

変位計測に基づくトンネル坑口斜面の安全監視に関する検討

山口大学大学院 学生会員 ○神谷康司
 (株) 大本組 正会員 田中隆一郎
 山口大学工学部 正会員 清水則一

1. はじめに

地すべりや斜面崩壊が発生することの多いトンネル坑口部では、現場計測に基づく施工管理（情報化設計施工法）が実施される。本研究では、GPSによる変位計測システムを開発し、トンネル坑口監視に活用している¹⁾。このシステムでは、従来まで困難であった3次元変位の連続計測が可能であるため、これを活用してトンネル坑口の新たな安定評価法を提案できる可能性がある。そこで、本研究は地表面変位を3次元かつ連続的に計測することにより、その結果を安定評価や施工管理に活用できる可能性を見出すことを目的とし、トンネル坑口斜面の安全監視の方法について検討を行った。

2. 数値解析によるトンネル掘削シミュレーション

2.1 目的・解析条件

トンネル坑口周辺地山が不安定に至る状況を、地表面変位計測によって推定し得るかどうかを知るために数値解析を行った。但し、数値解析は簡単のため2次元で行った。図1に示

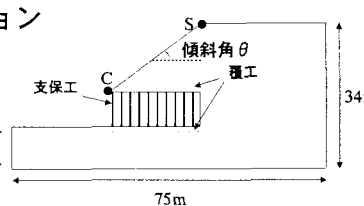


図1 解析モデル

表1 物性値

地山の物性値		覆工の物性値	
ヤング率	1000MPa	ヤング率	20GPa
ポアソン比	0.3	ポアソン比	0.2
内部摩擦角	30°	内部摩擦角	30°
密度	2000kg/m ³	密度	2509kg/m ³
支保工の物性値			
ヤング率	5GPa		
断面2次モーメント	3200cm ⁴		
断面積	127.06cm ²		

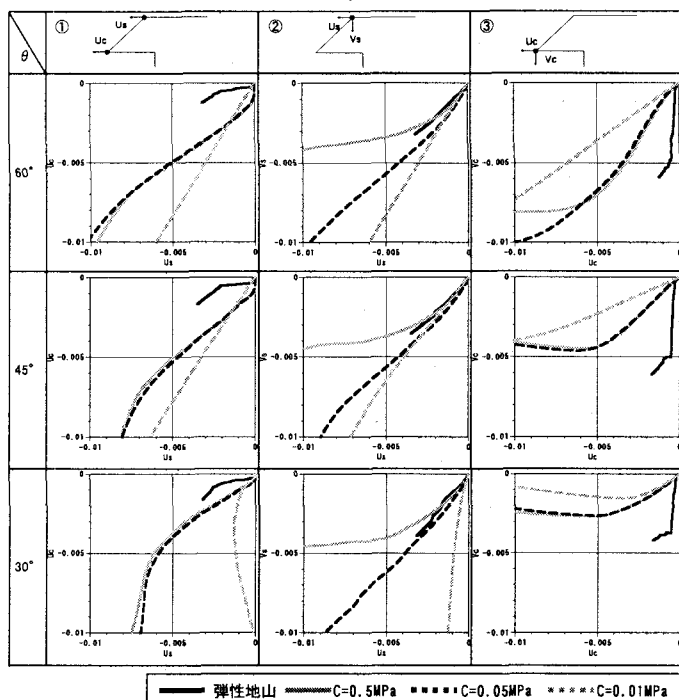
すような解析モデルを用い、弾性地山および弾塑性地山について解析した。表1に用いた物性値を示す。解析パターンは、斜面の傾斜角 θ (30°, 45°, 60°) 及び粘着力 c (0.01MPa, 0.05MPa, 0.5MPa) を変化させたものを用いた。ここで、トンネル掘削については、切羽位置が斜面上端部直下に来るまで行うものとする。なお、解析には有限差分法に基づく解析コード (FLAC2D) を用い、弾性地山については解が収束するまで計算を行い、弾塑性地山については解が収束しないため最大変位が10cmとなるまで計算を行った。

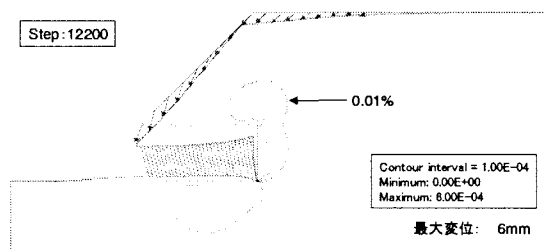
2.2 解析結果

まず、弾性地山と弾塑性地山との変位モードの違いについて調べる。斜面上端部S点と下端部C点（表2参照）の2ヶ所に着目し、各モデルに発生する変位ベクトルを水平・鉛直方向に分解し、グラフの縦軸・横軸として組み合わせたものを検討する。表2に、特徴的な結果が得られた3パターンを示す。S点及びC点の水平方向変位（表2-①）の関係については、弾性地山はS点の変位が卓越するのに対し、弾塑性地山はS点、C点ともに大きく変位する。一方、S点の水平・鉛直変位の関係（表2-②）については、弾性地山と弾塑性地山とで変位方向に大きな違いは見られない。しかしながら、C点の水平・鉛直変位の関係（表2-③）については、弾性地山は鉛直方向変位が卓越したまま収束するのに対し、弾塑性地山は粘着力の低下につれて、弾性地山と逆の傾向、つまり、水平方向変位の卓越が確認される。これは連続して変位を計測している際、水平方向変位が卓越し始めることが検出できれば、斜面の不安定化の検知が可能であることを示唆している。

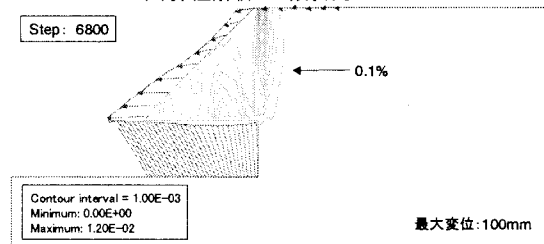
次に、トンネル掘削による地山の変位がある程度進行した場合についての考察を行う。ここでは一例として、斜面傾斜角45°のモデルを取り上げる。地表面変位と最大せん断ひずみ分布を図2に示す。地表面変

表2 地表面変位比較図

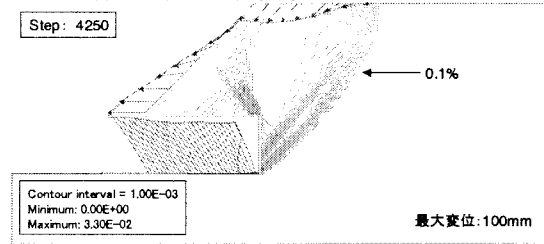




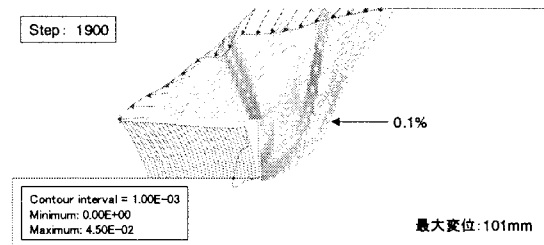
(a)弾性解析：傾斜角 $\theta = 45^\circ$



(b)弾塑性解析：傾斜角 $\theta = 45^\circ$ ， $C=0.5\text{MPa}$



(c)弾塑性解析：傾斜角 $\theta = 45^\circ$ ， $C=0.05\text{MPa}$



(d)弾塑性解析：傾斜角 $\theta = 45^\circ$ ， $C=0.01\text{MPa}$

図2 変位ベクトル図及び

最大せん断ひずみ分布図

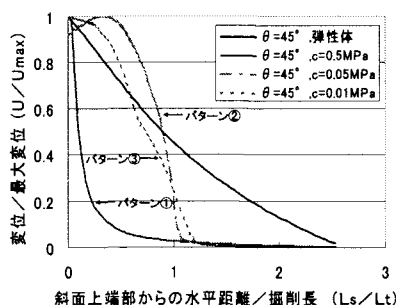


図3 地表面位置と
地表面変位との関係

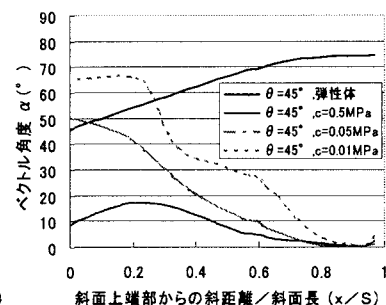


図4 斜面位置と地表面変位
ベクトル角度との関係

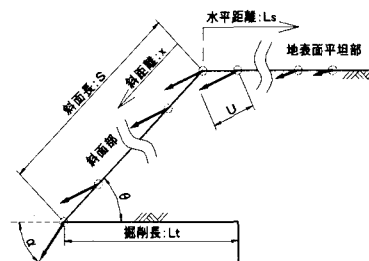


図5 変位ベクトルの計測位置図

位と最大せん断ひずみ分布の関係をより明確にするために、図3に地表面位置と地表面変位との関係を、図4に斜面位置と地表面変位ベクトル角度との関係を示す。また、図5は変位ベクトルの計測位置を示したものである。図3より斜面の水平距離 L に対してそれぞれ次のような特徴が見られた。パターン①：変位が急激に減少し、変位0付近で収束 ($c=0.5\text{MPa}$)。パターン②：変位が緩やかに増加後、急激に減少し、変位0付近で収束 ($c=0.05\text{MPa}$)。パターン③：②と同様の傾向であるが、変位減少の途中で減少率が変化 ($c=0.01\text{MPa}$)。これらの傾向は、地中の最大せん断ひずみ分布との関連性が考えられる。また、図4 ($c=0.01\text{MPa}$) のような、斜面の地表面ベクトル角度が急激に変動する場合は、切羽上端から斜面に向かう最大せん断ひずみの集中が発生する、といった関係も考えられる。このような視点から、それぞれのパターンに対応した対策工の提案を試みる。各パターンに対する対策工を表3にまとめる。

表3 各パターンの対策工

変位モード	地山の状態	対策の目的	有効な対策工
パターン①	切羽直上に最大せん断ひずみの集中が発生	切羽天端の安定	先受工(フォアボーリング・注入式フォアボーリングなど)
パターン②	切羽下端から地表面への最大せん断ひずみの集中が発生 地表面沈下	切羽鏡面の安定 地表面沈下防止	鏡面の補強(鏡吹付コンクリート・鏡ボルトなど) 長尺先受工(AGF・水平ジェットグラウトなど)
パターン③	切羽下端から地表面への最大せん断ひずみの集中が複数発生 地表面沈下	切羽鏡面の安定 地表面沈下防止	鏡面の補強(鏡吹付コンクリート・鏡ボルトなど) 長尺先受工(AGF・水平ジェットグラウトなど)
	切羽上端から斜面への最大せん断ひずみが発生	斜面下端部の崩壊防止	地表面からの対策(垂直縫地ボルト・法面補強ボルトなど)

3. まとめ

- トンネル掘削による坑口部破壊モードの大きな特徴は、斜面下部における水平方向変位の卓越である。
- 地表面の3次元変位計測から、不安定時の地山内部状況を推定し、対策工の選定に結びつけることができる可能性がある。

今後の課題として、2次元解析結果の確認及び3次元解析による検討、また、地山の不安定モードと対応する対策工の効果の妥当性の検討と現場への適用を考える必要がある。

参考文献

- 平野宏幸，田山聡，清水則一，岩崎智治：坑口動態観測にGPS自動変位計測システムを適用・第二東名高速道路 引佐第二トンネル，トンネルと地下，vol.35，no. 9，pp. 49-55,2004