

トンネル覆工背面空洞充填材料 (PLAM) の開発

小島 文寛* 早川 健司* 伊藤 正憲*
前原 聡** 鈴木 祥三* 徳留 修*

要約： 矢板工法で建設された古いトンネルでは、覆工コンクリート背面に空洞が存在している場合が多く、耐久性を向上させるために背面空洞充填工法が適用されている。本研究では、既設の覆工の巻厚や劣化状態に応じて材料強度の選択が可能な背面空洞充填材料 (PLAM) の開発を行なった。鉄道トンネルの模擬試験体に静的荷重試験を行い、覆工が薄い場合では、覆工コンクリートと同等の強度を有する材料を用いると、従来の材料を用いた場合よりも覆工の安定性が向上することを確認した。また、アンカーの引抜耐力を向上させ、鉄道トンネルにおける架線固定用アンカー等をより確実に固定できることを確認した。一方で、覆工の状態によっては、空洞充填に際し補強工を必要とする場合がある。本研究では、特に覆工厚さが設計以下の薄い場合を想定し、種々の補強を施した試験体による荷重試験を実施した。その結果、覆工が 100mm と極端に薄い場合でも、ロックボルトと高靱性モルタルボードを用いた補強工法により、注入施工時の安全性を確保できることを確認した。

キーワード： トンネル 矢板工法 覆工背面空洞充填工法 可塑性モルタル 補強

- 目次：**
- | | |
|----------------|-------------------------|
| 1. はじめに | 5. 覆工 1/4 モデル荷重試験 |
| 2. 新充填材料のコンセプト | 6. 充填時の安全性の確認と内巻補強効果の確認 |
| 3. 新充填材料の物性 | 7. まとめ |
| 4. アンカー引抜き試験 | |

1. はじめに

矢板工法で建設されたトンネルでは、覆工コンクリート背面に空洞が存在している場合が多い。特に、矢板工法は、NATM 工法で建設されたトンネルに比べて天端部に空洞ができやすく、覆工の設計厚が確保されないまま供用されているトンネルもある。このようなトンネルの耐久性を向上させるために、背面空洞充填工法が適用されている。

本研究では、新たに覆工厚に応じて強度を選択可能な従来の強度タイプと高強度タイプを有する可塑性モルタルを用いた背面空洞充填材料 (PLAM: Plastic Lightweight Aggregate Mortar) の開発を行い、その優位性を検証するために、あと施工アンカー引抜き試験およびトンネル覆工模擬試験体の荷重試験を実施した。

また、背面空洞充填工法の施工に際しては事前調査を行い覆工の圧縮強度が 10N/mm^2 以下の場合や覆工厚が 200mm 以下の部分がある場合には、充填作業時の安全性を含め、何らかの内巻補強工を施工することが求められている¹⁾²⁾。そこで覆工厚さが 200mm 以下の薄い場合を想定し、充填施工時の安全性を確保するための検討として、補強を施した覆工モデル試験体の荷重試験を実施した。本論では、材料の設計コンセプトと諸性能を述べるとともに、上述した一連の実験結果について報告する。

2. 新充填材料の設計コンセプト

従来の背面空洞充填工法に用いられている充填材料は、発泡ウレタンやエアモルタル等の無機系可塑性モルタルが適用される場合が多い。この場合、充填材料の要求性能は、地盤反力を均等に覆工に伝えることや、地山の緩みの進展の防止であり、圧縮強度は地山程度を想定して設計されている。しかし、簡易解析の結果によれば設計覆工厚が確保されていない条件では、地山相当の $1\sim 2\text{N/mm}^2$ 程度の材料を充填するよりも覆工コンクリート強度を有する高強度材料で充填したほうが覆工の安定性が確保されるとの結果を得た。

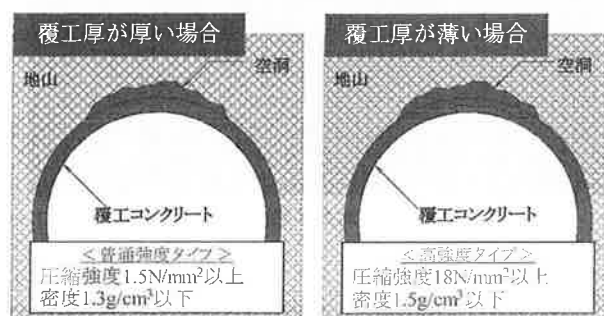


図1 設計コンセプトのイメージ

また、鉄道トンネル内では架線や信号ケーブルを支持する金物を固定する場合、あと施工アンカーを利用して、覆工が薄く充填材料が低強度の場合、確実な固定ができないことも考えられる。

一方で、覆工が薄い箇所は、覆工背面空洞ら部分的に存在することが多い。そこで、図 1 に示すように覆工の状況に応じ従来材料すなわち地山相当の 1~2N/mm²程度の普通強度タイプと覆工コンクリートと同等の高強度タイプを同施工システムで選択可能とする材料とした。

強度以外の諸性能は、「矢板工法トンネルの背面空洞注入工設計・施工指針」²⁾(以下、NEXCO 規格)に示される要求性能とし、配合の調整により、地山相当強度とさらに高強度化した 2 タイプの可塑性モルタル(PLAM)の開発を進めることとした。

3. 新充填材料の物性

3.1 材料構成および基礎物性

表 1 に PLAM の材料構成および基礎物性値を示す。2 タイプは同じ材料構成であり水セメント比や特殊可塑性の量を変えることで強度レベルを変化させている。密度は普通強度で 1.31g/cm³、高強度で 1.49g/cm³であり、材齢 28 日圧縮強度は 3.2 N/mm²と 20.5 N/mm²であった。いずれも NEXCO 規格(水中不分離抵抗性など)を満足する。

表 1 充填材料の材料構成および基礎物性値

種類		普通強度	高強度
水セメント比(%)		208	52
単位 質量 (kg/m ³)	特殊可塑性材	636	171
	軽量発泡材	6.4	6.4
φ 80mm フロー	静止時	121	90
	打撃時	205	164
密度(g/cm ³)		1.31	1.49
圧縮強度 σ ₂₈ (N/mm ²)		3.2	20.5

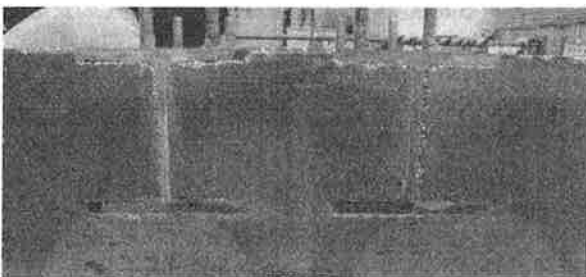


写真 1 NEXCO 充填試験結果(H鋼周辺)



写真 2 NEXCO 充填試験結果(黄線より上が PLAM)

3.2 充填性能

充填性能は、NEXCO 規格に準拠して行なった。その結果、H 鋼やコンクリートブロックなどの障害付近においても完全に充填されており、ほぼ 100%の充填性が確認された。(写真 1 および 2)

なお充填試験時には、型枠内面に作用する圧力を測定し、施工時の安全性の検討に用いた。充填試験型枠の注入口付近・中部・後部の 3 箇所にて圧力を計測したところ、注入口付近での圧力が最大となり、0.078MPa であった。

4. アンカー引抜き試験

4.1 試験概要

表 2 および図 2 にアンカーの引抜き試験の概要を示す。アンカー筋は充填材の上に覆工を模擬したコンクリート平板を設置し、充填材のみで定着させた。鉄道総合技術研究所「あと施工アンカー工法設計の手引き」³⁾を参考にするとアンカーの定着長は 15D となる。しかし、本試験では充填材の違いによるアンカーの引抜き耐力を評価するため降伏しないように定着長を 6D とした。350kN ジャッキを使用し、普通強度、高強度タイプそれぞれ 2 回の試験を行い、引抜き荷重とアンカー根元部の変位量を測定した。

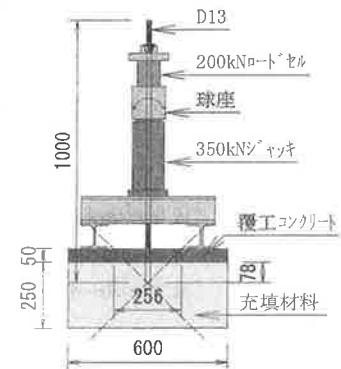


図 2 試験体の概要

表 2 アンカー引抜き試験の概要

充填材種類	普通強度・高強度タイプ
試験体寸法	600×600×300mm
アンカー	SD490 D13 L:1000mm
削孔径	16mm
定着長	78mm(6D)
定着樹脂	エポキシ樹脂

4.2 試験結果

図 3 にアンカーの引抜き荷重と変位の関係を示す。高強度タイプの最大荷重の平均が 55.8kN であったのに対して、普通強度タイプは 13.8kN となり、高強度タイプの方が約 4 倍の引抜き荷重となった。このことから、覆工厚が薄い場合、架線他、トンネル内に必要な設備を固定する場合の安全性が高強度タイプの充填により向上することを確認した。

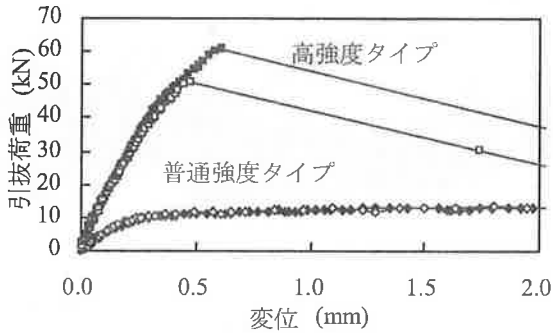


図3 アンカー引抜き試験結果

5. 覆工モデル試験体の荷重試験

5.1 試験概要

表3、図4、写真3に荷重試験の概要を示す。試験体は、鉄道複線トンネルの1/4モデルとし、内半径R=1mの半円形無筋コンクリートとし、天端部に断面欠損部を設けて空洞を模擬した。荷重試験は、充填しないもの(No.1)、および高強度(No.2)、普通強度タイプ(No.3)の可塑性モルタルを充填した3体の試験体を対象とした。荷重は、350kNジャッキを用いて単純荷重し、ひび割れなどの発生状況を確認するとともに、荷重、変位などを計測した。

表3 鉄道複線トンネル1/4モデルの概要

覆工コンクリート	覆工厚：125mm 天端厚：50mm 幅：200mm W/C：70% σ 28：24N/mm ²
模擬地盤	セメントベントナイト改良土

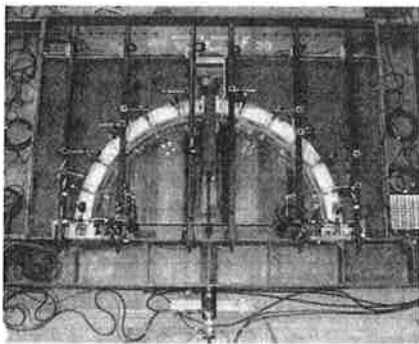


写真3 1/4モデル荷重試験状況

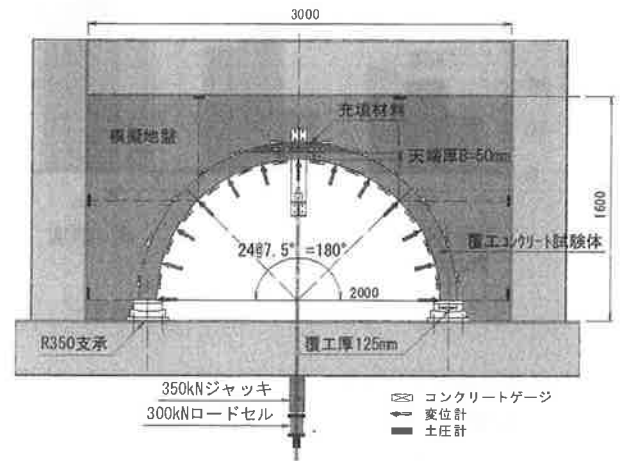
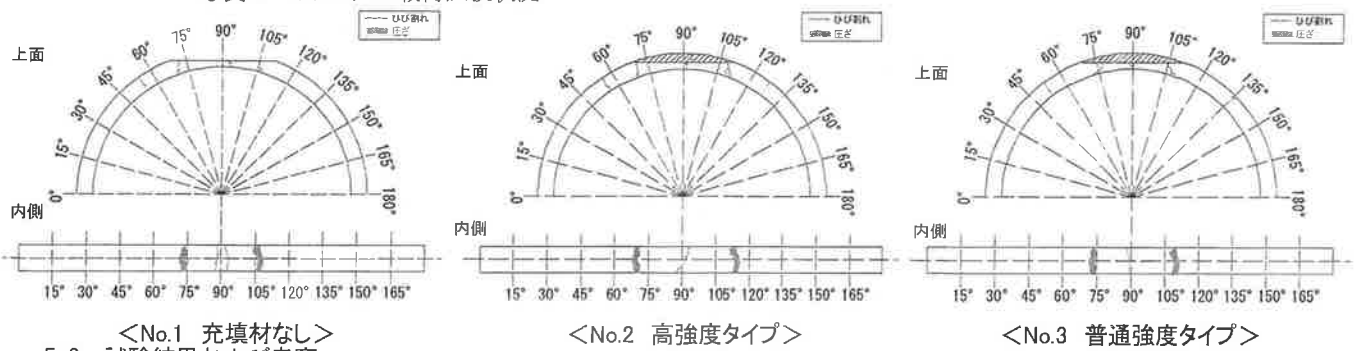


図4 1/4モデル荷重試験装置



<No.1 充填材なし>
5.2 試験結果および考察

<No.2 高強度タイプ>

<No.3 普通強度タイプ>

図5 1/4モデル試験体の荷重試験後の状況

図5に荷重後の試験体の状況を、図6に荷重試験の結果である荷重と天端変位の関係を、図7に各荷重条件における比較図を示す。いずれの試験体も90度内側、60度と120度付近外側にひび割れが発生し、次に、75度と105度外側(肩部)付近にひび割れが発生した。その後、ピーク荷重に達し、最後は、75度と105度内側付近のコンクリートの圧壊により破壊に至った。充填材料の違いによる補強効果の違いは、肩部外側のひび割れ発生時(図6中のP2)に顕著であり、充填材なしに対し高強度タイプは約170%、普通強度タイプは約110%であった。特に、75度と105度付近の外側の曲げひび割れ発生時に充填材の強度の差が顕著に現れている。なお、両タイプともに天端内側にひび割れが発生するまでの初期剛性は、ほぼ同等の挙動を示した。

このように、高強度タイプを充填することで覆工耐力が向上することが示された。また実際のトンネルではより天端厚さが薄く、また、背面空洞の範囲が大きくなる場合も想定され、この場合は高強度タイプの優位性がより顕著になると考えられる。

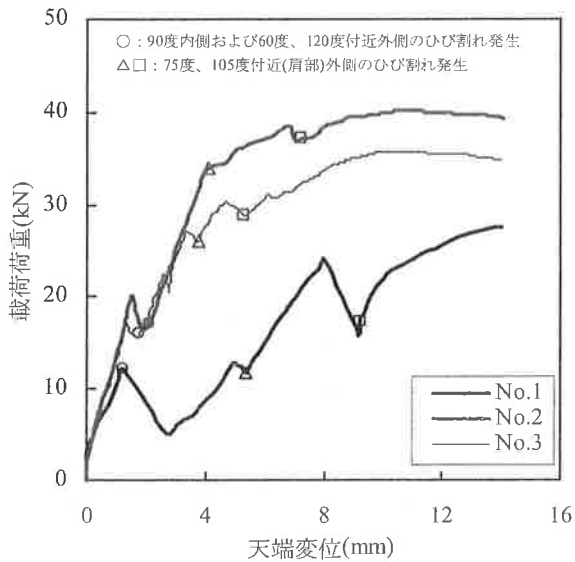


図6 荷重と天端変位の関係

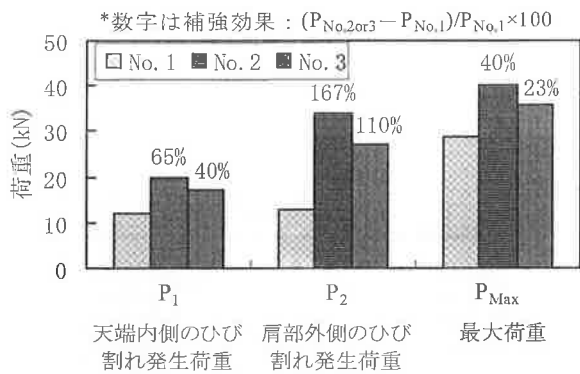


図7 各荷重条件における比較図

6. 充填時の安全性の検討

6.1 試験概要

表4および写真4に示すような鉄道複線トンネルの覆工の1/2モデル、天端60~120度範囲を想定したアーチ型無筋コンクリート試験体を対象とした。表4に試験体の諸元等を示す。天端厚は背面空洞を想定し、事前に補強の必要のない断面厚100mm(No.1)と事前補強が必要となる75mm(No.2)、50mm(No.3)の3体を作製した。

表5に試験体の補強方法を示す。補強方法は、ロックボルトおよびアラミド繊維シート(目付量90g/m²)を接着した高靱性モルタルボード(写真5)のアンカーによる貼付固定・覆工へのエポキシ樹脂接着を選定した。載荷は、図8に示すように、500kNジャッキを用いて単調載荷し、荷重、変位の計測、ひび割れなどの発生状況を確認した。No.2試験体の補強効果の初期剛性の確認方法は、天端変位が0.6mm以上、天端コンクリートひずみが100μ以内の弾性域内での載荷を行なった。



写真4 1/2モデル試験体

表4 1/2モデル試験体の諸元

		実大トンネル	1/2試験体 (400mm幅)
試験体 寸法 (mm)	内半径	4000	2000
	覆工厚	500	250
	天端厚	200	100
		150	75
	100	50	
空洞厚(mm)		500	250
補強工	ロック ボルト	D32@900mm	D16@450mm
		D25@900mm	D13@450mm
	ボード 固定用 アンカー	M12@450mm	M6@225mm

表5 試験体の補強方法

No.	試験体 天端厚 (mm)	補強方法*		
		ロック ボルト	モルタルボード アンカー固定	ボード 接着
No.1	100mm	—	—	—
No.2-1	75mm	—	—	—
No.2-2		—	4mm	—
No.2-3		D13	4mm	—
No.2-4		D13	4mm	○
No.3	50mm	D16	4mm×2枚	○

*モルタルボード2枚、覆工への接着は、エポキシ樹脂を使用

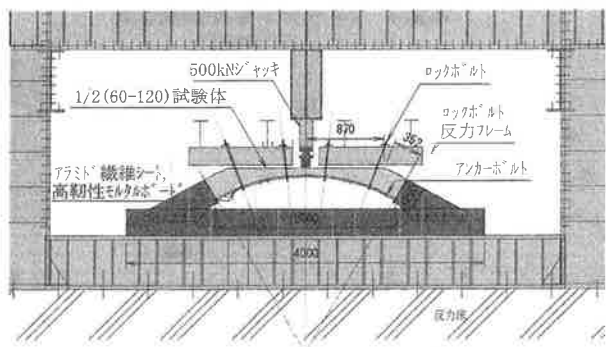


図8 試験体載荷方法

6.2 試験結果および考察

本報告での補強効果の検証は、No.2 を対象としたひび割れが発生する前の初期剛性(初期ひび割れ発生前、弾性域内の天端変位 0.6mm 時の荷重)および終局破壊状態(荷重-変位関係)とした。さらに補強により充填時の安全性が確保できるかの検証を行なった。

さらに、実施工を考慮すると充填材注入時の安全性についても検証する必要がある。つまり、覆工が極端に薄い場合、充填時の圧力により覆工に変状を起こさせないことも重要な要件と考えられる。ここで、事前に行った充填性試験時に計測した充填圧力値”0.078MPa”から、実工事において半径 2m の範囲の覆工背面に材料を充填することを想定し、1/2 モデル試験体にかかる荷重を算定した。想定荷重は 31.4kN であり、これもひとつの評価基準とした。

図 9 に各補強パターンと天端変位 0.6mm 時の荷重を示す。無補強 No.2-1 を 100%として各補強工法の効果を定量的に比較する。ボードをアンカーで取り付けた No.2-2 では、+5%の補強効果、これにロックボルトを取り付けた No.2-3 では+28%、さらに、試験体にアンカーとエポキシ樹脂でボードを接着させ、これにロックボルトを取り付けた No.2-4 では、+42%の補強効果があることが確認できた。

覆工厚を変えた試験体に対する補強効果は、図 10 に示す「荷重-変位関係」で評価した。

No.2-4 は、天端厚 75mm の試験体を補強したものであるが、No.1 とほぼ同様の荷重-変位関係が得られ、ロックボルトとボード接着による補強効果が確認できた。一方、天端厚 50mm を補強した No.3 では補強を施しても剛性の変化点は低い荷重で発生し、その後の靱性補強効果も若干小さかった。これは、断面厚が薄く、ひび割れ発生後に有効なアーチ効果が発揮されなかったことなどが影響しているものと考えられる。No.1 と同等の耐力とするためには吹付けコンクリートなどの内巻補強をして断面を厚くする工法が必要であるが、この場合には内空限界が問題となることも予想される。この補強の目的の一つは充填時の安全性の確保である。写真 5 に示すような薄い高靱性モルタルボードを用いた補強を施すことで No.3 のひび割れ発生前の剛性は、No.1 と同等となり、特に、ひび割れ発生時の荷重が前述の 31.4kN を超えていることから、充填工施工時に天端変位を計測することなどにより安全に作業できることが確認できた。

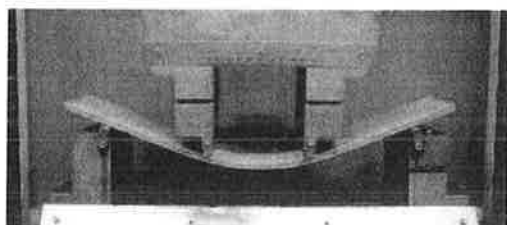


写真 5 高靱性モルタルボード

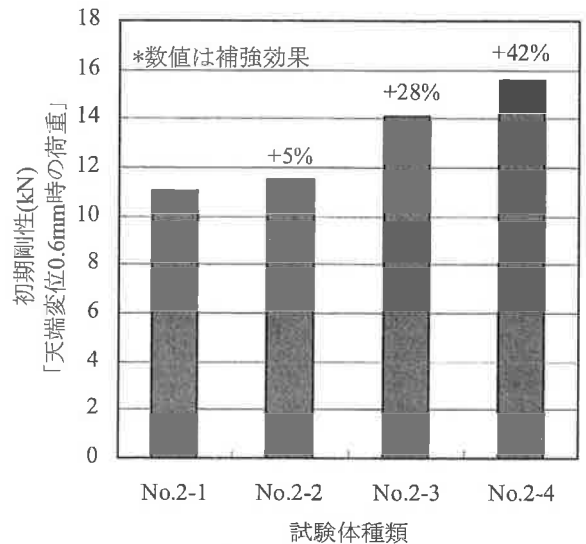


図 9 各補強方法の初期剛性補強効果

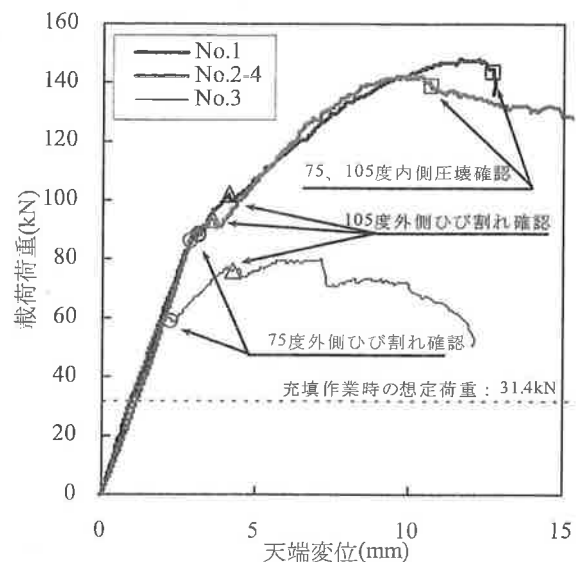


図 10 載荷荷重と天端変位の関係(破壊試験)

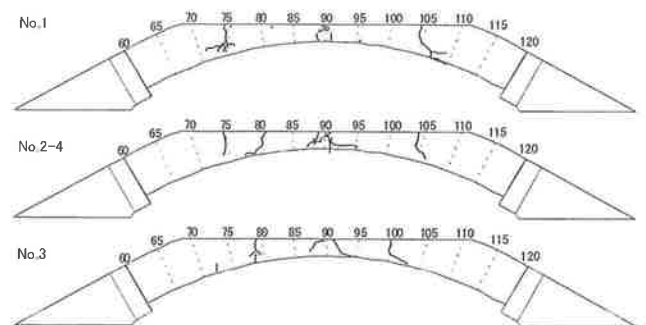


図 11 各試験体の載荷後のひび割れ観察結果

7. まとめ

矢板工法で建設された古いトンネルの補修を想定し、新しいトンネル背面空洞充填工法の開発を行なった。

充填材料として充填性に優れた可塑性モルタルを開発し、さらに従来材料と同じシステムで高強度タイプを選択できるものとした。高強度化した材料は、アンカー引抜き強度、覆工の安定性に対して優位性があることが明らかとなった。

また、覆工コンクリートが健全な状態でないとして背面空洞充填工の前提となる内巻補強工法の効果の検証を

実施した。その結果、覆工厚が 100mm 程度と薄い場合でも適切な補強工法を適用することにより、充填時の安全性を確保することができ、さらに健全性の向上に寄与することが確認できた。ただし、覆工が 100mm 以下と極端に薄い場合には、終局的な耐力の増加は期待できないことになり、今回適用したボードの剛性を高めた場合の効果の検証などが今後の課題となった。

今後は、施工システムを含めた検討を行い、新しい覆工背面充填工法として PLAM 工法の実用化、普及を目指して検討を続けていくものとする。

参考文献

- 1) 財団法人鉄道総合研究所 トンネル補修・補強マニュアル,平成 19 年 1 月
- 2) NEXCO 中央研究所 矢板工法トンネルの背面空洞注入工設計・施工指針,平成 18 年 10 月
- 3) 財団法人鉄道総合研究所 あと施工アンカー工法設計の手引き, 昭和 62 年 9 月

THE DEVELOPMENT OF THE TUNNEL BACK CAVITY FILLING METHOD OF CONSTRUCTION

F.Ojima, M,Ito, K.Hayakawa
S.Machara, S.Suzuki, and O.Tokudome

We have developed a new back cavity filling method of construction, and it can choose conventional materials or high strength plasticity mortar depending on a state of tunnel concrete linings. The high strength materials improved stability of tunnel concrete linings than the conventional materials. In addition, it improved the drawing pull-out capacity of the anchor and will be able to fix an anchor for overhead line fixation of the railroad tunnel surely.

On the other hand, there is a case to need inner lining reinforcement before performing hollow filling depending on a state of tunnel concrete linings. Thickness of tunnel concrete linings assumed a thin case less than a design, and we experimented on the inner lining reinforcement effect. As a result, in the case of tunnel concrete linings of very light 10cm, I was able to secure safety at the time of the hollow filling by inner lining reinforcement to use a high toughness mortar board for.