

山岳トンネル用繊維補強吹付けコンクリートの研究

A DESIGN METHOD AND A SPECIFICATION OF THE FIBER REINFORCED SHOTCRETE

三谷 浩二^{*}・城間 博通^{**}・海瀬 忍^{***}

Koji MITANI, Hiromichi SHIROMA, Shinobu KAISE

In the construction of tunnels with a large cross section on the New Tomei-Meishin Expressways, not only safety but also cost reduction should be attained by using new construction method and materials. As an attempt of the development of new materials, we have been studying the fiber reinforced shotcrete(SFRS) which is able to replace steel ribs partly in good ground condition. In this paper, effects as a tunnel support, a calculation method for the bearing capacity and a toughness specification of the SFRS are described.

Keywords: The New Tomei-Meishin Expressways, Tunnel, Fiber reinforced shotcrete, Limit state design method, Flexural toughness,

1. はじめに

日本道路公団(以下 JH という)が建設を予定している高速道路のうちトンネルの全延長は約 334km, 内訳は通常の2車線トンネルが約 206km, 第二東名・名神高速道路の大断面トンネルが約 128km である。これらのトンネル建設に要する費用は膨大な額になり、今後の高速道路建設費の大きな割合を占めることになる。現在、高速道路の採算性の確保が JH 内部はもとより社会的にも重要課題となっており、トンネル建設費のコスト削減が強く求められている。

特に、今後建設が本格化する第二東名・名神高速道路のトンネルは、今までに施工実績の無い扁平かつ大断面の掘削断面を有することから、コスト削減の観点に立って新しい工法や材料を積極的に取り入れる発想の転換が必要である。ここでは、新しいトンネル支保材料として、比較的良好な地山において鋼アーチ支保工の代替えとしての使用に関して研究を進めている繊維補強吹付けコンクリートについて報告する。

2. 繊維補強吹付けコンクリートの支保効果とメリット

2.1 吹付けコンクリートの支保効果

吹付けコンクリートの支保効果は、単体の岩塊の安定について局所的に検討する場合と、掘削面全体としての安定に着目して検討する場合の考え方に分けられる¹⁾。前者としては、図 2.1 のようにトンネル天端における三角形をした岩塊の落下を防止する効果、後者としては図 2.2 の付着力モデルによって説明される効果と図 2.3 の軸力モデルによって説明される効果がある。いずれも吹付けコンクリートと岩盤との付着力が吹付けコンクリートの効果に大きく影響する。

過去に施工された JH のトンネルから得られた計測データベースによると、トンネル内空変位と吹付けコンクリート応力の関係は図 2.4 のようになる。この図で、吹付けコンクリートの応力が小さい部分は岩塊落下防止効果、内空変位が小さいにもかかわらず吹付けコンクリートの応力が発生している部分は付着力モデル、吹付けコンクリートの応力が内空変位の増加とともに線形比例に増加している部分は軸力モデルがそれ

^{*} 正会員 日本道路公団 試験研究所 トンネル研究室 主任

^{**} 正会員 日本道路公団 試験研究所 トンネル研究室 室長

^{***} 正会員 日本道路公団 試験研究所 トンネル研究室

ぞれ支配的に機能しているものと考えられる。

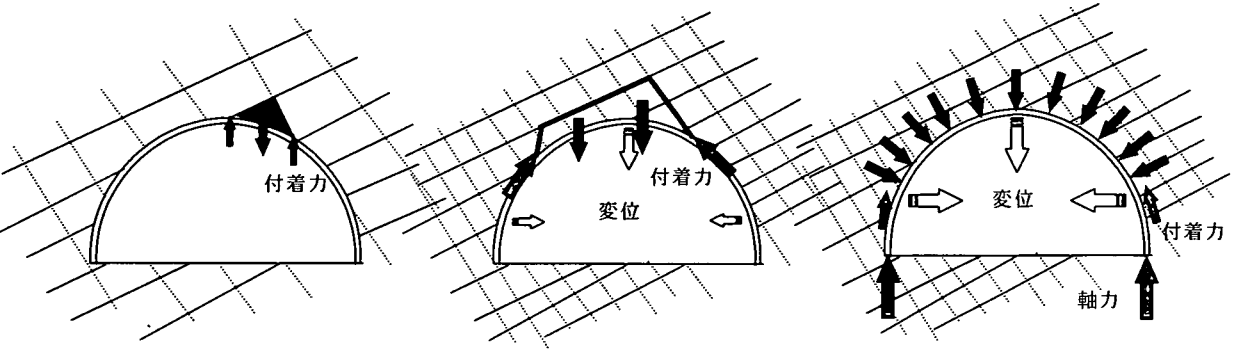


図 2.1 岩塊の落下防止効果

図 2.2 付着力モデルによる効果

図 2.3 軸力モデルによる効果

有限要素解析によって求めたトンネル内空変位と吹付けコンクリート応力の関係は、図 2.4 の軸力モデルの部分に相当することが確認された。したがって、これより吹付けコンクリートの応力が小さい領域は、吹付けコンクリートと岩盤との付着が損なわれているものと推定される。

また、過去のトンネル崩壊事例を調べると、岩盤と吹付けコンクリートの付着が大きければ吹付けコンクリートのせん断抵抗で岩塊を支えられていたものが、付着が損なわれ曲げ破壊に至ったことも確認されている。以上より、トンネルの支保構造である吹付けコンクリートの限界状態として、岩盤と吹付けコンクリートの付着が損なわれた場合を想定することができると考えられる。

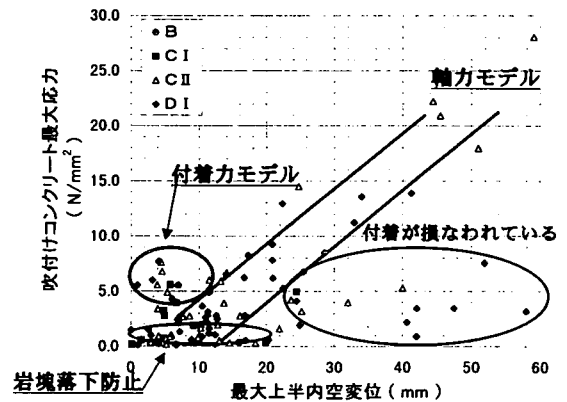


図 2.4 吹付けコンクリートの内空変位と応力

2.2 繊維補強吹付けコンクリートのメリット

繊維補強吹付けコンクリートを比較的良好な地山におけるトンネルの支保として使用する目的として、作用する軸力が小さいトンネルで、吹付けコンクリートと岩盤の付着が損なわれた場合に、ロックボルト間を支える版としての安全性を高めることがまず最初に考えられる。コンクリートを繊維で補強することによって、コンクリートの弱点である引張りに対する抵抗が改善され、ひび割れ発生後も作用荷重を保持することができる。すなわち、繊維補強の最大メリットは繊維がコンクリートの破壊後もひび割れを縫いつけて引張力を伝達することで得られるタフネス特性である。通常の吹付けコンクリートでは、脆性破壊を生じて安全性が一挙に損なわれるが、繊維補強コンクリートでは荷重によりひび割れが発生してもねばることができるので、その間に必要な対策を講じることが可能となり安全を確保できる。

なお、コンクリート断面に大きな軸力が作用する場合には、コンクリートの圧縮応力のみで作用する曲げモーメントに抵抗できるので繊維補強によるメリットが相対的に小さくなる。したがって、繊維補強コンクリートの適用を検討する場合には、対象とする構造物に作用する軸力と曲げの両者の大きさを把握しておくことが必要である。

3. 岩塊落下モデル試験

3.1 試験の概要

吹付けコンクリートの支保メカニズム（岩盤との付着力による抵抗、せん断抵抗、曲げ抵抗の相互関係）と繊維補強の効果調べるために、図 3.1 のような大型供試体を使った岩塊落下モデル試験を実施した。試験は供試体厚さを 10cm および 5cm、繊維混入量を体積比で 0、0.5、0.75、1.0% に変化させて実施し、供試体厚さと繊維混入量の影響を調べた。供試体は、実物トンネルとほぼ同じ大きさを模擬できるように、1.2m の間隔でロックボルトボルトにより固定した。また、供試体は打込んだ 3 日材令コンクリート（吹付けコンクリートの 1 日材令相当）から作成したが、表面処理を施した花崗岩とコンクリートの付着強度は約

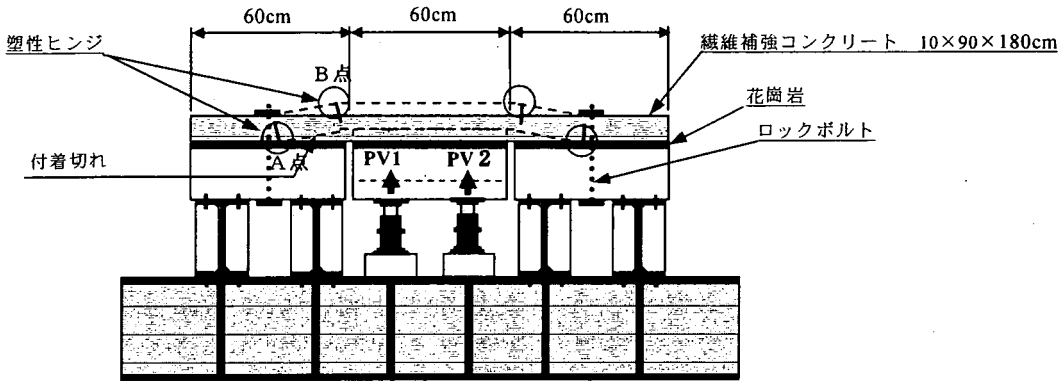


図 3.1 岩塊落下モデル試験

0.6Mpa であることを確認した。これは、別途 2 車線トンネルで実施した岩盤と吹付けコンクリートの付着力試験結果によると概ね地山等級 C I に相当する。

3.2 試験の結果

岩塊落下モデル試験の破壊過程をビデオテープに録画して観察してみると、図 3.1 の B 点下側より A 点に向かってコンクリートと花崗岩の付着が切れ、その直後に B 点から下方に向かってひび割れが発生した。すなわち、せん断破壊に達する前に、まずコンクリートと岩盤の付着力が損なわれ曲げひび割れが発生した。その後、繊維補強吹付けコンクリートの場合は A 点から上方に向かってひび割れが発達して荷重を保持するが、無補強のコンクリートの場合には B 点で急激に破壊した。繊維補強コンクリートの場合には、ひび割れ面で塑性ヒンジを形成してモーメントの再分配がなされることによって荷重を保持することができるが、無補強の場合には最初のひび割れが急激に発達して脆性破壊を生じることになる。

代表的な試験結果を図 3.2 および図 3.3 に示すが、ここでは載荷荷重 (PV1, PV2) と中間ブロック 4 階

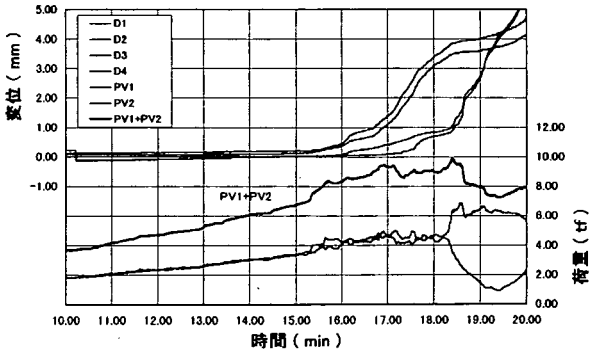


図 3.2 厚さ 10cm、繊維混入率 0.75% の結果

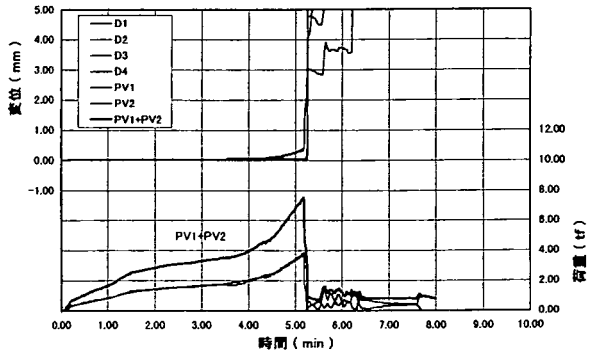


図 3.3 厚さ 10cm、繊維補強無しの結果

の変位 (D1~D4) の関係を縦軸に時間を横軸に表わしている。なお、図 3.2 は供試体厚さ 10cm、繊維混入率 0.75%の試験結果を、図 3.3 に供試体厚さ 10cm、繊維無しの試験結果を示している。

以上の岩塊落下モデル試験の結果より、繊維補強吹付けコンクリートが形成する塑性ヒンジにより、ひび割れが発生してもロックボルト間から抜け落ちる程度の岩塊 (ロックボルト間隔が 1.2m の場合で約 2 tonf/m 程度) ならば 10cm 程度の厚さでこれを保持することができ、せん断強度には余裕があるということが確認できた。

4. 設計手法と仕様

コンクリートを繊維で補強することによって得られるメリットは、ひび割れ発生後のタフネスであるから、繊維補強吹付けコンクリートの設計手法としては、これを考慮できるように繊維のひび割れ架橋効果を表現できる限界状態の考え方に立脚する必要がある^{3),4),5),6),7)}。そこで、10cm×10cm×40cm の供試体を使った曲げタフネス試験から逆算した引張軟化曲線^{3),4),5),6),7)}を使うことが考えられる。

岩塊落下モデル試験の繊維補強がある場合には、ひび割れ発生後も塑性ヒンジにより約 7~8 tonf/0.9m の荷重を保持しているが、両者の曲げ抵抗モーメントが等しいとして計算すると、その値は約 0.6 tonf・m/m となり、10cm×10cm×40cm の供試体を使った曲げタフネス試験から逆算した引張軟化曲線による計算値 0.57 tonf・m/m とほぼ一致する。すなわち、引張軟化曲線を使って繊維補強吹付けコンクリートの耐力が算定できることになる。

繊維補強コンクリートは混入する種類によってタフネスが大きく異なることから、上記のような設計手法に基づく繊維補強吹付けコンクリートの仕様として、今までのように単に繊維混入量のみで規定するのではなく、曲げタフネス試験の荷重-変位曲線で囲まれたタフネス値で規定することが考えられる。

5. まとめと今後の課題

吹付けコンクリートを繊維で補強することにより、岩盤と吹付けコンクリートの付着が損なわれて、吹付けコンクリートがロックボルトで支えられたはり構造となった場合に、塑性ヒンジを形成して荷重を保持できることが岩塊落下モデル試験より明らかになった。また、塑性ヒンジによる抵抗は、ひび割れを考慮した耐力計算によって、10cm×10cm×40cm の供試体を使った曲げタフネス試験から逆算した引張軟化曲線により算定できることが確認できた。今後は、実際のトンネル現場で吹付けて繊維補強の効果を検証することが必要である。その際には、吹付けた場合の跳ね返りと配向性の影響を把握することが重要である。また、曲げタフネスを現場で簡易に管理する手法を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 今田 徹：トンネル支保構造に関する構造的力学的研究，1980 年 7 月
- 2) 日本道路公団：設計要領第Ⅲ集第 9 編トンネル
- 3) Nanakorn, P., Horii, H. and Matsuoka, S.: A Fracture Mechanics-Based Design Method for SFRC Tunnel Linings, *J. Materials, Conc. Struct. Pavements*, No.532/V-30, pp.221-233.1996.
- 4) 峯本 守，鬼頭 誠，梶原 雄三，松岡 茂：トンネル覆工の限界状態設計法に関する研究，土木学会論文集，No.493/Ⅲ-27, pp.79-88, 1994
- 5) 松岡 茂，松尾 庄二，益田 彰久，柳 博文：繊維補強コンクリートの特性を考慮したトンネル覆工の設計，土木学会論文集，No.554/Ⅲ-37, pp.147-155, 1996.12.
- 6) Nanakorn, P.: Fracture Mechanics Based Design Method of SFRC Tunnel Linings, Department of Civil Engineering The University of Tokyo, 1993
- 7) 松尾 庄二，松岡 茂，益田 彰久，柳 博文：SFRC の引張軟化曲線の推定法に関する一研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17, No.1, pp.457-462, 1995.