

部分パイプクーリングによる覆工コンクリートの温度ひび割れの解析的検討

安藤ハザマ ◦正会員 新居秀一, 荒井匠, 正会員 白岩誠史

国土交通省東北地方整備局福島河川国道事務所 表康弘

1. はじめに

山岳トンネルの NATM 工法において、土被りの小さい坑口部や、地山条件の悪い区間の覆工コンクリートは、インバートコンクリートを設けて断面を併合し、アーチ効果でトンネル構造物を安定させる。しかし、インバートを施工する箇所の覆工コンクリートは、鉄筋コンクリートであることが多く、インバートの拘束に起因する温度ひび割れの発生により耐久性の低下が懸念される。本論文では、インバートの拘束を受ける覆工コンクリートの側壁をひび割れ指数(以下、指数)の低い部分のみをクーリングしてひび割れの発生を防ぐ“部分パイプクーリング (Localized Pipe Cooling, 以下 LP クーリング)”を提案し、そのクーリングパイプの効果的な配置方法について、「国道 115 号馬館山トンネル工事」の覆工コンクリートをモデルに、3次元 FEM 温度応力解析により検討した結果を報告する。

2. 3次元 FEM 温度応力解析による検討

2.1 解析条件

解析モデルは図-1 に示すように 1/4 モデルとし、詳細図を図-2 に示す。また、入力条件は、2012 年制定コンクリート標準示方書(設計編)に準じ、打設日および温度条件は表-1 に示す。覆工コンクリートの 1 スパンの延長は、10.5m である。

2.2 クーリングパイプの配置パターン検討

LP クーリングを実施しない場合(“解析 No.①”)の部材中心の指数および温度分布図を図-3 に示す。内部の最高温度が 44.28°C、指数は 0.75 となり、ひび割れの発生する可能性が高い結果となった。そのため、LP クーリングを検討することとし、クーリングパイプの配置パターンについて検討した。

図-4 に“解析 No.①”の側壁とインバートの接続部の指数分布の詳細図を示し、各指数の範囲を示した。指数 1.0 以下の範囲はインバート天端から 0.8m、延長方向は 6.0m、指数 1.1 以下の範囲はインバート天端から 1.1m、延長方向は 7.5m となっている。この指数の範囲をクーリングすれば、ひび割れ指数を向上できると考

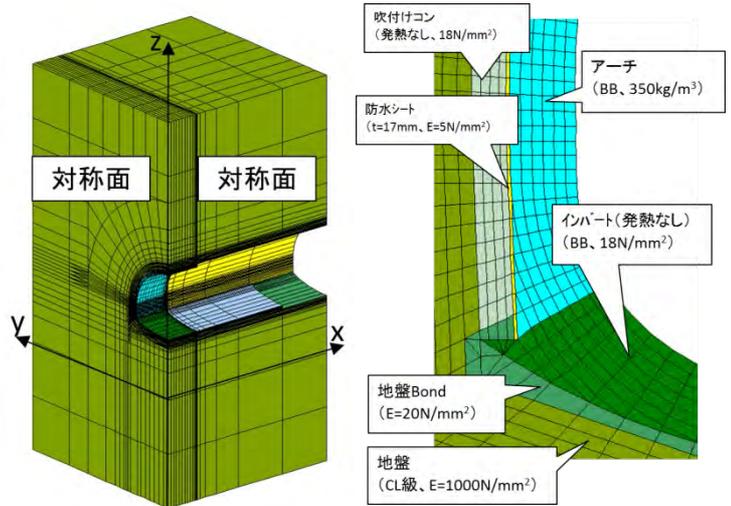


図-1 1/4 解析モデル図

図-2 解析モデル詳細図

表-1 入力条件(打設日、想定温度)

リフト	部位	打設日	外気温度(°C)	打込み温度(°C)
1	インバート 1	2013/ 4/ 1	6.1	6.1
2	インバート 2	2013/ 4/ 3	6.1	6.1
3	アーチ覆工コン	2014/ 8/27	21.0	24.0
—	解析終了	2015/ 3/31	6.0	—

* : 外気温は過去 20 年間の年平均気温を採用。

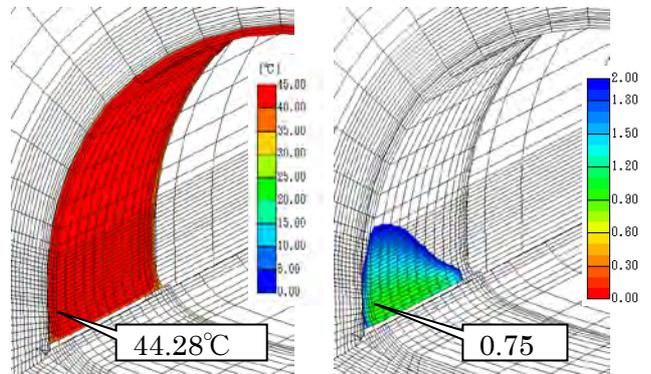


図-3 解析 No. ①の部材中心の指数および温度分布図

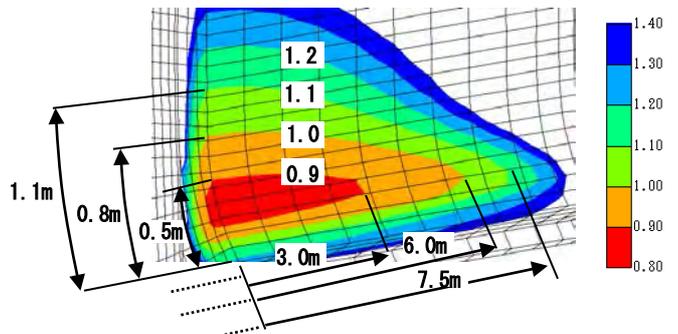


図-4 指数分布の詳細図(分布図内の数字は指数)

キーワード 覆工コンクリート, インバート, ひび割れ, パイプクーリング, 3次元 FEM 温度応力解析
 連絡先 〒107-8658 東京都港区赤坂 6-1-20 安藤ハザマ 土木事業本部 TEL 03-6234-3670

えられる。

図-5 に、今回検討するクーリングパイプの配置パターン図を示し、その検討結果およびクーリング条件の一覧表を表-2 に示す。表-2 中のひび割れ指数は、打設後 2 週間程度の初期の指数と、冬期の外気温が下がってきたときの指数を記載している。

“解析 No.②～④”が、直径 2.5cm、延長 10m のクーリングパイプを側壁下部に 2、3、4 段配置した場合の解析結果である。ひび割れ指数は、2 段配置することでクーリングをしない場合よりも初期で 0.39、冬期で 0.17 改善し、また 2 段から 3 段にすることでさらに初期で 0.2、冬期で 0.12 改善する。しかし 3 段から 4 段にすることで、初期で 0.01、冬期で 0.05 のみの改善効果であることが確認できた。

“解析 No.⑤、⑥”が、直径 5.5cm のクーリングパイプを 2 段および 3 段配置した場合の解析結果である。直径 2.5cm の場合で 2 段および 3 段配置した場合の“解析 No.②、③”と比較すると、2 段の場合はひび割れ指数が 0.04 改善するが 3 段の場合は変わらない。

次に、直径 2.5cm で 3 段配置する場合に、クーリングパイプの延長を短くできないか検討した。“解析 No.⑦、⑧”がその結果である。3 段全ての延長を 10m から 5.5m に短くしてもひび割れ指数は変わらない結果となった(温度、指数分布図は図-6 参照)。

2.3 クーリングパイプへの通水条件の検討

直径 2.5cm のクーリングパイプを延長 5.5m、3 段配置した場合のクーリング水の流量および温度の影響を確認した。その解析結果を表-3 に示す。

“解析 No.⑧～⑩”が流量を 3～4L/分まで変えたときの解析結果である。ひび割れ指数はほとんど変わらない。次に“解析 No.⑪～⑬”で、水温を 15℃～25℃まで変化させた。その結果、水温が 5℃変化するだけでひび割れ指数が 0.1 以上変化し、水温の影響が大きいことが分かった。

3. まとめ

直径 2.5cm の鋼製のクーリングパイプを、指数が 1.0～1.1 以下程度の範囲に壁厚と同じ程度の 400mm ピッチで、3 段配置することで、ひび割れの発生を抑制できることが確認できた。解析による検討により、指数が低いところのみを部分的にクーリング(LPクーリング)する方法が、効率よくひび割れの発生を抑制できることが確認できた。

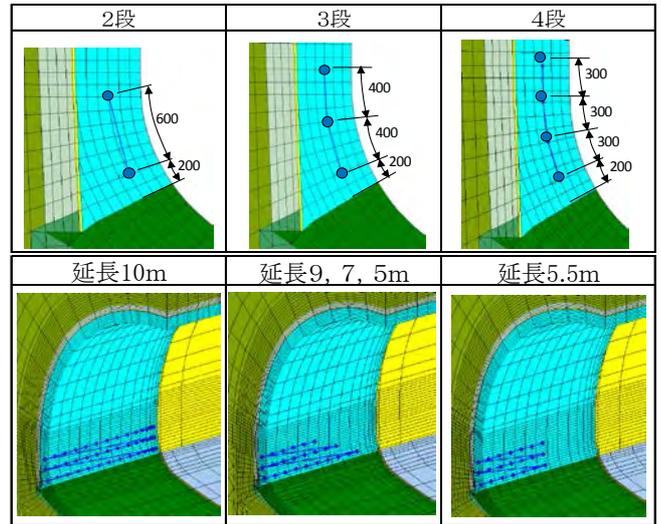


図-5 クーリングパイプ配置パターン図

表-2 解析結果一覧表(クーリングパイプ配置検討)

No.	クーリング条件							解析結果			
	パイプ配置パターン			通水条件				内部最高温度(℃)	ひび割れ指数【発生確率】		
	段数	延長(m)	直径(cm)	流量(L/分)	熱伝達率(W/m ² ℃)	通水期間(日)	水温(℃)		初期	冬期	
①	-	(クーリングなし)						-	44.3	0.75 [91]	1.00 [50]
②	2段	10	2.5	4	125	2	20	40.8	1.14 [33]	1.17 [30]	
③	3段	10	2.5	4	125	2	20	37.7	1.34 [18]	1.29 [21]	
④	4段	10	2.5	4	125	2	20	36.2	1.35 [18]	1.34 [18]	
⑤	2段	10	5.5	4	161.1	2	20	40.3	1.19 [28]	1.21 [27]	
⑥	3段	10	5.5	4	161.1	2	20	37.5	1.34 [18]	1.29 [21]	
⑦	3段	9,7,5	2.5	4	125	2	20	37.8	1.33 [19]	1.29 [21]	
⑧	3段	5.5	2.5	4	125	2	20	37.8	1.33 [19]	1.29 [21]	

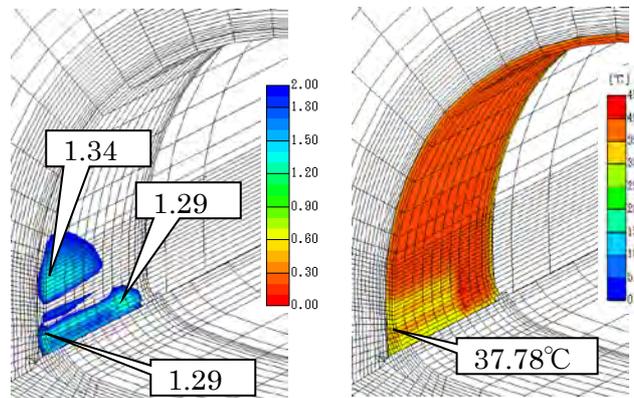


図-6 解析 No. ⑧の部材中心の指数および温度分布図

表-3 解析結果一覧表(通水条件の検討)

No.	クーリング条件							解析結果		
	パイプ配置パターン			通水条件				内部最高温度(℃)	ひび割れ指数【発生確率】	
	段数	延長(m)	直径(cm)	流量(L/分)	熱伝達率(W/m ² ℃)	通水期間(日)	水温(℃)		初期	冬期
⑧	3段	5.5	2.5	4	125	2	20	37.8	1.33 [19]	1.29 [21]
⑨	3段	5.5	2.5	3.5	116	2	20	37.9	1.32 [19]	1.28 [22]
⑩	3段	5.5	2.5	3	106	2	20	38.0	1.30 [20]	1.28 [22]
⑪	3段	5.5	2.5	3	106	2	25	40.0	1.18 [29]	1.18 [29]
⑫	3段	5.5	2.5	4	125	2	25	39.9	1.19 [28]	1.19 [28]
⑬	3段	5.5	2.5	3	106	2	15	36.7	1.35 [18]	1.34 [18]