

トンネル坑口部における垂直縫地工法の地山補強効果に関する数値解析

(株)フジタ 正 ○正木 重雄 山口大学大学院 学 村田 洋一
日本技術開発(株) 正 河原 幸弘 山口大学工学部 正 中川 浩二

1. はじめに

トンネル坑口部は、その特有な地形、地質条件から土被りが薄く、崖錐性堆積物等の軟弱な地質であるため掘削によって斜面崩壊などの問題が生じる場合が多い。その対策として垂直縫地工法はトンネル掘削に先立ち、掘削対象地山を補強することで地表面沈下の抑止や切羽、天端崩落防止の目的で施工されている。しかし、設計の考え方に定まったものがなく、事後の評価もトンネル毎に評価しているのが現状である。そこで本研究では坑口部における垂直縫地工法について文献調査を行い、数値解析を用いて本工法の地山補強効果について評価を行った。

2. 垂直縫地工法の現状

トンネル坑口部の対策・補助工法の採用状況を把握するために、過去15年間に「トンネルと地下」に掲載されていた坑口部に関する文献より調査を行った。調査結果より、対策・補助工法の採用状況を図-1に示す。垂直縫地工法は施工事例数が2番目で、約15%（施工事例54例中8例）と比較的多く施工されている。

次に本工法の採用目的を図-2に示す。これより地すべりの抑止が50%と多く占めていることが確認でき、また、調査結果より対象地山の問題点も地すべりが約40%を占めていることも確認できた。故に、本工法は地すべり対策として位置付けることができる。

表-1に文献調査からまとめた本工法の施工概要を示す。本工法の設計法にはまとまったものが無く、メカニズムには不明な点が多いため、表-1に示した様な地山補強効果が実際どのようなにあるのか十分に解明されていない。この地山補強効果について数値解析を用い、検証を行った。

3. 二次元的な斜面改良効果の検討

二次元的に垂直縫地工法の施工による効果を確認するため、図-3のハッチング部を切土して、垂直縫地工法の施工の有無による斜面の塑性域の比較を行った。解析に用いた各物性値を表-2、3に示す。地山物性値はDII地山を想定し、その物性値を用い、粘着力はこれのみを低下し、坑口付け（斜面ハッチング部を切土）を行うことによって、斜面が崩壊していくものを採用した。垂直縫地ボルトは解析モデルの斜面部分にボルトピッチ2m、根入れ長を切土基盤までと想定した。

図-4に解析結果の塑性領域図を示す。破壊条件は、モール・クーロンの破壊条件である。垂直縫地工法を施工することによって斜面全体に発生していた塑性域が大きく減少している。また、本工法の施工により斜面の変位が大きく減少する結果も確認できた。このことから、本工法を施工することにより、斜面の安定を得ることができると考えられる。

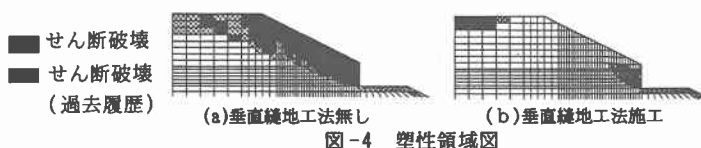


図-4 塑性領域図

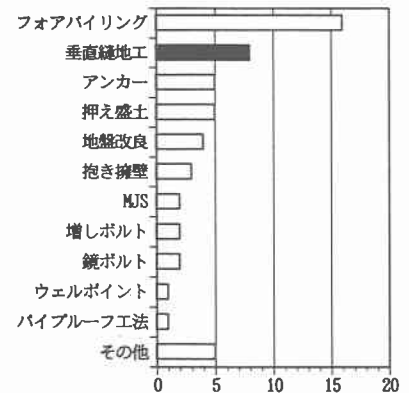


図-1 補助工法の採用状況

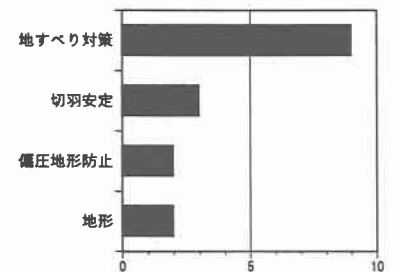


図-2 垂直縫地工法採用目的

表-1 垂直縫地工法概要

地質	崖錐性堆積物などの軟弱な地層
地形	地すべり地形、非常に土被りが薄く偏圧地形である
期待される効果	・斜面の安定 ・地すべりの抑制 ・地表面沈下抑制 ・偏圧の防止 ・切羽の安定
ボルトの径	D25~35
削孔径	φ86~120
ボルト配置	1m~2mピッチで千鳥配置
根入れ長	SLから岩盤ラインより2m深く施工を行い、土被りがある程度ある場合は根入れ深さを任意に浅く設計
施工範囲	地形・地質条件から判断されるすべり幅、または、ゆるみ域

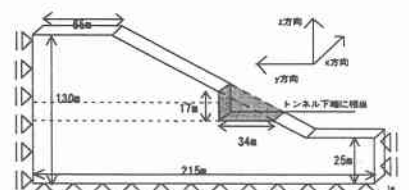


図-3 解析モデル

表-2 地山物性値

単位体積重量 (g/cm^3)	弾性係数 (Pa)	ポアソン比	粘着力 (Pa)	内部摩擦角 (°)	引張り応力 (Pa)
2.1	147×10^6	0.35	0.03×10^6	30	0.679×10^6

表-3 ボルト物性値

構造要素	直径 (mm)	断面積 (mm^2)	単位重量 (kg/m)	弾性係数 (kgf/cm^2)	ポアソン比
beam	D32	794.2	6.23	2.1×10^4	0.17

4. 三次元的に見た垂直縫地工法の地山改良効果の検討

垂直縫地工法の施工の有無を比較し、本工法の先行補強効果の確認を行った。今回は支保の影響を無視し、垂直縫地工法の純粋な効果を見るためトンネル掘削を無支保で行うこととした。地山物性値は坑口部を無支保掘削すると、その影響でトンネル周辺と斜面に塑性域が大きく発生するものを採用した。その値は、表-2に示す粘着力を $C=0.02, 0.0225, 0.025$ (MPa)に変更した3ケースである。垂直縫地ボルトの物性値は表-3と同様である。図-5に解析モデルを示す。図-5のAA'線はトンネル土被りが0mとなる地点である。垂直縫地工法の施工範囲は、垂直縫地工法が無い場合にトンネルを18m掘削したときに広がる塑性領域をカバーできるように想定した。解析ステップを表-4に示す。破壊条件は前述した通りである。

図-6は解析ステップ2での切羽到達点の地山断面の塑性域の分布状況である。支保の影響が無いため塑性域がトンネル周辺に大きく発生したが、垂直縫地工法を施工することによって地表面、トンネル切羽断面での塑性域の抑制を確認できた。また切羽前方8mまでにかけて、トンネル断面から地表面付近の塑性域の抑制を確認できた。塑性域をトンネル掘削によるゆるみ域の一つの指標と考えると、ゆるみ域の低減に効果があると考えられる。

図-7は解析ステップ3 (14m掘削時) での地表面沈下量である。図-7より地表面沈下量は全てのケースで、切羽前方に抑制効果が顕著にみられ、沈下をほぼ0に抑制できている。また、切羽が通過した地点での変位にも抑制効果が見られた。このことより、切羽前方での沈下抑制には特に効果的であると言える。

図-8は解析ステップ3での天端沈下量である。全てのケースにおいて垂直縫地工法を施工することによって、沈下抑制効果が見られ、最大約50%沈下の抑制効果が見られた。

図-9に解析ステップ3での切羽の押出し変位量を示す。ボルトの施工されているSLより2m下以上の点の変位は顕著に抑制されており、また、前述したように切羽前方の塑性域も減少していることから、切羽の安定にも有効であると考えられる。

5. おわりに

本研究では垂直縫地工法の効果を検討するために、補助工法を必要とする地山を対象にモデル化し、数値解析を行った。解析より塑性域の抑制、地表面沈下・天端沈下の抑制、切羽の安定に効果が確認できた。

以上の解析結果より、垂直縫地工法はトンネル掘削によるゆるみ域の発達の抑制効果があると考えられる。

今後はさらにすべり面、不連続体のモデル化、現場計測結果の考察、垂直縫地工法の効果のメカニズムの検証を行うことが重要であると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書 [山岳工法編]・同解説
- 2) 中田雅弘、佐野信夫、嘉指登志也：垂直縫地工法の支保効果に関する実験的考察，日本道路公団試験研究所報告書，pp.137～149, 1993

垂直縫地工の施工範囲

AA'よりトンネル縦断方向44m、横断方向はトンネル中心から10mでボルトピッチは2m、根入れ深さをSLより2m下までとした。

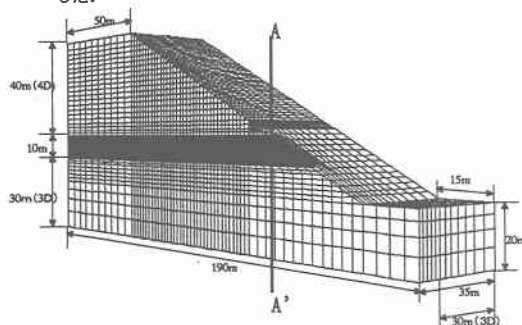
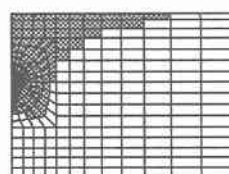


図-5 解析モデル

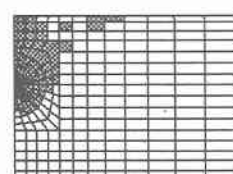
表-4 解析ステップ

解析ステップ	内容
1	重力解析
2	垂直縫地ボルト施工→AA'より10m地点まで掘削
3	さらに4m掘削(10～14m)
4	さらに4m掘削(14～18m)
5	さらに4m掘削(18～22m)

■せん断破壊



垂直縫地工法無し



垂直縫地工法施工

図-6 切羽断面の塑性図

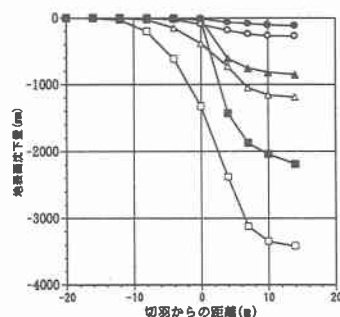


図-7 地表面沈下量

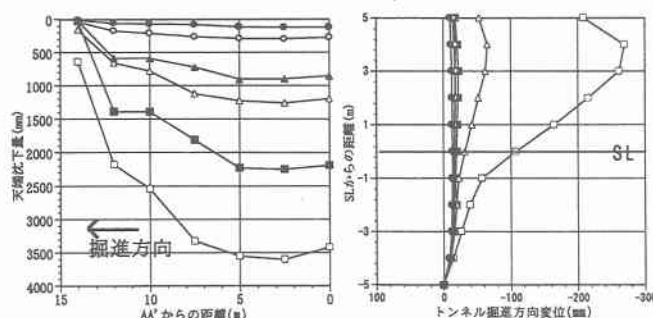


図-8 天端沈下量

図-9 切羽変位量