

# トンネル覆工の背面空洞注入材の開発 —長距離圧送可能な可塑性注入材—

柳 澤 太 一

渡 部 正

## 要 旨

近年、トンネルの耐久性に関する問題が顕在化しており、特に既設トンネルの覆工背面と地山との間に空洞があると、トンネル構造の安定上問題となっている。そのため、覆工背面空洞への注入を、トンネル補修・補強における基本的な対策工として採用している事例が多い。

最近のトンネル補修・補強工事においては、夜間限定工事等にみられる時間の制約、および、交通の円滑を図るためトンネル内作業スペースを縮小する等の制約が生じることが多く、背面空洞注入工事においても、急速大量施工および坑内作業エリアの省スペース化が求められている。

本研究では、限定注入可能で高耐水性を有する可塑性背面空洞注入材を開発し、基礎物性試験、トンネルを模擬した型枠への注入試験を実施して良好な結果を得た。また、交通規制エリアの省スペース化施工、急速施工、時間制約下における施工等に対応が可能な背面空洞注入材の製造システムを開発した。

キーワード 背面空洞注入材／限定注入／高耐水性／製造システム／長距離圧送／省スペース化

## 目 次

- |             |               |
|-------------|---------------|
| 1. まえがき     | 4. 模型型枠への注入試験 |
| 2. 目標性能の選定  | 5. 背面空洞注入材の   |
| 3. 背面空洞注入材の | 製造システム        |
| 基本特性        | 6. まとめ        |

## DEVELOPMENT OF FILLING MATERIAL FOR VOIDS BEHIND TUNNEL LINING — THIXOTROPICAL FILLING MATERIAL WITH PUMPING ABILITY OF LONG DISTANCE —

Taichi YANAGISAWA

Tadashi WATANABE

### Synopsis:

Recently, the issues of durability of tunnel are frequently occurred. For instance, the void behind the concrete lining of existing tunnel is the problem in structural stability of tunnel. Therefore, it is often executed to fill the filling material in voids behind the concrete lining of tunnel for strengthening the tunnel. There are many restrictions on working space, public traffic and etc. to repair or strengthen the tunnels.

We developed the thixotropic filling material, which can fill the voids without flowing out and has superior resistance against the washout by water. Properties of the material are tested and the experimental filling test was successfully carried out. Moreover, the manufacturing system of the filling material, which can minimize the influence on public traffic and makes it possible to fill the voids rapidly, was developed.

## 1. まえがき

近年、トンネルの耐久性に関する問題が顕在化している。特に既設トンネルの覆工背面と地山との間に空洞があると、地圧の作用により、覆工は変形しやすさ、変状の程度が大きくなるため、トンネル構造の安定上問題となっている。そのため、地圧の形態によらず、覆工背面空洞への注入を、トンネル補修・補強における基本的な対策工として採用している事例が多い。

既存の背面空洞注入材<sup>1)</sup>の概略を表-1に示す。最近の背面空洞注入材としては、可塑性注入材が数多く採用されるようになった。可塑性注入材は、地山亀裂中からトンネル空隙内に流出する湧水等に対する材料分離抵抗性が高く、また、地山の亀裂への逸散や覆工のひび割れ、目地からの漏出による材料損失が少なく、所定の空隙に限定注入可能な背面空洞注入材である。

現在のトンネル補修・補強工事においては、夜間限定工事等にみられる時間の制約、および、交通の円滑を図るためトンネル内作業スペースを縮小する等の制約が生じることが多く、背面空洞注入工事においても、急速大量施工および坑内作業エリアの省スペース化が求められている。

そこで、本研究では、限定注入可能で高耐水性がある可塑性背面空洞注入材の開発、および、背面空洞注入工事において、作業エリアを省スペース化、急速大量施工を可能とする背面空洞注入材製造システムを開発することを目的とした。

表-1 既存の背面空洞注入材

| 材料   | モルタル系注入材                     |                        | 非セメント系注入材             | 可塑性注入材              |
|------|------------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------|
|      | セメントモルタル<br>エアモルタル<br>膨張モルタル |                        | 発泡ウレタン<br>シリカレジン      | 可塑性モルタル             |
| 材料特性 | 比重                           | 0.5～1.5程度              | 0.1～0.2程度             | 1.0～1.5程度           |
|      | 性状                           | 流動性が大きい                | 発泡体                   | 可塑性（チキソトロピック性状）     |
|      | 限定注入                         | 亀裂地山細部にまで充填される材料ロスが大きい | 限定注入可能<br>材料ロスが少ない    |                     |
|      | 湧水への適用                       | 材料分離を生じやすい             | 耐水性を有する               |                     |
|      | 耐火性                          | 不燃性                    | 難燃性                   | 不燃性                 |
| 施工性  | 材料製造設備                       | 大～中規模                  | 不要                    | 大～中規模               |
|      | 坑内設備規模                       | 大～中規模                  | 小規模                   | 大～小規模               |
|      | 施工設備規模                       | 大～中規模                  | 小規模                   | 大～中規模               |
|      | 長所                           | 施工実績多い                 | 坑内作業エリア、時間制約化での施工に適する | 材料ロスが少なく、トータルコストが安価 |
|      | 短所                           | 材料ロスが大きい<br>ため、コスト高となる | 材料単価が高いため、コスト高となる     | 粘性が高いため、圧送性が劣る      |

## 2. 目標性能の選定

### 2.1 背面空洞注入材の目標性能

背面空洞注入材の目標性能を各機関の設計・施工指針（案）等を引用し、以下のように設定した。

- ・ 限定注入可能である。（亀裂地山等への材料ロスが少ない。
- ・ 施工性を向上させるため、早期強度発現性（材齢 7 日で 1.0N/mm<sup>2</sup>以上）があるものとする。
- ・ 覆工への負担を軽減させるため、軽量材料（目標比重：1.0～1.5）とする。
- ・ 湧水が流入する空隙に適用可能とするため、水に対する材料分離抵抗性に優れた高耐水性材料とする。
- ・ 周辺環境（土壌、地下水等）への影響を考慮し、無機材料で構成する。

### 2.2 製造、施工に関する目標性能

多様な施工条件への適用を可能とするため、製造に関する目標性能を以下のように設定した。

- ・ 急速大量施工が可能な製造システムとする。
- ・ 500m 以上の圧送が可能な製造システムとする。
- ・ 坑内注入エリアを縮小可能な製造システムとする。

## 3. 背面空洞注入材の基本特性

### 3.1 背面空洞注入材の配合

開発した背面空洞注入材の基本配合を表-2に示した。配合は A 材、B 材、C 材で構成されており、個別に練混ぜた各材を混合して、注入材を製造するものとする。ただし、施工条件に併せて、設計比重、混合方法等を選定するものとする。

表-2 基本配合

| 設計比重 | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |       |     |     |       |      |      |
|------|--------------------------|-----|-------|-----|-----|-------|------|------|
|      | A材                       |     |       | B材  |     |       | C材   |      |
|      | 固化材                      | 水   | 混和剤 A | 可塑材 | 水   | 混和剤 B | 気泡剤  | 水    |
| 1.2  | 280                      | 128 | 1.20  | 345 | 469 | 1.20  | 0.80 | 10.8 |
| 1.5  | 487                      | 223 | 2.09  | 345 | 469 | 1.20  | —    | —    |

各材料の概略を以下に示す。

- ・ A 材：注入材の固化性状に寄与する。固化材は、セメント系無機粉体、混和剤 A は遅延効果を有し、施工条件に応じて添加量を増減し、A 材の凝結を制御する。
- ・ B 材：注入材の可塑性状に寄与する。可塑材は、微粉末無機粉体、混和剤 B は B 材を長距離圧送するために適度な流動性を付与する効果を有する。
- ・ C 材：注入材の比重を調整する。施工条件に応じて、添加量を増減させる。配合設計する際、覆工への負

担を軽減するためには、設計比重を小さくし、多量の湧水等が存在する空隙へ適用するためには、設計比重を大きくするものとする。

### 3.2 背面空洞注入材の品質試験方法

表-2 に示した基本配合の基礎性状を確認するため、以下に示す品質試験を行った。

#### (1) 流動性状

JIS R 5201 に基づきフロー値を測定した。フロー値は、フローコーン引抜き直後および 15 回落下後に測定した。

#### (2) 強度特性

JIS A 1108 に基づき、材齢 7 日、材齢 28 日の一軸圧縮強度を測定した。

#### (3) 耐水性

水中不分離性コンクリート設計施工指針（案）<sup>2)</sup>の水中分離度コンクリートの水中分離度試験方法（案）を参考とし、背面空洞注入材を一定量のイオン交換水に投入した後、被検水を採取して、濁度計を用いて、水の濁度を測定した。

### 3.3 背面空洞注入材の基礎性状

開発した背面空洞注入材の材料性状を以下に示した。

#### (1) 流動性状

表-2 に示した基本配合の流動性状を表-3、写真-1、写真-2 に示した。

フローコーン引抜き直後は、ほとんど流動性を示さないが、外力（振動）を加えることにより、流動性状を示し、チキソトロピックな性状を有することが確認された。

表-3 フロー値

| 設計比重 | フロー値 (mm) |        |
|------|-----------|--------|
|      | 引き抜き後     | 15回落下後 |
| 1.2  | 96        | 156    |
| 1.5  | 89        | 148    |



写真-1 フロー試験（コーン引抜き直後）



写真-2 フロー試験（15 回落下後）

#### (2) 強度特性

図-1 に一軸圧縮強度試験結果を示した。

材齢 7 日で  $1.0\text{N/mm}^2$  以上の早期強度発現性があることが確認され、以後、経時的に強度が増進する現象がみられた。日本道路公団<sup>3)</sup>、鉄道総合研究所<sup>4)</sup>の指針等では圧縮強度について、28 日で  $1.0\sim 1.5\text{N/mm}^2$  以上としており、本注入材は十分に品質を満足できることが確認された。

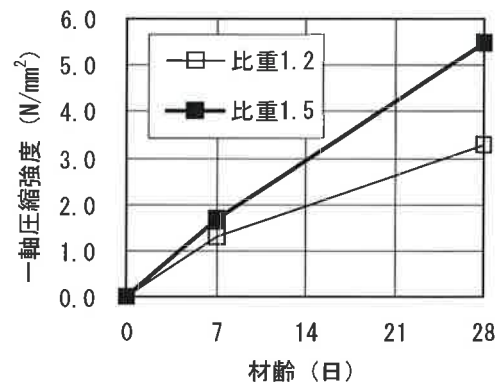


図-1 一軸圧縮強度

#### (3) 耐水性

濁度の測定結果を表-4 に示した。なお、表中には代表的な背面空洞注入材について試験した結果についても併記した。なお、水中不分離性コンクリートの濁度は  $200\text{ppm}$  以下となっている。

気泡剤を用いた設計比重 1.2 の注入材については、エアーモルタルより濁度が小さく、他の可塑性注入材とほぼ同等の耐水性を持つことが確認された。また、気泡剤を用いない設計比重 1.5 の注入材は、濁度が小さく、より高い耐水性をもつことが確認された。

表-4 濁度

| 材料       | 開発材料   |        | 既存の材料   |        |
|----------|--------|--------|---------|--------|
|          | 比重 1.2 | 比重 1.5 | エアーモルタル | 可塑性注入材 |
| 濁度 (ppm) | 113    | 83     | 175~210 | 90~120 |

## 4. 模型型枠への注入試験

背面空洞注入材の流動性状、充てん性状、耐水性を施工レベルで確認するため、模型型枠への注入試験を行った。

### 4.1 試験概要

#### (1) 模型型枠の概要

模型型枠の形状、寸法を図-2、外観を写真-3に示した。注入材は、図に示した内径 400mm、外径 800mm、長さ 4000mm の空隙に充てんするものとし、空隙の大きさの違いによる充てん性の違いを検討するため、型枠端部から 1000mm の位置に長さ 1000mm、幅 350mm、天端からの空隙高さ 350mm の空隙を設けた。なお、注入材は、注入管 1 および注入管 2 から注入するものとした。

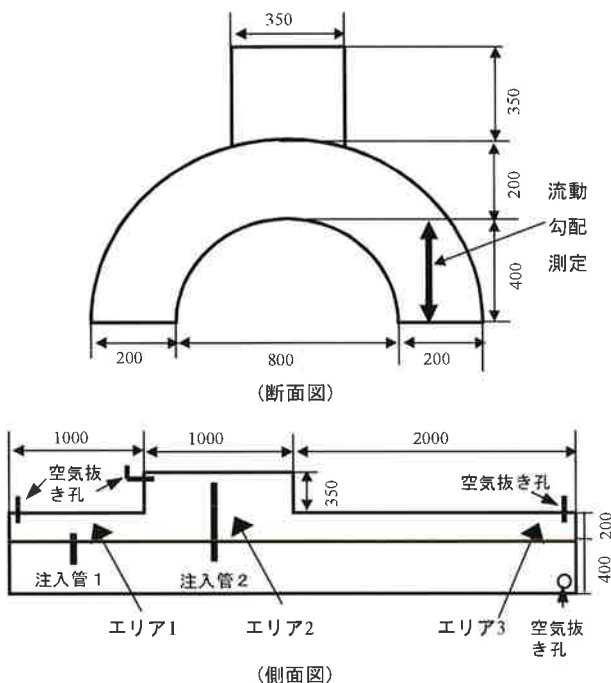


図-2 模型型枠の形状寸法（単位 mm）



写真-3 模型型枠外観

#### (2) 注入材製造方法

注入材は、図-3 に示す方法で必要量製造した。A 材、B

材はミキサで練混ぜ、C 材は発泡器を用いて発泡させた後、まず、A 材、C 材を混合し、最後に B 材をラインミキサで混合して注入材を製造した。なお、流量は、表-2 に示した基本配合に基づき、流量計を用いて制御した。

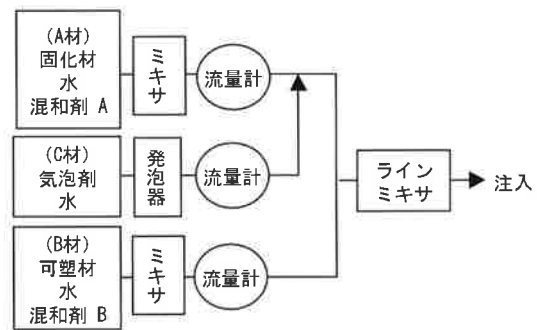


図-3 注入材料製造方法

#### (3) 試験パラメータおよび試験方法

本試験のパラメータを表-5 に示した。注入材は設計比重 1.2 を用いた。そして、フロー値、注入高さの違いによる流動性状について評価した。また、耐水性を評価するため、型枠内に内径天端高さ 200mm まで水を湛水して施工試験を行った。

表-5 試験パラメータ

| 試験ケース | 設計比重   | フロー値 (mm) | 使用注入管 | 湛水 |
|-------|--------|-----------|-------|----|
| ケース 1 | 比重 1.2 | 180mm     | 注入管 1 | なし |
| ケース 2 |        | 150mm     |       |    |
| ケース 3 |        |           | 注入管 2 | 有り |
| ケース 4 |        |           |       |    |

品質試験項目を表-6 に示した。

##### 1) フロー値

製造された注入材を模型型枠に注入する前に採取し、フロー値の測定を行った。

##### 2) 流動性状

図-2 に示した断面（太線矢印）におけるの流動勾配を注入材が側面図の右端の達した時に測定した。

##### 3) 濁度

図-2 に示した側面図右端の型枠側面および天端に設置した空気抜き孔に注入材が達する直前に空気孔から吐出している水を採取して、濁度を測定した。

##### 4) 強度特性

型枠脱型後、図-2 に示したエリア 1～3 から  $\Phi 50 \times 100$ mm のコア供試体を採取し、コア供試体の比重および一軸圧縮強度を測定した。

表-6 品質試験項目

| 試験ケース | 注入前  | 注入試験中 |    | 型枠脱型後 |      |
|-------|------|-------|----|-------|------|
|       | フロー値 | 流動性状  | 濁度 | コア比重  | コア強度 |
| ケース 1 | ○    | ○     | —  | —     | —    |
| ケース 2 |      |       | ○  | ○     | ○    |
| ケース 3 |      |       |    |       |      |
| ケース 4 |      |       |    |       |      |

## 4.2 試験結果

試験結果を以下に示した。

### (1) 流動性状

図-4 に各ケース毎に測定した注入材のフロー値、前述した断面における流動性状を示した。

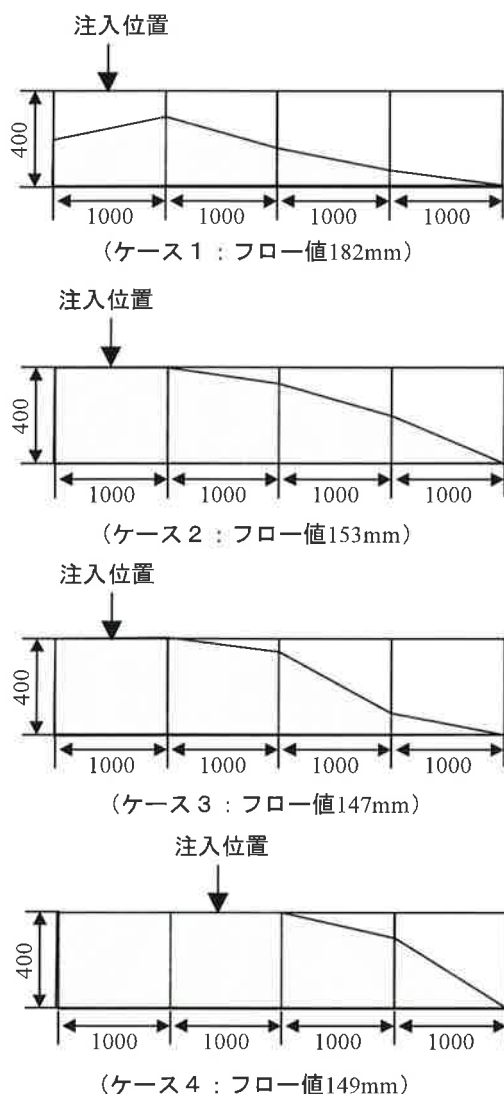


図-4 流動性状

ケース1、ケース2を比較すると、注入材のフロー値が小さいケース2の流動勾配が大きい傾向にあり、材料の逸散が少ないと考えられ、本注入材に関しては、フロー値が150mm程度のもの方が限定注入に適していると考えられた。

ケース2（気中打設）とケース3（水中打設）を比較すると、注入位置近傍の流動勾配に大差はなかったが、注入位置から離れるにつれて、水中打設した注入材の流動勾配が大きくなる傾向にあった。これは、水压により注入材の水平方向への移動が妨げられたものと考えられる。

ケース3とケース4、つまり、注入高さの違いによる流

動勾配を比較したところ、注入位置が高いケース4の方が流動勾配が大きく限定注入に適していると考えられた。つまり、注入管の材料吐出口を、できるだけ空隙天端近傍に設置すれば、限定注入性能が高くなると考えられた。

### (2) 濁度

空気抜き孔から採取した水の濁度測定試験結果を表-7に示した。濁度は、側面から採取したもの、および、低い吐出位置から水中打設したものの方が若干小さい傾向にあったが、全て200ppm以下であった。

表-7 濁度測定結果

| 試験ケース | 濁度 (ppm) |    |
|-------|----------|----|
|       | 側面       | 天端 |
| ケース3  | 115      | 92 |
| ケース4  | 132      | 96 |

### (3) コア比重、強度

ケース3で水中打設した注入材を脱型した状況を写真-4に示した。端部まで流動した注入材が天端まで充てんされていることが確認された。



写真-4 脱型状況（ケース3：端部）

採取したコアの比重、圧縮強度測定結果を表-8、比重と圧縮強度の関係を図-5に示した。

表-8 比重、圧縮強度試験結果

| 試験ケース | 比重   |      |      | 圧縮強度（材齢7日） |     |     |
|-------|------|------|------|------------|-----|-----|
|       | Ⅰア1  | Ⅰア2  | Ⅰア3  | Ⅰア1        | Ⅰア2 | Ⅰア3 |
| ケース2  | 1.32 | 1.22 | 1.21 | 2.6        | 1.8 | 1.6 |
| ケース3  | 1.31 | 1.24 | 1.24 | 2.7        | 1.9 | 1.4 |
| ケース4  | 1.29 | 1.35 | 1.23 | 2.2        | 2.8 | 1.4 |

表-8 から、注入管近傍の比重、圧縮強度が大きい傾向にあった。これは、注入管近傍の注入圧が高いことに起因すると考えられる。また、4m程度流動させたエリア3の注入材でも材齢7日で目標圧縮強度である1.0N/mm<sup>2</sup>以上となることが確認された。さらに、気中、水中打設し

たコアの比重、圧縮強度の差異はほとんどみられず、高い材料分離抵抗性があることが確認された。図-5 から、圧縮強度は、比重との相関が高いことが確認された。

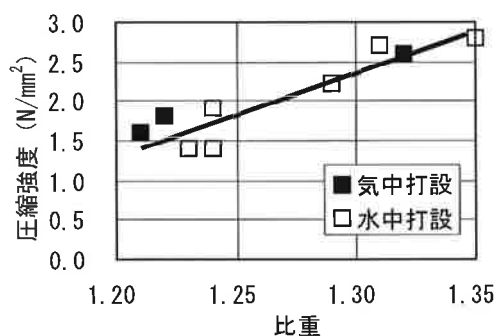


図-5 比重と圧縮強度の関係

## 5. 背面空洞注入材製造システム

急速大量施工，500m 以上の圧送，坑内注入エリアの縮小等が要求される多様な施工条件への適用を可能とする可塑性背面空洞注入材の製造システムを開発した。A 材，B 材は 1500m まで圧送可能，C 材は 500m まで圧送可能であり，各材の特徴を考慮した製造システムを図-6 に示した。

### (A 方式：基本システム)

坑外プラントで A 材，C 材を製造し，混合して圧送するラインと，B 材を製造して圧送するラインとで構成されている。圧送距離は 500m までとし，坑内プラントで注入材を製造する。そのため，坑内設備規模が小さくて済むため，交通規制エリアの省スペース化を図ることが可能である。

### (B 方式：長距離圧送・急速施工システム)

坑外プラントで A 材を製造し圧送するラインと，B 材を製造して圧送するラインとで構成されている。圧送距離は 1500m まで可能であり，坑内プラントで A 材と C 材を混合した後，B 材を混合し，注入材を製造する。

なお，A 材は凝結遅延効果を有する混和剤 A の添加量を増加させることにより，最大 2 日まで固化せず圧送可能であり，B 材も固化しない。したがって A 材，B 材を大量にストック（練置き）することにより，注入材の大量製造が可能であるため，急速施工，時間制約下における施工に対応が可能となる。

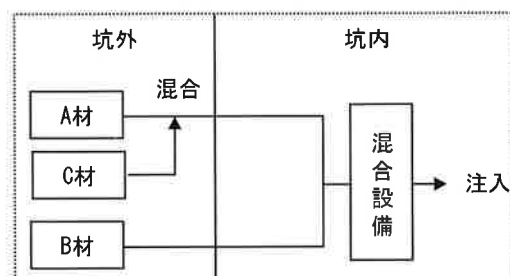
## 6. まとめ

限定注入可能な可塑性背面空洞注入材を開発し，注入材の品質評価を行った結果，以下のような知見を得た。

1) 開発した可塑性背面空洞注入材は，材齢 7 日で

### A方式：基本システム

(圧送距離 500m まで)



### B方式：長距離圧送・急速施工システム

(圧送距離 1500m まで)

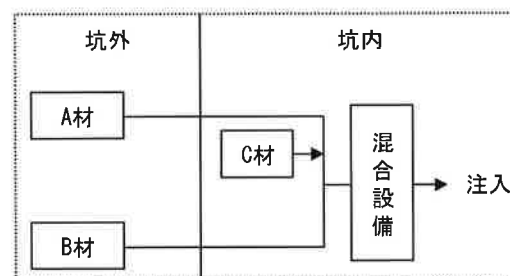


図-6 可塑性背面空洞注入材の製造システム

1.0N/mm<sup>2</sup>以上の早期強度発現性があり，高い耐水性能，材料分離抵抗性能を持つ。

2) 開発した可塑性背面空洞注入材は，フロー値 150mm 程度で良好な限定注入性能を持つと考えられる。水中で水平方向に 3m 程度流動させても，目標品質以下の品質低下が生じていないことがわかった。なお，空隙中に充てんした注入材の圧縮強度は，比重と高い相関があることがわかった。

3) 開発した可塑性背面空洞注入材製造システムは，多様な施工条件，すなわち，交通規制エリアの省スペース化施工，急速施工，時間制約下における施工等に対応が可能となる。

謝辞：本実験において多大なるご協力をいただいた近江機工（株）の石井宏明氏，長岡廉浩氏他関係各位の皆様方に深く感謝致します。

## 参考文献

- 1)例えば，充てん材の品質評価研究委員会中間報告書，日本コンクリート工学協会，pp7-36，1992
- 2)水中不分離性コンクリート設計施工指針（案），土木学会，pp65-66，1991
- 3)矢板工法トンネルの背面空洞注入工設計・施工指針（案），日本道路公団，2000 年
- 4)変状トンネル対策工設計マニュアル，鉄道総合研究所，1998 年