

CFRPを利用したシールドトンネルセグメントの技術的フィージビリティ・スタディ

日鉄コンポジット(株) 正会員 ○小林朗 東京大学 正会員 松本高志
 清水建設(株) フェロー会員 後藤茂 石塚与志雄 正会員 杉山博一
 (株) 大林組 フェロー会員 入矢桂史郎 東レ(株) 松井孝洋

1. 目的

下水道シールドトンネルに CFRP を適用することによりセグメントの薄肉化、掘削外径の縮小等による建設コストの低減に加えて、高耐久性により維持管理コストの低減が期待される。本報では、CFRP を利用したセグメントを設計する上での要求性能や性能照査方法を検討し、さらに CFRP・コンクリート合成セグメントの試設計を行い、設計上の技術的課題を抽出した。

2. 設計手法の検討

CFRP を利用したセグメントの設計を行うために、シールド工法もしくはセグメント関連の設計指針類を調査した。設計基準については事業者ごとに異なっているが、土木学会のトンネル標準示方書「シールド工法編」が共通のベースとなり、事業者ごとに要求性能を規定しているようである。現示方書は基本的には許容応力度により記述されており、一般に慣用計算法によりシールドセグメントに作用する設計断面力を算定し、部材断面のコンクリートおよび鋼材の発生応力度が許容応力度以下となることを確認することとしている。

一方、限界状態設計法によるシールドセグメントの設計法の検討も進められており、土木学会では「トンネルへの限界状態設計法の適用」¹⁾が取りまとめられ、試設計例が示されている。この試設計例では、断面破壊の終局限界状態、ひび割れの使用限界状態、変形の使用限界状態、目開き量の使用限界状態について検討が行われている。この中で、材料係数、部材係数は、コンクリート標準示方書に準じて設定されている。終局限界状態の荷重係数は、水圧の荷重係数が 0.9、側方土圧の荷重係数が 0.85 と、荷重が小さくなる方向で定義されている。これは、地下水位の低下や周辺構造物の影響により側方土圧が小さくなることで覆工に曲げが卓越する状態を想定したものと考えられる。

3. 試設計

文献 1)を参考に、シールドトンネル覆工に CFRP・コンクリート合成セグメントを用いるものとして図-1 に示す中心直径 4150mm の下水道シールドセグメントの試設計を許容応力度法および限界状態設計法により行った。CFRP・コンクリート合成セグメントは、図-2 に示すようにコンクリートの内・外表面に同一厚さの 1 方向性 CFRP を接着したサンドイ

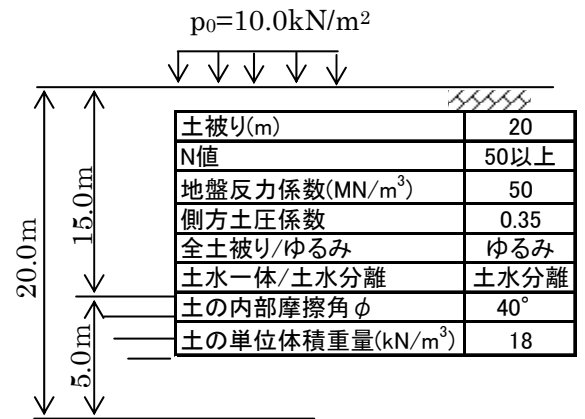
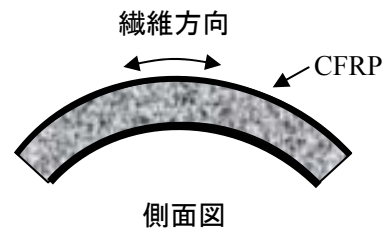
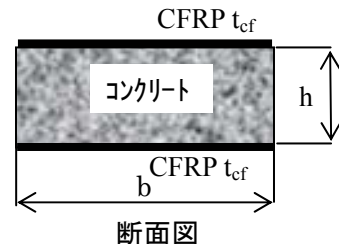


図-1 土質条件



側面図



断面図

図-2 CFRP・コンクリート合成セグメント

キーワード：シールドトンネル、革新的構造材料、CFRP、合成セグメント、限界状態設計法

連絡先 〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町 3-8 日鉄コンポジット(株)技術部 TEL:03-5623-5558

ッチ構造とした。CFRP は引張強度 2550N/mm²、圧縮強度 1500N/mm²、ヤング係数 135kN/mm²とした。

(1) 許容応力度法

慣用計算法で算定した設計断面力は、曲げモーメント 22.8 kN・m、軸圧縮力 258.1kN であった。コンクリートと CFRP の許容応力度をそれぞれの設計強度の 1/3 として、許容応力度法により発生応力度を照査した結果を表-1 に示す。セグメント厚さを 150mm、50mm とした時の CFRP の必要厚さは、それぞれ 0.2mm、3mm となった。断面の決定要因は、コンクリートの圧縮応力度であった。

(2) 限界状態設計法

照査項目として、終局限界状態に対して①曲げおよび軸方向耐力②せん断耐力を、使用限界状態に対して③応力度の制限値④変形を選定して文献 2) に準じて照査した結果を表-2 に示す。ここで設計断面力は、セグメント厚さごとに、はりばねモデルにより算定した。一般にコンクリート構造物では、使用限界状態に対してひび割れ幅を照査しているが、CFRP・コンクリート合成セグメントでは、表面にコンクリートのひび割れが露出しないこと、CFRP に遮水性があり腐食しないことから、ひび割れ幅の照査は行わなかった。ただし、CFRP に持続応力が作用することから応力度の制限値（コンクリート：設計圧縮強度の 0.4 倍）を照査した。セグメント厚さ 150mm、50mm のいずれに対しても CFRP の厚さを 0.2mm とすれば終局限界状態、使用限界状態ともに照査項目を満足した。はりばねモデルによる設計断面力が、セグメント厚が薄くなると小さくなることもあり、許容応力度法により決定した断面に比べて CFRP の必要厚さが薄くなる結果となった。セグメント厚さ 50mm では、コンクリートの圧縮応力度の制限値が断面決定要因となり、終局耐力(曲げ・せん断)、変形については余裕があった。

4. まとめと今後の課題

以上の試設計では、CFRP・コンクリート合成セグメントは、RCセグメントに比べてセグメント厚さの薄肉化が可能であり、許容応力度法に比較して限界状態設計法による方が CFRP の所要量が少なくなる結果となった。CFRP は鋼材に比べて、その応力ひずみ関係が降伏現象を示さず線形性を保持したまま脆性的に破断し、強度が高く鋼材の降伏ひずみに比べて高い破断ひずみを示すが、剛性/強度比が小さいなどの特徴を持っている。従って、CFRP を利用したシールドセグメントの設計を行う場合、許容応力度法では CFRP の許容応力度の設定方法が、限界状態設計法では照査すべき限界状態と限界値の設定が課題となると考えられる。座屈、継ぎ手、その他の評価と照査法についても検討していく必要がある。また、FRP は可燃性を有するので道路トンネルでは、耐火性に対する性能照査も重要となる。

なお、本報の内容は、土木学会「革新的構造材料の活用検討委員会」（平成 16～17 年度）の検討として実施した成果を要約したものである。

参考文献

- 1)土木学会：トンネルライブラリー第 11 号トンネルへの限界状態設計法の適用，2001
- 2)土木学会：コンクリートライブラリー 88 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針（案），1996

表-1 許容応力度法による試算結果

構造	鉄筋コンクリート	CFRP・コンクリート合成
セグメント厚さ mm	150	50
補強材	鉄筋	CFRP
鉄筋径・FRP厚さ	2D13+4D16	0.2mm
補強材断面積 mm ²	1047	2.0
コンクリート圧縮応力度 N/mm ²	9.1	12.1
許容応力度 N/mm ²	15.0	
鉄筋径・FRP引張応力度 N/mm ²	102.2	265.6
許容応力度 N/mm ²	200	850

表-2 限界状態設計法による照査結果

構造	鉄筋コンクリート	CFRP・コンクリート合成	
セグメント厚さ mm	150	50	
補強材	鉄筋	CFRP	
鉄筋径・FRP厚さ	2D13+4D16	0.2mm	
補強材断面積 mm ²	1047	2.0	
終局	曲げ耐力 kN・m	79.6	
限界状態	設計曲げモーメント kN・m	11.5	
	せん断耐力 kN	139.9	
	設計せん断力 kN	16.5	
使用限界状態	コンクリート圧縮応力度 N/mm ²	4.4	
	制限値 N/mm ²	0.4f _{ck} =16.8	
	変形 mm	1.807	4.311
	制限値 mm	1/300*Do=14.33mm	