

薄肉高強度覆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 ○菊地浩貴, 日下敦, 佐々木亨, 田村賢人

1. はじめに

山岳トンネル工法により施工される通常断面の道路トンネル一般部の覆工では、設計巻厚 30cm、一軸圧縮強度 18N/mm^2 のプレーンコンクリート（以下、「従来覆工」と称する。）が標準的に採用されている。トンネル施工時に過大な変形等により所定の覆工の設計巻厚が確保できない場合には、対応の 1 つとして高強度化した覆工構造の適用等が考えられるが、これまで覆工に求められる機能・性能が確立されていないこと等の理由から、崩落のリスク等を冒して地山の縫い返しを行い、当初の設計巻厚を確保できるよう施工するのが一般的である。本報告では、覆工に求められる性能のひとつである耐荷性能に着目し、薄肉高強度覆工の耐荷力および破壊モード等を明らかにすることを目的として、実大規模の覆工載荷実験を行い、さらに過去に実施した従来覆工の実験結果¹⁾と比較し、概ね同等の耐荷性能を把握した結果を報告する。

2. 覆工載荷実験の概要

実験装置および供試体の概要を図-1 に示す。二車線道路トンネルの一般部と同程度の実大規模の実験装置であり、最大荷重 2000kN の油圧ジャッキが 10° ピッチで 17 台 反力壁に設置されている。ジャッキ先端に設置された載荷版を介して供試体に載荷を行うことができる。各ジャッキは、荷重制御、変位制御、バネ化制御が可能である。実験は、まず予備載荷として全ジャッキ荷重制御で 40kN/本まで載荷を行い、供試体に軸力を導入する。その後、本載荷として、天端からのゆるみ土圧を想定し、 $80, 90, 100^\circ$ 位置のジャッキを 5:8:5 の比で内空側へ段階的に強制変位させた。このとき載荷以外のジャッキはバネ化制御とし、地山側への変形のみ一定のバネ定数で拘束することで地山を模擬した。本実験でのバネ定数は約 400kN/mm とした。計測項目は、各ジャッキの反力、ストローク量、供試体内面および外面、上面のひずみ量等である。さらに載荷ステップの合間に、目視で供試体表面のひび割れ状況等の観察・記録を行った。

3. 薄肉高強度覆工の概要

本検討では、覆工厚 20cm、呼び強度 40N/mm^2 のプレーンコンクリートからなる供試体を用いた。覆工厚および強度の設定にあたっては、予備解析より従来覆工と同等以上の耐荷力が得られ、同等の破壊モードを呈することを確認し決定した。載荷実験時の圧縮強度は、別途作製した円柱供試体の一軸圧縮試験から 43.1N/mm^2 であった。

4. 実験結果

ここでは薄肉高強度覆工の実験結果と併せて、従来覆工の実験結果¹⁾を併記する。それぞれの供試体物性値を表-1 に示す。なお、両ケースとも 2. に示す載荷方法およびバネ定数である。

図-2 に荷重（載荷ジャッキの合計値）と天端部の変位の関係、図-3 に最大荷重に対して損傷の各段階の荷重を比で表した耐荷重比を示す。両ケースとも直線的に荷重が増加しており、比較的低い荷重レベルで天端内面、肩部外面の順に引張ひび割れが発生する。荷重が増加すると天端外面、肩部内面の順に圧縮破壊が生じ、case1 では約 2400kN、case2 では約 2300kN で構造全体の耐荷力に達した（case1 は載荷重の低下が確認さ

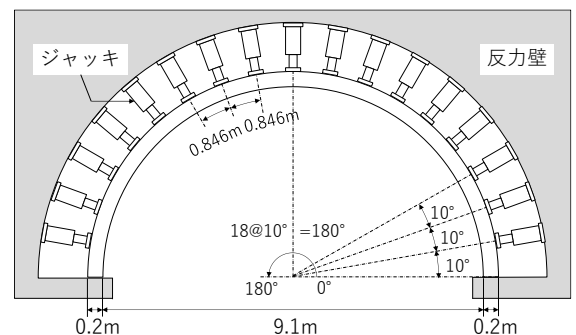


図-1 実験装置および供試体の概要

表-1 供試体物性値

		case1 (従来覆工)	case2 (薄肉高強度覆工)
覆工厚	mm	300	200
圧縮強度	N/mm^2	25.4	43.1
引張強度	N/mm^2	-	3.18
弾性係数	N/mm^2	19307	23169
曲げ剛性	Nmm^2	$4.34\text{E}+13$	$1.54\text{E}+13$
ポアソン比	-	0.15	0.16

キーワード 山岳トンネル, 覆工コンクリート, 耐荷力

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 (国研) 土木研究所 道路技術研究グループ (トンネル) TEL : 029-879-6791

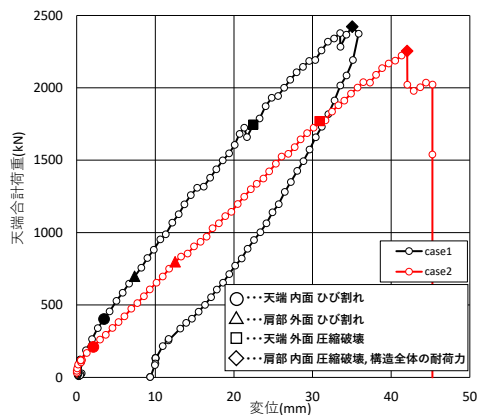


図-2 荷重変位関係

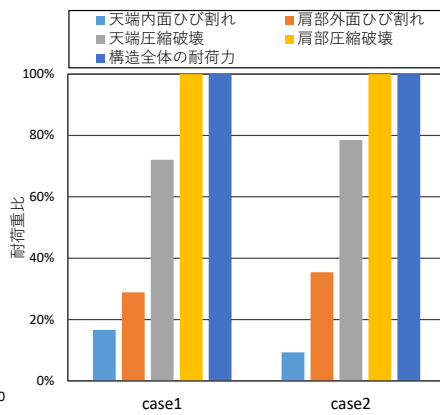


図-3 耐荷重比



写真-1 肩部の損傷状況 (case2)

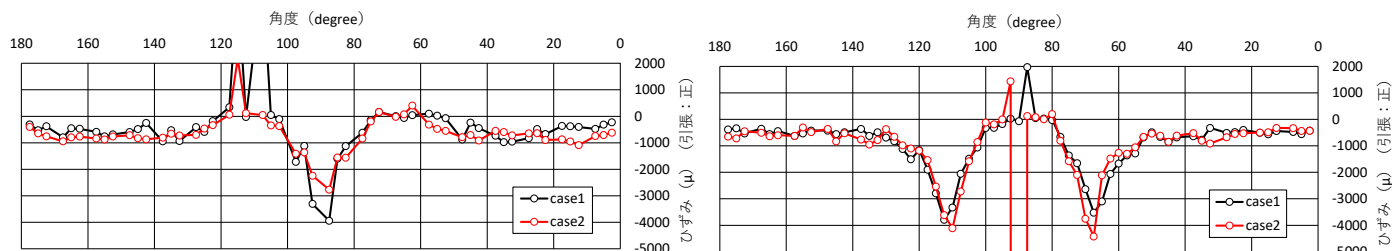


図-4 ひずみ分布 (左：外面 右：内面)

れた時点で除荷)。構造耐力に達した後の case2 の肩部の状態を写真-1 に示す。覆工内面が圧ぎによりはく落し、最終的に 110～120° 位置でせん断破壊が生じた。耐荷重比では、両ケースとも本実験条件においては同等の傾向が確認された。天端および肩部の引張ひび割れ発生時点では、約 3 割の耐荷重であり、構造耐力までは十分余裕がある一方で、天端および肩部の圧縮破壊が生じる段階では余裕がないことが分かる。図-4 に最大荷重時のひずみ分布を示す。両ケースとも、天端外面、肩部内面で-3500 μ 前後の圧縮ひずみ、内外反対側では引張ひずみ、その他の断面は小さな圧縮ひずみが発生しており、天端、肩部で曲げ圧縮破壊、その他の断面で全断面圧縮応力が生じて構造全体の耐力に達していることが分かる。

以上より、本実験条件においては、両ケースともおおむね同程度の耐力を有し、破壊メカニズム、破壊モードも同様であることが明らかになった。一方で、case2 の方が荷重変位の傾きは小さく、構造全体の耐力に達したステップの天端変位は約 7mm 大きい結果となった。これは、case1 に対して断面係数は約 1/2、曲げ剛性は約 1/3 であり、曲げ変形しやすい構造であることに起因すると考えられる。なお、覆工表面の目視観察は荷重の数ステップに 1 回程度の頻度で行うため、損傷が生じたタイミングと記録したステップが厳密に一致していない場合もある。

5. まとめ

薄肉高強度覆工の耐力および破壊モード等を明らかにすることを目的として、実大規模の覆工荷重実験を行った。本実験条件においては、覆工厚 20cm、呼び強度 40N/mm² の薄肉高強度覆工は、覆工厚 30cm、呼び強度 18N/mm² の従来覆工と同程度の構造耐力を有し、かつ破壊メカニズムや断面の破壊モードも同等であることが明らかになった。一方で、従来覆工に対して曲げ破壊しやすくなることから、覆工に曲げモーメントが卓越するような荷重形式や地山条件においては、損傷が早期に発現し耐力が大幅に減少することが想定される。今後は、地山条件等を変更したケースを実施することで、薄肉高強度覆工の適用範囲や検討にあたっての留意事項の検討を行いたいと考えている。なお、本報告は一定の荷重条件における覆工の耐力および破壊モード等に注目した実験であり、本実験結果をもって覆工の薄肉化を図ることが出来るわけではないことに留意が必要である。

参考文献

- 1) 石村利明, 砂金伸治, 日下敦, : 炭素繊維シートを鋼材により固定した場合のトンネル補強効果に関する実験的検討, 第 72 回年次学術講演会, 2017. 9