

覆工コンクリートの天端部を対象とした収縮試験と分布バネ解析によるひび割れ条件の検討

(株) 奥村組 技術研究所 ○フェロー会員 東 邦和 正会員 齋藤隆弘
 (株) 奥村組 技術研究所 正会員 小野 緑 正会員 張 志瑄
 東京工業大学 環境・社会理工学院 正会員 岩波光保

1. はじめに

山岳トンネルの覆工コンクリート天端部は、施工時の品質低下に伴いトンネル軸方向のひび割れ発生が懸念される部位である。本研究は天端部を対象として、収縮の進行がひび割れの発生に及ぼす影響を検討するため、一連の試験と解析を行った。自由収縮試験と拘束収縮試験の結果から収縮の大きさを求め、拘束試験の解析により分布バネの大きさと降伏時期の検討を行った。次に現場における計測結果を示して、解析により覆工に発生する応力の大きさを比較した。さらに覆工コンクリートの品質低下を想定し、引張強度と収縮進行などのひび割れ条件がひび割れ発生に与える影響を検討した。

2. 自由収縮と拘束収縮の試験および解析

2-1 試験方法

覆工コンクリートを対象とした試験の使用材料と配合を表-1 に示す。自由収縮試験は試験体 100×100×400mm の内部にひずみ計を設置して測定した。拘束収縮試験は JIS A 1151 「拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法」に準拠して行い、ひずみゲージを貼付して測定した。気中養生条件は温度 20℃、湿度 60% である。

表-1 使用材料と配合

セメント	高炉セメント B 種, 密度 3.05g/cm ³
細骨材	富津産山砂: 表乾密度 2.61g/cm ³
粗骨材	桜川碎石: 表乾密度 2.64g/cm ³ , Gmax20mm
混和剤	AE 減水剤標準形 I 種
配合	スランプ 12.5cm, 空気量 4.3%, 水セメント比 55.0%, 単位水量 161kg/m ³ , 単位セメント量 293kg/m ³

2-2 計測結果

自由収縮試験計測結果を図-1 に示す。試験体には 80 日後に -300×10^{-6} の収縮ひずみが生じた。ひずみの大きさは深さ 25mm と 50mm (中心) で同じであり、ひずみには自己収縮と乾燥収縮を含んでいる。拘束収縮試験体のコンクリートと拘束枠のひずみ計測結果を図-2 に示す。コンクリートは打設から 15 日後に -70×10^{-6} の収縮となり、ひび割れが生じた。コンクリートのひずみはひび割れにより拘束が解放され、収縮の大きさが -130×10^{-6} になり、その後 74 日の時点で -286×10^{-6} になった。拘束枠のひずみは、ひび割れの発生と同時に -140×10^{-6} から -40×10^{-6} に戻り、以降は一定である。材齢 28 日測定のコクリートの圧縮強度は 30.3N/mm²、静弾性係数は 2.93×10^4 N/mm² である。

2-3 拘束収縮試験の解析

ひび割れ発生の解析にはプログラム FEAST (JIP テクノサイエンス) を用いた。拘束試験解析モデル (1/2 モデル) を図-3 に示す。解析条件を表-2 に示す。拘束試験体モデルの高さ中央に静弾性係数の値から求めた分布バネ要素を設け、降伏後のバネ定数を 1/100 に低減する。自己収縮と乾燥収縮ひずみは解析ステップごとに与えた。解析用収縮ひずみを図-4 に示す。分布バネの降伏規準 (引張強度) をコンクリート標準示方書式りから 2.6N/mm² (材齢 28 日) に設定して解析した。バネ要素の変位 (ひび割れ幅) を図-5 に示す。設定したバネ定数において降伏の発生時期が 20 日程度となり、60 日後にはバネ要素の変位が 0.05mm となる結果が得られ、ひび割れの状況を表せた。

表-2 解析条件

温度上昇, 強度発現	土木学会コンクリート標準示方書に準拠
自己収縮, 乾燥収縮	土木学会コンクリート標準示方書に準拠
分布バネ定数の設定	1.27×10^9 k N/m ³ (10 ⁷ ~10 ¹⁰ 範囲で検討)

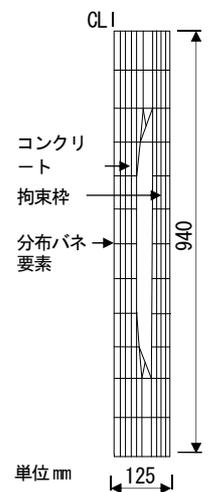


図-3 拘束試験解析モデル (1/2 モデル)

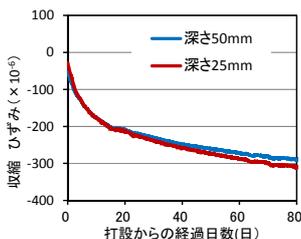


図-1 自由収縮試験計測結果

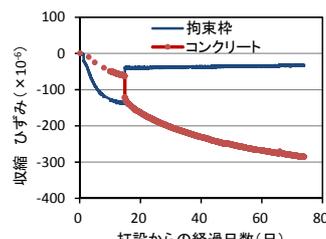


図-2 拘束試験体ひずみ計測結果

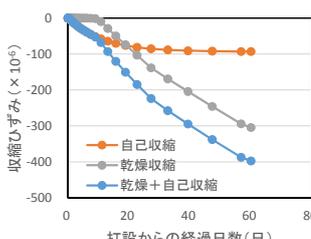


図-4 解析用収縮ひずみ

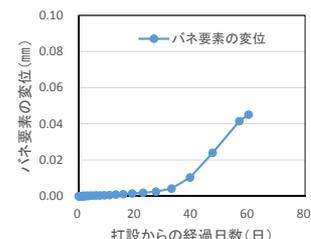


図-5 バネ要素の変位 (ひび割れ幅)

キーワード: 覆工コンクリート, 乾燥収縮, 自己収縮, ひび割れ, 温度応力解析

連絡先 〒300-2612 茨城県つくば市大砂 387 (株)奥村組 技術研究所 TEL 029-865-1521 FAX 029-865-1522

3. 現場覆エコンクリート計測結果

3-1 計測方法及計測結果

道路トンネル²⁾の覆エコンクリートにおいて養生のない区間を設定して、計測した実ひずみを図-6に示す。覆エ厚さ300mmに対し、表面から30, 75, 150mmの深さにひずみ計をトンネル軸方向と周方向に、スプリングライン高さ位置に設置している。コンクリートひずみは時間経過とともに収縮側に増大した。打設後70日で周方向ひずみは150mm深さ(中心部)で -252×10^{-6} 、30mm深さでは -880×10^{-6} に達している。また、構内湿度は打設時の90%からトンネル貫通時の60%に低下した。天端表面部ではトンネル軸方向に乾燥収縮ひび割れが発生した。

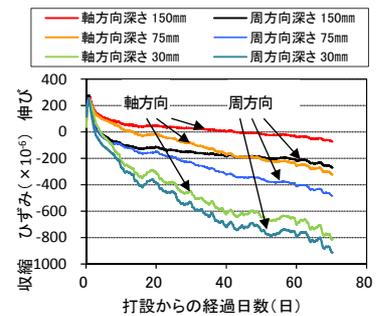


図-6 覆エコンクリート実ひずみ

4. 覆エ天端部の分布バネ解析によるひび割れ条件の検討

4-1 解析方法

覆エ解析モデルを図-7に示す。覆エ部はコンクリート部のみをモデル化している。解析条件を表-3に、解析ケースを表-4に示す。分布バネの値は拘束試験から定めた。全ケースで温度応力と自己収縮を覆エ部要素に与えて解析した。Case-2, 3では、解析モデルの天端部中央に分布バネを設け、覆エコンクリート最内面要素に片面乾燥収縮の大きさのひずみ³⁾を与えた。解析用収縮ひずみを図-8に示す。Case-2の分布バネの引張降伏強度は 2.6 N/mm^2 、Case-3では天端部にノロの巻き込みなどによる弱部³⁾があると想着て、引張降伏強度を1/2の 1.3 N/mm^2 とした。

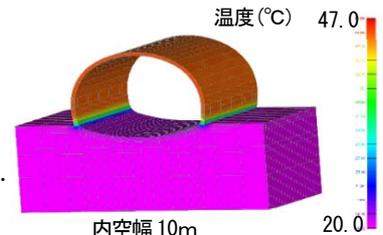


図-7 覆エ解析モデル

表-3 解析条件

外気温・湿度	20°C一定	60%一定
収縮ひずみ	自己収縮, 乾燥収縮	
分布バネ定数	$1.27 \times 10^9 \text{ k N/m}^3$	

4-2 解析結果

Case-1(乾燥収縮なし)の覆エ天端部要素の応力解析結果を図-9に示す。天端部の引張応力は 0.31 N/mm^2 であり、コンクリートの引張強度 2.6 N/mm^2 と比較して小さくひび割れは生じない。

Case-2のバネ要素の応力を図-10に示す。天端部の最内面要素(下部要素)では引張応力が発生し、打設から100日経過後にバネが降伏した。乾燥収縮の進行により天端部にひび割れが入ると考えられる。

Case-3のバネ要素の応力を図-11に示す。打設から68日で下部のバネが降伏した。バネ要素の変位(ひび割れ)解析結果を図-12に示す。Case-2では、打設から180日で下部バネ要素の変位は 0.014 mm となる。引張強度の小さいCase-3では、下部のバネ要素の変位は 0.034 mm であり、Case-2の2.3倍になる。ひび割れの状況を図-13に示す。

表-4 解析ケース

Case-1	乾燥収縮なし
Case-2	乾燥収縮あり
Case-3	乾燥収縮あり, 引張強度 1/2

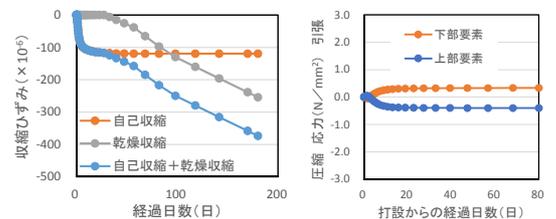


図-8 解析用収縮ひずみ 図-9 要素応力(乾燥収縮なし)

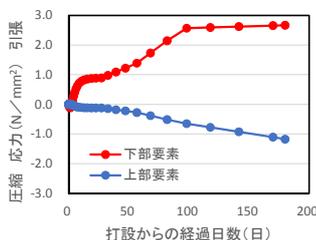


図-10 バネ要素応力 Case-2

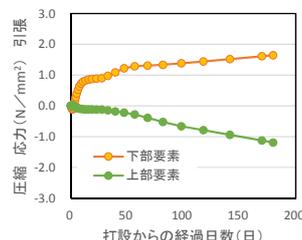


図-11 バネ要素応力 Case-3

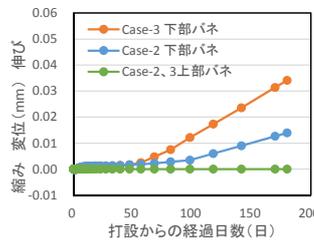


図-12 バネ要素の変位 Case-2, 3

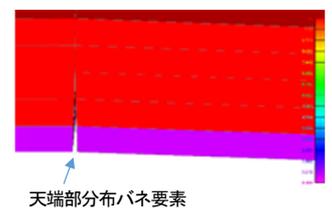


図-13 ひび割れ状況 Case-3

5. まとめ

覆エコンクリートの天端部は、トンネル内の湿度が60%程度になると乾燥収縮が進行し、100日経過後にトンネル軸方向のひび割れの入る可能性が大きい。また、施工時に引張強度が1/2になるような弱部が生じた場合には、60日経過後の早期にひび割れが入るといえる。弱部は打重ね部にノロが巻き込まれるなどした時に発生する場合が考えられる。

参考文献 1) 土木学会コンクリート標準示方書 設計編 2017年制定

2) 東 邦和 他: 保湿・保湿養生マットを用いた覆エコンクリートの養生効果の研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36.No.1, pp.430-435, 2014

3) 小野 緑 他: 覆エコンクリートの天端部における打重ね箇所のひび割れ性状に関する要素実験, 土木学会第73回年次学術講演会, pp.169-170, 2018