

## REDEEM工法の小断面トンネル適用のための試験施工

舟橋 孝仁\*1・島根 米三郎\*2・唐沢 智之\*3・川又 篤\*4・森部 広邦\*5

## 概 要

小断面トンネルにおける REDEEM 工法の適用にあたり、施工上の課題を解決するため、実際の施工環境を再現した模擬トンネルを製作し試験施工を行った。また、モルタルの品質管理基準値を見直すために凍結融解試験を行った。

試験施工により、アンカー穿孔方法の改善やアンカーの変更、自動計量装置の採用、鉄筋固定に切欠き冶具の使用、モルタル充填性確認等を行い、施工性や作業効率の向上、品質・出来形を確保できる施工方法を得た。また、凍結融解試験により、モルタル空気量の管理基準値の下限を 3.0%としても品質上問題がないことを確認し、新たな空気量の管理基準値を 3.0~10.0%と見直した。

キーワード：REDEEM 工法，小断面トンネル，試験施工，自動計量装置，鉄筋，管理基準値

## TRIAL CONSTRUCTION FOR APPLICATION OF THE REDEEM METHOD TO SMALL SECTION TUNNELS

Takahito FUNAHASHI \*1, Yonesaburo SHIMANE \*2, Tomoyuki KARASAWA \*3  
Atsushi KAWAMATA \*4, Hiroyuki MORIBE \*5

## Abstract

For application of the REDEEM method to small section tunnels, we have built a simulated tunnel that reproduces the actual construction environment and carried out test construction for the purpose of solving problems with construction. We have also conducted a freezing and thawing test to reconsider quality control standard values for mortar.

Through the test construction, we have improved the anchor boring method, changed the anchors, employed an automatic measuring device, used a notching jig for securing reinforcing bars, verified the mortar filling property, etc. to identify a construction method that improves workability and work efficiency, and ensures quality and work progress. In addition, we have confirmed, through the freezing and thawing test, that specifying the lower limit of the control standard value for the air content of mortar as 3.0 does not cause any problem with quality and revised the control standard for air content to a range of 3.0 to 10.0%.

Keywords: REDEEM method, small section tunnels, test construction, automatic measuring device, reinforcing steel, control standard value

---

\*1 Tunnel Group, Civil Engineering Technology Department, Civil Engineering Division

\*2 Manager, Tunnel Group, Civil Engineering Technology Department, Civil Engineering Division

\*3 Manager, Material Group, Research and Development Center, Construction Technology General Center

\*4 Architectural Department, Architectural Division

\*5 Tokyo Branch

## REDEEM工法の小断面トンネル適用のための試験施工

舟橋 孝仁\*1・島根 米三郎\*2・唐沢 智之\*3・川又 篤\*4・森部 広邦\*5

## 1. はじめに

横浜環状南線の一部において、既設上水道トンネル（以降、水路トンネルとする）の上方を4本の高速道路トンネル（本線トンネル2本、ランプトンネル2本）が交差する近接工事の計画がある。水路トンネルと高速道路トンネルの近接工事の位置関係を図-1に示す。水路トンネルと近接工事との近接度の区分は、直接影響領域<sup>1)</sup>に該当し、双方のトンネルの離隔は、約6~13mである。そのため、水路トンネルは、高速道路トンネルの近接工事により、トンネル掘削に起因する外力の影響を受けることが懸念されており、その影響範囲について、事前の補強対策工が計画されていた。

横浜環状南線釜利谷地区整備工事は、この水路トンネルに対し、近接工事の影響が予想される範囲において補強対策工を行うものである。補強対策工は、覆工背面の空洞充填および覆工の内面補強工があり、内面補強工については当社保有技術であるREDEEM（Revival technique using Ductility mortar in Effective and Efficient Maintenance of concrete

structures）工法が採用されることとなった。

当社におけるREDEEM工法の施工実績は、鉄道トンネルや高速道路トンネル等、比較的断面の大きいトンネルに適用した事例が多い。しかしながら、今回対象とする水路トンネルは、11m<sup>2</sup>程度の小断面トンネルであり、当社におけるREDEEM工法の施工実績からすると、極端に小さい断面である。小断面の水路トンネルへのREDEEM工法の適用にあたっては、従来どおりの施工が可能であるかや、特異な問題点を整理しそれを解決しておくなど、施工条件を想定した本工法の適用性について事前に検討を行う必要がある。

そこで、前記したトンネル内面補強工事を対象として施工上の課題を整理したうえで、実際の施工環境を再現した模擬水路トンネルを製作し、試験施工を行った。試験施工では、各施工段階における施工方法の確認、施工方法の改良・改善を行った。また、過去の経験を踏まえ、現場で管理し易い注入モルタルの品質管理基準値について見直しを行った。

2. REDEEM工法の概要<sup>2),3)</sup>

REDEEM工法は、図-2に示すように、既設トンネル覆工の内面にPVA（ポリビニールアルコール）繊維をマット状に成形したリディームマットを設置し、その表面にPVA繊維で補強したリディームボードを埋め込み型枠としてアンカーで固定し、リディームマット部分にモルタルを注入して覆工内面に補強層を構築するも

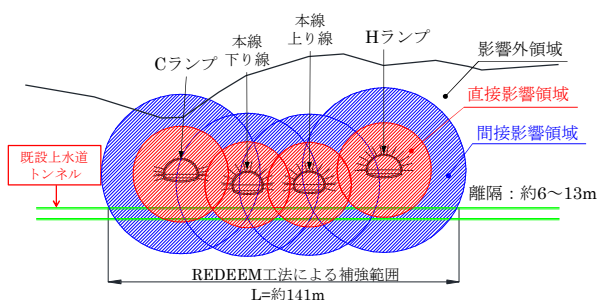


図-1 近接工事の位置関係

- \*1 土木本部 土木技術部 トンネルグループ  
 \*2 土木本部 土木技術部 トンネルグループ グループリーダー  
 \*3 建設技術総合センター 研究開発センター 材料グループ グループリーダー  
 \*4 建築本部 建築部  
 \*5 東京支店 釜利谷作業所

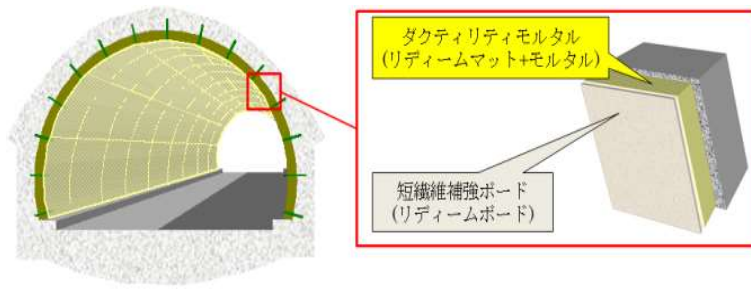


図-2 REDEEM 工法概要図

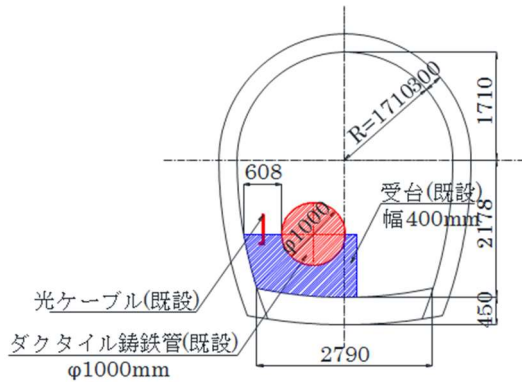
写真-1 PVA 繊維マット  
(リディームマット)

図-3 水路トンネルの断面図



写真-2 水路トンネル内の状況

のである。リディームマットの隙間に浸透、充填されたモルタル層は、薄肉で高強度、じん性に優れたダクティリティモルタル層を形成している。REDEEM 工法に用いられる主要な材料の特徴を次節に示す。

### 2. 1 短繊維補強ボード (リディームボード)

埋込み型枠として用いる短繊維補強ボード (寸法 910×1820×5.5mm) は、繊維径 26～100 $\mu$ m の PVA 短繊維を 3vol% 混入したセメント系材料である。このボードは、優れた引張特性を有しているため、大きな変形に追従でき、トンネル覆工の曲面に合わせて設置することができる。さらに、耐衝撃性に優れており切断や削孔などの加工が容易にでき、合板と同様の方法で型枠として組み立てることが可能である。

### 2. 2 PVA 繊維マット (リディームマット)

PVA 繊維マットは、写真-1 に示すように繊維径約 100 $\mu$ m の短繊維をマット状 (寸法 1000×2000×70mm) に成型したものである。トンネルの壁面の凹凸に対応できるため厚さ約

70mm のマットを 50mm に押し縮めて施工することを基本としている。50mm に押し縮めて使用した場合、PVA 繊維混入率は、約 0.9vol% となる。

### 2. 3 ダクティリティモルタル (リディームマット+モルタル)

ダクティリティモルタルは、リディームマットにモルタルを注入、充填することにより形成される、高強度でじん性能に優れた均質なセメント系繊維補強層である。また、繊維の効果により、優れたひび割れ抵抗性を有し、ひび割れ分散効果に優れている。

### 3. 既設水路トンネルの概要

試験施工の対象とした水路トンネルの断面図を図-3に、トンネル内の状況を写真-2に示す。また、トンネルの概要を表-1に示す。トンネル空間は、人が徒歩巡回できる程度の空間はあるものの、作業空間としては非常に狭小であることがわかる。

表-1 水路トンネルの概要

竣工	昭和 39 年
延長	L=4,040m
内空幅×高さ	約 3.5m×約 3.9m
内空断面積	約 11.4m <sup>2</sup>
覆工巻厚	アーチ・側壁部：300mm インバート部：450mm
トンネル内 既設付属設備	・ダクティル鑄鉄管(φ1,000mm) ・受け台(コンクリート製) ・光ケーブル

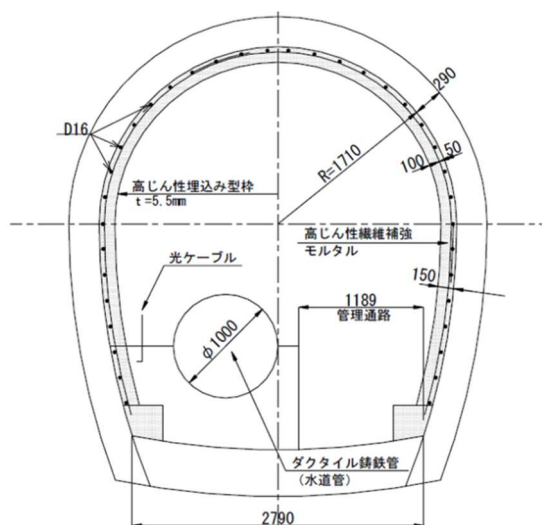


図-4 内面補強工の標準断面図

#### 4. 内面補強工の施工概要

水路トンネルに対する内面補強工の施工範囲は、図-1に示すように、近接度の区分が間接影響領域<sup>1)</sup>となる範囲の約141mである。そのうち、離隔距離が最も小さい本線(上り線および下り線)トンネルの直接影響領域を包括する約59m区間では内面補強厚が150mmであり、それ以外の範囲では内面補強厚が100mmとなっている。また、図-4に示すように、高じん性繊維補強モルタル部材内には鉄筋(主鉄筋D16@250mm, 配力筋D16@250mm)を配置する設計になっている。

#### 5. REDEEM 工法適用にあたっての施工上の課題

小断面水路トンネルへの REDEEM 工法の適

用にあたっては、施工上の課題として、3.および4.で示したトンネル空間や施工条件から以下の3項目を抽出した。

##### ①施工空間が狭小

トンネル空間として、内空幅約3.5m(半径約1.7m)、内空断面積11m<sup>2</sup>程度と小断面であるとともに、半径が小さい。また、トンネル内の片側には、ダクティル鑄鉄管やその受け台が設置されており、特に狭小な箇所が存在する。そのため、小半径でのリディームボードの取付けが困難となることや、狭小箇所での施工性が悪化することが懸念される。

##### ②施工延長が長い

REDEEM 工法の主要工程として、アンカーによるベースプレートの固定、受けプレート設置、リディームマットおよびボードの設置、モルタル材料の計量、モルタル注入等がある。このうち、アンカーによるベースプレートの固定については、アンカー打設に多大な手間を要し、工程への影響が懸念され、注入モルタル材料(特に練混ぜ水や混和剤)の計量については、練混ぜバッチごとに作業員が計量することになるため、計量誤差や計量ミスが品質のばらつきを生じさせる要因となりうるということが考えられる。本施工の施工延長は約141mであり、これまでの実績と比べると非常に長い。そのため、施工延長が長くなる程、施工手間、工程、品質等への影響が懸念される。

##### ③リディームマット内の鉄筋配置

本施工の内面補強工は、補強厚100mmおよび150mmのリディームマット内に鉄筋を配置する必要があり、施工実績もない。鉄筋は、リディームマット間の所定の位置に固定する必要があり、鉄筋の固定方法によっては、鉄筋かぶりや出来形確保に影響し、人手や施工手間が掛かる施工工程となることが想定される。また、リディームマット内の鉄筋の存在が、注入モルタルの流動性や充填性を阻害することも想定される。

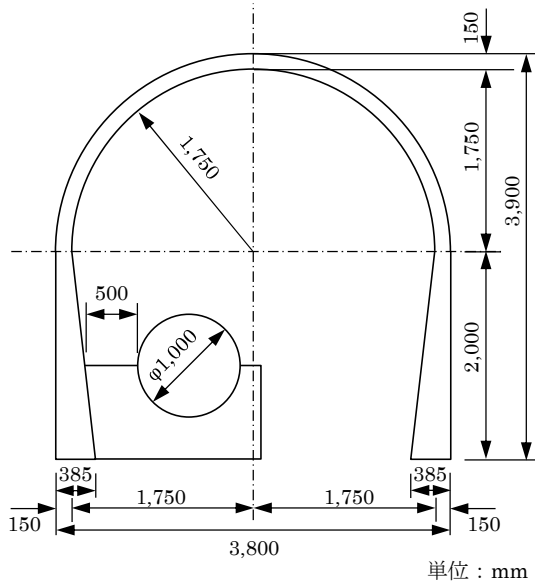


図-5 模擬トンネルの断面寸法



写真-3 模擬トンネルの全景



写真-4 管と側壁の距離



(a)通常タイプ



(b)アングルチャック装着

写真-5 ハンマードリルの穿孔方向の違い

## 6. 試験施工

5. で示した施工上の課題は、本施工の前に解決しておく必要がある。そこで、実際の水路トンネルを模擬した小断面トンネル(以降、模擬トンネルとする)を製作し、試験施工を行った。試験施工では、所定の品質、出来形を確保できる施工方法や施工手順の確認、作業の効率化および施工工程の短縮を目的として、施工方法の改良・改善を行った。なお、従来どおりに施工できる作業工程についてはそのままとした。

### 6. 1 模擬トンネル

模擬トンネルの断面寸法を図-5に、全景を写真-3に示す。模擬トンネルの大きさは、水路トンネルの内空断面寸法とほぼ等しく、延長は6.0mとした。また、付属設備として、ダク

タイル鑄鉄管は紙ボイドにより、受け台は木製型枠により再現した。

### 6. 2 施工上の課題に対する改良・改善

#### (1) 「施工空間が狭小」に対する施工方法の改善

ダクタイル鑄鉄管および受け台が設置されるトンネル側壁側では、写真-4に示すように、施工空間が40~50cm程度しか確保できない。この狭い空間でのアンカー孔の穿孔は、写真-5(a)に示す通常のハンマードリルを用いた場合、ドリルの回転軸と穿孔方向が同じであるためドリルの全長が長くなり、困難を極めた。そこで、限られた空間でアンカー孔の穿孔を確実にを行うために、写真-5(b)に示すアングルチャックを用いることとした。アングルチャックと

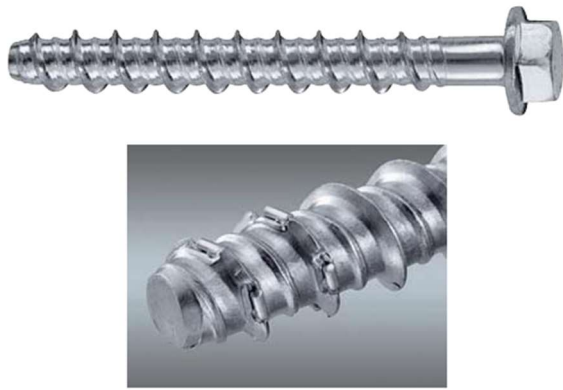


写真-6 ねじ固定式金属アンカー4  
(HILTI 社製)

は、ドリルの回転軸を直角方向に変換できるものであり、これにより、狭い空間における穿孔作業を容易にし、施工性の向上、作業の効率化を図ることができた。

一方、内空半径が小さいアーチ部に対するリディームボードの設置については、ボードの割れや折れ等の不具合が生じない設置方法をトライアル的に実施した。設置前のボードの初期形状、ボードを単管固定するためフォームタイの締付け順序等を確認した。試験施工の結果、設置前のボードに対し、若干の曲げクセをつけておくことでボードの設置が容易になることや、ボード端部におけるフォームタイの締付け順序に注意することで、ボードが損傷なく設置できることが分かった。

### (2) 「施工延長が長い」に対する改良

本施工は、施工延長が長く、ベースプレートを固定するためのアンカー打設に多大な施工手間と時間が費やされる。従来のアンカー打設は、アンカー孔の穿孔・清掃、ホールインアンカーの挿入・打込み、ベースプレートのボルト固定、といった概ね3工程で行っていた。試験施工では、ベースプレートの固定に要する作業工程を短縮するため、写真-6に示す HILTI 社製のねじ固定式金属アンカー（以降、スクリューアンカーとする）を採用した。スクリューアンカーを用いることにより、従来のベースプレートの固定に要したアンカー挿入・打込み、ボルト固



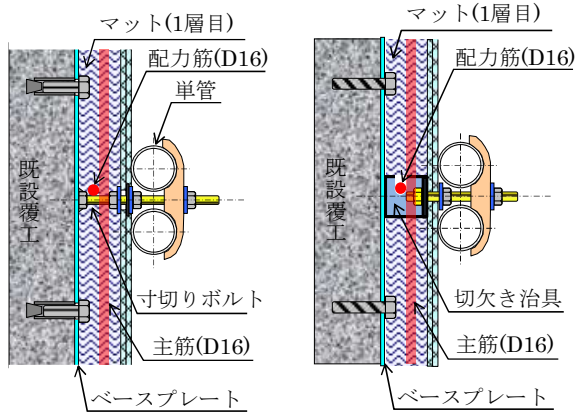
写真-7 自動計量装置

定の作業工程を短縮でき、ベースプレートを当てた状態でスクリューアンカーにより直接固定するのみの工程となった。これにより、ベースプレートの固定に掛かる作業スピードや作業効率の向上を図ることができた。

つぎに、施工延長が長くなるにつれてモルタルを注入する回数も増えるが、それと同時に注入材料の計量回数も多くなり施工手間も増加する。また、モルタルの品質に影響を与える練混ぜ水および混和剤は、従来1バッチごとに作業員が計量を行っており、計量誤差、計量ミスによるモルタル品質にばらつきが生じることが懸念された。またそれは、計量回数が増すにつれ増大することが想定された。そこで、計量手間を削減し、安定した計量ができるようにするため、写真-7に示す練混ぜ水および混和剤（今回は高性 AE 減水剤を想定）の自動計量装置を開発した。本装置は、練混ぜ水は流量管理によって、混和剤は時間管理によって所定の量を安定して計量することができる。この装置を使用することにより、計量回数が増しても、計量手間を削減することができ、安定した計量が可能なため、モルタル品質の安定にも繋がった。

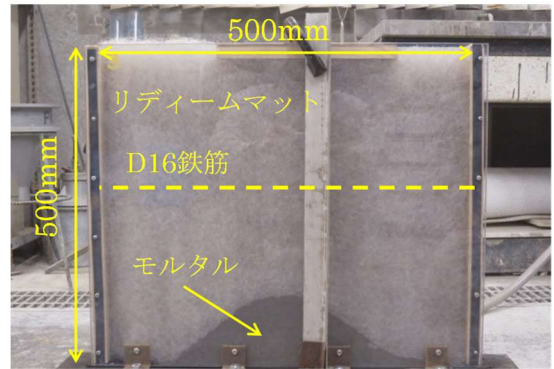
### (3) 「リディームマット内の鉄筋配置」に対する対応

これまでの REDEEM 工法による施工では、リディームマット内に鉄筋を設置する事例はなく、本施工が初めてである。そのため、鉄筋の



(a)従来方法 (b)改良後の方法

図-6 鉄筋固定方法



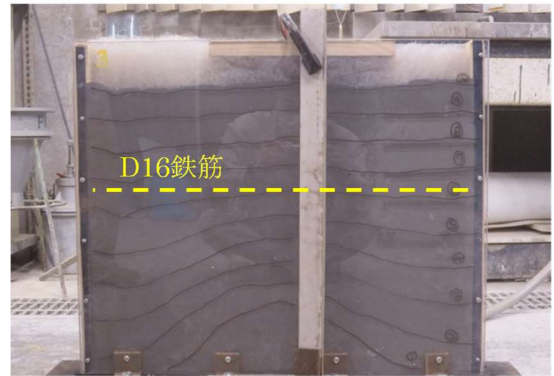
(a)注入中



写真-8 固定状況 (従来方法)



写真-9 切欠き治具



(b)注入完了後

写真-10 注入中および注入完了後の状況

固定方法、薄肉部材における所定のかぶりや出来形の確保、施工性等を試験施工で確認する必要がある。まずは、図-6(a)に示す従来の施工方法の流れで鉄筋の設置を行った。ベースプレートおよび受けプレートの設置後、リディームマットを取付け、ベースプレートに固定された寸切りボルトのかぶりが確保できる位置に鉄筋(配力筋)を結束し、鉄筋でマットを押え込むようにした(写真-8)。この施工方法は、所定の部材厚は確保できるものの、狭小な作業空間でマットを鉄筋(配力筋)で押えながらの作業となり、しかも結束箇所ごとに作業員が必要となる人手の掛かる作業であった。また、マットの反発により結束作業に時間を要すうえ、鉄筋にずれが生じる等、施工性の悪化やかぶり不足につながる可能性があることがわかった。これを改善するため、鉄筋の固定方法を見直し

た。改良後の施工方法を図-6(b)に示す。改良後の施工方法は、切欠きを有した治具(以降、切欠き治具とする)が溶接されたベースプレート(写真-9)を用いた。この切欠き治具は、鉄筋配置位置に切欠きがあり、そこに鉄筋(配力筋)を引っ掛けることができる。そのため、改良前に比べ寸切りボルトへの結束作業が省略できるうえ、正確な位置に鉄筋を固定することができるため、所定のかぶりを確実に確保できる利点がある。また、部材の巻厚調整について、従来の方法では、寸切りボルトとナットにより受けプレートの高さを調整していたが、改良後は、あらかじめ高さ調整された治具に受けプレートを固定するだけであり、確実に所定の巻厚が確保できる。

つぎに、圧縮されたリディームマット内に鉄筋が存在する場合、モルタル注入の際、鉄筋が

モルタルの流動を阻害し充填性が悪化する可能性があるため、事前にその影響を確認した。モルタルの流動性および充填性の確認は、注入試験により行った。模型型枠は、縦 500mm、横 500mm とし、厚さは型枠脱型後に鉄筋のまわりの充填性を確認するために 50mm の半断面とし、注入の状況が観察できるよう前面にはアクリル板を使用した。また、鉄筋 (D16) は、模型高さのほぼ中央に水平方向に 1 本設置した。注入状況は、1 分ごとの注入高さをアクリル板に記録した。注入中および注入後の状況を写真-10 に示す。注入試験より、マット内に鉄筋がある場合においても、モルタルの流動を阻害する状況は確認されず、モルタルの充填性は良好であることを確認した。

## 7. 管理基準値の見直し

### 7. 1 概要

REDEEM 工法における注入モルタルの品質管理項目には、モルタルフロー、空気量、ブリーディング率、圧縮強度等がある。なかでも空気量については、従来の管理基準値は、 $8.5 \pm 1.5\%$  (7.0~10.0%) としており、空気量が多く、かつ管理幅が小さい。そのため、たとえば AE 剤添加量の僅かな誤差でも空気量は影響を受け易く、管理値を満足することが難しい場合があった。モルタルの所要の性能を確保できる範囲であれば、管理基準値を見直すことにより、施工時の品質管理もし易くなるものと考えられる。

そこで、管理基準値の下限値に着目し、空気量が低下した際に、凍害に対する抵抗性がどの程度保持されるのかを確認するため、凍結融解試験を行い、空気量の下限値の見直しを行った。

### 7. 2 試験概要

凍結融解試験は、JIS A 1148:2010 コンクリートの凍結融解試験方法 (A 法：水中凍結水中融解試験方法) により実施した。試験では、たわみ振動の一次共鳴振動数および質量の測定間隔は 30 サイクルとし、試験終了は 300 サイクルまでとした。なお、300 サイクルまでに相対

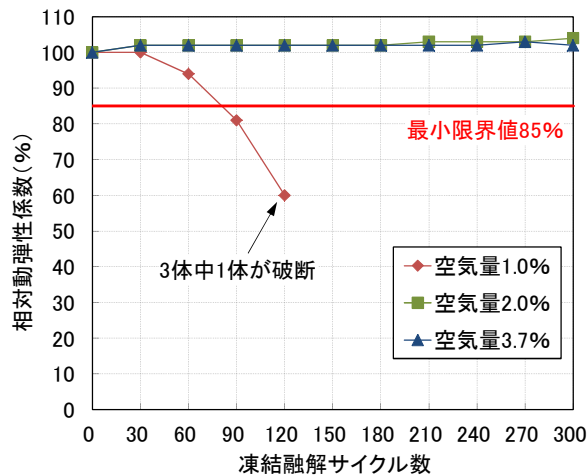


図-7 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係 (空気量 1.0%, 2.0%, 3.7%)

動弾性係数が 60%以下となったものは、そのサイクルで終了とした。試験ケースは、空気量が 1.0%, 2.0%, 3.7%の 3 種類とした。

### 7. 3 試験結果

凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係を図-7 に示す。図中には、コンクリート標準示方書<sup>5)</sup>に規定される凍結融解試験における相対動弾性係数の最小限界値 85%のラインを示した。試験結果は、空気量 2.0%および 3.7%の場合には、凍結融解サイクル数が 300 サイクルにおいても、相対動弾性係数にはほとんど低下がみられず、最小限界値 85%を上回る結果となった。一方、空気量 1.0%の場合では、90 サイクルの段階で、相対動弾性係数の平均値が、最小限界値 85%を下回り、120 サイクルでは相対動弾性係数の平均値 (供試体 3 本中の 1 本が破断したため 2 本の平均とした) は 60%まで低下した。

### 7. 4 空気量の新たな管理基準値の設定

試験結果を参考に、空気量の管理基準値の見直しを行った。試験では、空気量 2.0%で規定を満足し、1.0%では満足しない結果が得られたが、データのばらつきや変動等に鑑み、空気量の下限値は、安全側の 3.0%に設定した。また、上限値はこれまでと同様の値とした。よって、新たに設定した空気量の管理基準値は、3.0~10.0%とした。



## 8. まとめ

小断面水路トンネルにおける REDEEM 工法の適用にあたり、施工上の課題を解決すべく、実際の施工環境を再現した模擬水路トンネルを製作し試験施工を行った。試験施工では、各施工段階における施工方法の確認、施工方法の改良・改善を行った。また、注入モルタルの品質管理基準値についても見直しを行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 狭小な施工空間におけるアンカー孔の穿孔にアングルチャックを使用することにより、狭い空間における穿孔作業を容易とし、施工性の向上、作業の効率化を図ることができる。
- (2) 内空半径が小さい箇所に対するリディームボードの設置方法は、設置前のボードに対し、若干の曲げクセをつけておくことでボードの設置が容易となる。また、ボード端部におけるフォームタイの締付け順序に注意することで、ボードを損傷させることなく設置ができる。
- (3) ベースプレートを固定するためのアンカー打設に、ねじ固定式金属アンカーを用いることにより、従来のベースプレートの固定に要した作業工程が短縮でき、作業スピードや作業効率の向上につながる。
- (4) モルタル注入材料の計量において、練混ぜ水および混和剤（高性能 AE 減水剤）の計量に自動計量装置を用いることにより、計量作業が省力化でき、安定した計量が可能となる。
- (5) リディームマット内に鉄筋を設置する場合、従来の施工方法では、狭小な作業空間でマットを鉄筋で押えながらの作業となるため鉄筋の固定に人手や時間を要し、施工性が悪化することがわかった。

鉄筋の設置方法として、鉄筋を掛けるための切欠きを有した治具が溶接されたベースプレートを用いることにより、改良前に比べ鉄筋の固定作業が容易になり作業効率が向上し、鉄筋のかぶりや巻厚を確実に確保できる。

- (6) リディームマット内に鉄筋が設置されている状態を模擬した模型型枠により注入試験を実施した結果、マット内に鉄筋がある場合においても、モルタルの流動を阻害する状況は確認されず、モルタルの充填性は良好であることが確認できた。
- (7) 注入モルタルの品質管理項目のうち、空気量の品質管理基準について、管理値の下限に着目し、凍結融解試験により空気量の低下に伴うモルタル品質の変化を確認した結果、空気量の管理基準の下限値を、従来の 7.0% から 3.0% としても品質上問題のないことがわかった。よって、新たな空気量の管理基準値を 3.0~10.0% とした。

## 参考文献

- 1) 東日本・中日本・西日本高速道路株式会社：設計要領第三集トンネル編トンネル本体工保全編(近接施工)，2015
- 2) 土井至朗ほか：ビニロン繊維マットを用いた補修・補強工法，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1701-1706，2002
- 3) 西脇敬一ほか：PVA 繊維マットを用いた補修・補強工法の既設トンネルへの適用，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.1565-1570，2003
- 4) 日本ヒルティ：日本ヒルティホームページ，<https://www.hilti.co.jp/>，(2015.11.20)
- 5) (公社)土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書[設計編]，pp.157-160，2013.3