

シールドトンネル施工時の壁面変位に関する研究

A STUDY ON DISPLACEMENT OF TUNNEL WALLS CHANGING
BY EXCAVATION OF SHIELD TUNNELS

立石 彰*・西岡 隆**

By Akira TATEISHI, Takashi NISHIOKA

The characteristic curve method is often used in analyzing a portion around cutting face by plane strain condition. Generally speaking, the axisymmetric analysis of tunnel is used as preliminary analysis of the characteristic curve method. Axisymmetric analysis, however, is not always suitable for shallow tunnels, because it assumes that the action of the load on tunnels is axisymmetric. Now, in this paper, the authors analyzed the difference of displacement curves of tunnel walls between unlined and lined tunnels with non-axisymmetric analysis, comparing them with the case of axisymmetric analysis.

Keywords : displacement curves of tunnel walls, cutting face, non-axisymmetric analysis, shield tunnels

1. まえがき

トンネル切羽周辺部の解析を行うことは、トンネルを設計、施工するうえで大きな意味を持つ。通常、トンネルの解析は、2次元平面ひずみ状態での有限要素法を用いるが、切羽周辺部の応力場は3次元状態であるので、単純に2次元解析をしていくことには大きな問題がある。切羽部分を忠実に解析していくためには3次元応力解析が必要となるが、入力するデータの量や計算時間等を考えると、この方法にもやはり問題がある。これらの問題を解決するために、切羽の3次元的な効果を考慮した2次元解析手法がいくつか提案され^{1) 2)}、そのうち、代表的な例の一つに特性曲線法³⁾がある。

この手法は、トンネル掘削面に発生する解放応力を切羽進行に合わせて徐々に解放していくもので、この時、切羽位置とトンネル掘削面の変位関係(特性曲線)を得るための予備解析として、通常、トンネル軸を中心軸とした場合の軸対称解析が行われる。しかし、軸対称解析はトンネルに作用する荷重を対称として扱うため、荷重の偏差的な成分を考慮することができない。とくに、都市内トンネルのように土被りの浅いトンネルの場合は、トンネルに作用する重力の影響を考慮する必要があるため、軸対称解析を用いることには問題があるように思われる。

そこで本研究では、重力の影響を考慮するために非軸対称有限要素法をシールドトンネルに適用し、軸対称解析から得られる結果と比較しながら、トンネル壁面変位についての傾向の分析を行った。

* 学生会員 筑波大学大学院 理工学研究科 理工学専攻 (〒305 つくば市天王台 1-1-1)

** 正会員 工博 筑波大学構造工学系教授 (〒305 つくば市天王台 1-1-1)

2. 解析方法

(1) 解析の概要

非軸対称有限要素解析から得られる結果をもとに、トンネル壁面変位の算出を行い、セグメントや物性パラメータが壁面変位に与える影響について検討を行う。また、軸対称有限要素解析を適用した場合についても同様の検討を行い、それらの結果の傾向について比較を行う。

(2) 非軸対称 FEM のトンネル問題への適用

トンネル断面が円形で地盤が均質であるとすれば、トンネルの切羽領域は、トンネル軸を対称軸とする軸対称構造物とみなすことができる。非軸対称解析では、任意の軸断面で独立したつり合い式を得るために、構造物の周方向に変位および外力の級数展開を行う。トンネル掘削予定面上における初期応力のフーリエ級数展開は、次式で与えられる。すなわち、

トンネル壁面で解放される応力は

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_2 \sin^2 \theta \dots\dots\dots (1) \\ &= -\frac{(1+k)\gamma H}{2} + \frac{(3+k)\gamma R}{4} \cos \theta - \frac{(1-k)\gamma H}{2} \cos 2\theta + \frac{(1-k)\gamma R}{4} \cos 3\theta\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tau_{\theta r} &= (\sigma_2 - \sigma_1) \sin \theta \cos \theta \\ &= -\frac{(1-k)\gamma R}{4} \sin \theta + \frac{(1-k)\gamma H}{2} \sin 2\theta - \frac{(1-k)\gamma R}{4} \sin 3\theta \dots\dots\dots (2)\end{aligned}$$

トンネル切羽面で解放される応力は

$$\sigma_z = \sigma_2 = -k\gamma H + k\gamma r \cos \theta \dots\dots\dots (3)$$

ここに

k : 側方土圧係数

r : トンネル中心軸からの距離

θ : 鉛直上向き方向よりの角度

γ : 地山の単位体積重量

R : トンネル半径

H : トンネル中心軸より地表面までの距離

これにより、掘削相当外力の調和成分は $n = 0 \sim 3$ の 4 項で整理され、任意の軸断面におけるトンネルの非軸対称解析は、4 つの 2 次元解析の重ね合わせとして評価することができる⁴⁾。

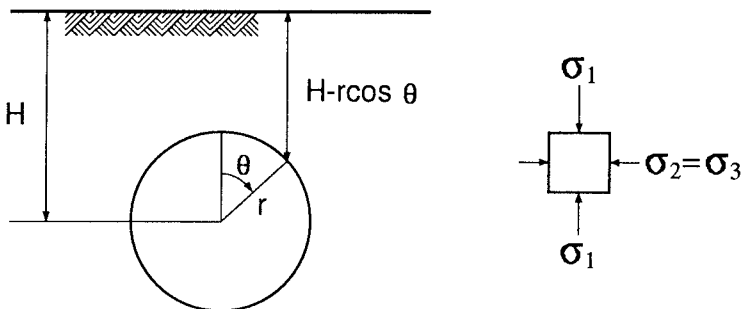


図-1 トンネル断面図

なお、軸対称解析では θ 方向の成分を考慮することができないので、式 (2) において $k=1$ もしくは $\theta=0$ とす

る条件が必要となる。今回行った軸対称解析では、通常行われている解析法に従い、 $k=1$ の地盤で、トンネル中心位置での応力状態をもとに掘削相当外力を算出している。

(3) 解析モデル

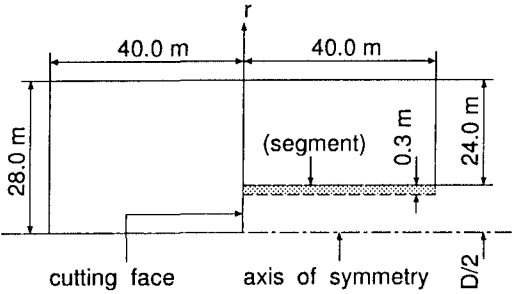


図-2 解析モデル

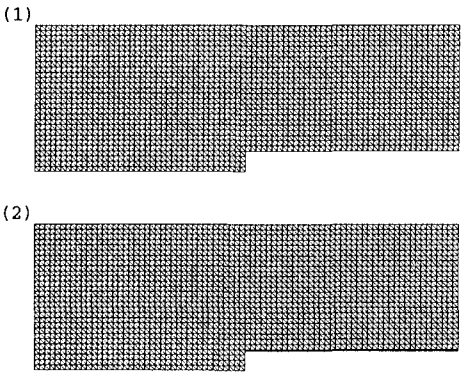


図-3 要素分割図 (1) 素掘り状態のトンネル (2) シールドトンネル

図-2は解析モデルの概略図で、図-3は要素分割図を示している。これらはトンネル軸を含む断面の半分の領域を見た図にあたる。素掘り状態のトンネルの直径は $D = 8.0(m)$ で、シールドトンネルの場合はその内側に $0.3(m)$ のセグメントを組み立てている。トンネル軸方向の解析領域は、切羽に対して前後 $5D$ をとり、半径方向の解析領域は $28.0(m)$ とした。節点数は素掘り状態のトンネルで 2189 節点、シールドトンネルで 2270 節点。支持条件は解析領域外周および切羽前方の端面で固定、切羽後方の端面でトンネル軸方向にのみ固定としている。なお、セグメントで補強されたシールドトンネルの解析では、計算の簡略化のため、セグメントは施工ステップによらずあらかじめ組み立てているものとしている。

(4) 物性値および各種パラメータ

表 1 に地盤およびセグメントの物性値を、また、表 2 にその他の解析パラメータを示す。表内で範囲の示されている値については、その値を変化させながら全ての組み合わせについて解析を行っている。ただし、軸対称解析では、側方土圧係数とトンネル軸より鉛直上向きから測る解析断面の角度を考慮することができないので、それらの値については非軸対称解析でのみ指定を行っている。

表 1

物性値	地盤	セグメント
単位体積重量 (tf/m^3)	1.8	2.0
ヤング率 (kgf/cm^2)	5×10^2	2.4×10^5
ポアソン比	0.35~0.45	0.18

表 2

その他の解析パラメータ	
土被り ($\times D$)	3.0~5.0
側方土圧係数	0.4~1.0
解析断面の角度	$0.0^\circ \sim 180.0^\circ$

(5) 壁面変位曲線の算出

解析結果として示す壁面変位曲線は、切羽位置と壁面変位の関係をもつて与えるものとする。ただし、切羽前方部の変位については、トンネル壁面延長線上の掘削予定面での値を用いている。また、壁面変位の符号は半径外側方向の変位を正として表示している。

3. 解析結果と考察

(1) 素掘り状態のトンネルの壁面変位曲線

図-4および図-5は、軸対称および非軸対称解析から得られた素掘り状態のトンネルの壁面変位曲線で、ポアソン比 0.4、土被り 3D、側方土圧係数 1.0 の地盤における解析結果を示している。非軸対称解析では、解析を行う軸断面の角度を任意に指定することが可能で、図には、軸断面の角度を天端からインバートにかけて 45.0° 刻みで変化させた場合の結果を重ねて示してある。その結果からわかるように、壁面変位は解析を行う軸断面の角度によって収束値が異なり、解析断面の角度が 180.0° 、すなわち、インバートに近づくほど大きな値をとる。これは、トンネル掘削前の初期地盤に、重力の影響を考慮した応力分布を想定しているためで、それに伴う壁面変位が結果に表れている。一方、軸対称解析によって得られた壁面変位曲線は、非軸対称解析の 90.0° 断面で側方土圧係数が 1.0 の場合におけるものと同一である。これは、軸対称解析では、その解析の性質上、側方土圧係数を 1.0 以外考慮できず、また、掘削相当外力をトンネル中心位置での深さをもとに算出しているためである。このように、軸対称解析から得られる結果は、非軸対称解析における 90.0° 断面で側方土圧係数が 1.0 の場合の結果として与えられる。

なお、ここで示されているケース以外の地盤についても、物性値を変えて解析を行っているが、今回行った解析ケースの範囲内では、ポアソン比もしくは土被りを大きくすることにより、壁面変位は増加する傾向のあることが確認された。しかし、いずれのケースについても曲線形状の傾向はほぼ等しく、トンネル壁面は常に半径内側方向に変位し、切羽後方 2D 付近で収束し、また、切羽到達までに約 30% の先行変位が生じている。

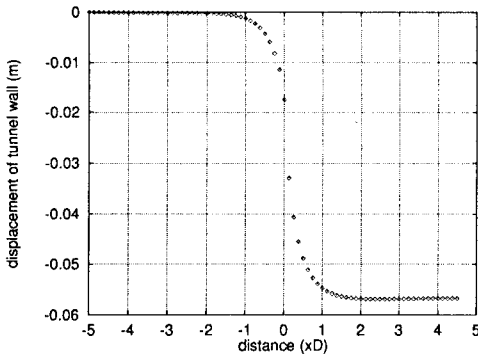


図-4 軸対称解析による素掘り状態のトンネルの壁面変位曲線

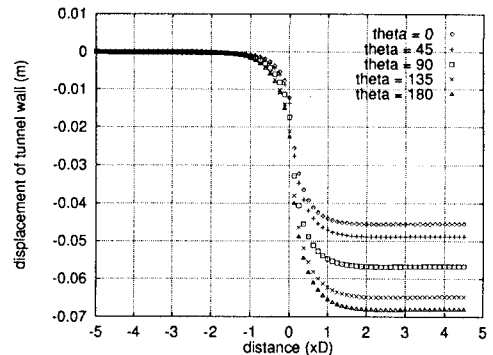


図-5 非軸対称解析による素掘り状態のトンネルの壁面変位曲線

(2) シールドトンネルの壁面変位曲線

図-6および図-7から図-11は、軸対称および非軸対称解析から得られたシールドトンネルの壁面変位曲線で、ポアソン比 0.4、土被り 3D の地盤における解析結果を示している。素掘り状態のトンネルの場合と同様、軸対称解析によって得られる壁面変位曲線は、非軸対称解析の 90.0° 断面で側方土圧係数が 1.0 の場合における結果と同一のものとなる。

非軸対称解析によって得られるシールドトンネルの壁面変位曲線は、解析を行う断面の角度と側方土圧係数が曲線形状に大きな影響を与える。それらの値のとり方によっては壁面変位が正、すなわち、トンネル壁面が半径外側方向に変位する場合も起こりうる。壁面変位が正となる条件は次の通りである。解析断面の角度が $0.0^\circ \sim 90.0^\circ$ 、つまり天端から側壁にかけてのアーチ部分で、さらに、天端については側方土圧係数が 1.0 以上の場合、側壁については 0.7 以下の場合である。このことは、側方土圧係数が大きい場合はトンネルが鉛直方向に変形し、側方土圧係数が小さい場合は水平方向に変形することを示している。

切羽前方部分では、いずれのケースについても壁面変位が正になることはなく、その変化はおおよそ 3D 付

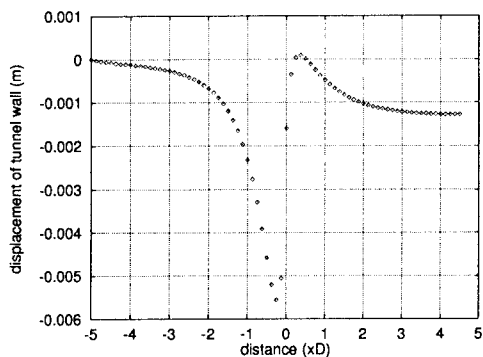


図-6 軸対称解析によるシールドトンネルの壁面変位曲線

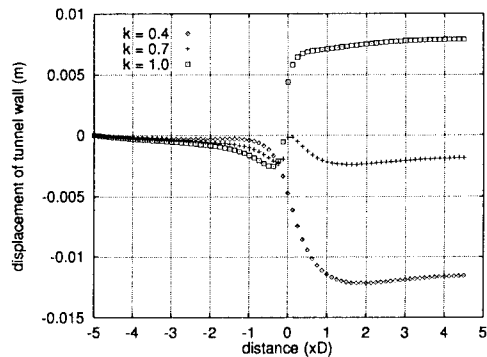


図-7 非軸対称解析によるシールドトンネルの壁面変位曲線 ($\theta = 0.0^\circ$ 断面)

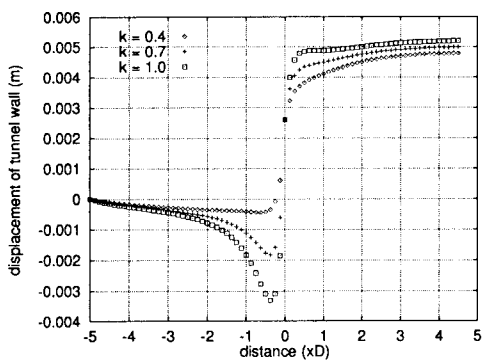


図-8 非軸対称解析によるシールドトンネルの壁面変位曲線 ($\theta = 45.0^\circ$ 断面)

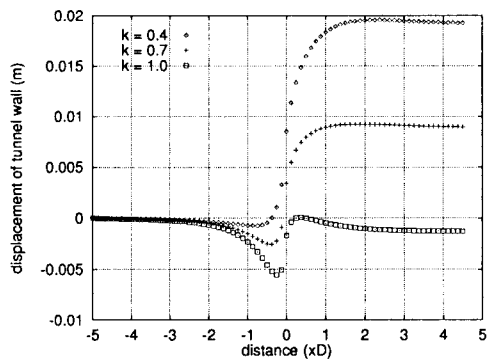


図-9 非軸対称解析によるシールドトンネルの壁面変位曲線 ($\theta = 90.0^\circ$ 断面)

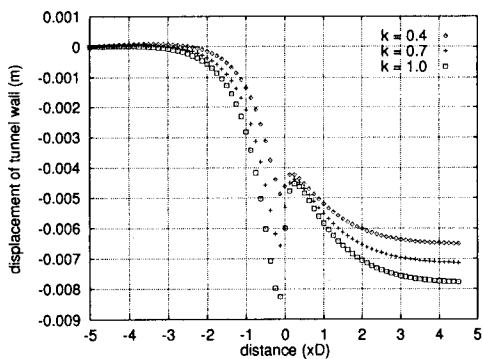


図-10 非軸対称解析によるシールドトンネルの壁面変位曲線 ($\theta = 135.0^\circ$ 断面)

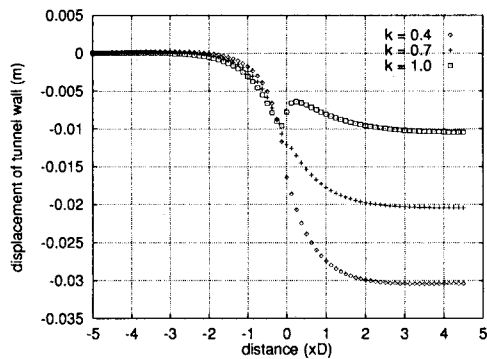


図-11 非軸対称解析によるシールドトンネルの壁面変位曲線 ($\theta = 180.0^\circ$ 断面)

近から表れ、 $-0.5D$ 付近でピークに達する。これは、 $-3D$ から切羽にかけての領域で、土がトンネル軸方向に移動し、さらに切羽を押し出していることを示している。また、切羽前方部で壁面変位が比較的大きな値となるのは、切羽後方のセグメントによる支保効果が表れ、トンネル壁面変位の収束値が相対的に小さくなったためである。

(3) 考察

素掘り状態のトンネルの壁面変位曲線は、解析パラメータによる曲線形状の変化にほとんど差がないのに対し、セグメントで補強されたシールドトンネルの壁面変位曲線は、パラメータの組み合わせによって大きく異なった形状となる。これは、素掘り状態のトンネルでは壁面変位が常に半径内側方向となるのに対し、シールドトンネルではセグメントの持つ剛性のため、局所的に半径外側方向に変位する場合もあるからである。このことは、シールドトンネルの解析をする場合、重力の影響による荷重分布を無視することのできないことを意味している。とくに、土被りの浅いシールドトンネルでは予想される結果である。また、そのようなトンネルの解析では、これらの要素を考慮することのできる非軸対称解析が有効な方法となるものと思われる。

軸対称解析は、通常、特性曲線法を用いて平面ひずみ場でトンネル解析を行う場合の予備解析として利用される。しかし、軸対称解析は、側方土圧係数が 1.0 で、かつ、応力分布が一様と見なせる地盤でのみ有効な方法であり、通常想定される地盤では非軸対称解析を用いるべきである。

4. 結論

非軸対称解析をトンネル問題に適用し、切羽位置とトンネル壁面の変位関係を示す壁面変位曲線の解析を行った。解析結果から得られた結論は次の通りである。

1. トンネルを側方から解析すれば、非軸対称解析は軸対称解析と比べ、土被りの浅いトンネルではとくに有効な方法となる。
2. 壁面変位曲線の形状は、素掘り状態のトンネルとシールドトンネルで大きく異なり、さらに、シールドトンネルでは側方土圧係数と解析断面の角度によって曲線形状が変化する。

参考文献

- 1) 土屋 敬：NATM 設計プログラムの開発，土木学会論文報告集，第 346 号，pp.117～123，1984.6.
- 2) 大西 有三・岸本 英明：トンネル切羽進行の影響を近似的に考慮した 2 次元有限要素解析，トンネルと地下，pp.7～12，第 11 巻 12 号，1980.12.
- 3) 地盤工学における数値解析の実務編集委員会：地盤工学における数値解析の実務，土質工学会，pp.250～252，1987
- 4) 小松 賢一・福井 卓雄：浅い円形断面トンネル切羽周辺の応力・変形解析，土木学会第 36 回年次学術講演概要集第三部，pp.482～483，1981.10.