

はく落形状の違いによるトンネル補修工の耐荷力に関する実験的検討

国立研究開発法人土木研究所 正会員 ○石村利明, 砂金伸治, 日下 敦, 森本 智

1. はじめに

国内の供用中の道路トンネルは年々増加傾向にあり、平成 25 年 4 月には箇所数 10,000 を超え、総延長も約 4,200km に達し、約半数以上のトンネルが供用後約 30 年以上経過している。これらのトンネルの中には供用後に覆工コンクリートへの外力作用や材質劣化等によるひび割れ等の変状が発生しているものがある。本報文は、材質劣化等により覆工コンクリートのはく落防止のためのトンネル補修工の合理的な設計手法の検討を行うための基礎資料として、はく落形状の違いによるトンネル補修工の耐荷力について押抜き試験を実施した結果について報告するものである。



2. 試験方法

押抜き試験は $1500 \times 1500 \times 150\text{mm}$ の供試体（強度 18N/mm^2 以上）を用いて供試体上面にトンネル補修工を設置し、下側からジャッキを用いて変位制御により載荷した（図-1）。試験は、押抜き形状（円形、矩形、ひし形）、載荷方法（単純載荷、繰返し載荷）を変化させ、それぞれの耐荷力・挙動の違いを把握した。対象としたトンネル補修工は、覆工コンクリートのはく落防止を目的に多くの実績を持つ、シート系（炭素繊維シート）およびネット系（FRP ネット）の当て板工とした。試験の実施ケースを表-1 に示す。試験に用いた補修工

試験NO.
B-1
B-2
B-3
B-4
B-5
B-6

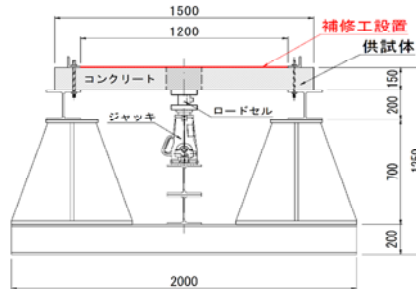


図-1 押抜き試験の概要図

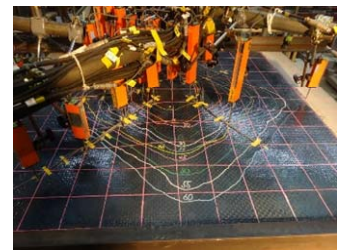


写真-1 押抜き試験状況

表-1 試験ケース一覧

試験NO.	押抜き形状	補修材	載荷方法	固定ボルトピッチ
B-1	円形（φ200）	炭素繊維シート	単純載荷	－
B-2			繰返し載荷	－
B-3	ひし形		単純載荷	－
B-4	円形（φ200）	FRPネット	単純載荷	並列50cm間隔
B-5			単純載荷	千鳥25cm間隔
B-6			ひし形	単純載荷

表-2 炭素繊維シートの様相

炭素繊維シート	炭素目付 g/m ²	引張強度 N/mm ²	引張弾性率 kN/mm ²
規格値	200以上	2900以上	230±34
試験地	207	4124	262
プライマー※	エポキシ樹脂	コンクリート付着強度5.8N/mm ²	
含浸接着樹脂 ※	エポキシ樹脂	曲げ強度：95N/mm ²	
		引張強度：46N/mm ²	
		引張せん断強度：16N/mm ²	

※JIS Z8703に準じた試験値

表-3 FRP ネット(格子筋)の仕様

格子筋	材質	断面積 mm ²	引張耐力 ※ kN	引張強度 ※ N/mm ²	引張剛性 ※ kN	引張弾率 ※ kN/mm ²
規格値	ガラス繊維・ビニルエステル樹脂	13.1	7.86以上	600以上	393以上	30.0以上
試験地			9.73	743	435	33.2

※JISCE-E-531-2010に準拠

の材料特性を表-2、表-3に示す。表-4に押抜き形状と固定ボルトピッチの概要図を示す。写真-1にシート系の押抜き試験状況を示す。

なお、押抜き形状の面積は、小型・大型の押抜き試験ともに円形の面積を基本として他の形状も同面積とした。載荷方法の単純載荷は所定の一定速度での載荷を、繰返し載荷は覆工コンクリートのひび割れが年間の温度変化等による変化を考慮して（0→2→0→4→2→6→4→8→6→・・・）のように最大値を 4mm ずつ増加させた後、2mm 減じるように変位量を繰り返し増減させながら載荷した。

3. 試驗結果

図-2 にシート系当て板工（炭素繊維シート）について、押抜き変位量と荷重の関係を示す。また、供試体のコンクリート表面とシートの付着強さは、各供試体の付着力試験（建研式）では $2.3 \sim 2.4 \text{ N/mm}^2$ であった。

表-4 押抜き試験の押抜き形状と固定ボルトピッチ

シート系補修工（炭素繊維シート）			ネット系補修工（FRPネット）		
B-1 単純載荷 押抜き形状：円形	B-2 繰返し載荷 押抜き形状：円形	B-3 単純載荷 押抜き形状：ひし形	B-4 固定ホルドピッチ：50cm 押抜き形状：円形	B-5 固定ホルドピッチ：25cm 押抜き形状：円形	B-6 固定ホルドピッチ：25cm 押抜き形状：ひし形

キーワード 道路トンネル, 覆工コンクリート, はく落, 補修工, 炭素繊維シート, FRPネット

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 国立研究開発法人土木研究所 TEL 029-879-6791

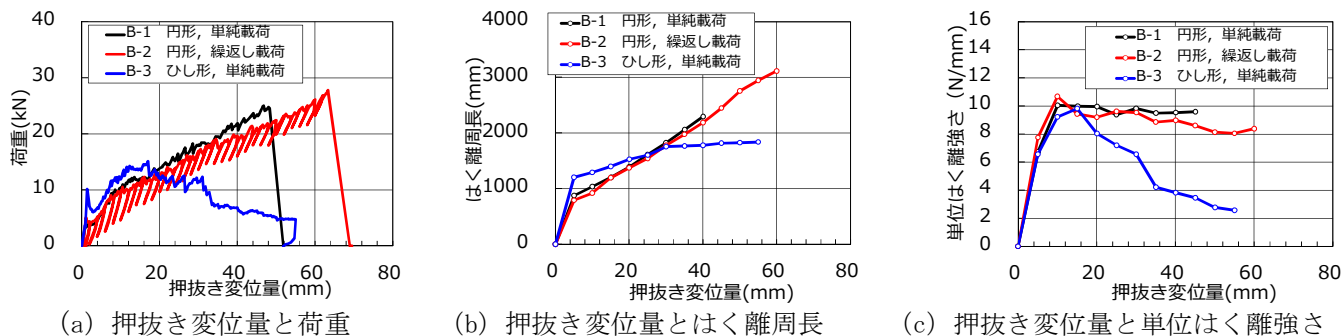


図-2 シート系（炭素繊維シート）の押抜き試験結果

図(a)より、荷重方法の異なる B-1 と B-2 を比較すると、最大荷重が約 25kN でほぼ同程度であり、最大荷重までの変位と荷重の関係も近似していることから、荷重方法による最大荷重、挙動の差異はないものと考えられる。

一方、押抜き形状が異なる B-1 と B-3 を比較すると、ひし形の場合は約 20mm 弱で最大荷重の約 14kN を示し、円形に比べて最大荷重が小さい。これは、シート系補修工は一般的に押抜き変位量の増加に伴ってシートのはく離範囲が拡大する挙動を示す(写真-1)が、ひし形形状のような鋭角部を有する場合は鋭角部付近のシートに一部損傷等(写真-2)が発生し、その後シートのはく離の拡大とともに、はく離の進行が抑制され、荷重が増加せず(図(b))に減少したものと考えられる。このことは、覆工コンクリートのはく落塊(はく落荷重)の大きさによっては、鋭角部を有するはく落形状の場合、補修工の材料の損傷により、シートのはく離が進行する際の単位はく離強さ(=荷重/はく離周長)(図(c))で想定できる耐荷力を確保できなくなる可能性がある。したがって、トンネルの補修工の設計にあたっては、はく落形状を考慮するとともに、想定するはく落荷重、補修工の材料の強度特性との関係を把握し、耐荷力がどちらで決定されるかを明らかにしておく必要があると考えられる。

図-3 にネット系当て板工 (FRP ネット) について、押抜き変位量と荷重の関係を示す。図より、押抜き形状が異なる B-5 と B-6 を比較すると、最大荷重が約 6~7kN でほぼ同程度であり、最大荷重となる変位も 160mm 程度でほぼ同程度であることから押抜き形状による最大荷重、挙動による差異はないものと考えられる。一方、ネットを固定するボルトピッチが異なる B-4 と B-5 を比較すると、ボルトピッチ 50cm が 25cm に比べて最大荷重が小さい。いずれのケースにおいても、荷重が約 4kN 程度付近から各変位における荷重変化が大きいことが分かる。これは、FRP の 50mm 間隔の格子筋の一部が損傷(写真-3)することで荷重が一旦減少したのち、瞬時に損傷した格子筋がそれまで荷重分担していた荷重がその周辺で再配分することを繰り返していることが分かる。格子筋 1 本の引張耐力は表-2 の規格値約 8kN の約半分の約 4kN で損傷しているのは引張力に加えてせん断力が作用したためと考えられる。ボルトピッチが大きい場合は、ボルト 1 箇所での荷重の負担が大きくなるため、固定ボルト周辺等の格子筋の損傷やずれなどが生じ、ボルトピッチが密な場合に比べて最大荷重が小さくなったと考えられる。

4. まとめと今後の課題

トンネル補修工を対象とした本押抜き試験の結果より、シート系の補修工ではひし形のような鋭角部を有する押抜き形状の場合には、鋭角部付近のシートが一部損傷等に伴い、一般的なシートのはく離が進行する挙動と異なることが分かった。また、ネット系の補修工は押抜き形状の違いは見られず、格子筋の強度と固定のボルトピッチにより耐荷力が決まることが分かった。

今後は、トンネル合理的な補修・補強工の設計方法の確立とともに、施工性・維持管理性の優れた技術の改良・開発および評価について検討していく必要があると考えられる。



写真-2 シート損傷状況

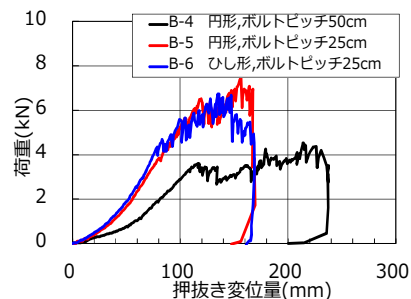


図-3 ネット系 (FRP ネット) 補修工の変位と荷重の関係

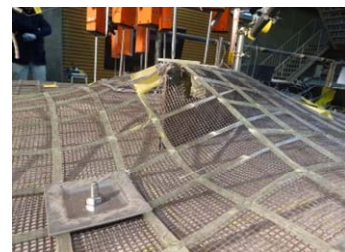


写真-3 ネット損傷状況