SFRC を用いた ECL 工法の覆工体設計方法に関する研究(その3)

再配分された土圧による覆工断面力の算定と実測値による検証

清水建設 正会員 後藤 茂,杉山博一,荻迫栄治

1. まえがき 筆者らは高流動鋼繊維補強コンクリート(SFRC)を用いた ECL 工法の覆工体設計方法の開発 のための一連の研究^{1),2)}を行っており,前報¹⁾では水を封入したラバーバルーンを埋設した模型地盤の遠心載荷 実験等によりバルーン周辺地盤の応力(土圧)再配分を検討した.今回は,同様の土圧再配分が ECL 周辺地盤 で生じた場合の覆工体断面力の算定方法を検討し,実際に SFRCを用いた ECL 工法で施工されたシールドトン ネルの覆工応力実測値との対比を行ったので報告する.

2.シールド覆工体に作用する土圧の分布 図-1に「慣用計算法」等のシールド覆工の設計で用いる外力分布 を示すが,今回提案したSFRCを用いたECL覆工の外力分布は図-2のa.のようになる.両者の違いは前者は地 盤の変形を覆工の剛性で支えると考えるのに対し,後者では内型枠と地盤の間に圧入されるSFRCが地盤を押 すという考え方の相異に起因している.つまり,前者では覆工体が横長に潰れる変形モードを想定し,地盤内 の初期応力と覆工の変形に伴う水平方向の地盤反力を評価しているのに対し,詳細は前報¹¹で述べたが,後者 ではSFRCの高い流動性による「地盤応力(土圧)の再配分」が生じるため図-2のa.に示すなめらかな外力分 布になる.また,土圧pは(1)式で示すようにSFRCの自重と圧入圧およびトンネル径によって決まる値になる.

 $p = p_{top} + \rho R(1 - \cos \varphi)$

(1)

ここで, *p*_{top} は天端での SFRC の圧入圧, *ρ* は SFRC の密度, *R* は覆工体半径である.

<u>3.上下方向の力の釣り合い</u> (1)式を周面に沿って積分すると上方向へ卓越している力 *p*πR² が残り,図中に 示した仮想支点反力を想定しなければ力の釣り合いが保てないことが分かる.

$$\oint p ds = \int_0^{2\pi} \left(p_{top} + \rho R (1 - \cos \varphi) \right) d\varphi = \rho \pi R^2$$
⁽²⁾

SFRC が硬化する前は内型枠が上記の力に対抗する力を伝えるが,硬化した後は内型枠が外されるため,同様 な力を受けると覆工体は力の卓越方向に変位して地盤反力の変化を生じる.その結果,力の釣り合いが得られ て仮想支点反力がうち消される.つまり,覆工体上部の地盤反力が増加して下部の地盤反力が減少することに なるが,覆工体が剛体変位をし,地盤の反力係数が載荷側も除荷側も同一であるとすれば,地盤反力の両変化 量は絶対値が等しい値になる.このようなメカニズムを模式的に表したのが図-2である.

4. 断面力の算定方法 慣用計算法では断面力算定に理論解を用いているが,ここで提案した外力分布も断面 力算定の理論解を誘導することができる.図-2に示された外力分布のうちb~dの3要素荷重は慣用計算法の 場合と同様に,「断面が一様なリングに1軸対象な荷重が作用した場合の解」として構造公式³⁾を用いて容易に 導くことができる.一方,「a.SFRCの圧入圧反力」は覆工に垂直で値が深さ方向に増加する力であり,断面力 の理論解は公式集に示されていない.そこで,公式集に示されている作用荷重が一定の場合の解(表-1参照) を荷重について微分し,更に円周方向に積分することにより「a.SFRCの圧入圧反力」の断面力算定式を誘導す る.荷重がSFRC 圧力と等価であり,断面力の式が荷重の作用範囲とそれ以外で異なることに留意すれば,断 面力算定式は(3)式により誘導される.

$$[M, N, Q] = \int \frac{\partial}{\partial w} [M_c, N_c, Q_c] dw = \int_0^\theta \frac{\partial}{\partial w} [M_{c1}, N_{c1}, Q_{c1}] \rho R \sin \varphi d\varphi + \int_\theta^\pi \frac{\partial}{\partial w} [M_{c2}, N_{c2}, Q_{c2}] \rho R \sin \varphi d\varphi$$
(3)

 $\therefore dw = \rho R \sin \varphi d\varphi, \ w = p = p_{top} + \rho R (1 - \cos \varphi)$

上記積分結果と他の荷重要素による断面力算定式を表-2に示す.但し,力の釣り合いのために各荷重要素毎に 図-2に示した仮想支点反力を設けているが,全体を重ね合わせた時に仮想支点反力は消滅する.

5. 実測値との対応 図-3は岡南シールド(ECL工法で施工)での覆工応力の実測値である.計測方法は参考 文献4)に詳しく述べてあるが,覆工表面にひずみゲージを貼付して周辺に溝を切削し,開放されたひずみ量か ら作用応力を推定するものである.覆工応力の測定は2断面で行われているが,両者は約1.2km離れており,図 に示すように土被りも異なっている.図中の曲線は表-2に示した式から計算したものであり,計算ではSFRC

キーワード:シールドトンネル,ECL,土圧再配分,断面力 連絡先:〒 135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設(株)技術研究所 Tel:03-3820-5245 Fax:03-3820-5489 の密度は2.3t/m³とし,覆工天端のSFRC 圧入圧は施工時の実測値(233kPaと212kPa)を用いた.図から明ら かなように,今回提案した算定式から求めた覆工応力の推定値は実測値と良い対応を示している.

6.まとめ 前報で報告したSFRCの流動性に着目したECL覆工に作用する土圧分布に基づき覆工断面力の算定 式を誘導した.実際にECL工法で施工された岡南シールドでの覆工表面応力の実測値と今回の算定式での推定 値は良い一致を見せ,考えの妥当性が検証された.この土圧は周辺地盤を受動的状態で考えるため水平方向以 外での受働限界値を明らかにする必要があるが,別の機会に報告する予定である.



図 -3 覆工体応力の実測値と 推定値の比較

土木学会編「土木構造公式集」,4)関他(1999)「応力開放法を用いた場所打ちライニン グの応力計測結果とその考察」,トンネル工学研究論文・報告集,第9巻