

高靱性セメント複合材料を用いた トンネル補強工法に関する研究

Study for Reinforcement Method on Tunnel
Utilizing Engineered Cementitious Composites

福田一郎¹・真下英人²・山本拓治³・名児耶薫¹・松原功明⁴
Ichiro Fukuda, Hideto Mashimo, Takuji Yamamoto, Kaoru Nagoya,
and Noriaki Matsubara

¹正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

E-mail:fukuda16@kajima.com

²正会員 工博 (独) 土木研究所 基礎道路技術研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

³正会員 工博 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

⁴正会員 工修 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

The authors developed a new reinforcement method for deformed tunnel, in which Engineered cementitious composite, ECC and steel, are effectively utilized. First, shotcrete spraying test was done, and best method was confirmed. After that, two kinds of full scale loading tests were done, and load carrying capacity was confirmed. And, fiber method analysis was done, and it was confirmed that load carrying capacity was appreciable in which plain conservation is kept.

Key Words deformed tunnel, Engineered Cementitious Composite, repair, reinforcement
shotcrete, loosening pressure

1. はじめに

比較的大きな変状が発生したトンネルの補強対策としては、全断面覆工打替え工法や既設覆工の内面にプレキャストコンクリート、鋼板などを接着する内面補強工法が適用されている。しかし、打替え工法では、不安定な既設覆工の撤去に際し、多大な工費と工期が必要となる。一方、補強断面が厚い内面補強工法の場合、内空を侵すため建築限界を確保できない。また、コンクリート片の剥落防止として適用される繊維シート接着工法は、引張耐荷力が向上するが、圧縮耐荷力の向上が期待できない。そのため、可能な限り薄肉で、圧縮・引張耐力ともに向上効果があり、かつ安全性・経済性に優れた内面補強技術が求められている。

内面補強技術を開発するにあたり、一般には以下の問題点が挙げられる。第1に、場所打ちコンクリートで内巻補強を行う場合は、充填性の確保を考えると、最低でも15cm程度の巻厚が必要となる。第

2に、補強巻厚を薄くした場合、一般的に普通コンクリートでは収縮ひび割れが発生しやすく、耐久性の低下につながる。第3に、前述した収縮ひび割れのほか、地圧などの荷重によってもひび割れが発生するため、第3者被害につながるコンクリート片の剥離・剥落が懸念される。

これらの問題点を解決するため、筆者らは、吹付け施工型の高靱性セメント複合材料 (Engineered Cementitious Composites 以下、ECC) と鋼材を用いた薄肉な内巻補強技術を考案した。

本報では、最適な鋼材の設置方法を検討するために実施した吹付け実験および耐荷力を確認するために実施した実大の静的載荷実験について報告する。

2. 補強工法の概要

今回考案した補強工法の概要を図-1に示す。本工法は、プラストなどで覆工内面の表面処理を行い、

エクスパンドメタルなどの鋼材をアンカーで覆工に設置してECCの吹付けを行うものである。鋼材は、長期的な剥落防止を目的として設置する。損傷度合いに応じて、鋼板接着を併用した補強も可能である。

ECCは擬似ひずみ硬化特性とひび割れ分散性を有する材料で、ひび割れ発生後もモルタルマトリックス中の繊維の架橋効果により、引張力を負担するとともに、ひび割れ幅を抑制することが可能である¹⁾。図-2にECCの一軸直接引張試験の結果を一般的なポリマーセメントモルタル（以下、PCM）と比較して示す。通常のコンクリートやPCMはひび割れが生じると急激に引張応力が低下するが、ECCはひび割れが発生した後に引張応力が増加し、さらに、鋼材の降伏レベル（0.2%程度）の10倍程度の引張ひずみにおいてもひび割れ発生時以上の引張応力を保持できるという特徴を有している。覆工の増厚材料として適用した場合、応力の分配効果に優れ、覆工の局所的な破壊を抑制する。覆工と合成した補強効果が期待できるため、補強断面の薄肉化が図れる。ECCのひび割れ抑制効果は、補強断面におけるひび割れの貫通を抑制する。さらに、ECCはエクスパンドメタルを介して、アンカーにより機械的に覆工に定着されるため、ECCおよび既設覆工コンクリート片の剥離・剥落を防止する。また、ECCは凍結融解抵抗性などの各種耐久性に優れるため²⁾、長期的な補強効果が得られる。また、ECCは吹付け施工のため、覆工の複雑な形状にも対応が可能で、かつ型枠支保工等の設置が必要ないため工期の短縮が図れる。

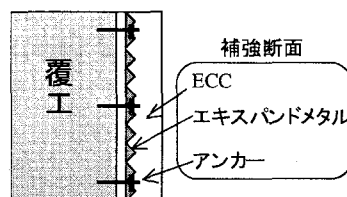


図-1 補強工法の概要図

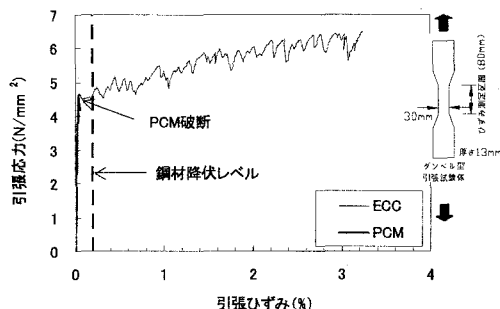


図-2 一軸直接引張試験の例

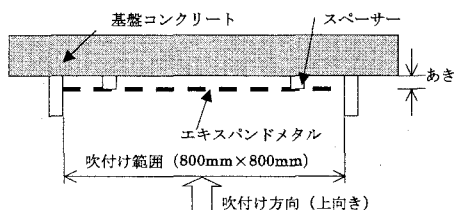


図-3 吹付け実験の試験体概要

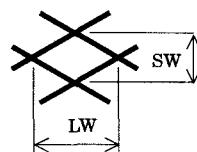
3. 吹付け実験

(1) 実験概要

最適な吹付け方法を選定することを目的に、吹付け実験を実施した。図-3および図-4に、試験体の概要およびエクスパンドメタルの仕様を示す。エクスパンドメタルと基盤コンクリートのあきを実験要因とし、0mm, 10mm, 20mmの3水準とした。ECCの吹付けは3層で行い、一般的に施工が最も困難となる上向きとした。実験では、施工時のECCの剥落状況を確認するとともに、ECCの硬化後に図-5に示す位置でコンクリートカッターにより切断してECCの充填状況を確認した。

(2) 実験結果

吹付け時の性状について、1層目の吹付け時にあきを20mmとした試験体は、ECCが基盤コ



エクスパンド メタルの種類	メッシュ寸法 (mm)		
	SW	LW	板厚
XS-82	75	203	4.5

図-4 エクスパンドメタルの仕様 (XS-82)

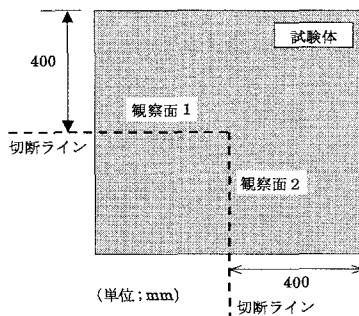


図-5 切断ラインと観察面

ンクリートに付着する手前でエキスパンドメタルに付着し、エキスパンドメタルが基盤コンクリートへのECCの付着を阻害していることが確認された。2層目以降の吹付け性状はいずれも良好であった。

写真-1に各試験体の観察面1の切断状況を示す。表-1に各観察面の空隙面積率（空隙の面積を観察面の面積（400mm×50mm）で除した値）を示す。写真-1および表-1の結果から、あきが0mmおよび10mmの試験体のECCの充填性は良好だが、20mmとした試験体は空隙率が大きく、また、空隙が連続的に分布していることから、基盤とECCの一体性に影響を及ぼすものと考えられる。

剥落防止の観点からは、エキスパンドメタルの背面にECCが充填される必要があり、本実験の結果から、エキスパンドメタルと基盤コンクリートのあきは10mm程度が良いことが確認された。

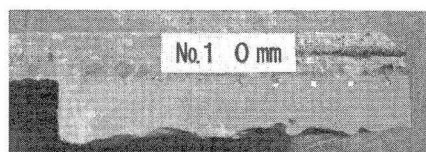
4. 実大載荷実験

(1) 実験概要

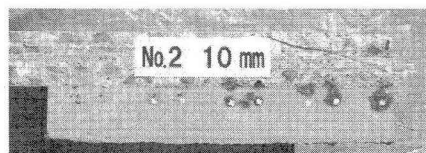
本工法の耐荷力を確認するため、半径4.85mの実大規模の試験体を作製し、既往の実験³⁾を参考に2種類の荷重パターン（試験Ⅰ、試験Ⅱ）で静的荷重実験を実施した⁴⁾。図-6および図-7に試験概要図を示す。写真-2に試験体作製時におけるECCの吹付け状況を示す。

試験Ⅰは、天端ゆるみ土圧などを想定し、比較的大きな軸力が作用する曲げ卓越型の破壊モードとなる。荷重要領は、全周のジャッキ（17箇所×2段＝34本）で同一荷重の20kNまで加力した後、中央3箇所（80°、90°、100°）以外のジャッキのバルブを閉めて反力ジャッキとした上で、中央3箇所のジャッキによる変位制御とした。覆工が損傷した状態での補強効果を確認するため、覆工単体の試験で最大荷重を確認して除荷を行った後に、本工法による補強を行い、同じ荷重要領で加力を行った。エキスパンドメタルの仕様は吹付け施工性試験と同様にXS-82とし、材質はSPHC（JIS G 3131 熱間圧延軟鋼板および鋼帯の一種）とした。エキスパンドメタルの継手は突き合せとし、5本/m²の間隔でM10の金属拡張系アンカー（根入れ長40mm）で設置した。ECCの吹付け厚さは50mmとした。

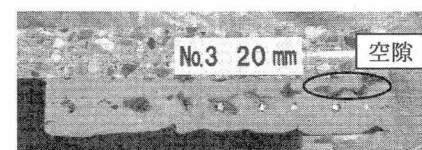
試験Ⅱは、覆工にせん断ひび割れや目違いが生じた状態を想定しており、左右肩部に覆工内面から外面に貫通する斜め面状に弱点部を設けた。弱点部は、テフロン板を2枚のステンレス板で挟みこんだもの



(a) あきなし



(b) あき 10mm



(c) あき 20mm

写真-1 吹付け実験における充填状況

表-1 吹付け実験の空隙面積率

あき	空隙面積率 (%)		
	観察面 1	観察面 2	平均空隙率
0mm	0.62	0.85	0.74
10mm	3.44	1.28	2.36
20mm	8.87	5.12	7.00

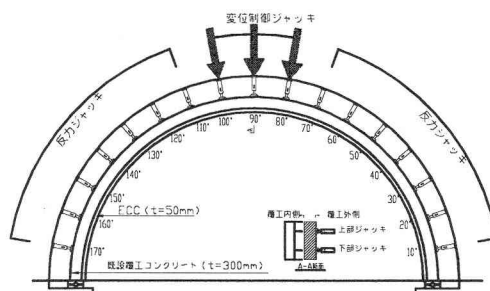


図-6 試験Ⅰ

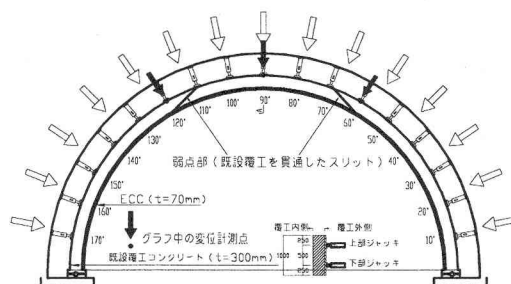


図-7 試験Ⅱ

を覆工コンクリート打設前に予め設置した。覆工コンクリート打設後に補強工を行い、全周から等荷重を作用させた。ECCの吹付け厚さを70mmとし、弱点部のずれ抑制を目的に、覆工内面の弱点部先端を中心に両側20°の範囲を厚さ9mmの鋼板で補強した。鋼板には補剛リブ（厚さ6mm、高さ50mm）を覆工周方向に4本溶接し、250mm間隔（22本/m²）でM16（根入れ長50mm）の金属拡張系アンカーにより固定した。鋼板の背面はアクリル樹脂を注入した。鋼板の設置状況を写真-3に示す。鋼板以外の部分は、試験Ⅰと同様にエキスパンドメタルを設置した。

(2) 実験結果

表-2および表-3に覆工およびECCの材料試験結果を示す。図-8～図-11に試験Ⅰおよび試験Ⅱの荷重－変位関係、ひび割れ状況、試験Ⅰの荷重－ひずみ関係を示す。

試験Ⅰでは、損傷載荷、補強後載荷のいずれも天端部内面からひび割れが発生し、次に肩部外側でひび割れが発生した。損傷載荷では、天端部、肩部のコンクリート圧縮ひずみがいずれも $3,500 \times 10^{-6}$ に達してから、周方向のひび割れが発生した後も荷重が増加し、最大荷重は2,100kN（載荷ジャッキ6本の合計）だった。補強後載荷では、荷重の増加に伴い天端部内側のECCのひび割れ本数が増加したが、個々のひび割れ幅は0.04mm程度と小さく、ECCのひび割れ抑制効果が認められた。荷重2,745kNにおいて、肩部で覆工とECC界面にずれが生じたが、その後も荷重は増加し、最終的には肩部の覆工が圧壊した（写真-4）。図-9に、補強後載荷における肩部の荷重－ひずみ関係を示すが、覆工、ECCともに一軸圧縮試験における破壊時のひずみ（以下、圧壊ひずみ）近傍まで達していることから、モルタルマトリクスと骨材間における組織の緩み等で付着力が低下し、覆工とECC界面でずれが生じたと思われる。

補強後の最大荷重は、無垢の覆工の約1.3倍であり、本工法の適用により、耐荷力が向上することが確認された。

試験Ⅱでは、載荷初期は全断面一様に内空側に変位したが、載荷荷重（1本当たり平均）が60kNの時点で、弱点部に大きなずれが生じ、その箇所の変位（120°）の勾配が小さくなるとともに90°の変位が反転した。最終的には、300kNで弱点部先端の覆工内面でコンクリート圧縮ひずみが $2,000 \times 10^{-6}$ 以上になった後、鋼板を覆工に固定していたアンカーの抜けと、既設覆工と鋼板界面の付着切れが生じたため、弱点部を境に覆工で大きなずれが生じて、弱点



写真-2 ECCの吹付け状況

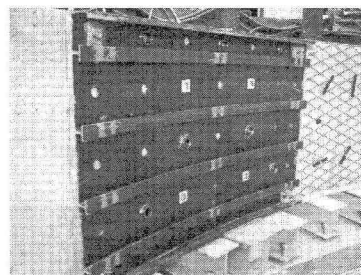


写真-3 鋼板の設置状況（試験Ⅱ）

表-2 覆工の材料試験結果

項目	試験体	試験値
圧縮強度 (N/mm ²)	試験Ⅰの損傷載荷	20.0
	試験Ⅰの補強後載荷	22.4
	試験Ⅱ	17.9

表-3 ECCの材料試験結果

項目	試験体	試験値
圧縮強度 (N/mm ²)	試験Ⅰ	43.9
	試験Ⅱ	51.0
引張降伏強度 (N/mm ²)	試験Ⅰ	3.5
	試験Ⅱ	3.8
引張終局ひずみ (%)	試験Ⅰ	2.5
	試験Ⅱ	2.2

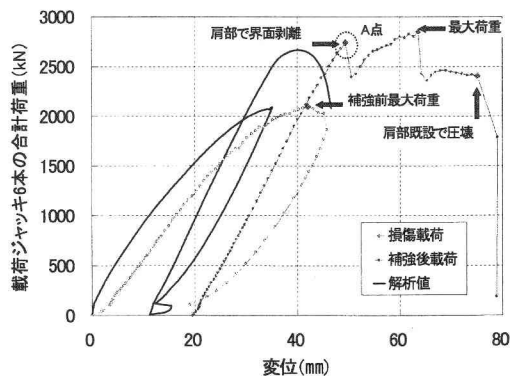


図-8 試験Ⅰの荷重－変位関係

部先端の覆工が圧壊し、鋼板先端でせん断引張破壊した。破壊時の弱点部の状況を写真-5に示す。最大荷重時における全ジャッキ荷重の合計を載荷面となる覆工外面面積で除した値を土圧とすると、 670kN/m^2 であった。鋼板に座屈等は生じておらず、アンカーの抜けにより鋼板のずれが大きくなり、補強後の剛性及び耐力が決まっているため、アンカー径を太くすることや覆工への根入れ長を長くすることで、鋼板のずれが抑制され、耐力力の増加が期待できる可能性が示された。

(3) 解析によるシミュレーション

本工法の補強効果を解析的に検討するため、試験Ⅰを対象に、覆工およびECCの材料非線形を考慮したファイバー法を用いたフレーム解析により実験のシミュレーションを行った。試験Ⅱは、平面保持の仮定が成立しないために対象外とした。図-12に解析のモデル図および解析ステップを示す。覆工とECCを別々の梁要素でモデル化し、覆工とECC間は剛体要素で接合した。荷重の載荷は、実験時の載荷ジャッキ3箇所での強制変位で入力し、反力ジャッキは法線方向のノーテンションバネでモデル化した。エキスパンドメタルは、耐力に寄与していないため、モデル化していない。

図-13に解析に用いた覆工およびECCの応力-ひずみ曲線を示す。覆工の圧縮側の応力-ひずみ曲線は、最大圧縮応力時のひずみまでは、実験時における一軸圧縮試験の結果を用いた。実験において、覆工は圧壊ひずみ以降も載荷されるため、圧壊ひずみ以降は圧縮ひずみが $3,500 \times 10^{-6}$ になるまで圧縮強度を維持した後、圧縮ひずみ $10,000 \times 10^{-6}$ まで直線的に応力低下するモデルとした。引張側は引張強度まで弾性変形するものとした。ECCは、圧縮側をコンクリートと同じ方法でモデル化したが、損傷載荷がなく、最大圧縮応力近傍で破壊したため、最大圧縮応力以降はモデル化しなかった。引張側は、ECCの引張降伏強度を頂点とする完全弾塑性モデルとした。

解析結果として、荷重と天端変位の関係を図-8に、補強後載荷における荷重-ひずみ関係を図-9に実験値と併記して示す。損傷載荷では、実験と同じ強制変位を与えると解析が安定しないため、最終的な強制変位は 35mm とした。図-8から初期剛性が若干異なるが、解析値と実験値は概ね一致している。実験では図-8のA点で覆工とECC界面のずれが発生したため、その後は実験値と解析値は乖離した。図-9から、補強後載荷における覆工、ECCの圧縮ひずみの傾向は概ね一致しており、解析においても、補強後

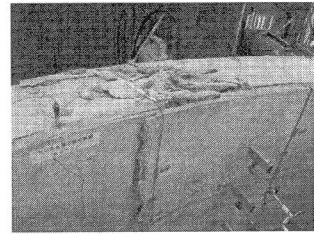


写真-4 試験Ⅰ終了時の肩部の状況

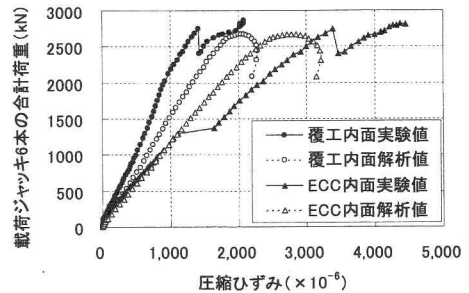


図-9 試験Ⅰの荷重-ひずみ関係

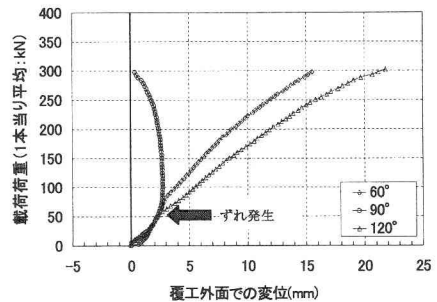


図-10 試験Ⅱの荷重-変位関係

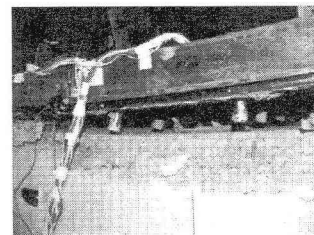


写真-5 試験Ⅱの破壊時における弱点部の状況

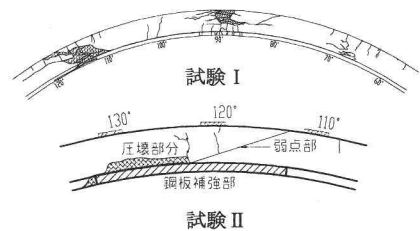


図-11 ひび割れ状況（終局時）

載荷における覆工およびECCの圧縮ひずみに着目することで、覆工とECCの一体性を判定できる可能性があると思われる。

以上より、変位の絶対値までは再現できていないが、本解析は、覆工とECC界面の一体性が確保されている図-8のA点付近までは、全体の挙動を比較的精度良くシミュレーションできている。設計では、損傷した覆工のモデル化が問題となるが、今後の研究により損傷した覆工のモデル化手法が確立されれば、本工法についても従来の補強工法と同レベルの設計が可能であると思われる。

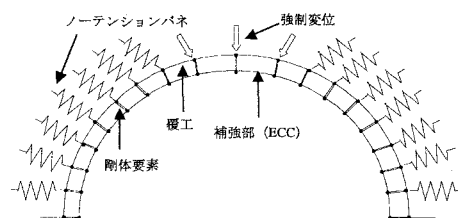
5. おわりに

吹付けECCと鋼材を用いたトンネルの補強工法を開発し、吹付け施工性試験と実物大の載荷試験を実施した結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 吹付け実験の結果から、エキスパンドメタルを用いる場合の基盤コンクリートとのあきは、ECCの充填性と剥落防止の観点から10mm程度が適当である。
- ② 天端にゆるみ土圧が作用した場合などの比較的大きな軸力が作用して曲げ卓越型の破壊モードとなる試験Ⅰでは、ECCの吹付け厚さ50mmで、無垢の覆工耐荷力の1.3倍の耐荷力を得た。また、材料非線形を考慮したファイバー法を用いたフレーム解析により、耐荷力を概ね評価できることが確認された。
- ③ 覆工にせん断ひび割れや目違いが生じた状態を想定して、全周から等荷重が作用させた試験Ⅱでは、弱点部先端に設置した鋼板のずれが大きくなり、弱点部先端の覆工が圧縮破壊し、鋼板の先端でせん断引張破壊が生じた。鋼板のずれにより剛性および耐荷力が低下することから、アンカー径を太くすることや覆工への根入れ長を長くしてずれを抑制することで、耐荷力の増加が期待できる可能性が示された。

今後は、現場への適用実績⁵⁾を増加させ、現場での適用結果を検討して改良を図りながら、様々な分野への展開を図っていきたい。

謝辞：本研究は、（独）土木研究所と鹿島建設（株）の共同研究により行われました。実験に協力して頂いた関係者各位に感謝の意を示します。



- 1：初期軸力導入力
- 2：ジャッキ固定用パネ設定+強制変位 30mm
- 3：強制変位 5 mm
- 4：除荷（強制変位-25mm）
- 5：ジャッキ固定用パネをはずす、初期軸力除荷
- 6：ECCと剛体要素間を剛パネ 初期軸力導入
- 7：強制変位 35mm

図-12 解析モデルおよび解析ステップ

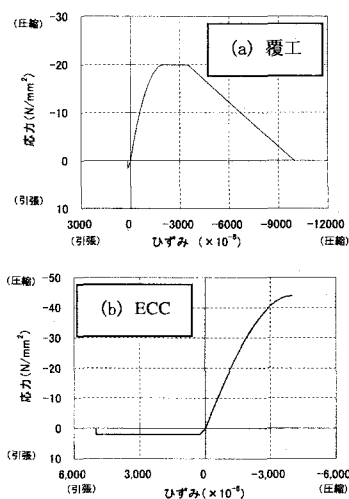


図-13 解析に用いた応力-ひずみ曲線

参考文献

- 1) 坂田ほか：高靱性繊維補強セメント複合材料の吹付け施工システムの開発，鹿島技術研究所年報，Vol. 50，pp.187-190，2002.9.
- 2) 松原ほか：下面増厚材料の力学的特性および耐久性に関する基礎試験，コンクリート工学年次論文集 Vol24，pp1419-1424，2002.
- 3) 箱石ほか：損傷トンネル覆工における内巻きコンクリートの補強効果に関する実験的研究，トンネル工学研究論文・報告集第13巻，pp349-354，2003.11.
- 4) 真下ほか：高靱性セメント複合材料を用いたトンネル補強工法の実大載荷試験，土木学会年次学術講演会概要集，Vol.60，pp.481-482，2005.9.
- 5) 山本ほか：高靱性セメント複合材料を用いたトンネル補修技術，土木学会年次学術講演会概要集，Vol.60，pp.483-484，2005.9.