

泥水式シールド工法による道路トンネルにおける 流動化処理土の路床材への適用

足立 幸郎¹・高磯 徹²・東出 明宏³

¹正会員 工博 阪神高速技術株式会社 維持事業部（〒541-0054 大阪市中央区南本町 4-5-7）

²阪神高速道路株式会社 神戸建設部・企画グループ（〒650-0041 神戸市中央区新港町 16-1）

³正会員 株式会社大林組 本店・阪神高速伏見工事事務所（〒612-0004 京都市伏見区深草相深町 2-3）

泥水式シールド工法において発生する二次処理土は一般に、産業廃棄物として処分される。道路トンネルに適用される泥水式シールド工法では掘削断面積が 100 m²を超える大断面となるため、発生する二次処理土量も莫大なものとなる。これに対して、産業廃棄物の減量化という社会の要請や、道路建設費のコストダウンを実現するためには、この二次処理土量を減量化する必要がある。

本稿では、泥水式シールド工法において二次処理土として処理される余剰泥水を固化材と混合して流動化処理土を製造し、これを道路トンネルのインバート部の路床材に適用した結果について報告する。

キーワード：泥水式シールド工法，流動化処理土，産業廃棄物，減量化，リサイクル，路床材

1. 工事概要

阪神高速 8 号京都線は 2001 年 1 月に制定された「京都市基本計画」に基づき、計画された自動車専用道路網であり、そのうちの（上鳥羽～第二京阪）間の 5.5 km 区間については高架構造で 2008 年 1 月 19 日に供用を開始している。



図-1 阪神高速 8 号京都線（山科～鴨川東）間概要図

一方、（山科～鴨川東）間は京都市東部の山科区と京都中心部とを結ぶ幹線道路が五条通と三条通の 2 路線しかなかった両地域を、東山連峰の南端に位置する稲荷山をトンネルで横断して結ぶ全長 2.7km の自動車専用道路であり、そのうち約 2.5km がトンネル構造で東行き線と西行き線の 2 つのトンネルからなっている（図-1 参照）。この稲荷山トンネルは地質や施工条件により 3 種類の工法が採用され、山科側は NATM 工法、鴨川東側は開削工法で既に施工済みであり、その間の約 855m がシールド工法区間である。

表-1 工事の全体概要

工事名	伏見工区トンネル工事
発注者	阪神高速道路株式会社
施工者	大林・佐藤・西武建設工事共同企業体
内径、延長	仕上り内径：φ 10.1m、掘削延長：約 855m×2
シールド機	φ 10.82m 岩盤対応型泥水式シールド機
セグメント	合成セグメント（嵌合方式、NM セグメント） 外径：φ 10.6m、厚さ：250mm、幅：1.5m

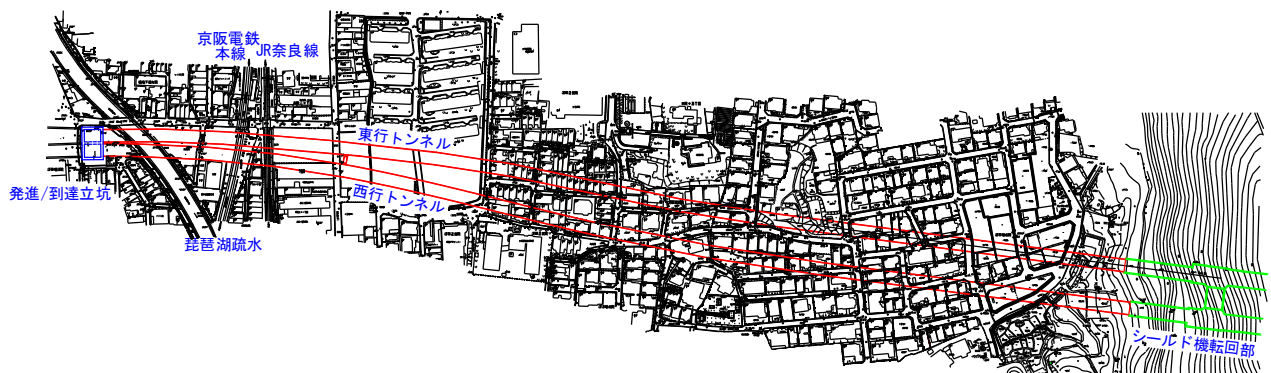


図-2 シールドトンネル区間平面図

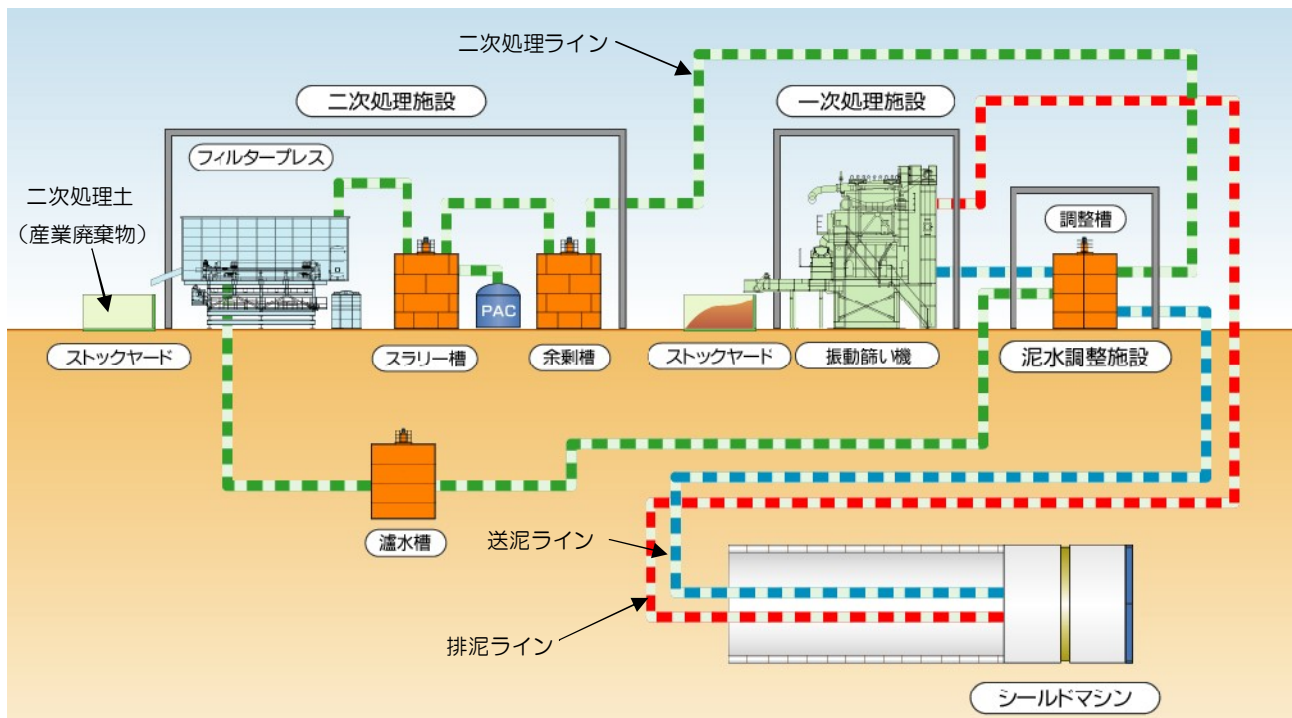


図-3 泥水式シールド工法のシステム図

平面図を図-2に示す。シールド機は鴨川東側の発進立坑より山科側に向かって掘進し、稲荷山の岩盤部に築造された転回部でUターンして発進立坑に戻ってくる計画である。工事の全体概要を表-1に示す。

2. 泥水式シールド工法における泥水処理

泥水式シールド工法では、図-3に示すように掘削土を泥水に混ぜて流体輸送し、地上の処理プラントで泥水と掘削土を分離する。分離後の泥水は掘削のために再利用し、掘削土は一旦、場内にストックされた後に場外へ搬出される。処理プラントは、粒径0.074mm以上の掘削土を振動ふるいによって分離する一次処理機と、0.074mm以下の掘削土を脱水によって分離する二次処理機（フィルタープレス）から

主に構成される。このようにして分離された掘削土のうち、二次処理機から排出される二次処理土は粘土分が多く含まれ、含水比が高いことから産業廃棄物として処分されるのが通例である。

今回のような道路トンネルに適用される泥水式シールド工法では掘削断面積が100㎡を超える大断面となるため、発生する二次処理土量も莫大なものとなる。これに対して、産業廃棄物の減量化という社会の要請や、道路建設費のコストダウンを実現するためには、この二次処理土量を減量化する必要がある。そこで、当工事では産業廃棄物の減量化による環境への貢献とコスト縮減を目的として、二次処理の対象となる余剰泥水に固化材を混合して製造した安定処理土（流動化処理土）をトンネル内の路床材として利用した。

3. 流動化処理土への要求性能

路床材に流動化処理土を適用する場合の基本要求性能として満足する必要のある項目は次の通り。

① 路床として必要な強度

路床として必要な強度は、路床の長期安定性確保の観点から設計される CBR=20 に相当する一軸圧縮強度 ($q_u=0.4\text{N/mm}^2$) に対して、安全率 $F_s=3.0$ を乗じた値以上を設計基準強度 ($\sigma_{28} \geq 1.2\text{N/mm}^2$) とする。安全率 $F_s=3.0$ は、日本道路公団「気泡混合軽量土を用いた計量盛土工法の設計・施工」(平成 8 年 9 月) ならびに (財) 土木研究センター「深層混合処理工法設計・施工マニュアル」(平成 11 年 6 月) における長期的な考慮が必要な場合の考え方に準じて設定した。

② 交通荷重に対し必要な強度

流動化処理土に作用する荷重は、舗装、路盤等の死荷重による応力度 q_{u1} と活荷重 q_{u2} の和で表わされる (図-4 参照)。

$$q_u = q_{u1} + q_{u2}$$

$$q_{u1} = \gamma_1 \times h_1 + \gamma_2 \times h_2$$

γ_1 : 舗装の単位体積重量 ($=2.3\text{ tf/m}^3$)

γ_2 : 路盤の単位体積重量 ($=2.0\text{ tf/m}^3$)

h_1 : 舗装の厚さ ($=0.25\text{m}$)

h_2 : 路盤の厚さ ($=0.15\text{m}$)

$$q_{u1} = 2.3 \times 0.25 + 2.0 \times 0.15 = 0.875\text{ tf/m}^2$$

$$q_{u2} = P(1+i) / \{ (B+2 \times Z \tan \theta) \times (L+2 \times Z \tan \theta) \}$$

P : 輪荷重 ($=10\text{tf}$)

B : 車輪輪帯幅 ($=0.5\text{m}$)

L : 車輪接地長 ($=0.2\text{m}$)

Z : 路面から流動化処理土上面までの深さ ($=0.4\text{m}$)

θ : 荷重分散角度 ($=45^\circ$)

i : 衝撃係数 ($=0.3$)

$$q_{u2} = 10 \times (1+0.3) / \{ (0.5+2 \times 0.4 \times \tan 45^\circ) \times (0.2+2 \times 0.4 \times \tan 45^\circ) \}$$

$$= 10\text{ tf/m}^2$$

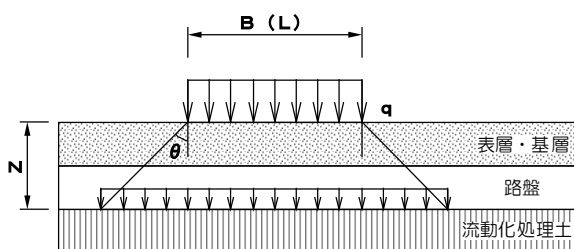


図-4 流動化処理土に作用する交通荷重

$$q_u = q_{u1} + q_{u2} = 0.875 + 10.0 \\ = 10.875\text{ tf/m}^2$$

ここで、長期的な安定が必要であるため、安全率 $F_s=3.0$ を乗じた値を交通荷重に対して必要な強度とする。

$$\sigma_{28} = 10.875 \times 3 = 32.6\text{ tf/m}^2 \approx 0.33\text{ N/mm}^2$$

③ 上部層施工時に必要な荷重

舗装、路盤部の施工にあたって、流動化処理土上に作業員や工事用車両が直接載ることが考えられる。この際に必要な応力度の検討は流動化処理土の上面の位置で行うものとし、ダンプトラックが走行する場合、接地面に作用する荷重および流動化処理土に発生する応力度を下式により算定する。

$$q_u = P_o/A = 10.0/0.152 = 65.8\text{ tf/m}^2$$

$$A = \pi \times r^2 = \pi \times 0.22^2 = 0.152\text{ m}^2$$

$$r = (12+P) / 100 = (12+10) / 100 = 0.22\text{ m}$$

P_o : 接地圧 ($=10\text{tf}$)

A : 接地面積 (m^2)

r : 接地半径 (m)

P : 輪荷重 ($=10\text{tf}$)

ここで、施工時の検討であるため安全率 $F_s=1.0$ とすると、工事用車両の通行に必要な流動化処理土の強度は以下になる。

$$\sigma_{28} = 65.8 \times 1.0 = 65.8\text{ tf/m}^2 = 0.66\text{ N/mm}^2$$

④ 耐久性から必要な強度

「鉄道構造物に用いる流動化処理土の設計施工法マニュアル (案)」に示されるトンネルインバート部に用いる流動化処理土の繰り返し載荷の実験結果より決定される。

これによると、 $q_{u28}=2\text{ N/mm}^2$ 、 6 N/mm^2 の供試体に対し、載荷周波数 20Hz の正弦波で、繰り返し載荷回数 150 万回、繰り返し載荷応力の両振幅 0.1N/mm^2 として、一定の載荷振幅による繰り返し載荷試験を行っている。実験の結果、沈下量は $q_{u28}=2\text{ N/mm}^2$ で 0.17mm 、 6 N/mm^2 で 0.11mm と微小であり、破壊にも至らなかった。ここで、「道路橋示方書」における T 荷重は 10.0tf であり、路面から流動化処理土までの厚さを 40cm 、荷重分散角度を 45° 、衝撃係数を 0.3 とすると $10.0\text{ tf/m}^2 (=0.1\text{ N/mm}^2)$ となり、上記試験条件と同等と考えられることから、耐久性から必要となる強度を 2 N/mm^2 と設定した。

以上より、インバート部の要求性能をまとめたものが表-2 である。

これに型枠脱型時の必要強度を考慮し、流動化処理土に求める強度特性を以下のように設定した。

- ・設計強度 : $\sigma_{28} \geq 2.0\text{ N/mm}^2$
- ・型枠脱型時の必要強度 : $\sigma_{16h} \geq 0.04\text{ N/mm}^2$

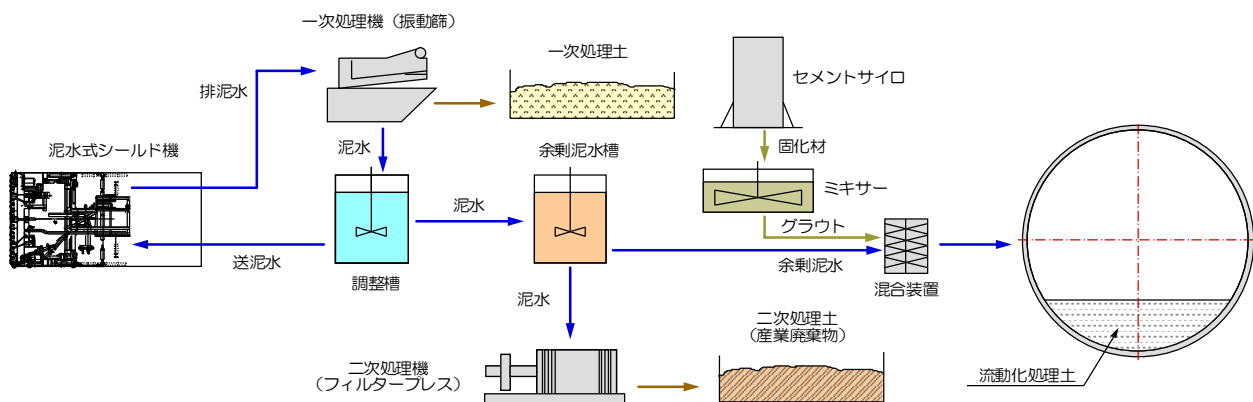


図-5 流動化処理土作製模式図

表-3 配合試験結果一覧表

配合 No.	固化材 の種類	流動化処理土 1 m ³ あたりの配合 (kg)						処理土	試験結果一覧				
		A液 (硬化液)			B液 (泥水)			の比重 (tf/m ³)	泥水フロ ー値 (mm)	ブリージン グ率 (%)	16時間強度 (N/mm ²)	7日強度 (N/mm ²)	28日強度 (N/mm ²)
		固化材	水	混和剤	泥水比重	泥水量	増粘材						
1	高炉 B種	350	175	1.75	1.20	850	0	1.38	550	4.8	0.068	1.35	2.48
2		350	175	1.75		843	15	1.38	478	1.2	0.093	1.58	2.63
3		350	175	1.75		841	20	1.39	453	0.7	0.079	1.60	2.95
4		350	175	1.75		838	25	1.39	460	0.3	0.094	1.59	3.12
5		300	150	1.50		864	30	1.35	473	0.5	0.037	0.88	1.78
6		325	163	1.63		866	20	1.37	470	0.5	0.063	1.25	2.31
7		375	188	1.88		815	20	1.40	475	0.4	0.122	2.01	3.10
8		375	188	1.88	1.17	793	25	1.38	543	1.6	0.068	1.57	2.88
9		375	188	1.88		791	30	1.38	510	0.8	0.094	1.59	2.74
10		375	188	1.88		788	35	1.39	478	0.5	0.102	1.61	2.82
11		325	163	1.63		839	30	1.36	495	0.5	0.039	1.10	2.15
12		350	175	1.75		815	30	1.37	523	0.4	0.072	1.21	2.36
13		400	200	2.00		766	30	1.40	510	0.5	0.088	1.95	3.69

表-2 要求性能のまとめ

①路床として必要な強度	1.2 N/mm ²
②交通荷重に対し必要な強度	0.33 N/mm ²
③上部層施工時に必要な強度	0.66 N/mm ²
④耐久性から必要な強度	2.0 N/mm ²

4. 流動化処理土の配合試験

流動化処理土の施工フロー図を図-5に示す。当工事では、坑内に中継ポンプを設置することなく流動化処理土の長距離圧送（1 km）を可能とするため、

泥水と固化液を2系統で別々に圧送し、打設場所で混合装置により混練する2液施工方式を採用した。

施工に際しては、現場で採取した泥水を用いて配合試験を行った。なお、現地発生土を使用した流動化処理土の場合、原料土の性状が大幅に変動し、強度等の性状におよぼす影響も大きくなることが予想される。よって、強度の変動係数を5～10%程度と仮定し、設計強度 2.0 N/mm² に対して割り増し係数 1.15 を乗じ、配合強度を 2.3 N/mm² とした。

配合試験の結果を表-3に示す。B液の増粘材はブリージングおよび材料分離の抑制のために使用した。強度特性およびブリージング率 1%未満（極めて精度の高い充填性が要求される場合や車道下に用いる場合に相当）を満足する配合の中から最も経済的な

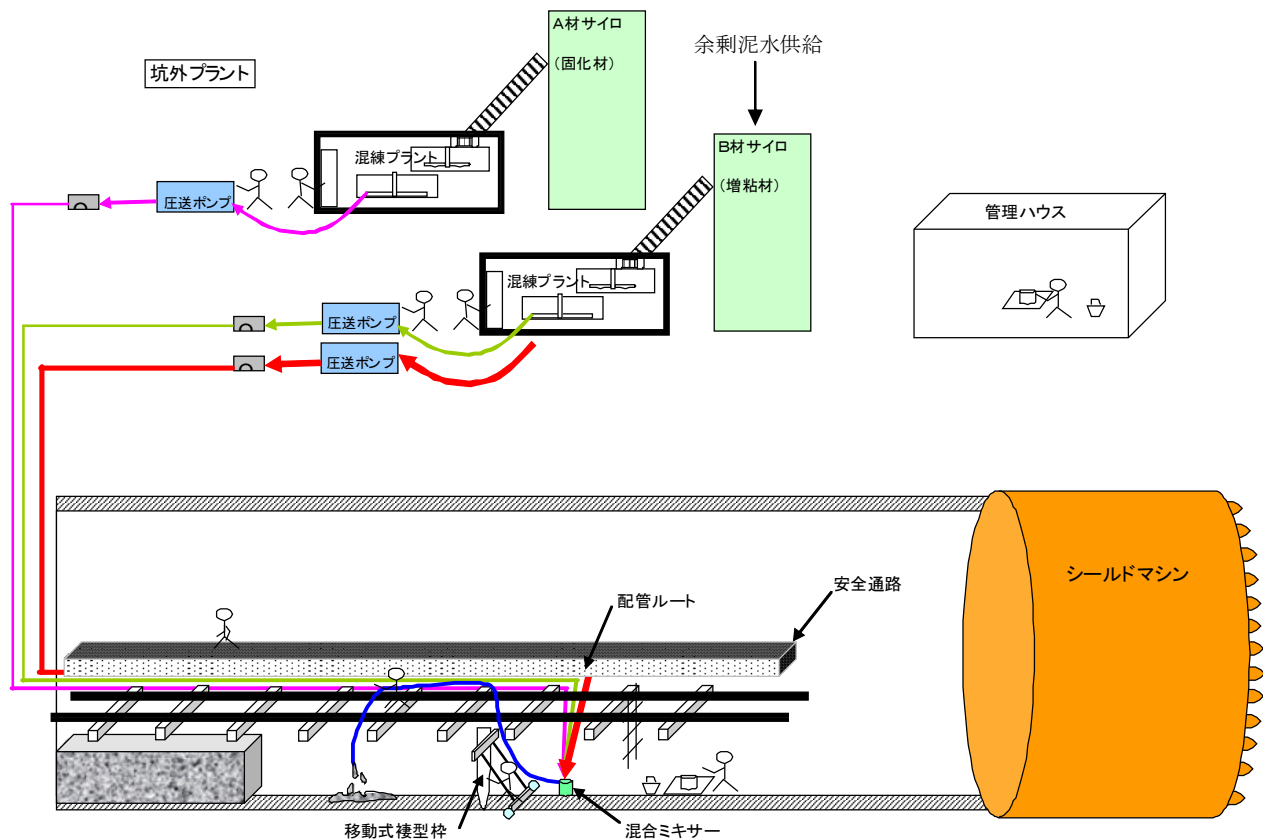


図-6 流動化処理土施工模式図

配合として表中に着色した2つの配合を決定し、これをもとに、供給される泥水比重に応じて表-4に示す配合を選択することとした。

5. 流動化処理土の品質管理

図-6に現場での施工模式図を示す。表-4に示す泥水比重に応じた4種類の配合を準備したが、供給する泥水の比重が変化すると、それに応じて配合変更が必要となり、流動化処理土の品質が安定しない。そこで、一定比重の（安定した）泥水を供給するため、本体工事である泥水式シールド工法における泥水の比重調整を非常に綿密に行った。そして、使用する泥水量を極力多くするため、および固化材や増粘材の使用量を減らしてコストアップを抑えるため、流動化処理土に用いる余剰泥水の比重は1.20を維持することを徹底した。

実施工においては、自走式の移動型枠をセットし、1日当たり9～12m区間（約130～180m³）の打設を行った。

表-4 流動化処理土の配合

	流動化処理土1m ³ あたりの配合 (kg)					
	A液（硬化液）			B液（泥水）		
	固化材 高炉B種	水	混和剤	泥水 比重	泥水量	増粘材
1	350	175	1.75	1.17	815	30
2	342	171	1.71	1.18	831	27
3	333	167	1.67	1.19	849	23
4	325	163	1.63	1.20	866	20



写真-1 自走式移動型枠



写真-2 流動化処理プラント



写真-5 流動化処理土打設完了



写真-3 型枠セット状況



写真-6 流動化処理土打設断面



写真-4 流動化処理土打設状況

6. まとめ

今回の路床材への流動化処理土の適用により、産業廃棄物となる二次処理土のうちの約7%、約7,530 tの減量化が達成された。また、同時に本来ならば路床材として使用される予定の約21,485m³の砕石を使用しなかったことによる省資源効果や、二次処理土の場外搬出、砕石使用時の運搬、敷均し等の重機作業にかかるNOx、Sox、二酸化炭素の排出抑制による環境保全への寄与も見逃すことはできないと考える。

今後は泥土圧シールド工法への採用も含め、さらなる産業廃棄物の再利用、減量化に努めていきたいと考える。