

二次覆工を考慮したシールドトンネル軸方向剛性評価の実規模実験

中部電力㈱ 正会員 滝 英治 依田 真〇児玉守広
日本工営㈱ 田中 弘 山田孝治

1. まえがき

都市部の重要送電施設である地中線洞道などのシールドトンネルを設計する場合、地震時の安全性を考慮した設計が求められる。この時、シールドトンネル軸方向剛性値の評価が重要な課題となるが、地中線洞道で通常施工されている二次覆工を考慮した研究は少なく、その剛性評価方法は確立していない。このため著者らは、二次覆工まで考慮にいたしたシールドトンネル軸方向剛性の合理的な評価法を検討するために一連の実験研究¹⁾を実施しており、ここでは二次覆工を打設した実規模シールドトンネル（スチールセグメントを使用）の地上載荷実験（軸圧縮・軸引張・純曲げ載荷）について報告する。

2. 実験概要

(1)供試体と載荷装置：写真に示すように、供試体はスチールセグメント(SM50)を軸方向に5リング千鳥組し、これに厚さ15cmの無筋二次覆工コンクリート（設計基準強度 $f'c=180\text{kgf/cm}^2$ ）を打設した、外径1.8m、長さ3.75mの実規模シールドトンネルである。セグメント諸元は下水道用標準セグメント1-1に準じるもので（ただし、主桁・継手板厚は14mm）、ボルトはM16（F10T、リング継ぎボルト20本）を用い、初期締付力は 2.0tf とした。トンネル両端にはトランジションとして、外径をトンネル部に合わせた厚さ30mm、長さ1mの鋼管を接合（ボルト接合+二次覆工も打設）し、この端部から載荷フレームを介し、片側 200tf ずつの両動ジャッキを用いて軸圧縮・軸引張・純曲げ載荷を行なった。

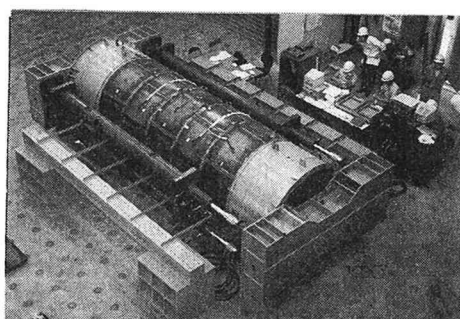


写真 実規模シールドトンネル供試体

表1 計測項目と計器配置

計測項目	計器配置
トンネル長さ変化	左右上下4箇所
トンネル直径変化	鉛直・水平5断面
リング継手変位	4継手部×6箇所
リング継ぎ部歪	4継手部×12箇所
縦リブ歪	3リング×12箇所
二次覆工内側歪	継手部・リング中央計7断面×12箇所

(2)計測項目と計器配置：表1に示す項目・配置で計測した。

(3)載荷方法：本実験では、曲げによる二次覆工のひびわれ発生・ひびわれ進行状態の把握、最終曲げ耐力に注目したため、図1に示すような、①二次覆工ひびわれ前での軸圧縮・軸引張載荷→②純曲げ交番載荷で二次覆工ひびわれ発生（1箇所発生したところで終了）→③二次覆工ひびわれ発生後の軸圧縮・軸引張載荷（ただし、ひびわれ部のセグメントは弾性挙動範囲内とする）→④載荷②のつぎの純曲げ交番載荷（二次覆工破壊、継手部破壊、最終耐力まで）とする載荷方法を採用した。

3. 実験結果

(1)純曲げ載荷過程でのトンネル破壊形態：本実験では純曲げ載荷過程（載荷②、④）で供試体を逐次破壊させた。図2に供試体の破壊形態とそれぞれの破壊荷重を示す。最初の二次覆工ひびわれは、第一回目の純曲げ載荷 $M=80.4\text{tfm}$ でNo.3-4リング間の継手部位置に発生した。この状態での軸方向載荷（載荷③）の後、第2回目の純曲げ載荷では $M=86.3\sim 96.4\text{tfm}$ でリング継手部位置での二次覆工ひびわれが逐次発生した。最終耐力は、全てのリング継手部での二次覆工ひびわれが発生した後、No.3-4リング間のリング継ぎボルト2本がほぼ同時に破断した $M=232.1\text{tfm}$ であった。①二次覆工ひびわれがリング継手部で発生したこと、②純曲げ載荷のため、ほぼ似たような荷重値で全ての継手部位置にひびわれを生じたこと、③ひびわれは最初発生した位置の両隣の継手位置に進展していったことが特徴である。

(2)軸方向載荷時のトンネル剛性：図3に軸圧縮・軸引張載荷時におけるセグメント5リング分のトンネル長

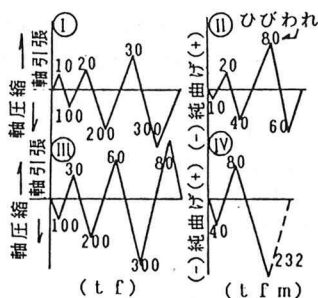


図1 載荷方法

さ変化（上下左右4箇所での計測の平均値）を示す。①二次覆工ひびわれ前では、圧縮・引張時ともトンネル長さ変化がほぼ同一ライン上にあり、二次覆工ひびわれ前のトンネル軸剛性は圧縮・引張とも変わらないこと、②二次覆工のひびわれ発生後は、圧縮・引張時ともに剛性が低下したことが特徴である。二次覆工ひびわれ発生後の圧縮時にも剛性が低下した理由は、ここでの軸圧縮載荷荷重レベルではセグメントリング継手部が完全に密着した状態には至らなかったためと考えられる。一方、ひびわれ後の軸引張剛性の低下は、ひびわれ発生位置での継手部の剛性に支配されたためである。

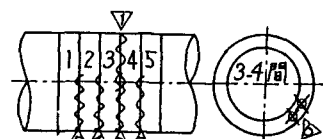
(3)軸方向載荷時のトンネル覆工挙動：図4に二次覆工コンクリートひずみ（二次覆工内面での計測で、継手部断面とセグメント中央断面でのそれぞれの計測値の平均値）および縦リブひずみ（セグメント中央断面の計測値の平均値）と軸方向載荷荷重との関係を示す。①二次覆工コンクリート表面ひずみはトンネル軸方向で一様ではなく、圧縮・引張時ともセグメント中央断面でのひずみの方が継手部断面でのひずみに比べて大きい、②縦リブひずみは圧縮・引張時とも、これと同一断面に相当するセグメント中央断面の二次覆工コンクリートひずみに比べて小さいことが特徴である。これらの計測値から軸方向載荷時のトンネル覆工挙動を模式すると図5のようになり、剛性の小さい継手部の存在のため、リング状に組み立てられているにもかかわらず、トンネル覆工は軸方向載荷時でも曲げを伴った挙動を示していることがわかる。

(4)二次覆工ひびわれ前後の純曲げ載荷時トンネル挙動の比較：図6に二次覆工ひびわれ前と、ひびわれ後の純曲げ載荷時の継手部目開き変位量分布図を示す。二次覆工ひびわれ前は、図3で示したようにトンネル断面の圧縮と引張剛性値が同等であるため、純曲げ作用時の中立軸はトンネル断面中心にある。一方、二次覆工ひびわれ後は、ひびわれが発生した継手位置ではセグメント部材のみが引張に抵抗することになり剛性が低下するため、中立軸は圧縮側にずれることが実験でも検証された。

4. あとがき

著者らは、今回報告した実験の他に、有筋二次覆工を考慮した実規模トンネル載荷実験、ならびに各種セグメント部材載荷試験を実施しており、これら一連の実験の検討をすすめ、シールドトンネル軸方向剛性値の合理的な評価法を確立したいと考えている。なお、本実験研究に際し貴重な助言をいただいた東洋大学小泉 淳助教授ならびに実験を担当した鹿島建設技術研究所関係各位に感謝します。

〔参考文献〕1) 滝、依田、水野、和田、田中：シールドトンネル一次覆工（スチールセグメント）の軸方向剛性評価の実規模実験、土木学会中部支部 1989.3



ひびわれ順序	曲げ荷重
△ No.3-4間継手	+80.4 t/m
△ 同上	-60.1 "
△ No.4-5間継手	-86.3 "
△ No.2-3間継手	-96.2 "
△ No.1-2間継手	-96.4 "
△ 【ボルト破断】	-232.1 "

図2 曲げによるトンネル破壊形態

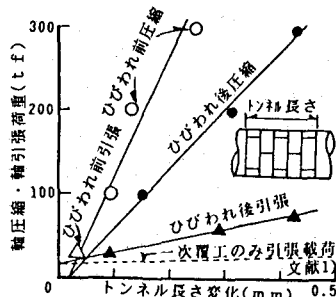


図3 軸圧縮・引張載荷時トンネル長さ変化

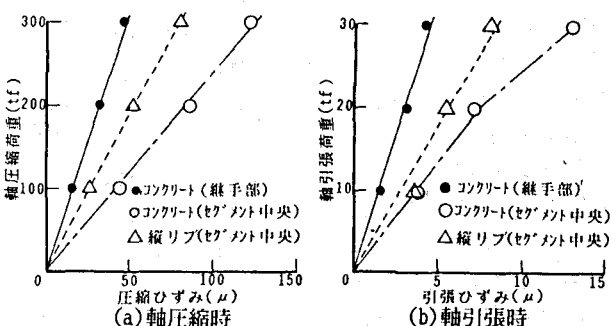


図4 二次覆工・縦リブひずみ挙動

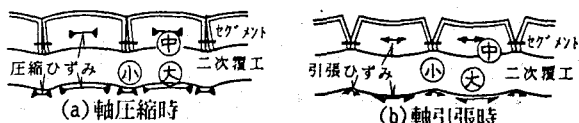


図5 覆工挙動模式図

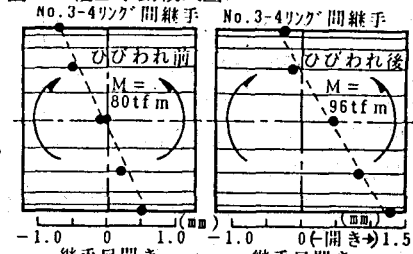


図6 純曲げ載荷時継手部目開き（ひびわれ前後の挙動比較）