

トンネル覆工の力学的特性に関する実験的考察

建設省土木研究所 真下 英人 ○砂金 伸治
日本道路公団試験研究所 城間 博通 海瀬 忍

1. はじめに

道路トンネルの建設箇所の増加と大断面化・偏平断面化が徐々に進みつつあることにより、トンネル建設におけるコスト削減は早急に取り組むべき課題となっており、その一方策としてトンネル覆工の力学的な特性を明らかにし、新たな材料を覆工に導入することにより、薄肉化を図った一層適切な覆工構造の提案が考えられている。

そこで本研究ではトンネル覆工の設計手法を確立するための基礎的な研究として、覆工の力学的特性に関するデータを得ることを目的とした覆工載荷実験を実施し、その結果について考察した。

2. 実験方法

実験は図-1 に示すような覆工を模擬した半円形のコンクリート供試体を作成し、それに中心方向に載荷することとした。実験により覆工の薄肉化に伴う影響と鋼繊維補強コンクリートを用いた場合の力学的特性を把握するために、これらを網羅するよう供試体の材料諸元を検討し、6 ケースの実験を行った。表-1 に実験に使用した供試体の仕様について示す。

載荷の制御は、ケース A および C～E は変位制御で行った。載荷は図-1 の座標系において $10\sim 40^\circ$ 、 90° および $140\sim 170^\circ$ の 9 断面で、供試体の下部より 30cm と 70cm にジャッキ中心部が配置されるように、1 断面に 2 本のジャッキを設置し行った。載荷は覆工の耐力を超えたと判断できるまで継続し、荷重パターンは覆工厚が 30cm と 20cm の場合で軸力導入の過程を分け実験を行った。軸力導入後は 90° 部分のジャッキのみで載荷を継続し、残りはジャッキのバルブを閉めることによりジャッキ自体を地盤反力ばねに模擬した。またケース B と F は荷重制御で行い、載荷は 10° ピッチの 17 断面で行うこととし、供試体の破壊に達するまで載荷を行った。荷重パターンは、20kN/本の荷重を全ジャッキより作用させ軸力を導入後、 $80\sim 100^\circ$ 部分のジャッキのみで載荷を継続し、残りは変位制御時と同様に地盤反力ばねに模擬した。最終的な荷重の状態のイメージを図-2 に示す。

3. 実験結果および考察

変位制御で載荷を行ったケース A および C～E の荷重-変位曲線を図-3 に示す。初めに鋼繊維の効果を把握することを試み、ケース A とケース C を比較した。なおケース A で軸力導入段階で天端部の内側にひび割れが発生したため、初期のひび割れ発生過程等の議論は不可能であったが、発生位置が天端の内側であり、ケース C の発生場所

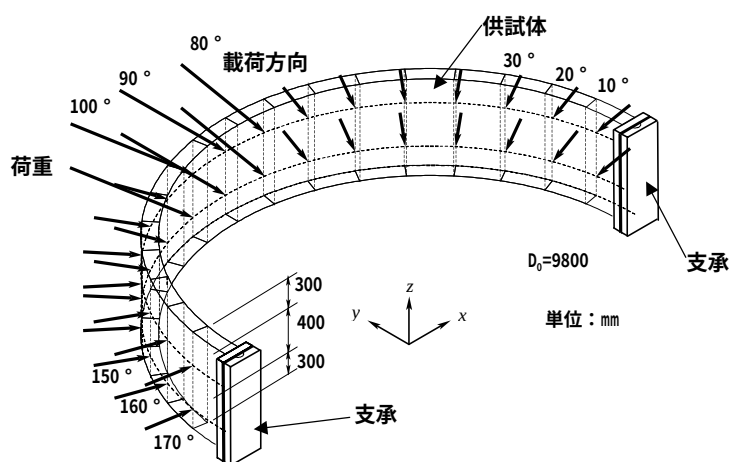


図-1 覆工供試体の概要図

表-1 実験に使用した供試体の仕様

実験ケース番号	A	B	C	D	E	F
使用材料(コンクリート)	プレーン		鋼繊維補強			
厚さ (cm)	30	30	30	20	30	30
外径(m)	9.8					
スランブ (cm)	12		12(混入前 18)			
粗骨材最大寸法 (mm)	40		20			
単位セメント量(kg/m ³)	270		280			
水セメント比(%)	57.5		65			
細骨材率(%)	43.8		52			
鋼繊維混入率(%)	—	—	0.5	0.5	0.5	0.5
鋼繊維直径 (mm)	—	—	0.8	0.8	0.8	0.8
鋼繊維長さ (mm)	—	—	60	60	30	60
載荷の制御方法	変位	荷重	変位	変位	変位	荷重
一軸圧縮強度 平均(N/mm ²)	28.1	26.3	20.9	23.1	23.7	19.9
曲げ強度 平均(N/mm ²)	—	—	4.88	5.19	3.51	3.88
曲げタフネス 平均(N/mm ²)	—	—	7.52	4.55	2.48	3.61

とほぼ同一であったため耐力等の評価は可能と判断した。図-3 より耐力はケース A の方がケース C に比較して小さく、鋼繊維の補強効果が覆工の耐力に表れる荷重の状態であることが分かる。また、図-4 に変位制御値が 5.0mm における曲げモーメント図を示す。この時点では天端部および肩部にひび割れが発生しており、その発生部分付近ではケース C においては曲げモーメントが供試体に発生しているが、ケース A では曲げモーメントがほとんど発生していない。すなわち、ひび割れ発生後もケース C では耐力が存在することを示しており、鋼繊維の補強効果が表れていると考えられる。

次に、薄肉化による影響を検討するために、鋼繊維補強コンクリートについてケース C とケース D を比較した。軸力導入値が異なるため供試体の持つ耐力としての絶対量の比較には注意を要するが、図-3 よりケース C では天端からの載荷重が 155kN/本で、ケース D では 66kN/本で載荷重が最大となった。また、供試体のひび割れについては、第 1 ひび割れは天端部内側、第 2 ひび割れは肩部 115° の外側に発生し、ケース C で第 1 ひび割れは変位が 0.5mm(荷重値は 57kN/本)で、第 2 ひび割れは 4.0mm(98kN/本)であるのに対して、ケース D で、第 1 ひび割れは 1.0mm(26kN/本)、第 2 ひび割れは 1.4mm(26.5kN/本)であった。ひび割れの発生状況は、主として上下方向に複数本のひび割れが進展する傾向が見られた。なお、載荷を終了するまで供試体からの剥落は発生しなかった。

さらに、鋼繊維の長さの影響として、ケース C とケース E を比較した。図-3 より最大荷重についてはケース C で 156kN/本、ケース E で 117kN/本となっていた。強度の差を考え併せても鋼繊維の長さを短くした場合では、耐力は低下することが分かる。また耐力を超えた後については鋼繊維の長さの短いケース E の方が、荷重-変位曲線の傾きが急に低下していた。

最後に荷重制御で載荷を行ったケース B とケース F を比較した。それらの荷重-変位曲線を図-5 に示す。これ

より破壊時の天端変位は両ケースとも概ね 40mm で、供試体の破壊荷重は異なっているが、それは供試体の強度の差による影響であり、鋼繊維による影響は明確には現れていないものと考えられる。破壊の状況から両ケースとも初めに肩部の内側から圧縮と思われる破壊が生じており、圧縮力が卓越する荷重の状態では、鋼繊維による力学的な補強効果は表れなかったためと考えられる。なお、供試体からの剥落についてはプレーンコンクリートでは発生したが、鋼繊維補強コンクリートでは発生しなかったため、剥落に関する補強効果はあると確認できた。

4. おわりに

鋼繊維補強コンクリートを覆工に用いた場合、載荷条件によって耐力の向上が明確に表れる場合があるとともに、ひび割れ分散効果や剥落防止効果について確認された。また鋼繊維長により耐力に差があり、耐力超過後の挙動も異なることが分かった。今後は載荷条件、覆工厚、強度、鋼繊維の影響を反映させた解析を行う予定である。

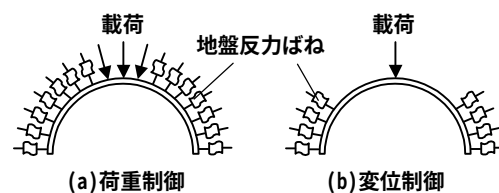


図-2 最終的な荷重の状態のイメージ

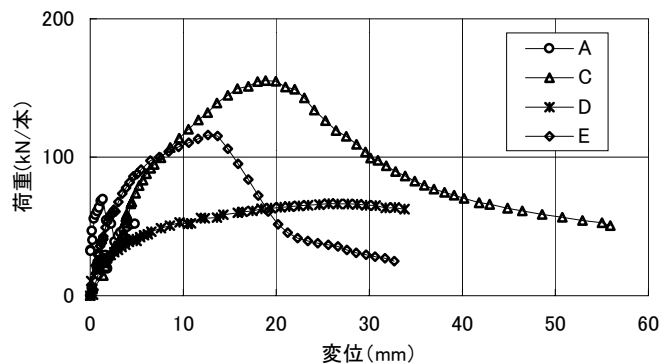


図-3 荷重-変位曲線(天端部, 高さ50cm, 変位制御)

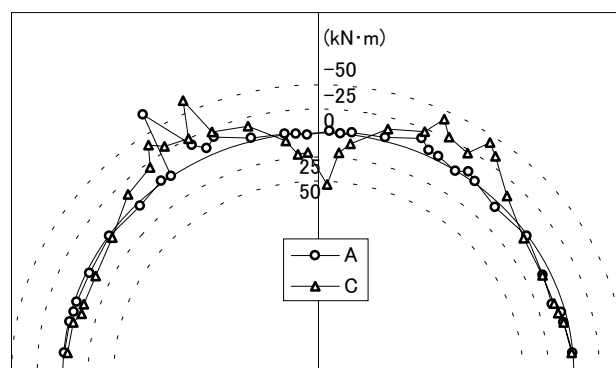


図-4 曲げモーメント図 (変位制御値5.0mm)

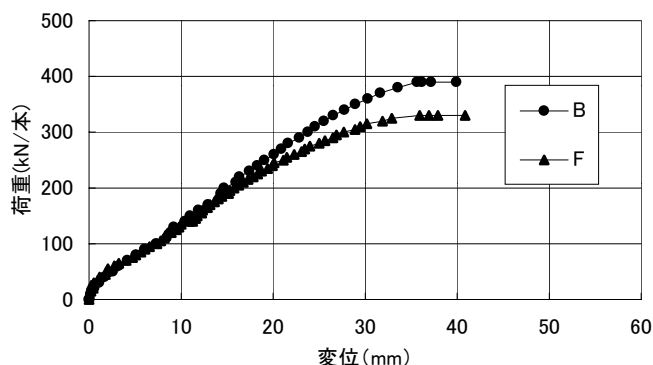


図-5 荷重-変位曲線(天端部, 高さ50cm, 荷重制御)