

開削トンネル下層路盤における湧水対策

～ポーラスコンクリートの適用～

阪神高速道路（株）建設・更新事業本部堺建設部設計課 加瀬 駿介

阪神高速道路（株）建設・更新事業本部堺建設部設計課 杉岡 弘一

阪神高速道路（株）建設・更新事業本部堺建設部設計課 星住 哲也

要 旨

阪神高速道路 6 号大和川線の開削トンネル区間の一部では、躯体のひび割れ部や目地部より湧水が発生している。そこで止水対策を実施したが、全ての湧水を止めることは難しく、導水による湧水対策に移行することとした。その中で躯体底版部及び、目地部からの湧水に対しては、「湧水が路盤内に滞水しないよう、速やかに排水できる構造とする」「湧水に対し耐久性の高い路盤を構築する」という設計思想のもと、下層路盤をポーラスコンクリート等に変更する湧水対策を実施した。一般的にポーラスコンクリートは表層に使用され、要求される性能項目は、主に強度（曲げ強度）と透水性である。しかし、ポーラスコンクリートが下層路盤で使用された事例は、極めて少なく、その性能項目は確立されていない。そこで、本稿では開削トンネル下層路盤における湧水対策及び、下層路盤に使用するポーラスコンクリートの性能項目について検討した結果を報告する。

キーワード:湧水対策, 開削トンネル, ポーラスコンクリート

はじめに

現在建設を進めている阪神高速道路 6 号大和川線では、開削トンネル区間の一部で、躯体目地部や底版ひび割れ部より、湧水が発生している。目地部やひび割れ部に対し、樹脂注入による止水対策を実施したが、目地からの湧水を止めることはできなかった。また、止水対策を実施した底版ひび割れ部の一部より、湧水の再発生が確認され、現在止水されている底版ひび割れ部においても将来的な湧水の発生が懸念される。

現地は図-1 に示すように A, E 区間が縦断勾配

約 3.0%の勾配区間, B~D 区間が縦断勾配約 0.4%の緩勾配区間となっており、目地部や底版ひび割れ部から発生した湧水が、写真-1 に示すように勾配の変化点や不陸の生じている底版に滞水している。



写真-1 不陸箇所や勾配変化点での滞水状況

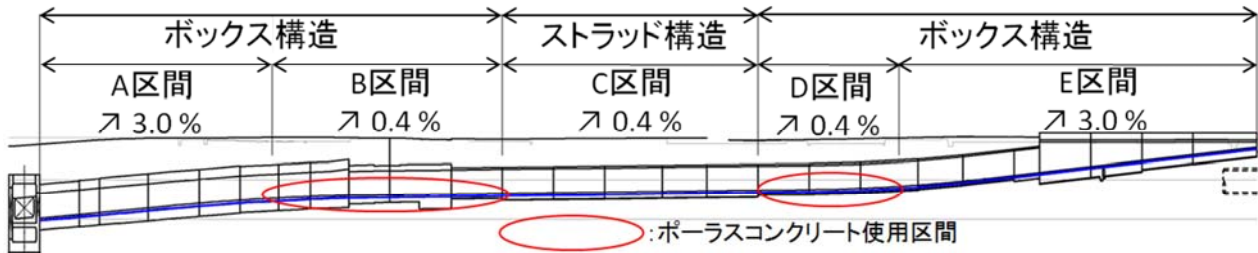
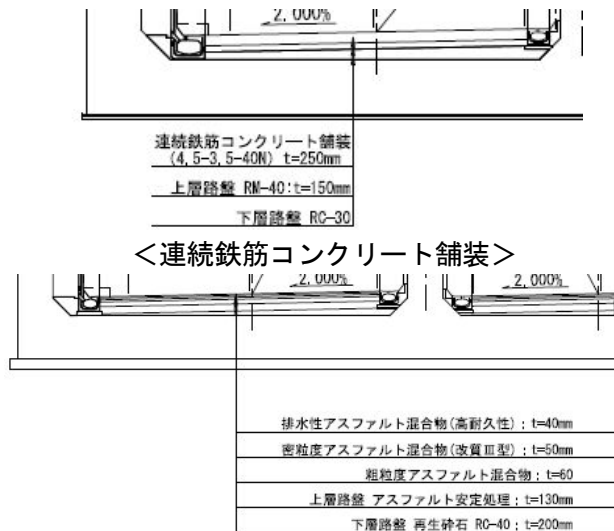


図-1 湧水発生区間の縦断勾配

湧水が発生している区間の舗装標準断面を図-2に示す。図-2より連続鉄筋コンクリート舗装及び、排水性アスファルト舗装のいずれの標準断面も下層路盤に粒状路盤材（RC-30or40）が使用されており、湧水対策を怠った場合、路盤の損傷が懸念される。



<排水性アスファルト舗装>

図-2 舗装標準断面

湧水によって最も懸念されるのが、路盤材のエロージョン（浸食）による路盤支持力の低下である。図-3に示すように、再生砕石の下層路盤に湧水が滞水することで、エロージョンが発生し、下層路盤が空洞化や泥濘化する¹⁾。それにより、下層路盤の支持力が低下することで、アスファルト舗装やコンクリート舗装が沈下やひび割れを起こし、破壊に至る。

以上の問題から、舗装構造の耐久性を確保するためには、発生する湧水を路盤内に滞水させず、速やかに排水する路盤の構造検討が必要である。また、湧水によるエロージョンに抵抗できる耐久性に富んだ路盤の構築も必要であり、路盤強化策

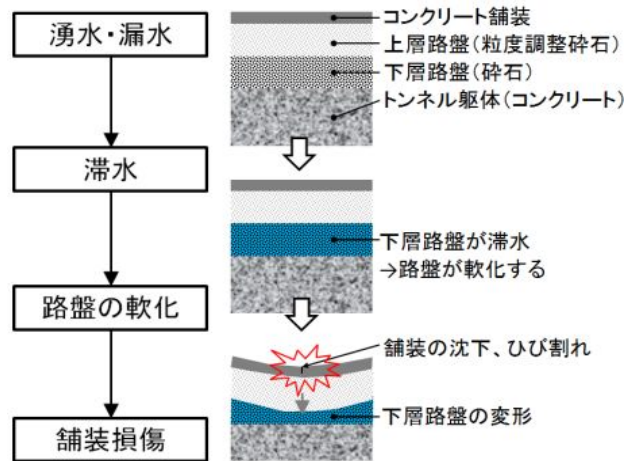


図-3 路盤滞水による舗装の破壊フロー

の検討も必要である。

2. 設計思想と対策

目地部や底版ひび割れ部からの湧水の実態を踏まえ、湧水が舗装に与える影響を除去し、耐久性の優れた舗装を構築することで、お客様に高い快適性と走行性を永続的に提供することが重要である。このためには、効率的な排水対策が必要であり、「湧水が路盤内に滞水しないよう、速やかに排水できる構造とする」「湧水に対し耐久性の高い路盤を構築する」という2つの設計思想に基づいて対策を検討した。

2-1 湧水を速やかに排水する路盤の構築

図-1のB～D区間は、緩勾配区間であり、かつ不陸の影響で縦断勾配がほぼフラットになっている。また、底版には排水勾配が設けられていない。このような現地条件のため、湧水が広範囲に広がり底版上に滞水している状況であり、弊社設計基準の標準的な湧水対策である線的な対策（ひび割

れ部や目地部の止水対策と導水マットの敷設)のみでは、路盤の損傷が懸念される。

この対策として、底版部分に調整コンクリート(18-8-20-BB)を打設し、横断勾配を設けることで、湧水の排水機能を確保した。更に、図-1のD区間は、E区間と縦断勾配の変化点であり、勾配が緩くなることで流速が落ちるため、路盤内への滞水が懸念される。また、図-1のB区間は、底版部に比較的ひび割れが多いことから、湧水が再発生し、将来的に底版から調整コンクリートに派生したひび割れを湧水が上昇し、路盤内への滞水する可能性が高い。従って、この2区間については、調整コンクリートの上部に排水性が高く、湧水に対し耐久性の優れたポーラスコンクリート層を設け、面的な排水層を構築した(図-4, 5参照)。

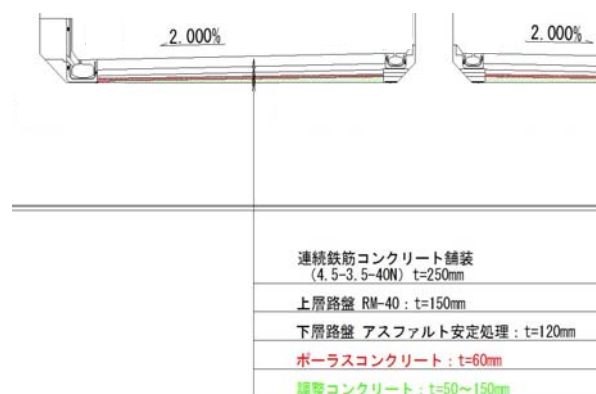


図-4 B区間標準断面図



図-5 D区間標準断面図

この対策により、湧水が調整コンクリート上面に浸透してきた場合でも、ポーラスコンクリート層の貯留効果及び、排水効果により、浸透水を遮断し、上部舗装構造への影響を防止することができる。ポーラスコンクリートの性能項目について

は、次章以降で述べることとする。

一方、ストラッド部である図-1のC区間については、底版部での滞水は確認されたが、現地踏査の結果、滞水の原因は底版からの湧水ではなく、底版部の不陸に雨水や上流部からの湧水が流れ込み滞水したものと判断した。よって、C区間については、図-6に示すように底版部に調整コンクリート(18-8-20-BB)を打設し、横断勾配を設け排水機能を確保するのみの対策とした。

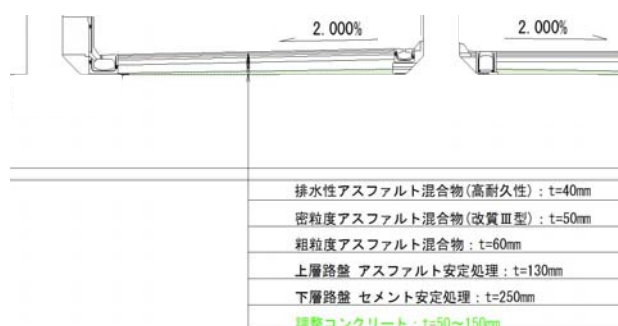
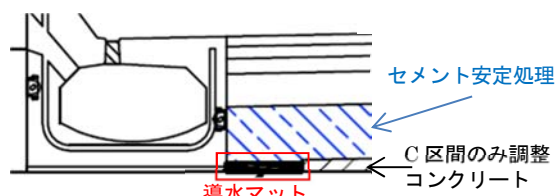
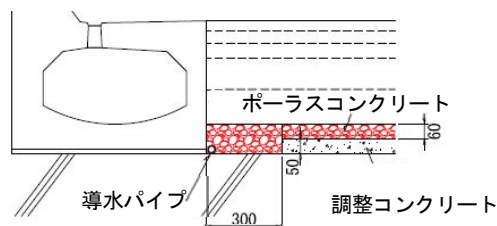


図-6 C区間標準断面

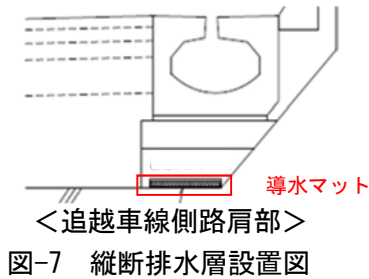
面的な排水機能に加え、車線路肩部には縦断方向に排水層(以下、縦断排水層とする)を設け、調整コンクリートの横断勾配で集水した湧水を流末まで導く線的な排水機能を構築した。縦断排水層は弊社の設計基準に則り、導水マットで構築し、排水効率を高めるため、図-7に示すように西行き・東行きの走行・追越両車線の底版上に配置した。なお、ポーラスコンクリートを使用するB, D区間走行車線側の縦断排水層は、ポーラスコンクリートの耐久性を考慮し、導水マットではなく、図-7に示すようにポーラスコンクリートとφ25mm導水パイプで構築した。



<A, C, E区間走行車線側路肩部>



<B, D区間走行車線側路肩部>



2-2 湧水に対し耐久性の高い路盤の構築

図-1のA、E区間は、約3.0%の縦断勾配があり、底版から湧水が発生した場合、湧水は底版上に滞水せず流下することになる。底版上には、下層路盤として再生砕石(RC-30or40)が使用されており、流下する湧水により、再生砕石の細粒分が流れ出し、舗装構造へ悪影響を与えることが懸念される。従って、A、E区間では、湧水の影響を直接受ける下層路盤を湧水に対し、耐久性の優れたセメント安定処理に変更した(図-8、9参照)。また、流下した湧水は各区間の境界部で図-7に示す縦断排水槽へ集水する。

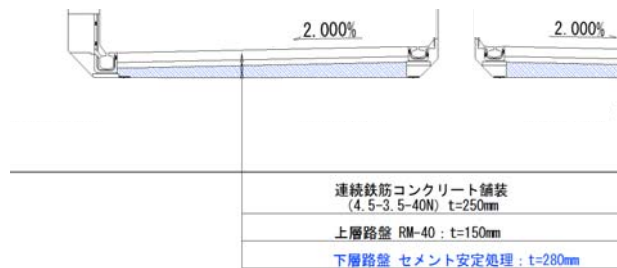


図-8 A区間標準断面



図-9 E区間標準断面

今回使用したセメント安定処理の仕様は、路盤のエロージョン抵抗性と使用材料の関係についてまとめた表-1より、エロージョンを防ぐためにクラスBのセメント量(約5%程度)が必要であることが分かる²⁾。セメント量と強度の関係についてまとめた過去の配合実績例³⁾を表-2に示すが、約4~5%のセメントを添加した場合の一軸圧縮強度は3N/mm²となる。また、NEXCOでは舗装の耐久性を確保するため、コンクリート舗装用路盤は原則としてセメント安定処理路盤を規定しており、その規格は表-3に示すように3N/mm²以上としている⁴⁾。従って、セメント安定処理の仕様は、目標一軸圧縮強度を3N/mm²を確保すれば強度的にも問題ないと考える。

表-1 路盤のエロージョン抵抗性と使用材料

分類	典型的な材料
クラスA: 非常にエロージョンしにくい	・最低7-8%セメント含むセメント安定処理路盤 ・最低6%アスファルト量を含むアスファルト混合物
クラスB: エロージョンしにくい	・5%程度のセメント量の プラント混合セメント安定処理路盤材料
クラスC: 条件次第でエロージョンが生じる	・3.5%程度のセメント量の プラント混合セメント安定処理路盤材料 ・3%アスファルト量を含むアスファルト混合物
クラスD: エロージョンしやすい	・2.5%程度のセメント量の プラント混合セメント安定処理路盤材料 ・現場混合の細粒セメント安定処理路盤 ・清浄かつ良好な粒度の粒状路盤
クラスE: 極めてエロージョンしやすい	・細粒分を多く含む、粒状路盤材

表-2 セメント安定処理の配合実績

現場名	目標強度を満足する添加量	目標強度
A	4.11%	一軸圧縮強度 3N/mm ²
B	3.88%	
C	4.35%	
D	4.35%	
平均	4.17%	

表-3 セメント安定処理の基準値

項目	工種	下層路盤	上層路盤	備考
CBR		60以上	-	処理後、 3日養生+4日水浸の値
一軸圧縮強度(N/mm ²)		-	3以上	処理後、 6日養生+1日水浸の値
現場締固め度(%)		95以上*	100以上**	*試験便覧T011-E方法 **試験便覧T011-A方法

3. ポーラスコンクリート路盤に要求される性能項目

湧水対策として、路盤内への滞水が懸念される箇所については、前述のように下層路盤をポーラスコンクリートへ変更した。一般的にポーラスコンクリートは、表層に使用され、要求される性能項目は、表-4 に示すように強度（曲げ強度）と透水性^{5), 6)}である。これまでの下層路盤でのポーラスコンクリートの使用事例は、東京外環道で一部あるものの、その事例は極めて少なく、性能項目は確立されていない。そこで本稿では、下層路盤で要求されるポーラスコンクリートの性能項目について検討した。

表-4 一般的なポーラスコンクリートの性能

項目	重交通車道用 (一般)	軽交通車道用 または歩道用
強度(曲げ強度)	4.5N/mm ²	2.5N/mm ²
透水性(透水係数)	0.01cm/s以上	0.01cm/s以上

4. ポーラスコンクリート路盤の強度に対する検討

B, D 区間でポーラスコンクリートが使用されるのは、躯体コンクリート直上の調整コンクリート上である。そのため、曲げ作用による変形（ひずみ）はほとんど発生せず、輪荷重と躯体コンクリートに挟まれることで鉛直方向の圧縮力が働くと考えられる。そこで、FEM 解析を行うことで発生する応力を検討するとともに、経験的な知見も合わせ、強度に対する要求性能を検討した。

4-1 FEM による検討

1) 使用ソフト

コンクリート舗装の FEM 解析ソフトとしては、石川工業高等専門学校西澤教授が開発されたフリーソフトである Pave-3D の汎用性が高く、本検討でも Pave-3D を用いることとした。

2) 解析モデルの舗装断面

本検討で使用するモデルの舗装断面を図-10 に示す。本検討では、舗装が完成し供用した後の状

態を想定した解析ケース 1，ポーラスコンクリートの打設が終了し、下層路盤を施工している状態を想定した解析ケース 2 の 2 ケースの解析を実施した。ポーラスコンクリートと調整コンクリートの付着については、付着がある場合とない場合をそれぞれ検討した。各舗装材料の弾性係数及び、ポアソン比は舗装設計便覧で使用されている値を参考に設定した⁷⁾。

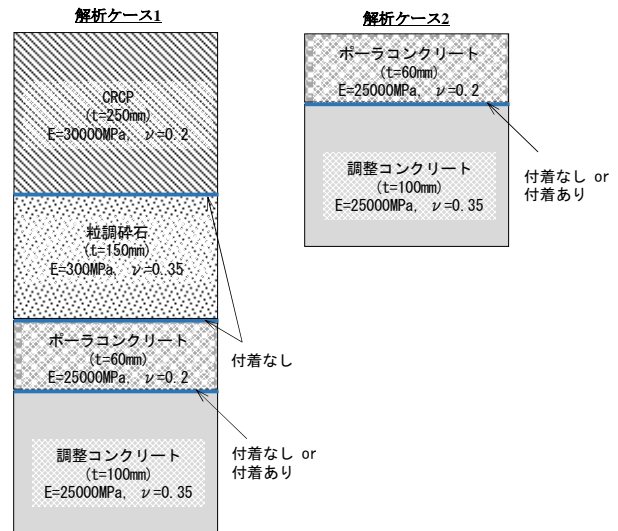


図-10 モデル化した舗装構造

3) 解析条件

モデル化した舗装平面及び、荷重載荷位置を図-11 に示す。解析モデルの平面寸法は、縦方向が一般的なコンクリート舗装版の解析で使用される 10m，横方向が 1 車線分の長さである 3.5m のとした。境界条件は、安全側になるようにすべて自由端部とした。また、荷重は条件的に不利となるシングルタイヤの輪荷重 5 t (20 t/4) とした。

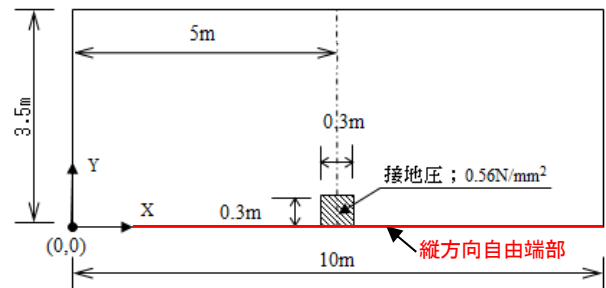


図-11 解析モデル平面

4) 解析結果

a) 解析ケース 1

解析ケース 1 の縦方向自由端部ポーラスコンクリート下面に発生する引張応力を図-12 に示す。

ポーラスコンクリートと調整コンクリートを付着させた場合は、ポーラスコンクリート下面には、圧縮応力が発生した。ポーラスコンクリートと調整コンクリートを付着させない場合は、ポーラスコンクリートの下面には、引張応力が発生した。しかし、その大きさは最大で 0.016N/mm^2 と非常に小さい値であった。これは、通常のコンクリート舗装版下面に発生する引張応力の約 $1/100$ 以下程度である。この理由としては、ポーラスコンクリートが十分に深い位置に設置され、また、ポーラスコンクリートより下の層がコンクリートであるため、曲げ作用が発生しないことが考えられた。縦方向自由端部中心部（ $(X, Y) = (5\text{m}, 0)$ ）のポーラスコンクリートに発生する S_x , S_y 及び S_z を表-5 に示す。数値の符号は、プラスが圧縮、マイナスが引張の応力を示す。

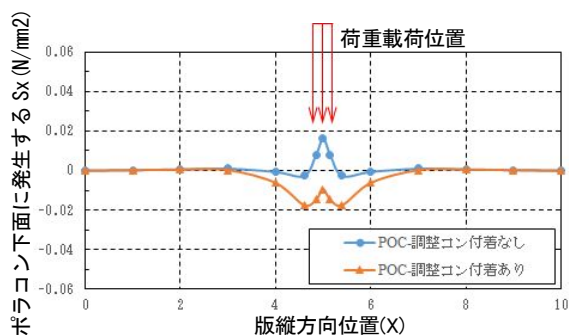


図-12 ポラコン下面に発生する S_x (ケース 1)

表-5 荷重位置での発生応力(ケース 1)

解析条件 ポラコン位置	POC調整コン付着なし			POC調整コン付着あり		
	S_x	S_y	S_z	S_x	S_y	S_z
ポラコン上面	-0.0162	-0.0091	-0.0890	-0.0371	-0.0161	-0.0885
ポラコン中央	0.0001	-0.0030	-0.0886	-0.0222	-0.0140	-0.0887
ポラコン下面	0.0161	0.0038	-0.0881	-0.0095	-0.0162	-0.0901

表-5 から各軸方向に発生する応力は非常に小さい値であり、 z 軸方向に発生する圧縮応力も 0.09N/mm^2 程度であることがわかる。ポーラスコンクリートの圧縮強度と曲げ強度の関係は、淀川左岸線の試験結果から概ね（圧縮強度） $=7\sim 8\times$ （曲げ強度）の関係⁸⁾であり、通常のコンクリート舗装版下面に発生する応力と比べ、非常に小さい値である。この解析には、舗装材料の自重は含まれていないが、ポーラスコンクリートに上載する舗装材料は 40cm 程度であるため、ほとんど

影響のない程度である。また、Pave-3D で対象とする荷重荷重は鉛直方向であるため、制動時のずれせん断応力あるいは水平方向応力の発生は考慮できない。しかし、今回の鉛直方向荷重で発生する応力の程度を考慮した場合、仮に制動による水平応力を入力したとしても、その影響は非常に小さいと考える。以上の解析結果より、一般車両供用中にポーラスコンクリートに発生する応力は調整コンクリートの付着に関係なく、非常に小さい値であることが分かった。

b) 解析ケース 2

解析ケース 2 の縦方向自由端部のポーラスコンクリート下面に発生する引張応力を図-13 に示す。解析ケース 1 と比較すると、荷重がポーラスコンクリートの直上に載荷されるため、発生する応力が大きくなった。ポーラスコンクリートと調整コンクリートを付着しない場合において最大となる S_x は 0.0233N/mm^2 であり、解析ケース 1 の結果と比較すると 40% 程度大きくなったが、応力としては非常に小さい値であった。また、ポーラスコンクリートと調整コンクリートが付着した場合は、版が一体となるため、圧縮応力が大きくなった。しかし、その大きさは 0.17N/mm^2 程度であり十分に小さい値であった。縦方向自由縁部の荷重荷重位置中央部（ $(X, Y) = (5\text{m}, 0)$ ）でポーラスコンクリートに発生する S_x , S_y 及び S_z を表-6 に示す。

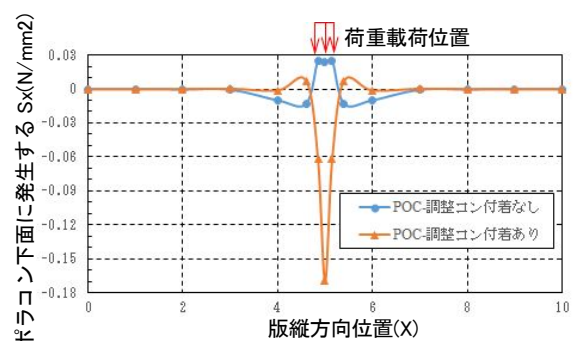


図-13 ポラコン下面に発生する S_x (ケース 2)

表-6 荷重位置での発生応力(ケース 2)

解析条件 ポラコン位置	POC調整コン付着なし			POC調整コン付着あり		
	S_x	S_y	S_z	S_x	S_y	S_z
ポラコン上面	-0.1081	-0.1215	-0.6838	-0.2261	-0.1826	-0.6719
ポラコン中央	-0.0225	-0.0067	-0.6698	-0.1638	-0.1159	-0.6661
ポラコン下面	0.0233	0.0600	-0.6735	-0.1694	-0.1629	-0.6967

表-6 に示すように、ポーラスコンクリートの下面の引張応力は、ポーラスコンクリートと調整コンクリートを付着させない場合、 S_x よりも S_y の方が大きくなった。これは、ポーラスコンクリートの下が調整コンクリートであり、曲げ作用がほとんどなく、 y 軸方向にも拘束がないため、自由に変形できる y 軸方向に変形する挙動を示したからである。ポーラスコンクリートに作用する引張応力としては、 $S_y=0.06\text{N/mm}^2$ であり、通常のコンクリート舗装版下面に発生する応力と比べ、十分に小さい値であった。鉛直方向の圧縮応力 (S_z) は解析ケース 1 と比較すると、載荷荷重が直上になるため、7~8 倍程度大きくなった。しかし、ポーラスコンクリートに作用する圧縮応力としては、小さい値であった。

5) 解析のまとめ

本検討では、一般供用後及び、工事中の状態を FEM でモデル化し、ポーラスコンクリートに発生する応力を検討した。その結果、ポーラスコンクリートと調整コンクリートの付着によらず、ポーラスコンクリート下面に発生する曲げによる引張応力は、ほとんど発生しないことが分かった。よって、B, D 区間で使用するポーラスコンクリートは、圧縮強度で強度性能を定めることとした。また、圧縮強度は通常の調整コンクリートと同様に 18N/mm^2 を確保していれば、十分な強度を有すると言える。

4-2 経験的な知見からの検討

上記の検討結果より、下層路盤で使用するポーラスコンクリートの設計強度は 18N/mm^2 以上とすればよいと考えるが、これまで軽交通路線で使用されている舗装用ポーラスコンクリートは設計曲げ強度 2.5N/mm^2 以上を標準としている⁶⁾。よって、施工性等を考慮した場合、軽交通路線用を満足するポーラスコンクリートである方が望ましいと考える。ポーラスコンクリートの圧縮強度と曲げ強度の関係は概ね (圧縮強度) = 7~8 × (曲げ強度) の関係があり³⁾、曲げ強度 2.5N/mm^2 以上に換算される圧縮強度は $17.5\sim 20\text{N/mm}^2$ 以上と

なる。従って、B, D 区間で使用するポーラスコンクリートは、圧縮強度 20N/mm^2 以上を基準値とするのがよいと考える。

5. 透水性及び排水性に対する検討

今回使用するポーラスコンクリートの透水係数は、従来使用される $1\times 10^{-2}(\text{cm/s})$ を確保すればよいと考える。ただし、空隙詰まりも考慮し、空隙率は従来の 15%⁵⁾ ではなく、交通用あるいは歩道用で採用されている 20% とし、透水係数 $1\times 10^{-2}(\text{cm/s})$ 以上の透水性を確保する。

導水計画として、上流からの流水は縦断排水層として設置される導水マットやポーラスコンクリート層などの導水設備へ誘導し、排水性を確保した。排水性舗装の排水能力については、土木研究所が発刊した「道路路面雨水処理マニュアル(案)」⁸⁾ に手順が示されているが、その排水能力は、導水管の能力によって決定される。排水性舗装の導水管の排水能力としては、過去の研究から $\phi 20\text{mm}$ 程度であれば、豪雨に対しても十分な排水能力を持つとされている⁹⁾。従って、ポーラスコンクリートの縦断排水層に設置する導水パイプについても、同様の構造であれば排水能力を持つと考えられるが、将来的な透水能力、排水能力を考慮し $\phi 25\text{mm}$ の透水管を設置した。

6. ポーラスコンクリートの要求性能と仕様 のまとめ

以上の検討結果から、要求される性能及び、その他の仕様を表-7 に示す。

表-7 要求性能及び仕様

分類	性能	項目	基準値	備考
要求性能	強度	圧縮強度	20N/mm^2 以上	空隙率管理基準上限値でも満足させる
	透水性	透水係数	0.01cm/s 以上	
仕様		骨材最大寸法	15mm	プラントで準備可能な粗骨材を使用
		空隙率	$20\%\pm 3.5\%$	
		厚さ	60mm	調整コンとの間に付着材は使用しない 骨材最大寸法の4倍

7. まとめ

本稿の検討結果のまとめを以下に示す。

- ① 本検討では「湧水が路盤内に滞水しないよう、速やかに排水できる構造とする」「湧水に対し耐久性の高い路盤を構築する」という2つの設計思想に基づいて湧水対策を検討した。
- ② 縦断勾配が緩い区間では、湧水が路盤内に滞水しないよう、速やかに排水できる構造を構築するため、下層路盤を再生砕石から調整コンクリート及び、ポーラスコンクリートに変更した。
- ③ 縦断勾配のある区間では、湧水に対し湧水に対し、耐久性の高い路盤を構築するため、下層路盤を再生砕石からセメント安定処理に変更した。
- ④ B, D区間の下層路盤に使用するポーラスコンクリートは圧縮強度で強度性能を定めた。

謝辞：本検討は、鹿島道路(株)と工事契約の中で実施し、貴重なご意見を頂いている。また、阪神高速道路(株)技術審議会構造技術委員会舗装委員会及び、分科会の委員の方々にご指導頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：舗装の維持修繕ガイドブック，2013.
- 2) 財団法人セメント協会：コンクリート舗装の補修技術資料，2015.
- 3) 中山栄作・高田佳彦・鈴木威・森重和・鎌田修：高速道路本線上におけるポーラスコンクリート舗装の室内試験による配合検討，舗装工学論文集第17巻，1_147，2012.
- 4) NEXCO：設計要領第一集舗装編，p19，2013.
- 5) 全国生コンクリート工業組合連合会：ポーラスコンクリートの製造・施工の手引き（舗装編），2011.
- 6) 財団法人セメント協会：車道用ポーラスコンクリート舗装設計施工技術資料，2007.
- 7) 公益社団法人日本道路協会：設計便覧，p79，2006.
- 8) 独立行政法人土木研究所：道路路面雨水処理マニュアル（案），土木研究所資料第3971号，2005.
- 9) 大久保和正・大川英雄・帆苅浩三；排水性舗装用導水管の設置効果（排水効果）に関する実大供試体による検討，第23回日本道路会議一般論文集(C)，pp.14-15，1999.

WATER SEEPAGE COUNTERMEASURES FOR THE ROADBED OF AN OPEN CUT TUNNEL: AN APPLICATION OF POROUS CONCRETE

Shunsuke KASE, Koichi SUGIOKA and Tetsuya HOSHIZUMI

Water seepage occurs at some joints and cracks in an open cut tunnel on the Yamatogawa Route. Since ordinary waterproofing measures did not work, a draining system was constructed by using porous concrete. The design concepts were to ensure quick draining performance of the system and to provide high durability to the roadbed under exposure to water seepage. It was necessary to determine the performance of porous concrete as the roadbed because of few experience of using the material for that purpose. This paper describes the water seepage countermeasures for the roadbed of an open cut tunnel and the performance of porous concrete used as the roadbed.

加瀬 駿介



阪神高速道路株式会社
建設・更新事業本部堺建設部設計課
Shunsuke Kase

杉岡 弘一



阪神高速道路株式会社
建設・更新事業本部堺建設部設計課
Koichi Sugioka

星住 哲也



阪神高速道路株式会社
建設・更新事業本部堺建設部設計課
Tetsuya Hoshizumi