

日本鉄道建設公団 東京支社 正会員 鈴木 恒男
日本鉄道建設公団 東京支社 正会員 大迫 哲

1. ま え が き

都市部において、単線併列シールドから複線シールドへの移行区間で、断面が変化する鉄道トンネルが計画される場合、その施工にあたっては、開削工法が採用されるのが一般的である。しかし、高度に市街化された地域では深い開削を行なうことにより、地下埋蔵物や道路交通への障害は避けられないことから、NATMによるトンネルの施工の可能性について検討してみることとした。本報告ではNATMを採用するにあたって、有限要素法解析により、地表面の沈下、トンネルの安定性、施工上の問題に対し、有利となる断面形状の検討を行なった結果について報告するものである。

2. 地 形、地 質

トンネル計画位置は幅員22mの道路直下(土波り22m)であり、道路に面して木造家屋、7、8階建程のビルが随所に建築されている商業地域である。地表は標高3mで、TP-1付近までは粘性土、砂質土から成る軟弱な沖積層が分布し、その下部は粘性土、砂礫、砂質土から成る洪積層により構成されている。地下水は不透水層の洪積粘性土を境にして上部と下部に分けられ、上部の沖積層中の地下水はTP-1付近にあって自由水面と考えられるのに対し、下部の洪積層中の地下水はTP-10の間隙水圧分布となっている。

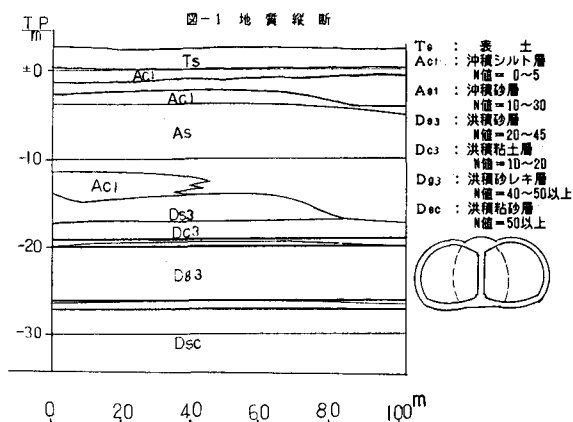


表-1 入力物性値

物性値	地層	As1	Dc3	Ds3	Ds3	Dec
単位体積重量(t/m³)		1.9	1.6	1.6	2.0	2.0
初期変形係数(kg/cm²)		300	200	500	1200	1700
破壊時変形係数(kg/cm²)		30	20	50	120	170
初期ポアソン比		0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
破壊時ポアソン比		0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
粘着力(kg/cm²)		0.2	2.0	0.2	0.2	0.2
内部摩擦角(度)		30	0	30	40	40

3. 有限要素法解析によるトンネル断面の検討

断面の検討にあたっては過去の土砂地山における施工例を参考にし、地表面の沈下、トンネルの安定などに対し有利となるよう、サイロットNATM、および、断面の中央に支柱を設ける一柱式NATMの断面を仮定し有限要素法解析を行なった。解析に用いた地山物性値は、ボーリングデータ等を参考にして表-1に示すとおりとした。仮定した断面の良否の判断は、周辺構造物に与える影響を考慮し、表-2に示した日本建築学会の建築基礎構造設計基準で定めるコンクリートブロック造の建物に対する許容沈下を適用した。

表-3にサイロットNATMの解析結果を示す。CASE-1では上半アーチ掘削時における地表沈下が最終沈下量の60%にも達するたので、サイロット上半の内壁の曲率を増すことによりアーチ部入パンの短縮を図るとともに、地山変位による不透水層(Dc3)への影響を極力避けるために施工基面を2m下げた(CASE-2)。その結果、内壁撤去前までのトンネル直上の地表沈下は3.1cm(CASE-1の40%)となり、アーチスパン短縮による効果はみられたが、内壁撤去時に3.2cmの沈下の増加があり最終的には15%の減少にとどまった。また、断面が扁平であることを反映して、トンネル壁

表-2 許容沈下量

相対沈下 対量	標準値(%)	1.0
	最大値(%)	2.0
最大沈下 対量	標準値(%)	2
	最大値(%)	4
限界変形 角	$\bar{\theta}$ (10^{-3} rad)	$\bar{\theta} = 1.0$ { $\theta = 1.0$ }
傾	斜	$\frac{1}{1,000}$

標準値：不同沈下によるき裂が発生し、ほとんど発生しない限度。
最大値：幾分か不同沈下によるき裂が発生するが被害には到らない限度。
限界変形角θ：ほとんどき裂の出る変形角。

面における水平変位より鉛直変位が大きく卓越しているため、上半アーチ半径を小さくすることにより、スパンライズ比を2.6から2.3に減じた(CASE-3)。しかし、変位、傾斜の改善はわずかで、許容値を上回る結果となった。

表-3 サイロットNATM解析結果

	CASE-1	CASE-2	CASE-3
解析断面			
解析条件	側坑同時進行 施工ピッチ 1.0m	同 左	同 左
最大地表沈下	1.5cm → 5.1cm → 7.7cm → 7.4cm	0.8cm → 3.0cm → 3.1cm → 6.3cm	0.8cm → 3.3cm → 3.5cm → 5.4cm
道路境界沈下	0.9 → 4.2 → 6.3 → 6.2	0.8 → 2.6 → 2.6 → 5.3	0.8 → 2.8 → 2.9 → 4.6
天端沈下	1.5 → 10.2 → 15.9 → 14.6	1.1 → 9.5 → 11.8 → 15.2	1.7 → 10.4 → 12.8 → 14.6
建物下傾斜	3.1/1000	2.4/1000	2.0/1000
改良点	—	アーチ部スパンの短縮 施工基面を2cm下げる	スパンライズ比の減少
良 否	否	否	否

備考) ○中の数字は施工順序。
沈下量は、側坑掘削時—上半アーチ掘削時—内壁撤去前—最終状態 の順。

表-4に一柱式NATMの解析結果を示す。CASE-1は中間支柱の剛性を考慮せず、中央導坑、左右の導坑の一次掘削が完了するまでとして解析を行なった。その結果、変位、傾斜が許容値を上回ったため、中央導坑掘削後に中間支柱を設けることが沈下抑制には有効であると考え、中間支柱の剛性を導入することとした(CASE-2)。CASE-2は15%の地表沈下の減少がみられたが、右導坑掘削時、支柱に大きな曲げモーメントが作用するため、その対策として左右導坑の掘削を対称化するとともに、沈下の抑制には中央導坑掘削時の沈下をできる限り小さく抑えることが肝要であると考え、中央導坑の断面を小さくしCASE-3の解析を行なった結果、変位、傾斜は許容値内に収まった。サイロットNATMと一柱式NATMの施工段階ごとの沈下傾向を比較すると、前者は導坑掘削完了時の沈下が最終

来下の15%程度であるが、上半アーチ掘削時、および、内壁撤去時の沈下の増大率が大いなのに対し、後者は沈下が小刻みに増え、施工の対応はし易いと考えられ、一柱式NATMの適用は可能であると判断した。

表-4 一柱式NATM解析結果

	CASE-1	CASE-2	CASE-3
解析断面			
解析条件	支柱の剛性を考慮せず 側坑片側先進 施工ピッチ 1.0m	側坑片側先進 施工ピッチ 1.0m	側坑同時進行 施工ピッチ 0.8m
最大地表沈下	1.7cm → 3.6cm → 5.5cm	1.5cm → 3.0cm → 3.6cm → 4.7cm	0.5cm → 2.1cm → 2.1cm → 2.6cm
道路境界沈下	1.2 → 3.6 → 4.2	1.1 → 2.9 → 2.9 → 3.9	0.4 → 1.6 → 1.6 → 2.0
側坑天端沈下	2.1 → 13.3 → 13.0	2.0 → 11.3 → 10.3 → 13.2	0.8 → 6.6 → 6.6 → 7.4
建物下傾斜	2.1/1000	2.0/1000	1.0/1000
改良点	—	支柱の剛性導入	中央導坑断面の減少 掘削の対称化
良 否	否	否	良

備考) ○中の数字は施工順序。
沈下量は、中央導坑掘削時—右導坑掘削時—左導坑掘削時—最終状態 の順。

4. おわりに

大断面のサイロットNATMと一柱式NATMの有限要素法解析を行なった結果、一柱式NATMの方が地表沈下、傾斜が小さく、施工上の対応もし易いことが明らかになった。さらに、一柱式NATMでは、早期に剛性の高い支柱を設けること、部分的な断面の縮小、掘すく傾斜を工夫することが沈下抑制に効果的であることが認められた。トンネルの断面位置は比較的地下水位が高い場所であるので、地下水対策、切羽の安定などの問題も考えられており、今後検討していきたいと考えている。