

論文 セグメントのボルトボックス吹付け充填工法の開発

川端僚二^{*1}・江口公道^{*2}・南田尚胤^{*3}・山下信^{*4}

要旨: シールドトンネルのセグメントの二次覆工を合理的、経済的観点から省略する場合、各セグメントを締結するボルトボックスの充填工法が必要になる。ガラス瓶のリサイクル軽量骨材により比重を1.4にした軽量モルタルとアルカリフリー液体急結剤を使用して、充填後左官仕上げを可能にする一層吹付け充填工法を開発した。またシールドトンネル工事の施工環境の観点から、いわゆる高密度流吹付けを可能にして、吹付け材の跳ね返りと粉塵の発生量を大幅に低減した。

キーワード: ボルトボックス、リサイクル、アルカリフリー液体急結剤、左官、軽量

1.はじめに

首都圏外郭放水路は、中川・綾瀬川流域の中流部における治水対策として、中川・倉松川の各河川と江戸川を地下水路で結び、これら河川の洪水を江戸川に排水するものである。現在外郭放水路のシールドトンネル工事を施工中であり、地下約50mに延長約6.3km、内径約10mのトンネルを構築する予定である。このシールドトンネルは、大口径、大深度であり洪水時水位による高い内水圧に対応することが求められている。さらに、合理的、経済的なトンネル構造を求める観点から二次覆工省略型であり、一次覆工のみのトンネルとなっている。

今回、当工事で使用されるセグメントのボルトボックス（以下Bと称する。）の充填工法の開発を行った。充填工法には大別すると型枠充填工法と吹付け充填工法の二工法が有る。型枠充填工法の場合、型枠の取り付けの手間、全周方向にあるBの完全充填性に問題がある。他方、吹付け充填工法は急結剤の使用が必要になる。急結剤には粉体と液体の二種類があるが、シールド工事の施工上、粉塵・跳ね返り量を考慮すると液体急結剤を選択することが望ましい。従来工法では液体急結剤としてアルミニン酸系の

ものが使用されているが、この急結剤はpHが14と強アルカリ性で、作業環境の保全上問題がある。また、凝結時間が極めて短く、充填後左官仕上げの時間が確保できない。従って所定厚さの手前3~5cmで吹付けを止めて、次に残りの断面を急結剤を使用しないで充填するといった、二工程の作業を行うことになる。

以上の観点から、低粉塵、低リバウンドの一層吹付け、いわゆる高密度流吹付け充填左官工法を開発することとした。

そのために、最近開発されたアルカリフリー液体急結剤を採用した。この液体急結剤は凝結時間が相対的に長く左官仕上げの時間を確保できる。一方、一層で40cmを上回る厚さの上向き吹付けを行うためには充填モルタルの比重を低減する必要がある。このためガラス瓶のリサイクル品である軽量細骨材を使用して練り上り時の比重を1.4とし、軽量化に併せて所定強度の確保を実現した。また充填モルタルの脱落を防止できる付着強度を有し、透水係数および耐摩耗性能等を改善する目的でアクリル系ポリマー乳化液を、単位水量を極力少なくて、収縮量を低減すると共に流動性を向上する目的でポリカルボン酸系高性能減水剤を併用した。

*1 鹿島建設㈱ 外郭放水路シールド工事事務所 次長

*2 建設省 関東地方建設局 江戸川工事事務所 建設監督官

*3 武田薬品工業㈱ 化成品研究所 主任研究員

*4 日本シーカ㈱ リペアープロテクショングループ 次長

表-1 要求品質

項目	基準値	備考
水密性(透水係数)	透水係数 $1 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 以下	
耐腐食性	B B 内アルカリ環境	
脱落防止	充填材の自重の3倍の引き抜き荷重により脱落しない	
材料の 収縮量	9. 3×10^{-4} 以下	セグメントの許容ひび割れ巾から算定
セグメント間	8. 1×10^{-4} 以下	
残留水圧の影響	セグメント内の残留水圧により脱落しない	
耐摩耗性	コンクリート (21 N/mm^2) と同程度の耐摩耗性	
粗度係数の確保	コンクリート (21 N/mm^2) と同程度の内面仕上げ	

2. 充填モルタルの要求品質

外郭放水路トンネルに使用するセグメントの B B 充填モルタルの要求品質は建設省関東地方建設局江戸川工事事務所の指示により表-1 の通りになっている。当基準値を満足する諸物性のモルタルの施工生産性と施工環境の適合性を備えた吹付け工法の開発を行った。

3. 使用材料

3-1 使用材料

配合に使用した材料は下表の通りである。

表-2 使用材料一覧表

名称	内容	比重
セメント	普通ポルトランド	3.14
混練水	水道水	1.00
ポリマーEマルション	アクリル系	1.01
細骨材	発泡ガラス軽量骨材	0.70
減水剤	ポリカルボン酸系	1.08
アルカリフリー液体急結剤	硫酸アルミニウム系	1.49

3-2 各使用材料

主な使用材料の特徴を以下に記述する。

(1) ポリマーEマルション

B B 充填モルタルにおけるポリマーEマルションの役割は次の通りである。従来ポリマーEマルションと高性能減水剤、アルカリフリー液体急結剤の組み合わせの実施例が無く、これら材料間の相性の確認実験を行い、最適なアクリル系ポリマーEマルションを選択した。

(1) 作業性の改善

内径 25 mm の圧送ホースを使用して、吹付け能力を施工サイクルの観点から $2 \text{ m}^3/\text{時間}$ 確保することとした。このためにモルタルの流动性を改善した。モルタルに流动性を付与する一番の要素は高性能減水剤であるが、これだけで

は粘性が不十分で材料分離によるポンプの閉塞が起きる。減水剤とポリマーEマルションのコロイド的性質が相まって良好なポンプ圧送性が得られる。また地下空間での施工を考慮して不揮発性中和剤を使用するなどして臭気を低減した。

(2) 物性の改善

〈収縮〉

軽量骨材を使用すると一般的に収縮量が大きくなる。これに影響する因子として W/C があるが、ポリマーEマルションのゴム弹性膜の存在は硬化収縮の内部応力を分散して収縮の低減に寄与する。

〈付着性〉

ポリマーEマルションは接着材として働き付着強度を改善する。

〈防水性〉

B B 充填モルタルの機能としてボルトの防錆があるが、ポリマーEマルションはセメント硬化体のキャビラリーを埋め、密実性を改善して防水性能を向上する。

(2) 軽量骨材

B B 充填モルタルで使用する軽量骨材は廃棄物の処理が社会的課題になっているガラス瓶のリサイクル品である。ガラスは本来アルカリ性に対して耐久性に問題があるが、当軽量骨材はカオリン系粘土鉱物の微粉末で表面コーティングし、約 1000°C の高温で焼結して、耐アルカリ性処理をしてある。アルカリ・シリカ反応性試験では、化学法およびモルタルバー法のいずれも規定値を満足している。

(3) 急結剤

従来使用されている液体急結剤は強アルカリ

性でアルミニ酸ナトリウムを主成分とするが、当アルカリフリー液体急結剤は、硫酸アルミニウム並びにアルカリと接触すると増粘する高分子エマルションが主成分で、PHは2.5である。

急結性能はアルミニ酸ナトリウム系急結剤に比べてかなり遅いが、チクソトロピーの保持によって、吹付け厚さも満足できる。硬化が相対的に遅いので左官仕上げの作業時間が確保でき、一層吹付け後の左官仕上げが可能になった。

3-3 配合

要求品質を満たし、且つ相性の良い材料の適性の判断後、各種室内配合試験を実施した。施工性即ちポンプ圧送性に懸かる流動性の試験を行い、その後物性試験を実施した。各種実験の結果以下の配合を選択した。配合条件および示方配合は表-3、表-4の通りである。各試験体の養生は20°C湿度60±5%の恒温室で行った。

表-3 配合条件（単位：%）

W/C	P/C	S/C	減水剤	急結剤
31.9	5.0	45.0	C×0.8	C×15.0

表-4 示方配合（単位：kg）

	名称	重量	備考
モルタル	セメント	701	
	混練水	179	
タール	ポリマーエマルション	80	
細骨材		315	
減水剤		6	C×0.8%
アルカリフリー液体急結剤		105	C×15%

注：ポリマーエマルションの固形分濃度は45%

4. 実験の概要

前記示方配合を決定するために各種の室内外の実験を行った。その実験結果は次の通りである。実験項目は、施工生産性と施工環境に関するものとモルタルの物性に関するものに大別される。

4-1 施工生産性（モルタルの流動性）

内径25mmの圧送ホースの圧送能力は一般的に1m³/時間とされるが、施工の生産性の観点から、当該ホースで2m³/時間を圧送する

ことを目標にした。W/C、減水剤率の各要因を変えて流動性実験を行うと共にモルタルポンプを使用して圧送実験を行った。結果は表-5の通りであった。

モルタルの流動性実験にはフローテーブルとこの実験用に製作した傾斜流動計（仮称）を使用した。流下時間が12秒以下であればポンプの閉塞は起こらないこと、内径25mmのホースで2m³/時間の圧送能力を確保するためには8秒以下にする必要があることがわかった。

この実験によってW/Cを31.9%、減水剤率は0.8%を施工性の観点から選択した。

表-5 フロー値と流下時間

W/C %	S/C %	P/C %	減水剤率 %	フロー値 (mm)	流下時間 (秒)
30.0	61.0	7.0	1.5	235×235	9
30.0	61.0	7.0	0.8	180×180	38
31.9	45.0	7.0	0.8	230×230	10
31.9	45.0	5.0	0.8	260×260	7



ノズル内での充填モルタルと液体急結剤の分散混合性が空気量を左右するため、各種ノズルを製作して実験を行った。空気の流量計を作成して充填モルタルのポンプ圧送量を $2\text{m}^3/\text{時間}$ に設定し、吹付け空気量を測定し、前記吹付け密度を実験した。混合性の優れたノズルを使用した実験結果の上記比率と粉塵・リバウンド量の測定、吹付け距離は下表のごとくであった。

表-6 高密度流吹付けのデータ

	当工法ノズル	在来型ノズル
吹付け密度	2~3%	1~2%
粉塵	少ない	多い
リバウンド	4~6%	6~9%
吹付け距離	15cm	60cm

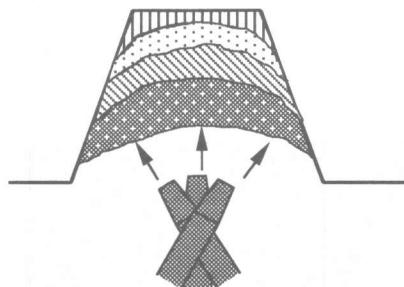


図-1 駆の防止方法

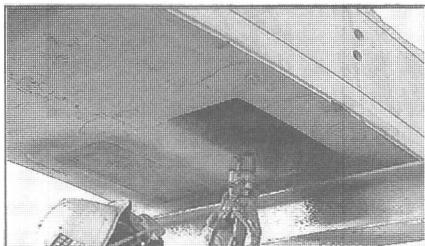


写真-2 吹付け状況

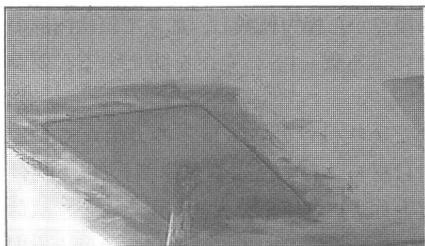


写真-3 左官状況

4-3 水密性（透水係数）

インプット法（浸透深さによる方法）によって、拡散係数を求めて透水係数を算定した。

実物のセグメントB Bに吹付け充填し、材令28日後直径15cm、深さ9cmの供試体を抜き取り、室温20°C、湿度60±5%の恒温室で1週間乾燥する。その後 0.59N/mm^2 の水圧を72時間加圧し、画像解析装置を用いて水の浸透面積を測定し、平均深さを求めた。

その結果は下表の通りで、いずれの場合も基準値を満たした。

表-7 P/Cと透水係数（単位：cm/sec）

P/C	拡散係数	透水係数
7%	1.94×10^{-4}	2.6×10^{-12}
5%	2.98×10^{-4}	4.2×10^{-12}
0%	5.64×10^{-4}	7.5×10^{-12}

4-4 耐腐食性

セメントコンクリート、モルタル中の鋼材はセメントの強アルカリによってpH12.5程度のアルカリ環境に置かれる。このようにアルカリ環境にある鋼材はその表面に20~60Å程度の酸化皮膜を形成し、不動態化しているため腐食作用から保護されている。

前記示方配合の各材料を混練した直後のものと、材令50日のモルタル硬化体を粉碎して蒸留水に懸濁したもののpHを測定した結果は下表の通りで耐腐食性に問題はないといえる。

表-8 pH試験

項目	pH
各材料を混練した直後	13.1
硬化体を粉碎したもの	12.8

4-5 材料の収縮量

充填モルタルの乾燥収縮実験はJIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ試験方法」によって行った。試験結果は下図の通りで、ポリマーエマルションの混和量がセメント硬化体のキャピラリーを埋めて、乾燥収縮量を低減する事がわかる。P/C 5%から改善効果が顕著で、5%の材令28日の乾燥収縮量は 6.1×10^{-4} でリング間、セグメント間のいずれの基準値をも下回っている。

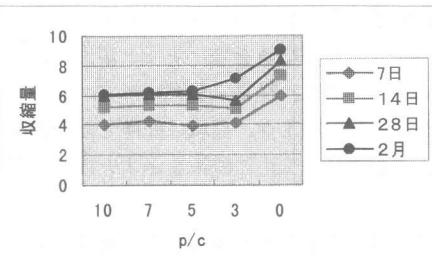


図-2 P/Cと乾燥収縮量（単位： $\times 10^{-4}$ ）

4-6 残留水圧の影響・脱落防止

(1) 残留水圧の影響

R C セグメントのリング間、セグメント間それぞれ 2 個、合計 4 個の B B を軽量モルタルを吹付け充填し、材令 28 日でそれぞれの B B の残留水圧実験を行った。後 0.59N/mm² の水圧を 72 時間加圧し、排水後残留水圧を測定した。B B 内部に残留水圧は残らなかった。

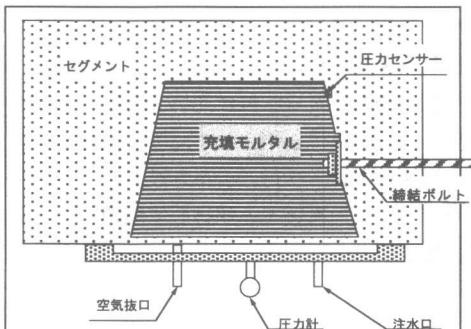


図-3 残留水圧実験の概略

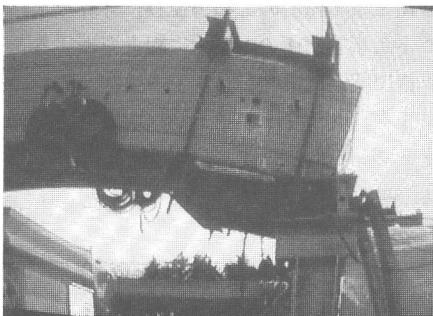


写真-4 残留水圧実験

(2) 脱落防止

残留水圧実験の結果、残留水圧が発生しなかったので、ジャッキで引き抜き試験を実施し、B B 充填材料の自重の 3 倍の引き抜き荷重、即

ちリング間 0.072tf、セグメント間 0.168tf で脱落しないことを確認した。

引き続き破壊するまで荷重を上げて実験を行った。10tf で充填モルタルが水平方向に破断した。

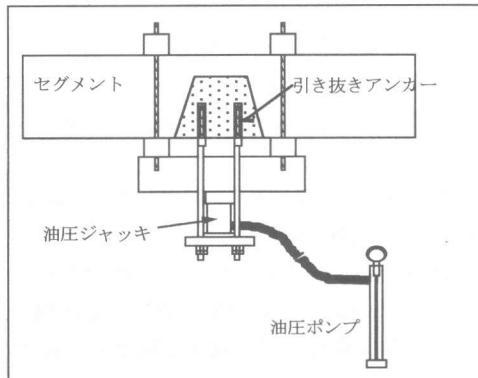


図-4 引き抜き実験の概略

自重を大幅に上回る引き抜き荷重に耐えたのは、B B 内のボルトが押し抜きせん断力に抵抗する事に加えて、充填モルタルの B B 内面に対する付着力によると考えられる。

（付着強度）

付着強度実験は「建研式引っ張り試験方法」によって行った。実験結果は図-5 の通りで、ポリマーエマルションの接着機能が混和量に比例することがわかる。改善効果が顕著な 5% が適切な混和量であることがわかる。

P/C 5 % の材令 28 日の付着強度は 2.5N/mm² であった。

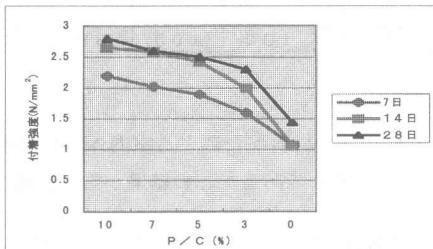


図-5 P/C と付着強度（単位：N/mm²）

4-7 耐摩耗性・粗度係数の確保

耐摩耗性・粗度係数の確保については圧縮強度 21N/mm² のコンクリートと同程度の耐摩耗性・粗度係数が基準となっている。

先の流動性および諸物性から選択した P/C

5 %の材令 28 日強度は $39N/mm^2$ であった。

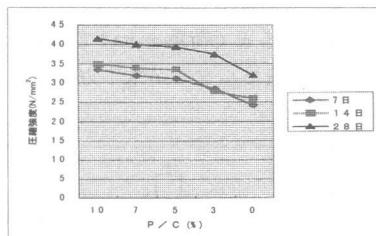


図-6 P/Cと圧縮強度 (単位: N/mm²)

圧縮強度は基準値を上回っているが、使用骨材によって耐摩耗性が大きく異なるのでテーバー試験器 (JIS A1453) を使用し、摩耗輪 H-22・荷重 1 kg にて 1000 回転の重量減量を試験した。試験結果は下記の通りで減量率は基準の $21N/mm^2$ のコンクリートの約 90% で、耐摩耗性に問題はない。

表-9

種類	摩耗減量	比較
$21N/mm^2$ のコンクリート	6200mg	100
$39N/mm^2$ の軽量モルタル	5670mg	91

4-8 耐久性の確認

ポリマーエマルション、ガラス瓶のリサイクル骨材混入モルタルの耐久性促進試験を JIS A 1172 に準拠して行った。80°C・湿度 90% の養生条件下の圧縮強度の低下率は 6 ヶ月で 8% で、圧縮強度も $30N/mm^2$ であった。

表-10 圧縮強度の変化

	初期値	1ヶ月	3ヶ月	6ヶ月
圧縮強度 N/mm ²	36	37	32	30
比率	100	103	89	83

5.まとめ

今回使用した材料配合による室内外実験結果は表-11 の通りである。この結果から二次覆

工省略型セグメントの充填モルタルは全ての物性の要求品質基準値を満たすことが出来た。

また当工法は、従来工法に比べてコストダウンが図られ、施工性、環境に配慮した合理的な工法であり、本工法の特徴を示すと以下の通りになる。

- ①ガラス瓶のリサイクル品である軽量骨材の使用によって練り上がり時の比重が 1.4 となり、厚さ 40 cm 程度の一層吹き付けが可能となった。
- ②ポリマーエマルションを用いることによって、特に収縮量、付着性、透水性の改善が見られ、軽量骨材の弱点を補うことが出来た。また収縮量、付着性の観点から添加量は物性の改善効果が著しい、P/C 5 % とした。
- ③アルカリフリー液体急結剤の導入により、凝結時間が比較的長くなり、吹付け後の左官仕上げが実施可能となった。
- ④吹付け時の空気量を少なくするノズルを開発して、粉塵、リバウンド量を低減することにより、坑内環境の改善を図った。

今回開発した B B 吹付け充填工法は外郭放水路シールド工事に適用されており、トンネル坑内に専用の混練・吹付け台車を設置し、シールドセグメント一次覆工と並行して順調に施工中である。

6. 謝辞

当実験を行うに当たり、建設省関東地方建設局江戸川工事事務所のご指導並びに外郭放水路シールド工事事務所のご協力に謝意を表すると共に、武田薬品工業㈱、日本シーカ㈱、㈱ジェーフェック、㈱ティ・アイ・シーのご協力を得たことを感謝申し上げます。

表-11 基準値と実験結果

項目	基準値		実験値
水密性(透水係数)	透水係数 $1 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 以下		$4.2 \times 10^{-12} \text{ cm/sec}$
耐腐食性	B B 内アルカリ環境		PH 12.8 で強アルカリ
脱落防止	充填材の自重の 3 倍の引き抜き荷重により脱落しない		自重の 3 倍で脱落しない
材料の 収縮量	リング間 9.3×10^{-4} 以下		6.1×10^{-4} で下回っている。
セグメント間	8.1×10^{-4} 以下		
残留水圧の影響	セグメント内の残留水圧により脱落しない		残留水圧が発生せず、脱落しない。
耐摩耗性	コンクリート ($21N/mm^2$) と同程度の耐摩耗性		圧縮強度 $39N/mm^2$
粗度係数の確保	コンクリート ($21N/mm^2$) と同程度の内面仕上げ		圧縮強度 $39N/mm^2$ コテ仕上げ