

安全管理のためのトンネル切羽の変位計測 Measurement of tunnel face displacement for safety monitoring

川上 純*・池田 宏**・大里祥生*

Jun KAWAKAMI, Hiroshi IKEDA and Yoshio OOSATO

We make study of a method to forecast risk of collapse of the excavated tunnel face. To measure a tunnel face displacement, a laser displacement gauge was used. Several measurement were performed and obtained data were analyzed. As the results of data analysis, it was found that the displacement behaviors were something like creep failure of the rock as obtained from laboratory tests. It was also ascertained that the time of causing such collapse could be forecasted from changing rate of displacement.

Keywords: tunneling, displacement measurement, creep, displacement rate of tunnel face

1. まえがき

建設業は他の産業に比べて、災害の発生率が多いのは周知のとおりであるが、建設業の中でもトンネル工事での災害発生率が多い。トンネル内での災害の多くは落盤および崩落等によるものである。特に最近のトンネル掘削では、掘削断面の大断面化、熟練坑夫の減少が顕著であり、切羽崩壊事故の可能性は低くなっている。

筆者等は、トンネル切羽の崩壊による事故を防止する一手法として、切羽の状況を監視する方法について検討している。具体的には、レーザー変位計を用いて切羽の変位を測定することにより、切羽の崩壊を推定する方法である。今までに、数箇所のトンネルにおいて計測を行い、いくつかの知見を得たので以下に報告する。

2. トンネル切羽変位の計測方法

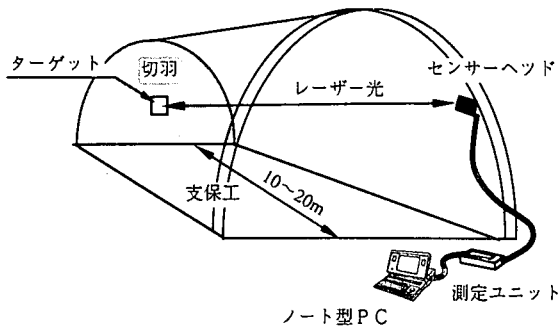
切羽変位は、レーザー変位計を使用して計測した。使用した変位計は、工場の品質管理用に使用されているもので、10m以上の距離から変位を測定できる。計器の性能は、測定精度 $\pm 0.5\text{mm}$ で最小表示は 0.1mm

* 正会員 大成建設(株)技術研究所

** 正会員 大成建設(株)土木技術部

である。図－１に計測方法の概要を示す。変位計測用のターゲットには、ベニヤ板に反射シートを張り付けたものを使用し、接着剤または釘で切羽のほぼ中央に取り付けた。そして、切羽後方10～15mにレーザーのセンサーヘッドを設置し、ターゲットの変位すなわち切羽のトンネル軸方向の変位を計測した。計測データは20秒間隔でノート型パソコンに収録した。

今までに計測したトンネルの切羽形状と地質を表－１に示す。切羽変位の計測は、掘削終了後から開始し、1サイクル間を連続計測した。したがって、計測時間はトンネルにより異なるが数時間程度である。また、休日の前日から測定を開始し、翌日までの約1日程度の連続測定を行った例もある。



図－１ 切羽変位の測定方法

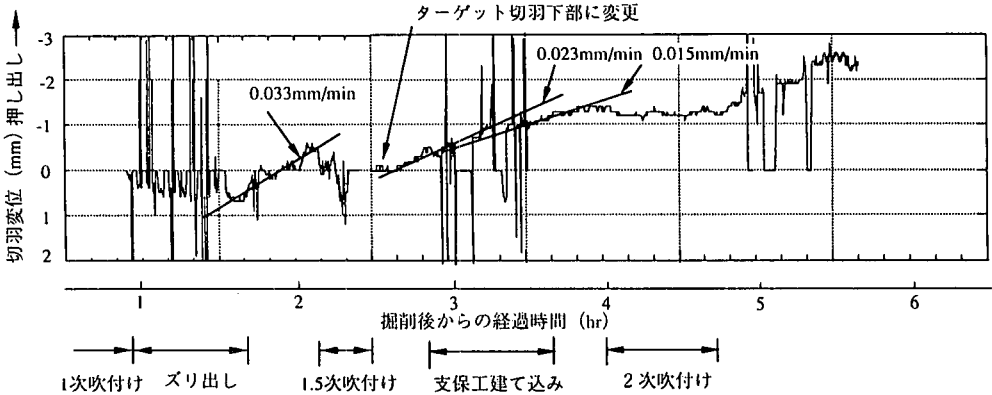
表－１ 計測したトンネルの切羽形状および地質

トンネル	切羽形状 (m) 幅×高さ	土被り (m)	地 質	一軸圧縮 強度 (MPa)
A	11×5.5	50	粘土状蛇紋岩	0.44～1.19
B	9.4×6.1	45	未固結砂礫層	—
C	12.8×6.4	180	凝灰角礫岩	15～20
D	10.6×5.3	210	砂質凝灰岩	5～8
E	9×7.9	25	泥岩	111～136
F	6.45×6.45	170	粘板岩	—

3. Bトンネルでの測定例

Bトンネルの地質は、未固結～半固結の砂礫層および粘土層から構成されている。計測は数回行った。図－２は通常の作業サイクル内で測定した結果の一例である。経過時間 t は、掘削終了時を基準としている。図－２のズリ出し中や支保工建て込み等の作業中に見られるスパイク状の異常値は、レーザー光が重機に遮られて一時的に計測不能となった時のものである。また、吹付け中は空気やターゲットの汚れにより、測定値には誤差が多く含まれ、正確な測定はできていない。また、図－３は長時間測定できた例であり、2次吹付け後は切羽付近での作業が行われていないため、精度の良い測定ができています。

切羽変位は、掘削後ある程度の時間が経過してから測定しているため、全変位量は測定できていない。そこで、図－２および図－３に示したように、連続して変位が測定されている部分を直線で近似し、その傾きから求めた変位速度 V について比較することとした。



図－２ 切羽経変位の経時変化の例（Bトンネル）

図-4は、変位速度と経過時間の関係を示したものであり、全体的には経過時間とともに変位速度が減少する傾向がみられ、ほぼ傾き-1の直線上に乗っている。変位速度の減少傾向を詳しくみると、●印のデータは他の場合よりも変位速度の減少が大きくなっている。この切羽では上部から湧水があり、切羽上部のクラックのために切羽に加わる土圧が時間とともに減少した可能性が考えられる。また、□印の2次吹付け後のデータも、変位速度の減少が大きくなっており、支保効果により切羽に加わる荷重が低減されたためと考えられる。以上のように、切羽の変位速度には、切羽付近の地質構造および支保が影響を与えていると考えられる。

4. 各トンネルにおける切羽の変位速度

4.1 変位速度の経時変化

図-5 (a) は、各トンネルでの変位速度と経過時間の関係を示したものである。図中には朝倉¹⁾により測定されたデータも示した。また、図-5 (b) は、切羽の代表長さとして切羽高さ H をとり、変位速度を H で割ってひずみ速度で示したものである。

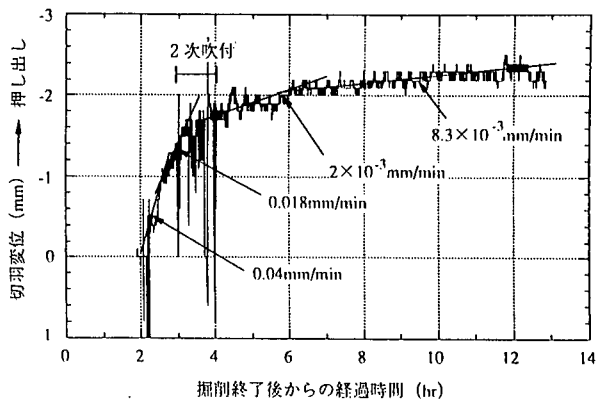


図-3 切羽変位の長時間計測の例 (Bトンネル)

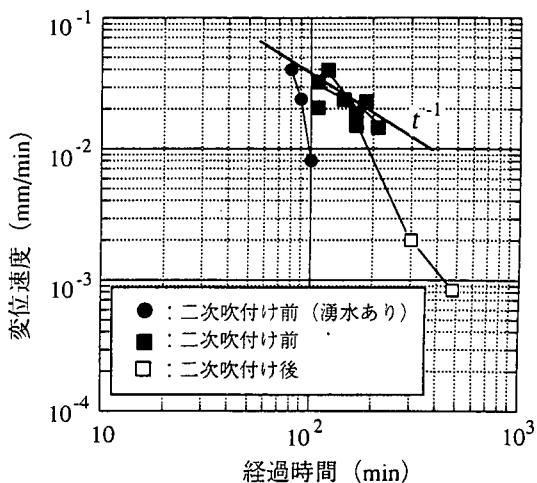
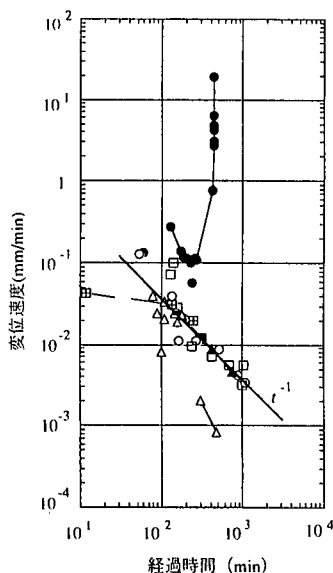
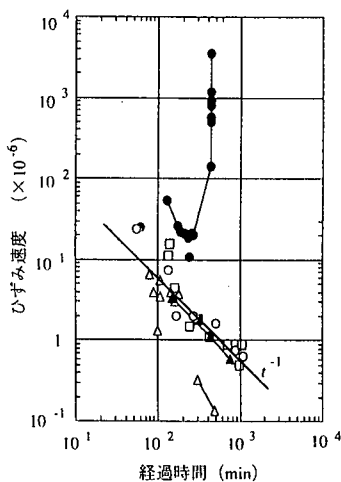


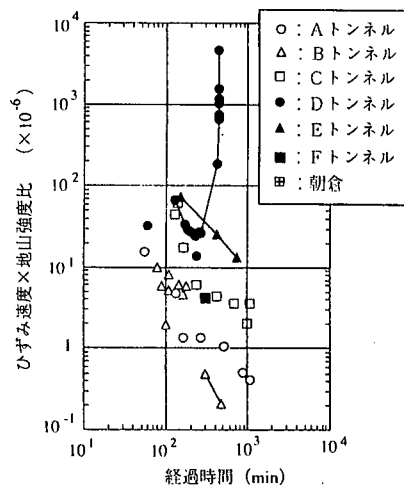
図-4 変位速度の経時変化 (Bトンネル)



(a) 変位速度



(b) ひずみ速度



(c) ひずみ速度×地山強度比

図-5 各トンネルにおける変位速度とひずみ速度等と経過時間の関係

Dトンネルの例を除くと、変位速度 V の対数と経過時間 t の対数は以下の式のような直線関係があり、その傾きすなわち a はほぼ1となっている。

$$\log(V) = b - a \cdot \log(t) \quad \dots \dots \dots (1)$$

岩石の一軸圧縮クリープ試験によると、一次クリープでは(1)式と同様な関係が示されており²⁾、掘削直後の切羽の挙動は一次クリープに近い挙動を示していると言える。

一般に、一次クリープでは、応力が大きいほどひずみ速度が大きく、また岩石の強度が大きいほどひずみ速度が小さいと言われている³⁾。すなわち、トンネルの切羽においては地山強度比が小さいほどひずみ速度が大きいことが予想される。そこで、ひずみ速度に地山強度比を乗ずれば、土被りと岩質の違いを除去できると考えられる。図-5(c)はひずみ速度に地山強度比を乗じた値と経過時間の関係を示したものである。

図-5(b)と図-5(c)を比較すると、図-5(b)の方が、データはまとまっており、逆に図-5(c)の方がばらついている。これは、切羽に加わっている応力は土被りに比例していない可能性があること、また岩石の一軸圧縮強度が切羽の岩盤強度あるいは変形係数を代表していない等の理由が考えられる。各トンネルでの切羽の変位速度がほぼ同程度の値となっていたことは、測定した切羽はほぼ同程度の安定性を保って施工されていることを示しているとも解釈できる。

4・2 岩石の一軸圧縮下のクリープとの比較

図-6は、福井他⁴⁾が岩石の一軸圧縮荷重下の実験で得られたクリープ曲線に今回の測定結果を重ね書きしたものである。切羽の変位測定では、荷重に対して横方向の変位を測定しているため、一軸圧縮試験よりもひずみ速度が小さくなるはずである。しかし、ひずみ速度が減少する一次クリープ領域では、切羽のひずみ速度は、岩石の一軸圧縮荷重下のひずみ速度の5～10倍大きくなっている。これは、岩盤には亀裂が存在するために、岩石に比べて切羽の剛性が小さくなっていることがその一因であると考えられる。

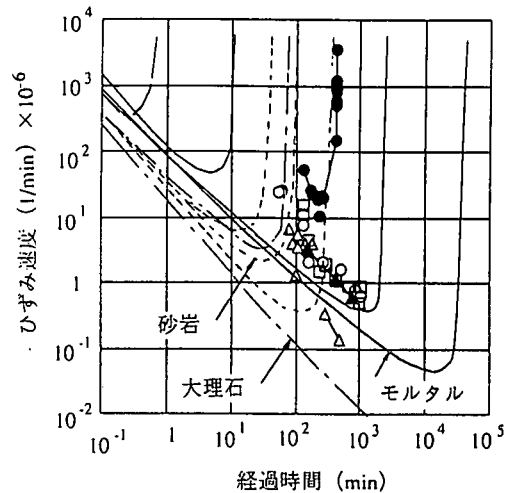


図-6 岩石のひずみ速度と経過時間との比較

5. 切羽崩壊時の測定例 (Dトンネル)

Dトンネルでは、掘削当初は変位速度は減少していたが、変位速度が最小値となった後、変位が急激に増大して切羽の崩壊に至った⁵⁾。その間に得られた計測データに基づき、崩壊に至るまでの状況を検討する。

5・1 切羽変位および変位速度の経時変化

計測は切羽掘削約1時間後に開始した。この切羽では、B計測用の計器を設置していたため、通常よりも掘削後長時間にわたって切羽を放置する結果となり、掘削後約7時間半で切羽崩壊に至った。切羽は天端から約1m下がった付近から下の部分が崩壊した。崩壊した切羽の奥には流れ盤状のすべり面が認められ、このすべり面に沿って切羽が崩壊したものと考えられる。計測された切羽の累計変位は71mmである。

図-7は、変位速度の対数と経過時間の対数の関係を示したものである。変位速度は、掘削後は減少しているが0.1mm/minと最小値を取った後、変位が急激に増大して切羽の崩壊に至っている。一般に破壊を伴うクリープ現象では、ひずみ速度が減少する一次クリープ領域、その後にひずみ速度一定の二次クリープ領域、

そしてひずみ速度が急激に増大する三次クリープがあるとされている。今回のDトンネルの例はこのクリープ現象とはほぼ同じ挙動を示しており、クリープに近い現象と考えられる。

5・2 最小ひずみ速度

一般に、最小ひずみ速度あるいは定常ひずみ速度の対数と破壊寿命（破壊するまでの時間）の対数は、直線関係があるとされている。図－8は、土質材料や斜面崩壊について齊藤他⁶⁾により示されている式と、岩石について福井⁴⁾により示されているデータを記したものである。Dトンネルでの破壊寿命は440分であり、最小ひずみ速度は $19 \times 10^{-6}/\text{min}$ であった。この値は、齊藤の土質材料や斜面崩壊の値に近くなっている。これは、Dトンネルの地質は砂質凝灰岩であり、一軸圧縮強度は5～8MPaと軟岩の範疇に入っているためであろう。

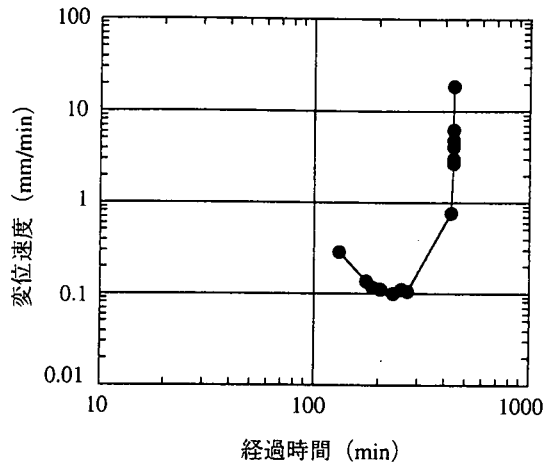
5・3 破壊時刻の予測について

三次クリープ領域における測定値を用いて崩壊時期を予測する方法は、斜面崩壊や鉱柱の破壊等で使用されており、齊藤⁷⁾、西松他⁸⁾、福岡⁹⁾等によりいくつかの方法が提案されている。

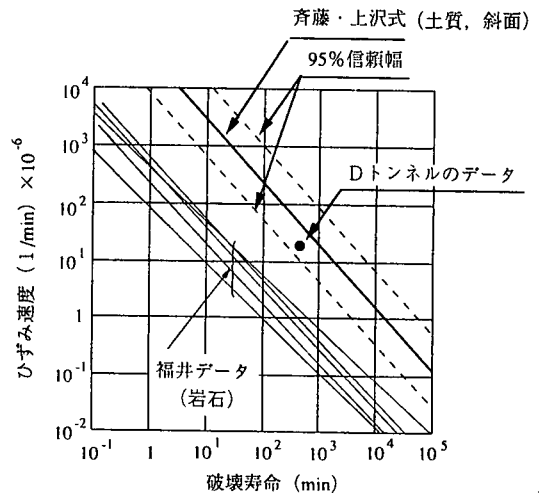
今回の測定データは、途中欠損が多く三次クリープ領域での全体的な変位曲線が得られていないため、変位から崩壊時期を予測する方法はうまく適用できない。したがって、ここでは福岡の方法を適用して検討する。

崩壊時には、変位速度が無限大になると考えると、崩壊時には変位速度の逆数はゼロとなる。すなわち、横軸に経過時間 t をとり、縦軸に変位速度の逆数 $1/V$ をとると、 $1/V$ の直線が横軸と交わる交点が崩壊時刻となる。図－9は崩壊時付近の変位速度の逆数の経時変化を示したものであり、崩壊付近で直線関係がある。この図から崩壊の20分程度前から崩壊時刻の予測が可能であることが分かる。

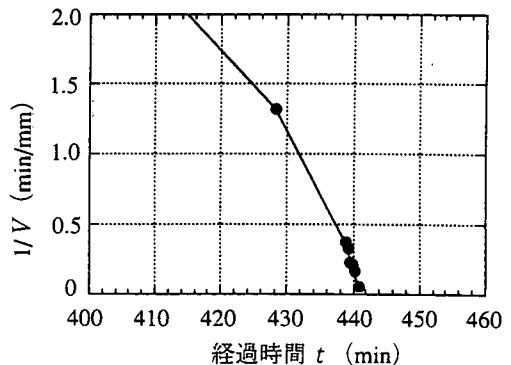
今回の計測では、経過時間330～420分の間は、側壁の吹付け作業のため空気およびターゲットが汚れたため、データが得られていないが、連続データが得られていればより早い段階から切羽の危険性の判断および崩壊時刻の予測が可能であったと考えられる。上記した方法により崩



図－7 変位速度の経時変化（Dトンネル）



図－8 ひずみ速度と破壊寿命の関係



図－9 変位速度の逆数 $1/v$ と経過時間の関係

壊時刻すなわち崩壊までの余裕時間が分かれば、緊急度を判断することができ、重機の退避や避難等の対処方法の参考になると考えられる。

また、趙他によると¹⁰⁾、経過時間と残存寿命の比は、最小クリープ速度の時にほぼ1となるとされている。すなわち、最小ひずみ速度までの経過時間は、破壊寿命のほぼ1/2であることになる。図-7に示したように、今回の測定結果では、最小変位速度の時の経過時間は220分で破壊寿命は440分となっており、上記の関係が成り立っていた。したがって、一次クリープおよび二次クリープ領域では、崩壊までにはそれまでの経過時間以上の余裕があることになり、崩壊余裕時間の概略の推定が可能である。

6. まとめ

数カ所のトンネルにおいて、掘削後の切羽変位の計測を行った。その結果、切羽変位の経時変化はクリープに近い挙動を示すことが明らかとなった。このようなクリープ現象を示す切羽については、切羽変位をモニタリングすることにより切羽の安全性を客観的に判定することができると考えられる。

すなわち、変位速度が減少する段階では、切羽は安定に向かっていると判断できる。また、変位速度が一定となっている場合は、切羽崩壊に移行する可能性があり、十分注意する必要があると判断できる。また、変位速度が増大する場合は、立入り禁止等の崩壊を前提とした対策が必要であろう。また、変位速度の経時変化から崩壊までの余裕時間の推定もある程度できるとことが分かった。

なお、今回の測定は切羽の一点を監視する方法であり、切羽の地質構造が一樣でない場合や下方向の変位が卓越するような場合には適用できない。今後は、切羽全体を監視するシステムについても検討する予定である。

最後に、計測に際して御協力を頂いた作業所の方々、および本研究をまとめるに当たって御指導を頂いた東京大学工学部の大久保誠介教授および福井勝則助教授に謝意を表する。

<参考文献>

- 1) 朝倉俊弘他：トンネル切羽付近における変位計測，第6回岩の力学国内シンポジウム，pp181-186，1984
- 2) 福井勝則：岩石のクリープ特性と寿命予測，資源・素材学会秋季大会，E3，pp9-12，1993
- 3) 西垣好彦他：軟岩のクリープ定数に及ぼす載荷時間の影響，第24回岩盤力学に関するシンポジウム，pp231-235，1992
- 4) 福井勝則：複数の荷重下における岩石のクリープ及び遅れ破壊，東京大学学位論文，1990
- 5) 田中一雄他：切羽変位計測による切羽崩壊予測の一試み，トンネルと地下，Vol.27，No.6，pp55-60，1996
- 6) 齊藤迪孝：斜面崩壊時刻予測のためのクリープ曲線の適用について，地すべり，Vol.24，No.1，pp30-38，1987
- 7) 齊藤迪孝：第3次クリープによる斜面崩壊時期の予知，地すべり，Vol.4，No.3，pp1-8，1968
- 8) 西松裕一，大久保誠介：鉱柱の残存寿命の推定とその信頼性，資源・素材学会誌，108，No.2，pp141-145，1992
- 9) 福園輝旗：表面移動速度の逆数を用いた降雨による斜面崩壊発生時刻の予測法，地すべり，Vol.22，No.2，pp8-13，1985
- 10) 趙顯他：三城目安山岩のクリープに及ぼす周圧の影響，第24回岩盤力学に関するシンポジウム，pp236-240，1992