

I-47

大断面扁平トンネルの3次元変形解析

北海道大学大学院 工学研究科 ○学生員 中村 恭揚
 北海道大学大学院 工学研究科 正会員 小池 明夫
 北海道大学大学院 工学研究科 フェロー 三上 隆
 北海道開発局 開発土木研究所 正会員 池田 憲二

1. はじめに

近年、交通量の増大等の理由から道路トンネルには掘削外径が20mを越える大断面が要求されている。しかし、経済性を考慮するとある程度扁平な断面形状を採らざるを得ない。このような大断面トンネルは過去に類似例も少なく、従来の経験的判断に基づき最適な断面形状を定めることは容易ではない¹⁾。山岳トンネル等で採用されているNATM工法によるトンネルの設計において、3次元モデルは一般に多くの手数と膨大な計算量を必要とするため2次元的なモデル化による解析が中心となっており、切羽の進行に伴い応力開放率を考慮した掘削相当外力を作用させることで3次元的な効果を表現している。そのため、切羽付近での3次元的な地山変形性状を把握することがきわめて重要である。本研究では3次元有限要素法を用いて円孔・楕円トンネルの掘削変位を数値解析により求め、大断面トンネルの縦横比の変化による影響について考察した。

2. 解析仮定

本研究において、対象となるトンネルは地表から非常に深い位置にある山岳トンネルを想定している。周辺地山は一様応力場とし、解析対象全域において弾性挙動を示すものとする。トンネル断面は直径 $D=16\text{m}$ の円孔トンネル(縦横比 $b/a=1.0$, 断面積 $A \approx 201\text{m}^2$)を基準とし、それと等断面積を有する楕円トンネル($b/a=0.8, 0.6$)の3タイプ(図-1)をモデル化し解析を行った。また、トンネル軸方向での地山剛性の変化が掘削変位の影響について考察するため、切羽後方で剛性を変化させた(図-2)解析を併せて行った。全作用荷重法を用い掘削後のモデル変位と掘削前のモデル変位の差を掘削変位としている²⁾。なお、解析は有限要素法解析汎用プログラムDIANAを用いた。

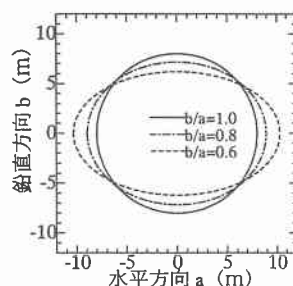


図-1 トンネル断面形状

2.1. 解析モデル

構造系・荷重系の対称性よりモデルは1/4断面をトンネル軸方向に押し出したものとし、解析範囲はトンネル断面の幅 a に対してそれぞれ側壁より水平方向に $3a$ 、全モデルで円孔トンネルの直径 D に対して天端上方に $3D$ とし、トンネル軸方向には切羽前方に $4D$ 、切羽後方に $8D$ (図-2)とした。

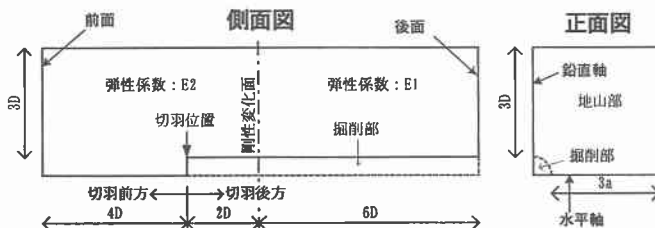


図-2 解析領域

3D Deformation Analysis of Large Section Flat Tunnels

by Yasuaki NAKAMURA, Akio KOIKE, Takashi MIKAMI, and Kenji IKEDA

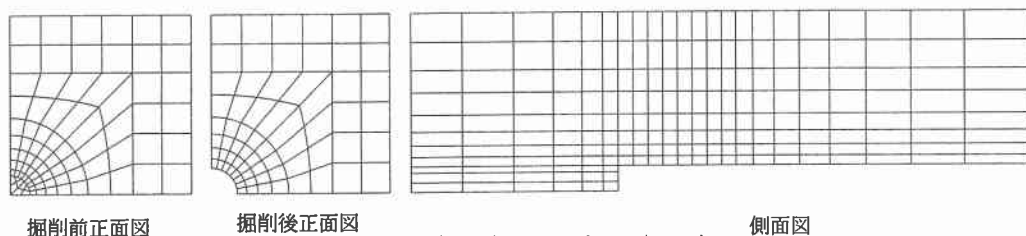


図-3 要素分割図（円孔トンネル $b/a=1.0$ ）

境界条件は、1)鉛直軸線上で水平方向拘束、2)水平軸線上で鉛直方向拘束、3)モデル前面、後面でトンネル軸方向拘束、とした。掘削前の地山には、鉛直方向応力 γh 、水平方向応力 $k\gamma h$ （ γ ：地山の単位体積重量、 h ：地表面よりトンネル中心までの深さ、 k ：側圧係数）が作用しているものとし、地山は六面体20節点アイソパラメトリック要素（積分点 $3 \times 3 \times 3$ ）を用いてモデル化した。この要素は2次曲面を面を持つ六面体要素を作ることができるため円孔、楕円をほぼ正確にモデル化できる。解析モデルの総要素数、総節点数はそれぞれ1848、8845である。図-3に本数値解析に用いた地山の要素分割図を示す。

2.2. 地山諸元と解析ケース

解析に用いた物性値を表-1に示す。また、 $h=100\text{m}$ 、 $k=1.0$ を用いた。掘削前の地山には鉛直・水平方向応力共に -250tf/m^2 が作用することになる。

また、 $b/a=1.0$ 、 0.8 、 0.6 のそれぞれのモデルで

表-2の様に地山剛性を変化させた。Case①、②は一樣な剛性を持った地山内を、③は剛性が低い地山領域から高い領域へ、④は剛性が高い地山領域から低い領域へ切羽が進行することを意味する。

表-1 地山物性値

弾性係数 (tf/m^2)	ポアソン比	単位体積重量 (tf/m^3)
1.5×10^5 または 1.5×10^6	0.3	2.5

表-2 解析ケース

Case	E_1 (tf/m^2)	E_2 (tf/m^2)
①	1.5×10^5	1.5×10^5
②	1.5×10^6	1.5×10^6
③	1.5×10^5	1.5×10^6
④	1.5×10^6	1.5×10^5

3. 解析結果と考察

3.1. 縦横比の変化によるトンネル天端変位の収束領域

全断面においてCase①の $L/D=8.0$ の位置での変位と2次元平面歪み問題（四辺形8節点要素）として解析した変位を表-3に示す。全断面とも $\pm 1.5\%$ 以内の差であり本研究の3次元解析における切羽から十分に離れた位置では、2次元問題と同等の結果を示していると言える。また、切羽から十分離れた位置では切羽の影響はないとも言える。

表-3 2次元と3次元の天端変位の比較

b/a	2次元 (mm)	3次元($L/D=8.0$) (mm)
1.0	-17.59	-17.81
0.8	-21.96	-21.97
0.6	-27.71	-27.68

縦横比を変えた3断面のトンネル天端変位を図-4～図-6に

示す。横軸には切羽からの距離をとり、縦軸に天端の掘削変位をとったものであるが、切羽より前方については切羽が進行すれば天端に相当する位置での変位を示している。また、Case①の変位を基準と考え全ケースの変位に $E^*/(\gamma \cdot h^*)$ を乗じて結果を整理した（ $E^*=1.5 \times 10^5\text{tf/m}^2$ 、 $h^*=100\text{m}$ 、 $\gamma^*=2.5\text{tf/m}^3$ ）。

Case①、②において3断面の2次元問題で得た変位を切羽の影響が全くない変形量（最終変形量）と考え、その95%の値に達した点を切羽後方の切羽の影響による変位の収束点とした。各断面の収束長は、縦横比1.0では1.0D、縦横比0.8では1.4D、縦横比0.6では1.7Dである。偏平になると収束点までの距離が長くなるが、縦横比が0.6のとき円孔トンネルの1.7倍程度とさほど縦横比の影響はない。切羽前方では、-0.5Dの地点において縦横比1.0、0.8、0.6でそれぞれ表-3に示す2次元問題で得た変位の6.6%、6.3%、5.7%の値をとる。-1.0Dの地点ではそれぞれ同様の変位の2.1%、2.1%、1.9%の値をとる。切羽前方では1.0D以内で掘削

の影響はほとんどなくなることが分かる。

Case③において、切羽前方では剛性差による変位の影響はほとんど見られない。切羽後方 0.1D で剛性の低い領域の影響が顕著に表れはじめ、Case②よりも変位が増大していく。剛性変化面 (2.0D の位置) を境に勾配を変えつつ Case①の変位に収束する。剛性変化面からの収束までに要する距離は約 5 ～6D である。また、その収束値は Case①より大きい (全断面で Case①の 1.02 倍)。また、収束領域は断面が扁平なほど長い。

Case④において、切羽前方では Case③と同様、剛性の変化による影響はほとんど見られない。しかし、切羽後方 0.1D あたりから剛性が高い領域の影響が顕著に表れはじめ完全に収束する前に変位量が減少を始める。その後、剛性変化面を境に勾配を変え剛性変化面から約 2～3D の距離で Case②の変位に収束する。その収束値は Case②よりも小さい (全断面において Case②の 0.94 倍)。また、収束領域は断面が扁平なほど長い。

Case③, Case④において、それぞれ Case①, Case②と収束値に違いが表れるのは、剛性の高い領域が低い領域方向に変位するため起こるものと思われる。そのため剛性の高い領域ではトンネル天端変位は小さくなり、剛性の低い領域では変位が大きくなる。

3.2. 縦横比の変化によるトンネル天端変位の影響

図-7 に縦横比によるトンネル天端変位の影響を示す。全ケースにおいて断面がより扁平になるにつれて変形量が大きく

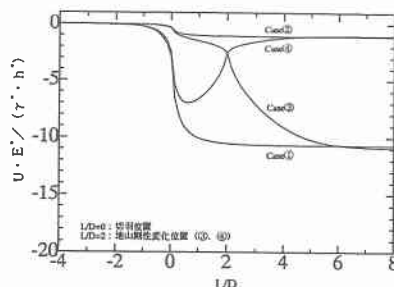


図-4 トンネル天端変位 ($b/a=1.0$)

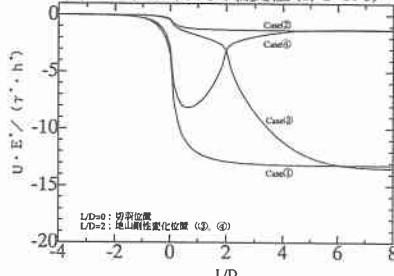


図-5 トンネル天端変位 ($b/a=0.8$)

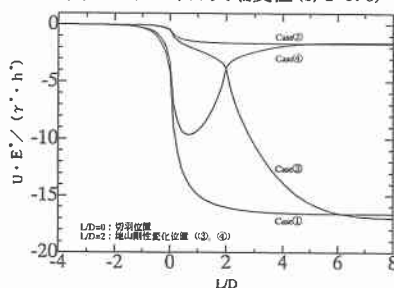


図-6 トンネル天端変位 ($b/a=0.6$)

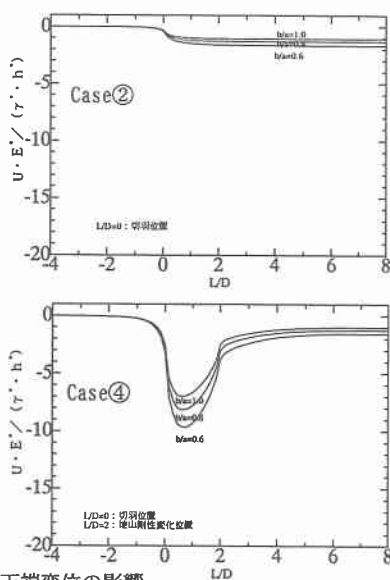
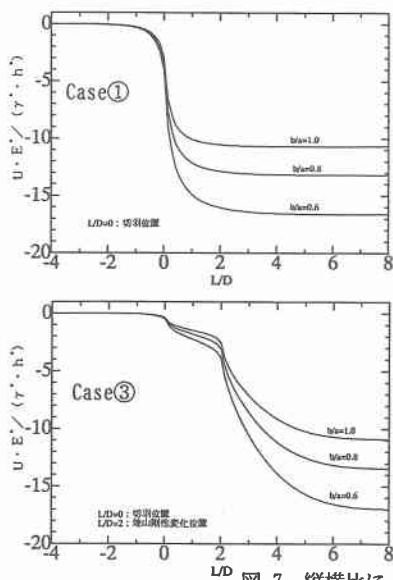


図-7 縦横比によるトンネル天端変位の影響

なる。

表-4 に解析領域内でのトンネル天端変位の解析領域内での最大変位量と切羽での変位量を示す。一様剛性である Case①, Case②では切羽位置で最大変位量の 25%前後変形を終了している。最大変位量に対する切羽位置変形量の比は断面の縦横比の影響は小さいが偏平になるほどその値は小さくなる。

トンネル天端の最大変位量, 切羽位置での変位量について円孔トンネル(縦横比 1.0)を 1 としたときの各断面(縦横比 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 の 5 断面)の変位の比をそれぞれ図-8, 図-9 に示す。Case①, ②, ③で最大変位量は縦横比 0.6 でも円孔トンネルの 1.6 倍弱であり, 縦横比の影響は少ない。Case④では切羽後方の剛性の高い領域の影響を受け他ケースと比較して小さく 1.4 倍弱であった。切羽位置での変位では Case③で最も縦横比の影響があるが, それでも 1.5 倍程度である。縦横比は切羽部よりも切羽後方の変位に影響を与える。縦横比と最大変位量, 切羽位置での変位量の関係は縦横比 0.6~1.0 の範囲では直線的な傾向を示すことが分かる。ただし, 縦横比が小さく断面が偏平になるほど変位比の増大が若干著しくなる。

4. まとめ

本研究では 3 次元有限要素法を用いて円孔・楕円トンネルの掘削変位を数値解析により求め, 大断面トンネルの縦横比の変化による影響について考察を行った。以下に結果を示す。

- (1) 一様剛性の地山での切羽によるトンネル天端変位は切羽前方で 1.0D 以内で収束し断面形状の影響は少ない。切羽後方では偏平になるにつれ収束領域は長くなるが, 縦横比が 0.6 断面においても円孔トンネル (1.0D) の 1.7 倍 (1.7D) 程度である。
- (2) トンネル天端の最大変位は断面が縦横比 0.6 において円孔トンネルの 1.6 倍弱である。また, 断面の縦横比は切羽部よりも切羽後方の変位に影響を与える。
- (3) 地山剛性の変化によるトンネル天端変位の影響は切羽前方ではほとんど見られない。切羽後方 0.1D から影響が顕著に表れ始め, 剛性変化面で勾配を変えつつ変位が収束していく。収束領域は剛性変化面後方の剛性が前方より高い場合, 剛性変化面から 2~3D であり, 前方より低い場合で 5~6D である。収束領域は断面が偏平なほど若干長くなる。
- (4) 縦横比と最大変位量, 切羽位置での変位量の関係は縦横比 0.6~1.0 の範囲では直線的な傾向を示す。

表-4 最大変位量と切羽位置での変位

Case①			
b/a	U_{max} (mm)	U_{cut} (mm)	U_{cut}/U_{max} (%)
1.0	17.832	4.838	27.13
0.8	21.977	5.737	26.11
0.6	27.684	6.815	24.62

Case②			
b/a	U_{max} (mm)	U_{cut} (mm)	U_{cut}/U_{max} (%)
1.0	1.783	0.484	27.13
0.8	2.198	0.574	26.11
0.6	2.768	0.681	24.62

Case③			
b/a	U_{max} (mm)	U_{cut} (mm)	U_{cut}/U_{max} (%)
1.0	18.180	0.543	2.99
0.8	22.411	0.662	2.96
0.6	28.276	0.808	2.86

Case④			
b/a	U_{max} (mm)	U_{cut} (mm)	U_{cut}/U_{max} (%)
1.0	11.641	4.092	35.16
0.8	13.576	4.699	34.62
0.6	16.096	5.402	33.56

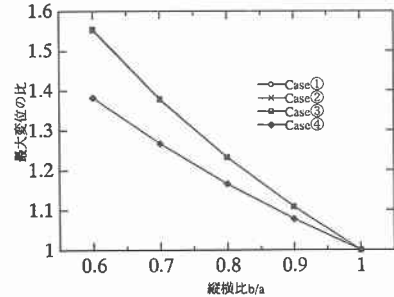


図-8 最大変位の比

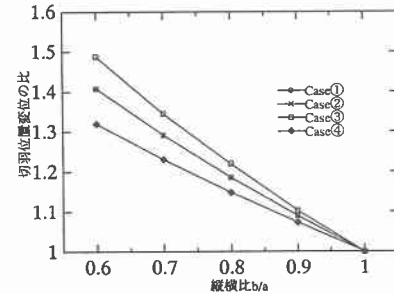


図-9 切羽位置変位の比

参考文献

- 1) (社)日本トンネル技術協会：大断面トンネルの設計・施工法に関する調査研究(その3)報告書<山地部編>, pp5~20, 1997.3
- 2) 桜井春輔：都市トンネルの実例, pp137, 1998.3