

内面鋼板補強を行ったトンネル覆工の挙動解析

The structural analysis of damaged tunnel lining reinforced by steel plate

寺本 正¹⁾、小池 武²⁾、田村 武³⁾

Tadashi TERAMOTO, Takeshi KOIKE, Takeshi TAMURA

The structural analysis was carried out to investigate the behavior of damaged tunnel concrete lining reinforced by steel plate. Steel plate is thin compared with existing concrete lining, then the effect of such plate is not yet made clear. Computer analysis by finite element method (FEM) was executed including surrounding ground, so that the interaction between tunnel lining and ground can be considered.

Assumed damaged concrete lining types were hinged condition and lack of lining at tunnel top section. Under such damaged conditions, effect of steel plate thickness was studied. As a result, thin steel plate is sufficient under the condition of tying steel plate with damaged concrete lining.

Key Words: tunnel, damaged concrete lining, steel plate reinforcement, FEM

1. はじめに

供用開始後長期間が経過し、トンネルの覆工コンクリートの老朽化対策が急務となってきた。対策として、吹き付けコンクリートや、炭素繊維をコンクリート面に貼るもの、新たにコンクリートを巻き立てる等各種の工法がある。薄い鋼板をコンクリート内面に設置する工法は、トンネル断面の減少が少なく、断面に余裕の無いトンネルでは有利な工法となる。その際、施工性、経済性を考慮して、可能な限り薄い鋼板を使う必要があり、その挙動を確認しておくことが不可欠である。本報告ではこのような点について、解析面からの検討を行ったものである。

供用中のトンネル覆工等が損傷を受ける原因として、覆工背面の空洞、巻厚不足等の構造的な欠陥や、経年変化に伴う覆工自体の劣化、また地下水や地山の緩みによる地山自体の劣化等が考えられる。このような状況下では、応力やひずみの再配分が行われ、覆工に作用する荷重が変化し、覆工や地山の破壊を招くことになる。このような状態においても、覆工等は構造的に安全であり、また地山は破壊に至らないことが要求される。地山の破壊を防ぐために、覆工は地山に対し必要な拘束圧力を与えると同時に、変形量も許容値以下に収めなければならない。これは覆工と地山に対しては、相反する要求である。つまり十分な拘束圧を作らせて変形を小さくしようとすると、覆工に作用する荷重は増加し、覆工に発生する応力も大きくなる。このように地山と覆工とは相互に影響を及ぼし合うと考えられ、本報告ではこのような相互作用を考慮した解析を行った。

補強された覆工の挙動に関する研究が、計算や実験で行われているが、その際覆工に作用する荷重を既定値として与えるものが多かった。その場合に、覆工側方の支持は、地山の弾性係数などから、ばねとして与えるものが多い^{1), 2)}。一方覆工の曲げ剛性の影響が、覆工が地山から受ける力や、発生応力に影響を与える

1) 正会員 工学修士 川崎製鉄(株) エネルギー水道事業部

2) 正会員 工学博士 川崎製鉄(株) 建材センター鋼構造研究所

3) 正会員 工学博士 京都大学工学研究科

ことも考えられ、このような効果を考慮した覆工の解析も行われている³⁾。筆者らは、覆工と地山との相互作用を考慮した模型実験を行い、曲げ剛性の低い柔な覆工に発生する力が小さいことを確認し、地山条件によっては薄い覆工の方が合理的であることを示した^{4), 5)}。本報告では実際の損傷覆工を想定し、鋼板による補強の効果についての検討結果を示す。

2. 解析概要

トンネル覆工を含んだ近傍の周辺地山を考える。トンネル構築後周辺地山や覆工に変化が無ければ、付加的な荷重や変形は発生しないため、トンネル構造は安定する。しかし長期間の供用中には、緩みによる周辺地山の強度低下、覆工自体の劣化等の変化が生じると考えられる。そのような場合に周辺地山を含めた覆工には、応力、ひずみの再配分が行われる。したがって厳密に言えば、この釣り合い状態から、強度低下や覆工劣化をたどって解析しなければならないが、本報告では鋼板補強をされたコンクリート覆工の基本的な挙動の把握が目的であるため、簡略化したモデルを採用した。つまり、コンクリート覆工設置時点で、この種の劣化が発生し、即座に鋼板補強を行うという簡略モデルで解析を行った。図-1に解析の流れを示す。初期状態として掘削前の地山を想定し、鉛直応力は土被り荷重相当を考慮した。その状態から、応力解放率 50%で掘削を行い、コンクリート覆工、補強鋼板を設置後、すべての応力を解放する場合を想定した。

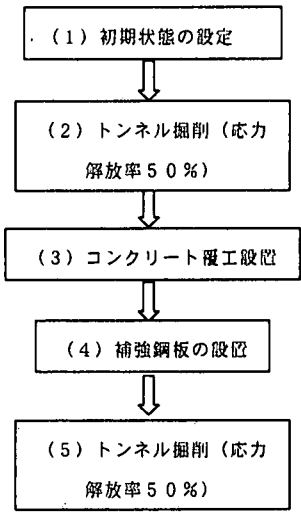


図-1 解析の流れ

3. 計算モデル

3.1 計算条件

トンネルのモデルとして、2車線の道路トンネルに相当する図-2に示すような覆工と地山領域を考慮する。境界条件は荷重で与え、変形が生じて、境界の荷重状態には変化が無いとした。簡略化のためこの領域の自重は無視し、上方から鉛直荷重を作用させた。側方からの荷重は、鉛直荷重の0.3倍の値とした。トンネル構築前にこれらの荷重を作用させ、その後トンネル断面を掘削する解析を行った。想定した健全な覆工の寸法、形状を図-3に示す。

地山は、弾性体とし、弾性係数を次のように設定した。

地山の弾性係数=10 kN/cm²

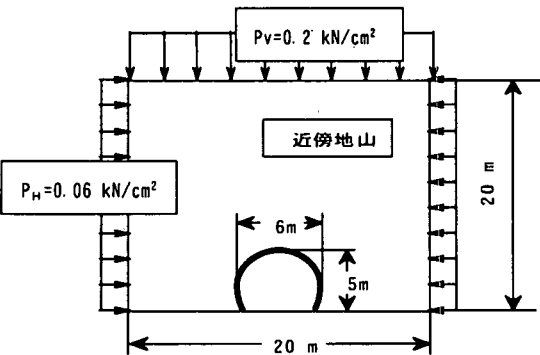


図-2 想定図

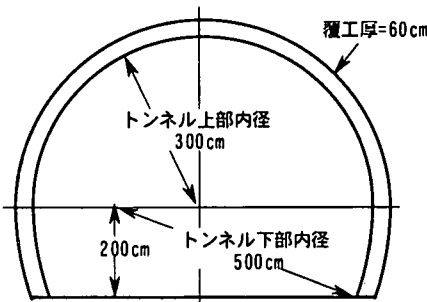


図-3 覆工図

境界における荷重条件は以下の通りである。

$$\text{鉛直荷重 } P_v = 0.2 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{水平荷重 } P_H = 0.06 \text{ kN/cm}^2$$

地山は、二次元ひずみ要素を用い、コンクリート覆工及び補強鋼板は、はりでモデル化し、有限要素法によって相互作用を考慮した。またコンクリート覆工と地山間および鋼板とコンクリート覆工間は、垂直方向の力のみ伝達が行われ、接線方向には力の伝達が行われない滑り要素を用いた。なおはりの境界条件として、インバート部でヒンジ拘束とした。

検討は以下のような場合を想定して行った。損傷ケース等の一覧を表－１に示す。

１）ケース１（健全なコンクリート覆工で鋼板補強無し）

健全な覆工を考慮して行った。したがってこの場合には鋼板補強は行わない。

２）ケース２（コンクリート覆工頂部ヒンジ）

コンクリート覆工の頂部に亀裂が発生し、その部分の曲げモーメントの伝達が行われない場合を想定する。補強鋼板厚さは 5、10、15、20mm とする。鋼板厚さ 10mm は現在用いられている補強鋼板厚さの下限に近い値である。この鋼板で定着点が無く単にトンネル内面に添えたもの、6 点で鋼板とコンクリートとを定着したもの、20 点で定着したものの 3 通りを考慮する。図－４に定着位置を示す。コンクリート覆工と補強鋼板との間は、滑り要素であり、定着点がある場合には、その箇所を滑りを拘束するモデルとした。

３）ケース３（コンクリート覆工頂部欠損）

コンクリート覆工の頂部が欠損している場合を想定する。この状態では、頂部ヒンジ状態と異なり、コンクリート覆工の欠損区間での力の伝達が行われないため、鋼板の補強が無いと不安定となる。

４）ケース４（コンクリート覆工頂部欠損で部分的に鋼板補強）

ケース３と同様に、コンクリート頂部が欠損状態で、上半部分や 1/3 部分のみを補強した場合の検討を行う。定着箇所は全周補強の 20 点定着位置に対応する。鋼板補強がトンネル上半部分であって、定着点数が 16 点の場合と、鋼板補強がトンネル上部約 1/3 部分であり、定着点数が 10 点の場合である。部分鋼板補強状態では、定着がされていない限り、補強鋼板は不安定状態となり、地山から受ける荷重によって下方に落下する。

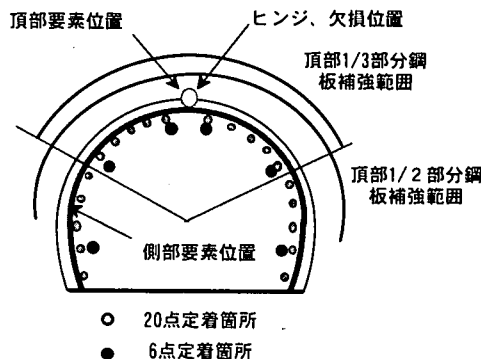
３．２ 計算結果

以下に計算結果を示す。覆工補強の評価項目として、コンクリート覆工の曲げモーメント、軸力、補強鋼板の曲げモーメント、軸力、応力、頂部変位に着目した。

図－５に、コンクリート覆工に発生する最大曲げモーメントを示す。頂部ヒンジ状態は、静定構造である

表－１ 解析ケース一覧

損傷ケース	鋼板定着区間	定着点数	補強鋼板厚さ
ケース１（健全）	鋼板補強無し		
ケース２ （コンクリート覆工 頂部ヒンジ）	全周	定着無し	5, 10, 15, 20 mm 鋼板
		6点	
		20点	
ケース３ （コンクリート覆工 頂部欠損）		定着無し	
		6点	
		20点	
ケース４ （コンクリート覆工 頂部欠損、部分補強）	頂部 1/2 周	16点	
	頂部 1/3 周	10点	



図－４ 損傷、鋼板定着の位置

ため、補強鋼板が無い場合でも安定である。ケース 1（健全な覆工）の場合は、 $-1240 \text{ kN}\cdot\text{cm}/\text{cm}$ （負の値はトンネル内面に圧縮力が作用する状態を表す）であり、ケース 2（頂部ヒンジ）で、補強無しの場合は、 $-1347 \text{ kN}\cdot\text{cm}/\text{cm}$ となり、定着が無い場合の値にほぼ等しい。なおこれらの表示は、奥行き 1 cm 当たりの値である。定着点の数の増加とともに、最大発生曲げモーメントは減少していく。鋼板厚さの影響は定着点の数が多い、つまり密に定着されている場合には効果が顕著である。ケース 3（頂部欠損）の場合も同じような傾向であるが、頂部ヒンジの場合に比べ値は大きい。頂部欠損状態では、覆工は不安定状態であり、鋼板補強無しでは自立しない。またケース 4 のように、全周に補強を行わない部分補強の場合には、大きな値となる。これは鋼板の端点では、鋼板との合成効果が無く、コンクリート覆工のみで耐えなければならないためである。

図-6 にコンクリート覆工側部での軸力を示す。ケース 1（健全な覆工）の場合は、 $-28.7 \text{ kN}/\text{cm}$ （負の値は圧縮を表す）であり、またケース 2（頂部ヒンジ）で補強無しの場合には、 $-27.8 \text{ kN}/\text{cm}$ である。頂部ヒンジ、欠損の場合の双方とも、定着箇所の影響で、部分的に大きな軸力が発生することがある。鋼板部分補強のケース 4 ではこの部分に鋼板が無く、全軸力をコンクリート覆工で負担するため、大きな値となる。補強鋼板厚さが増加すると、鋼板が圧縮力を負担する影響で、コンクリート部の軸力は減少する。

図-7 に鋼板頂部曲げモーメント、図-8 に鋼板頂部の軸力を示す。ケース 2（頂部ヒンジ）で定着無しの場合には、鋼板とコンクリートが一体化していないため、小さな軸力となる。水平方向の軸力はヒンジを介して、コンクリート覆工が負担しているためである。定着がされていると、鋼板とコンクリートが一体化して、鋼板には、頂部の曲げによる引張り力が作用する。一方、ケース 3（頂部欠損）では、頂部のコンクリートが無く、側方からの力はすべて鋼板で負担しなければならないため、大きな圧縮力が鋼板に作用する。圧縮力の値は、鋼板厚さの増加とともに増加する。

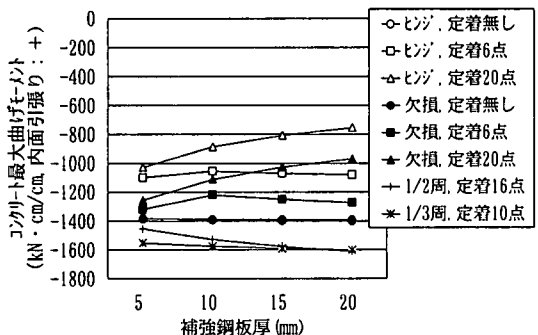


図-5 鋼板補強した場合のコンクリート覆工最大曲げモーメント

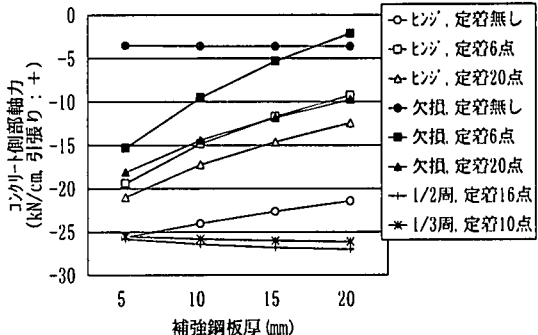


図-6 鋼板補強した場合のコンクリート覆工側部軸力

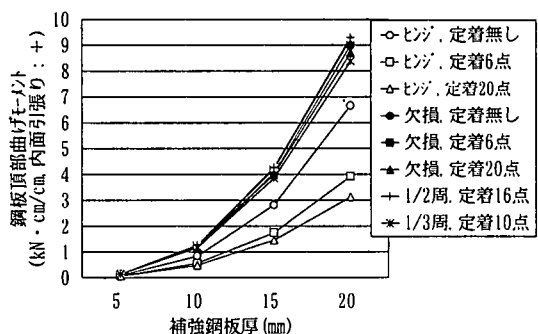


図-7 鋼板補強した場合の補強鋼板頂部曲げモーメント

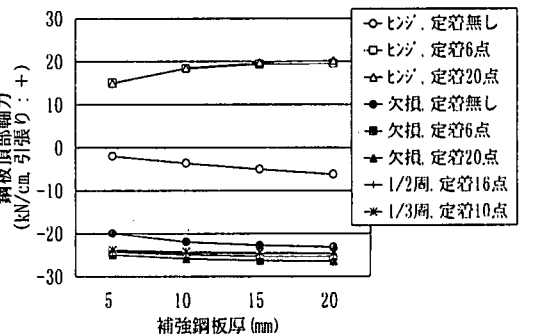


図-8 鋼板補強した場合の補強鋼板頂部軸力

曲げモーメントは、鋼板板厚とともに、増加する。頂部ヒンジ状態で、コンクリートと鋼板が一体化するに連れ、鋼板は曲げ変形から、合成構造としての引張り変形主体に変化していく。

図-9に鋼板頂部の外面応力を示す。これは軸力と曲げモーメントから算出したものである。軸力から定着モデルではヒンジタイプで引張り、欠損モデルでは圧縮となっており、軸力の影響が大きい。

図-10に鋼板側部の外面応力を示す。鋼板板厚の増加とともに、応力は減少する。

図-11にトンネル頂部変位を示す。コンクリート覆工を行わないで、地山を自立させた場合には、変位は下方を負として、-15.2cmとなり、ケース1（健全な覆工）では、-8.5cm、ケース2（頂部ヒンジ）で補強無しの場合は-9.6cmとなる。ヒンジ状態で定着を行うと、計算上では健全なコンクリート覆工の変位より小さくなる。つまりヒンジ状態となっても、鋼板補強で健全なコンクリートの性能を保っていると考えられる。定着点の多い方が、また鋼板厚さが厚い方が変位は小さくなる。ただ鋼板の厚さを増加させても、それに見合った効果があるとは言えない。

図-12に覆工頂部直上の地山鉛直応力を示す。ケース1（健全な覆工）では圧縮応力を負として、-0.107 kN/cm²、ケース2（頂部ヒンジ）で補強無しの場合は、-0.084 kN/cm²である。鋼板厚さが増加して、覆工の曲げ剛性が高くなると、作用する荷重も増加する。そのことから地山の強度が期待できる場合には、覆工の剛性を上げることは得策とはいえない。

3.3 計算結果の考察

本報告では、コンクリートの損傷として、頂部がヒンジ状態となったものと欠損状態のものとを考慮した。実際の覆工に損傷があるとしても、完全にコンクリートの強度が期待できない場合は少ないと考えられる。頂部コンクリートがヒンジ状になった場合には、地山からの荷重による頂部曲げモーメントの負担は期待で

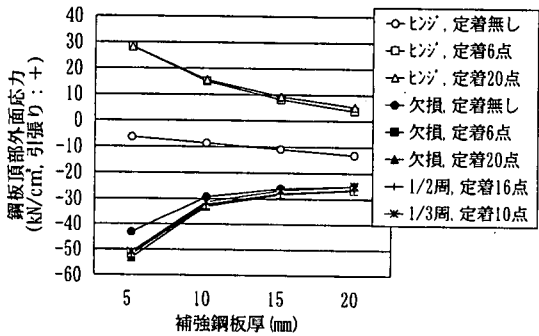


図-9 鋼板補強した場合の鋼板頂部外面応力

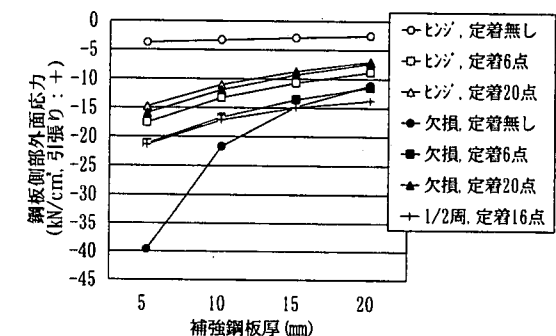


図-10 鋼板補強した場合の鋼板側部外面応力

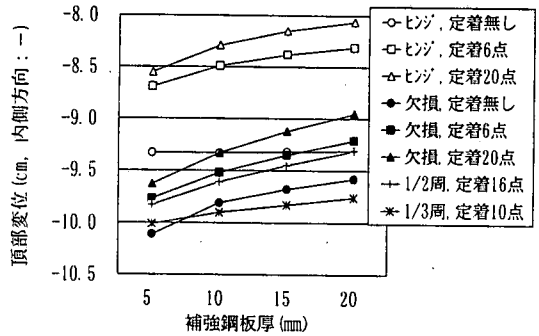


図-11 鋼板補強した場合のトンネル頂部変位

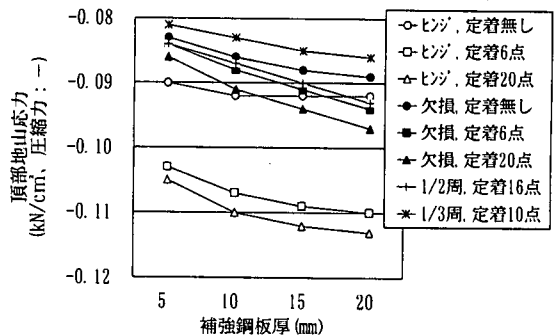


図-12 鋼板補強した場合の頂部地山鉛直応力

きない。この場合に、鋼板を定着させることで、覆工は頂部曲げモーメントを負担できる構造に変化し、その結果鋼板には引張り力が作用し、合成構造として効果的といえる。

一方頂部が欠損状態や、ヒンジ状態でも定着がなされていない場合には、頂部鋼板に圧縮力が作用し、薄い鋼板では不安定になる可能性がある。定着点の数を増やすことで、コンクリート覆工に発生する曲げモーメントや軸力を低減させることができるが、鋼板厚さを増加させても、増加に見合った効果は期待できないこともある。したがってむやみに補強鋼板厚さを増加させることは、経済的とは言えない。また覆工の剛性を上げると、地山からの作用荷重が増加するため、地山の破壊を防ぐ拘束圧を与えるような場合を除けば、薄い鋼板が経済的と言える。

また鋼板補強範囲を、トンネル全周にわたって設置しない場合には、その端点のコンクリート覆工に大きな曲げモーメントが発生し、鋼板補強したことによって、弱点が発生することが考えられる。特に鋼板板厚が増すとその端点での曲げ剛性の差が大きくなって、大きな曲げモーメントがコンクリート部分に発生する。

4. 結語

本報告では、損傷を受けたトンネル覆工に、鋼板を定着させる補強工法の挙動を、有限要素法を用いて検討した。コンクリート覆工が健全であるならば、通常の荷重状態では十分余裕があると考えられる。ところが何らかの原因で覆工が損傷を受けたような場合には、覆工、地山双方とも機能が低下する。そのような場合に、鋼板をコンクリート覆工内面に定着補強することで、機能回復が可能である。特に鋼板は高強度のため、合成構造として、有効に働くと考えられる。本報告の解析では、荷重、損傷条件をかなり簡略化して扱っており、必ずしも実トンネルに合致しない面もあるが、基本的な挙動をつかむことができた。

今回行なった検討から得られた結果を以下に示す。

鋼板の厚さに関しては、厚い方が強いことは確かであるが、厚くすることによってそれに見合った効果があるとは言えない。薄い鋼板でも、トンネル内面全周に設置することの方が、効果的といえる。

本報告の頂部ヒンジ状態のような損傷では、十分な耐力がコンクリート覆工に残されており、それを有効に使うことで損傷の進行を食い止めることも可能である。また頂部欠損のような場合には、補強鋼板に圧縮力が作用することが考えられるため、欠損部分にはコンクリートを充填し、補強鋼板の効果を向上させるといった、総合的な補修対策も重要と考えられる。

トンネル損傷と地山の条件の組み合わせは、千差万別であり、緩みによって地山の弾性係数が低下するような場合も含め、今後条件を変化させた解析が必要と思われる。

参考文献

- [1] 朝倉俊弘 他：変状トンネル覆工対策工の効果に関する比較検討、トンネル工学研究論文・報告書第6巻、1996年11月。
- [2] 中田雅博 他：変状トンネルの覆工補強設計に関する研究、トンネル工学研究論文・報告書第6巻、1996年11月。
- [3] 木村定雄 他：トンネル覆工に作用する土圧と覆工変形の相互作用に関する模型実験、トンネル工学研究論文・報告書第4巻、1994年11月。
- [4] 寺本正 他：丸棒積層体を使用したトンネル模型載荷試験、第32回地盤工学研究発表会、1997年7月。
- [5] 寺本正 他：鋼板で補強したトンネル覆工と周辺地山との相互作用に関する模型実験、トンネル工学研究論文・報告書第8巻、1998年11月。