

山岳トンネル覆工コンクリートの収縮ひび割れに関する解析的検討

川又 篤*1・松岡 茂*2・唐沢智之*3・西脇敬一*1

概 要

山岳トンネル覆工コンクリートのひび割れ発生原因の一つにコンクリートの収縮ひずみがある。収縮ひずみは環境条件の影響を受けることから、覆工コンクリートのひび割れ発生パターンも季節変動があることが予想される。そこで、実際に発生したひび割れの調査を行い、ひび割れ発生パターンの違いを FEM 解析で検討した。その結果、覆工コンクリートでは、夏季に施工した場合、気温が低下する冬季には乾燥収縮ひずみに加えて温度収縮ひずみが増加するため、ひび割れが増加することを確認できた。また、地山側の拘束度合いによりひび割れ発生パターンは変化することが確認できた。更に、インバートの拘束によるひび割れは、主に側壁部に生じ、その方向は軸直交方向であることがわかった。

キーワード：トンネル・覆工・収縮・ひび割れ

ANALYTICAL STUDY ON SHRINKAGE CRACKING OF LINING CONCRETE IN MOUNTAIN TUNNEL

Atsushi KAWAMATA *1, Shigeru MATSUOKA *2,
Tomoyuki KARASAWA *3, Keiichi NISHIWAKI *1

Abstract

The shrinkage strain of concrete is one of causes of cracking in mountain tunnel lining. Since the shrinkage strain is affected by environmental conditions, cracking pattern of the lining concrete may vary from season to season. Therefore the cracks in lining concrete of actual tunnels were researched, and then the difference of cracking pattern was analyzed by the FEM. The research revealed that, in lining concrete placed in summer, cracking increases in winter when both drying shrinkage strain and thermal shrinkage strain increase as temperature decreases. The research also demonstrated that the cracking pattern varies depending on the degrees of confining pressure by the ground. Furthermore, it was shown that cracking due to confining effect of the invert mainly occurs in the side walls, and the cracking direction is orthogonal to the tunnel axis.

Keywords: tunnel, lining, shrinkage, cracking

*1 Construction Material Group, Research and Development Department, Engineering Division

*2 General Manager, Research and Development Department, Engineering Division

*3 Manager, Construction Material Group, Research and Development Department, Engineering Division

山岳トンネル覆工コンクリートの収縮ひび割れに関する解析的検討

川又 篤*1・松岡 茂*2・唐沢智之*3・西脇敬一*1

1. はじめに

山岳トンネル覆工コンクリートのひび割れ発生原因の一つにコンクリートの収縮ひずみがある。収縮ひずみは環境条件（気温、湿度）の影響を受けることが知られていることから、覆工コンクリートのひび割れ発生パターンも季節変動があることが予想される。そこで、実トンネルの覆工コンクリートに発生したひび割れの調査を行い、ひび割れ発生パターンの違いをFEM解析で検討した。

2. ひび割れ発生パターン

施工中のトンネルのひび割れ調査結果（調査年月 2010年1月）を打設時のコンクリート温度とひび割れ本数で整理したものを図-1に示す。これを見ると、コンクリート温度 20°Cを境にひび割れ本数に大きな差異が見られる。なお、コンクリート打設は、終点側から起点側に向かって行われており、期間は 2008年12月から 2009年7月である。したがって、終点側と起点側とは約7ヶ月もの差異があり、終点側の方が乾燥収縮ひずみは大きいものと考えられる。しかしながら、コンクリート温度が高い夏季に打設し、打設からの材齢の短い起点側の方が、ひび割れ本数は多くなっている。コンクリートは、温度降下

により温度収縮し、乾燥により乾燥収縮する。よって、高温多湿の気象条件下で夏季施工の覆工コンクリートは、打設後は冬季に向かって収縮する傾向となるため、ひび割れとして顕在化したものと考えられる。そこで、乾燥収縮と季節変動による温度収縮を考慮した FEM 解析でひび割れ発生パターンを検討した。

3. 乾燥収縮ひずみの推定方法検討

3.1 概要

綾野^{1),2),3)}らは、乾燥収縮ひずみの経時変化を拡散係数、フィルム係数、収縮係数を用いた FEM 解析で求めることができ、100×100×400mm の角柱供試体の乾燥期間 180 日の乾燥収縮ひずみは、φ50×100 のコア供試体の乾燥期間 42 日における値とほぼ一致するとしている。また、測定された乾燥収縮ひずみから、逆解析により、拡散係数、フィルム係数、収縮係数を求めることが可能であると示

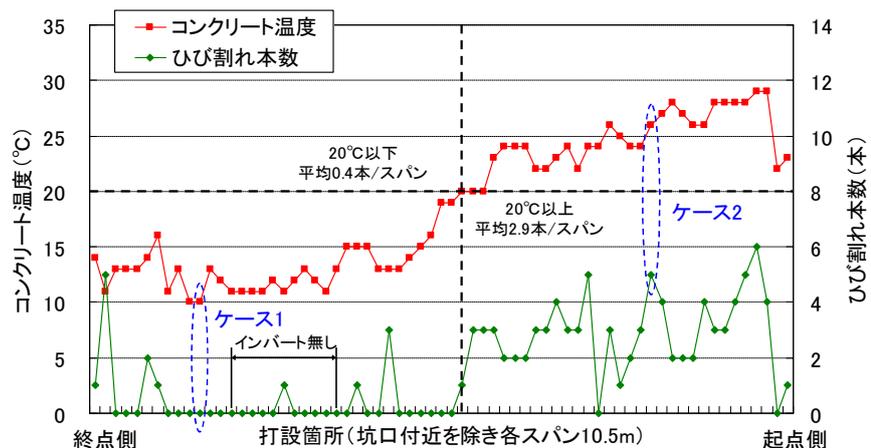


図-1 覆工コンクリートのコンクリート温度とひび割れ本数

*1 エンジニアリング本部 研究開発部 建設材料グループ
 *2 エンジニアリング本部 研究開発部 部長
 *3 エンジニアリング本部 研究開発部 建設材料グループ グループリーダー

ている。

ここでは、事例に示した覆工コンクリートで使用された配合について、測定された乾燥収縮ひずみから、FEMによる逆解析により拡散係数、フィルム係数、収縮係数を推定して、覆工コンクリートの三次元 FEM 解析で使用する拡散係数、フィルム係数、収縮係数を決定した。

3. 2 解析方法

覆工コンクリートで使用された配合の乾燥収縮ひずみの計算に先立ち、表-1に示す配合1について計算方法の確認を行い、同様の方法を用いて覆工コンクリートの配合である配合2について検討を行った。なお、配合1及び2で使用しているそれぞれの材料は異なるプラントのものである。

配合1については、JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法 第2部：コンタクトゲージ方法」に準拠した100×100×400mmの角柱供試体、及びφ50×100mmの小径コア供試体の乾燥収縮ひずみを測定した。小径コア供試体については、上下面は乾燥しないように樹脂で覆って側面のみから乾燥するようにして、上下面それぞれの中央に測定用のコマを接着し、ダイヤルゲージを使用して乾燥収縮ひずみを測定した³⁾。配合2については、JIS A 1129に準拠した角柱供試体の乾燥収縮ひずみを測定した。供試体は材齢7日まで温度20±1℃の水中養生を行って、その後、温度20±1℃、相対湿度60±5%RHの環境下で乾燥養生を開始した。

FEM解析は非定常解析とし、拡散係数(mm²/day)、フィルム係数(mm/day)、収縮係数(μ/RH)を物性値として試算した。拡散係数は、コンクリート中の水分移動を表す係数である。コンクリート表面からの水分発散量は、外気の相対湿度とコンクリート表面の水分量との関係で決定され、その関係を示すのがフィルム係数である。収縮係数は、変化する相対湿度に対す

表-1 配合

配合	水セメント比	細骨材率	空気量	単位量(kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
1	41.0	42.9	4.5	163	398	744	1018	5.97
2	50.3	47.0	4.5	171	340	827	945	5.1

る乾燥収縮ひずみであり、収縮係数と相対湿度を乗じることにより乾燥収縮ひずみが求まる⁴⁾。モデル形状は、角柱供試体については三次元の1/4モデルとし、小径コア供試体については二次元の1/4モデルとした。解析では、測定結果に合うように拡散係数、フィルム係数、収縮係数を決定した。

3. 3 解析結果

測定結果と解析結果を図-2に示す。配合1の結果について見てみると、測定結果と解析結果はよく一致していることがわかる。また、文献³⁾のように、小径コア供試体の乾燥材齢42日の乾燥収縮ひずみと角柱供試体の乾燥材齢182日の値がほぼ一致した。

覆工コンクリートの配合である配合2については、文献⁴⁾を参考に拡散係数及びフィルム係数と最大骨材寸法及び単位水量の関係を式(1)及び式(2)のように定めて計算を行ったところ、測定結果と解析結果が一致する結果が得られた。

$$D(h) = 2.7787G_{max}^{-0.7474} \times e^{(9586W^{-1.488} + (1-h)\log_e(-63.566W + 16534))} \quad (1)$$

$$H_F = 1.323 \times 10^7 G_{max}^{-0.5} W^{-2.928} \quad (2)$$

ここに、 $D(h)$: 拡散係数 (mm²/day)

H_F : フィルム係数 (mm/day)

h : 相対湿度 (%RH)

G_{max} : 最大骨材寸法 (mm)

W : 単位水量 (kg/m³)

これらの結果から、配合2の拡散係数、フィルム係数、収縮係数を式(3)~(5)のように定めた。拡散係数と相対湿度の関係を図-3に示す。阪田⁴⁾らの研究によると、飽和状態での拡散係数は50~100mm²/day程度、フィルム係数は1~5mm/day程度という結果が得られており、今

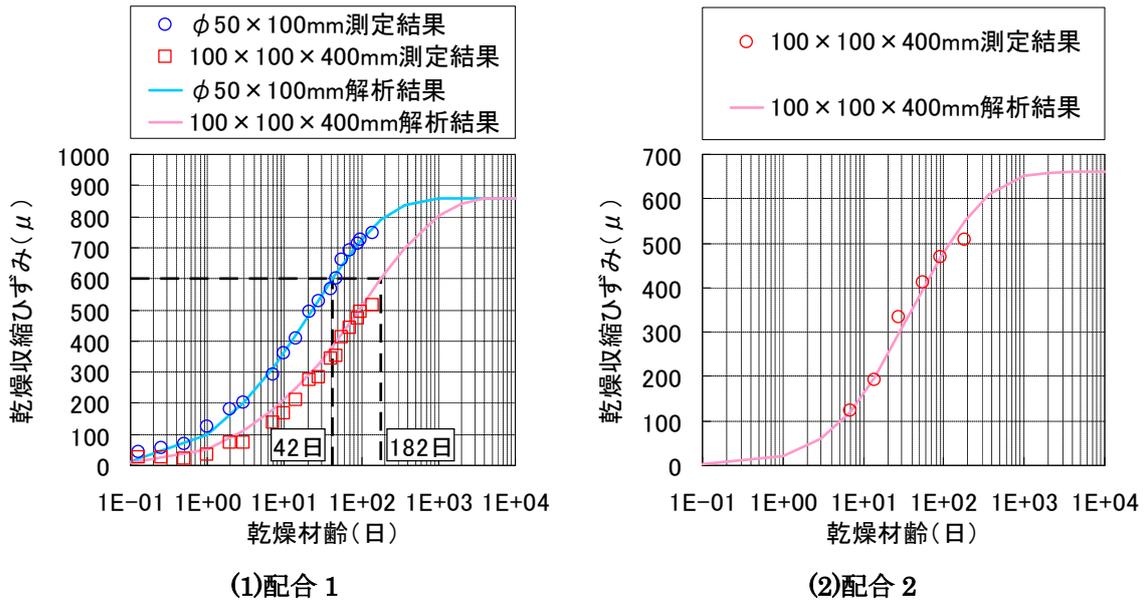


図-2 乾燥収縮ひずみの測定結果と解析結果

回の結果はこれらと比較しても大きくかけ離れた値でないことがわかる。しかしながら、これらの値は材料や配合によって異なると考えられるため、更なる検討が望まれる。

$$D(h) = 59e^{8.6(1-h)} \quad (3)$$

$$H_F = 0.9 \quad (4)$$

$$Sh = 1650 \quad (5)$$

ここに、 Sh : 収縮係数 (μ/RH)

4. 覆工コンクリートの収縮ひずみ

4.1 概要

図-1に示すケース1(2009年1月コンクリート打設)及びケース2(2009年6月コンクリート打設)の乾燥収縮ひずみ及び温度収縮ひずみをそれぞれFEM解析で求めてそれらを合算し、覆工コンクリートのひび割れ発生パターンを確認する三次元FEM解析における入力データとなる収縮ひずみを求めた。なお、ケース1ではコンクリート打設とひび割れ調査の月が同一であるため、季節変動の影響は考慮せず乾燥収縮ひずみのみとし、ケース2では乾燥収縮ひずみと温度収縮ひずみの両方を考慮した。また、覆工コンクリートの内空側と地山側の特性がどの位置でも一定であると仮定し、内空側と地山側の

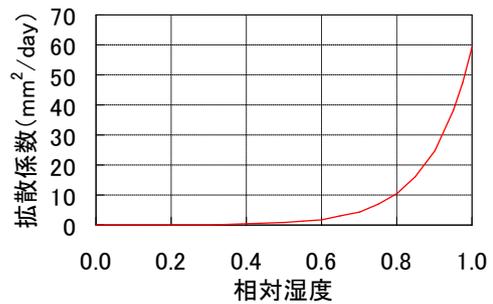


図-3 拡散係数と相対湿度の関係

表面を結んだ覆工厚さ300mmの一次元FEM解析とした。

4.2 乾燥収縮ひずみの解析

いずれのケースにおいても、コンクリートの初期の相対湿度は100%RHとした。解析における乾燥面は、覆工コンクリートの内空側の一面とした。ひび割れ調査時の内空側の相対湿度は、日々の湿度変化のばらつきを考慮して平均的な値が望ましいと考え、気象庁HPよりひび割れ調査を行った1月の統計期間30年の平年値62%RHとした。また、乾燥材齢は、ケース1では364日、ケース2では199日である。拡散係数、フィルム係数、収縮係数は式(3)~(5)に示す通りである。

FEM解析により得られたひび割れ調査時の乾燥収縮ひずみと覆工深さの関係を図-4に

示す。解析の結果、覆工コンクリートの内空側表面での乾燥収縮ひずみはケース1で556 μ 、ケース2で527 μ となり、乾燥材齢の長いケース1の方が大きな値を示した。

4.3 温度収縮ひずみの解析

ケース2における温度収縮ひずみは熱伝導解析により求めた。熱伝導率は2.7W/m $^{\circ}$ C、熱伝達率は13W/m 2 C、比熱は1.05kJ/kg $^{\circ}$ C、線膨張係数は10 μ / $^{\circ}$ Cとした⁵⁾。密度は2.3とした。打設時のコンクリート温度を実際の測定値である26 $^{\circ}$ Cとし、打設時の内空側の温度を気象庁HPより打設した6月の統計期間30年の年平均値20.6 $^{\circ}$ Cとし、地山側の温度は気象庁HPより統計期間30年の年平均値13.8 $^{\circ}$ CとしてFEM解析を行った結果を図-5に示す。なお、水和熱については、単位セメント量がそれほど多くないこと、部材厚が大きくないことを考慮して、ここでは無視した。図を見ると、コンクリートの温度は打設後1日程度で一定の温度分布になることがわかった。温度収縮ひずみは、フレッシュなコンクリートが凝結して硬化し始めてから発生すると考えられるが、硬化初期のコンクリートのひずみ変化は水和熱やクリープ等の影響を受けて複雑である。そのため、上記解析で到達した初期の一定の温度分布を、簡易的に初期のコンクリート温度とした。

上記解析で到達した一定の温度分布を初期のコンクリート温度とし、ひび割れ調査時の温度分布を計算した。ひび割れ調査時の内空側の温度は、気象庁HPよりひび割れ調査を行った1月の統計期間30年の年平均値2.5 $^{\circ}$ Cとし、地山側の温度は気象庁HPより統計期間30年の年平均値13.8 $^{\circ}$ Cとした。FEM解析により得られたひび割れ調査時のコンクリート温度と覆工深さの関係を図-6に示す。コンクリート温度は、図-5に示した結果と同様に直ぐに環境温度に則した一定の温度分布となった。図-5と図-6において到達した一定の温度分布の差から算出した覆工コンクリートの温度収縮ひずみを図-7に示す。覆工コンクリートの内空側表面

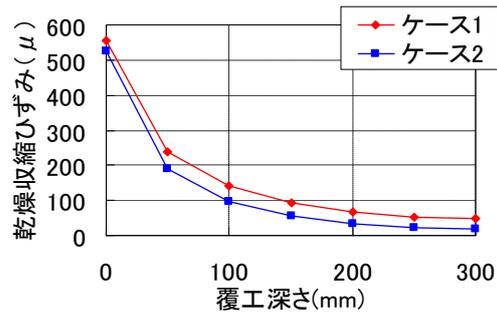


図-4 覆工内部の乾燥収縮ひずみの解析結果

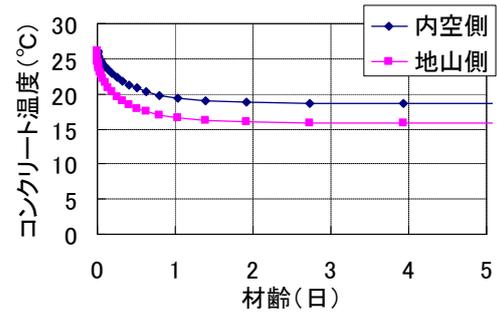


図-5 コンクリート温度の解析結果(初期)

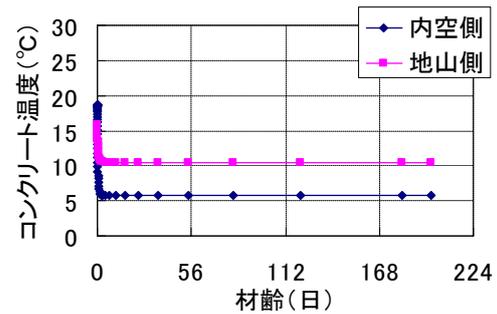


図-6 コンクリート温度の解析結果(長期)

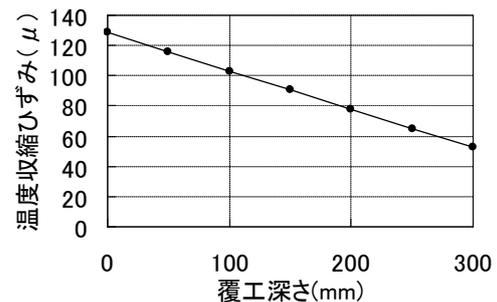


図-7 覆工内部の温度収縮ひずみの解析結果

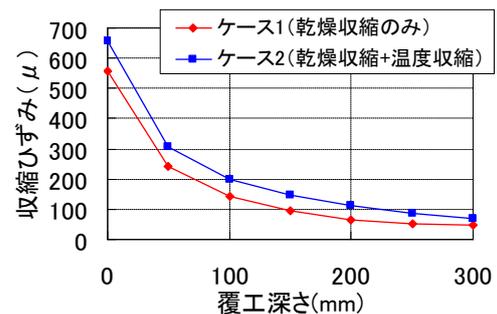


図-8 覆工内部の収縮ひずみの解析結果

での温度収縮ひずみは 128μ となった。

4. 4 乾燥及び温度による収縮ひずみ

上記の結果より、乾燥及び温度による収縮ひずみを図-4及び図-7の合算により求めた。その結果を図-8に示す。乾燥収縮ひずみのみの場合、図-4に示すようにケース2の方が大きな値を示したが、季節変動を考慮した温度収縮ひずみを加えるとケース1の方が大きな値を示す結果となった。

5. 覆工コンクリートのひび割れ発生パターン

5. 1 解析方法

コンクリート打設時期の異なる覆工コンクリートのひび割れ発生パターンを検討するため、三次元 FEM により温度応力解析を行った。覆工コンクリートの形状は、覆工厚 300mm, S.L. 以上の曲率半径 $R=5,200\text{mm}$, S.L. 以下の曲率半径 $R=7,800\text{mm}$, スパン 10,500mm である。対称性からモデルは 1/2 モデルとした。拘束条件は、インバートとの打継ぎ部は完全拘束、地山側は無拘束とした。また、両隣のスパンとの打継ぎ部は無拘束とし、地山側の節点間(長さ: 約 100mm) はばねにより拘束し、ばね剛性をパラメータとした。また、図-1に示すようにインバートの拘束が無い場合、ひび割れ本数が少ないことから、拘束条件はインバートの有無についても検討した。なお、計算モデルは、各要素にひび割れが1本発生する分布ひび割れモデルとした。

解析におけるコンクリートの物性値は、圧縮強度 36.7N/mm^2 , 引張強度 2.54N/mm^2 , 引張軟化材料係数 $1.21 \times 10^4\text{N/mm}^2$, 弾性係数 28473N/mm^2 , せん断剛性保持率 0.2, ポアソン比 0.2, 密度 2.3, 線膨張係数 $10\mu/^\circ\text{C}$ とした。また、引張軟化材料係数は、式(6)により算出した。なお、引張軟化曲線は文献⁴⁾に示されるバイニア型とし、その第一直線を使用した。

$$E_{sof} = f_t L / w \quad (6)$$

ここに、 E_{sof} : 引張軟化材料係数 (N/mm^2)

f_t : 引張強度 (N/mm^2)

L : 三次元直方体要素の対角の長さ (mm)

w : 引張軟化曲線の第一直線のひび割れ幅 (mm)

また、温度応力解析に使用するコンクリート温度については、図-8に示される収縮ひずみを線膨張係数 $10\mu/^\circ\text{C}$ で除して算出した温度を各覆工深さの節点に与えた。

5. 2 解析結果

ひび割れ発生パターンを図-9～図-11に示す。計算では、コンクリートの引張強度と弾性係数の関係から 89.2μ でひび割れが発生するものと判定し、ひび割れを灰色で示した。

乾燥収縮ひずみのみを考慮したケース1と比較して、温度の季節変動も考慮したケース2では、側壁部にインバートの拘束と思われる軸直交方向のひび割れが多数発生している。このことから、覆工コンクリートのひび割れは収縮ひずみの増加に伴って増加することがわかった。そのため、乾燥収縮ひずみによりある程度の収縮ひずみが蓄積されている場合には、季節変動による温度収縮によりひび割れの発生が誘発される可能性があることが確認できた。しかしながら、季節変動による温度収縮ひずみは制御できないことから、コンクリートの乾燥収縮ひずみ低減等によるひび割れの低減策を検討することが重要と言える。

また、ばね剛性の増加に伴ってひび割れが増加することがわかる。これは、ばね剛性が小さい場合には、拘束力が小さく比較的自由な収縮が可能であるためひび割れ本数は少なく、ばね剛性の増大に伴って地山側が拘束体となり、ひび割れ本数が増加したものと考えられる。そのため、同一のコンクリートであっても、地山側の拘束度合いによりひび割れ発生パターンは変化するものと考えられる。

また、インバートの拘束が無い場合では、側

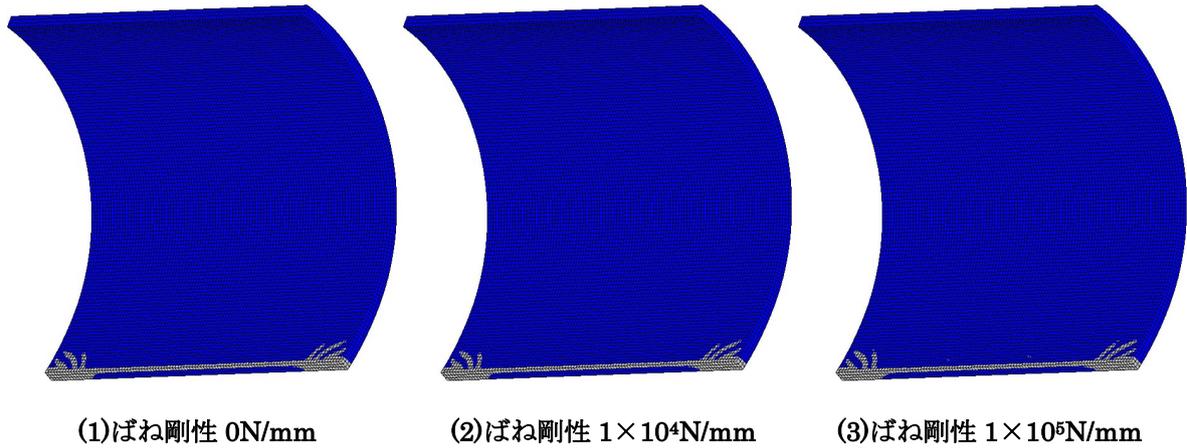


図-9 ひび割れ発生パターン (ケース 1, インバート拘束有り)

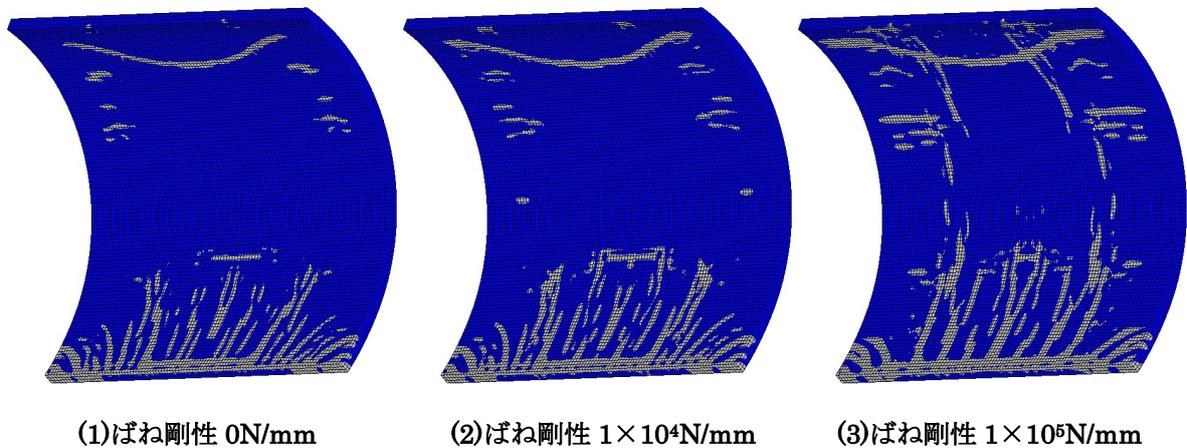


図-10 ひび割れ発生パターン (ケース 2, インバート拘束有り)

壁部の軸直交方向のひび割れがほとんど発生していない。したがって、側壁部の軸直交方向のひび割れは、インバートの拘束に起因する特徴的なものと判断される。そのため、インバートの打継ぎ部の縁切り処理をすることにより、ひび割れ低減を図ることが可能であると考えられる。

6. まとめ

コンクリートのひび割れ発生メカニズムは、本報告で検討した項目以外にクリープ等の影響を受けることが知られているが、ここでは非常に簡略化してひび割れ発生パターンの解析を行った。結果を以下にまとめる。

- (1) 解析では、夏季に施工した場合、気温が低下する冬季には乾燥収縮ひずみに加えて温度収縮ひずみが増加するため、ひび割れが増加

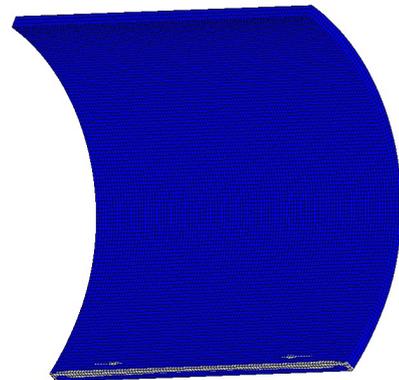


図-11 ひび割れ発生パターン (ケース 2, ばね剛性 0N/mm, インバート拘束無し)

するという調査した結果と同様の傾向が得られた。

- (2) 覆工コンクリートに使用されるコンクリートが同一であっても、地山側の拘束度合いによりひび割れ発生パターンは変化することが確認できた。

- (3) インバートの拘束によるひび割れは、主に側壁部に生じ、その方向は軸直交方向であることがわかった。

謝辞

本研究を遂行するに当たり、ご指導下さいました岡山大学の綾野克紀教授には、厚く御礼申し上げます。また、本研究を遂行するに当たり、ご助言を頂きました東日本高速道路（株）関東支社千葉工事事務所大栄市川工事区の窪田賢司工事長に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Ayano, T., Sakata, K. and WITTMANN, F. H. : Moisture Distribution, Diffusion Coefficient and Shrinkage of Cement-Based Materials, J. Material, Conc. Struct., Pavements, JSCE, No.634, V-45, pp.387-401, 1999.11
- 2) 蔵本修, 森脇拓也, 綾野克紀, 阪田憲次 : 乾燥下における高強度モルタルの収縮挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.503-508, 2003
- 3) 藤井隆史, 谷口高志, 渡辺純一, 綾野克紀 : コア供試体を用いた乾燥収縮ひずみの早期判定試験に関する研究, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, V-378, pp.755-756, 2010.9
- 4) 阪田憲次, 蔵本修 : 乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散と乾燥収縮に関する研究, 土木学会論文報告集, No.316, pp.145-152, 1981.12
- 5) (社)土木学会 : コンクリート標準示方書[設計編], 2007 年制定