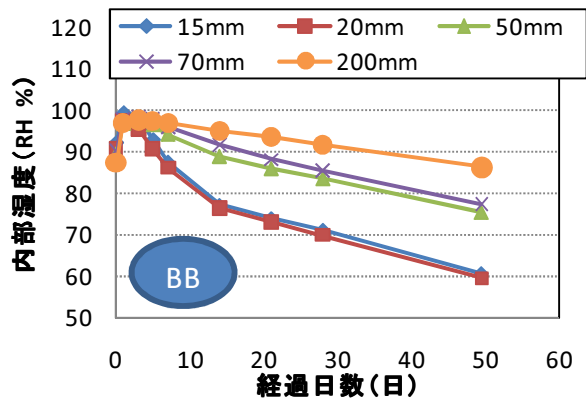


図-4 深さ方向における内部湿度測定結果



(左：N使用，右：BB使用コンクリート)

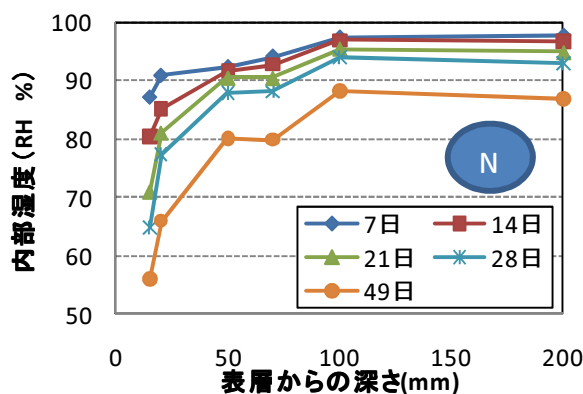
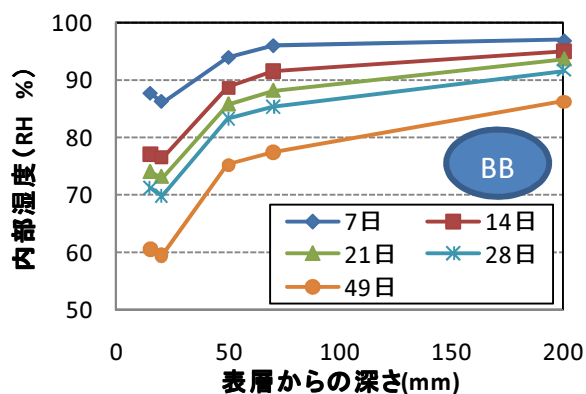


図-5 深さ方向と内部湿度の関係



(左：N使用，右：BB使用コンクリート)

した。なお、WD 環境においては6サイクル繰り返したのち7サイクル以降は乾燥環境Dへ移動して材齢90日まで測定を継続した。

(4) 周囲環境がセメントの水和に与える影響 (Step3)

20℃で一定の湿度環境に脱型直後から暴露された場合のセメント反応⁴⁾について調査するために、W/C50%の普通ポルトランドセメントならびに置換率50%の高炉セメントB種を用いたセメントペーストを作製した。試験体サイズは、環境の影響を均一に受けるよう20mm角とし、脱型までの1日は封緘養生を施し、その後NaOHにより湿度調整をしたRH40,60,80%の環境ならびに封緘条件で養生を行った。試験材齢は脱型直後と3,7,28日とし強熱減量とサリチル酸アセトンメタノール溶液を用いた選択溶解法⁵⁾によりセメントの反応度とスラグ反応率の測定を実施した。

3. 試験結果と考察

3.1 周囲環境の深さ方向影響度試験 (Step1)

図-4は深さ位置における内部湿度の経時変化を示したものである。これよりN, BBともに表層から近い距離においては相対湿度が早い経過日数時点で大きく低下していることが分かる。一方で深い位置では測定開始から緩やかに減少するものの急激な湿度低下は認められない。そこで図-5は測定材齢ごとの深さ方向と内部湿度

の関係性をNならびにBBで示したものである。これより、Nにおいては表層部分で湿度が著しく低下しているのに対し、深さ50mmでその影響は小さくなり、100mm以深ではほとんど認められない。またBBにおいては表層から75mm程度までは乾燥の影響が大きく、またそれ以深でも材齢とともに相対湿度が緩やかに低下している様子が認められる。このことから深さ方向への周囲環境の影響はNと比較してBBが大きいといえる。

3.2 初期養生方法とその後の環境が乾燥収縮と内部湿度に与える影響 (Step2)

(1) 乾燥収縮測定結果

Step1の結果より乾燥の影響は試験体内部50mmまでと考え試験体が一律に環境の影響を受けるように全面を解放した試験体を用いて乾燥収縮を測定した。図-6は各種養生条件におけるNならびにBBの乾燥収縮量の経時変化を示したものである。一定環境に暴露した試験体[*-D]では、初期に養生の影響を大きく受け、Nでは環境暴露後はほぼ同一挙動を示すのに対し、BBでは材齢80日においても養生の影響がみられる。これは、気中養生Aでは粗大な空隙を残存してしまい、収縮に起因することのない水隙から水分逸散し、その後は水分が減少してしまい、乾燥収縮量は小さくなると考えられる。一方水中養生したものは水和とともに空隙を緻密化し水分の逸散を抑制していると考えられる。

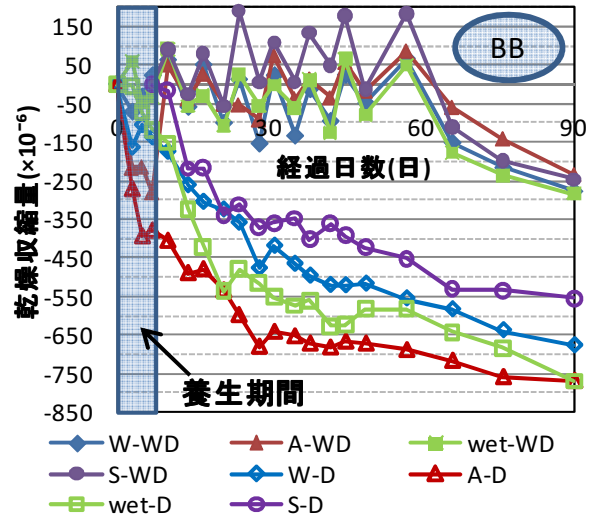
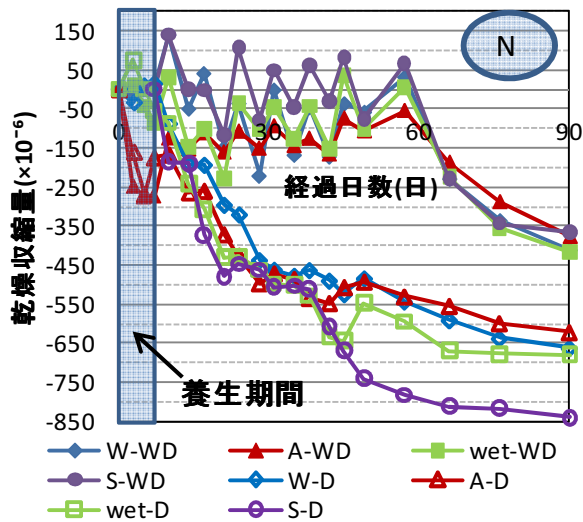


図-6 乾燥収縮の経時変化

(左：N使用，右：BB使用コンクリート)

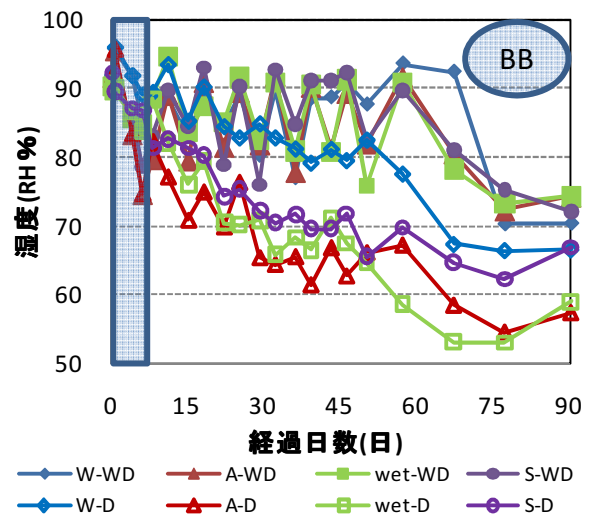
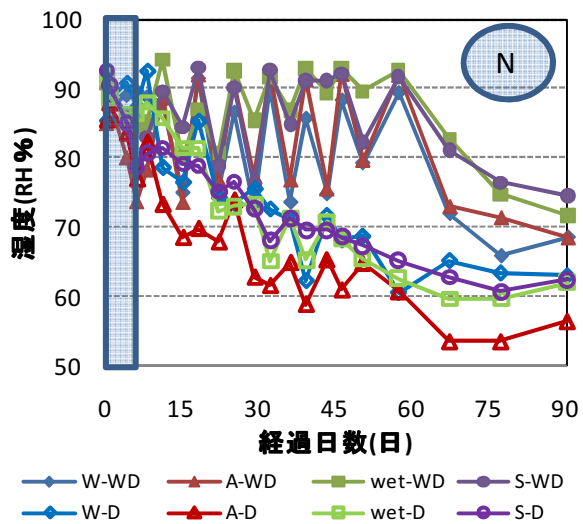


図-7 内部湿度の経時変化

(左：N使用，右：BB使用コンクリート)

一方養生終了後から乾湿繰り返し[*-WD]を行った乾燥収縮測定結果をみると、NおよびBBのいずれのコンクリートにおいても初期養生条件の相違が乾燥収縮量に与える影響はあまり認められなかった。その中でも気中養生A-WDの挙動は他と比べて小さい変動幅であった。その原因として考えられるのは、材齢初期からの急激な乾燥でいったん水和停止したセメント粒子が、乾湿繰り返し作用により供給された水分により再び水和が進行したものとする。このことに関しては、今後空隙の測定や水和度等の測定を行い、調査をする必要があると考えられる。

(2)内部湿度の経時変化

図-7は試験体内部に埋設した小型湿度センサーの試験体内部湿度の測定結果を示したものである。これより乾燥条件ならびに乾湿繰り返しの条件において初期養生の影響として、気中養生Aでは材齢初期に湿度が低く

RH80%以下となる傾向にあるが、その後は他の養生とほぼ同じ挙動を示しており、周囲環境に応じた挙動を示していることがわかる。またNとBBにおいても顕著な差は認められなかった。しかしBBの水中養生した試験体だけは他の試験体と比較して湿度の低下が鈍いことが認められた。このことはBBが緻密化していることに起因すると考えられるが詳細は今後の検討課題である。

(3)乾燥収縮量と水分逸散率ならびに相対湿度の関係

図-8は乾燥収縮量と試験体の質量変化から求めた水分逸散率の関係を示す。なお、養生を施した試験体においては暴露開始時を起点とし、気中養生Aの試験体は脱型直後を起点とした。つまり同一環境に暴露を始めた時点から整理したものである。これより気中養生Aでは暴露直後に急激に水分が逸散するが収縮に起因していないことがわかる。一方、A-WDのように乾湿繰り返し作用を施すことでセメントの再水和に伴い、他の養

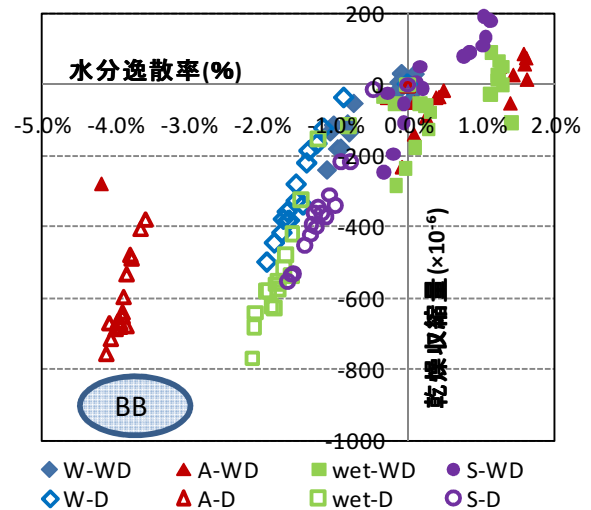
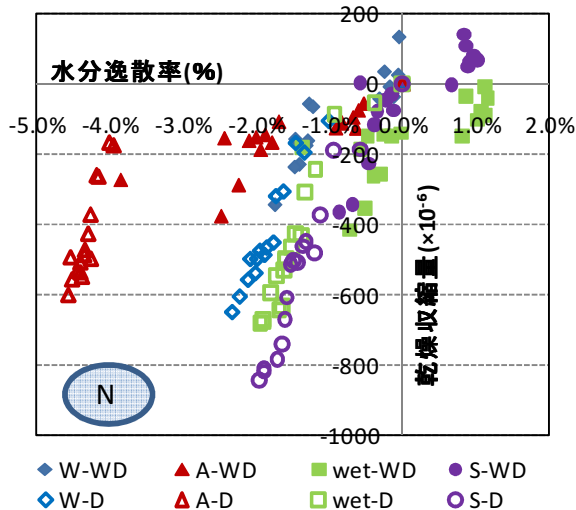


図-8 水分逸散率と乾燥収縮量の関係

(左：N使用，右：BB使用コンクリート)

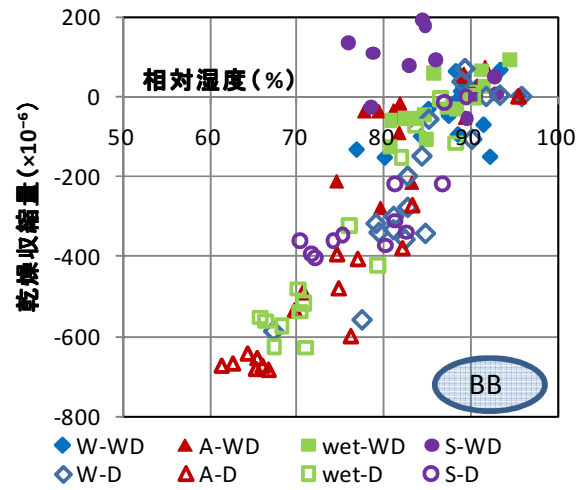
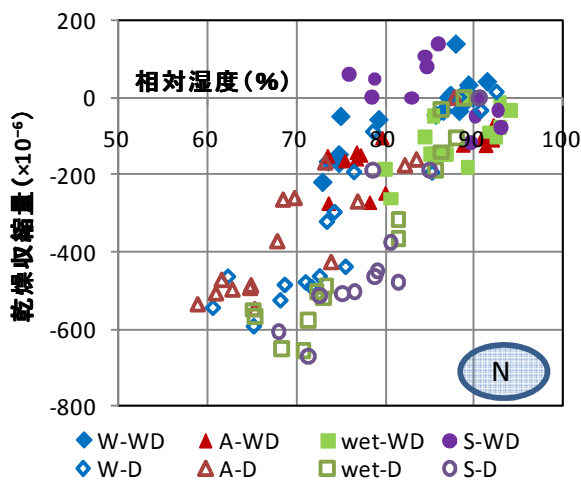


図-9 内部湿度と乾燥収縮量の関係

(左：N使用，右：BB使用コンクリート)

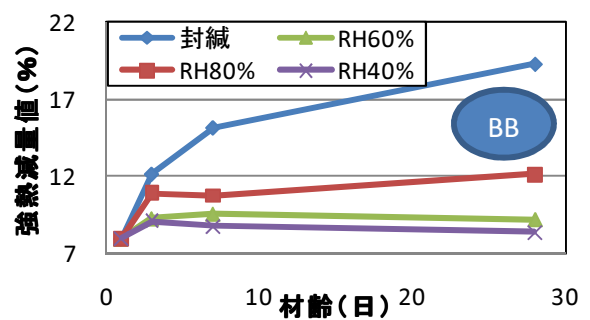
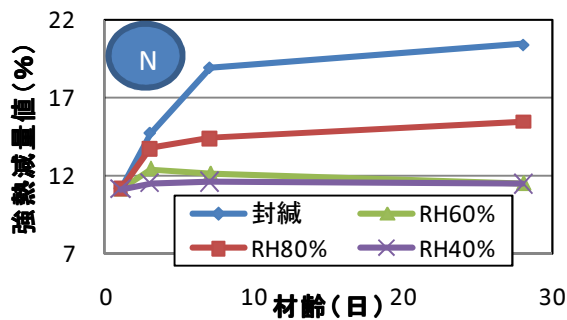


図-10 強熱減量試験によるセメント反応度調査結果

(左：N使用，右：BB使用コンクリート)

生を施した試験体とほぼ同じ挙動となることがわかる。この関係はセメントの種類によらずほぼ一定であった。

図-9 は内部湿度と乾燥収縮量の関係を示したものである。これより、N と BB のいずれにおいても内部の相対湿度の低下に伴い乾燥収縮量が増大することがわかる。その傾向は養生方法やその後の環境変化によらないといえる。N と BB を比較すると、同一湿度環境において BB の方が N よりも収縮量が大きい結果となっており

セメント種類により内部湿度と乾燥収縮の関係が異なるといえる。

3.3 周囲環境がセメントの水和に与える影響 (Step3)

図-10 は強熱減量による結合材全体の反応度を示したものである。これによると封緘条件下では水和が材齢とともに進行しているのに対し、湿度が低く設定されると水和が停滞していることがわかる。しかし、RH80%では水和は若干ではあるが進行しているのに対し、RH60%以

下では暴露直後から水和停滞が起こっており、水和に必要な水分が不足していると推測できる。図-11はBBセメント中の高炉スラグ微粉末の反応度を測定したものであるが、強熱減量の結果と同様、封緘養生やRH80%養生では水和は継続しているのに対し、低湿度環境では水和が阻害され停滞していることがわかる。このことからRH60%とRH80%の間に境界が存在し、水和の継続可能領域が存在すると推定できる。

このことから急激に乾燥し水分が逸散する気中養生ではコンクリートにおいても水和が停滞し、粗大な空隙を残したままの組織を形成するのに対し、養生を施したり、乾湿繰り返し条件下に晒されたりすることで、内部湿度がRH80%を上回り再水和し空隙を減少させるために前述した相対湿度と乾燥収縮量の関係が維持できると想定できる。

4. まとめ

本研究により得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 両端が解放された試験体を用いて周囲環境が内部湿度に与える影響を調査した結果、表層から50-70mm程度まで及ぶことがわかった。また、養生を施さない場合にはNに比べてBBの方が深い位置まで影響することが分かった。
- (2) 初期における養生方法を変化させた試験体により一定環境および乾湿繰り返し環境下での乾燥収縮を測定したところ、一定環境での乾燥収縮は養生方法によらないことがわかった。ただし、気中養生をした場合には材齢初期において大きな収縮量となることがわかった。また、乾湿繰り返し環境では全体として収縮量が小さくなる。これは湿潤時に供給される水分によりセメントが再水和し、空隙が減少することが原因であると考えられるが今後の検討課題である。
- (3) 試験体内の内部湿度においても初期養生の影響を受けず乾燥収縮と同様の挙動を示した。しかし、BBの水中養生を施した試験体のみは相対湿度の低下が緩やかとなり水分逸散がしにくい緻密な構造であることが推測できる。
- (4) 水分逸散率および内部湿度と乾燥収縮量には養生方法ならびに養生後に一定環境および乾湿繰り返し環境によらず相関性が認められた。いずれの測定結果においても、Nと比較してBBの方が同一相対湿度ま

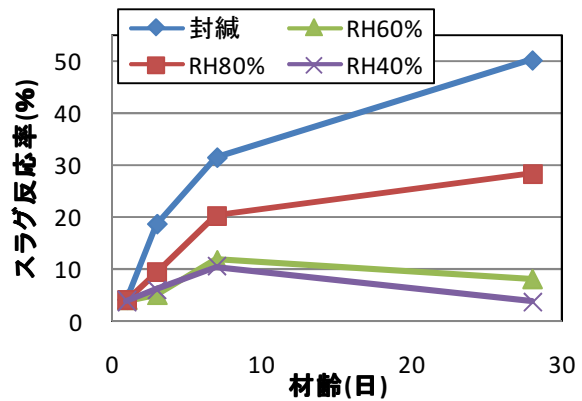


図-11 選択溶解法によるスラグ反応率調査結果

たは水分逸散率になると乾燥収縮量が大きくなる傾向を示した。

- (5) ある湿度環境下でのセメント反応度ならびに高炉スラグ微粉末の反応度を計測した結果、RH80%以上であれば水和反応が継続するのに対し、RH60%以下では水和反応は停滞してしまうことが確認できた。

以上より、今後は実現場トンネルへの適用を含めた検討を継続していくとともに、養生条件やその後の環境によるセメントの水和反応からの検討を予定している。

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) 檀康弘, 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, pp.431-441, 2009
- 4) 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 (Issue 35)
- 5) 混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会報告書, 土木学会, 2007