

都市部トンネル施工における 周辺地山挙動把握と環境影響評価に関する研究

佐々木郁夫*・蔣 宇静**・棚橋 由彦**

村里 静則***・今長谷秀亮****

Monitoring and Environmental Impact Assessment during Tunnel Excavation in Urban Area

by

Ikuo SASAKI*, Yujing JIANG**, Yoshihiko TANABASHI**

Sizunori MURASATO*** and Hideaki IMAHASE****

When improving a transportation system in the urban area, tunnel structures are often used recently as a result of city planning and environmental measure. This paper is to present a method for predicting the ground movement and assessing the influence effect to the surrounding environment during tunnel construction process by using the three-dimensional numerical method. The proposed approach is clarified by the field measurements. Based on the prior estimations, a rational supporting design method is also put forward to effectively control the ground movement and surface settlements.

1. 研究の背景と目的

近年、都市化した地域で道路を整備する場合に、都市計画や環境対策上トンネル構造が選択されることが多くなってきている。また、土被りの小さい場所では、従来開削工法のトンネルとされていたものが、用地取得や家屋移転、施工時の環境対策、掘削土処分などの困難な条件があり、非開削のトンネルの方が、経済的にも環境対策上においても有利となる場合が増えている。一般に、トンネルの施工に際しては、自然環境（地形、地質、地下水など）・社会環境（土地利用、既設構造物など）・生活環境（騒音、振動など）への影響が問題となる。特に都市部では、坑口部の用地取得の制約が多いことから、低土被り対策や近接施工対策、また、地質的には特殊地山対策が必要となる。土

被りの小さい場所では、固結度が低いことや地下水の影響もあって、切羽の自立性や地山の強度の不足によって、トンネルの施工が困難な場合がある。さらに、地表の建物や地下埋設物に悪影響を与えないよう地表沈下および周辺地山の変形を抑制しなければならない。

双設トンネルでは、両トンネルが互いに応力的に影響し合わない距離をおいて施工されるのが望ましく、高速道路トンネルでは、トンネル中心離隔を約3D（D:トンネル径）程度確保して路線計画がなされている。しかし都市部などでは、用地上の制約などにより、双設トンネル相互の応力的干渉が生じるほど両トンネル間の離隔を小さくせざるを得ないケースが増えている。このような両トンネルの離隔が小さい双設トンネルでは、通常、トンネル間に導坑を先行して掘削しセ

平成14年4月19日受理

* 飛鳥建設株式会社 (Tobishima Construction Co.,Ltd)

** 社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

*** 長崎県庁 (Nagasaki Prefectural Office)

****大学院修士課程社会開発工学専攻 (Graduate Student, Department of Civil Engineering)

ンターピラーを打設する眼鏡型トンネルと、センターピラーを設けない超近接双設型トンネルに区分される。

こうした厳しい制約条件に対して、最近では補助工法を活用して解決している施工事例が多くなっている。

本研究は、都市部トンネル施工において問題となる騒音、振動、地表面沈下などの環境影響のうち、土被りが小さい都市部トンネルを対象に、掘削に伴う周辺地山の力学的挙動および地表面への影響を、三次元掘削解析モデリングを行的確に把握・評価し、都市部トンネルの合理的設計施工を実現することを目的とする。

2. 補助工法の概要

補助工法とは、ロックボルト、吹付けコンクリート、鋼製支保工などの通常の支保パターンでは対処できないか、対処することが得策で無い場合に、切羽の安定性・トンネルの安全性確保ならびに周辺環境保全のため、主に地山条件の改善を図る目的で適用される補助的または特殊な工法をいう。補助工法を大別すると、通常の機械・設備で施工ができ、比較的施工サイクルにおよぼす影響が少ないものと、特殊な機械・設備を必要とし、施工サイクルにおよぼす影響が大きいものに分けられる¹⁾。近年、多種多様な条件のもとで、トンネルを施工する事例が多くなってきていることから、施工的にも経済的にも補助的な工法ではなく、むしろ主要工種となってきている。

各種補助工法のうち、先受け工はトンネル周辺地山の崩落を防止したり、変形を小さくとどめたりするために、切羽前方の地山に対して施工するものである。その中でも、土被りの小さい都市部などでのトンネル掘削に積極的に採用されている長尺鋼管先受け工（長尺鋼管フォアパイリング方式）は、地山の先行変位の抑止、地山のゆるみ防止、施工の安全性確保などを目的に、切羽安定対策、地表面沈下対策、特殊地山のうち未固結地山対策として採用され、その施工実績の増加は表-1に示されたように、トンネル現場における長尺鋼管先受け工の評価には高いものがある。長尺鋼管先受け工は、トンネル掘削に先立って、切羽前方地山に鋼管を打設すると同時に、セメントミルクや薬液

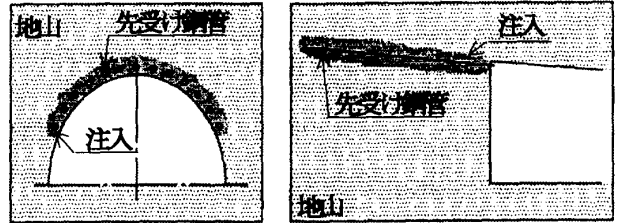
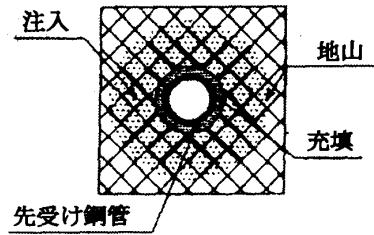


図-1 長尺鋼管先受け工の補強概念図

などを圧力注入することにより、地山の安定に対し梁効果およびシェル効果を期待するものである²⁾。図-1に長尺鋼管先受け工の補強概念図を示す。

3. 本研究の着目点

都市部トンネル施工における周辺地山挙動把握と環境影響評価を行うにあたって着目点を設定し、以下にそれらの特徴を略述する。

(1) 実際の施工過程によるモデル化

トンネルや地下空洞の安定解析に関しては、有限要素法を代表とする数値解析手法による研究が盛んに進められ多くの実績が積み上げられているが、トンネル縦断方向の効果を無視した、二次元平面ひずみ問題として解析されることが多い。また、三次元解析が行われた場合でも実際の施工過程を再現して解析を行っているものは少なく、解析における掘削過程の表現は曖昧で単純化されたモデルとなっている。本来、地山の挙動は三次元的なものであり、合理的な支保設計を図るには掘削に伴う切羽周辺の地山の挙動を忠実に解明しなければならない。本研究では、掘削過程を表現するため

表-1 先受け工の方式別適用事例数²⁾

先受け工方式	事例数
スリットコンクリート方式	3
水平ジェットグラウト方式	15
長尺鋼管フォアパイリング方式	221

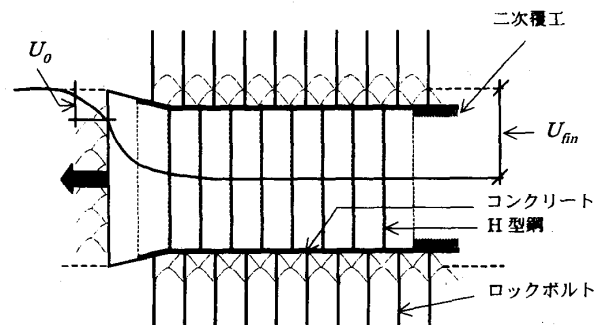


図-2 掘削過程のイメージ

に、図-2に示すような①ステップごとの掘削作業、②H型鋼の建込作業、③コンクリートの吹付け作業、④ロックボルトの打設作業、⑤二次覆工打設作業といった現場での一連の流れを最大限かつ忠実に再現する掘削解析モデルの開発を行い、地山の挙動を定量的に評価していく。

(2) 三次元ビーム要素による長尺先受け鋼管の表現

長尺鋼管先受け工のモデル化は複雑であるため、既往の研究においても長尺鋼管先受け工を三次元で表現したものは少なく、先受け工により改良される領域の地山の变形係数を大きくすることで二次元的に表現されてきた。しかしながら、本来長尺鋼管先受け工は、切羽前方の地山に対して施工するものであるため、切羽の進行とともに三次元で表現すべきである。したがって、本研究では長尺鋼管先受け工を三次元のビーム要素で表現することとする。図-3に本研究で用いた支保モデルを示す。

(3) 軟岩の力学的挙動の表現

トンネル周辺地山の变形挙動は、それを構成する周辺地山の応力-ひずみ特性、特にピーク強度以降の特性に大きく支配される。本研究で対象とする軟岩は図-4のようなひずみ軟化挙動を示すものとして取り扱い、軟岩の力学的挙動を正しく評価するために、軟岩特有の特性であるひずみ軟化特性とダイレイタンスー特性のモデル化を行う。ここで、ひずみ軟化特性とは岩の種々の内部機構の変化を経てピーク強度に達した後、一度に内部エネルギーを消散して崩壊するのではなく、徐々に応力が低下し、やがて残留応力が一定となってひずみだけが進行する現象であり、ダイレイタンスー特性とはひずみ軟化および塑性流動状態における体積増加のことである。

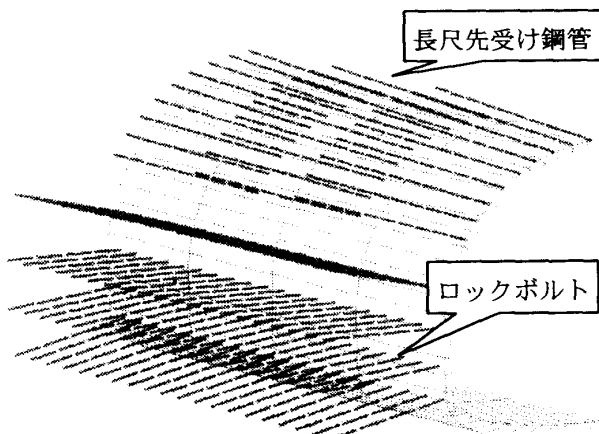


図-3 支保モデル

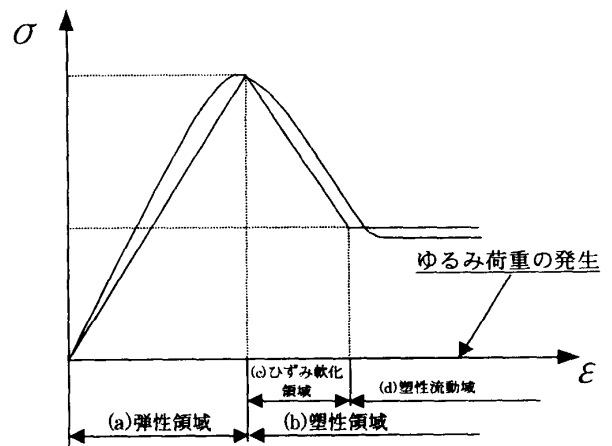


図-4 軟岩の応力-ひずみ関係

4. 解析ケースの設定

本研究では、多数ある補助工法の中でも低土被りでの都市部トンネルを掘削する際に、積極的に利用されている長尺鋼管先受け工の地表沈下と地山変形に対する抑制効果を解明することこそが、都市部トンネル施工における周辺地山挙動把握と環境影響評価を行えるものと位置付け、前述した3つの着目点に則してその評価を試みた。また、実例への適用として、現在長崎市で施工されているオランダ坂トンネルを対象とし、三次元掘削解析と考察を行った。

5. 長尺鋼管先受け工の地山変形に対する抑制効果の評価

(1) モデリング

長尺鋼管先受け工の沈下抑制効果を評価するために、長尺先受け鋼管の各諸元を変化させ三次元掘削解析を行った。掘削工法は全断面掘削とし、断面形状は標準断面(掘削外径約10m)とする。地山の特性値は、日本道路公団の地山分類¹⁾のDIクラス程度(ヤング率 $E=278\text{MPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.35$ 、内部摩擦角 $\phi=25^\circ$ 、ダイレイタンスー角 $\psi=20^\circ$)を想定し、支保工打設もそれに準じた支保パターンを用いることとする。また軟岩地山は、破壊後ひずみ軟化挙動(残留強度はピーク強度の50%とする)を呈することとする。長尺先受け鋼管は鋼管長14m、ラップ長4m、打設範囲はスプリングラインより 120° とする。解析では、逐次掘削過程を表現するために標準的な施工手順に基づき、掘削は1掘削ステップ長(1.0m)毎に行い、支保工は1ステップ分遅らせて鋼製支保工を含めた吹付けコンクリートおよびロックボルトの打設を行う。また、先受け鋼管は10ステップ掘削毎に打設する。

長尺鋼管先受け工は、トンネル縦断方向に打設した

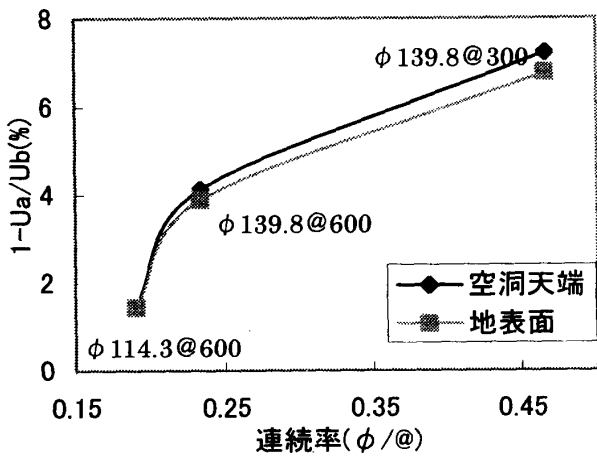


図-5 各打設パターン毎の沈下抑制効果

(Ua: 先受け工が有る場合の最終変位,
Ub: 先受け工が無い場合の最終変位)

鋼管の剛性により地山の安定性向上を図ることが主目的で、注入によるプレライニングの効果(シェル効果)は補助的であり、鋼管の打設間隔や鋼管周辺地山の改良の程度によりその効果は異なるものと考えられる。したがって、本研究ではシェル効果を無視し梁効果のみを考慮する。

(2) 打設パターンの違いによる効果

長尺先受け鋼管の種々の打設パターンによる変形に対する抑制効果を試みた。打設パターンは長尺先受け鋼管の鋼管径(ϕ)および円周方向打設ピッチ(@)を変化させることとした。比較検討するために ϕ 114.3@600, ϕ 139.8@600, ϕ 139.8@300(単位:mm)と設定した。図-5にそれぞれの場合におけるトンネル天端および地表面沈下の抑制効果の比較を示す。なお、図-5において、縦軸は先受け工の有無による地表面沈下抑制効果の割合、横軸は鋼管打設間隔の連続率とした。図-5から ϕ 139.8@300の場合で最も沈下抑制効果があり、鋼管が密に打設された状態であれば沈下に対する抑制効果が増加することがわかる。また、沈下抑制効果は連続率に比例していないため、円周方向打設ピッチを狭くするよりも鋼管径を大きくした方が効果の増加が期待される。しかしながら、打設しない場合に比べ最も効果のある場合でも10%未満の効果しかないため、長尺鋼管先受け工の梁効果はあまり期待できないことが明らかになった。

(3) 地山強度比の違いによる効果

国内の地山分類は岩種、割れ目の状態、地山の弾性波速度値を因子としているものが多い。また、軟岩や

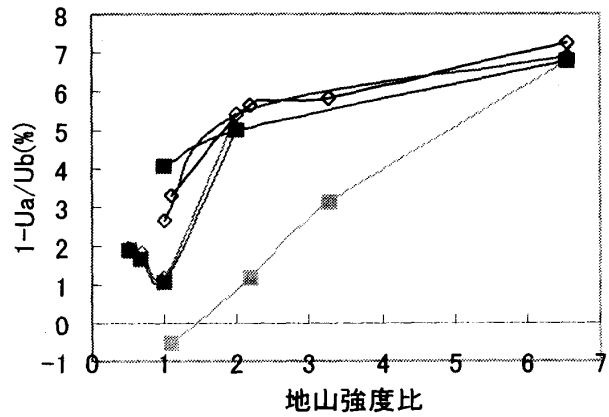


図-6 各地山強度比毎の沈下抑制効果

土砂などの地山については弾性波速度値ばかりでなく、トンネルの土被り荷重と地山の一軸圧縮強度の比(地山強度比)を因子とする例が多いことから、本研究では土被りおよび一軸圧縮強度を変化させて各地山強度比毎の長尺鋼管先受け工の効果を評価した。図-6に各地山強度比毎の効果を示す。図-6から地山強度比が大きいくほど沈下抑制効果が増加しているため、土被りが小さいほど、また地山が安定しているほど効果があるということがわかる。また、地山強度比が2以下になると効果が急激に減少する傾向が見られ、地山強度比が2以下の不良地山に対しては長尺鋼管先受け工の効果はほとんど期待できないと考えられる。

(4) 梁およびシェル効果の比較

梁効果のみならず注入によるシェル効果をも考慮した解析を行い、定性的に注入による効果の把握を試みた。解析では薬液などの注入によって改良された地山の変形係数を5倍、10倍と変化させることで注入による改良域を表現した。図-7にトンネル天端および地

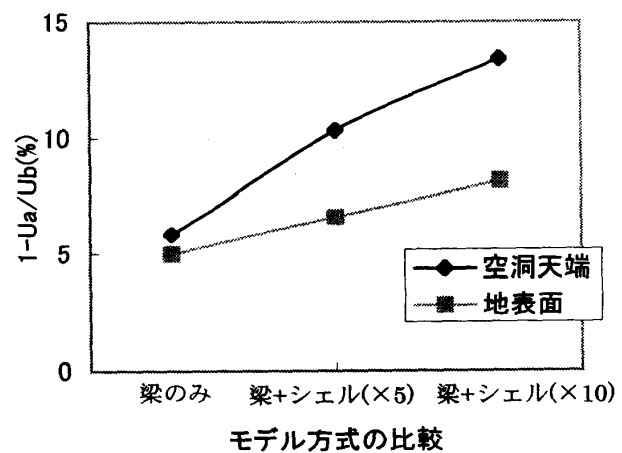


図-7 注入によるシェル効果

表面沈下の抑制効果を示す。図-7から、注入によるシェル効果が発揮されるのはトンネル天端部であり、地表面沈下にはわずかな効果しか期待できないことがわかる。したがって、長尺鋼管先受け工は地表面沈下を抑制するというよりも、むしろ鏡面の安定性を向上させる補助的なものと考えられる。

6. 実現場の環境影響評価と対策

(1) 環境影響評価

トンネル解析の現状として、合理的な設計のために行われているというよりも、単なるケーススタディや施工の裏付けに止まっているのがほとんどで、実現場へ適用可能な解析手法や評価法の確立が求められている。その背景で、実際の設計は従来の実績や経験に基づいて行われているのが実状である。本研究では、具体事例として現在長崎市に施工中のオランダ坂トンネルを対象として、実現場を忠実に再現したモデル化による掘削解析を実施し、都市部トンネル施工における周辺地山の挙動と環境影響を考察した。

オランダ坂トンネルは、写真-1に示すように住宅密集地下に存在し、最低土被りは坑口部で約7mであり、さらに地形的制約により上下線両トンネルの中心間距離が約3D (D:トンネル径) から2Dへと漸近し、特殊立地条件下での施工を余儀なくされている。住宅密集地では、既設構造物やガス管・上下水道などのライフラインを対象とした影響把握が必要となるため、坑内、坑外において計測工を実施し、周辺地山の挙動を把握することで環境影響評価を行う。また、計測結果の現場施工へのフィードバックを行うことで、最適な補助工法の採用を検討する。オランダ坂トンネルでは、最も許容値の厳しいガス管を対象に管理基準値を20mmに設定している。

図-8に計測管理フロー図を、表-2に構造物ごとの管理基準値³⁾を、表-3にオランダ坂トンネルの管理基準値を示す。

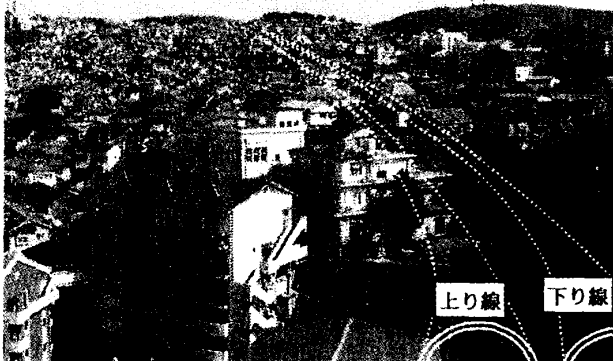


写真-1 出口側坑口状況

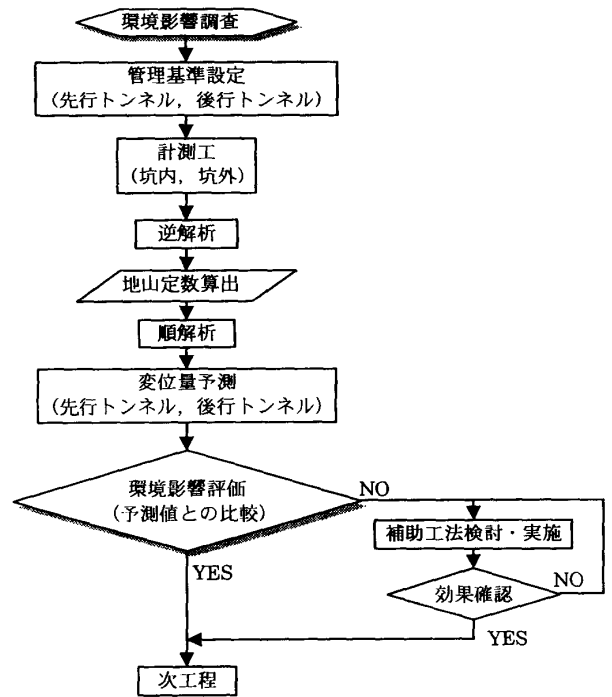


図-8 計測管理フロー図

表-2 近接工事による構造物ごとの管理基準³⁾

既設構造物			許容値	管理値
用途	企業者	形式		
建築物		鉄筋コンクリート 5F	沈下: 5mm	±120 秒
		RCベタ基礎 地上 9F 地下 3F	沈下: 5mm	
		RC直接基礎	フーチング部材角 1/300~1/500	
		ビル RC3F、4F	傾斜±160 秒	
		家屋	絶対沈下量: 20~30mm 変形角: (1~2) × 10 ⁻³ rad 相対沈下量: 2250mm	
その他	東京ガス	ガス管	沈下: 20mm	沈下: 4mm

表-3 オランダ坂トンネルの地表面沈下管理基準

注意レベル	地表面沈下計測を用いた管理基準 (mm)	
	先行トンネル	後行トンネル
	3 以下	4 以下
I	3~11	4~13
II	11~17	13~20
III	17 以上	20 以上

(2) 本解析手法の実現場における適用

現在、2002年2月時点で、長尺鋼管先受け工を補助工法として(図-3)、下り線が上り線より90~100m先行して施工が行われているが、不浸透性の地山のた

め梁効果しか期待できない状況にある。

モデル対象としたのは新地側坑口から415mの区間であり、現場での支保パターンおよび地層分布も含めて、現場施工を忠実に反映させた解析モデルの設計を行った。地層分布を図-9に示し、モデル全体図および上下線トンネルの位置関係を図-10に併せて示す。現場で得られた計測結果を参考に地山物性値の同定を行い、現場で適用可能なモデリングを行った。求められた地山の物性値を用いて解析的に予測した結果と既掘削域における計測結果を図-11に示す。図-11から計

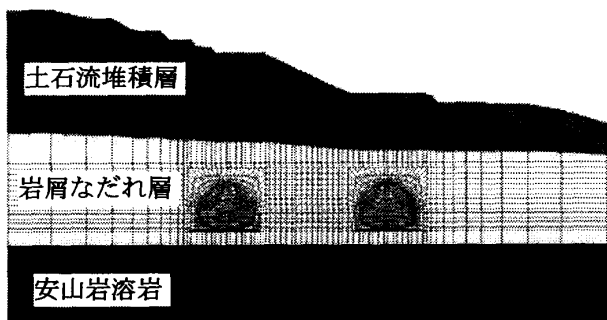
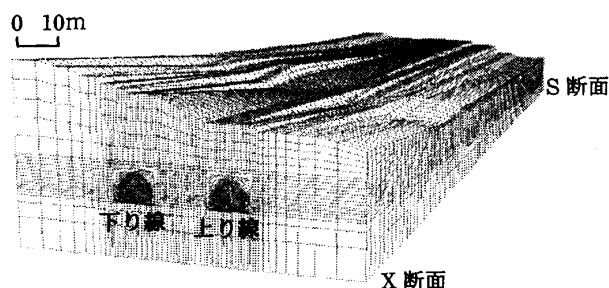
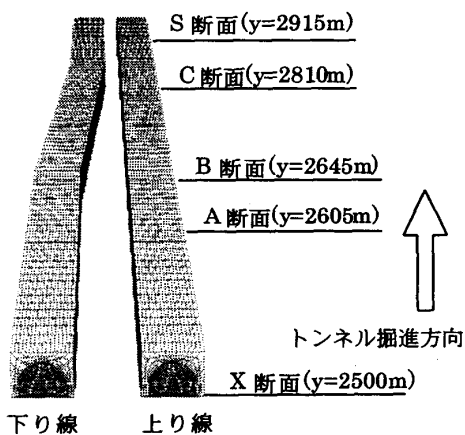


図-9 X断面(y=2500m)における地層分布



(a) モデル全体図



(b) 上下線トンネル位置関係(y=坑口からの距離(m))

図-10 オランダ坂トンネルモデル図

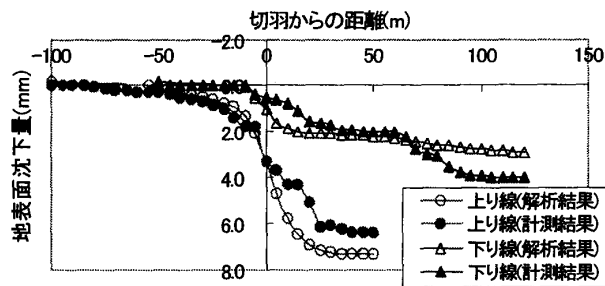


図-11 解析結果と計測結果の比較(地表面沈下量)
(切羽位置: 上り線y=2735m, 下り線y=2815m)

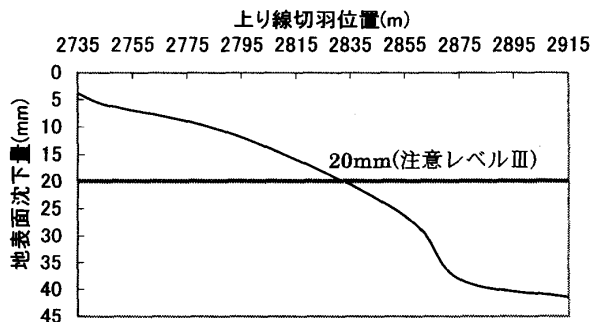
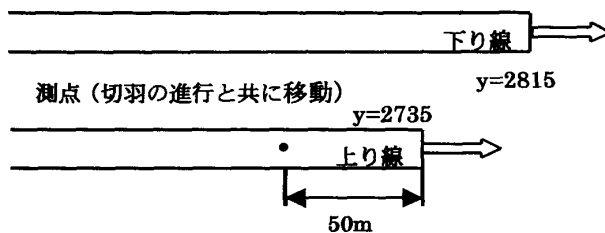


図-12 切羽の進行に伴うセンターピラー部地表面沈下量

測結果との差は多少あるものの、実現場における地山の挙動を適切に表現できたと考えられ、本研究で示したモデルおよび解析手法の妥当性は証明できた。したがって、未掘削域での影響をある程度の範囲で予測できるものとし、未掘削域での地表面沈下量の予測を試みた。図-12から切羽後方50m程度で変位の収束が見られるため、後行する上り線の切羽位置を基準とし、切羽の進行とともに50m後方の点も移動させ、その点における地表面沈下量を予測した。予測対象とした場所は上下線のセンターピラー部であり、上り線の切羽位置がy=2735m (測点位置y=2685m) から坑口のy=2915m (測点位置y=2865m) までとする。図-12に解析によって得られた予測地表面沈下量を示す。図-12から、上り線切羽位置がy=2835m (測点位置y=2785m) 付近で、現場において定められた管理基準値の中でも最も注意レベルの高いⅢの20mmを超えていることがわかる。両トンネルの中心間距離および地山強度比が小さくなったことが原因と考えられる。また、坑口部

では40mm程の地表面沈下量が生じているため、地表面沈下対策を行うため施工法の再検討が必要であると考えられる。解析結果から長尺鋼管先受け工の地山変形抑制効果を考慮した場合、この補助工法のみでは地表面沈下量を管理基準値以内に抑制することが困難であることから、インバート一次吹付けによる断面の早期閉合、上半支保工脚部補強による断面閉合までの沈下防止、高強度吹付けコンクリートによる支保耐力の向上などの補助工法を追加することにより、出来るだけ地表面の沈下を抑制する。また、これらの補助工法の効果を確認し評価することにより、坑口部の対策工の検討を行う。

7. 終わりに

本研究は都市部トンネル施工における周辺地山挙動把握と環境影響評価を行うために、三次元解析手法を用いて長尺鋼管先受け工の各諸元に関するケーススタディを実施することにより沈下抑制効果を確認することができた。その結果、長尺鋼管先受け工の効果は地山の状況によって変化するが、打設しない場合に比べ

て10%未満であり、固結度の低い地山では沈下抑制効果はあまり期待できないことが明らかになった。また、影響予測と対策のために現場施工へ有用な情報を与え得るモデルの開発を行い、環境影響の事前評価を行った。今後は、種々な地山条件を考慮した長尺鋼管先受け工の沈下抑制効果の評価を行うとともに、環境影響を最小限にした都市部トンネルの合理的施工のための効果的な対策法を提案していく。

参考文献

- 1) 土木学会編：トンネル標準示方書（山岳工法編）・同解説，1996.
- 2) 土木学会：トンネル・ライブラリー第10号，プレライニング工法，2000.
- 3) トンネル技術協会：地中送電線土木工事における構造物近接部設計施工指針，1985.
- 4) 箱石他：計測データ分析に基づいたアンブレラ工法の効果に関する一考察，トンネル工学研究論文・報告集，第7巻，pp.23-30，1997.