

高耐圧・目詰り耐久型ジオテキスタイル排水材を用いた路盤排水対策

— 目詰まり耐久性の評価とトンネル坑内仮設道路のトラフィカビリティー改善効果 —

高橋 真一 山岸 克彰
 平間 邦興 上野 孝之

Road Drainage System Using Highly Compressible and Long-term Permeable Geotextile

— Evaluation of Long-term Permeability and Application to Trafficability in a Tunnel —

Shinichi Takahashi Katsuaki Yamagishi
 Kunioki Hirama Takayuki Ueno

Abstract

Nearly all temporary roads in a tunnel are constructed using muck. If seepage water appears on the road, trafficability worsens. In order to attain trafficability, a highly compressible geotextile called "ART-DRAIN" for drainage has been developed. ART-DRAIN is characterized by high compressibility and long-term permeability. A Model permeability test was carried out for 3 years to estimate the long-term permeability of ART-DRAIN and transfer characteristics of fine grain soils round the drain, and showed that permeability of the drain was kept. Several site experiments using ART-DRAIN have been conducted, and have indicated that roads using ART-DRAIN run dry and provide trafficability.

概要

「掘削ずり」を利用する一般的なトンネル内仮設道路に湧水が浸出すると「わだち」や泥状化が進展する。その結果、仮設道路のトラフィカビリティーが極端に低下し、路盤管理に多くの労力を要している。ジオテキスタイル排水材を用いた仮設路盤の排水対策を行うため、まず仮設道路の使用条件を考慮して大きな耐圧性と長期目詰まり耐久性の向上を図るため細粒分透過型フィルターの有するジオテキスタイル排水材：呼称ARTドレーンを開発した。次にARTドレーンの目詰まり耐久性を長期模型透水実験により検証するとともに、いくつかのトンネル坑内仮設道路において路盤排水対策を行った。その結果、細粒分透過型フィルターの効果により排水材の目詰まりの発生は生じないことを確認するとともに、効率よい浸透水の集排水と路盤の支持力維持が確認され、トンネル坑内路盤のトラフィカビリティーの改善効果が得られた。

1. はじめに

トンネル工事中の坑内仮設道路は、掘削用重量機械やずり出し用重量機械の頻繁な走行によって大きな繰返し荷重を受けるため、トラフィカビリティー確保の対策が重要である。対策方法としては、①鋼板の敷設、②簡易なコンクリート舗装、③良質な購入碎石の投入、が用いられるが、コストや撤去処分方法の問題などを抱え、現実的には、掘削ずりを敷設したまま仮設道路として使用することが多い。一方、坑内の排水対策は、側壁に沿って掘り込んだ簡単な側溝や釜場排水などを用いることが多く、路盤からの湧水が多い所では路盤表面への湧水の浸出を抑える効果は少ない。その結果、路盤からの湧水が発生する坑内仮設道路では、Fig. 1に示すように大きなわだちの発生や、路面の泥状化などトラフィカビリティーが悪化を招き、維持管理に多くの労力を要しているの現状である。

著者らはこれまでに、耐圧性と耐目詰まり性に特徴を持つジオテキスタイル排水材（呼称ARTドレーン）を

開発し、基本特性について室内試験を行うとともに坑内仮設道路の路盤排水に適用しその効果を示した¹⁾。この報文では、長期透水模型実験を用いた目詰まり耐久性の検証とともに坑内仮設道路への適用とその効果について示す。

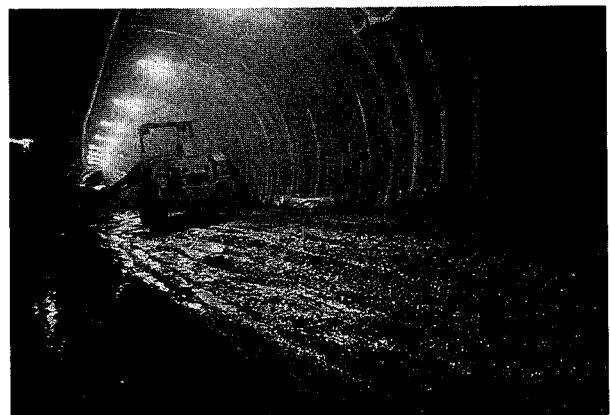


Fig. 1 湧水が発生している路盤状況
 Worsened Temporary Road in a Tunnel

2. 湧水が発生する路盤

路盤材に掘削ずりを利用した2箇所のトンネル施工現場の試料を用いて締固め試験とCBR試験を行った。粒度特性をFig. 2に示す。両試料とも細粒分が比較的少ない良質な材料である。Fig. 3は、CBR試験結果である。CBR試験は、含水比の上昇による路盤の支持力特性を把握するために、締固め後水浸せず貫入試験結果を行った。両試料とも最適含水比 (w_{opt}) から2%程度とわずかな含水比の増加で、CBR値はその最大値の1/10~1/5程度まで急激に低下している。

Fig. 4は、含水比と支持力特性の一般的な関係を示したものである。最適含水比以下の状態では、含水比の増加に伴って強度は増加するが、 w_{opt} を超えると含水比の増加に伴って強度は極端に低下する。一方締固めエネルギーを中心に考えると、 w_{opt} 以下では締固めエネルギーとともに強度も増加するが、 w_{opt} を超えると強度が低下する事となる。このことを路盤の含水比に状態と路盤上の車両走行に当てはめた場合、含水比が w_{opt} より小さな場合は、車両走行によって路盤はますます締固められ強度は増加するが、 w_{opt} より大きいと車両走行によって路盤強度は低下することがわかる。このことは、実際後述する適用場所で確認できた。

以上のことから、湧水が路盤表面へ浸出しないように適切な路盤排水を行い、路盤の含水比を上昇させないことが路盤支持力確保に重要であることがわかる。

3. ARTドレーンの耐久性

3.1 ARTドレーンの特徴

坑内仮設道路の路盤排水に用いるため、新たに開発したジオテキスタイル排水材ARTドレーンをFig. 5に示す。ARTドレーンは、

- 1) 工事用車両の走行に対する耐圧性 (最大40tf/m²)
- 2) 十分な排水能力 [動水勾配 $i=1$ で $k=100\text{cm/sec}$
厚さ3cm, 幅25cm(標準)]
- 3) 長期間にわたり目詰まりすることなく排水機能が維持できるように、目詰まりの原因となる微細土粒子対策として微細土粒子透過性フィルターを採用などの特徴を有する¹⁾。

3.2 ARTドレーンの目詰り耐久性(長期通水性)

Fig. 6は、模型土槽を用いた長期排水模型実験の概要である。模型土槽 (幅40cm, 高さ40cm, 長さ150cm) 内にARTドレーン (幅20cm, 厚さ3cm, 長さ150cm) を覆土厚さ20cmで敷設し、動水勾配が1となるよう水頭差20cmの定水位状態で長期間排水実験を行った。なお、土試料は坑内路盤で使用されている材料を想定して細粒分約15%を含む山土を、給水は水道水を使用した。

Fig. 7は、排水量の時間変化である。約30日ではほぼ定常状態となり、その後約3年間にわたって同程度の排水

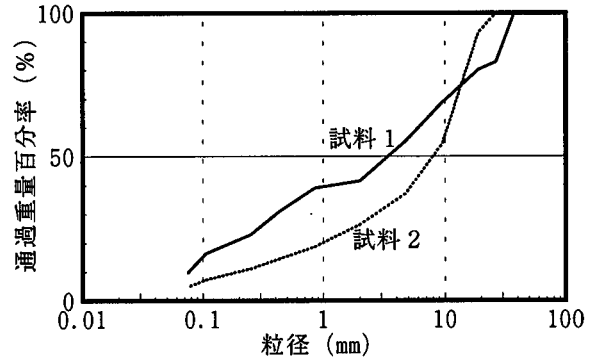


Fig. 2 路盤材の粒度特性
Grain Size Distribution of Muck

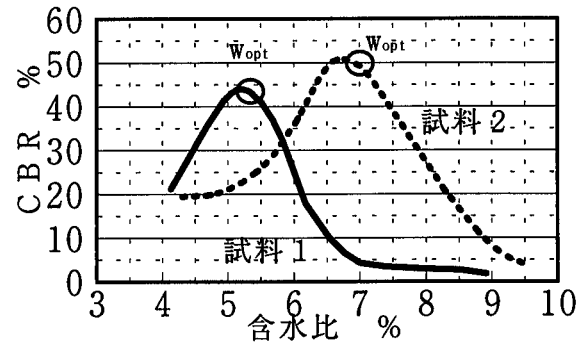


Fig. 3 CBR試験結果
Results of Compaction Tests

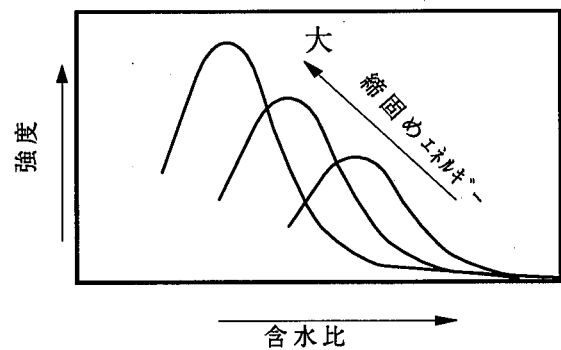


Fig. 4 含水比と支持力
Bearing Capacity with Water Contents Variation

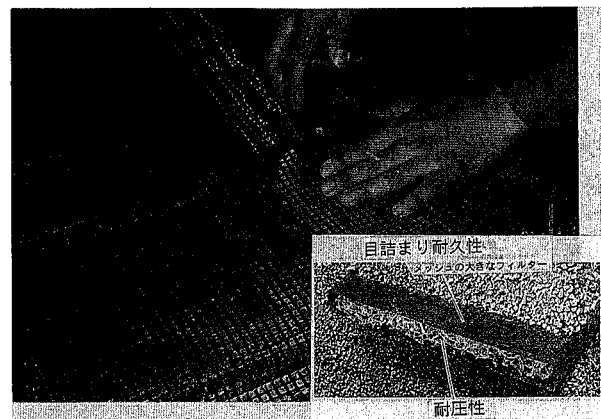


Fig. 5 ジオテキスタイル排水材 (ARTドレーン)
ART-DRAIN

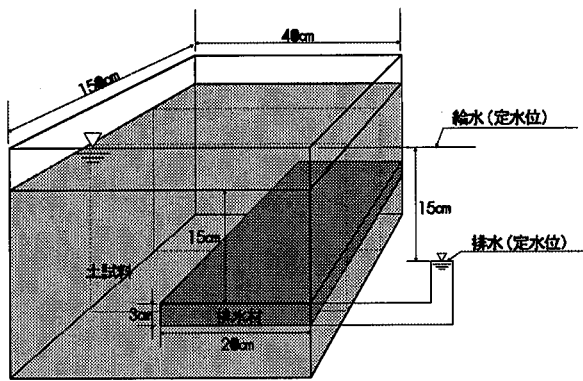


Fig. 6 長期排水模型実験の概要
Overview of Long-term Permeability Model Test

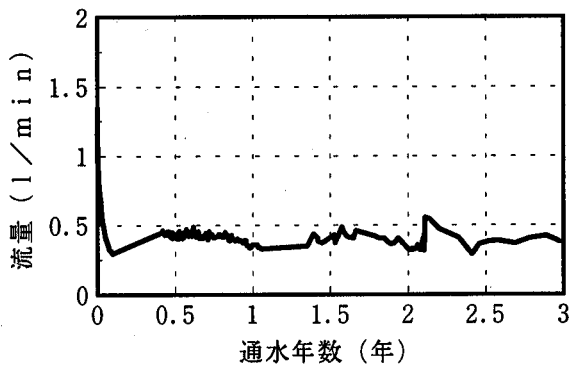


Fig. 7 排水量の経時変化
Result of Model Test

量を維持している。ARTドレーンの良好な長期排水性が確認できた。

長期排水性を土粒子の移動の観点から検討するため、排水実験終了後模型地盤の粒度試験を行った。Fig. 8には粒度試験の位置関係を示した。Fig. 9は、細粒分(75 μ m以下)の分布である。排水材周辺では細粒分が減少し、目詰まりは発生せず良好な透水性を維持していることがわかる。排水材周辺の細粒分は、排水材周辺にとどまることなく排水材内へ流入し、排水材、およびその周辺土の透水性を確保するというARTドレーンの目詰まり耐久性のシナリオが確認できた。

Fig. 10は、各試料の粒度特性の差異を用いてシルト分、粘土分の移動量を推定した結果である。排水材周辺ではシルト分、粘土分とも流出が多く、Fig. 9で示した細粒分の分布を違った角度から示した結果となっている。また、排水材周辺以外にも細粒分の流出と蓄積が随所で発生している事が確認できる。

ところで、大量の土粒子がフィルター内へ流入してくるのはフィルター機能上好ましくない。ARTドレーンを用いた今回の実験結果から、通水実験中に通水とともに排出される細粒分は透水直後のみであるとともに、ARTドレーン内に残留した細粒分量も実験終了後の観察によってARTドレーン内への細粒分の流入量は下部に薄く分布する程度と少量であることを確認した。この結

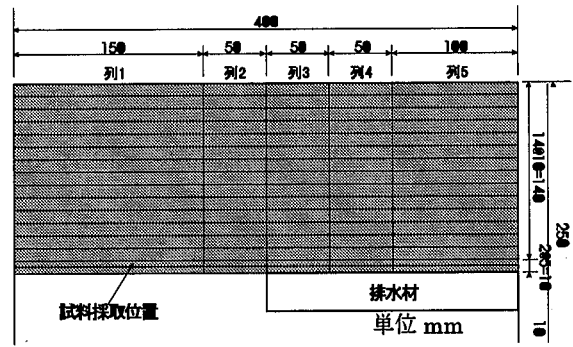


Fig. 8 粒度試験試料
Position of Grain Size Distribution Tests

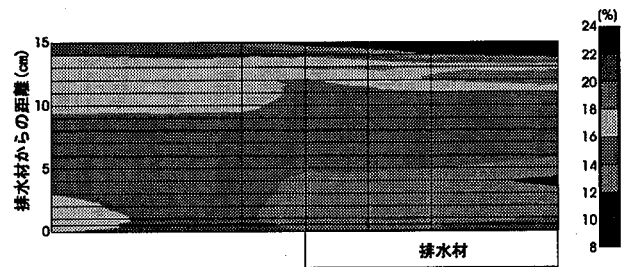
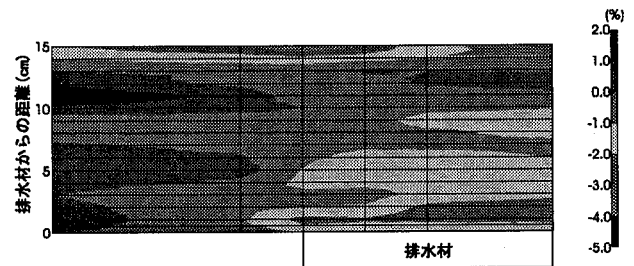
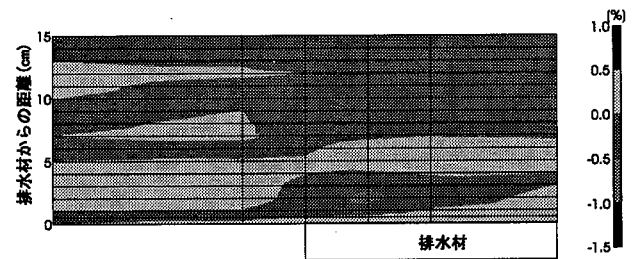


Fig. 9 細粒分含有率の分布
Distribution of Fines Content Ratios



(1)シルト分



(2)粘土分

Fig. 10 シルト分・粘土分の移動推定分布
Distribution of Moved Fines Volume

果、ARTドレーンはフィルター周辺の試料の流入を食い止めるフィルター機能も保持しているとともに、流入した細粒分で面内通水に障害が生じることはないことが確認できた。また、モールドを用いた室内透水実験からも、細粒分の流出は、通水開始後約数時間から10日間程度の通水初期の段階でほぼ終了することも確認している。

4. 路盤排水対策適用例と設計方法

4.1 京都市高速鉄道烏丸線宝が池トンネル工事

宝が池トンネルは、延長約1,030m、岩質はチャートや頁岩が主体で機械掘削のトンネルである。路盤排水を施工する前は、路盤面の一部から浸出した湧水が路盤表面全体に広がり、路盤は不良な状態であった。そのため、トラフィカビリティーを確保するためには、頻繁な路盤維持作業が必要であった。

ARTドレーンを用いた路盤排水対策は、多段ベンチカットで掘削施工が進む状況で、仮設道路としての使用期間が最も長い下半掘削時の仮設道路で行った。

Fig. 11は、ARTドレーン（耐圧40tf/m²、断面：厚さ3cm×幅25cm、フィルターの開口径 $\phi_1=0.8\text{mm}$ ）の敷設状況である。敷設配置は、掘削断面や路盤材の透水性（透水係数 $k=10^{-3}\text{cm/sec}$ 程度）を考慮して、敷設深さは約50cm、敷設間隔1.2~2.6mとした。ARTドレーン敷設後は、比較的良質で含水比が低い状態（約4~6%）の掘削ずりを路盤材として埋戻し、バックホウなどのキャタピラ式建設機械を用いて締固めを兼ねた路盤表面整形を行った。また、ARTドレーンで集水した浸透水は、いったん30~100m間隔で設置した釜場に集水した後、ポンプによって場外排出した。

ARTドレーン適用後の路盤は、Fig. 12に示すように良好な状態が得られた。このトンネル現場では試験施工でトラフィカビリティー改善効果を確認した後、ほぼ工事全域で同様の排水対策を実施した。その結果、仮設道路使用期間中には大規模な路盤維持作業を行うことも無くトラフィカビリティーを確保することができた。

路盤排水によるトラフィカビリティー改善効果を定量的に把握するためARTドレーン敷設後に路盤の現場調査結果を行った。以下にその調査結果を示す。

Fig. 13は、路盤表面の含水比と土研式動的貫入試験を用いた路盤強度の経時変化である。路盤強度はARTドレーンによる排水効果で路盤の含水比が増加しないことに加え、坑内換気による乾燥のため、含水比は低下している。路盤強度は、車両走行による路盤締固め作用の影響もあり時間の経過とともに増加している。

Fig. 14は、ARTドレーンを敷設して約6ヵ月路盤排水対策を施した路盤の含水比深度分布を調査した結果である。ARTドレーン敷設深さ（約55cm）では約12%と高いものの、路盤表面に近づくほど低くなり、路盤表面近くでは約6%と低い含水比状態を維持していることがわかった。図中には室内毛管上昇実験の結果も付記した。路盤の地下水位はほぼドレーン敷設深さであったことから、ARTドレーン敷設面と室内実験での水面位置を合わせている。路盤の含水比分布は、室内毛管上昇実験の結果と良く一致し、含水比上昇の主な要因が毛管水の上昇であることがわかる。この結果から敷設深さを決めるに当たっては路盤材の毛管上昇高さを考慮することが必要であることがわかった。



Fig. 11 下半盤におけるARTドレーン敷設状況
Site View of Laying ART-DRAIN

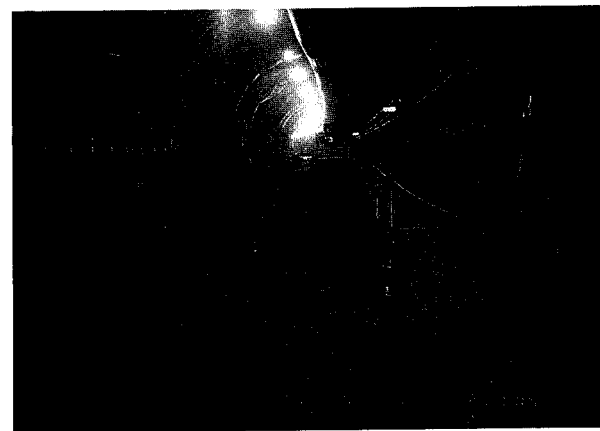


Fig. 12 ARTドレーン適用後の路盤状態
Temporary Road after Laying ART-DRAIN

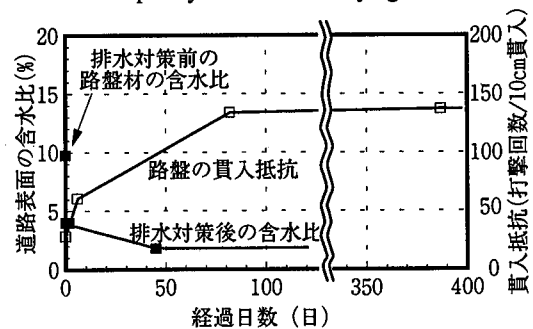


Fig. 13 路盤表面の強度と含水比の経時変化
Change of Bearing Capacity and Water Contents

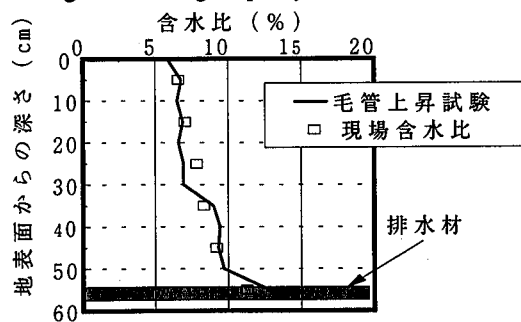


Fig. 14 含水比の分布
Water Contents Distribution

4.2 国道482号たんたんトンネル工事

全長約1,240mの山岳トンネル（兵庫県側620m区間）の建設工事である。岩質は宮津花崗岩が主体で、湧水等で含水比が上昇するとわだちが大きくなり十分トラフィカビリティーが確保できない状態が予想された。このトンネルでは、上り勾配であったため、切羽付近や側壁から浸透水は、自然流下で坑口側に流出してきた。そこでこの浸透水の排水を主な対象として、ARTドレーンを用いてインバートコンクリート上に中央部仮設センタードレーンを設置するとともに、3.5~5m間隔で横断方向に枝管をフィッシュボーン状に設置した。

適用したARTドレーンは、切羽で発生する浸透水の一部流入も加わった排水量を考慮して、耐圧40tf/m²、断面厚さ6cm×幅25cm、フィルター開口径φ_f=0.8mmと比較的大きな通水断面を有する仕様とした。

Fig. 15は、ARTドレーンの敷設状況である。インバートコンクリート打設2日後に敷設し、その後、埋戻して仮設路盤の使用を開始した。路盤埋戻し材には、比較的良質で含水比が低い状態（約7~10%）の掘削ずりを選定して用いるとともに、埋戻し厚さが最大約85cm（中央部）と比較的厚いことから2層に分けて重機転圧を行った。土研式貫入試験を用いて埋戻し後の路盤の強度を調査した結果をTable 1に示す。この表から重機転圧や車

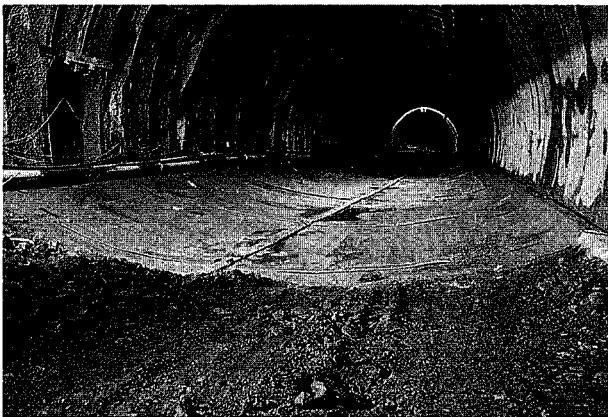


Fig. 15 インバート部のARTドレーン敷設状況
Site View of Laying ART-DRAIN

両走行の開始に伴い、支持力が増加していることがわかった。先に示した宝が池トンネルと同様に車両走行による大きな締固め効果が認められた。なお、重機走行前の状態で車両走行（20トンダンプ）を行ったところ、路盤には大きなわだちが発生し、路盤の支持力不足が確認された。締固め路盤が必要な支持力を有するように締固めを適切に行う必要が有るのは、湧水対策の有無に関わらず一般的な道路施工と同様である。

Fig. 16は、仮設道路として使用開始後の路盤状態である。路盤への浸透水の浸出は認められず良好な状況が確保できた。

ARTドレーンで集水した浸透水は、40~100m間隔で設けた釜場から場外へ排水した。Fig. 17は排水量の経時変化である。ARTドレーン敷設延長にかかわらず各々の釜場から10~60l/分程度の浸透水が継続的に認められ、その合計量は、敷設延長に応じて増加している。ARTドレーンの長期排水能力が確認できた。

以上の一連のARTドレーンを用いた路盤排水対策の結果、トラフィカビリティーが確保され、ズリ出し用の20トンダンプのスムーズな走行が可能となった他に、2次巻きコンクリート打設用スライディングフォームの移動作業時に大規模な路盤手直しが不要であったなどの施工全般に及ぼす効果も確認できた。

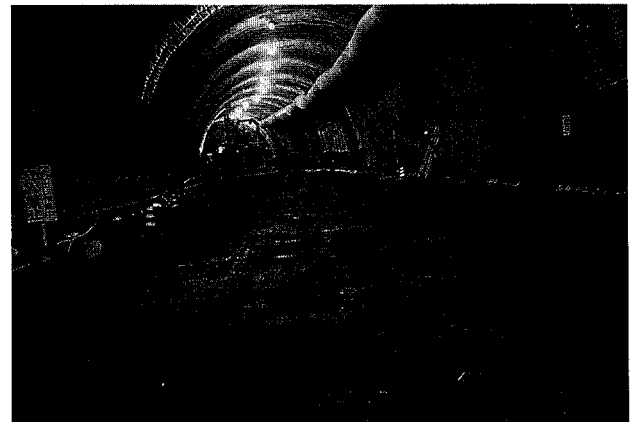


Fig. 16 ARTドレーン適用後の路盤状況
Temporary Road after Laying ART-DRAIN

Table 1 路盤の支持力の時間変化
Bearing Capacity of Temporary Road

調査状態	土研式貫入試験結果 (10cm貫入に要する 打撃回数)
路盤埋戻し直後 (重機転圧前)	18回
重機転圧直後 車両走行なし	60回
重機転圧後 車両走行9日目	170回

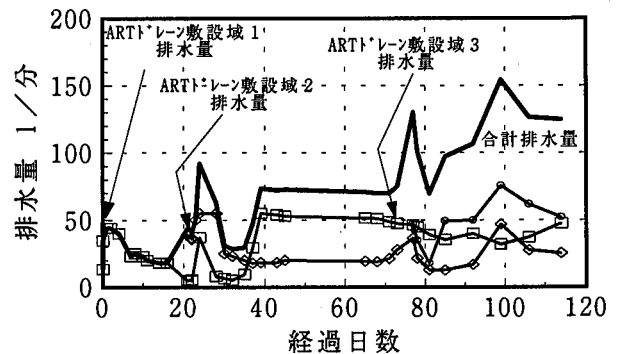


Fig. 17 排水量の経時変化
Drainage Water Volume

4.3 阪神高速道路北神戸線唐櫃東トンネル

延長約1,070m 2本の上下線双設トンネルで、岩質は主として風化花崗岩、上り勾配である。先に示した「たんたんトンネル」と同じ目的でインバートコンクリートの埋戻しに先立ち、インバートコンクリート上の仮設センタードレーンとして全域で敷設した。敷設方法も先に示したたんたんトンネルと同様に、フィッシュボーン状で配置するとともに、特に湧水量が増加した場所では、Fig. 18に示すように横断方向の枝管部にはARTドレーンを、センター部分には通水断面の大きな有孔管(鋼管φ15cm)を適用した路盤排水を行った。

ARTドレーン敷設後は掘削ずりを用いて埋戻し、路盤として使用した。数カ所に設置した釜場からは連続的に集排水を行うとともに、路盤は車両走行によるわだちが発生しない強度を維持し、良好なトラフィカビリティーを確保する事ができた。なお、排水量を計量した釜場からは100 l /分程度が排水された。

4.4 ARTドレーン敷設間隔の設計

前述の適用事例を集約すると、ARTドレーンを用いた路盤排水対策の効果を引き出す主要因を整理すると、

- 1) 良質な路盤材料の選定
- 2) 初期締固めによる路盤強度の確保
- 3) 排水材の耐圧性やフィルターが目詰まり耐久性
- 4) 適切なドレーン敷設間隔

が挙げられる。このうちドレーン敷設間隔は、Fig. 19に示すような境界条件を想定すると、敷設間隔Lと水面高さ h_{max} の関係式は次式で与えられる。

$$L = 2 h_{max} \sqrt{\frac{k}{q}} \dots\dots (1)$$

- ここに、L : ARTドレーンの敷設間隔
 h_{max} : ドレーン間での最大水位
 q : 湧水量
 k : 路盤の透水係数

これに加えて、実際には宝が池で確認できた毛管上昇の影響も考慮した最低敷設深さ以上の深さに敷設することが必要となる。これまでの現場適用の結果から考えれば、その最低敷設深さは、30cm程度と考えられる。

5. まとめ

湧水が浸出する坑内仮設道路に、耐圧性、目詰まり耐久性の大きなジオテキスタイル排水材ARTドレーンを敷設した結果、路盤表面への湧水の浸出抑制効果、路盤のトラフィカビリティー確保、の効果が確認された。良好な路盤は、車両のスムーズな通行(車両運搬の効率化)、比較的良質な現場発生土の有効活用(新規購入土量の低減など)、ドライワーク化、仮設作業の効率化(移動式コンクリート型枠移動固定作業の省力化など)、路盤補修作業の省力化など、作業性向上に寄与する幅広い波及



Fig. 18 インバート部のARTドレーン敷設状況
Site View of Laying ART-DRAIN

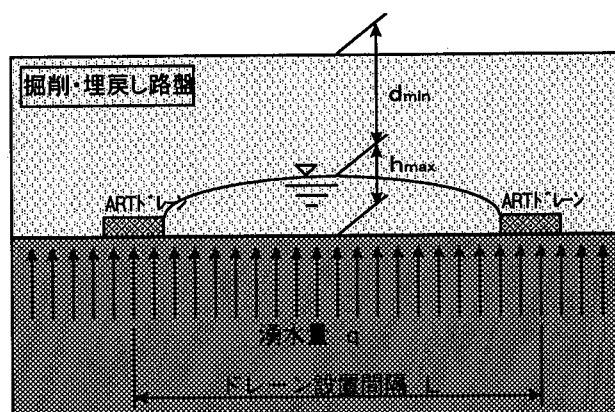


Fig. 19 ARTドレーン周辺の浸透水の想定図
Seepage Water Line Image around ART-DRAIN

効果が認められた。

また、現場適用を通じて、ドレーンを敷設する際には単に所定の深さにドレーンを設置するだけでなく、敷設時の路盤掘削方法や路盤埋戻しに使う掘削ずりの含水状態の考慮などその効果の善し悪しに大きく影響するいくつかの知見を反映させる必要性がわかった。

謝辞

施工に際しご指導賜りました京都市交通局高速鉄道本部建設部第3建設事務所、兵庫県豊岡土木事務所、阪神高速道路公団神戸第一建設部山手工事事務所、ならびにARTドレーンの共同開発にあたりご協力を賜りました東洋紡績(株)、繊維土木開発(株)に対しまして謝意を表します。

参考文献

- 1) 高橋, 西林, 山岸: ARTドレーンを用いた路盤排水によるトンネル坑内仮設道路のトラフィカビリティー確保, 大林組技術研究所報, No.52, (1996)