

膨張性地山におけるトンネル覆工の ひび割れ発生状況に関する考察

A Study on Cracks of Tunnel Concrete Lining in Squeezing Ground

岡崎 準¹⁾・小川 淳²⁾・田村 武³⁾

Jun OKAZAKI, Atsushi OGAWA, Takeshi TAMURA

Some number of cases where concrete pieces of tunnel lining exfoliate are paid attention to as a social problem. Repair methods for them have been studied and experienced. However it is thought to contribute to the future durability and safety to minimize damage of cracks as small as possible in a construction stage before starting operation. In the squeezing ground in particular, the damage on lining is quite remarkable compared with the normal ground.

This paper aims at suggesting a method of design of lining by the following analysis. Firstly relationship between deformation of ground, stress within lining and damage of cracks on the basis of investigation on lining in squeezing ground is examined and secondly the multivariate analysis is done which makes possible to predict damage of cracks before placing the lining concrete.

Key Words: crack, lining, squeezing ground, multivariate analysis

1. はじめに

最近、鉄道などのトンネルにおいて、年数が経過した覆工コンクリートが老朽化やその他様々な要因により劣化し、コンクリート片が剥落するといった事故がいくつか報告されており¹⁾、社会的にも大きく取り上げられている。このような剥落を防止するために、トンネル覆工の変状箇所の補修方法について実験、研究が重ねられてきている^{2) 3)}。一方、供用を開始する前の建設段階において、ひび割れの発生を極力少なくするなどトンネルの劣化が進行しないように対処しておくことが将来的な耐久性・安全性に結びつくと考ええる。特に膨張性地山においては、一般地山と比較して覆工のひび割れの発生が顕著であり、長期的に残存する土圧が覆工に作用する可能性があるため、完成時のひび割れの発生を最小限にすることが重要である。

本論文では、東北新幹線岩手一戸トンネル 25.8km のうち、膨張性を有する区間 4km 間の覆工コンクリートのひび割れ調査を行い、その結果から地山の変形、覆工内の応力状態とひび割れの発生との関係を把握するとともに、多変量解析からひび割れ発生に関する予測式を求めた。また、これらの結果を述べ、覆工打設前のひび割れの発生予測による、安全な覆工コンクリートの設計、施工法を提案する。

1) フェロー 日本鉄道建設公団

2) 正会員 日本鉄道建設公団 盛岡支社

3) フェロー 京都大学 工学研究科 社会基盤工学専攻

2. 覆工ひび割れの発生要因

トンネル覆工コンクリートのひび割れの発生要因として、表-1の項目が挙げられており⁴⁾、これらの項目は土圧などの外力による曲げ引張応力の卓越するもの、温度降下による応力、乾燥収縮による応力などのコンクリート自身の内的要因によるもの、材料の欠陥、施工不良などの要因に大別される。一般に覆工コンクリートは、トンネル軸方向、周方向が覆工巻厚に対して延長が長く、吹付けコンクリートと接しているため、コンクリートの温度降下や乾燥による収縮挙動が吹付けコンクリートにより拘束されることからひび割れが生じやすいことが挙げられ、これらの環境的側面がその発生要因となることが多い。また、膨張性地山において変位が収束する前に覆工を施工した場合には、覆工打設後に二次的な荷重が外力として作用することが研究されており^{5) 6) 7)}、その結果、ひび割れが生じることがある。ひび割れはこれらの要因が単独で、または複合して発生していると考えられる。

表-1 覆工コンクリートのひび割れ発生要因

大分類	小分類
外力	覆工施工後の外力作用
	地山支持力不足
	背面地下水の凍結
	水位上昇による外水圧
材料	異常凝結・水和熱大
	骨材不良
環境	温度応力
	乾燥収縮
施工	施工不良

3. ひび割れの位置付け

ひび割れの発生要因は前節で述べたとおり様々なものが考えられるが、その要因を特定することは実際の事象においては非常に困難である。しかしながら、ひび割れの主な要因である温度応力・乾燥収縮は、温度変化が小さい比較的長い延長のトンネル内部においては耐力上問題となるケースは少なく、そのひび割れの規模も大きいものではない。そのため、本論文では特徴的なひび割れ発生要因である地山の膨張性に伴う外力の影響に特に注目し、検討を行うこととした。

膨張性地山では変位の収束が遅く、変形が継続している状態で覆工を打設すると変形が拘束され、覆工に荷重が作用し（以降、短期残留荷重）、ひび割れが生じる可能性がある。一方、後述するように、変位がほぼ収束して

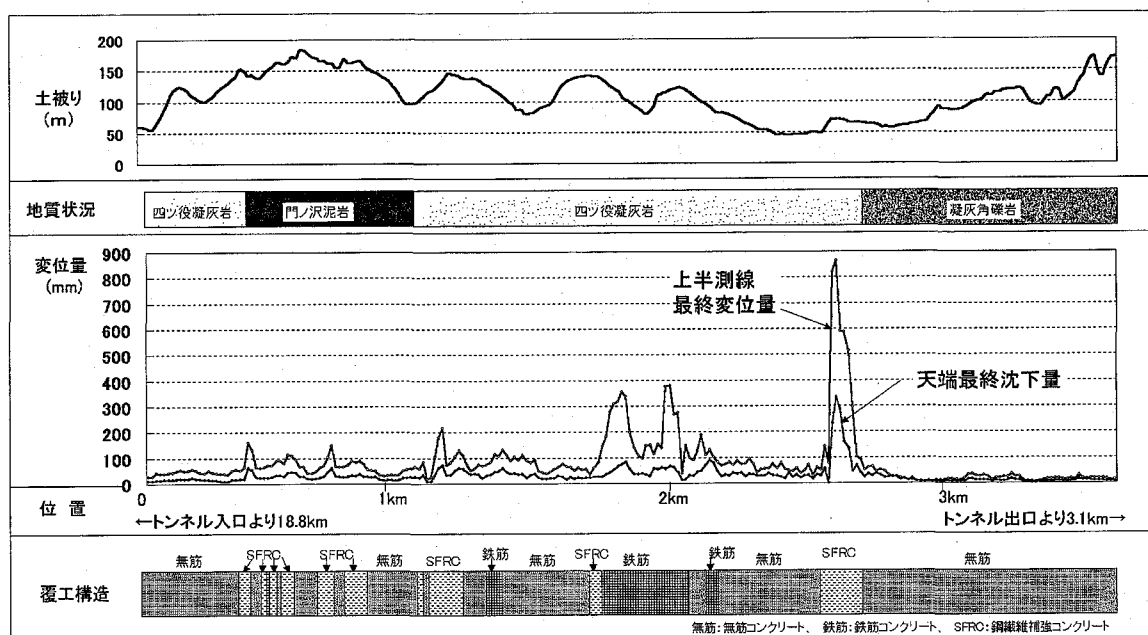


図-1 対象区間概要図

から覆工を打設しているにもかかわらず、ひび割れが生じている事例が見られた。この現象の要因として、ここでは覆工を打設して長時間経過後に再度土圧が増加している（以降、長期残留荷重）と仮定し、特にこの荷重が掘削により生じた塑性化領域の大きさに依存していると考えた。本論文では、未収束変位に伴う短期残留荷重を表すものを覆工打設直前の変位速度とみなし、長時間経過後の長期残留荷重を表現するものを最終変位量（計

測開始～覆工打設までの変位量）やインバート閉合後変位量と考え、分析を行った。

4. ひび割れ発生の特性分析

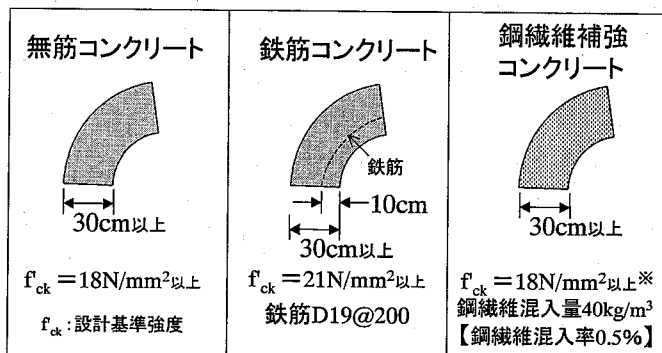
1) 対象トンネルの概要と覆工構造

分析対象とするのは東北新幹線岩手一戸トンネル 25.8km のうちの一部の膨張性を示す新第三紀の凝灰岩類が分布する約 4km の区間である。この区間では保守上の観点から覆工打設後、ひび割れ状況の詳細な調査を継続して行っている。対象区間の土盛り、地質、変位状況を図-1に示す。

覆工構造は、覆工厚 30cm の無筋コンクリート構造を基本とするが、膨圧による変形が大きい区間では鉄筋コンクリート構造、鋼繊維補強コンクリート構造により補強を行っている。鉄筋コンクリート構造はトンネル内空側に単鉄筋により補強する構造である（図-2）。

2) 荷重状態とひび割れ発生の関係

ここでは覆工に生じるひび割れが、外力の影響により発生したかどうかを検証する。当該トンネルにおいて覆工応力測定を行った4ヶ所（鉄筋コンクリート2断面、鋼繊維補強コンクリート2断面）の内空側縁応力と実際のひび割れの発生状況を比較したものを図-3に示す。ここに、応力測定の初期値は覆工打設翌日に設定し、図に示した応力値は打設後約6ヶ月後の測定値（最終計測値）



※圧縮試験結果では33N/mm²が得られている。

図-2 覆工構造概略図

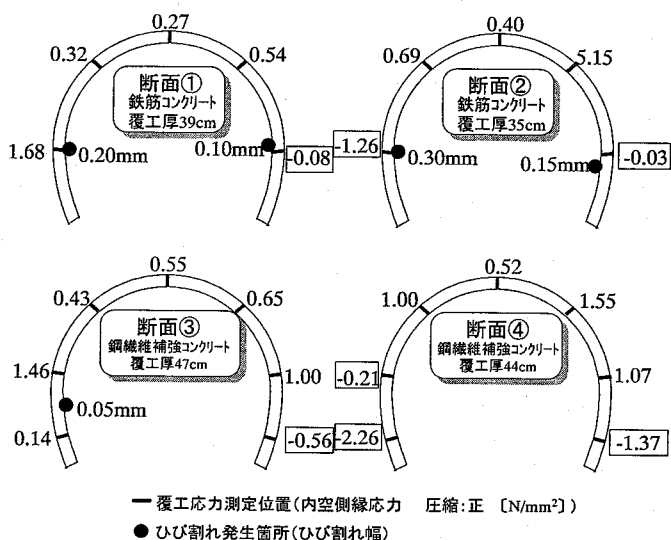


図-3 覆工応力測定結果とひび割れ発生状況

表-2 骨組解析条件

覆工構造	設計基準強度 $f'_{ck}=18\text{N/mm}^2$ (無筋コンクリート覆工厚30cm)
地盤条件	変形係数 $E=500\text{MPa}$ (地盤反力を地盤ばねでモデル化)
荷重条件	鉛直荷重 $P_V=100\text{kN/m}^2$, 側圧係数 $K_0=1.2$
支承条件	脚部X, Y方向固定, 回転自由

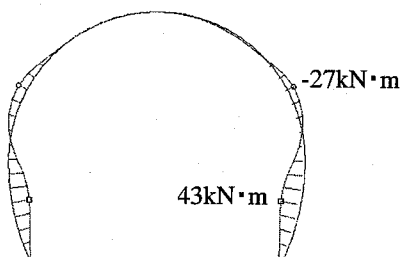


図-4 曲げモーメント図

となっている。また、応力はコンクリート内部にコンクリート有効応力計を埋め込み、直接計測している。さらに、覆工打設～ひび割れ測定の間は断面①、②は10年、断面③は6年、断面④は7年である。この結果、引張応力が発生する位置は側壁付近に集中しており、断面①、②ではその位置の近傍でひび割れが発生している。この引張応力発生箇所の状況は、計測地点と類似の条件（表-2）のもとで行った骨組み解析による曲げモーメントの分布（図-4）とほぼ同様の傾向を示している。この解析においては、荷重条件は等分布荷重とし、支承条件はインバートのストラットとしての拘束効果のみを最大限考慮するものと仮定した。断面③、④では、引張応力が発生している付近で、ひび割れが発生した箇所が見られないが、これは鋼繊維補強コンクリートのひび割れ抑制効果によるものと考えられる。

以上より、計測における引張応力の発生箇所、実際のひび割れ発生位置および骨組み解析による曲げの卓越する位置が整合しており、外力作用の影響すなわち膨張圧の影響により覆工内面に引張応力が生じ、ひび割れが発生している可能性が高いと考えられる。

なお、対象区間におけるひび割れは、未貫通であり、せん断ひび割れ固有の食い違いの現象は起こっていないため、曲げ引張応力によるひび割れと判断している。

3) 膨張性について

事前調査において、トンネルの膨張性を予測するものとして様々な指標が提案されている^{8) 9) 10)}。その中の代表的な指標として地山強度比¹¹⁾が挙げられ、土木学会トンネル標準示方書¹²⁾によると地山強度比6以下を「地圧が大きいと推定可」としている。当該トンネルでの地山強度比と上半測線の最終変位量との関係を図-5に示す。地山強度比が小さくなるにつれて変位量が大きくなる傾向があり、特に地山強度比が3未満では、一部の区間では200mmを超える大きな変位量が発生している。以上のことから本論文では、土圧が大きい（膨張性が大きい）区間を対象とし、地山強度比6以下の区間に限定して分析を行う。

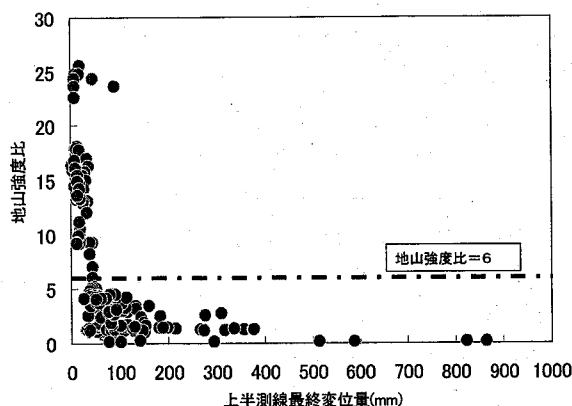


図-5 地山強度比と上半測線最終変位量の関係

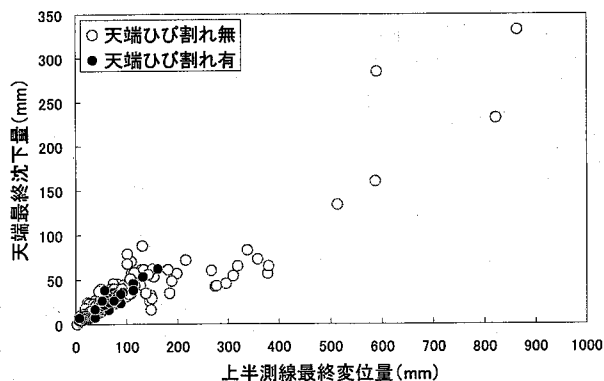


図-6 天端最終沈下量、上半測線最終変位量と天端ひび割れ発生との関係

4) ひび割れ発生定義

本分析におけるひび割れ発生の定義について述べる。前述のように本論文で扱うひび割れは乾燥収縮などの影響ではないと仮定したので、ある程度連続した延長で発生しているものという観点から幅0.2mm以上とする。また、対象とするひび割れは地山荷重が覆工に負荷して発生したものとし、トンネル横断方向のひび割れは考慮せず、トンネル縦断方向のひび割れのみ限定し、その角度は軸方向から45度以内のものを扱うこととした。また、天端付近のひび割れ発生状況について変位量との関係（図-6）では、天端沈下量、内空変位量ともにひび割れ発生とは明確な関係を示

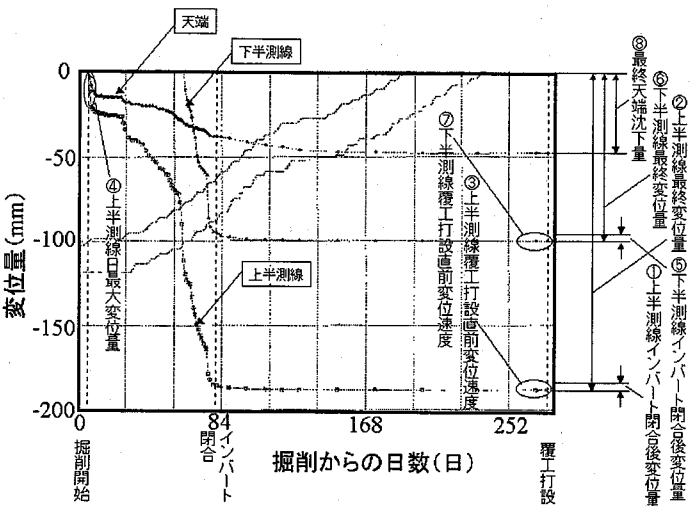
さない。一般に天端ひび割れは側圧が小さく、鉛直荷重が大きい場合、すなわち内空変位が小さく、天端沈下が大きい場合に生じると考えられるが、そのような傾向にはなっていない。膨張圧によるものとは別の要因によるものと考えられる。したがって天端のひび割れについては本論文では対象とせず、側壁のひび割れのみとした。

最終のひび割れ調査は平成 13 年 6 月に目視により行っており、覆工打設時期が平成 3 年～10 年であり、本分析におけるひび割れ発生有無のデータは打設後 3 年～10 年経過した覆工コンクリートを対象としている。

ひび割れの有無は覆工打設スパン 10.5m ごとのデータであり、全対象スパン数は 162 スパンである（表－3）。

覆工構造は無筋コンクリート、鉄筋コンクリート、鋼繊維補強コンクリートがあるが、このうち無筋コンクリート構造を中心に分析を行う。また通常箇所と同等に扱えないと考えられるスパンについては、分析対象外としている。対象外としたのは、貫通点近傍・器材坑近傍・作業坑交差部近傍・施工境・覆工厚が 60cm を超えるスパン・一次支保、覆工厚の急激な変更箇所・断面拡幅箇所である。

次項以降では本項で定義したひび割れと変位状況との関係について、図－7 の例に示す様々な各種変位データ（①～⑧）を用いて分析していく。



図－7 経時変化図と変位データの例

表－3 地山強度比 6 以下の対象スパンと
側壁ひび割れ発生スパン

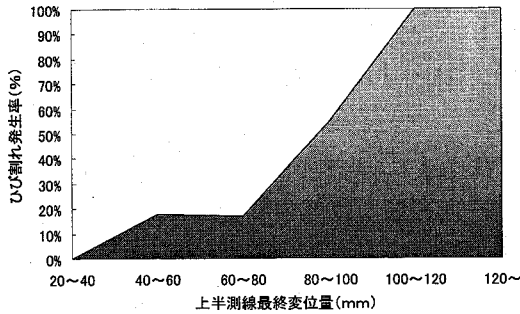
覆 工 構 造	全スパン数	ひび割れ発生 スパン数 幅0.2mm以上	ひび割れ発生 スパン数 幅1.0mm以上
無筋コンクリート	94	22	0
鉄筋コンクリート	31	19	1
鋼繊維補強コンクリート	37	2	0
合計	162	43	1

5) ひび割れの発生と短期残留荷重

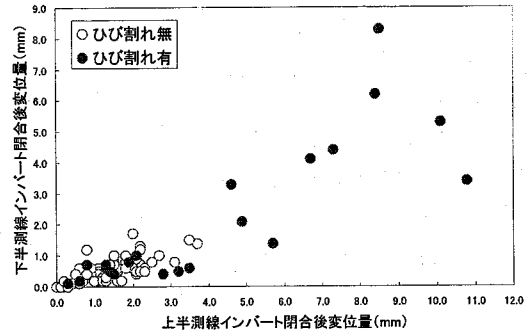
覆工打設時に変位が収束していない場合、覆工への荷重の負荷が明確であり、その荷重の作用によりひび割れが発生している可能性がある。対象トンネルでは、覆工打設の直前まで変位を継続して測定したことにより、精度良く覆工打設前の変位速度が測定できた。無筋コンクリート覆工におけるこの変位速度とひび割れ発生率の関係を表－4に示す。上半測線、下半測線ともに覆工打設前変位速度が 0.001mm/日（覆工打設前 3 ヶ月間の変位量が 0.1mm）以上の場合、ひび割れの発生率が大きい。このことから変位が収束していない状況で覆工を打設すると、短期残留荷重が作用し、覆工ひび割れの発生の危険性が高まることが分かる。一方、変位速度が 0.001mm/日未満とほぼ収束しているにもかかわらず、ひび割れが生じているスパンが上下半とも 20% 程度と比較的多いことが分かった。

表－4 覆工打設直前変位速度とひび割れ
発生率の関係

計測位置	覆工打設直前 変位速度 (mm/日)	適 用 スパン数	ひび割れ発生 スパン数	ひび割れ 発生率
上 半 測 線	0.001未満	90	18	20%
	0.001以上	4	4	100%
下 半 測 線	0.001未満	84	15	18%
	0.001以上	10	7	70%



図－８ 上半測線最終変位量とひび割れ発生率



図－９ 無筋コンクリート覆工における上下半測線のインバート閉合後変位量とひび割れ発生率の関係

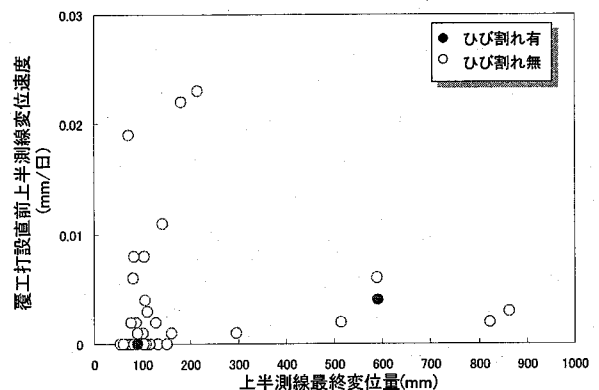
6) ひび割れの発生と長期残留荷重

前項では、覆工打設前変位速度が $0.001\text{mm}/\text{日}$ 未満の場合でもひび割れが比較的多く発生している現象が分かった。変位がほぼ収束しながらひび割れが生じている理由として、長時間経過後の土圧（長期残留荷重）に着目した。すなわち、掘削中の変形が周辺の地山の塑性化領域を拡大した結果、これに起因する土圧が長時間経過後に覆工に作用するという考え方である。この長期残留荷重を表現するものとして、最終変位量、インバート閉合後の変位量を想定した。無筋コンクリート覆工において、上半測線の最終変位量とひび割れ発生率の関係を図－８に示す。ここでは上半測線の最終変位量とひび割れ発生率に明確な関係を見ることができた。変位量 30mm 付近でひび割れが発生しはじめ、 90mm 程度で半数に、 110mm 以上では 100% ひび割れが発生する状況が把握できた。またインバート閉合後変位量とひび割れ発生の関係（図－９）では上半測線において変位量が 4mm を超えると、ほとんどのスパンでひび割れが発生している。また下半測線については 2mm を境界として同様の傾向が認められた。

もし、これらのひび割れの発生が乾燥収縮等の環境的な要因によるものであれば、変位の状況とは無関係に発生するはずである。しかし、本項の分析結果では、変位状況とひび割れ発生との間に明確な関係が見られたため、外力の作用（長期残留荷重の作用）がひび割れを生じさせたものと考えられる。

7) 鋼繊維による補強効果

対象トンネルでは、変位量や覆工打設前の変位速度の状況に応じて鋼繊維補強コンクリート構造とすることにより補強して覆工を施工した。この補強により、最終変位量や残留変位速度が大きい状態でひび割れをどの程度抑止できているのかについて分析を行った（図－１０）。この結果、無筋コンクリート構造では覆工打設前変位速度が $0.001\text{mm}/\text{日}$ 、上半測線最終変位量が 80mm を境にひび割れの発生傾向が大きくなるのと比較して、覆工打設前変位速度が $0.02\text{mm}/\text{日}$ 、上半測線最終変位量が 800mm を超える状態でもひび割れの発生が少なく、全体で 37 スパン中、 2 スパンしか発生していない。このことから、鋼繊維補強コンクリート覆工では、無筋コンクリート覆工と比較してひび割れの抑止効果が大きいことが分かった。すなわち、発生応力度がコンクリートの引張強度を超えてひび割れが生じて、その後のひび割れ開口幅の進展が鋼繊維の架橋効果により食い止められているものと考えられる。



図－１０ 鋼繊維補強コンクリート覆工における変位状況とひび割れ発生状況の関係

8) 多変量解析によるひび割れ発生判定

以上のように、ひび割れの発生は未収束変位による短期残留荷重と掘削による周辺地山の塑性領域の拡大に伴う長期残留荷重の両方に関係があることが把握できた。ここではそれらの変位速度や変位量を説明変数とし、ひび割れの発生有無を目的変数として多変量解析の一つである判別分析を無筋コンクリート覆工を対象に行った。説明変数としては、地山強度比、インバート閉合後上半変位量、上半測線最終変位量、覆工打設直前の上半測線変位速度、上半測線日最大変位量、インバート閉合後下半変位量、下半測線最終変位量、覆工打設直前の下半測線変位速度、天端最終沈下量を用い、これらの変数を組み合わせて分析を行った。最終的な判別関数式は、上半測線の最終変位量、下半測線のインバート閉合後変位量と覆工打設直前の上半測線変位速度の3つの説明変数で表される結果となり、判別率は89.1%と良好な結果を示した。分析結果を図-11に示す。判別式は

$$Z = 0.0436 \times A + 0.6649 \times B + 21.0795 \times C - 4.7922$$

(1)

で表される。ここに、Z:判別得点(正值→ひび割れ発生、負値→ひび割れ無し)、A:上半測線の最終変位量(mm)、B:下半測線のインバート閉合後変位量(mm)、C:覆工打設直前の上半測線変位速度(mm/日)である。

この式はひび割れの発生が短期残留荷重と長期残留荷重の複合的な作用によって生じていることを表す判定式となっており、膨張性地山のトンネルにおいて、側壁部にトンネル縦断方向に発生する幅0.2mm以上の外力作用によるひび割れの発生を予測する上で有効な判定式であると考えられる。逆に、この式により算定された値が正值にならないよう、変位量を抑制する、覆工打設時期の検討を行う、または前項においてひび割れに対して非常に有効であることが確認された鋼繊維補強コンクリートを用いる等の対策の検討が可能となる。例えば、覆工打設時に変位がほぼ収束している場合、C=0であり、インバート閉合後の下半測線の変位量Bを今回データの平均値2mmとすると、上半測線の最終変位量Aの標準的な基準値は80mmとなる。このことから変位が収束していても最終変位量が80mmを超える場合はひび割れが発生する可能性が大きいこととなる。実際の施工において、変位

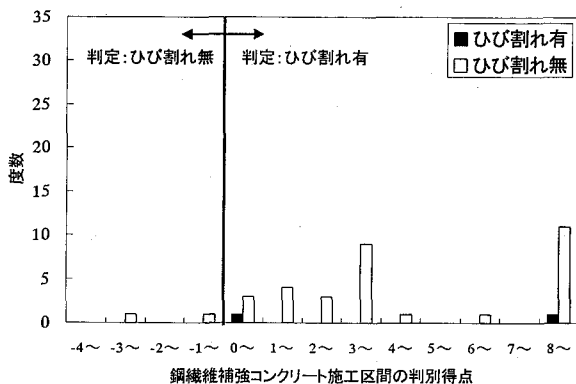


図-12 判別式の鋼繊維補強コンクリート区間への適用結果(判別得点の分布)

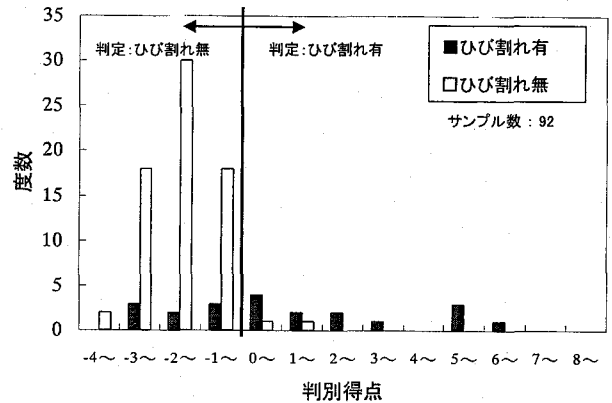


図-11 判別分析結果(判別得点の分布)

状況がこれと近い場合には覆工材料に鋼繊維補強コンクリートを用いるなどの対策が考えられる。

9) 判別式を用いた鋼繊維補強コンクリートのひび割れ抑制効果の検証

ここで鋼繊維補強コンクリート区間(スパン数36)に対し、前項の無筋コンクリート覆工のひび割れ判定式(1)に3種類の説明変数を代入して判別得点を求めたものを図-12に示す。判別式によるひび割れ発生の判定ではほとんどのスパンでひび割れが発生すると予測されたにもかかわらず実際の覆工には発生していないことから、無筋コンクリートで施工されていれば発生するはずである

ひび割れが鋼繊維補強コンクリートを打設することで抑制出来ていることが確認できた。また同時にこの判別式の有効性についても検証することができた。

5. まとめ

本論文では膨張性地山のトンネルにおける覆工コンクリートのひび割れ発生特性について検討を行うとともに、多変量解析によりひび割れ発生に関する予測式を求めた。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 覆工コンクリートのひび割れは覆工内の応力状態に大きく影響を受けて発生しており、その応力状態は覆工打設前変位速度が表す未収束変位に伴う短期残留荷重、最終変位量やインバート閉合後変位量が表現する長期残留荷重により引き起こされていることが想定できた。
- 2) 多変量解析により求めたひび割れの発生を最も適切に判定する判別関数式は、上半測線の最終変位量、下半測線のインバート閉合後変位量および覆工打設直前の上半測線変位速度で表され、本論文で仮定した短期残留荷重、長期残留荷重の複合作用を言い換えるものとして有効と考えられる。
- 3) 判別関数式を用いることにより、変位の状況からひび割れ発生を予測し、覆工材料や覆工打設時期などを検討することが容易に行えると考えられる。
- 4) 鋼繊維による補強区間のひび割れ特性分析および判別式の鋼繊維補強コンクリート施工区間への適用結果から、鋼繊維補強コンクリート覆工のひび割れ発生に対する抑止効果を確認し、同時に判別式の有効性を検証した。

一方、本論文では単一のトンネル 4km 間のデータによる分析を行っているため、この結果が、異なった地質、トンネルにおいてそのまま適用できるとは考えていない。今後は、他トンネルのデータも追加し、判別式等の精度を高めていくことが必要と考えている。また、トンネル天端のひび割れについて変位状況と大きな関係が見られなかったことから本論文では分析対象外としたが、今後、その発生原因を追求し、天端のひび割れについても抑制していくことが必要である。

本論文で対象としたひび割れについては、幅も小さく、構造耐力的に問題となるものはないと思われる。しかしながら、膨張性地山におけるトンネルでは、一般の地山と異なり、ひび割れの発生が顕著であり、将来にわたって問題を残さないためには、建設段階から十分にひび割れの発生を抑止する対策を行っておくことが重要と考える。

参考文献

- 1) 運輸省 : トンネル安全問題検討会報告書—事故の原因推定と今後の保守管理のあり方—、2000
- 2) (財) 鉄道総合技術研究所 : 変状トンネル対策工設計マニュアル、pp.131-173、1998
- 3) 日本道路公団試験研究所 : トンネル変状対策事例集、試験研究所技術資料第 357 号、1998
- 4) 土木学会 : 山岳トンネル覆工の現状と対策トンネルライブラリー第 12 号、pp.28-29、2002
- 5) 北川修三、登坂敏雄、長谷川達也、中川信男、鈴木一成 : 膨張性地山における二次覆工の設計、トンネル工学研究論文・報告集第 7 巻、pp.153-158、1997
- 6) 登坂敏雄、前田昌康、福田勝美、西村元男 : 膨張性軟岩における二次覆工の設計に関する考察、土木学会論文集 No.623/IV-43、pp.109-118、1999
- 7) 岡崎準、小川淳、山本秀樹、田村武 : 膨張性地山におけるトンネル覆工の荷重推定に関する検討、第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、投稿中、2004
- 8) 日本鉄道建設公団 : NATM 設計施工指針、pp.36-42、1996
- 9) 朝倉俊弘、小島芳之 : 膨張性地山の調査・試験・解析、地質と調査 第 1 号、pp.7-14、1995
- 10) 小島芳之、櫻井孝 : トンネルにおける岩石試験結果の利用、地質と調査 第 1 号、pp.19-26、1991
- 11) 仲野良紀 : 膨張性地山の実体、トンネルと地下 第 6 巻 10 号、pp.15-25、1975
- 12) 土木学会 : トンネル標準示方書 [山岳工法編]・同解説、pp.36、1996