

既設トンネル拡幅を伴うパイプ・イン・トンネル工法に関する検討 Investigation of Pipe in Tunnel Method with Expansion of Old Tunnels

中村 康明* 毛利 栄征**
Yasuaki Nakamura, Yoshiyuki Mohri

はじめに

老朽化の著しい水路トンネルの改修方法として、「拡幅を伴うパイプ・イン・トンネル工法(以下、拡幅 PIT 工法)」を適用した。拡幅 PIT 工法は、パイプライン改修工法として知られる「パイプ・イン・パイプ工法」と水路トンネル標準施工法である「矢板工法」両工法のハイブリッド工法であり、全国的に前例が少ない。特にパイプと地山の間隙を充填する中込注入材の強度や機能に関しては不明点が多く、土地改良事業計画設計基準・設計「水路トンネル」基準書・技術書には「裏込注入に用いられたグラウトは特に高い強度は必要でなく、固結後 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度であれば十分である」と表現されているが、その根拠は十分に証明されていない。

今後予定される同工法適用工事において、確証ある設計・施工を行うべく、現場計測結果及び有限要素解析解を比較検討し、拡幅 PIT 工法の力学的メカニズムを検証した。

現場計測

同工法施工中及び施工後約 1 年 6 ヶ月間に亘り、現場計測を行った。Fig.1 に現場計測断面、Table 1 に現場計測機器を示す。Fig.2 に FRPM 管ひずみの経時変化を示す。FRPM 管には、内外圧によるひずみと中込注入材の発熱による熱ひずみが同時に発生することが確認されるが、ひずみ量は最大 $200\ \mu$ 程度と、一般的な工法で地中埋設される FRPM 管に生じるひずみ量の 6 分の 1 程度であることから、パイプ自体は安全に施工されていると判断される。

Fig.3 にひずみコンターマップを示す。現場計測では、FRPM 管側方 60° 近傍、支保工脚部近傍にそれぞれひずみが集中する傾向が確認された。FRPM 管側方 60° 近傍へのひずみ集中は、一般的な埋設工法で地中に布設される FRPM 管においても同様である。一方、支保工脚部近傍へのひずみ集中は、施工時の中込注入により外力が作用し、支保工脚部近傍にひずみが集中したものと推測されるが、安定的な変形量の範囲内と考えられる。

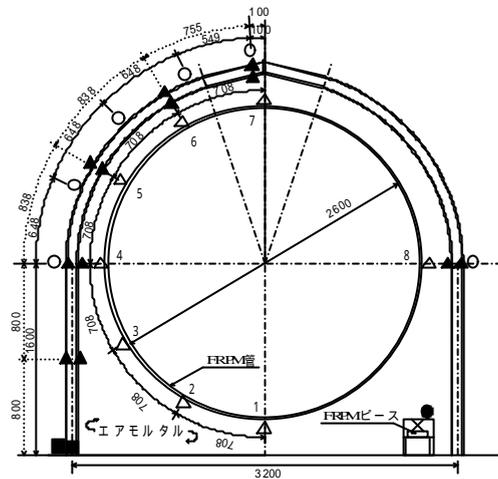


Fig.1 現場計測断面

Table 1 現場計測機器

印	計器名	数量
	土圧計	6点
	荷重計	2点
	ひずみゲージ	12点
	塑性域ひずみゲージ	8点
	熱電対	1点
x	ダミーひずみゲージ	1点

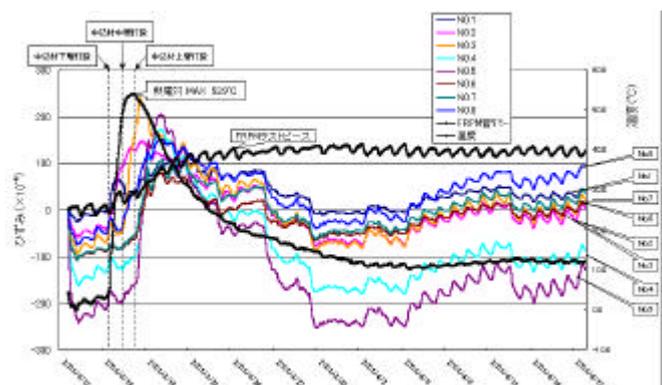


Fig.2 FRPM 管ひずみ - 時間関係

* 農林水産省農村振興局 Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries

** 農業工学研究所造構部 National Institute for Rural Engineering

・有限要素解析

単純モデルによる予備解析でプログラムの適応性を確認した上で、拡幅 PIT 工事に関する有限要素解析を行った。降伏関数には Mohr-Coulomb 条件、塑性ポテンシャルには平面上に特異点を持たない Drucker-Prager 条件を適用した。材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮した有限変形解析は Hibbit らの変形前の状態を基準とする Total-Lagrange 法定式化に基づく方法で行った。

Fig.4 に有限要素メッシュを示す。軸対称平面ひずみ問題とみなし、半断面 2 次元メッシュを使用した。荷重条件として、地表面(土被り厚 10.0m)から等分布荷重 971.19kN/m^2 を与えた。

地山と FRPM 管の間隙を充填する中込注入材(実施工はエアモルタル)の材料係数を変化させ、中込注入材による検討を行った。Fig.5~7 に中込注入材をエアモルタル($E=196,200\text{kN/m}^2$)、コンクリート($E=1,962,000\text{kN/m}^2$)、ムース($E=98.1\text{kN/m}^2$)とした解析ケースにおける最大主ひずみコンターマップを示す。

中込注入材をエアモルタル及びコンクリートとしたケースにおいて、FRPM 管側方 60° 近傍にひずみが集中し、現場計測と同様の傾向を示した。この傾向は一般的な工法で地中埋設される FRPM 管も同様であるため、エアモルタル及びコンクリートとしたケースでは、FRPM 管・中込注入材・支保工・地山の 4 者が安定的に応力を相互分担していると判断される。一方、中込注入材をムースとしたケースにおいて、支保工脚部近傍及び地山にひずみが集中する傾向を示した。特に、支保工背面の地山には広くひずみが分布しており、中込注入材に低強度の材料を使用すると地山に緩みを発生させる要因となると判断される。

・おわりに

拡幅 PIT 工法に関して、力学的メカニズムを検証した。現場計測では、当拡幅 PIT 工事が安定的に施工されたことを確認した。数値解析では、現場計測のひずみ分布と同じ傾向が再現された。中込注入材の検討では、エアモルタルとコンクリートとしたケースが最も安定的となり、ムースとしたケースは地山を不安定とする危険性があることが確認された。

前述の「固結後 10kg/cm^2 程度であれば十分である」との表現に関して、ムース状の低強度材料は採用し得ないが、圧縮強度 10kg/cm^2 程度($E=196,200\text{kN/m}^2$)の材料、即ち、当拡幅 PIT 工事で採用したエアモルタルは中込注入材として妥当であることが証明された。

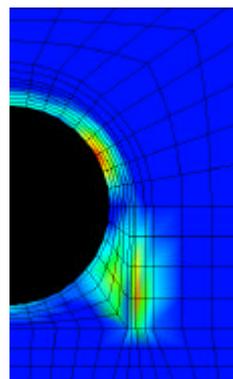


Fig.3 ひずみコンター
(現場計測)

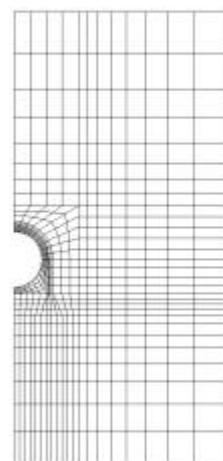


Fig.4 有限要素メッシュ

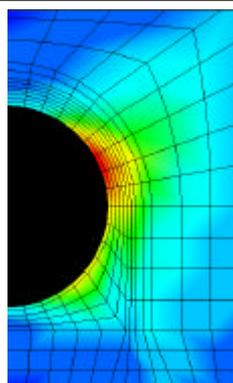


Fig.5 ひずみコンター
(エアモルタル)

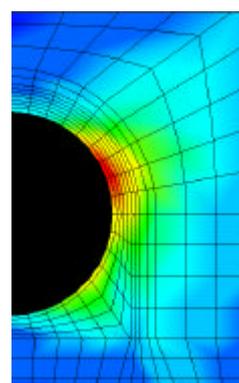


Fig.6 ひずみコンター
(コンクリート)

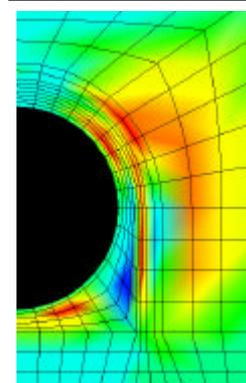


Fig.7 ひずみコンター
(ムース)