トンネル覆工の挙動特性に及ぼす材料の影響に関する考察

独立行政法人土木研究所　○砂金 伸治　真下 英人

１．はじめに

近年の道路交通の発展に伴い道路トンネルの建設箇所が増加しつつあり，また一方で覆工コンクリートの剥離および剥落といった問題が発生している．トンネルの建設コストの縮減と耐久性の向上を図っていくためには，掘削する地山の特性に応じた合理的で耐久性の高い，かつ経済的にも優れたトンネル構造を構築する必要がある．

本研究では，覆工の設計法を確立するために，曲げモーメントの影響が顕著に表れやすい荷重条件において，覆工に使用する材料の影響を考慮したトンネル覆工載荷実験を行った．また，実験結果に基づき，覆工に鉄筋を配置した場合や鋼繊維補強コンクリート(SFRC)を使用した場合の挙動の特性を数値解析により検討した．

２．研究方法

載荷実験では写真-1 に示す覆工を模擬した半円形の供試体を作成した．載荷は覆工の天端および肩部背面に空洞が発生した場合で覆工に上部から荷重が作用した状態を想定し，図-1 に示す載荷形式を採用した．この形式では覆工の肩部に変形に顕著な影響を及ぼすと考えられる程度の曲げモーメントが生じる．載荷は供試体の右側脚部を 0 度と定義した座標系において，10～40 度, 90 度, 140～170 度の計 9 断面で軸力の導入を実施した．その後，天端の 90 度の 1 断面のみで変位制御により強制変位を与えることにより実験を行った．強制変位を与える間は他の 8 断面のジャッキはバルブを閉めることで地盤反力ばねに模擬した．本研究では使用する材料の影響を把握できるように表-1 に示す 6 ケースの実験を実施した．特にケース⑥では鉄筋を供試体の内縁側より 7cm の位置に，道路トンネルの坑口部において一般に用いられているものと同様に，主筋として D19 を 20cm 間隔で，また配力筋として D16 を 30cm 間隔で配置した．

写真-1　覆工の供試体の概要

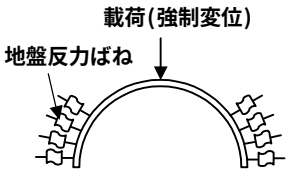

図-1　載荷形式のイメージ

数値解析はひび割れの進展を考慮できる有限要素解析により実施した．覆工は平面応力要素と仮定し Kupfer の破壊規準を用いた．実験と同様に強制変位を与える解析を実施し，強制変位が所定の変位より 10%以上の過不足で変位が生じた地点を解析的に不安定に達した地点と定義し，その地点まで解析を継続した．引張強度は圧縮強度より推定し，引張軟化曲線は曲げ試験から算定した．表-1 に曲げ引張応力-ひび割れ開口幅曲線勾配 β および残留強度率 μ の算定結果を示す．引張軟化曲線の第 2 直線の勾配 λ は繊維長に無関係に β を 1.85 で除した値と仮定した．ケース①および⑥では μ=1.0，限界ひび割れ開口幅は 0.02mm と仮定した．鉄筋は棒要素を用い，引張特性はバイリニアと仮定して実験と同一の箇所に要素を配置した．地盤反力ばねは引張の影響を無視し，地盤反力ばね定数は実験時のジャッキストロークとジャッキ反力の測定結果に基づき 25MN/m(変形係数で 62.5MN/m²程度)とした．

表-1　供試体の諸元

ケース番号	厚さ (mm)	外径 (mm)	材料	繊維長 (mm)	繊維混入率 (%)	平均一軸圧縮強度 (N/mm²)	β	μ
①	300	9700	プレーン	－	－	26.9	－	－
②	300	9700	SFRC	60	0.5	21.8	-0.30	0.80
③	300	9700	SFRC	30	0.5	23.7	-0.45	0.55
④	300	9700	SFRC	30	0.3	19.3	-0.24	0.30
⑤	300	9700	樹脂繊維	50	0.5	28.3	-0.57	0.30
⑥	300	9700	鉄筋配置	－	－	29.1	－	－

３．研究結果および考察

実験で得られた荷重変位曲線を図-2 に示す．実験は概ね 5 断面にひび割れが発生した後，強制変位を安定して与えることが可能で載荷が継続できると判断される状態まで実施したが，各ケースとも供試体が圧縮の限界に達す

キーワード：トンネル，覆工，載荷実験，繊維補強コンクリート，ひび割れ
〒305-8516　茨城県つくば市南原 1-6　TEL：0298-79-6791

ることによって生じる破壊は観察されなかった．プレーンコンクリートを用いたケース①では最大荷重が 54kN/本程度であり，6 つの実験ケースの中では最も小さい値であるとともに，最大荷重に達した直後に載荷が不可能となった．鉄筋を配置したケース⑥では繊維を混入した 4 つのケースより最大荷重に達した後の荷重の低下率が大きいことが分かった．

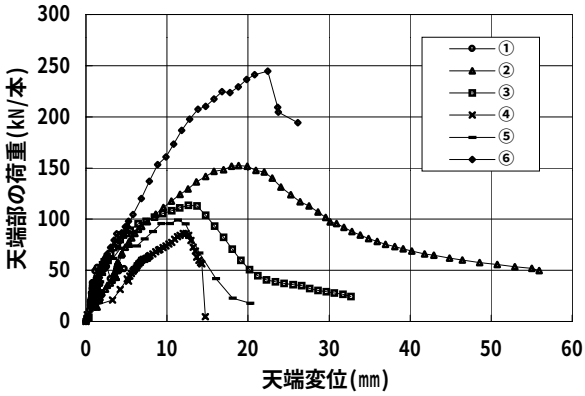

図-2 実験による荷重変位曲線

図-3 にケース⑥における最大荷重の直前でのひび割れ図を示す．ひび割れは天端部(概ね 90 度)の内面側，肩部(概ね 60 度および 120 度)，側壁部(概ね 40 度および 140 度)の順で発生する様子が観察された．鉄筋を配置しなかった外面側ではプレーンコンクリートの場合と同様に上下方向 1～2 本に集中してひび割れが進展し，鉄筋を配置した内面側ではひび割れは上下方向に複数本に分散して発生する様子が観察され，ひび割れの発生状況は SFRC の場合と鉄筋を配置した場合とでは大きな差が見られないことが実験より明らかとなった．

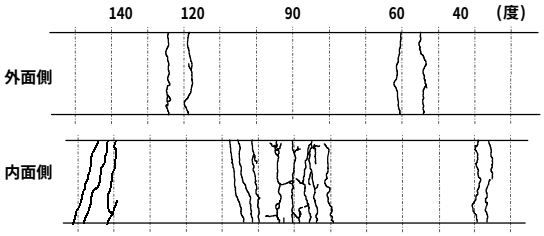

図-3 ひび割れ発生図(ケース⑥)

解析では初めにケース②および⑥の実験結果を解析し，荷重変位曲線とひび割れ発生荷重を比較して解析の妥当性を検証した後，ケース⑥のコンクリートの諸定数をケース②のそれと一致させた場合の荷重変位曲線を比較し最大荷重の差を検討した．図-4 にそれらの実験および解析結果を示す．ケース②の実験と解析による荷重変位曲線の変化の傾向は，実験の初期で供試体が大きく変位している影響により変位値に差が生じているが，荷重変位曲線の傾きは概ね一致しており，解析は実験を概ね再現していると考えられる．ケース⑥についても解析は実験を概ね再現していると考えられるが，ケース②および⑥ともに最大荷重付近では若干合致しない部分があった．これは実験時の地盤反力ばね定数が実験を通じて一定にならない影響等が考えられる．ケース⑥の諸定数をケース②と同一にした場合は，最大荷重やその時の変位は鉄筋を配置した場合と SFRC の場合とで大きな差は見られず，同一の荷重の場合の変位はある程度までは鉄筋を配置した方が大きく発生する傾向があることが解析的に明らかとなった．

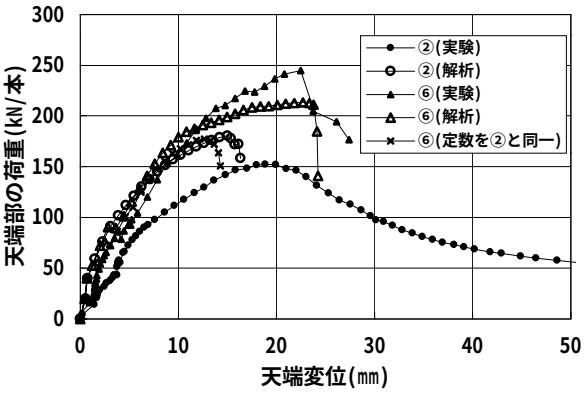

図-4 ケース②，⑥の荷重変位曲線

実験で用いた供試体は一軸圧縮強度が異なっていることから，引張特性を改善する材料が覆工の耐荷力に与える影響を比較するためにケース①～⑥の一軸圧縮強度を 18N/mm^2，ヤング率を 2.2×10^{4}N/mm^2 と仮定した解析を実施した．図-5 に解析結果を示す．最大荷重に達した後の挙動の差違を把握することは困難であったが，繊維長を短くした場合や混入率を低下させることにより最大荷重は低下することが解析的に分かった．特にケース②～⑤については引張軟化曲線の傾きや切片，すなわち残留強度の違いにより最大荷重の差が生じることが明らかとなった．

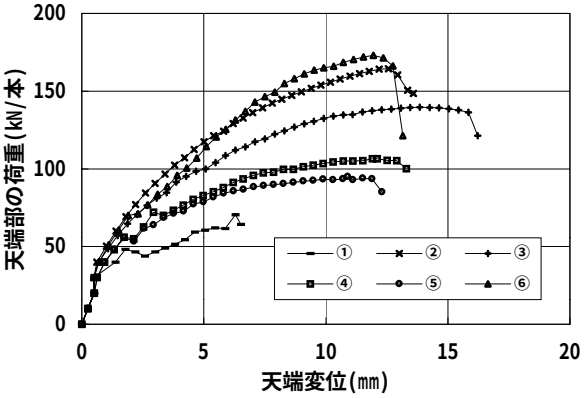

図-5 材料毎の荷重変位曲線(解析値)

４．まとめと今後の課題

覆工に鉄筋を配置した場合と長さが 60mm で混入率が 0.5%の SFRC の場合とでは曲げモーメントの影響が顕著となる載荷状態では覆工の耐荷力に大きな差は見られなかった．今後は鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度や引張軟化曲線のばらつき，地山条件および荷重状態を詳細に検討して覆工の耐荷力を総合的に検討する予定である．