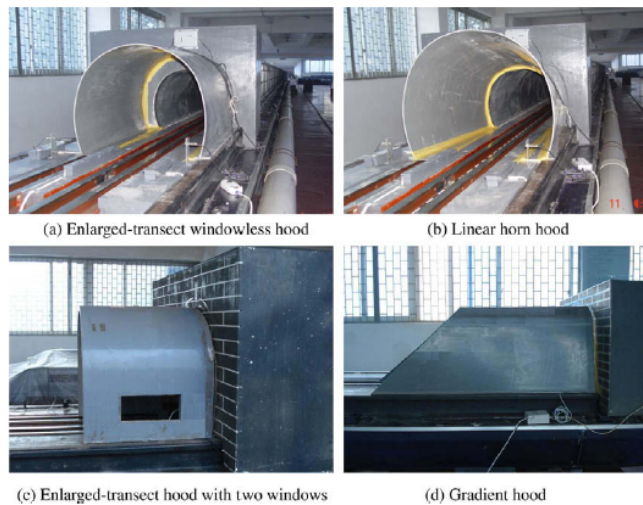


Design and optimization of tunneling hoods トンネル緩衝工の設計と最適化

本論文では、高速の列車がトンネルに進入するときが発生する気圧変化とトンネル出口側で発生する衝撃波“微細圧力波”について研究を行なった結果を示している。本研究では三次元数値解析と高速で動く2台の列車がトンネルに進入する状況を模擬できる模型を用いた比較実験から、トンネル緩衝工の形状が“微細圧力波”に与える影響を定式化しており、この結果から適切な緩衝工形状を設定することが可能となる。



本研究により得られた結論は以下の通りである。

- ① 緩衝工は圧力波とトンネル出口側で発生する衝撃波の圧力勾配を効果的に低減させることが可能である。また緩衝工の必要長と必要断面積には明確な相関がある。
- ② 適切な緩衝工を選定するにあたっては、衝撃波をどの程度低減させる必要があるかを明らかにした上で、地形条件やコストの制約等を考慮した詳細な解析により緩衝工の長さや断面積を設定する必要がある。
- ③ 衝撃波を減少させるためには、緩衝工に窓を設けたり、竹割形状とすることが有効である。

Optimum spacing of TBM disc cutters: A numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method

TBM ディスクカッターの最適配置～3次元動的破壊解析により数値シミュレーション～

TBMにて岩盤を掘削する際、ディスクカッターにより岩盤に圧縮力が加わる際、岩盤チップングが生じる領域と引張クラックが形成される領域とに分類できると考えられる。一方で実際の破壊現象はディスクカッターによる圧縮力と回転力の作用により生じるため、2次元解析を用いた破壊状況のシミュレーションではディスクカッターの回転力と3次元動的破壊状況を模擬できない。そこで研究では3次元動的破壊解析によりディスクカッターが作用した際の岩盤の破壊現象をシミュレートし、実大模型実験による岩石破壊結果との比較を行った。

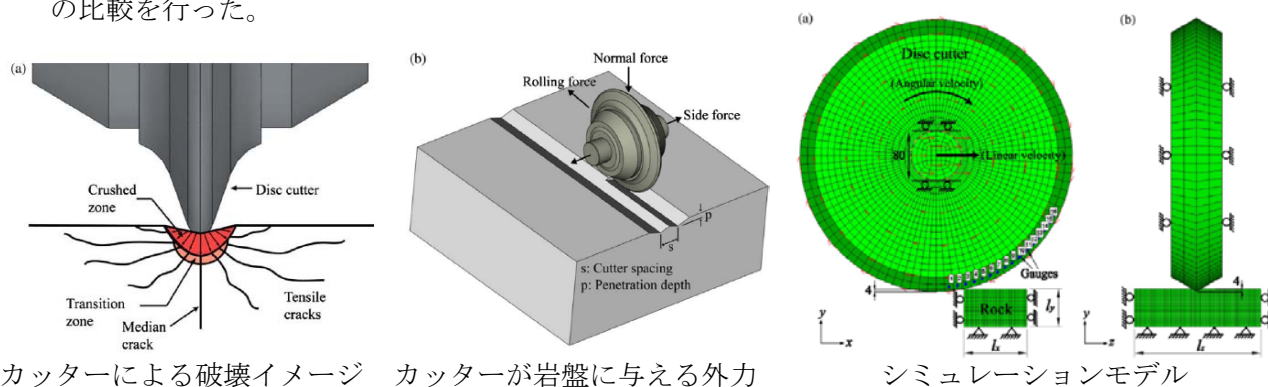


図1 (a) カッターによる破壊イメージ (b) カッターが岩盤に与える外力

(c) シミュレーションモデル

<試験結果>

単位体積の岩盤を切削するのに必要なエネルギーを固有エネルギーと定義し、カッターの速度、岩盤のモデル化領域やカッター間隔が固有エネルギーに与える影響に関して調査を行った。

①カッター移動速度が固有エネルギーに与える影響

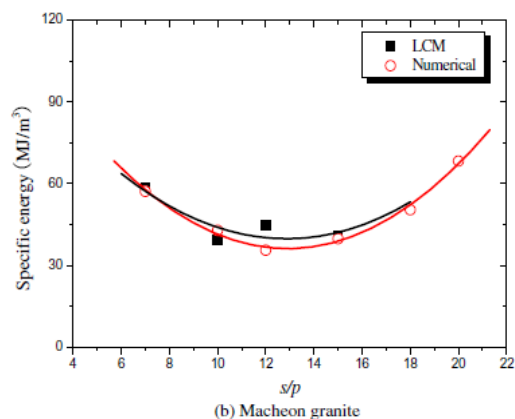
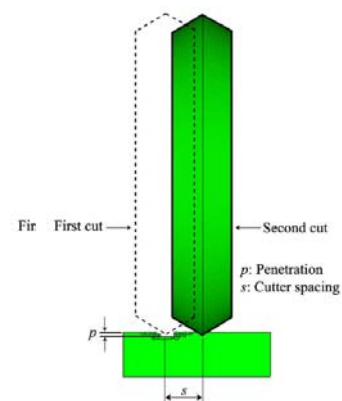
既往の研究では、カッター移動速度は固有エネルギーに影響を与えないとされている。今回のシミュレーションでも速度と固有エネルギーに相関はほとんどなかった。

②モデル化する岩盤の大きさと固有エネルギー

岩盤のモデル化領域を $l_x=100\text{mm}$ 、 $l_y=30\text{mm}$ 、 $l_z=100\text{mm}$ 以上とすれば、固有エネルギーやカッターの回転力、剥落する岩石の大きさは概ね一定となる。

③カッター通過位置のずれが固有エネルギーに与える影響

TBM のカッターは円周方向に同一の軌跡をたどるわけではなく、軌跡にずれが生じる。軌跡のずれを” s ”カッターの貫入量を” p ”として、 s/p に対する固有エネルギーをシミュレーションと模型実験により求めた結果からは、最適な s/p は 10 から 18 と求められた。また、シミュレーションと模型実験には 20%程度しか差がなく、シミュレーション手法は妥当と考えられる。



(b) Macheon granite

Sequential excavation, NATM and ADECO: What they have in common and how they differ

Sequential excavation, NATM, ADECO の共通点と相違点

本文は Sequential excavation、NATM、ADECO それぞれについてその考え方や歴史について触れ、ADECO の優位性について述べている。筆者のコメントは以下の通り。

- Sequential excavation とは TBM を使用せずに人力をベースとしたトンネル掘削工法でアメリカでは 200 年の歴史がある。
- NATM は Sequential excavation の一部に過ぎない。
- NATM を提唱したラブシュウィッツは「トンネルはできるだけ全断面で掘削すべき」と述べている。しかし、脆弱地質や膨張性地質などの厳しい応力条件下では加背を分割することで対処してきた。
- ADECO の出現がこのような厳しい地質でも「全断面掘削」を可能にした。
- ADECO はいかなる応力条件下でも全断面掘削を可能とするもので、工期、工費とも最小となる施工法である。NATM は地山に応じて支保パターンや施工速度が変化する施工法であるが、ADECO はできるだけ施工速度が速くなるように地盤条件に変更する施工法である。過去の施工実績からも、ADECO は地質の変化に関わらず施工スピードが一定であることが分かる。
- ADECO が出現した背景には、大規模な施工機械の開発、切羽前方補強技術、切羽変位計測手法及びその評価方法が発達したことが大きい。

Profile deformation of a circular tunnel induced by ambient stress changes

周辺の土圧変化による円形トンネルの変形

最近のトンネルの変位計測技術の発展によって、「2測点の3方向の座標（6点の座標）計測とレーザー照査による計測によって早く簡単な変位計測」、「トンネル内部形状を100点以上で評価」、「4mm未満の精度で計測」が可能となった。このようなトンネルの内部形状が最も簡単に正確に実際のトンネル形状に近く計測できるようになってから、形状計測はトンネルの安定性の評価を行う上で標準となってきた。

このことを踏まえて、この論文の研究では、「変形挙動が変化した後トンネル形状が周辺の土圧の変化によってどう変わるか」、「どのように周辺の土圧の潜在的な変化がトンネル形状の変化に影響するのか」を明らかにすることを目的として、解析で円形トンネルについて地圧条件を変え、トンネルの各位置でどのような変形状態になるかケーススタディーを行っている。

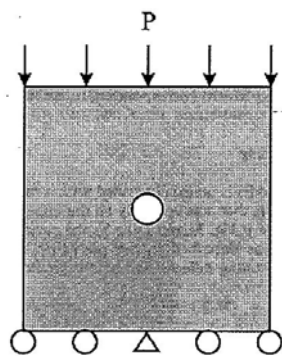
検討では以下のような解析用物性値及びモデルを用いている。

表一解析用物性値

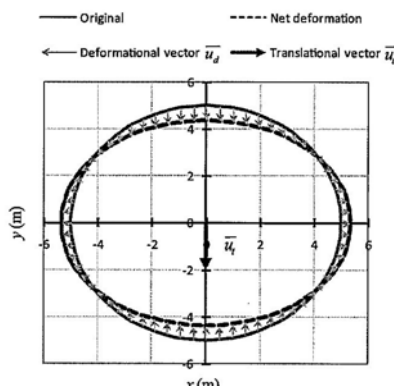
Materials	Mechanics property					Physical property (for all cases)
	(For all cases)		(For Case 17 only)			
	E (GPa)	ν	Friction angle ($^{\circ}$)	Dilation angle ($^{\circ}$)	Cohesion (kPa)	D_r (kN/m ³)
Rock	2.0	0.3	35	35	100	23.5
Lining	26.5	0.15	N/A	N/A	N/A	21.2

Remarks: E = Young's modulus; ν = Poisson's ratio; D_r = density.

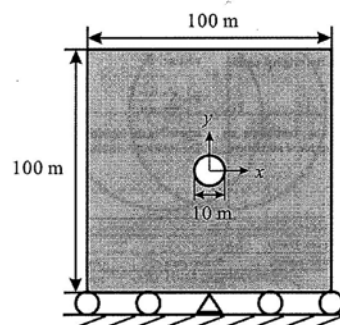
上載荷重 P がモデル上部に作用した場合のケースについて行った検討の結果例を以下に示す。



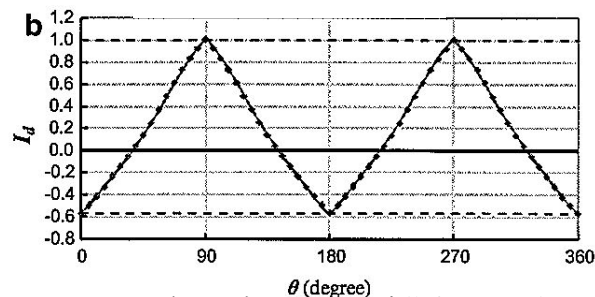
図一荷重条件



図二トンネル変形図



図一解析モデル



図二トンネル周方向位置 θ と変位率 I_p の関係

また、この論文の研究では実施工への適用も考え、円形トンネル以外にも扁平断面や幌型などの形状の変形状態を解析的に各トンネル位置（周方向の角度）と変位率の関係で示すことで変形状態を確認している。

解析的に得られた変形状態を基に内部形状の計測から周辺の地山からの荷重を予測することになる。しかし、変形が大きく塑性領域が広がり計測値とうまく合致しない場合があり、このような場合には完全弾塑性モデルによりトンネルの変形状態を評価する必要がある。

る。

Stability of unlined twin tunnels in undrained clay

非排水粘土層における素掘り双設トンネルの安定性

この論文では隣接する双設トンネルの相互干渉効果を評価する際に重ね合わせの原理を用いることに対する有効性を示している。

非排水粘土層中の双設トンネルの変形量分布は各単線トンネルの変形量分布を足し合わせることによって得られる。図-1 はガウス曲線で表した塑性メカニズムを点線で、その足し合わせを実施した結果を実線で示しており、計測結果との比較を行っているもので、理論解と計測値が大差ないことが確認できる。また両トンネル掘削後の変位は掘削順序の影響を受けずに、想定される地盤変位と変わらないことが確認できる。

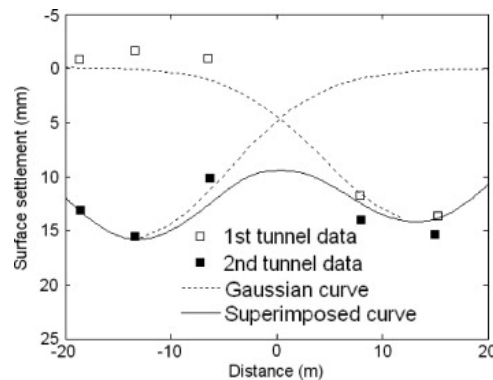


図-1 計測値と理論値の比較 (London clay , Heathrow Express Terminal 4 Station)

また論文では数値解析プログラム MATLAB を用いて、双設トンネルの離隔、トンネル深さ、非排水強度プロファイル、土の密度をパラメータとした双設トンネルの塑性変形解析を実施しており、式1で表される安定係数を用いて各パラメータの比較を行っている。

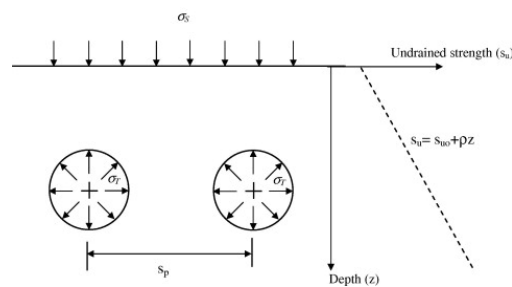


図-2 解析モデル

$$N_s = \frac{(\sigma_s + \gamma z_0 - \sigma_T)}{s_{u,r}}$$

式-1 安定係数

上記より以下の結果が得られた。

- 双設トンネルの離隔は大きな影響を与えており、離隔 0 に対して浅いトンネル (C/D=1) で 35%、深いトンネル (C/D>3) で 22%の安定係数の増加が確認できる。
- 双設トンネルの離隔が地表面深さの 0.75 倍となるときに安定係数は最小となる。
- 設計上、双設トンネルの離隔が 1.5D 以上のときに相互干渉の影響がない。
(C:土被り高さ, D:トンネル高さ)

この研究の更なる発展には均質地盤中の双設トンネルに関する研究と、十分な機器を備えた、より精度の高いデータが必要となる。