

R.B.S.M.による斜面下トンネル掘削時の安定解析

R.B.S.M. Stability Analysis of Tunnel Excavation under Sloped Rock Mass

桑田 俊男*
Toshio Kumeta

松野 倬也**
Takuya Matsuno

要 約

土被りの浅い斜面にトンネルを掘削する場合の安定検討は、従来種々の方法が試みられてきた。

本報告は、上記の検討において、地盤のせん断破壊が逐次進行して迂り線を形成し、遂に破壊に至る迄のパターンを追跡する解析を試みたものである。解析に用いた新離散化モデル（略してRBSM）は上記のような現象を忠実に追跡可能な計算手法として川井¹⁾により提案され、当社もこの2年間、東京大学生産技術研究所川井研究室において行なわれた土質岩盤解析用プログラムの研究開発に参加した。

解析は、当社施工現場の中から、土質地盤、断層を含む岩盤の2ケースに適用してみたが、双方とも地表面に現われたクラックの位置および斜面の変形状態等については計算とよく一致した。RBSMは電算機使用時間も有限要素法と比較して約20%短縮されるため、コストダウンとなることもわかった。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. RBSMの概要
- § 3. 解析例
- § 4. おわりに

§ 1. はじめに

トンネル施工をする場合、坑口付近等で斜面の近傍を掘削しなければならないことがある。一般にこのような斜面は崖錐帯であったり、風化が進んでいたりして、軟弱で滑り易く施工条件が極めて悪い場合が多い。したがって、このような地形の条件下での施工を行う場合には、斜面の安定性やトンネル自身の安全性を十分に検討したうえで実施されなければならない。

従来、このような問題の検討法としては、円弧迂り面を用いる方法や有限要素法による解析が試みられてきた。しかし、前者の方法では円弧を用いて迂り面を仮定する

ため、多層地盤であったり、トンネル掘削によって斜面中に空洞が生じた状態における迂り面の仮定が難しく、たとえ、それが可能であったとしても、トンネル構造物の安全性まで含めて検討することはできない。一方、後者による解析では、トンネル掘削に伴う斜面の安定性およびトンネル自身の安全性を考慮した解析となっているが、明確な迂り線が得られず、しかも要素内降伏を前提としているため塑性域が広がる傾向にあり、得られた結果の評価が困難な場合もたびたび見受けられる。

一方、川井により提案された新離散化モデル (*Rigid-Body-Spring-Model*; 以降R.B.S.M.) を斜面安定問題に適用した場合の有効性は多く報告されており^{3) 4) 5)}、ここでは斜面近傍にトンネルが掘削された場合の安定解析例を示す。^{6) 7) 8)}

§ 2. R.B.S.M.の概要

2-1 有限要素法(F.E.M.)とR.B.S.M.

固体構造物の変形は一般に弾性域から弱塑性域（塑性歪の小さい非弾性域）、強塑性域、破壊の順に進行する。これらの過程を過去の実験、F.E.M.およびR.B.S.M.で

*土木設計部土木設計課
**土木設計部土木設計課課長

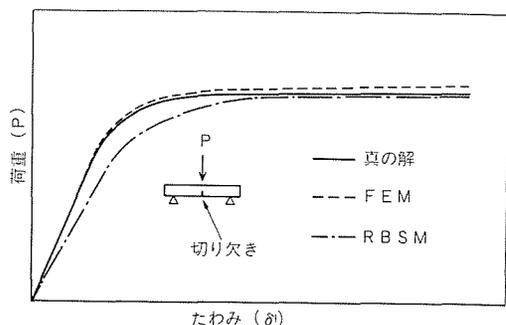


Fig-1 切り欠きの入った2次元曲げ部材の荷重-たわみ曲線
2-Dimensional load-deflection curve of beam with V-notch

比較すると Fig-1 のようになる。これによれば次のような結論が得られる。

(1)F.E.M.は弾性域から弱塑性域までは真の解とよく合うが、それ以上荷重を載荷すると真の解から次第に離れて行く傾向にあり、最終荷重は真の値よりもかなり高目に出る。

(2)R.B.S.M.は弾性域から弱塑性域では一般に低目の荷重～変位曲線を与えるが、荷重の増大に伴って真の解に次第に接近してゆく。

以上より、F.E.M.は弾性域ないしは弱塑性域までに適用すべきものであり、R.B.S.M.は本来極限解析用のモデルとして使用すべきものである (Fig.-2)。

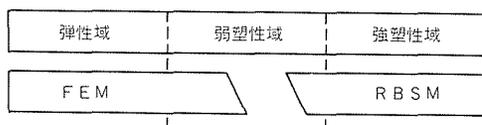


Fig-2 FEM、RBSMの適用範囲
FEM and RBSM applicable ranges

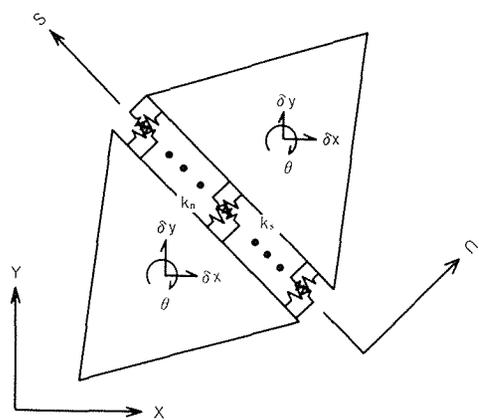


Fig-3 RBSMモデル
Conception of RBSM

2-2 R.B.S.M.要素

解析領域を有限個の任意多角形要素に分割し、各々の要素は一定厚の剛板と仮定する。この剛板の各境界線上に連続的に分布した垂直バネとせん断バネ (k_n, k_s) を考え、剛板は相互に連結されているものとする。剛板の重心に平行変位 (δ_x, δ_y) と回転 (θ) の3自由度をとり、隣りあった剛板の相対変位より要素境界上の表面力 (σ_n, τ_s) を求める (Fig.-3)。

§ 3. 解析例

3-1 土質地盤への適用

Fig-4 は解析に用いたモデル図を示す。地質は上層より A ; 関東ロームの盛土地盤であり盛土完了後5年経過している、B ; 腐植土および凝灰質粘土を主体とした軟弱地盤、C ; シルト質細砂で安定した基礎地盤から成っている。当地に図のようなトンネルを掘削した場合の安定解析を試みた。

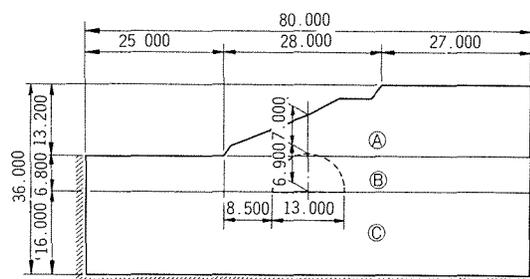


Fig-4 解析モデル
Geologic section

Table-1 材料定数
Material property

Material		(A)	(B)	(C)
Young's modulus	t/m ²	3000.0	3500.0	8000.0
	Pa	29.4×10^6	34.3×10^6	78.5×10^6
Poisson's ratio		0.4	0.35	0.3
Cohesion	t/m ²	4.0	5.0	3.0
	Pa	39.2×10^3	49.0×10^3	29.4×10^3
Unit weight	t/m ³	1.8	1.6	1.8
	KN/m ³	17.7	15.7	17.7
Angle of internal friction	deg.	0.0	0.0	40.0
	rad.	0.0	0.0	0.698

(1)解析条件

平面歪状態における弾塑性解析法を用いた。破壊規準は直線型モール・クーロン包絡線の塑性条件を採用し、材料定数は Table-1 に示したものをを用いた。境界条件は周辺スライドとし、荷重は地山の自重のみを考慮した。また支保時の条件として、鋼製支保工 (H-200) を 1 m

間隔で建て込むと考え、梁要素を用いて評価した。

なお塑性解析における荷重増分率 r を、その段階で作用している荷重 p^* と本来作用すべき荷重 p_0 との比 $r = p^* / p_0$ と定義する。

(2)計算ケース

1. トンネル掘削前の原地盤の安定解析
2. トンネル掘削後無支保で放置した場合の安定解析
3. トンネル掘削後支保工を建て込んだ場合の安定解析

の順に解析を行った。以下に各解析結果を示し考察を加える。

(3)原地盤安定解析

トンネル掘削時の安定解析をするためには原地盤が安定であるかを確認しなければならない。Fig-5は原地盤の最終状態 ($r=100\%$) におけるり線である。これによれば、軟弱地盤層Bを中心にり線が発達しているものの、地表面まで貫通していないことがわかる。したがって、斜面内部に円弧り線破壊を形成しようとする傾向があるが、完全なり線破壊を形成しないので、当斜面は安定であると判断できる。しかし、これから掘削するトンネル周辺地山はすでに破壊が進んでいると予想されるため、薬液注入等の補助工法をあらかじめ施す必要がある。

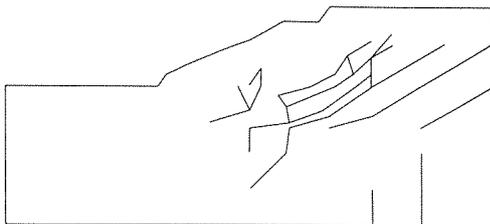


Fig-5 $r=1.00$ 最終状態の原地盤り線
Slip line before excavation ($r=1.00$)

(4)素掘りトンネル掘削時の安定解析

トンネル掘削後、無支保状態で放置した場合について以下に示す。

Fig-6は荷重増分率とトンネル壁面の水平変位量の関係 ($r - \delta x$ 曲線) である。ここで、 r が0.3を越えると変位量が急増することに着目すれば、トンネルが崩壊することがわかる。そこで、 $r=0.35$ のときのり線(Fig-7)をみると、トンネル山手側の根足部より右上方に向かって円弧を描くようにり線が発達し地表面に達しているため、り線より上側の土がトンネル内空に向かって落下することが容易に考察できる。また、このときの変位モード (Fig-8) をみると、トンネル山手側アーチ部の

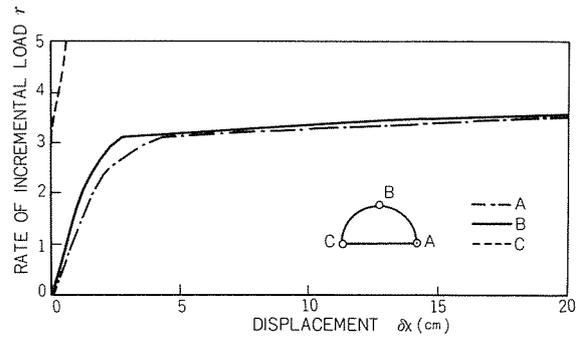


Fig-6 $r - \delta x$ 曲線
 $r - \delta x$ relation curve

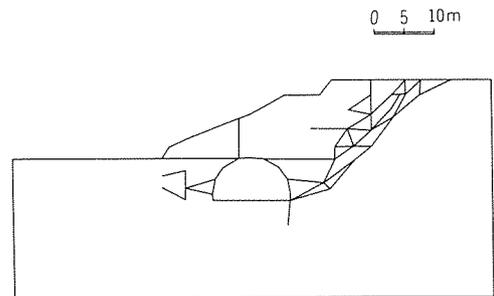


Fig-7 $r=0.35$ 時のり線(素掘り)
Slipline for un-supported condition ($r=0.35$)

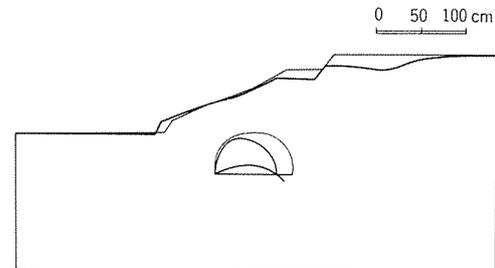


Fig-8 変位モード(素掘り)
Deformation (un supported condition)

押し出しが大きく、斜面法肩より右方10~15mの地表面では局部的に急激な沈下を示している。

以上をまとめると、斜面がり線破壊を起こすことよりも、トンネル崩壊に伴う地盤の陥没を起こす傾向のほうが強いことがわかる。また、陥没は法肩より10~15mの範囲の地表面のせん断クラックの観察により予知できる。

(5)支保トンネルの安定解析

トンネル掘削後、直ちに支保工が建て込まれた場合の安定解析について以下に述べる。Fig-9, Fig-10は、荷重増分率とトンネル壁面変位量の関係を水平方向、鉛直方向別に示したものである。これによれば、 $r=0.65$ までは各点とも一様に変位しており、その変位量も小さい。しかし $r=0.65$ を越えると変位量が急激に増加し、トンネル全体が川手側へ押し出されるような傾向を示す。そこで、 $r=0.65$ におけるり線(Fig-11)を書くとき、トンネル山手側の円弧り線に加えて、トンネル川手側の

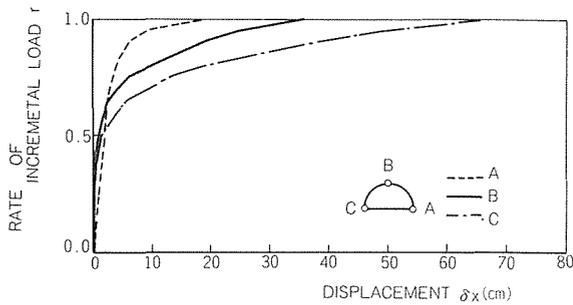


Fig-9 $r-\delta_x$ 曲線
 $r-\delta_x$ relation curve

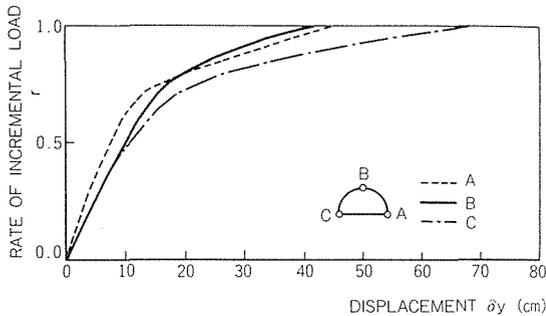


Fig-10 $r-\delta_y$ 曲線
 $r-\delta_y$ relation curve

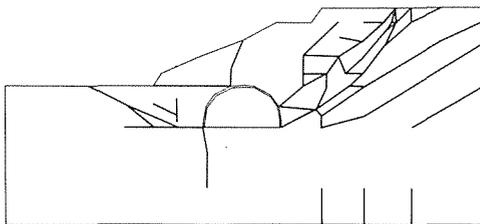


Fig-11 $r=0.65$ 時の迂り線(支保)
Slipline for supported condition ($r=0.65$)

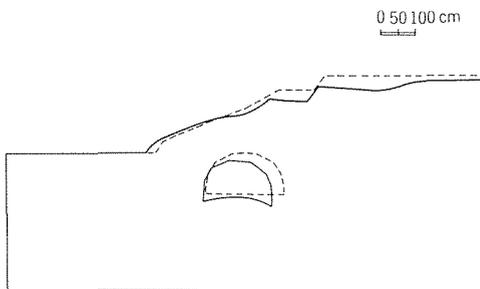


Fig-12 変位モード(支保)
Deformation (Supported condition)

の根底部より斜面前方の地表面に向かって迂り線が貫通する。また、このときの変位モード(Fig.-12)では、斜面法肩より10~15mの地表面が局部的に大きく沈下し、法尻付近ははらみ出しの傾向をみせているところから、斜面の迂り破壊が起きそうであることを示唆している。以上より、トンネルが崩壊しないように十分剛な支保を

施すと、斜面全体の迂り崩壊の危険性が生じることがわかる。ここで、迂り崩壊線の貫通時の荷重増分率 r を安全率と考えるならば、素掘りトンネルの場合が0.35、支保の場合が0.65となり、支保をすることにより安全率が上がるものの、1.0に達していない。したがって、このような場合には、掘削前にFig.-5で表われた迂り線地域を中心に、トンネル掘削部の周辺地山を強化もしくは補助工法を施しておかなければならない。

(6) まとめ

斜面近傍に土被りの浅いトンネルを施工した場合に発生する崩壊機構のうち最も一般的なものは、次の2種類である。

- i) 掘削に伴い斜面の迂りに対する抵抗力が減少したために生ずる斜面の迂り破壊。
- ii) 掘削されたトンネルが崩壊したために生ずる地表面の陥没。

R.B.S.M.は(4)~(5)に示したとおり、上記の(i~ii)を個々に計算しなくとも、同一計算の中でどちらの崩壊機構が優先的に発生するかが判断できるし、その時の崩壊の発展状況を逐次追跡できる。

すなわち、最も危険な崩壊形状とその発展段階が予測できるため、事故防止のための補助工法などが、経済的に計画できることになる。

3-2 岩盤への適用

Fig.-13は断層を含む岩盤斜面近傍に土被りの浅いトンネルを掘削する場合の解析モデルである。地盤は、A; 崖錐帯, B; 風化砂岩, C; 砂岩頁岩の互層, そしてB, Cの境界に発達した断層が存在する, を考える。当地に上部半断面先進工法により掘進した場合の安定解析を試みた。

(1) 解析条件

主な解析条件は3-1と同様である。材料定数は、Table-2に示したものをを用いた。また断層は、Fig.-3のパネ値, および c , ϕ をTable-2のように減少する

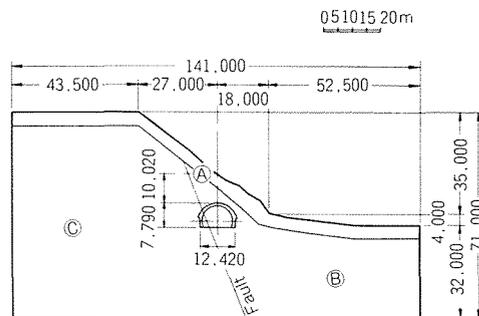


Fig-13 Geologic section

Table-2 Material property

		A	B	C	Fault	Lining
Young's modulus	kg/cm ²	5.0×10^2	1.0×10^3	2.0×10^3	5.0×10^2	1.4×10^5
	(N/m ²)	4.9×10^8	0.98×10^9	1.96×10^9	4.9×10^8	1.37×10^{11}
Poisson's ratio		0.44	0.33	0.30	0.44	0.167
Unit weight	t/m ²	1.90	2.10	2.40	1.90	2.30
	(N/m ²)	1.86×10^{-3}	2.06×10^{-3}	2.35×10^{-3}	1.86×10^{-3}	2.25×10^{-3}
Cohesion	kg/cm ²	0.5	1.0	10.0	0.5	
	(N/m ²)	0.49×10^6	0.98×10^6	0.98×10^7	0.49×10^6	
Angle of internal friction	deg	10	25	30	10	
	rad	0.1745	0.4363	0.5236	0.1745	
Cross section	cm ²					6000.0
Moment of inertia	cm ⁴					1.80×10^7

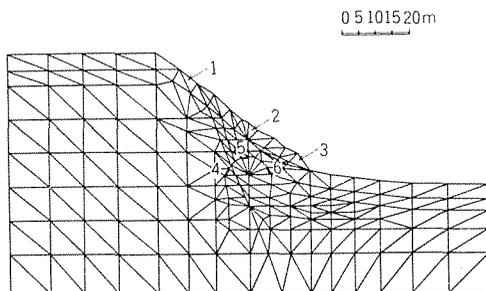


Fig-14 Generated mesh

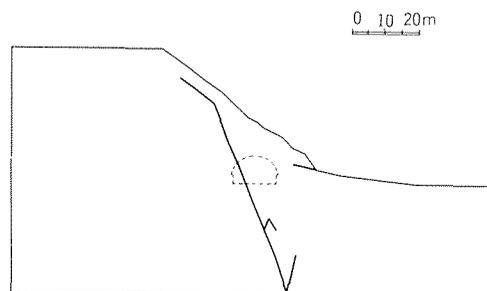


Fig-15 Slip line before excavation

ことで評価した。掘削が上半先進工法のため、解析は上半掘削時そして下半掘削時の順を追った。支保時の条件は、巻厚60cmのコンクリートライニングとして梁要素によりモデル化した。解析モデルの要素分割は Fig-14 を用いた。

(2) 計算ケース

1. トンネル掘削前の斜面安定解析
2. 無支保掘進時の安定解析
3. 支保トンネルの安定解析

の順に計算を実施した。以下に各解析結果を示し考察を加える。

(3) 原地盤安定解析

トンネル掘削前の斜面の安定状態を知っておく必要がある。Fig.-15は、この時の迂り線図である。断層の位置がよく表われているが、斜面の迂り破壊の傾向はまったくみられない。

(4) 無支保掘進時の安定解析

トンネル周辺の岩盤にとって最も条件の悪い場合、すなわち素掘り掘進時の岩盤の安定解析を行い、施工条件が最も悪い場合の安定性への指針とする。Fig.-

16～Fig.-19はこの時の解析結果である。

i) 上半掘進時

トンネル上半が掘削された状態の解析結果がFig.-16, Fig.-17である。Fig.-16の迂り線図によれば、断層から延長して地表面に迂り線が突き抜け、また斜面法尻よりトンネル川手アーチ部に向かって迂り線が貫通している。この迂り線の形状は断層が迂ることによる陥没が原因で斜面崩壊へと進展して行く傾向であることを示唆している。Fig.-17の変形図でも、断層部分で迂りによる落盤を起こすことを表わしている。

ii) 下半掘進時

Fig- 18, Fig.-19は上半に続き下半が掘削された状態の迂り線図および変形図である。上半掘削時に既に破壊が進展してしまっているため、下半掘削による変化はほとんどない。

(5) 支保トンネルの安定解析

最も堅実に施工された場合のトンネル周辺岩盤の安定解析の結果がFig.-20, Fig.-21である。上半掘削時も下半掘削時も迂り線および変位傾向に大きな差が認められなかったため、下半掘削時のみを示す。

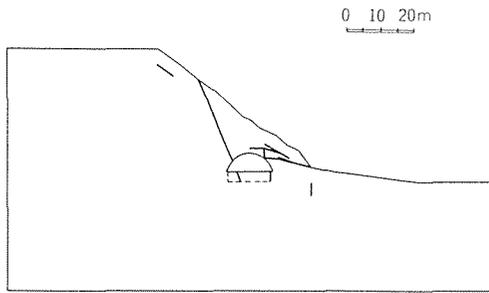


Fig-16 Slip line after excavation of upper-half

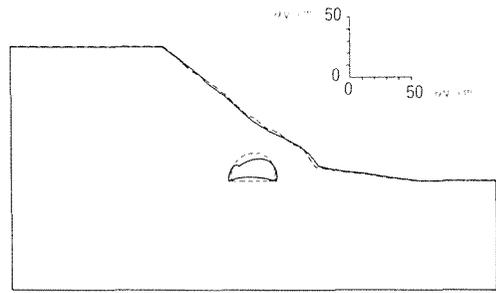


Fig-19 Deformation

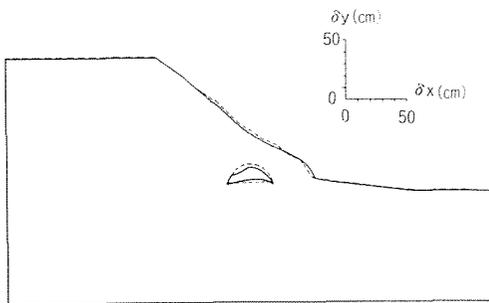


Fig-17 Deformation

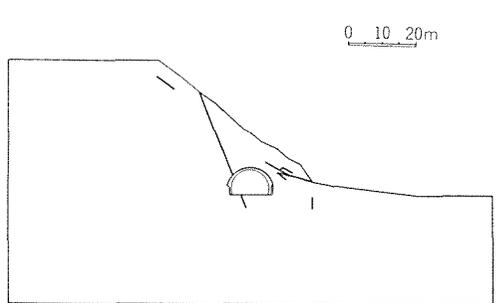


Fig-20 Slip line after completion of concrete lining

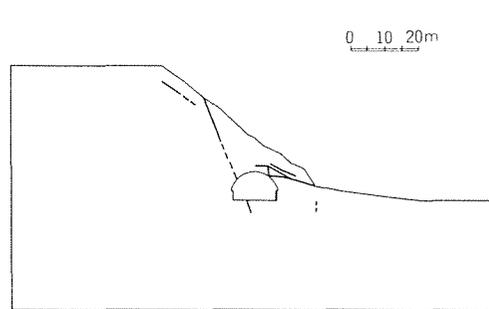


Fig-18 Slip line after excavation

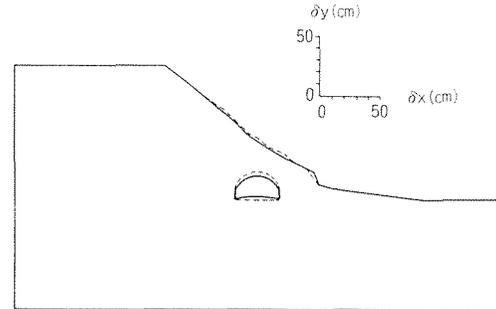


Fig-21 Deformation

Fig-20によれば、迂り線は法尻で円弧迂り線を形成しようとするが、迂り線が途中で進展しなくなり、安定が保たれることを示している。ただし、断層部では迂り線が地表面まで突き抜けているため、トンネルアーチ上の岩の全荷重が断層に平行方向に偏土圧として支保に载荷される。従って、この偏土圧に対抗できる支保の設計施工がなされなければならない。

(6) まとめ

以上の解析結果より、当斜面地域でトンネルを掘進する場合に、施工上最も注意する点は、断層に沿って起こるトンネルの落盤である。もしトンネルアーチ部に大きな変形が生じてしまうと、これに伴って斜面法尻部に迂り破壊が起こる。従って施工においては、トンネルアーチ部の変形に注意を払い、トンネル崩壊を防止することで突破できる。しかし施工安全を考慮し

で法尻部に押さえ盛土等の補助工法などにより法尻部の安定に努めれば万全である。

§ 4. おわりに

R.B.S.M.の特長は次のようにあげられる。

1. 迂り線が有限要素法に比較して明確に表現できるため、斜面の安定など迂り破壊問題に有効である。
2. 異方性（断層や節理系）の地山の解析が容易である。
3. 迂り線と変位から、斜面崩壊が、表層迂り、円弧迂り、陥没のいずれの要素が大きな原因になるか、また最も危険な迂り破壊線が何処にあるのかを発見できる。
4. 斜面の安定のみでなく、トンネル施工の安全性や施工法の適不適まで予測することが可能である。
5. 有限要素法と比較して計算時間が短縮できる。

今回の報告では、トンネル掘削に伴う斜面の安定解析をとりあげて解析例を紹介したが、R.B.S.M.は、従来有限要素法により解析されていた地盤構造物一般についての解析が可能である。特に、杭や地下連続壁などの地盤支持力問題やシールドトンネル切羽の安定問題、トンネル掘削に伴う緩み領域の判定問題などでは数多くの報告⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾が発表され、結果が良好であると紹介されている。

R.B.S.M.の地盤への応用は、東京大学生産研究所川井研究室との共同開発という体制で1980年4月から1982年3月の2年間をかけて研究したものである。業界、学会などでは、破壊の形態を忠実に表現する極限状態の解析法として、近年注目されており、一般化された解析法となりつつある。

本報告書をまとめるにあたり、東大生研の川井忠彦教授、竹内則雄助手に貴重な御意見を賜った。ここに記して感謝の意を表します。

<引用文献>

- 1) 川井：生研セミナーテキスト コース29, 39, 48, 57, 76 (生産技術研究奨励会)
- 2) 川井, 都井：“A New Element in Discrete Analysis of Plane Strain Problems” 生産研究 Vol. 29 No. 4(1977)
- 3) 中村・竹内・川井：“斜面安定問題に対する一離散化解析” 第35回土木年講 Vol. 3(1980)
- 4) 矢田・竹内・川井：“新離散化極限解析の斜面安定に対する応用” 第36回土木年講 Vol. 3(1981)
- 5) 波田・竹内・川井：“新離散化モデルによる斜面の極限解析について” 第36回土木年講 Vol. 3 (1981)
- 6) 竹内・糸田・川井：“新離散化モデルによる地盤基礎の極限解析”(その5) 生産研究 Vol. 33 No. 5 (1981)
- 7) 竹内・糸田・川井：“斜面近傍のトンネル安定解析” 第8回土木学会関東支部講演概要集 (1981)
- 8) 糸田・竹内・川井：“断層を含む斜面のトンネル掘削解析” 第36回土木年講 Vol. 3 (1981)
- 9) 山下・加倉井・川井・竹内：“新離散化モデルによる斜面の支持力の解析” 第16回土質工学研究発表講演集 P853～856
- 10) 竹内・川井：“新離散化モデルによる地盤基礎の極限解析”(その1) 生産研究 Vol. 33 No. 6
- 11) 竹内・川井：“新離散化モデルによる地盤基礎の極限解析”(その2) 生産研究 Vol. 32 No. 8