

## 連載講座

# トンネル新技術 ( 14 )

## 同時裏込め注入工法

### 「トンネル新技術」連載講座小委員会

## 1. はじめに

シールド工法において必然的に生じるテールボイド処理を担う裏込め注入工はきわめて重要な工種である。都市トンネル工法としてシールド工法が日本で用いられた当初の裏込め材は、豆砂利や砂モルタルが用いられていた。その後も砂モルタルに代表される 1 液型注入材であった。しかし、土質の複雑な日本のシールド工事では、裏込め注入を施工する前にテールボイドを埋めるように周辺地山の崩壊が起こったり、地下水に希釈されたりと問題が多く、1 液型注入材では適切な裏込め注入工が施工できなかった。

1976(昭和 51)年に、エアモルタルに急結材である水ガラスを注入孔直前で混合させる 2 液型裏込め注入材と注入システムが開発された。狭いテールボイド空隙を可塑状ゲルで充填させ、早期に硬化させることができる画期的な工法であった。このアイデアは瞬く間に日本中のシールド現場に拡がり、多くの 2 液型裏込め注入材が開発され、日本では 1 液型注入材を駆逐した。

2 液型裏込め注入材という革新的な裏込め注入材が開発されたものの、裏込め注入工法はセグメントからの注入が長い間主流であった。

1982 年大阪地下鉄中央線のシールド工事においては、2 液型同時裏込め注入工が採用され、それまで大きな沈下が発生していた軟弱粘性土層において地盤沈下量を画期的に抑えることに成功した。

しかし、「同時注入管(装置)はすぐに閉塞トラブルが起こる」「シールド機外周に突起物があるため、掘進制御を阻害する」といった批判が同時裏込め注入工の普及を阻んでいた。

2 液型同時裏込め注入工を支える新時代の同時注入管の開発と改良を紹介する。

## 2. 開発の背景

### 2-1 それまでの状況

関西から始まった 2 液型裏込め注入材は、モルタルのブリージングを防ぐ工夫として、ベントナイトが高価であったため、エアモルタルを主材としていた。続いて始まった関東では、近隣にベントナイト産地があったため、主材を C B としていた。

当時の裏込め注入技術は未成熟で、注入材のシールド機内への漏出を防ぐために数リング遅れることが多く、片番に 1 回の注入がせいぜいといった状態であった。しかしテールシールドの改良に伴い、テール近くでの注入が可能となり、掘進中の裏込め注入が試みられるようになった。立坑上の裏込め混練プラントからモルタル鋼管圧送方式が普及していたため、毎リングの注入を可能とするためモルタルの可使時間を延ばす安定剤(硬化遅延剤)が開発され、1980 年頃に同時注入が可能となる裏込め注入材の原型が完成した。

しかし、裏込め注入工は材料だけでなく、注入時期、場所、方法がまとまって機能するものである。同時注入を可能にするためには、注入

装置の開発が不可欠であった。

### 2-2 開発への取り組み

裏込め注入の方式には、一般的に「同時注入」と「即時注入」がある。「即時注入」は掘進に遅れない程度に裏込め注入する方法で、セグメントの注入孔を利用して行っている。「同時注入」は、テールボイドの発生に合わせて注入する方法で、一般的にはシールド機に設けた「同時注入管」を利用して注入する。周辺地盤の緩みを防ぎ、地盤沈下を極力抑えるには「同時注入」が有効である。海外においても、使用する注入材の如何に関わらず、同時注入は裏込め注入の常識とされている。

一方、2液型裏込め注入材の大きな特長は、注入する直前までは液体状で、2液が混合されると10秒程度で可塑状ゲルに変化し、20分経過後から硬化が始まる点である(図-1)。

2液型裏込め注入材は取り扱いが難しく、開発当時はセグメント注入孔からの注入でも操作ミスによってしばしばミキシングノズルや配管を閉塞させていた。ましてや、同時注入管を用いた裏込め注入は閉塞トラブルの連続となると考えられた。また、「ゲルタイムの早い材料は大断面シールドのテールボイド全周に充填可能か」という疑念も提示され、可塑状ゲルの状態であれば加圧流動性があることを実験で証明した。

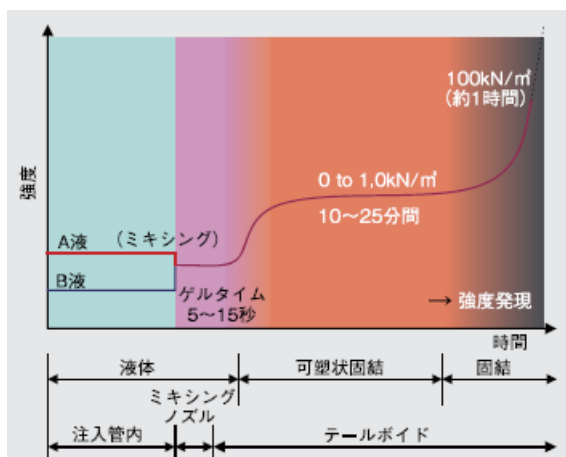


図-1 裏込め注入材の性状変化と強度

## 3. 開発の経緯

### 3-1 プッシャー式同時裏込め注入管

1液型注入材の裏込め注入工による同時注入管は、蓋構造も洗浄管もない単管パイプであった(図-2)。

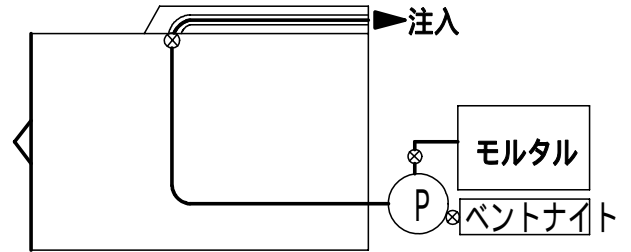
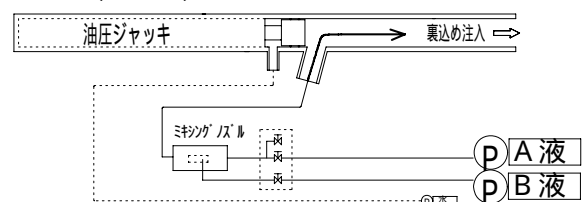


図-2 単管パイプ構造の注入管

上記の構造では、2液型裏込め注入材の注入は不可能であった。2液混合すると早期に硬化する2液型裏込め注入材を用いて連続使用が可能となる構造が求められた。油圧ジャッキを利用して、注入と洗浄の切り替えと、ジャッキヘッド部の伸縮でモルタルを除去清掃するアイデアをもとにプッシャー式同時裏込め注入管を完成させた。

図-3に示すような蓋構造と管洗浄構造を持つプッシャージャッキ式注入管(第1世代同時注入管)が開発された。これは大阪地下鉄工事に採用された注入管である。

裏込め注入中(ジャッキ縮)



裏込め停止中・水洗浄(ジャッキ伸・蓋)

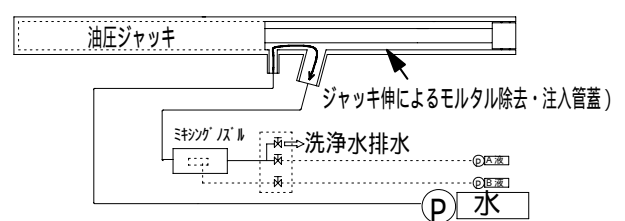


図-3 プッシャージャッキの注入管概念図

第1世代注入管の弱点は、ロングジャッキであったため、引き込み時の負圧で外部の土砂を呼び込んでしまうこともあった。また、時代は中

折れ式シールド機の普及時代と重なり、全長の短い注入管が求められるようになった。

シールド機後胴に装備する第2世代注入管(図—4)は、プッシャージャッキの利点を活かして注入管本体の長さを短くしたものである。ジャッキの伸縮長が短くなったかわりに、2液混合後のモルタル通過延長距離が長くなり、閉塞トラブルがしばしば発生した。

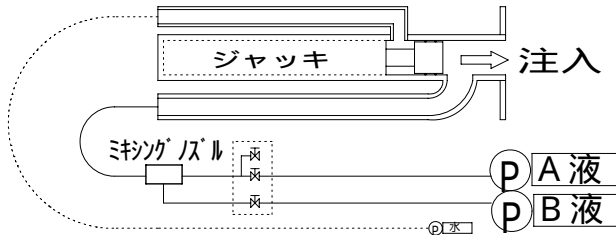


図 - 4 第2世代注入管概念図

テールボイド発生量の多い大断面シールド機においても初期掘進時や掘進がスムーズに進まないときにはしばしば注入管の閉塞が生じた。

この注入管の閉塞には、トラブルの経験から、

人為的な操作ミス

停電等のアクシデント時の処理不足

注入管自体の設計ミスや取り付けミス

洗浄不良

低吐出量によるモルタルコレステロールといった要因があることが分かってきた。

～ については徐々に改良することができた。要因のうち除去が難しかったのは 2液混合後の注入材をミキシングノズルから吐出口まで通していると必ずモルタルコレステロールが管内壁に付着していくことである(図—5)。硬化し始めている注入材は多少の洗浄圧では完全に清掃できず、管内の壁面にモルタルが蓄積されていった。特に低吐出量の注入時には、これが顕著であることが分かってきた。

この管内閉塞解除には下水配管清掃用のカソツールというドリルを用いた物理的処理と、有機酸による化学的処理を用いた。

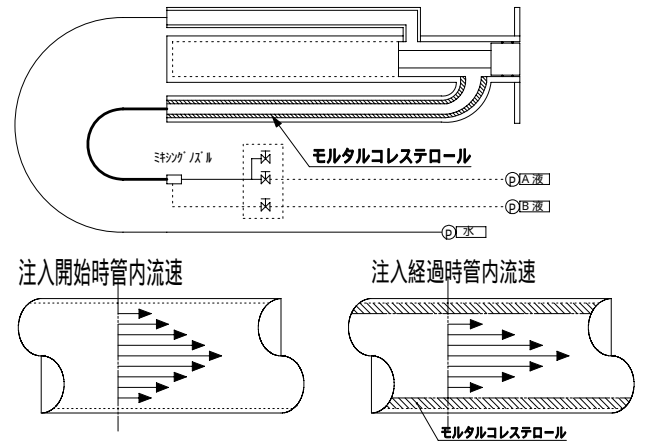


図 - 5 注入管閉塞とモルタルコレステロール

### 3-2 先端混合型同時裏込め注入管

ミキシングノズルと吐出口の配管のところで管内閉塞が生ずることから、ミキシングノズルを注入管の先端に設けることによって、モルタルコレステロールの発生距離を抑えようと考え、製作されたものが第3世代注入管である(図—6、写真—1)。2液混合部のミキシングノズルは必ずモルタル付着が進行してしまうため、ミキシングノズルが取り出せる構造も取り入れ、閉塞時には交換可能とした。

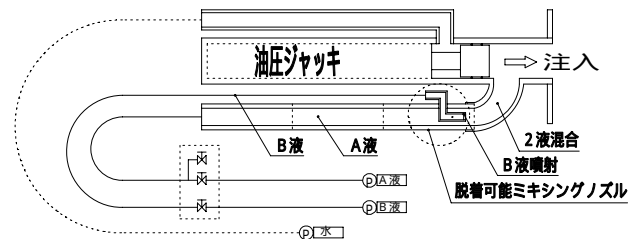


図 - 6 第3世代同時注入管概念

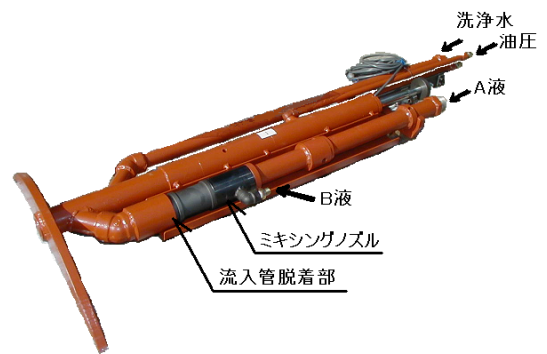


写真 - 1 第3世代同時注入管

この第3世代同時注入管は1998年の大阪淀川横断シールド工事に採用されたが、掘進開始から500m区間を通常の水洗浄だけで使用可能であった。

初期の同時注入管は、シールド機の外周に約15cmの突起物として設置されていたが、この第3世代同時注入管は内部の空間を出来る限り抑え、カバー板を入れて10cmに抑えた。

しかし、この突起物は発進・到達に支障が出るという苦情も多かった。

そのような状況下で、海外物件でスキンプレート内に納められる先端混合型同時注入管開発の要請があった。

海外のシールド機のスキンプレート厚は厚く、テールシールド部でも6cm以上あったが、上下にカバー板を設けると内空間の高さは3cm程度となる。第3世代同時注入管本体の高さは8cmである。この注入管の高さを支配していたのがミキシングノズルの構造であった。2重管であるためその部分が太くなっていた。また、油圧ジャッキの太さもネックであった。

そこで外径50mmの油圧ジャッキを直列接続することで油圧力を高め、ミキシングノズルの構造を差し込み型にすることで、注入管本体高さをぎりぎり50mm近くまで縮小した(写真-2、図-7)。カバー板を設けると80mm程度となるが、外周ビット切削範囲に収まると言うことで採用された。

海外での採用と共に日本国内でも、カバー板を含めて70mm近くまで低くした「低突起先端混合型」が第3.5世代として普及していった。図-8に注入管のフロー図を示す。

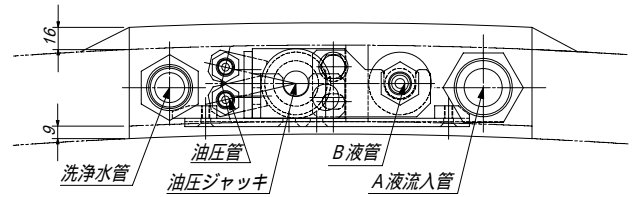
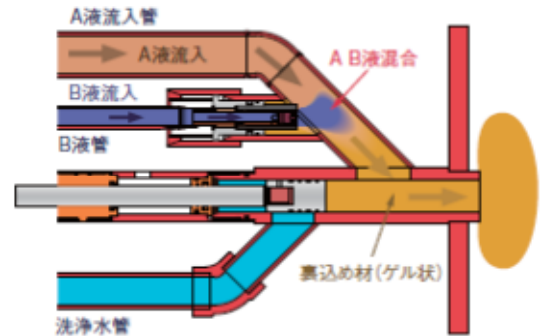


図-7 第3.5世代同時注入管埋め込み断面

この薄型注入管の開発から、シールド機メーカーと協力して、スキンプレート内蔵の工夫が始まった。海外のシールド工事ではスキンプレートの厚みがあるため、埋め込み型が標準となっている。日本国内においても、10m級の大断面シールドでは同様の試みが行われている。

< 注入時 >



< 水洗浄・注入停止時 >

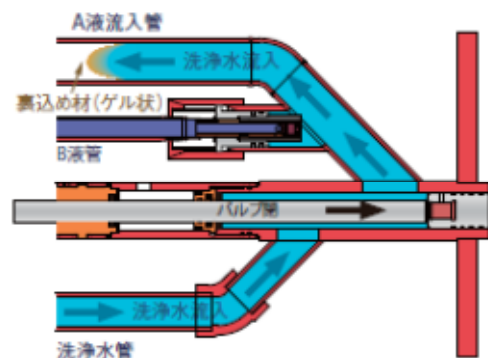


図-8 第3.5世代同時注入管のフロー図

また、低突起型となったため、小口径断面のシールド機(2130mmマシン)にも採用され、閉塞トラブルを起こすことなく、沈下防止効果をあげている。急曲線施工において、突起物はマシン制御を阻害するともいわれていたが、現在ではR=10mの急曲線施工においても補助工



写真-2 第3.5世代同時注入管

法を併用することにより、この注入管を用いて同時注入を問題なく行っている。この補助工法は、急曲線施工において、従来の地盤改良工法に代えて、余掘り部にクレーショック（可塑性粘土）充填材を注入し、テールボイドに遅硬性裏込め材を同時注入しながら掘進し、停止時にセグメント固定装置であるミニパッカーを膨らませる方法である。



写真 - 4 ミキシング試験

#### 4. 先端混合新注入管の開発

##### 4-1 低突起ミキシング脱着型注入管

しばらくの間一定の評価を獲得していた「低突起先端混合型」の第 3.5 世代同時注入管にもまだ弱点があった。

一番大きかった問題は、ミキシング部全体の脱着が不可能であり、B 液チェック弁の詰まりは解消できても、A 液ラインの閉塞解除が容易でないという点であった。突起高さを低くしたまま、ミキシングノズルの脱着が可能な注入管改良の要望が強くなってきた。この問題を解決するために、ミキシングノズルの改良を行った。

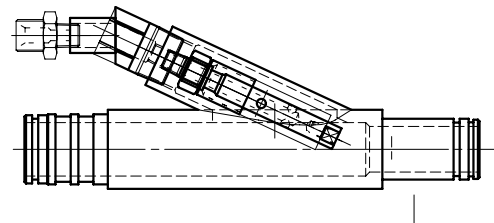


図 - 9 ミキシングノズル構造

2 液型裏込め注入材は、比例混合方式をとっているため、ミキシングの構造は重要である。B 液の噴射角度もミキシング効率に影響するため、細くしかも噴射効率を満足させ、脱着可能な構造にするため、Y 字管の中に B 液チェック弁を内蔵する形を開発した。



写真 - 5 ミキシングノズル脱着部

模擬機を製作して、モルタルミキシング状態を確認すると共に、B 液チェック弁廻りのモルタル固着進行状態などを確認した。モルタルのミキシング状態は良好であり、付着状態についても問題ないと確認した後、実機を造り、同様の試験も行った



写真 - 6 第 4 世代同時注入管



写真 - 3 第 4 世代同時注入管モデル

現在、この第4世代同時注入管は、シンガポールの現場だけでなく、日本の現場においても稼働し始めている。初期段階で多少のトラブルがあったものの、現在は順調に稼働している。ミキシングノズル全体を脱着できる構造を持っているため、注入管先端部のモルタル付着状況も簡単に把握することが出来るので、注入管トラブルの対処が容易となっている。

#### 4-2 ブロック型同時注入装置

埋め込み型注入管の要望に対して、シールド機スキンプレートに孔をくり抜き、プッシャー式構造を内蔵した注入管も生まれている。スキンプレートの中に中空があると強度不足となるというシールドマシン製作者の要望に応じて製作されたものである。基本構造はプッシャー式注入管であるが、スキンプレートそのものに内蔵する形の注入管がブロック型同時注入装置である。

くり貫かれたスキンプレートの孔の中にスリーブとロッドを前後から挿入する構造の注入管は、到達後に取り出して再利用が可能となる。海外では、到達したシールド機を取り出し、再使用することも多くあるため、組込型は初期製作費が高くなるものの、再利用できる注入管の需要も高い。

#### 4-3 同時裏込め注入システム

同時裏込め注入工を十分に効果が望める形で実現するためには、注入材料・同時注入管と共に、同時裏込め注入システムも重要である。材料特性を掴み、同時注入管のメリットを十分に生かしたシステムは、裏込め注入効果を高めるものである。

裏込め注入システムは、単にジャッキスピードに連動して裏込め注入ポンプの制御を行うだけのシステムではなく、施工者の裏込め注入工に対する考え方に左右される。裏込め注入工の管理方法として、注入量管理と注入圧管理があげられているが、ジャッキスピードの連動と共

に常に一定の注入圧を保つように、注入吐出量を制御する方法が現在主流となってきている。

注入管先端の面板に設置している土圧計も裏込め注入システムの実践的バックアップを担っている。

### 5. 今後の課題

現在の同時注入管はシールドマシンの大口径も小口径も本数の違いはあるものの、同じものを用いている。ユーザーからは、「もっと低く」という要望が根強い。小口径シールドでは最大瞬間吐出量は50L/min以下である。そこで、小口径シールド向けに低吐出・低突起の注入管を模索している。現在の注入管内径は32mmであるが、25mmにサイズダウンして、小口径シールド対応の注入管を作ることによって、同時裏込め注入工をもっとシールド工事全体に広げていきたい。

### 6. おわりに

2液型同時裏込め注入の普及は、「詰まらない、詰まりにくい注入管の開発」が不可欠であった。

初期の同時注入管は閉塞トラブルを起こし、工程を阻害することが多かった。その過去の経験から、未だに「同時注入管は閉塞トラブルがあるので使わない方がいい」と助言する人たちもいる。しかし、「注入管以外からの注入は認めない」という大阪市交通局の元建設本部長であった平田武弘氏と現交通局長の塩谷智弘氏の同時注入への強い信念が、今日の同時注入による同時裏込め注入工の改良・進歩を後押ししたと考えている。

現在では日本はもとより、シンガポールを始めとした海外でも2液型裏込め注入材と低突起型同時注入管による同時自動注入工が地盤変状防止効果に貢献している。

最後に、同時裏込め注入工法の開発にあたり助言をいただいたすべての方々には厚くお礼を申しあげる次第です。

( 文責 : 加納洋一 / ( 株 ) タック 瀧川信二 / ( 株 )  
タック )

## 参 考 文 献

- 1 ) トンネル標準示方書 [ シールド工法 ] ・同解説、土木学会、第 142 条 裏込め注入工 pp.180-182 , 2006.
- 2 ) 平田武弘 : 密閉式シールド掘削に伴う軟弱粘土地盤の挙動と施工技術に関する研究 , 京都大学学位請求論文 , 1989 .
- 3 ) 加納洋一 : 難条件下のシールドと 2 液型裏込め注入 , 日本プロジェクトリサーチ , pp.38-61 , 1990 .
- 4 ) 葛野恒夫 ・ 高崎肇 ・ 寺田幸紀 ・ 山田功 : 3 連マルチのシールド駅 , 大阪市地下鉄 7 号線 大阪ビジネスパーク駅 , トンネルと地下 , pp.35-37 , 1996 .
- 5 ) 塩谷智弘 : 大阪ビジネスパーク駅とシールドトンネル ( 特に裏込め注入について ) , 現場技術者のための土質工学 地中構造物 , ( 社 ) 地盤工学会関西支部 , pp.63-77 , 1997 .
- 6 ) NETIS 【 KT 150085 A 】 : シールド機に取付けた同時裏込め注入装置 , 2015.