

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

中部電力㈱ 正会員 滝 英治 依田 真〇水野竜也
日本工営㈱ 和田正樹 田中 弘

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、地震時におけるトンネル挙動の検討、急曲線施工時や不等沈下に対処する覆工部材設計などのトンネル軸方向に係わる検討が近年重要となってきている。この際に必要となるシールドトンネル軸方向剛性値を検討するため、著者らはこれまでに一連の実験研究¹⁾ならびに現場計測²⁾を実施しており、ここでは電力洞道（特に曲線施工部）で用いられることの多いスチールセグメントを用いた実規模シールドトンネル地上載荷実験について報告する。

2. 実験概要

(1)供試体と実験方法：写真に示すように、トンネル供試体はスチールセグメント（SM50）5リングを軸方向に千鳥組した外径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I-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1.0mの鋼管をボルト接合し、この端部から載荷フレームを介し、片側100tfずつの両動ジャッキを用いて、供試体が弾性挙動を示す荷重範囲での軸圧縮・軸引張・純曲げ載荷を実施した。

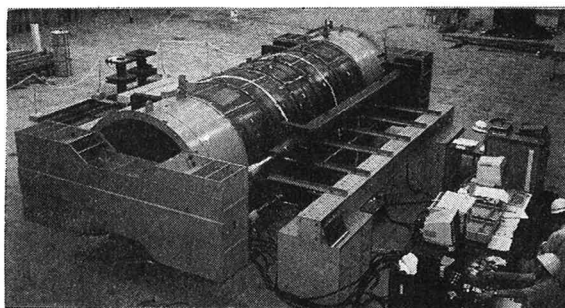


写真 実規模トンネル供試体

(2)計測項目と計器配置：表1に示す項目・配置で計測した。

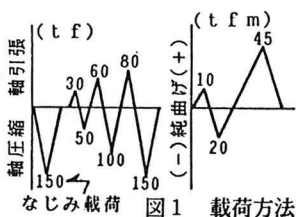
表1 計測項目と計器配置

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箇所
リガ継手変位	4継手部×6箇所
リガ継ぎボルト変位	4継手部×12箇所
縦リブ変位	3リング×12箇所

(3)載荷方法：図1に示すように、最初に150tfの軸圧縮なじみ載荷を加えたのち、最大圧縮150tf、最大引張80tfの軸方向繰り返し載荷、ならびに最大曲げモーメント45tfmの純曲げ交番載荷を行なった。

3. 実験結果

(1)軸引張載荷時のトンネル挙動：図2に引張荷重とセグメント5リング分のトンネル長さ変化（上下左右4箇所での計測の平均値）の関係、図3に引張荷重と継手部変位挙動（No.2-3,3-4リング間の計測の平均値）の関係、また表2に最大引張荷重80tf載荷時の各リング間の継手部変位（目開き）量を示す。図2より、最大引張80tf載荷時のトンネル長さ変化は2.39mmであり、この時の各リング間の継手部変位量の総和も表2より2.39mmとなっている。これより今回の荷重レベルでは、トンネル全体の引張挙動がリング継手部の挙動に対応していることがわかる。



繰り返し載荷のため、図2、3ともに初期立ち上がり部分に表れるはずのボルト初期締付効果は明瞭でないが、図2における初期立ち上がり直線勾配ならびにピーク荷重30, 60, 80tfを結んだ後半部分の直線勾配から継手部1箇所当たりの引張ばね定数を算定する（測定間にはリング継手が4箇所あり、各箇所には計20箇所の継手部があるとして算定）とそれぞれ9.3、5.6tf/mmとなる。一方、図3でも同様に継手部1箇所当たりの引張ばね定数を算定するとそれぞれ8.8、5.2tf/mmとなり、トンネル全体の引張剛性がリング継手部の剛性に支配されていることがわかる。

(2)純曲げ載荷時のトンネル挙動：図4にNo.3-4リング間の継手部変位から算定した曲げモーメント～継手部回転角の関係を示す。回転角は曲げモーメントに対して直線的に変化していることから、今回の載荷荷重範

用(最大曲げモーメント $M=45\text{tfm}$)では継手部曲げ剛性は一定であり、この場合の回転ばね定数は $k_{\theta j} = 6.0 \times 10^4 \text{ tfm/rad}$ である。一方、図5に示す曲げモーメント～セグメントリング曲げひずみ(内外縦リブひずみの差)の関係も直線であり、今回の載荷荷重範囲ではセグメント部も同様に曲げ剛性が一定である。セグメント内が全幅一様にこのひずみを生じていたとしてセグメントリング部の回転ばね定数を試算すると $k_{\theta \text{seg}} = 45 \times 10^4 \text{ tfm/rad}$ となり、上記の継手部回転ばね定数に比べ約1桁大きい値となる。これより、トンネル全体の曲げ挙動は曲げ剛性の小さい継手部の曲げ特性に支配されることがわかる。

図6に最大曲げモーメント $M=45\text{tfm}$ 載荷時の継手部変位・ボルトひずみ・縦リブひずみそれぞれの断面分布図を示す。継手部位置での計測である継手部変位とボルトひずみ断面分布図では、中立軸が圧縮側にずれているのに対し、セグメントリング中央部で計測している縦リブひずみ分布図の中立軸はほぼ断面中心にある。これは、継手部位置では曲げ圧縮に対してセグメント部材剛性が、また曲げ引張に対してはそれより剛性の小さい継手部剛性が抵抗するため中立軸がずれるのに対し、セグメントリング部では曲げ圧縮・引張とも同じ剛性を有するセグメント部材が抵抗しているためである。図中には西野らが提案した方法³⁾で求めた継手部位置での中立軸位置を併記したが、実験結果の中立軸の方が中央によっている。軸圧縮載荷時の挙動から推察して、この原因は継手部の圧縮剛性が十分に剛な状態になっていないためと考えられる。

4. あとがき

スチールセグメントを用いたシールドトンネルの軸引張、純曲げ挙動が、これまで考えられていたように継手部挙動に支配されることを本実験で検証できた。今後、本トンネル載荷実験と別途実施しているセグメントピース継手載荷試験結果との関係を詳細に分析し、シールドトンネル一次覆工状態の合理的な剛性評価法を確立するとともに、二次覆工を考慮した場合¹⁾との比較検討をすすめてゆく予定である。なお、本実験の実施に際し貴重な助言をして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、児玉、田中、山田：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、土木学会中部支部、1989.3、2) 滝、奥田、武内、和田：曲線シールド洞道施工時の現場計測結果とその考察、土木学会中部支部、1989.3、3) 西野、吉田、小泉：シールドトンネル縦断方向の現場載荷試験とその考察、土木学会論文集、第376号/III-6、1986.12

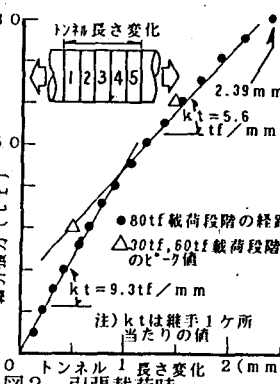


図2 トンネル長さ変化と軸引張力

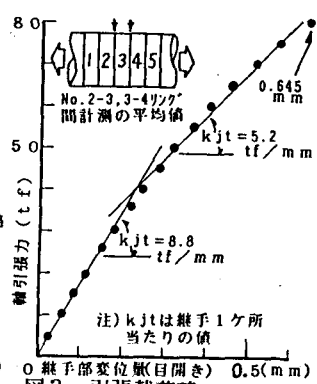


図3 継手変位と軸引張力

表2 軸引張80tfの継手変位

No.1,2 リンク間	0.54 mm
No.2,3 "	0.63 mm
No.3,4 "	0.66 mm
No.4,5 "	0.56 mm

継手変位の合計 2.39 mm

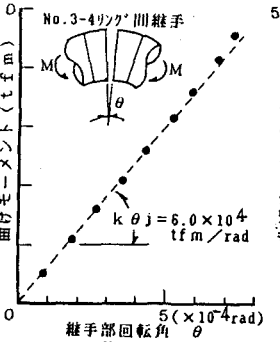


図4 継手回転角と曲げモーメント

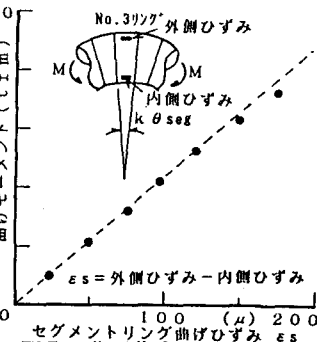


図5 セグメントリング曲げひずみと曲げモーメント

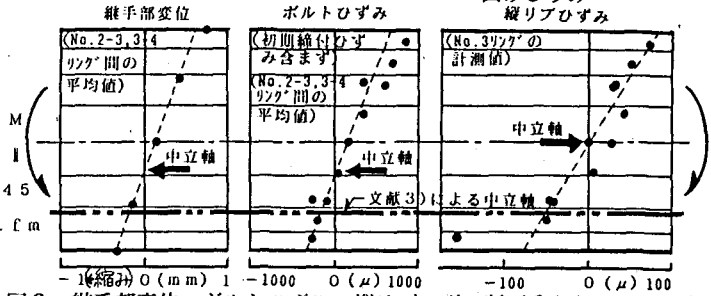


図6 継手変位・ボルトひずみ・縦リブひずみ断面分布($M=45\text{tfm}$)