

(17) NATMによる近接トンネルの設計例

東京都立大学 工学部	正会員	今田 徹
東京都南多摩新都市開発本部	正会員	小林 正邦
応用地質株式会社	正会員	○水野登志実
応用地質株式会社	正会員	近藤 達敏

The Design of Twin Tunnel by NATM under the Soft Ground

Tohru	KONDA,	Tokyo Metropolitan University
Masakuni	KOBAYASHI,	The Tokyo Metropolitan Government
Toshimi	MIZUNO,	OYO Corporation
Tatsutoshi	KONDOH,	OYO Corporation

Abstract

The tunnel construction schemed in the urban area will sometime get an severe condition for the existing buildings and many structures surrounding the tunnel.

Considering the rising amounts of underground excavation in the urbanized area, to excavate a new tunnel adjacent to another tunnel which was already constructed may cause any serious damages in the existed tunnel linings, so that it is very important for the preliminary designing work to evaluate the stabilities of the existed tunnel structures as well as them of the surrounding ground.

In this article, as an example, the designing procedure of Minami-oosawa tunnel which has two tunnels located very closely in 30m, is mentioned first, then, the calculated mechanical stabilities of the tunnel structures and surrounding ground, especially mechanical stability of ground distributed between the two tunnels and the feasibility in the economical view point is described.

1. はじめに

山岳工法の標準工法として急速にNATMが普及し、その工法の合理性から都市トンネルにも広く応用されるようになっていく。都市部におけるトンネルの設計・施工は厳しい制約条件を受けることが多く、その一つとして近接トンネルの問題が挙げられる。地下空間利用の増大により、新設、増設の双設トンネルが多く計画され、トンネルの近接度をどの様に評価するかが設計上の大きな問題点となっている。

本論文では、30mの間に4車線トンネルを配置する南大沢トンネル（仮称）において近接トンネルの近接度に対する力学的検討を行い、これまでに多く設計・施工されたメガネトンネルを含めて、双設トンネルの構造の合理性、経済性について考察する。

2. 近接トンネルの設計

2.1 設計条件

今回の検討対象となったトンネルは、多摩丘陵の一角に位置する。地質はトンネル上半部に風化の進んだ礫層が分布し、下半部には上総層群と呼ばれる固結シルトが分布する。

建設を計画した路線は、計画線上に遺跡が分布すること、および公園緑地計画のため周辺の景観を考慮してトンネルが採用された。トンネルは都市計画上の制約から僅か30mの範囲以内に4車線（監査廊、歩道付き、延長398m）を設計する必要がある。

2. 2 基本検討

(1) 断面形状の選定

トンネル部の地質状況、施工技術および経済性等から上下線を分離したNATMによる双設あるいはメガネトンネルが妥当と判断し、詳細な検討を行うものとした。過去の施工例等から判断し、検討断面の対象を表-1に示す3断面とした。

第1案はトンネルの離隔を可能な限り狭めた双設トンネルである。離隔については後に検討するが、国内での道路における実績は坂下トンネル¹⁾等があり、ピラー（両トンネル間に残る地山）の幅3.5mまで近接させた例がある。地下鉄においては、国内外で駅部のアプローチにこのケースが見られる。

第2案は「ボックム駅部施工法(B.B.B.)」²⁾と呼ばれ、先行トンネル内に両トンネルの支柱を構築するもので、同種の施工を鷺羽山道路トンネルで行っている。

第3案はミュンヘン地下鉄駅部³⁾で使用された工法である。トンネル中心の支柱を構築するため導坑を先進させ、トンネル部を拡幅する施工法である。国内では小名浜港トンネル⁴⁾が類似した形で施工されている。

後述する解析検討のため、各断面とも吹付けコンクリート厚15cm、覆工厚55cmとし、第2案、第3案における支柱の厚さは過去の施工例を参考に140cmとした。

(2) 双設トンネルの近接度について

双設トンネルの離隔については、明確な規定はない。山岳トンネル標準示方書においては、「近接トンネルの設計にあたっては、地山条件や施工方法を十分考慮して接合部や近接部の構造を検討しなければならない」としている。

双設トンネルにおける相互の影響については多くの研究がなされている。山本ら⁵⁾は地山材料として散弾（ $\phi 1\text{m}/\text{m}$ ）、覆工材料として光弾性材料を使用して光弾性実験により並列複線トンネルの相互干渉について考察している。その結果、良質な砂質地山において施工される並列複線シールドトンネルは、その中心間隔が外径の1.5倍以上離れていれば、単設の場合と同じ土圧ならびに応力状態と考えてよいとしている。

トンネルの離隔に応じた応力状態については川本⁶⁾が理論解を求めており、図-1に示すようにy方向の一軸引張応力は、トンネルが相互に十分離れている場合に比べ、ピラー側壁面の最大値で10%増、トンネル

表-1 検討断面一覧表

名称	断面形状略図	掘削 m ²	吹付け コンクリート m ²	覆工 m ²
第1案 双設式		① 100.8 ② 100.6 計 201.2	16.0	36.0
第2案 中壁式		① 110.3 ② 92.4 計 202.7	16.6	41.8
第3案 1柱式		① 33.7 ② 86.8 ③ 86.8 計 207.3	16.0	42.1

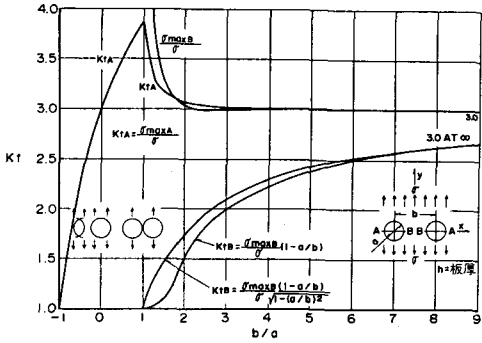


図-1 等大2円孔を有する無限板の応力集中係数（y方向の一軸応力）⁶⁾

外側の壁面で 5% 増となる。また、オバートとデュバル⁷⁾ による結果では、図-2 に示すようにピラーの幅を 0.5D とした場合のピラーの平均主応力は応力場の値 (P_z) の 3.0 倍となり、壁面の最大応力はピラーの平均主応力の 1.27 倍 (P_z の 3.81 倍) となっている。この結果は複数の円トンネルが近接した場合であり、一定の範囲内にピラーの幅が狭くなるに従って円の占める面積が増加していることから、単純な双設トンネルの壁面最大応力に比べ最大応力が大きくなっているものと考えられる。いずれにせよ、0.5D の幅でピラー部の平均応力は初期応力の 3 倍程度となり、壁面近傍の最大応力は単独トンネルの 10 ~ 27% 程度の増加となる。

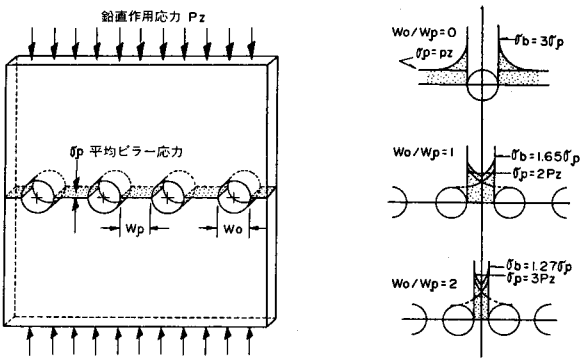


図-2 円形トンネル間のリブ・ピラーにおける応力⁷⁾

初期応力に対する地山強度が十分にある場合はトンネルの離隔を 0.5D 程度としても相互に影響が少ないと考えられる。本トンネルにおいては土被り最大 28m、初期応力 5.6kg/cm² であり、これに対応する応力の再配分による荷重増加が地山の強度およびトンネルの支保構造に対して十分対応できるかどうかについて、トンネルのピラー幅を 0.5D として他工法との比較検討を行った。

2. 2 解析検討

(1) 解析方法

3 種類の断面形状による周辺地山の安定性および支保部材の安全性を比較検討するために、有限要素法を用いた弾性解析を行った。

解析断面は最大土被りの位置とし、掘削半径の 10 倍程度を解析領域とした。地層の状況に合わせ、地層を 3 層に区分して解析を行った。

解析ステップはそれぞれの断面の現実的な施工に従って定めた。第 1 案および第 2 案では先行するトンネルの覆工 (あるいは支柱) 終了後に後行のトンネル掘削を行なう。第 3 案では中央導坑を掘削し支柱を構築後、右のトンネルを掘削し、覆工完了後、左トンネルの掘削を行なう。支保部材は吹付けおよび覆工コンクリートとし、ロックボルトについては考慮していない。

各々のステップにおいて、切羽進行の影響を考慮し、各切羽掘削時 (無支保状態) の解放率を 30% とし、吹付コンクリート施工後に残りの 70% を解放する。採用した物性値を表-2 に示す。

表-2 解析物性値一覧表

項 目	変形係数	ポアソン比	単位体積重量
地 層	kgf/cm ²		g/cm ³
ローム層	100	0.40	1.5
御殿峠層	400	0.40	1.8
上総層群	1,000	0.40	1.9
吹付コンクリート	35,000	0.25	2.5
二次覆工	150,000	0.16	2.5

(2) 解析結果

各案の最大せん断ひずみ分布を図-3 ~ 5 に示す。本検討におけるトンネルの安定性に関する評価は破壊に関する近似解としてひずみにより比較検討した。本地山における破壊ひずみを 1% 程度とした場合、比較的安定なのは第 1 案および第 3 案である。第 2 案については支柱直上の地山に大きなひずみが生じており、この部分は破壊するものと考えられる。上半部の礫層にモール・クーロンの破壊基準により壁面近傍の応力を照査した結果、基準を超える部分が一部あるが、最大せん断ひずみの結果と同様第 1 案および第 3 案については特に問題はない。

吹付けコンクリート応力は、圧縮を負とすると、第1案ピラー部で -91kgf/cm^2 、第2案後行トンネル側壁部で -93kgf/cm^2 、第3案後行トンネル側壁部で -78kgf/cm^2 となり、現状の支保部材では断面量が若干不足している。

覆工コンクリートについては、各案とも隣接するトンネルの掘削の影響は少なく、数 kgf/cm^2 の圧縮力に留まった。しかし、第3案については支柱の応力が先行トンネル掘削後に左右のバランスが崩れ、後行側の支柱縁端部に最大 35kgf/cm^2 の引張応力が生じ、配筋による補強が必要である。

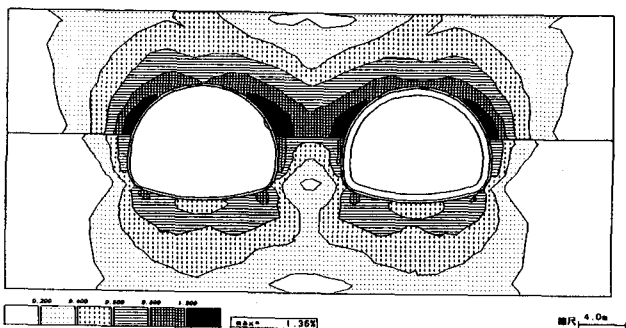


図-3 最大せん断ひずみ分布図（第1案）

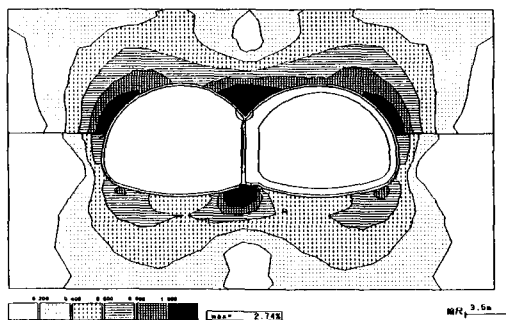


図-4 最大せん断ひずみ分布図（第2案）

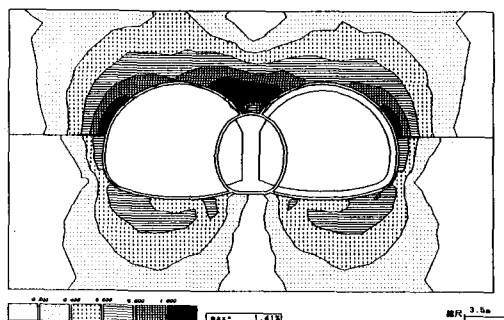


図-5 最大せん断ひずみ分布図（第3案）

地山の安定状態の点では、各ケースとも特に大きな問題はない。但し、第2案の支柱直上部にはなんらかの補強が必要と考えられる。過去の施工例でも両トンネルの中心付近の地山に薬液注入を行う等の補助工法を採用しているケースが多く、施工中にトラブルが生じ易い。

部材応力からみると 15cm の吹付けコンクリートでは厚さが不足している。何れの案を採用しても部材を増す必要がある。覆工コンクリートに与える後行トンネルの掘削の影響は比較的に少なく、最低限度の補強を行えばよいものとする。しかし、第3案については先行トンネル掘削時に支柱に曲げモーメントが働き、相当量の補強を要するものとする。

2.3 施工性および経済性について

前述の解析検討から地山の安定、支保部材の応力の点で最も実現可能な第1案、第3案について施工法を検討し、工期と工費の比較を行なった。各案においていくつかの加背割を検討し、工期の最も短いものについて概算工事費を検討する。

第1案は地山の状況から両トンネルを中壁（CD）工法で施工するものが最も望ましいと判断し、互いに独立したトンネルを交互に掘削し、拡幅することとした。第3案は導坑、本坑とも2段ベンチとして検討し

た。結果を表－3に示す。

①施工性

第1案は相互のトンネルを単独で施工できることから施工性がよく、第3案に比べ工期が3割程度短い。

②経済性

第3案は第1案に比べ10%程高い。

表－3 工法比較検討表

検討項目	施工性	工 期	工 費
第1案 双設トンネル	独立施工が可能 ○	21.3ヶ月	指数1.00
第3案 メガネトンネル	施工が煩雑 △	33.0ヶ月	1.11

3. まとめ

① 既往の施工例，研究等からトンネルのピラー

幅を0.5D程度としても，地山の初期応力，地山の強度，支保部材の剛性等からみてトンネルの施工は可能と判断した。

② これにより双設トンネルとメガネトンネル2案の3案について比較検討を行ない，以下の結論を得た。

- ・解析上は，各案とも十分採用可能と判断された。しかし，メガネトンネルについては支柱直上の地山の不安定化，支柱の応力のアンバランス等に問題がある。過去の施工例においても問題を生じたことが多い。
- ・施工性，経済性では双設トンネルが工期・工費共に有利である。

③ ロックボルトの拘束効果を考慮した場合，双設トンネルにおけるセンターピラーは更に有利なものとなる。従って，①，②から本トンネルの工法を双設トンネルとする。なお，解析上部材力が不足する部分については，吹付けコンクリートを増し，鋼製支保工を考慮することで対応する。

4. あとがき

限定された用地の範囲内に4車線トンネルを計画し，トンネル延長，地山条件からトンネルピラーを0.5Dとした双設トンネルが妥当と判断した。筆者らはその掘削順序についても検討を行い，センターピラー側の導坑を先行して交互に掘削し，ピラーを補強する工法を計画した。現在施工に着手した所である。

なお，本検討は「南大沢トンネル基本計画検討委員会」より適切な指導・助言を頂いてまとめたものである。ここに深甚の謝意を表する。

<参考文献>

- 1) 寺本達郎，青砥 宏，川村 賢，領家邦泰：既設トンネルに近接するアーストンネルの挙動と施工，土と基礎No.984，1977年2月
- 2) 社団法人日本トンネル技術協会：近接トンネルの設計施工に関する調査研究報告書（Ⅱ），1977年3月
- 3) W.Hochmuth,A.Krischke and J.weber:Subway construction in munich,Developments in Tunnelling with Shotcrete Support,Rock Mechanics and Rock Engineering Vol.20 No.1,January - March 1987
- 4) 近内克夫：NATMによるメガネトンネルの施工〈幹線臨港道路2号線小名浜港トンネル〉，トンネルと地下Vol.20 No.2，1985年2月
- 5) 山本 稔，山崎良一，横内脩三：双設シールドトンネルの相互干渉について，土木学会第23回年次学術講演会講演概要集，1988年10月
- 6) 川本眺万：応用弾性学，共立出版
- 7) E. フック・E. T. ブラウン共著：岩盤地下空洞の設計と施工，pp86，土木工学社，昭和60年2月