

○ 千葉工業大学 学生員 高橋 成明
 東京大学 正 員 堀井 秀之, 吉田 秀典

1. はじめに

近年, 特に都市部(首都圏)において高層ビル群, 高速道路, 住宅地などの建設による過密化によって, 地上部における土地利用空間の減少が生じ, 新たに開発すべき土地利用空間の確保が困難に成りつつある。そこで, こうした諸問題を解決する手段として地下空間の開発・利用が注目されているが, 上記の問題を解決するためには, 地下空間の規模はこれまでの実績を遥かに超えたものとなる可能性がある。都市部の地下空間を開発する掘削工法としては, 開削工法, シールド工法, NATMなどがその代表的な施工方法として挙げられ, 特にシールド工法に関しては泥水加圧式シールドをはじめとして都市部のほとんどの軟弱地盤において適応され, 既に多くの実績を残している。しかし, 都市NATMは本来, 山岳地域で用いられていた工法を都市部に適応したもので, 地山の自立性に乏しい都市部においては, 例えNATMで掘削が可能な地質でも自ずと空洞規模等に制約が生じる。しかしながら, 地山自体が有している力を積極的に利用し, それに支保工(吹付けコンクリート及びロックボルト)を適当に施したり断面形状や掘削順序を工夫することで, 都市部においてもNATMによる大断面掘削が可能になるものと考ええる。そこで本研究では, 解析を通してその可能性の検討を行うことを目的とした。

2. 解析方法

本研究では, 図1に示すような, 横幅9.3m, 高さ13mの規模を有する偏平トンネルの掘削を行うことを想定し, その掘削順序を図中に示した。ただし, 解析は左右対象問題としたので, 図2に示すような2分割した領域(幅50m, 高さ70mの矩形領域)で解析を行った。都市部においてもやや良質な地山(首都圏では上総層程度)が現われると思われる深度30mを土盛りとして確保し, 文献¹⁾を参考に地山の特性を表1のように設定した。支保を考慮に入れる解析においては, トンネル上半部および下半部の一部に, 約1mの間隔で長さ6mのロックボルトを計16本, また上半部, 下半部に厚さ10cmの吹付けコンクリートを施した。

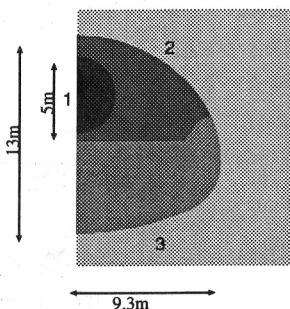


図1 掘削順序

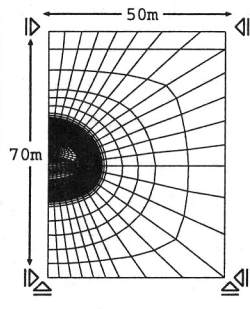


図2 解析メッシュと境界条件

これら支保の特性も文献²⁾を参考にして定め, これらの諸元を表2に示す。境界条件については, 左右側面のX方向変位, さらに底面のY方向変位をそれぞれ固定した。解析では, 1) 無支保全断面掘削(case1), 2) 無支保分割掘削(case2), 3) 有支保分割掘削(case3), 4) 無支保分割弾性解析(case4)という4種類のケースを設けた。

表1 地盤の変形特性と強度特性

ヤング率 $E:(kgf/cm^2)$	ポアソン比 μ	単位体積重量 $\gamma:(kgf/cm^3)$	内部摩擦角 $\phi:(deg)$	粘着力 $C:(kgf/cm^2)$
1000	0.3	0.002	40	4.0

表2 支保部材の入力パラメータ

材料	要素タイプ	ヤング率 $E:(kgf/cm^2)$	ポアソン比 μ	断面積 $A:(cm^2)$
ロックボルト	トラス要素	1.94×10^6	0	0.624
吹付けコンクリート	平面ひずみ要素	1.0×10^6	0.2	

解析手順としては, まず最初に自重解析を行い, その後にトンネル掘削予定線より地山相当応力を逐次的に解析することと掘削を表現した。さらに, 分割掘削の場合は掘削を3段階(頂設先進導坑, 上半部, 下半部)に分割し, 支保は切り

キーワード: 大断面地下空洞, NATM

〒113 東京都文京区本郷 7-3-1 TEL:03-5804-8708 FAX:03-3812-4977

羽が到達後に直ちに打設されるものとし応力解放直前に施した。すべての解析において、地山材料には Drucker-Prager の構成則を適用し、弾塑性二次元平面ひずみの条件下で解析を行った。

3. 解析結果

まず、トンネル中心部の直上にあたる地表面、トンネル中心天端、上半部掘削における角隅部、及びトンネル断面の右斜め下部の4点で変位をピックアップし、これらの点における全断面掘削後の変位量をまとめて表3に示す。

表 3 最終変位 (cm)

解析ケース	地表面		トンネル天端		上半隅角部		下半右斜め下	
	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向
case1	-0.6	-6.0	-0.1	-11.8	-0.9	-5.4	-1.2	+0.5
case2	-0.56	-5.4	-0.07	-11.0	-0.03	-3.1	-1.1	+1.2
case3	-0.3	-2.3	-0.3	-5.7	+0.3	-3.0	+0.34	+3.1
case4	-0.5	-4.9	-0.08	-10.3	-0.3	-1.1	0	+0.2

表より、いずれの箇所においても全断面一括掘削のケースで変位が大きく、それに続いて無支保分割掘削、無支保分割弾性掘削、そして有支保掘削と続く。ここで、無支保解析である case1, case2, case4 の比較をすると、当然のことであるが分割弾性解析の case4 が一番小さい。これと分割弾塑性解析を比較すると、トンネル天端のY方向で 0.7cm の差がある。このことを念頭に入れて全断面一括掘削と分割掘削を比較すると、同じ点で 0.8cm の差があり、分割掘削をすることで変位を抑えられる効果があることわかる。さらに、通常の施工に近い支保工の打設を行うことで、ほとんどの箇所 で変位が急激に減少しており、支保による効果が顕著に表れている。

次に、無支保及び有支保分割掘削における全断面掘削後の最大せん断ひずみをそれぞれ図3と図4に示した。本解析では、無支保のケースでトンネル周辺に1.5%以上の最大せん断ひずみが広く分布しており、最大で5.4%のひずみが上半掘削ラインのトンネル隅角部に生じた。これに対して支保を有する分割工法のケースでは、トンネル下部にあたる下半部での領域の大きさは無支保の時とあまり差はないが、上半部では、無支保のケースと比べトンネル右隅部の塑性領域が小さくなっており、最大値も1.1%であった。これより、支保を打設することで地山の変形を抑制できることがわかる。

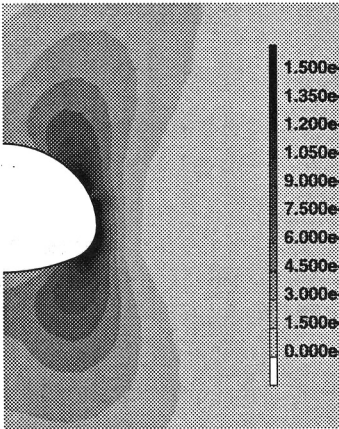


図 3 支保無分割掘削解析の最大せん断ひずみ

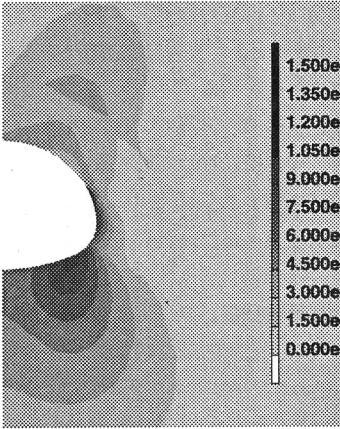


図 4 支保有分割掘削解析の最大せん断ひずみ

4. まとめ

本解析より、分割工法による掘削や支保工の併用によって、変形・ひずみを抑止できることが判明した。これより、地山の特性を予め精度よく把握し、効率のよい分割と適当量の支保工を用いることで、都市部のような地山の悪い地下深部においても、NATM工法による大断面地下空洞トンネルの掘削が可能であると思われる。今後、これらの解析を3次元に拡張し、アンブレラ工法やプレライニング工法なども考慮に入れてより現実のトンネル掘削に近いものにする必要があろう。

参考文献

1) 加茂富士夫 (ほか) “地下空間の活用とその可能性：新しい都市空間-ジオフロント：地下開発の政策・制度・技術・活用のハンドブック”
2) 松井正・嶋村貞夫・松井保・辛嘉請・孝石欣一・藤田健二：“大阪層群砂礫層における偏平大断面中壁式NATMのFEM解析 (第一報)”