供用開始後の地下水位上昇に起因するトンネル変状発生可能性の検討

東京大学	正会員	椛島ネ	右一郎
東京大学	正会員	堀井	秀之

1.はじめに

適切な覆エコンクリートの補修・設計・建設のためには,将来トンネルに作用する荷重やトンネルの変形・変状に関する知見が不可欠である.変状メカニズムを解明することで増加荷重や偏土圧等の外力変化を定量的に示すことができれば,覆エコンクリートに作用する断面力を予測し,トンネル変状の予防が可能となる.

湧水を伴う地層境界近傍の不透水性の凝灰角礫岩層に位置するトンネルで,切羽通過後に内空変位の増大や吹付けコンクリートのせん断破壊,鋼製支保の座屈等の変状や,供用開始後に二次覆工コンクリートにひび割れが 確認される事例が報告されている.本論分では変状メカニズムの特定を目的に九州自動車道加久藤トンネルを対 象として,施工後の地下水位上昇に着目し,解析により変状可能性を検討したものである.

2.加久藤トンネル変状状況

加久藤トンネルは九州縦貫自動車道の熊本と宮崎の県境に位置する延長 6,251m の長大トンネルである.最大 土かぶりは約 400m.変状発生区間の地質は主に安山岩と凝灰角礫岩から構成されるえびの層群である.凝灰角 礫岩は自破砕あるいは熱水変質を受けて強度低下しており,安山岩は亀裂に沿って地下水を通しやすく,上部地 層に貯留された地下水がえびの層群の安山岩と凝灰角礫岩の層境界から湧水となってトンネル内に流出する.

加久藤トンネル 期線の覆工コンクリート打設後7年を経過した時点で実施された目視調査により, 期線施 工当時に大きな変位量を観測した区間でトンネル軸・横断方向に卓越する覆工コンクリートのひび割れが観察さ れた.0.2mm 幅以上のクラック密度は最大131cm/m²であり,多くの区間で50cm/m²を超えている.特に湧水 が確認された安山岩層と凝灰角礫岩層の境界付近を境に、凝灰角礫岩区間においてひび割れが顕著に測定された. 変状の規模から判断して,トンネルに大きな外圧が作用したものと考えられる.

3. 変状原因の推定

併設の調査坑における湧水圧測定結果から,期線掘削前の地下水頭はトンネル上方約30mに位置していたが, トンネル切羽進行に伴い地下水頭はほぼトンネルと同じ高さまで低下することが確認された.この応力状態で覆 エコンクリートを打設すると考え,建設終了後の地下水位がトンネルに外圧として作用することで覆工ひび割れ が発生したという仮説を立てることとする.地表面からのボーリング調査によるとトンネル上方約180m,260m にも地下水面が存在していることから判断して,高い水圧が作用する可能性が高い.

トンネル掘削後に凝灰角礫岩に作用する鉛直応力分布の変化

トンネル掘削時の水頭を 0, 凝灰角礫岩に作用する有効応力(=全応力)を σ_v^o とする.覆エコンクリート建設後に水頭が ΔH 上昇したとき,凝灰角礫岩に作用する有効応力 σ_v' と全応力 σ_v は ΔH の大きさにより,以下のように変化すると考える.ただし,水の密度を γ_w とする.

i) $\sigma_V^o > \gamma_w \Delta H$ のとき:水圧 $u = \gamma_w \Delta H$,有効応力 $\sigma_V' = \sigma_V^o - u$ と変化するが, $\sigma_V = \sigma_V' + u = \sigma_V^o$ より,全応力は変化しない.

ii) $\sigma_V^o < \gamma_w \Delta H$ のとき:水圧 $u = \gamma_w \Delta H$.地層境界において上下の 地層間に引張応力は発生しないため,有効応力は負の値にならず $\sigma_V' = 0$ と変化する.このとき全応力は $\sigma_V = \sigma_V' + u = u$ となるため, $\sigma_V^o < \gamma_w \Delta H$ の領域において $\Delta \sigma_V = u - \sigma_V^o$ だけ応力が増大する.

トンネルと,安山岩(透水層)までの距離が近い場合の応力変化 の模式図を図-1に示す.覆エコンクリート打設時に凝灰角礫岩層に 作用する応力が地下水圧上昇分より小さい領域では,全応力は上昇 した水圧と等しくなり,地下水位上昇時に凝灰角礫岩層に作用する 応力が増加する.この地層境界に作用する応力増加がトンネル覆工 に伝達し,覆工変状を発生させる原因となったと考えられる.



図-1 凝灰角礫岩層に作用する鉛直応力分布変化

4.地下水頭上昇時のトンネル変状可能性の三次元解析による検討

原位置採取試料実験結果にもとづく二次元弾性解析結果,および 期線掘 削時(STA550+40.0 地点)の内空変位を比較することにより,凝灰角礫岩の 剛性 300MPa と側圧係数 0.8 を同定した.図-2にトンネル天端から安山岩層 までの距離を変化させた時に凝灰角礫岩層に作用する鉛直応力分布を示す. トンネル直径の範囲で鉛直応力が大きく減少し,トンネル直上で最小となる.

図-3に解析用メッシュを示す. 左端・下端・手前側はそれぞれ x 方向・y 方向・z 方向に固定することで解析対象の対称性を利用している. 荷重は, 加久藤トンネル 期線STA550+40.0 地点における応力条件を再現するため, 上端から土被り358m分の初期地圧7.2MPaを与え,右端からは二次元弾性 解析において同定した側圧係数0.8 を乗じた荷重を与える.

解析メッシュ上面において作用させる水圧の載荷幅はトンネル半径とほぼ 同じ5mに,また,トンネルと安山岩層間距離が5m以内の区間で水圧が作 用すると考え,現場の地質条件を考慮し,奥行き20mとする.周辺の地下 水位観測値をもとに,水圧の最大値として2.5MPa作用させる.メッシュ上 面より上方には安山岩が存在し,水圧載荷範囲以外は変位拘束されると考え られるため,水圧載荷範囲以外の接点の鉛直方向変位を拘束する.







図-3 三次元解析用メッシュ

トンネル円周方向,軸方向の引張応力発生領域を図-4に示す.引張応力分布はトンネル円周方向に関しては水 圧作用領域の天端から約0~30度の範囲で引張応力状態にあるのに対し,トンネル軸方向では水圧作用領域以外 の天端から0~50度の範囲で引張応力状態であることが確認できる.いずれの結果もトンネル軸方向,横断方向 のひび割れの発生を示唆しているが,ひび割れ発生区間が異なることが特徴として挙げられる.

円周・軸方向の引張応力発生領域の違いを比較するために,覆工の内空側と地山側のひずみ分布を最大張力応 力が発生した断面に関して表示したのが図-5である.円周方向は z=2.5m 断面の円周角に対するひずみ分布を, 軸方向は =7.0°の奥行きに対するひずみ分布を表示した.円周方向の天端付近では軸ひずみがほぼゼロである が,曲げが発生していることで内空側に引張ひずみが発生していることが確認できる.軸方向では水圧載荷をし ている 20m 区間では曲げにより内空側が地山側よりも引張ひずみ状態になっているが,軸力による圧縮ひずみ が大きいために内空側で引張ひずみが発生していない.水圧載荷範囲から離れた区間では逆に引張軸ひずみが卓 越しているために内空側でも引張ひずみが発生している.

以上の現象は以下に示す二つの曲げ変形が同時に発生したために発生したと考えられる.

- (i) 周辺岩盤が軟弱なために発生する,トンネル覆工全体の曲げ変形
- (ii) トンネル天端近傍シェル部材の局所的な曲げ変形



5.まとめ

本研究では,供用開始後の地下水位上昇に着目した解析を加久藤トンネルを例に行い,覆エコンクリート変状 可能性を示すことが添削できた.トンネル円周方向・軸方向では引張応力発生領域が異なる結果が得られたが, これはトンネル全体の曲げ変形と天端部材の局所的な曲げ変形が同時に発生した結果と考えられる.

最後に,加久藤トンネル関連資料を提供して下さった日本道路公団の三谷浩二工事長に謝意を表します。 参考文献

1)加久藤トンネル施工検討委員会,平成13年度第1回委員会資料,2001