

# 新離散化モデルによる地盤基礎の極限解析(その5)

## — トンネル問題 —

Limit Analysis of Soil and Rock Foundation by Means of New Discrete Models (5th Report)

— Tunnel Problems —

竹内 則雄\*・条田 俊男\*\*・川井 忠彦\*  
Norio TAKEUCHI, Toshio KUMETA and Tadahiko KAWAI

### 1. はじめに

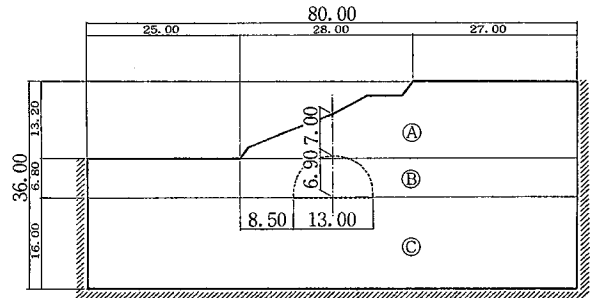
トンネルを施工する場合、必ずといってよいほどつきまとう問題が坑口付近の対策である。一般に坑口付近の施工では斜面の近傍を掘削しなければならず、しかも土被りが浅いため最も破壊事故が起き易い。したがって、掘削に伴う斜面の安定性やトンネルへの影響等を予想しておくことが重要である。

従来、このような問題に対して円弧切り面を用いる簡易法的解析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切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場合等における切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定性まで議論することはできない。これは円弧切り面による解析が単なる斜面の安定だけを議論しているのみで、トンネル構造物の崩壊現象まで取り入れていないからである。一方、後者の有限要素法による解析では、トンネル掘削に伴う斜面の安定性ならびにトンネル自身の安定性を考慮した解析となっているが、明確な切り線が得られず、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、斜面安定問題に対する川井モデル<sup>1)~3)</sup>の有効性はすでに(その3)<sup>4)</sup>で報告したとおりであり、今回はこの斜面近傍にトンネルを掘削した場合の安定解析例を示す。

### 2. 解析モデル

図2・1に解析に用いたモデル図と材料定数を示す。本解析における地盤は3層より成るものとし、上から④；関東ロームで盛土後約5年経過した地盤、③；腐植土および凝灰質粘土を主体とした軟弱地盤、②；シルト質



(a) 計算モデル

Material		④	③	②
Young's modulus	t/m <sup>2</sup>	3000.0	3500.0	8000.0
	Pa	29.4×10 <sup>8</sup>	34.3×10 <sup>8</sup>	78.5×10 <sup>8</sup>
Poisson's ratio		0.4	0.35	0.3
Cohesion	t/m <sup>2</sup>	4.0	5.0	3.0
	Pa	39.2×10 <sup>8</sup>	49.0×10 <sup>8</sup>	29.4×10 <sup>8</sup>
Unit weight	t/m <sup>3</sup>	1.8	1.6	1.8
	kN/m <sup>3</sup>	17.7	15.7	17.7
Angle of internal friction	deg.	0.0	0.0	40.0
	rad.	0.0	0.0	0.698

(b) 材料定数

図2・1 斜面近傍のトンネル安定解析に用いた計算モデル

細砂で安定した基礎地盤、程度の材料定数を選んだ。境界条件は周辺スライドで、荷重条件は自重のみを考慮した。破壊条件としてモール・クーロンの直線包絡線型の塑性条件を採用した。計算ケースとして、トンネル掘削前の盛土斜面安定解析、素掘りトンネル掘削に伴う斜面の安定解析、さらに、支保工が建て込まれた状態に対する斜面近傍のトンネル安定解析の3ケースを取り上げた。なお、トンネルは鉄道複線型断面とし、支保工は、鋼製支保工H-200を1m間隔で建て込むものとした。

図2・2に要素分割図を示す。節点数124、要素数249、スプリング数340である。ここで、支保工については梁要素を用いたため、要素分割図から読み取ることができないが、インパートを除くトンネル壁面に添って

\* 東京大学生産技術研究所 第2部

\*\* 西松建設(株) 土木設計部

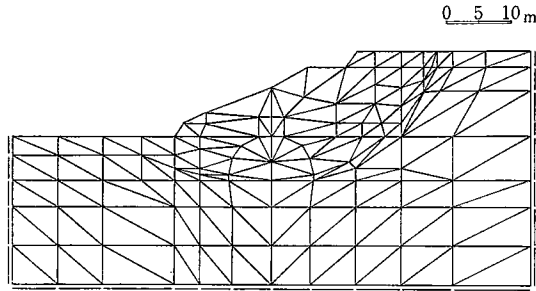


図2・2 計算に用いた要素分割

10要素を用いて評価している。

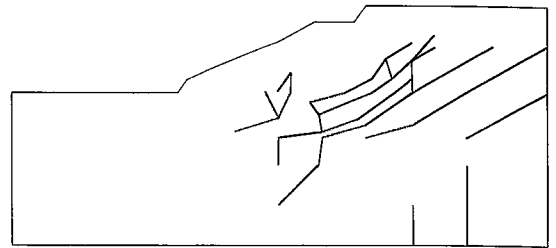
次に塑性解析における荷重増分率を、その段階で作用している荷重  $P^*$  と、本来作用すべき荷重  $P_0$  との比 ( $P^*/P_0$ ) として、百分率で表している。

以下に各々のケースの解析結果を示し考察を加える。

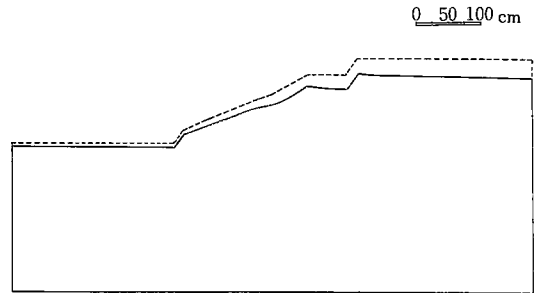
### 3. 盛土斜面安定解析

トンネル掘削前の盛土斜面の安定解析を行った。

図3・1は荷重載荷率100%のときの(a)りり線および(b)変位モードである。(a)りり線図から理解されるように、軟弱地盤層⑤では破壊が進行しているものと思われるが、盛土層④と基礎地盤層③が安定であるため、りり線は崩壊機構を形成するに至らず、一応盛土斜面の安定は保たれている。また、(b)変位モード図を眺めても一様沈下の傾向を示しており、斜面上部の局部的沈下あるいは法面のはらみ出しは見られない。以上の結果より、トンネル掘削前の盛土斜面は一応安定であるが、軟弱地盤層では、すでに破壊が進んでいることが考察される。



(a) りり線

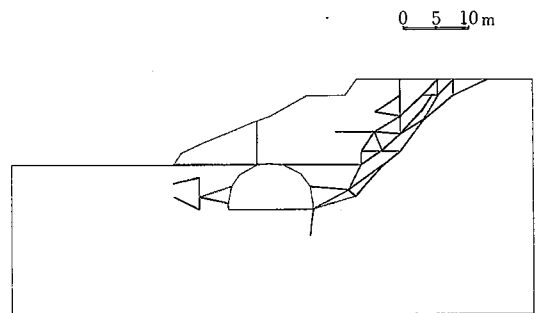


(b) 変位モード

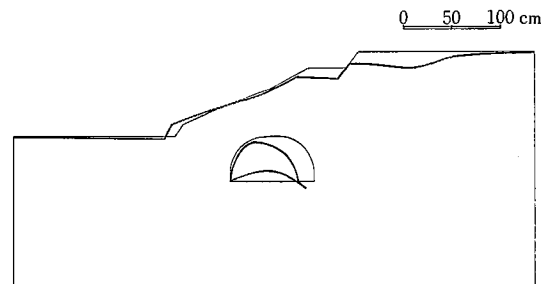
図3・1 トンネル掘削前の盛土斜面安定解析結果

### 4. 素掘りトンネル掘削に伴う斜面安定解析

トンネル掘削後、無支保状態で放置した場合の結果を図4・1・図4・2に示す。図4・1は荷重載荷率35%のときの(a)りり線と(b)変位モードである。荷重載荷率35%までのりり線の発達状況を眺めると、トンネル山手側の根足部よりりり線が発生し、円弧りり線を描くように右上方に向かって伸びてゆく。トンネル山手側の根足部と斜面上端との間にりり線が崩壊機構を形成すると同時に、トンネル天端より真上に向かってりり線が貫通する。すなわち、円弧りり線破壊を起こす前にトンネルが陥没する傾向を示している。(b)変位モードを見ても、斜面上部が局部的に沈下し、トンネル壁面も山手アーチ部からの押し出しが激しく偏圧による落盤現象を示しており、このことから陥没を予想することができる。図4・2はトンネル壁面各部分における水平方向変位と荷重載荷率の関係を示したもので、川手根足部(C点)の水平変位がほとんど生じないのに対して、天端(B点)および



(a) りり線



(b) 変位モード

図4・1 素掘りトンネルの安定解析結果

山手根足部(A点)では荷重載荷率が30%を越えると変位が急激に増加し、トンネルが崩壊することを示している。以上の結果より、トンネル掘削後無支保状態で放置しておく、斜面がりり破壊を起こすことよりも、トンネル

研究速報

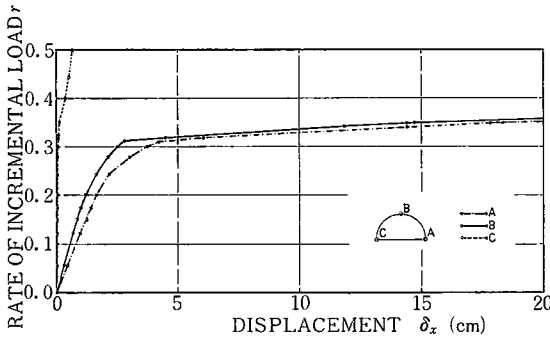


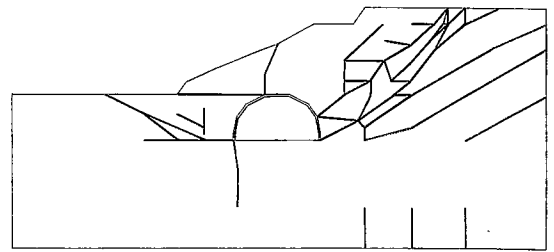
図4・2 素掘りトンネルの各点における荷重変位曲線

崩壊に伴う地盤の陥没を起こす傾向のほうが強いと考察される。

このような現象を通常の円弧り面を用いた方法では表現できないことから、本法の有効性を伺うことができる。

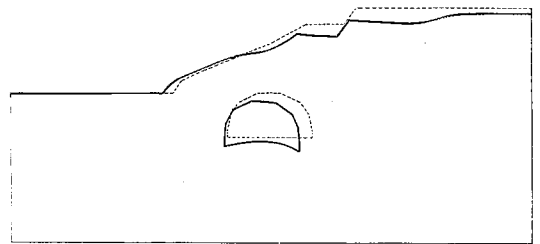
5. 支保トンネルの安定解析

支保工が建て込まれた状態におけるトンネル安定解析の結果を図5・1・図5・2に示す。図5・1は荷重荷率65%のときの(a)り線と(b)変位モードである。(a)り線によれば、斜面前方にもり線が進展していることがわかる。これは支保工が剛なため、山手からの偏土圧を川手の地盤に伝えてしまうために生ずるものと考えられる。これにより、斜面前方にり線崩壊機構を形成し、斜面全体のり線崩壊の傾向が見られる。(b)変位モードを見ると、支保の導入によりトンネルの形状は保たれているが、斜面上部に局部的な沈下が見られ、法面のほらみ出しも表れている。図5・2はトンネル壁面の各点における荷重荷率-変位量曲線で、(a)水平方向、(b)鉛直方向の変位に対するものである。これによれば、斜面全体のり線崩壊機構を生ずる荷重荷率65%までは各点とも一様に変位しており、その絶対変位量も少ない。ところが65%を越えると変位量が急激に増加し、トンネル全体が押し流されるような傾向を示す。これから斜面全体のり線崩壊を起こす可能性が予想できる。以上の結果より、トンネルが崩壊しないように剛な支保をした場合には、斜面全体のり線崩壊の危険性が生じると考察される。ここで、り線崩壊機構を形成したときの荷重荷率を安全率と考えるならば、素掘りトンネルの場合が35%、支保の場合が65%となり、支保をすることにより安全率は増加するものの100%には達していない。したがって、このような場合には図5・1(a)で表れたり線地域を中心に、トンネル掘削部周辺の地盤を強化もしくは補助した後に、トンネル掘削施工をするよう計画



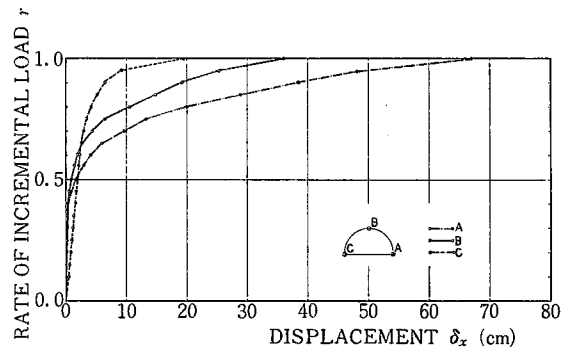
(a) り線

0.50100 cm

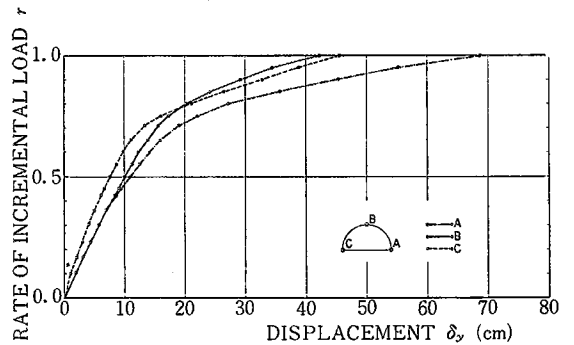


(b) 変位モード

図5・1 支保工の建て込まれたトンネル安定解析結果



(a) 水平方向変位



(b) 鉛直方向変位

図5・2 支保工の各点における荷重変位曲線

しなければならない。

6. ま と め

川井モデルをトンネル掘削時における斜面の安定問題に応用した例を取り上げて考察を行った。斜面安定問題の場合、切り線に異種の構造物が介在すると計算が難しいとされていたが、当モデルにより十分評価されたと考える。また4で陥没による崩壊、5で複合切り面による崩壊と2種類の崩壊パターンが推察されることを示した。これらの崩壊パターンは斜面に土被りの浅いトンネルを掘削する場合によく問題にされるものであるが、当モデルの解析結果を総合的に判断することで、どちらのパターンに属するかを予想し得ると考える。

川井モデルを斜面安定問題に応用してみると、次の利点があげられる。

- 1) 有限要素法と比較して、計算時間が短い。また切り線が明確である。
- 2) 切り線の発達段階を追跡することで、最も危険度の高い切り線を発見することが可能である。
- 3) 予想される切り線の領域内に異種の構造物が介在しても、それを含めた解析をすることで評価できる。また補助工法を考慮したい場合でも、補助工法をモデル化することにより簡単に評価できる。

4) 陥没や複合切り面破壊が、切り線図、変位図等を総合判断することにより推察できる。

一般に斜面の安定を問題にする場合、変形量も崩壊に至るまでの尺度として問題にされるが、最終的に問題になるのは崩壊するか否かであり、その観点からみても極限解析の立場に立つ川井モデルを応用することは有効であると考えられる。

本計算を行うにあたり、西松建設株式会社 土木設計部 松野倬也氏から貴重な資料やご意見を賜った。ここに記して感謝の意を表する。

(1981年2月23日受理)

参 考 文 献

- 1) 川井：生研セミナー・テキスト (1977)
- 2) Kawai and Toi: J. of "Seisan Kenkyu" Vol. 29.No 4 204 - 207 (1977)
- 3) 竹内、川井：土木年講概要集 (1979)
- 4) 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3)”，生産研究，32.8.376-379 (1980)
- 5) 竹内、桑田、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研究発表講演概要集 (1981)

正 誤 表  
(3 月 号)

頁	段	行	種 別	正	誤
118	左		図2の横軸の文字の位置	0.0 0.18 0.37 0.54 0.74	0.0 0.18 0.34 0.54 0.74

(4 月 号)

頁	段	行	種 別	正	誤
(目次)			表 2	論 說   不連続体… 研究速報   回転対称…	研究速報   不連続体…   回転対称…
132	中央		図 7	j (P=p=0.0)	j (P (P=p=0.0)
152	右	↓ 2, ↓ 3, ↓ 4, ↓ 9, ↓ 27,	本 文	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>
(生研ニュース)			表 3	で助教授に	で教授に