

山岳単線トンネルの裏込め注入に関する基礎的研究

鉄道総合技術研究所 正会員 ○野城 一栄
東海旅客鉄道 正会員 石川 達也

1. はじめに

矢板工法で建設されたトンネルは、覆工と地山の間に空洞を有する場合もある。空洞があるとトンネル周囲の地山がゆるみやすくなったり、地圧が作用したときに地山反力が十分に得られないなどの問題が生じる。対策工として裏込め注入工があるが、松尾ら¹⁾の研究によれば、注入時、空間を閉塞すると覆工に 200kPa 以上の圧力が作用する場合もあるとされ、この時、巻厚不足箇所ではひび割れ等の変状が生じる場合も考えられる。このため、山岳単線トンネルを想定し、数値解析により注入圧が作用した時の影響を検討した。

2. 解析モデル

解析モデルを図-1 に示す。対称性を利用して解析範囲は高さ方向 12m×水平方向 6m×線路方向 5m とし、覆工コンクリートは無筋で地山と共に線形弾性体とした。トンネルは標準的な鉄道単線トンネル 1 号型(図-2)とした。背面空洞はトンネル全延長に設定し、注入範囲は天端部を中心に 60, 90, 120 度範囲とした。設計巻厚は健全時を 400mm とし、巻厚不足を想定して 320, 240, 160, 80mm を設定した。境界条件はモデルの前面の覆工以外をローラー支持とした。注入圧は覆工に垂直に等圧で作用させるものとし、注入圧を増加させてゆき覆工内面に 1.8MPa 以上の応力が作用した場合、引張破壊(引張ひびわれ)が生じたと判断した。解析に使用した入力物性値を表-1 に示す。

3. 解析結果(注入範囲、天端巻厚の影響)

まず、注入延長(線路方向の注入範囲)を実物 6m 相当(解析上は対称性を考慮して 3m)と仮定して注入範囲、天端巻厚の影響について検討した。解析ケースの一覧を表-2 に示す。なお、注入孔間隔以上の延長にわたって注入圧が作用することはないと考えられるため、注入延長 6m は注入孔間隔 6m に相当する。

各解析ケースについて、注入延長を実物 6m 相当として注入圧を作用させた場合に覆工に引張破壊が生じた注入圧を比較した結果を図-3 に示す。巻厚が小さいほど低い注入圧で引張破壊が生じていることが分かる。また、巻厚に係わらず注入範囲が狭いほど引張破壊が生じやすい。これは覆工は天端から SL にかけてアーチ形状をしているため、注入範囲が広がると注入圧の水平成分が増え、覆工に導入される軸力が増加するためと考えられる。

4. 解析結果(注入延長の影響)

実際の注入は注入孔間隔は 6m 以下で実施されることが多いと考えられる。文献 1)によれば注入延長を小さくすると注入の影響は小さくなるとされている。よって、3.において注入圧 200kPa 以下で破壊したケースについて、

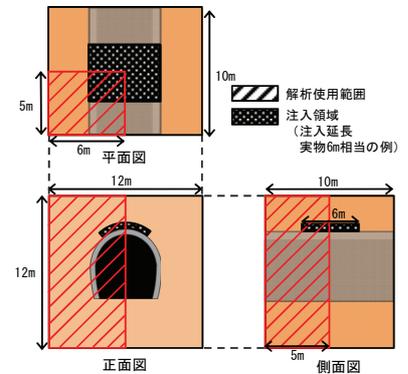


図-1 解析モデル

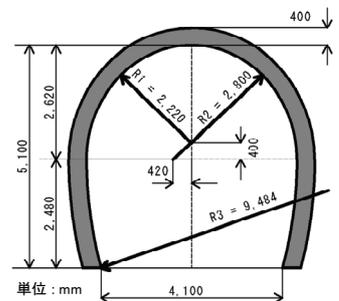


図-2 トンネル寸法概要図

表-1 入力物性値

物性値	地山:軟岩	覆工:無筋コンクリート
ヤング率	200 MPa	22 GPa
ポアソン比	0.30	0.20
引張強度	—	1.8 MPa
モデル	線形弾性体	線形弾性体

表-2 解析ケース

注入範囲	60度	90度	120度
天	ケース1	ケース2	ケース3
端	ケース4	ケース5	ケース6
巻	ケース7	ケース8	ケース9
厚	ケース10	ケース11	ケース12
	ケース13	ケース14	ケース15

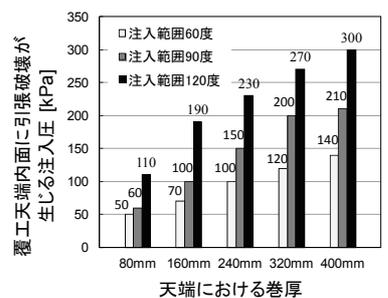


図-3 解析結果(注入延長 6m)

キーワード 裏込め注入, 単線トンネル, 3次元 FEM

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 TEL 042-573-7266

注入孔の間隔を狭めることを想定して、注入延長を、当初の実物 6m 相当から 1m 相当まで短くした場合について、注入圧 200kPa での破壊の有無を検討した。覆工に生じる応力を表-3 に示す。基本的に注入延長が短くなると覆工に生じる応力が減少し引張破壊しにくくなっているが、1m 相当でも巻厚 80mm では破壊が生じた。そこで、次章にて裏込め注入時に必要と考えられる覆工の補強について検討した。

5. 覆工補強についての検討

覆工補強として、繊維シート、鋼板を想定し、注入前に覆工内面に施工した場合を想定し、図-3 の 200kPa 以下の圧力で破壊したケースについて、注入延長を実物 6m 相当として引張破壊の有無を検討した。補強材の物性値を表-4 に示す。なお、補強範囲は注入延長と同じとした。覆工に生じる応力を表-5 に示す。表より、繊維シート、鋼板を施工することにより、覆工に生じる応力を一部減少させることができるが、覆工自体の引張破壊は防止できないことがわかった。ただし、補強材に生じる応力を表-6 に示すが、補強材に生じる応力は、繊維シートが最大で 47.7MPa、鋼板が最大で 34.7MPa で、補強材自体の破断や降伏は無いと判断できる。覆工にひび割れが生じるものの補強材には損傷が無いため、覆工の大規模な破壊や剥落を防ぐには一定の効果を有すると考えられる。

6. 既往研究との比較

松尾ら¹⁾の研究では山岳複線トンネルについて本研究と同様の検討を行っている。今回の上部鉛直方向からの注入圧の影響に対しては、単線の方が断面は小さく、設計巻厚が薄い分、引張破壊の生じる注入圧は単線の方が小さく影響が大きいと考えられるが、全体的な結果の傾向は同じであった。なお、図-4 にケース 8、図-5 にケース 13 での引張破壊時の覆工の最大主応力分布を示す。これらの図から、注入範囲の中央部分で引張破壊が生じていると分かるが、既往研究では注入範囲外で破壊が生じたという違いがある。

7. おわりに

本研究では、山岳単線トンネル裏込め注入時の影響について検討を行った。その結果、巻厚が小さいほど、また、注入延長が長いほど、注入の影響を受けやすくなること、注入孔の間隔を狭め注入圧の作用する長さを短くすると影響が小さくなること、繊維シートや鋼板による覆工補強により一定の対策効果が得られることが分かった。また、単線トンネルは複線トンネルよりも設計巻厚が小さい分、注入時に留意が必要であることも分かった。なお、今回の解析は、注入時に覆工に圧力が液圧として作用するものとし、また、口元の注入圧がそのまま減衰無く覆工に作用するものとした。覆工についても巻厚が一様に薄い場合を想定しているという等の仮定を加えた状態での検討であり、かなり安全側を想定した解析となっていると考えられる。今後は、巻厚の分布や圧力の作用状態等も考慮し、実際の注入を想定した場合について、検討を深度化していきたいと考えている。

参考文献

1) 松尾知明, 嶋本敬介, 朝倉俊弘, 内藤繁, 田川謙一: 山岳トンネルの裏込め注入に関する研究, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学) 特集号, Vol. 68, No. 3, pp. I-39~I-49, 2012.

表-3 覆工に生じる応力

注入範囲	巻厚 (mm)	注入延長 (実物相当)					
		6.0m 相当	5.0m 相当	4.0m 相当	3.0m 相当	2.0m 相当	1.0m 相当
60度	80	8.8 MPa	8.1 MPa	7.2 MPa	6.1 MPa	4.9 MPa	3.2 MPa
	160	5.5 MPa	4.9 MPa	4.2 MPa	3.4 MPa	2.4 MPa	1.5 MPa
	240	3.9 MPa	3.5 MPa	2.9 MPa	2.2 MPa	1.5 MPa	0.5 MPa
	320	3.0 MPa	2.6 MPa	2.2 MPa	1.6 MPa	1.1 MPa	0.8 MPa
	400	2.7 MPa	2.4 MPa	1.9 MPa	1.4 MPa	1.0 MPa	0.8 MPa
90度	80	6.4 MPa	5.7 MPa	5.0 MPa	4.1 MPa	3.3 MPa	2.5 MPa
	160	3.7 MPa	3.1 MPa	2.5 MPa	1.9 MPa	1.3 MPa	1.3 MPa
	240	2.5 MPa	2.0 MPa	1.7 MPa	1.4 MPa	1.0 MPa	1.0 MPa
	320	1.9 MPa	1.6 MPa	1.4 MPa	1.2 MPa	0.8 MPa	0.8 MPa
	400	1.9 MPa	1.6 MPa	1.4 MPa	1.2 MPa	0.8 MPa	0.8 MPa
120度	80	3.3 MPa	3.0 MPa	2.6 MPa	2.2 MPa	2.0 MPa	2.3 MPa
	160	2.0 MPa	1.5 MPa	1.3 MPa	1.0 MPa	0.9 MPa	1.3 MPa

表-4 物性値 (補強材)

物性値	繊維シート: アラミDAK-40	鋼板: SS400
ヤング率	118 GPa	200 GPa
ポアソン比	0.30	0.30
強度	2060 MPa (破断)	245 MPa (降伏)
厚さ	0.193 mm	4.5 mm
モデル	線形弾性体	線形弾性体

表-5 覆工に生じる応力

注入範囲	巻厚 (mm)	注入延長実物6m相当	
		補強無	繊維シート 鋼板
60度	80	8.8 MPa	8.5 MPa, 4.2 MPa
	160	5.5 MPa	5.4 MPa, 3.1 MPa
	240	3.9 MPa	3.9 MPa, 2.6 MPa
	320	3.0 MPa	3.0 MPa, 2.2 MPa
	400	2.7 MPa	2.7 MPa, 2.1 MPa
90度	80	6.4 MPa	6.1 MPa, 3.4 MPa
	160	3.7 MPa	3.6 MPa, 2.6 MPa
	240	2.5 MPa	2.5 MPa, 2.1 MPa
	320	1.9 MPa	1.9 MPa, 1.8 MPa
120度	80	3.3 MPa	3.1 MPa, 2.4 MPa
	160	2.0 MPa	2.0 MPa, 2.0 MPa

表-6 補強材に生じる応力

注入範囲	巻厚 (mm)	注入延長実物6m相当	
		繊維シート	鋼板
60度	80	47.7 MPa	34.7 MPa
	160	31.7 MPa	31.0 MPa
	240	23.0 MPa	26.4 MPa
	320	17.8 MPa	22.3 MPa
	400	16.2 MPa	20.8 MPa
90度	80	33.6 MPa	24.8 MPa
	160	21.3 MPa	22.1 MPa
	240	14.8 MPa	18.5 MPa
	320	11.1 MPa	15.6 MPa
120度	80	16.2 MPa	10.6 MPa
	160	8.31 MPa	8.83 MPa

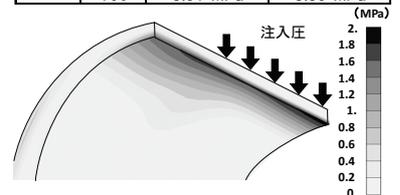


図-4 ケース 8(150kPa 時)

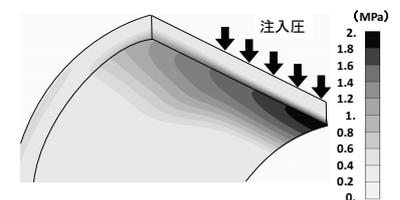


図-5 ケース 13(140kPa 時)