

漏水のあるトンネル内舗装への排水性舗装の適用

阿部 忠行¹・廣島 実²・峰岸 順一³

¹ 正会員 工博 東京都土木技術研究所技術部 (〒136-0075 東京都江東区新砂 1-9-15)

² 正会員 工修 同

³ 正会員 工修 東京都建設局道路管理部 (〒163-8001 東京都新宿区西新宿 2-8-1)

アンダーパス形式の道路トンネルにおいては、一般に開削工法によるコンクリートのボックスカルバート形式が採用されるが、近接施工や超軟弱地盤など種々の理由から躯体にひびわれが発生し、底版からの漏水を防止し得ないまま舗装を舗設しなければならない事例が少なくない。ここで報告する事例も、超軟弱地盤上に、様々な制約下の中で建設されたトンネルで底版に発生したひびわれからの漏水を前提として舗装構造を検討したものである。舗装下面からの浸水に対するアスファルト混合物のはく離抵抗性と底版のひびわれの進行に伴うリフレクションクラック抑制を考慮して排水性舗装を用いた舗装構造とした。供用後5年間にわたる追跡調査の結果から、本工法の有効性が確認された。

Key Words : *tunnel pavement, asphalt mixture for drainage pavement, rolled asphalt mixture, reflective cracking,*

1. はじめに

東京都において主要幹線道路が交差する箇所では、立体交差が約300ヶ所で計画されており、その構造形式は沿道環境保全あるいは交通規制の関係からアンダーパス形式の事例が多くなっている。一般に開削工法によるコンクリートのボックスカルバート形式が採用されるが、このような道路トンネルにおいては、近接施工や超軟弱地盤など種々の理由から躯体にひびわれが発生し、底版からの漏水を防止し得ないまま舗装を舗設しなければならない事例が少なくない。

ここで報告する事例も、超軟弱地盤上に、様々な制約下の中で建設されたトンネルで底版に発生したひびわれからの漏水を前提として舗装構造を検討したものである。トンネル内の舗装は、維持修繕を出来る限り少なく、かつ安全性の確保や視認性の向上を図るという面から一般にはセメントコンクリート舗装や半たわみ性舗装が採用されることが多い¹⁾²⁾。しかし、本事例のトンネル内の舗装は、底版に新たなひびわれの発生と漏水補修箇所からの漏水があり得るという条件が付加されている³⁾。そのため、舗装構造を決定するにあたって、底版の変形への追従性、底版からの漏水に対する対応、底版からのリフ

レクションクラックの低減などを目標課題として検討した。その結果、底版からの漏水は下層に設けた排水層を通して流下させ、底版の変形によるリフレクションクラックに対しては開粒度アスファルト混合物によって低減を図る舗装構造を採用した。ここでは、その舗装構造と材料の検討経緯、舗設結果および供用後5年間の追跡調査結果について報告する。

2. 対象箇所の概要

今回対象としたトンネルは海浜の埋め立て地域内の超軟弱な地盤上に構築され、構築後も地盤の不同沈下などにより躯体にひびわれが発生していた。なお、トンネルの躯体断面は、二連式ボックスカルバート形式であり、断面寸法は図-1に示すとおりである。

3. 舗装構造検討上の諸条件

(1) 交通条件

新規路線であり推定交通量は、41,000台/日・2方向で、大型車混入率は約20%と推定した。大型車交通量は4,100台/日・1方向であり、交通条件としては、交通量区分Dであった。

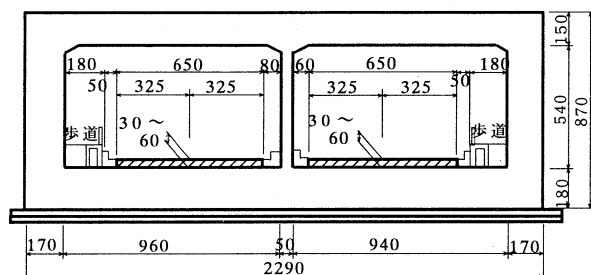


図-1 トンネル躯体断面 (単位 mm)

(4) 線形条件

線形条件は、平面的に $R=500\text{m}$ と $R=350\text{m}$ の S 字曲線状となっており、縦断形状は図-2に示すように抗口より 5 % ~ 0.3 % ~ 2 % となっていた。舗装路面の横断勾配は、各点で変化しており、カントの部分では 4 % 程度の横断勾配となっている箇所があった。車道の幅員は、 6.5m ($3.25\text{m}+3.25\text{m}$) $\times$ 2 方向である。

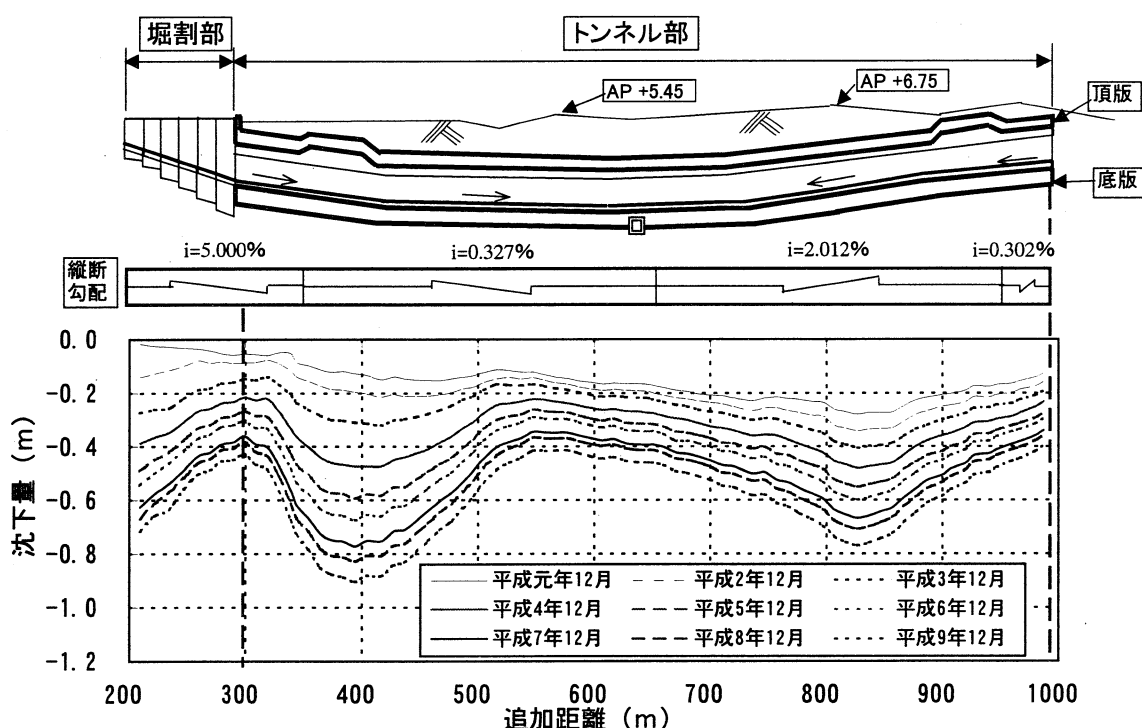


図-2 トンネル縦断図および経年沈下量

(2) 路床条件

路床条件としては、コンクリートスラブ上の舗装となる。ただし、コンクリートスラブである底版には、ひびわれがあり、一部に漏水があることを考慮する必要があった。

(3) 環境条件

温度条件はトンネル内であり、夏期に於いてもそれほど高温になることがないため塑性流動による変形には有利な条件であった。しかし、漏水の水質は、海水の $1/3$ 程度の塩分濃度となっており鉄筋の腐食し易い条件となっていた。

4. 舗装構造の検討

(1) 舗装構造選定のフロー

舗装構造の選定にあたって考慮した事項は、以下に示すとおりである。

a) 諸条件の設定

諸条件は、対象構造物の現状把握、問題点の抽出および各問題点の対応策について検討を行って設定した。

構造面から考慮すべき条件は次のとおりであった。

- ・ 厚さ 180cm のコンクリートスラブ上の舗装で、コンクリートスラブにはひびわれの発生が認められる。
- ・ 不同沈下により生じた凹凸を縦断線形で緩和する

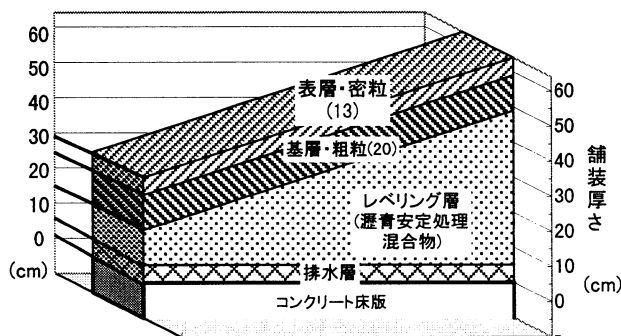


図-3 舗装厚の変化

ことと、曲線部にカントを設けるため舗装厚さが縦横断の各位置で変化する（図-3参照）。

- ・建築限界の 4.7m を確保する。
- ・底版の変形が進行中である。

機能面から考慮すべき条件は次のとおりであった。

- ・走行車両の安全性を確保するため路面の輝度を確保し視認性の向上を図る。
- ・一部、5%の縦断勾配があるためすべりに対する安全性を確保する。
- ・路面のわだち掘れや縦断凹凸などの機能的破損の発生を出来る限り防止する。

環境面から考慮すべき条件は次のとおりである。

- ・躯体の大部分が地下水位以下にあるため頂版部、側壁部、底版部のひびわれからの漏水が懸念される。
- ・漏水の水質は、海水の 1/3 程度の塩分濃度となっており鉄筋の腐食し易い環境にあった。
- ・火災時の安全性の確保が重要であった。

b) トンネル内舗装に要求される性能と工法

トンネル内舗装に要求される主な性能は次のとおりである。

- ・補修工事が困難なため供用寿命が長く、かつメンテナンスフリーであること。
- ・路面が明るく走行車両の視認性が良好なこと。
- ・漏水などによるはく離作用に対して抵抗性が大きいこと。
- ・火災時を考慮して、不燃性であること。

これらの諸条件を考慮した場合、一般的にはセメントコンクリート系舗装が採用されることが多い。しかし、ここでの舗装構造の選定に当たっては軟弱地盤に起因する圧密沈下と不同沈下に伴う躯体の変形への追随性やリフレクションクラックの低減を第一目標とした。同時にこのようなことから、一般的なコンクリート舗装や半たわみ性舗装では早期にひびわれの発生が懸念されその際の補修工法が困難であり不採用とした。また、連続鉄筋コンクリートやプレストレスコンクリート舗装の場合には鉄筋類の

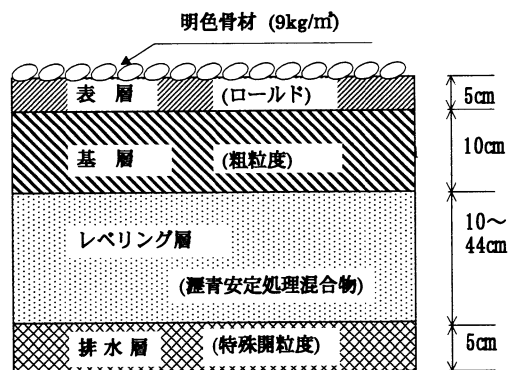


図-4 舗装断面

腐食が懸念されることと、舗装厚さが変化するために最小版厚さの確保が難しいために不採用とした。以上の検討結果からアスファルト舗装を採用することとした。

c) 漏水、滞水対策

躯体のひびわれからの漏水に対しては、止水あるいは導水工法によって処置するが、舗装工事完了後新たに発生するひびわれや底版に生じている 0.25mm 以下のひびわれからの漏水に対処することが舗装構造の検討の条件となった。

d) アスファルト舗装での検討事項

アスファルト舗装を選択する上での検討事項は次のとおりであった。

- ・有限要素法による底版と舗装との付着性に伴う応力発生の相違の検討。
- ・底版からの漏水に対し、耐はく離性の高い材料選択の検討。
- ・底版からの漏水を排水可能とする工法の検討。
- ・底版のクラックに起因するリフレクションクラックの抑制に関する検討。
- ・路面の視認性を高める表層の検討。

(2) 舗装構造と材料の検討

a) 舗装構造

舗装厚は、平面線形上曲線があり、カントをつけるため各位置によって変化する。舗装厚は最大値 64cm、最小値は 30cm、平均約 45cm であった（図-3）。コンクリート底版上の舗装構造の決定にあたって参考となる類似構造物としては、コンクリート床版上の橋面舗装があげられるが舗装厚が大きく異なるので準拠することは出来ない。舗装構造の基本的考え方は、水を排水可能とする工法という観点から底版上に排水層を 5cm 設けることとした。表層と基層は、一般部の最小厚さ 15cm を確保することとした。なお、表層・基層厚 15cm 確保することは、リフレクションクラックの抑制に寄与することも配

表-1 使用アスファルトの管理試験値

試験項目 \ 種 別	付着性改善アスファルト		高粘度改質アスファルト		改質アスファルトⅡ型
	表・基層・ベリング層		排水層用		
	試験値	規格値＊	試験値	規格値＊	
針入度(25℃) 1/10mm	56	40～65	60	40～65	40～65
軟化点 ℃	65.5	57.0～75.0	82.0	75.0～90.0	57.0～75.0
伸度(15℃) cm	100 †	50以上	100 †	90以上	50以上
引火点(C. O. C) ℃	—	280以上	—	280以上	280以上
薄膜加熱質量変化率 %	0.04	0.3以下	0.05	0.3以下	0.3以下
薄膜加熱針入度残留率%	82.1	65以上	90.0	80以上	65以上
タフネス N・m	17.7	12.0以上	31.7	28.0以上	12.0以上
テナシティ N・m	11.6	6.0以上	24.1	20.0以上	6.0以上
粗骨材の剥離面積率 %	—	5以下	0.0	5以下	—
60℃粘度 Pa・s	3,200	800以上	45,300	2,000以上	—

*規格値は東京都土木材料仕様書による。なお、改質アスファルトⅡ型は比較のため掲載した。

慮したものである。残り 10～44cm の部分はレベリング層とした。

b) 各層の機能と材料の選択

選択した標準断面の舗装構造は図-4に示すとおりである。また、各層に期待する機能と選択した材料は次のとおりである。

・表層：通常表層の機能とともに明色性と耐はく離性の確保に重点をおいて材料を選択した。また、一部縦断勾配が5%の箇所があることからすべり抵抗の確保にも配慮した。材料としては、耐流動性および耐はく離性を高めた付着性改善アスファルトを用いたホットロールド混合物とし、視認性向上のため明色人工骨材を散布圧入する工法を採用した。

・基層：表層と同様な考え方から表層と同一の付着性改善アスファルト混合物（粗粒度）とした。

・補強シート：不同沈下が最も著しい区間において基層の補強とリフレクションクラックの分散あるいは防止を目的としてアスファルトを含浸させた不織布を基層混合物の中間位置に舗装した。

・レベリング層：各位置で舗装厚が変化すること、底版からの漏水の影響を受ける危険性があることを考慮して選定した。材料は、付着性改善アスファルトを用いた瀝青安定処理混合物とした。

・排水層：底版のひびわれ部からの漏水をある程度許容することを前提とする設計条件から、漏水を底版の縦断勾配を利用して最深部まで流下させポンプ排水する工法を採用した。材料は、透水係数が $1 \times 10^2 \text{ cm/sec}$ 以上でかつはく離抵抗性があり安定度も高く排水性舗装に用いられている高粘度改質アスファルト混合物とした。さらに、アスファルト被膜を厚くして耐久性を高めるために天然の木材を原料とする植物繊維を添加した。

排水層およびレベリング層に比較的空隙の大きな材料を使用したのは、底版の変形によるひびわれの

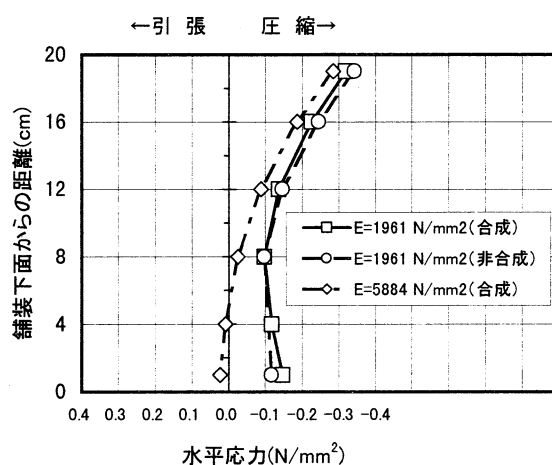


図-5 合成・非合成の応力(FEM)

伝播を応力緩和により抑制する効果に配慮したものである。

・底版処理および接着層：現在生じている 0.25mm 以上のひびわれについては、低弾性タイプの日地材の充填工法により止水を行った。

舗装と底版の付着性については FEM によって検討した結果、図-5に示すように付着のない非合成の場合は舗装下面に引張り力が生じひびわれ発生の危険性があることがわかった。このため、微細なひびわれ補修と底版との接着性を高めるためゴム入りアスファルト乳剤をタックコートとして使用した。

なお、FEM 解析は、舗装の弾性係数 ($1961, 5884 \text{ N/mm}^2$ の 2 種)、舗装厚 (20, 40cm の 2 種)、接合状況 (合成、非合成の 2 種)、載荷荷重 0.54 N/mm^2 、載荷半径 17.0cm とした。

5. 使用材料の仕様と管理試験結果

(1) アスファルトの性状

表層・基層およびレベリング層に用いる付着性改

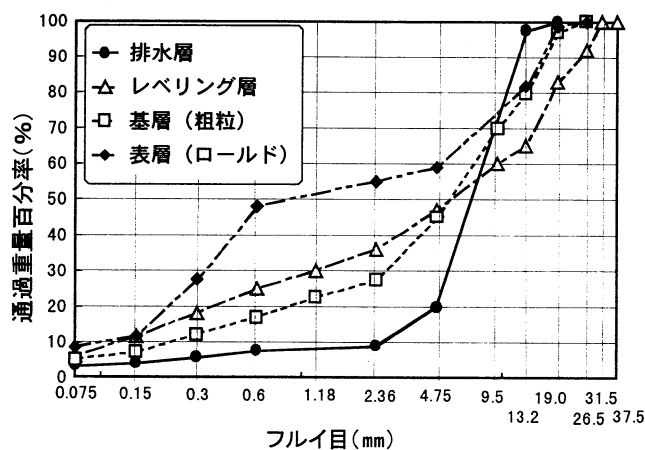


図-6 合成粒度

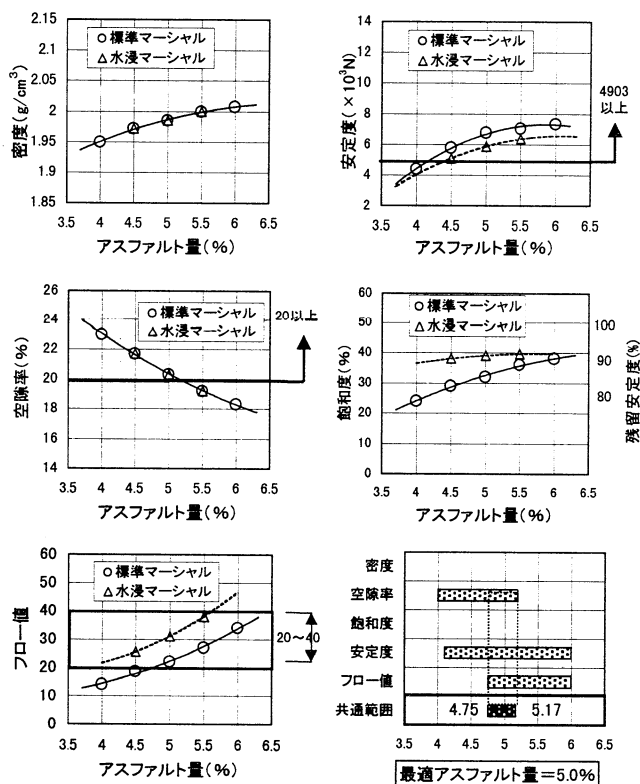


図-7 マーシャル特性値（排水層）

善アスファルト、排水性舗装用の高粘度改質アスファルトの性状は、表-1に示すとおりである。

(2) 混合物の配合

a) 排水層用混合物

・合成粒度

透水能を確保するため空隙率が20%以上となることを目標としてマーシャル試験結果によって図-6の合成粒度を選定した。

・最適アスファルト量

最適アスファルト量の設定は、マーシャル試験結果(図-7)による共通範囲から設定した。はく離抵抗

表-2 最適アスファルト量におけるマーシャル特性値

項目 題名	最適アス量 (%)	密度 (g/cm ³)	最適密度 (g/cm ³)	空隙率 (%)	飽和度 (%)	安定度 (N)	フロー値 (1/10mm)
基 層	4.7	2.426	2.525	3.7	74.9	13141	27
	目標値	2.35以上	—	3~7	65~85	9807以上	20~40
レベリング層	4.0	2.400	2.550	5.9	61.2	12651	25
	目標値	2.33以上	—	3~12	—	3923以上	20~40
排 水 層	5.0	1.985	—	20.5	31.9	6669	22
	目標値	—	—	20以上	—	4903以上	20~40

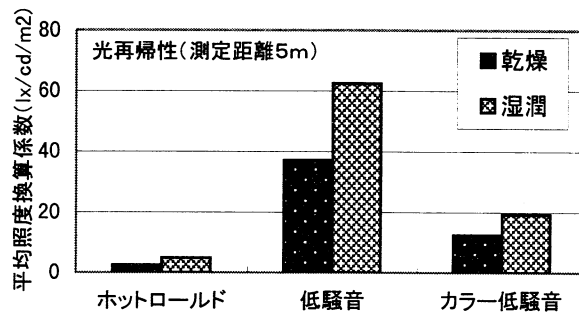


図-8 光源の前方5mの光再帰性

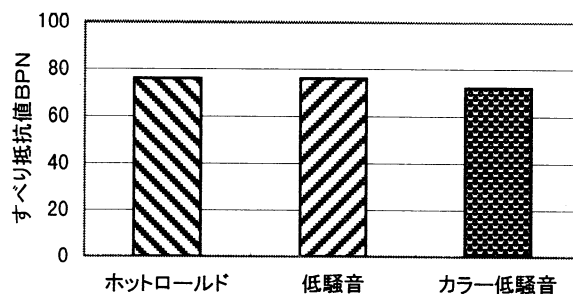


図-9 すべり抵抗性測定結果(BPN)

性については水浸マーシャル試験を行った。図-7から最適アスファルト量を5.0%とした。最適アスファルト量におけるマーシャル特性値は表-2に示すとおりである。

b) レベリング層用混合物

レベリング層に用いる瀝青安定処理混合物の合成粒度は、仕様書に定められた粒度範囲内でかつ施工性が良好な2.36mmふるい通過質量百分率が35%程度を目標として図-6の粒度とした。最適アスファルト量については、マーシャル試験の結果から4.0%とした。最適アスファルト量におけるマーシャル特性値は表-2に示すとおりである。

c) 基層用混合物

基層に用いる粗粒度アスファルト混合物の合成粒度は図-6に示すとおりである。最適アスファルト量については、マーシャル試験の結果から4.7%とし

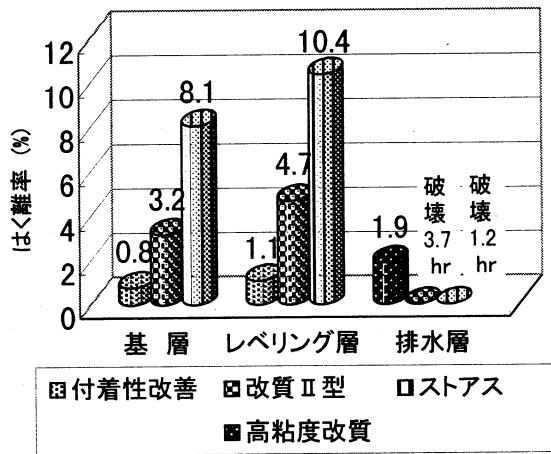


図-10 はく離抵抗性(水浸 WT)

た。最適アスファルト量におけるマーシャル特性値は表-2に示すとおりである。

d) 表層用混合物

表層に用いるロードアスファルト混合物の合成粒度は図-6に示すとおりである。最適アスファルト量については、マーシャル試験の結果から7.35%とした。なお、視認性を確保するため明色骨材を平均9kg/m²散布圧入した。

明色舗装の視認性と照明効果については光再帰性試験を、すべり抵抗については振子式スキットレジスタンステスターによるすべり抵抗試験を室内で実施した。その結果低騒音、カラー舗装と比較してより明るい舗装とすることができ(図-8)、すべり抵抗も低騒音、カラー舗装と同程度であることを確認した(図-9)。

(3) 混合物の性状

混合物の性状として、はく離抵抗性を検討するために水浸ホイールトラッキング試験、ひびわれ抵抗性については曲げ試験、排水層の透水性については透水試験を行った。なお、比較のためにストレートアスファルト40～60と改質アスファルトⅡ型を用いた混合物についても試験を行った。試験は舗装試験法便覧に準拠した。なお、水浸ホイールトラッキング試験の荷重は、0.63N/mm²とした。

a) 水浸ホイールトラッキング試験

水浸ホイールトラッキング試験の結果は、図-10に示すとおりである。基層およびレベリング層における結果では、付着性改善アスファルトのはく離率はストレートアスファルトの約1/10で改質アスファルトⅡ型の1/4程度であった。排水層においては、はく離率1.9%と高いはく離抵抗性を示した。改質アスファルトⅡ型では3.7時間、ストレートアスファルトでは1.2時間で混合物が破壊したことから高粘度改質アスファルトの耐久性の高いことがわか

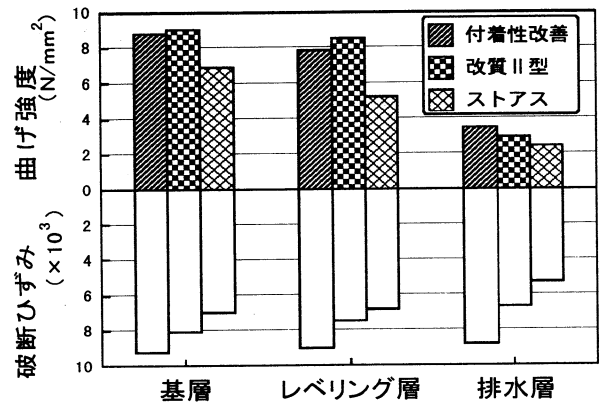


図-11 曲げ強度と破断ひずみ

った。

b) 曲げ試験

曲げ試験の結果は、図-11に示すとおりである。曲げ破壊時の応力は、付着性改善アスファルトと改質アスファルトⅡ型とほぼ同様であり、ストレートアスファルトの1.3～1.6倍であった。排水層では、ストレートアスファルトに比べて改質アスファルトⅡ型で1.2倍、高粘度改質アスファルトで1.4倍程度であった。

破断ひずみもいずれの層においてもストレートアスファルトよりも大きな値を示し、変形抵抗性の高いことがわかった。

c) 透水試験

透水試験の結果は、アスファルト量5%、密度1.984g/cm³、空隙率20.5%において5.08×10³cm/secと目標値1×10³cm/sec以上であった。

6. 施工および管理試験結果

(1) 施工

施工は、底版の清掃、タックコート工(0.4ℓ/m²)、排水層工、レベリング層工および基層工、表層工の順で行った。

(2) 温度管理

各ダンプトラックの荷下ろし毎に計測した。基層およびレベリング層に用いた付着性改質アスファルトの温度粘度曲線から求めたマーシャル混合温度は176～181℃、マーシャル締固め温度は163～169℃であった。また、高粘度改質アスファルトは最適混合温度と最適締固め温度を温度粘度曲線から求めると200℃を超えることから、使用実績から混合温度170～185℃、締固め温度145～165℃とした。これらの温度と比較して施工は、適切な温度管理がなされていた。

表-3 追跡調査項目一覧

調査項目	調査年度 月				平成5年度				平成6年度				平成7年度				平成8年度				平成9年度			
	4	7	10	1	4	7	10	1	4	7	10	1	4	7	10	1	4	7	10	1	4	7	10	1
トンネル供用期間(供用開始H5.9)																								
路面性状調査																								
軸重調査																								
交通量調査																								
動荷重測定調査(オンボード)																								
舗装の滞水状況調査																								
舗装の健全度調査(FWD)																								

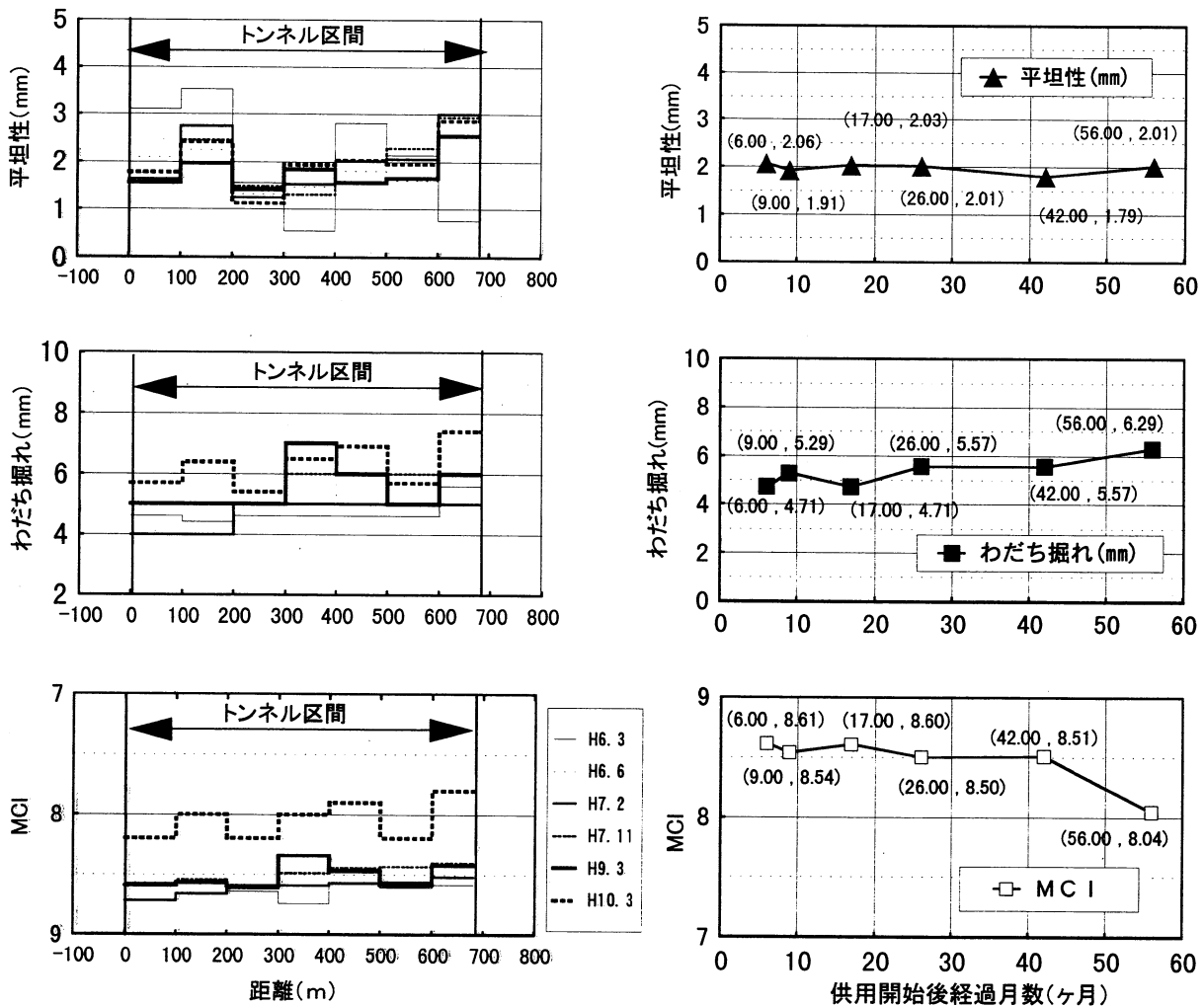


図-12 路面性状調査の経年変化 (内回り・走行車線)

(3) 施工厚および密度管理

施工厚および密度管理は、抜取りコアによって行った。いずれも基準を満足するものであった。

(4) 動的安定度

施工管理の一環として行った抜取り供試体の動的安定度の平均値は、基層 3450 回/mm、レベリング

層 6570 回/mm、排水層 3200 回/mm であり、いずれも規格値 2000 回/mm を超えていた。

7. 追跡調査

平成5年9月に供用を開始後、平成10年1月までの5年間の追跡調査項目は、表-3に示すとおりである。

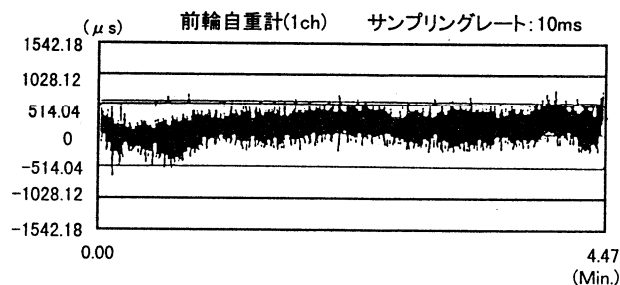


図-13 動荷重（オンボード）

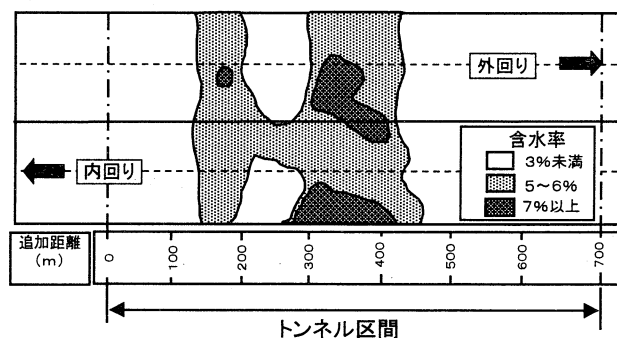


図-14 滞水状況推定図

(1) 路面性状調査

路面性状調査は、わだち掘れ、ひびわれおよび平坦性について路面性状自動計測装置を使用して行った。建築限界の制約の中で縦断勾配が変化した施工となったことから平坦性の変化を把握することが重要と考えられた。このことについては、路面性状調査と平行して動的荷重調査、路面レスポンス調査でも検討した。

調査結果は、図-12に示すとおりである。供用開始後約5年経過しているが、わだち掘れは7mm以下、ひびわれはほとんど無く、平坦性も2～2.5mmと良好で、全ての車線でMCIが8.0以上と良好な路面状態を保持していた。

(2) 交通量・軸重調査

大型車交通量は、3249～7834台/日・1方向であった。マット式軸重計で測定した5トン換算輪数は801～1615輪/日・1方向であった。

(3) 動的荷重調査

動的荷重調査は、試験車両の車軸にひずみゲージを設置したオンボード式の測定装置を用いて動的な荷重の変動から路面や躯体の変状を推測するために行った⁴⁾。測定結果は、図-13（前輪の測定例）に示すとおりである。どの車線においても、通常の良好な舗装の荷重変動と同様な傾向であり、動的荷重の変動から見る限り路面の変状はないと考えられた。

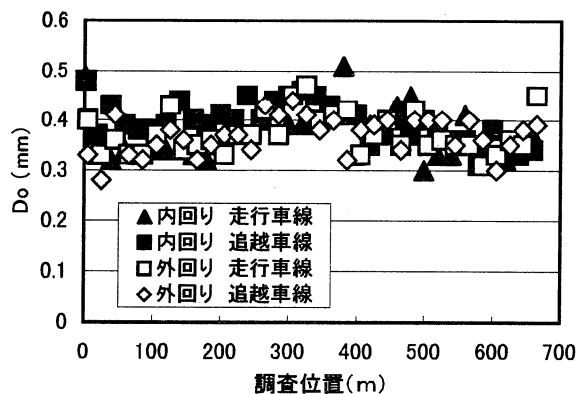


図-15 FWD 調査結果

(4) 舗装の滞水状況調査

舗装が滞水の影響を受けて耐久性が低下することが考えられるので舗装の滞水状況調査を実施した。調査は、レーダー（電磁波）探査車両を用いて行った。滞水状況の調査結果は、図-14に示すとおりである。トンネルの中央部を中心に300m程度の範囲で滞水している状況が推定された。

(5) たわみ量調査

舗装の残存価値など構造的な健全度をFWDによるたわみ量調査で検討した。開通後の交通量の増加および滞水の影響で舗装の破損が生じる可能性と舗装の厚さが異なることからたわみ分布が異なると考えられたために実施した。測定箇所は、20mピッチで全車線計140カ所、荷重は10tとして測定した。その結果は、図-15に示すとおりであった。

載荷板直下のたわみ量は、全車線35μm程度であり、特に大きくたわみ分布が異なっていなかった。

8. まとめ

調査結果から得られた主な結論は次のとおりである。

- (1) 供用開始後約5年経過しているが、わだち掘れは7mm以下、ひびわれはほとんど無く、平坦性も2～2.5mmと良好で、全ての車線でMCIが8.0以上と良好な路面状態を保持していた。
- (2) ここで採用した舗装構造は多少の滞水状態であっても累積5トン換算輪数で300万輪程度においてもはく離による破損も発生せず良好な供用性が確保されていることが分かった。
- (3) 約5年間の追跡調査の結果、本工法の有用性が確認された。

9. おわりに

本報文は、超軟弱地盤の箇所で地上構造物の変形に追随する変形を余儀なくされた条件下で設計された鉄筋コンクリートのトンネル内の舗装に関する検討である。底版からの漏水による影響と構造物の変形あるいは底版に生じたクラックに起因するリフレクションクラックの抑制を考慮する必要があった。そのため、検討にあたっては漏水に対しては混合物層内の空隙による排水、またリフレクションクラックの抑制が中心課題であった。

はく離に対しては、底版に接する層に排水性舗装用の透水性の大きな混合物を用いるとともに、レベリング層や基層にも橋面舗装用のはく離抵抗性の高い付着性改善アスファルトを使用した。一方、リフレクションクラックの抑制には下層に開粒度あるいはアスファルト処理混合物のように空隙が大きな材料による応力緩和層を設けることと基層の間にシー

トを敷設することで対処した。

約5年間の追跡調査の結果、本工法の有用性が確認され、最近開通した同種のトンネルにおいても底版からの漏水が余儀なくされ、同様な舗装を適用したところである。

なお、舗装構造の検討にあたって日本大学理工学部阿部頼政教授に、また調査にあたって建設局道路管理部保全課および第二建設事務所の担当者にご協力頂きましたことに紙面を借りて感謝いたします。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱, 平成4年
- 2) 日本道路公団：設計要領
- 3) 阿部忠行、関口幹夫他：環状第8号線羽田トンネルの動態, 平8都土木技研年報, pp.127-138, 1996
- 4) 阿部忠行、峰岸順一：舗装設計における動的荷重の適用に関する一考察, 土木学会第50回年次学術講演会, pp.496-497, 1996

MEASURES AGAINST LEAKAGE AT TUNNEL BOTTOM SLAB CRACKS BY DRAINING PAVEMENT.

Tadayuki ABE, Minoru HIROSHIMA, Junichi MINEGISHI

Generally for the purpose of minimizing maintenance and repairs and of ensuring higher safety and repairs and better visibility, cement concrete and semi-flexible pavements are used extensively for road section in tunnels. However, the tunnel, which is the subject of the present investigation, inevitably suffers from reflective cracking by differential settlement of the ground or due to other causes and from leakage at the cracks of bottom slabs because it was built on a very weak ground. Under these unfavorable conditions, using a cement concrete pavement might result in early cracking. For this tunnel, therefore, we investigated a pavement structure which is capable of reducing the occurrence of reflection cracks and of draining water leaking out at the bottom slab cracks. As a result, a mixture, which is used for draining type pavements, was applied for the layer being in contact with the bottom slabs. We confirmed the validity of this method from the result of the follow-up survey of five years.