

丸棒積層体を用いたトンネル模型載荷実験

寺本 正¹・小池 武²・田村 武³

¹正会員 工修 川崎製鉄エネルギー・水道事業部主査 (〒100-0011東京都千代田区内幸町2-2-3)

²正会員 工博 川崎製鉄建材センター鋼構造研究所所長 (〒263-0005千葉市稲毛区長沼町351)

³正会員 工博 京都大学工学研究科教授 (〒606-8501京都市左京区吉田本町)

トンネル覆工の挙動を見る目的で、周辺地山とトンネル覆工との相互作用を考慮できる模型実験装置を製作し、載荷試験を行った。鋼製の丸棒積層体を用いて地山を模擬した。トンネル覆工には鋼板を用い、その板厚を変化させることで、覆工剛性の影響を考慮した。実験結果より、高い剛性の覆工には大きな曲げモーメントが発生することがわかり、地盤反力の期待できる地山の場合には薄い覆工の方が有利であることがわかった。

Key Words : tunnel lining, model experiment, steel rod layer

1. 目的

老朽化したトンネルコンクリート覆工の補修方法として、鋼板をトンネル内面に定着させる工法が採用されている^{1), 2)}。この場合に定着させる鋼板の厚さは、コンクリート覆工に比べてかなり薄く有利な手法となるが、補強されたトンネルの挙動が明確になっているとは言い難い。本実験ではその基礎的な挙動を把握する目的で鋼板のみで覆工を模擬し、鋼板の弾性範囲内での載荷を行った。地山と覆工との相互作用が把握可能な2次元載荷装置を製作し、覆工の曲げ剛性の違いによるトンネル周辺挙動への影響を調べた。

2. 載荷装置

(1) 装置の概要、特徴

載荷装置の概念図を図-1に、外観を写真-1に示す。装置は載荷フレームと上部載荷板、側壁からなり、それぞれスライドする構造になっている。寸法は奥行き100mm、上部載荷板の幅、側壁の高さは500mmであり、これらはロードセルを介して、ジャッキに接続されている。その内部に地山を模擬した鋼製の丸棒を積み重ねる。側壁は完全に固定する支持と、ジャッキのバルブを閉じることで、側壁変位に応じて反力が増加するばね的支持の両方が可能である。前者を固定支持、後者をばね支持と呼ぶ。

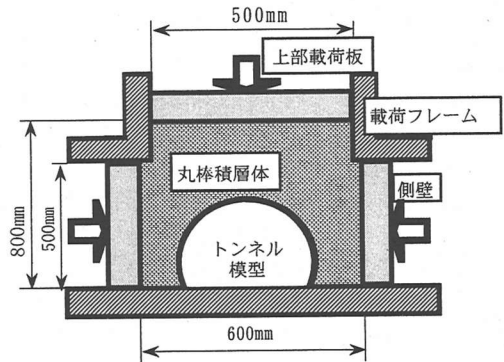


図-1 載荷概念図

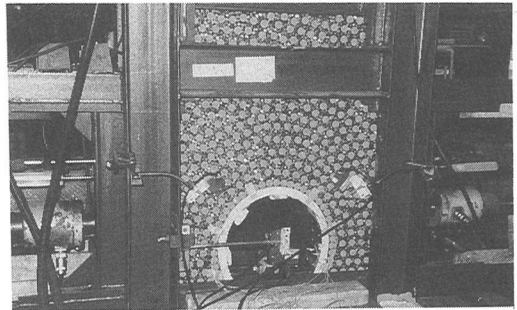


写真-1 載荷装置外観

(2) 2軸試験

トンネルを設置せずにこの載荷装置内部を鋼製の丸棒によって積層し、上部載荷板から荷重を加えることで、水平方向の圧力を測定する2軸試験を行った。側壁は固定支持とばね支持の両者で行った。丸棒の直径は9mmのもの、20mmのものであり、本数比で5:1に混合した。これは重量比で見ると1:1程度

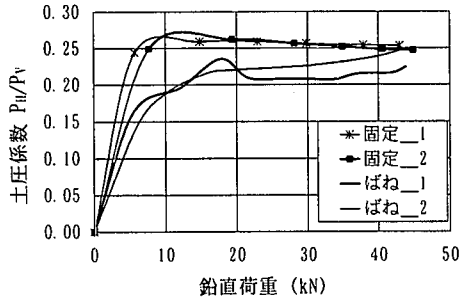


図-2 2軸試験結果

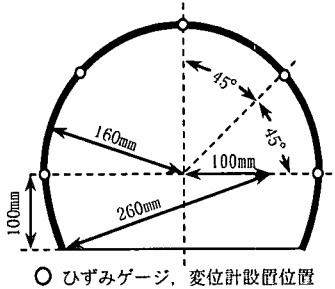


図-4 トンネル模型寸法

になる。丸棒の長さは、載荷装置と同じ100mmである。側壁固定支持の場合には丸棒の移動はほとんど無く、側壁にかかる荷重は静止土圧に相当する。一方側壁ばね支持の場合には、側壁が移動するため丸棒も移動して、破壊に相当する流動が発生した。その場合に側壁にかかる荷重は、側壁の移動の瞬間には主動土圧に相当し、その後増加しつりあう。これを主動的土圧と呼ぶ。丸棒の自重のみが作用している状態での鉛直荷重の初期値を0として載荷を開始すると、載荷直後に側壁に荷重が発生する。鉛直荷重が小さい間は自重の影響があるが、荷重増加とともに自重の影響が相対的に低下し、丸棒積層体の特性を求めることができる。各々2回載荷した2軸試験結果を図-2に示す。この結果より、主動的な土圧係数は0.22程度であることから、粘着力を無視して内部摩擦角を求めると約40°となる。なお土圧係数とは鉛直土圧 P_V に対する水平土圧 P_H の比を意味する。図-3に2軸試験時の上部載荷板の荷重と変位との関係を示した。側壁固定支持では、側壁の移動が拘束されているため、一次元圧縮に近いと考えられる。この荷重、変位をもとに丸棒積層体の疑似的な弾性係数を求めると、約500N/mm²となる。一方側壁ばね支持の場合では、6kN付近から側壁の移動が顕著になり丸棒積層体の流動が生じているが、単純に疑似的な弾性係数を求めると、45N/mm²程度となり、側壁固定支持とは大きく異なる。

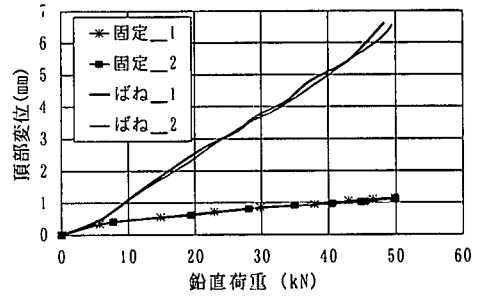


図-3 2軸試験荷重変位

表-1 模型の種類

模型番号	板厚 (mm)	曲げ剛性 (kN・cm ² /10cm)
NO. 1	1.6	72
NO. 2	2.3	213
NO. 3	3.2	574
NO. 4	4.5	1595
NO. 5	6.0	3780
NO. 6	9.0	12758

3. 模型載荷実験

(1) 載荷方法

載荷はインバート部を固定した状態で以下のような手順で行った。

(a) トンネル模型の設置

(b) 模型周辺の丸棒を積み上げる

(c) 側壁固定支持で上部から載荷、除荷の繰り返し

(d) 側壁ばね支持で上部から載荷、除荷の繰り返し
載荷時の繰り返しは4回行った。上部からの荷重は概ね2.5kN (2500N) 毎に、最大40kN返上させた。ただしそれ以下でも大きな変形が発生した場合にはそこで荷重増加を打ち切った。1回目は丸棒の締固めが十分ではなく、比較的大きな変位量を示したが、2回目以降は残留ひずみも小さく、ほぼ同じ履歴をたどった。

測定項目は、つぎのとおりである。

(a) 上部載荷板、側壁における、荷重、変位

(b) トンネル模型における内外面ひずみ、変位

ひずみ測定箇所および変位測定箇所は同一箇所である。図-4における、頂部(クラウン)、側部(スプリングライン)2箇所および頂部から45°のショルダー部2箇所、計5箇所である。

(2) トンネル模型

本実験ではトンネル覆工模型は、鋼板によって製

表-2 荷重を10kNから20kNに増加させた場合の結果一覧
(引張りひずみ: +, トンネル内面に引張りを生じる曲げモーメント: +)

模型番号	鋼板板厚 (mm)	側壁固定支持			側壁ばね支持		
		頂部内面ひずみ増分 (μ)	頂部曲げモーメント増分 ($\text{kN}\cdot\text{cm}$)	頂部変位増分 (mm)	頂部内面ひずみ増分 (μ)	頂部曲げモーメント増分 ($\text{kN}\cdot\text{cm}$)	頂部変位増分 (mm)
NO. 1	1.6	39	0.03	0.35	295	0.30	2.95
NO. 2	2.3	40	0.08	0.37	410	0.70	2.13
NO. 3	3.2	70	0.23	0.34	470	1.60	2.43
NO. 4	4.5	120	0.50	0.37	580	3.80	1.75
NO. 5	6.0	140	1.80	0.36	480	5.50	1.10
NO. 6	9.0	160	4.10	0.33	275	6.90	0.55

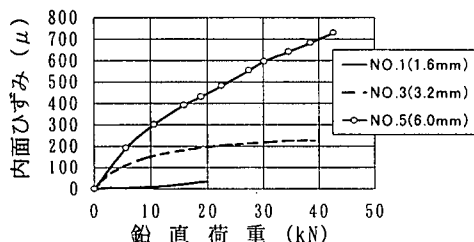


図-5 側壁固定支持の場合の頂部内面ひずみ
(引張りひずみ: +)

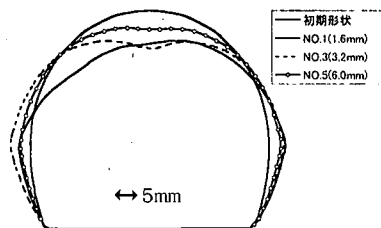


図-6 20kN載荷時の変形パターン
(側壁ばね支持)

作し、相似則を考慮した^{3), 4)}。縮尺を1/20程度としているが、実物と同一の材料を用いているため、応力は1:1に対応し、変位は縮尺に比例する。模型形状寸法は図-4に示すとおりである。表-1にトンネル模型の板厚および丸棒積層体の長さと同じ奥行き10cmを考慮した曲げ剛性を示す。

(3) 実験結果

いずれの載荷の場合も鋼板ひずみは弾性範囲内であった。上部からの荷重を10kNから20kNまで10kN増加させた場合の、トンネル模型頂部の内面のひずみ、曲げモーメント、変位を、側壁固定支持、側壁ばね支持各々について、表-2に示す。同じ板厚に対しては、側壁固定支持の場合が、側壁ばね支持の場合に比べて、いずれの値も小さくなる。また鋼板の板厚の増加とともに、発生するひずみ、モーメントは増加する傾向が見られる。

側壁を固定支持にして、鋼板板厚1.6, 3.2, 6.0mmの場合の、上部からの荷重増加に伴う頂部内面ひずみの変化を図-5に示す。1.6mm板厚の場合はかなり薄いため、上部からの載荷に対して変形が非対称になる挙動が見られ、荷重も20kN程度までしか上昇させなかった。図-6に側壁ばね支持で上部からの荷重が20kN時の変形パターンを示す。鋼板板厚1.6mmのNO.1模型では頂部ひずみはあまり発生しないにもかかわらず、頂部以外の変形は比較的大きい。頂部での変位量は他の板厚の鋼板と大きな差は

出ていないが、変形が非対称になっている。側壁固定の場合板厚が大きくなるにつれ頂部内面発生ひずみ、頂部曲げモーメントも大きくなる。また図-6からも明らかのように、変形は頂部(クラウン)と側部(スプリングライン)で大きく、頂部から45°のショルダー部には板厚が大きくなると、ほとんど発生しない。図-7は上部荷重を10kNから20kNに増加させた場合の、奥行き10cmを考慮した頂部曲げモーメント増分を曲げ剛性との関係で示した。この図より曲げ剛性と発生曲げモーメントの間には相関があることがわかる。図-8と同様に横軸に板厚、縦軸に頂部変位をプロットしたものを示す。側壁固定支持の場合頂部変位量は、板厚によらずほぼ一定の値を示しているが、側壁ばね支持の場合には板厚が小さいと大きな値となっている。側壁固定支持では丸棒積層体の特徴として周辺地山が固くなるため、上部からの荷重の多くを周辺地山が負担しているためと考えられる。一方ばね支持では覆工に大きな荷重が作用すると考えられる。

4. 結語

本研究では、トンネルと地山との相互作用が考慮可能な模型実験を目的に、鋼製の丸棒積層体を用いた載荷装置を製作した。この装置を用いて鋼板によって製作したトンネル覆工模型の載荷実験を行っ

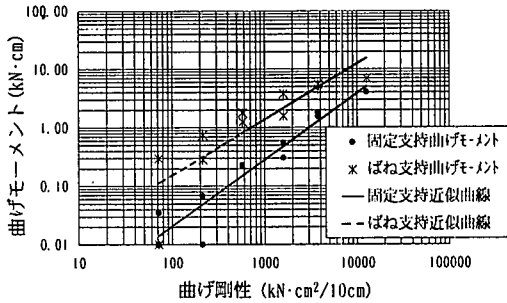


図-7 曲げ剛性と頂部発生曲げモーメント増分
(10kNから20kNへ荷重増加)

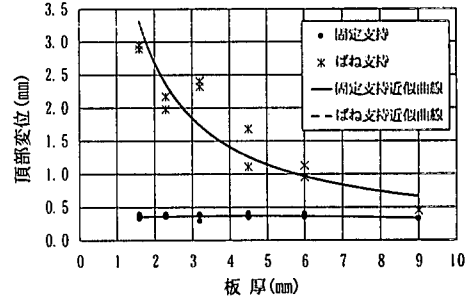


図-8 鋼板厚と頂部変位増分
(10kNから20kNへ荷重増加)

た。

載荷装置に関して、得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 鋼製の丸棒積層体を地盤モデルとして用い、地山とトンネル覆工との相互作用を考慮した載荷が可能になった。
- 2) 側壁条件を変えることで、静止土圧、主動的な土圧を発生させることができるようになった。それらによって、地盤の剛性の違いを考慮することが可能となった。

またこの装置を用いた実験結果より、以下のような結果が得られた。

- 3) 地山が良好な場合、曲げ剛性の高い覆工には大きなひずみ、曲げモーメントが発生する可能性がある。これは本来地山自体が負担することが可能な荷重を、覆工が負担しているためと考えられる。したがってこのような地山に対しては比較的柔な覆工によって荷重を地山に負担させることが適当といえる。
- 4) 一方、地山の状態が良くない場合には、柔な覆工を用いると、変形が大きくなり破壊する可能性がある。このような場合にはある程度曲げ剛性を有する覆工を用いる必要がある。

本実験は、損傷を受けた既存トンネルの内面に鋼板を定着させる工法の基礎的な挙動を把握することが目的であった。亀裂などによる損傷を受けたコンクリート覆工は、その平均的な曲げ剛性は低下して

おり、本実験の曲げ剛性の低い覆工に相当すると考えられる。そのような場合の対策として、剛性の高いもので補強すると、地山が比較的良好ならば、さらに大きな曲げモーメントが発生するような可能性もある。一方本来の剛性が不足して損傷を受けた場合には、剛性を上げることも必要となる。特に変形が大きくなるような場合には、地山自体も良好とは言えず、そのような対策が必要と考えられる。

今後コンクリート覆工に鋼板を定着させた場合の検討を、模型実験および数値計算を通して、適切な設計ができるように検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 日経コンストラクション編：補修・補強の実践手法、日経BP社、1996年7月。
- 2) 鉄道総合研究所：トンネル補強・補修マニュアル、1990年10月。
- 3) 朝倉俊弘、安東豊弘、小俣富士夫、若菜和之、松浦章夫：欠陥を有するトンネル覆工の変形挙動と内面補強工の効果、土木学会論文集、No. 493/111-27, pp. 89-98, 1994。
- 4) 朝倉俊弘、小島芳之、安東豊弘、佐藤豊、松浦章夫：トンネル覆工の力学挙動に関する基礎的研究、土木学会論文集、No. 493/111-27, pp. 79-88, 1994。

(1998. 6. 15受付)

AN EXPERIMENT OF TUNNEL LOADING IN STEEL ROD LAYER

Tadashi TERAMOTO, Takeshi KOIKE and Takeshi TAMURA

Tunnel loading experiment was executed to investigate the effect of lining rigidity. A loading device was made to observe the interaction between tunnel lining and the surrounding ground. The surrounding ground is modelled by steel rod layer. The vertical load is supported by both lining and surrounding ground. Large bending moment is arised in case of rigid lining under the stiff ground condition. In such a case the flexible lining is preferable to utilize the surrounding ground strength.