

論文 トンネル背面空洞に対する裏込め注入グラウトの充填方法に関する研究

小森大育*¹・魚本健人*²

要旨：トンネル覆工背面に裏込めグラウトを注入する際に注入管を設置する天端部、肩部の両部に対して、グラウトのレオロジー特性と注入管の長さ、覆工の勾配等を要因として空洞充填試験による検討を行った。次に施工条件をレオロジー特性と“地山の起伏に対して注入管及び排出管位置”を変化させることにより実験的検討を行った。天端部・肩部の空洞を充填するために関係の深い材料特性及び注入管配置の条件が判明した。

キーワード：トンネル覆工背面空洞, レオロジー特性, 天端部, 地山起伏形状, 勾配定数

1. はじめに

トンネル覆工背面空洞は 1970 年代に NATM 工法が登場する以前の数十年間に建設したトンネルに主に存在していると言われている。発破の未成熟な技術による掘削断面の粗雑さや旧来のトンネル覆工の施工法である引き抜き管方式、覆工支保として矢板や鋼製支保を用いることによる施工欠陥により天端部が完全に満たされないことにより主に起こったとされる。

このような覆工背面と地山の間に空洞が存在する場合、トンネル構造安定上、問題となることがあり、この場合代表的な補強方法として覆工背面の空洞を裏込め注入により充填して覆工と地山を一体化させる裏込め注入工がある。

裏込め注入方法は、現在以下のような手順で行われている。初めにトンネル横断方向に両肩部、天端部の計 3 列、トンネル縦断方向に約 1.5m~3m の間隔に覆工に対しコア抜きを行い、先端を切り欠きかつ注入口元に逆止弁を取り付けた注入管を地山から 50mm の位置に先端が来るように設置する。次にトンネル縦断方向の高さの低いほうから、左右どちらか一方の肩部注入管列を使って高さの高い方向へ充填していく。その際、充填を行っている注入管から、充填作

業はできないと判断する条件は、①上流側に隣接する注入孔から漏出が確認されるか、②充填を行っている注入管の口元圧力が 2kg/cm^2 を超えるかのどちらかにより行い、確認された段階で充填を中止し、上流側の注入管に移り作業を繰り返すといった方法である。なお、注入を行っている注入管以外の管は空気を排出する役割も兼ねている。

これらの施工法で、注入口のある天端部・肩部空洞の充填のされ方および、空洞内の地山起伏形状に対して注入管の設置条件が異なった場合の充填のされ方に対する研究がなされていないと言える。

そこで本研究では、トンネル裏込め注入グラウトを模擬したベントナイト水ペーストを用い、トンネル肩部・天端部を想定した実験を行った。覆工の傾きを 0° と 15° に変化させ、注入管がある空洞と隣接した空洞の充填試験を行い全体の充填性を検討した。また地山の凹凸による注入管と排出管位置パターンをモデル化し高い充填性を得るための施工条件を検討した。

*1 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤専攻 (正会員)

*2 東京大学生 教授 工博 (正会員)

表-1 配合・使用材料およびフレッシュ試験結果

	B25	B30	B32	B34	B35	B36	B37	B40	B45
水粉体比 [W/P%]	250	300	320	340	350	360	370	400	450
テーブルフロー [mm]	100	106	116	128	131	134.5	144	156	178
塑性粘度 [Pa·s]	91.9	63.5	56.2	38.8	30.5	36.6	32.8	25.1	9.35
降伏値 [Pa]	443	190.5	149.3	105.8	88.5	49.9	42.4	28	13.13

使用材料-ベントナイト：水分 10%以下, 53 μm ふるい残渣=10%以下, 膨潤度=5~7

2. 実験概要

2.1 フレッシュ試験

本研究においては裏込め注入グラウトをビンガム流体として扱ったときのレオロジー特性値を用い空洞を充填させるための条件を定量的に把握することが目的であるので、経時変化の著しいセメントを含む裏込め注入グラウトに替えて可塑性のベントナイトペーストを用いて実験を行った。

実験に用いた材料および配合は表-1に示す。水粉体比を変化させた9配合とし、ベントナイトは市販のものを使用した。練り混ぜは容量30リットルのモルタル練りミキサーで行い、実験前に毎分1000回転のハンドミキサーを使用し、3分を行った。練り混ぜ時間および順序については図-1に示すとおりで、ベントナイトを水で膨潤させるために合計で45分以上の練り混ぜを行い、実験には一夜12時間経過したものをを使用した。

まず9種類の配合について、レオロジー定数の測定とコンシステンシー試験を行った。レオロジー定数の測定には二重円筒回転粘度計を用い、せん断速度とせん断応力の関係より塑性粘度と降伏値を算出した。また、テーブルフロー試験 (JIS R5201 セメントの物理試験方法に準拠) を行い15打フロー値により評価を行った。その結果を表-1に示す。

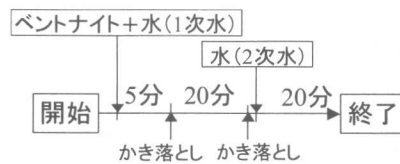


図-1 練り混ぜ方法

2.2 流動勾配測定試験

90cm×90cmの平板中央部に吐出用の長さ0, 10 cm, 20 cmの3種類の直径2 cmの注入管を差込み、スクイーズ式ポンプを用いてベントナイト水ペーストを吐出させ、勾配定数を測定した。なお、吐出を行う際には平板の摩擦係数を考慮しなくて良いように表面に同配合のベントナイトペーストをあらかじめ塗布してから行った。流動勾配は図-2に示すように縦軸を流動高さ、横軸を流動広さと本研究では呼ぶことにし、流動広さを流動高さで除したものを勾配定数と定義する。通常の流動勾配の概念と逆の意味になるが、横軸方向に流動が主に変化するためこのように定義する。この勾配定数が小さいと勾配が急になり、大きいと勾配が緩やかになる。

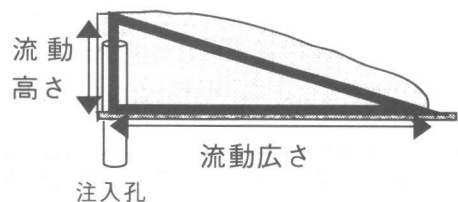


図-2 勾配定数の定義

2.3 空洞充填試験

2.3.1 単空洞充填試験

写真-1 に示す通り、流動勾配測定試験と同様に 90 cm×90 cm 平板中央部に吐出用の直径 2 cm の注入管を立て、深さ 10 cm の下部空洞を製作した上部に直径 30 cm、高さ 15 cm の空洞を模擬したアクリル製半球（以下半球空洞部と呼ぶ）を設置し、その空洞を注入するための条件を検討した。注入管長さは 0、10 cm、20 cm と 3 種類とし、トンネル横断方向に天端部または肩部注入管を想定し、同方向に写真-1 に示す θ を 0、15 度と変化させた 2 種類の実験を行った。充填評価は空洞に充填されたベントナイト水ペーストの重量を最大充填量で除した空洞充填率によって行った。なお、配合は天端部 9 種類、肩部 3 種類用い、配合 250 はコンプレッサーを用いて材料を注入した。

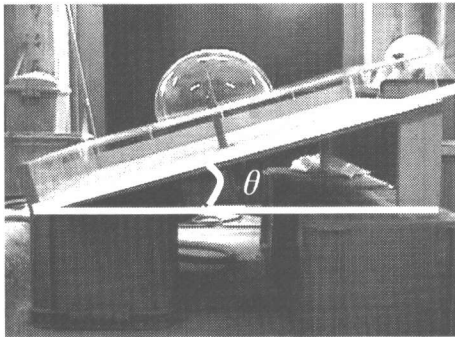
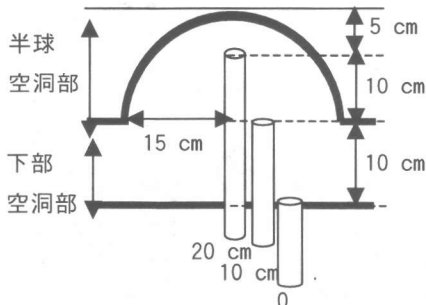


写真-1 単空洞充填試験



(注入管は半球中心部に設置する)

図-3 注入管の配置

2.3.2 複数空洞試験

同じ大きさのアクリル製半球を単空洞試験体の空洞 5 cm 横に設置した試験体（写真-2 を用い、隣接する空洞の充填評価を行った。実験を行った 3 種類の地山起伏形状のモデル、CASE-A、B、C を写真-2 および図-4 に示す。隣接する空洞の充填性を検討するために、排出管長さを下部空洞で 5 cm、半球空洞部分では 20 cm を用い、隣接する空洞での排出管の有無について、単空洞試験と同様に試験を行った。

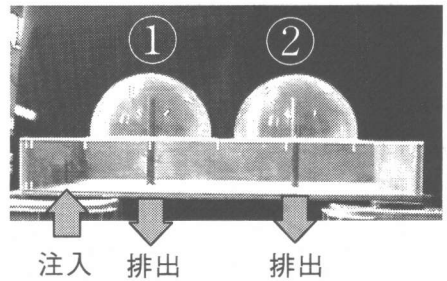


写真-2 複数空洞充填試験 (CASE A)

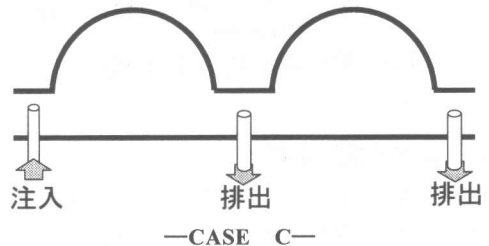
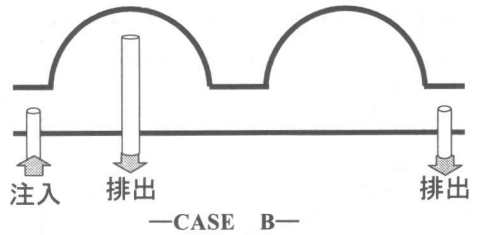


図-4 複数空洞試験-地山起伏形状によるモデル

3. 実験結果と考察

3.1 フレッシュ試験

レオロジー試験及びコンシステンシー試験の結果を表-1に示す。また、図-5,6に塑性粘度と降伏値、テーブルフロー値と降伏値の関係をそれぞれ示す。なおテーブルフロー値は15打値を用いた。

それぞれ、降伏値と塑性粘度、降伏値と15打フロー値ともに高い相関性があることが分かる。

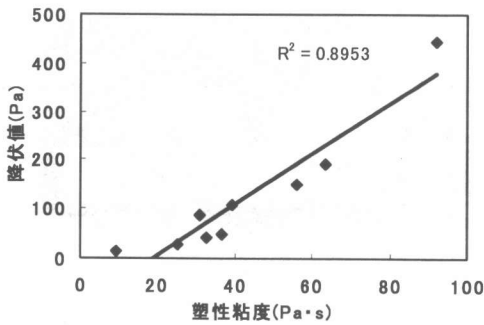


図-5 降伏値と塑性粘度

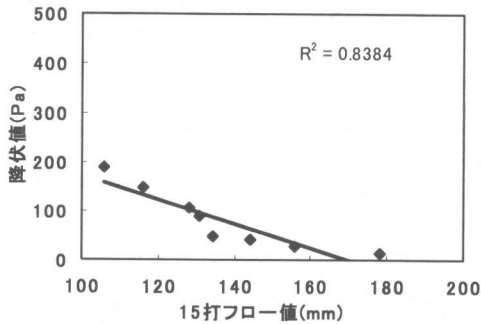


図-6 降伏値と15打フロー値

3.2 流動勾配測定試験

図-7に試験における15打フロー値と勾配定数の関係を注入管長さ0, 10 cm, 20 cmおよび各配合について示す。

この図より注入管長さによらず15打フロー値と勾配定数は高い相関性がある事が分かる。

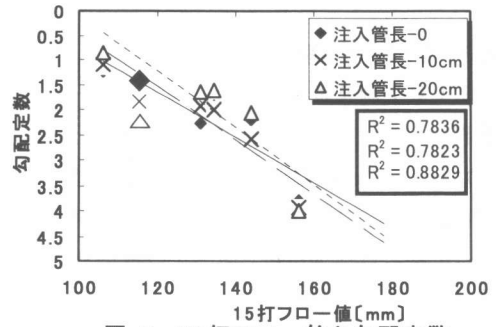


図-7 15打フロー値と勾配定数

3.3 空洞充填試験

3.3.1 単空洞試験

図-8,9に本試験のトンネル横断方向に 0° , 15° の傾斜を付けて想定した天端部及び肩部の15打フロー値と空洞充填率, または勾配定数と空洞充填率との関係を示す。

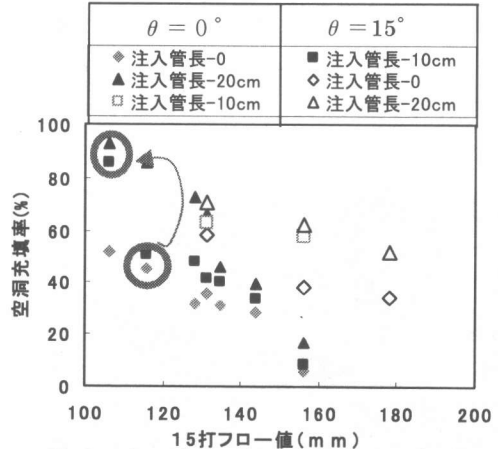


図-8 $\theta = 0^\circ, 15^\circ$ の充填率—15打フロー値

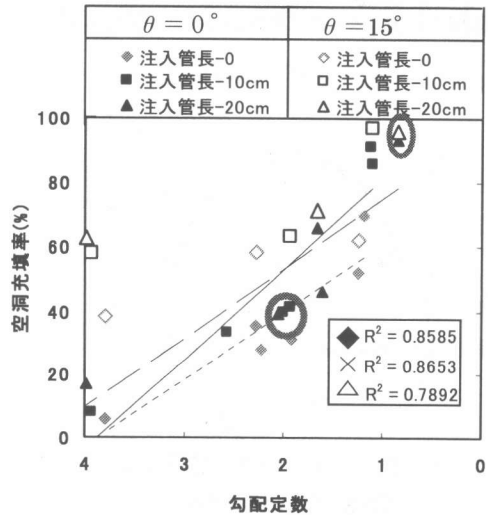


図-9 $\theta = 0^\circ, 15^\circ$ の充填率—勾配定数

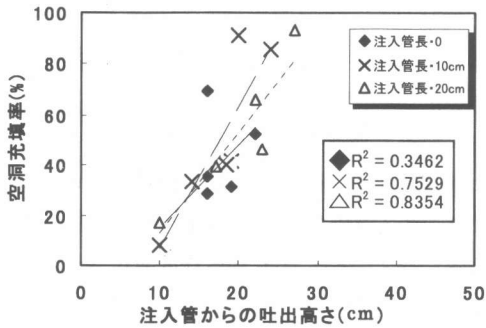


図-10 天端部空腔充填率

全体的にフロー値が小さくなると勾配定数は小さくなり空腔充填率が高くなる。図-9のモデルは $\theta = 0^\circ$ で長さ10 cmの流入管を用いた場合、配合 B25 と B30 の間（フロー値 106, 降伏値 190）即ち勾配定数が 1.9~1.1 の範囲で充填率が 80~90% に急に上昇している事がわかる。これは図-10 の注入管長さ 0 よりも 10 cm の管の方が注入管からの材料吐出高さ（以下、吐出高さと呼称）と空腔充填率との相関係数が大きくなっていることから分かる。空腔が充填される際に、注入管から吐出された注入管と材料の高さが空腔上部に接近したために、空腔に接して充填されるようになったためであると考えられる。この要因として勾配定数よりも“吐出高さの最大値と半球空腔頂上部までの高さの距離差”が支配的となったと考えられる。このように注入管を空腔上部に接して充填した場合には充填率が高くなるので、注入管からの吐出高さが空腔上部に接近し、空気を逃がすような大きな勾配定数を持つ材料と注入管の配置が好ましいといえる。

そして、図-9 において、勾配定数が 1.9~1.1 の間で充填率が急に上昇したのは、図-11 のように 20 cm の注入管を例に用いて考えると、頂上と空腔の縁を結んだ勾配 1:1.5 付近に今回の実験ケースにおける“空気を逃がしながら充填する最小の勾配定数”が存在したためであると考えられる。

このことから、空腔をより多く充填するためにはこの境界よりも小さな勾配定数を持つ材料を選定するのがよいと考えられる。ただし、配合 B25（フロー値 100, 降伏値 443）と B30（フロー値 106, 降伏値 190）の充填試験結果を比較すると充填率はほとんど変化しないため、今回の実験ケースでは 90% 以上充填するためには B30, 15 打テーブルフローで 110 mm 程度の材料を用いることが施工性の面から妥当であると言える。

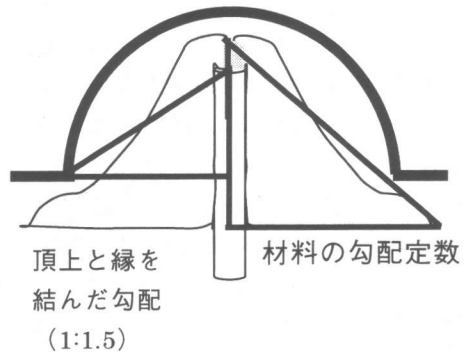


図-11 勾配定数による注入の限界

次に $\theta = 15^\circ$ モデルでの注入状況を見ると降伏値 50 以下の配合でも 40% 程度以上の空腔充填率が得られていることが分かる。これは写真-2 のように、半球空腔ではなく写真中で印の付いた下部の起伏のない空間（以下下部空間と呼ぶ。）から水のように順番に充填されたためである。

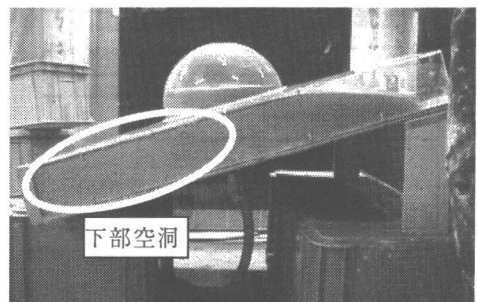


写真-3 空腔充填試験例・ $\theta = 15^\circ$

$\theta = 15\%$ モデルでは配合 B34 (フロー値 128,降伏値 106) は 70%程度充填し, 下部空間を満たすことができるが, 半球空洞をより満たすためにはこれ以上の小さな勾配定数を持つ材料を用いる必要がある。しかし, より小さな勾配定数をもつ材料を用いると, 設定した半球空洞は充填されるものの空洞よりも下部空洞部に流れださないため, 同一材料で充填するにはポンプで強力に押し出す必要がある。しかし, この場合, 半球空洞部分も含めて高い充填性が得られると考えられる。下部空洞が大きな空洞に対しては下部空洞のスペースはそれよりも大きい勾配定数を持つ流動性の高く半球空洞が充填される限界である配合 B40 よりも勾配定数が小さな材料を用いるべきであることが分かる。

単空洞充填試験では注入管が位置している起伏を充填するための条件が, 空洞形状と注入管からの吐出位置充填率が高まり, 高い充填性が得られることが分かったと言える。

3.3.2 複数空洞試験

図-12に充填率の結果を示す。

注入管から右方向に空洞①, 空洞②とし, その充填率を求めた。初めに配合 B35 について行い, 注入管, 排出管の位置を変えた実験ケースは次の3つを行った。その後, B45 について, この内の2ケース行った。

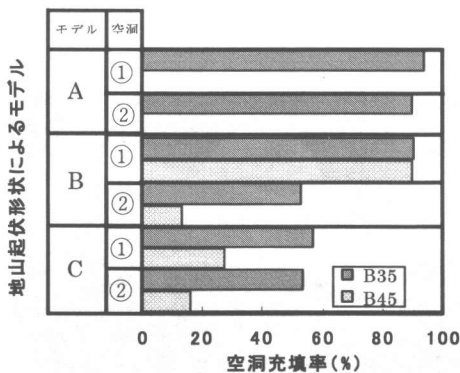


図-12 複数空洞試験結果

この結果, 注入材料を押し出しさえすれば, 半球空洞に排出管があるか無いかによりその充填率が決まると言うことがわかる。また注入管から距離が離れても B35 の充填率は変わらず, また空洞に排出管が存在しない場合であっても B45 では 30%以下の充填率となることに對し, B35 では 55%程度充填されることがわかった。

5. まとめ

トンネル覆工背面裏込め注入グラウトによる空洞充填を行うための基礎的研究として, トンネル肩部・天端部を想定した空洞充填実験を行った結果, 以下の知見を得た。

(1) 天端部に注入管が存在する空洞において, 完全に充填するためには注入材料が地山に接触するように管を設置し, 空洞内の空気が逃げるとな勾配定数を持つ材料を選定する必要がある。

(2) 天端部に注入管が存在しない空洞では, 空気の排出が排出されないのにも関わらず, 配合 B35 (降伏値 200 程度 15 打フロー 110mm) は 55%以上充填でき, 注入管から離れた空洞においても同等な充填率が得られた。

謝辞: 本研究を実施するにあたり実験を手伝って頂いた, 千葉工業大学卒論生の菊地善文君に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 朝倉俊弘, 河野重行ら: 既設トンネル覆工背面の新充填工法の開発と実証, 地下シンポジウム論文・報告集, 土木学会一般投稿論文, Vol.4, pp.251-256, 1999
- 2) 橋大介, 河野重行, 朝倉俊弘: トンネル覆工背面新充填材料の開発, コンクリート工学論文集, Vol.11, No.3, pp.129-138, 2000
- 3) 小島芳之: トンネル覆工の安全問題と今後の課題, RRR, 1998.6
- 4) 玉井元治, 川東龍夫: ベントナイトを混入したセメントペーストのレオロジー, 第34回土木学会概要講演集, Vol.