

PPP-BOTDA 方式光ファイバ計測による超長尺先受け鋼管のひずみ挙動

清水建設（株）地下空間統括部 正会員 ○淡路 勲太・福田 和寛
 清水建設（株）紀勢線海山トンネル作業所 平野 宏幸
 ニューブレクス（株） 横山 光徳・松田 公彦

1. はじめに

紀勢線海山トンネル (L=1,591m) は、到達側坑口部の約45m間が土砂状に強風化した頁岩を主体とする脆弱地山であることから、トンネル掘削に先立って超長尺鋼管先受け工（以下 Extremely Long Pre-Supporting を略し、ELPS と呼ぶ）により、トンネル坑口部の地山補強を実施した¹⁾。ELPS の実施にあたり、トンネル掘削に伴う地山および先受け鋼管の挙動を調べるために、PPP-BOTDA 方式の光ファイバセンサを用いたひずみ計測を実施した。ここでは、ELPS における先受け鋼管の挙動特性について得られた知見を報告する。

2. PPP-BOTDA 方式光ファイバ計測の原理

ブリルアン散乱光と呼ばれる後方散乱光は、光ファイバに加えらるひずみや温度によって周波数を変化する性質を持っており、ブリルアン散乱光を解析することで光ファイバ全体のひずみや温度分布を計測することができる。従来、ブリルアン散乱光によるひずみ計測は、分解能1m程度が限界であるとされてきたが、PPP-BOTDA 方式 (Pulse-PrePump Brillouin Optical Time Domain Analysis) では、パルス光の形状を改善することにより、空間分解能を2cm程度まで上げることができる。PPP-BOTDA 方式によるひずみ計測では、1本のファイバを敷設することで対象物全体のひずみ分布情報を一度に取得し、最大距離分解能2cm、温度環境下は-270℃～750℃まで計測が可能となる。

3. 計測方法

ELPS の先受け鋼管の挙動は、VP 管(L=45.5m)に光ファイバを軸方向に接着し、インナー管として鋼管内に挿入し、管内注入によって一体化することで、鋼管の変形に追随するインナー管のひずみとして計測を行った。図1に計測を行ったELPSの配置図を示す。インナー管には上下左右の4測線の光ファイバを軸方向に設置することで、鉛直方向と水平方向の引張・圧縮挙動を検出することが可能である(図2)。

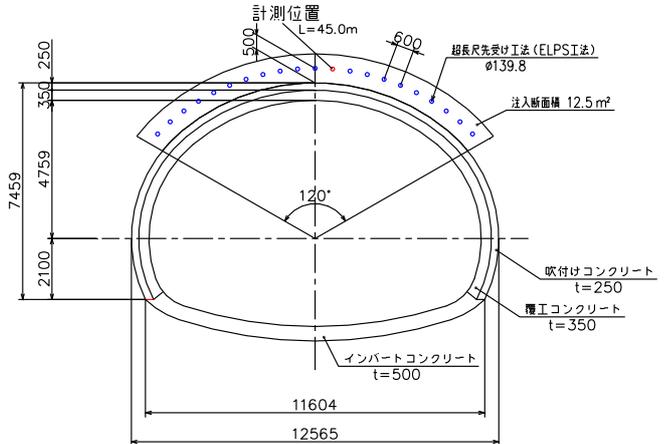


図1. 先受け鋼管のひずみ計測実施位置

表1. 先受け鋼管・計測用インナー管断面諸元

	質量 W (kg/m)	外径 D (mm)	厚さ t (mm)	断面積 A (cm ²)	断面二次モーメント I (cm ⁴)	断面係数 Z (cm ³)
超長尺先受け鋼管	21.68	139.8	6.6	27.6	614.0	87.8
インナー管 VP75	2.20	89.0	5.5	14.4	126.3	28.4

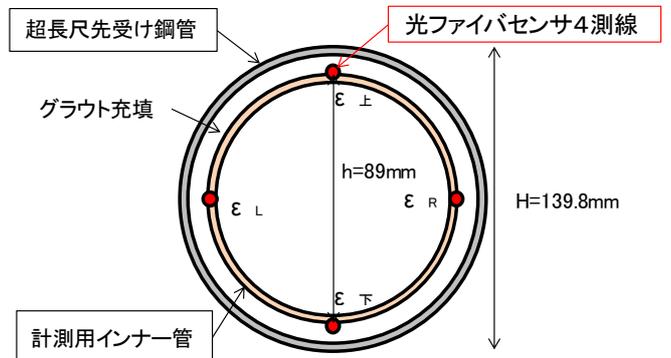


図2. 光ファイバ測線配置図

4. 計測結果

表1に示す断面諸元にしたがって、計測されたインナー管のひずみデータを先受け鋼管の各断面力に換算した。光ファイバ測線上のひずみ計測は10cm間隔で実施し、計測されたひずみ値は先受け鋼管長25cm区間の平均的な値に換算して整理を行った。

4.1 先受け鋼管の軸力分布

図3(a)に坑口より20mの位置に上半切羽が到達した時の先受け鋼管に発生する軸力分布を示す。先受け鋼管の軸力は切羽前方4～6m程度から圧縮性の軸力と

して挙動が出始めている。掘削直後の切羽後方 1~2m 区間で圧縮軸力の最大値を示し、切羽から離れた後方では引張性の軸力が優勢となっている。

4.2 先受け鋼管の曲げモーメント(上下)分布

図 3(b)に坑口より 20m の位置に上半切羽が到達した時の先受け鋼管に発生する曲げモーメント(上下)の分布を示す。切羽前方の 4~6m 区間では、下に凸の曲げモーメントが発生し始めるが発生量自体は小さい。最も大きな曲げモーメントを示すのは掘削直後の切羽後方約 2m 区間で、切羽側から上に凸と下に凸の曲げモーメントのペアが認められる。これは、切羽後方の掘削域で鉛直下向きのたわみが発生していることを示している。また、切羽から離れた支保工区間では、曲げモーメント分布が波打つ形状を示している。

4.3 計測ひずみ値の3次元コンター図

PPP-BOTDA 方式の光ファイバひずみ計測は、ひずみの発生状況を連続的に高頻度で計測可能であり、ひずみ発生状況をコンター図として表現できる(図 4)。切羽の進行とともに前方地山部の圧縮ひずみ域が谷状に連なり、ほぼ全域で発生していることが分かる。また、終点側坑口近傍の脆弱地山部で先受け鋼管に大きく引張ひずみが発生してしていることが分かる。

5. 考察

5.1 切羽前方の先受け鋼管の挙動について

通常の長尺鋼管先受け工法(L=12.5m, ラップ長 3m)に比べて、ELPS の利点は、切羽前方の影響域に対して、十分な定着長を確保することができることにある。計測結果からは切羽前方 5~6m 程度の位置から、鋼管に曲げ圧縮が発生し始めている(図 3(a), (b))。これは通常の長尺鋼管先受け工法の最低定着長 3m に比べて、5~6m の広い範囲で先受け効果が得られていることを示し、超長尺で先受け工を行う有効性を示している。

5.2 切羽後方の先受け鋼管の挙動について

計測結果から切羽後方の 2m 区間で鋼管に大きなたわみが生じており(図 3(b))、先受け鋼管による天端部のゆるみ抑制効果が発揮されている。また、掘削域後方の支保工区間では、鋼管に曲げが残留しているが、引張応力が優勢となっている(図 3, 図 4)。これは、切羽後方の支保工区間における地山のゆるみ域で先受け鋼管に引張応力が生じていることを示している。このように、ELPS では掘削域後方にも先受け鋼管長を長く確保しているため、通常の長尺鋼管先受け工より広い範囲で鋼管に断面力が発生し、天端部のゆるみ抑制

効果が発揮されている。

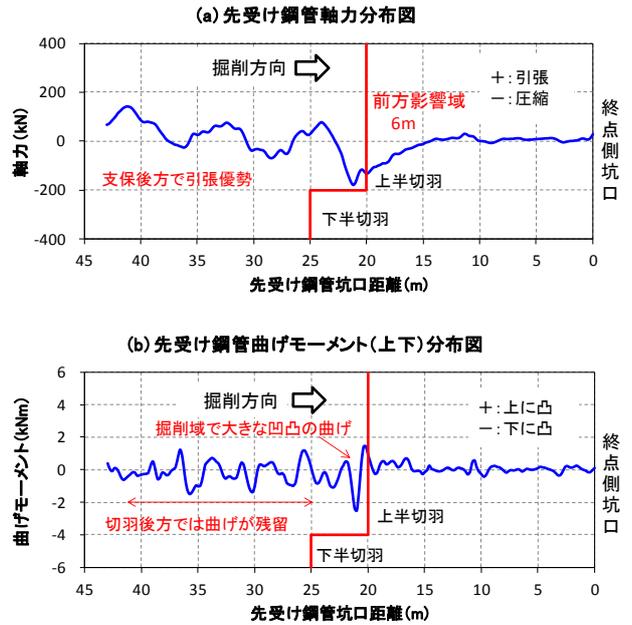


図 3. 切羽位置 20m の各鋼管断面力の分布状況

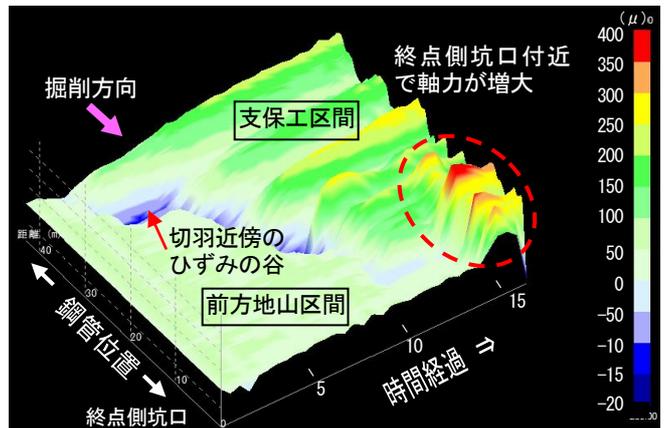


図 4. 計測ひずみ(軸ひずみ)の3Dコンター図

6. まとめ

PPP-BOTDA 方式による ELPS 先受け鋼管(L=45m)の光ファイバひずみ計測により、トンネル掘削に伴う先受け鋼管の挙動を高精度・高解像度で把握することが出来た。これにより、以下の知見が得られた。

- 先受け鋼管には切羽前方の 5~6m 程度の位置から曲げ圧縮応力が発生している。
- トンネル掘削に伴う大きなたわみは、切羽~約 2m の掘削域で生じ、切羽後方の既掘削域では鋼管に引張応力が優勢となる。

- ELPS には、通常の長尺鋼管先受け工に比べて、広い範囲で天端部のゆるみ抑制効果が発揮されている。

参考文献

1) 高岡秀明, 川上博史, 平野宏幸: 弱風化した脆弱地山における坑口の安定対策の検討, トンネル工学報告集, 第 21 巻, pp.103-110, 2011.11