

山岳トンネルにおける地表面沈下の 予測評価と合理的対策工の選定

蔣 宇静¹・安田 亨²・木梨秀雄³・土門 剛⁴・山田浩幸⁵

¹正会員 博士(工) 長崎大学教授 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)
E-mail: jiang@civil.nagasaki-u.ac.jp

²正会員 博士(工) パシフィックコンサルタンツ(株) トンネル部 (〒163-6018 東京都新宿区西新宿6-8-1)

³正会員 博士(工) (株) 大林組生産技術本部トンネル技術部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

⁴正会員 首都大学東京都市環境学部 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

⁵正会員 博士(工) (株) 鴻池組本社土木事業本部企画部 (〒530-8517 大阪市北区梅田3-4-5)

都市部においてトンネル建設によって発生する地表面沈下は、地下水低下問題とともに環境へ与える重要なインパクトとして近年大きな課題となっている。山岳工法による沈下は、その発生メカニズムの解明、事前の沈下量予測と適正なモデル化、施工中のモニタリングと情報化施工のあり方、効果的な対策工の選定など多くの課題があり、実務者にとって明確な対応策をとることは容易ではない。本報告は以上の背景に鑑み、土木学会内に設置した「山岳トンネルにおける地表面沈下検討部会」にて検討した成果の一部を総括的に報告するものであり、最終取りまとめの前に広く意見を採り入れることを目的としている。

以下に、予測や対策工選定に求められる調査・計測手法、事前・施工中に適切に地表面沈下を予測・評価するための手法と課題、情報化施工によって対策工を適宜選定し評価するためのフローと課題などの観点から、上述した各課題に対する調査研究結果を報告する。

Key Words : tunnel, ground-surface subsidence, countermeasure, predictive estimation

1. はじめに

近年、都市部においても山岳工法による施工事例が増えており、住宅等市街地へのトンネル掘削の影響評価が重要になっている。しかし、実務においては、地表面沈下の予測はモデル化などにおいて様々な課題があり、決して容易ではない。また、施工時の対策工や計測監視方法も様々あり、施工条件に応じた合理的な工法選定が必要と思われる。

以上の背景を踏まえ、土木学会内に「トンネル工学小委員会、山岳トンネルの地表面沈下検討部会」を設置し、地表面沈下の予測評価と合理的対策工の提案を目的として活動している。主要な検討内容は、既往研究や対策工選定の現状を調査分析するとともに、地表面沈下の予測手法、事前調査や施工中のモニタリング手法、対策工の合理的な選定法等の検討等である。

現在、部会活動は最終段階にあり、原稿の取りまとめに鋭意取り組んでいる。本報告においては、検討項目、検討課題等について、調査、検討した結果を総括的に報告するものであり、最終取りまとめ前に多くの実務者の意

見、希望を取り入れることにより、ニーズに呼応した成果に高めたいと考えている。

(1) 活動内容

(a) 研究テーマ

- ① 都市部における山岳工法の地表面沈下予測、対策選定の調査、分析
- ② 山岳トンネルにおける地表面沈下の予測と対策に関する研究
- ③ 地表面沈下予測・モデル化の検討 など

(b) 組織

委員33名(産官学の参画、公募による)
以下の3ワーキングを設置して活動している。

- ① WG1 調査・計測ワーキング
- ② WG2 予測・評価ワーキング
- ③ WG3 対策ワーキング

(c) 活動期間

平成19(2007)年度 ～ 平成22(2010)年度

(d) 成果発表

平成23年度夏 ライブラリー発刊予定

平成23年度秋 講習会開催予定（東京、大阪）

(e) 日中トンネル安全リスク会議の開催

本検討部会は、中国土木学会「トンネルリスク研究委員会」との共同企画で、日中トンネル安全リスク会議を2回開催した。

第1回 2009.8.29～30 上海 同済大学

CJTSR2009-First China-Japan Workshop on Tunnelling
Safety & Risk

第2回 2010.8.27～28 東京 首都大学東京

JCTSR2010-Second Japan-China Workshop on Tunnelling
Safety & Risk

会議の主旨は、都市部トンネルの施工における環境影響の予測評価と合理的対策技術に関する技術交流と情報収集、および日中のトンネル施工実状の把握を目的としている。中国においても地表面沈下をはじめとする環境影響、安全、リスク問題に積極的に取り組んでおり、当部会の検討主旨と同調していることから開催する運びとなったもので、今後も継続開催する予定である。

(2) 部会構成メンバー

部会長	蔣 宇静	長崎大学
幹事長	安田 亨	パシフィックコンサルタンツ (株)
幹事	木梨秀雄	(株) 大林組
幹事	土門 剛	首都大学東京
幹事	山田浩幸	(株) 鴻池組
	芥川真一	神戸大学
	浅野 剛	(株) 奥村組
	井浦智実	独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構
	遠藤太嘉志	株式会社地層科学研究所
	大谷達彦	西松建設 (株)
	岡部 正	(株) ケー・エフ・シー
	奥井裕三	応用地質株式会社
	梶山貴司	レベックス
	日下 敦	独立行政法人土木研究所
	熊坂博夫	清水建設株式会社
	熊谷幸樹	飛島建設株式会社
	小池真史	大成建設株式会社
	小谷拓	日本工営
	重田佳幸	パシフィックコンサルタンツ (株)
	嶋本敬介	財団法人鉄道総合技術研究所
	清水雅之	株式会社高速道路総合技術研究所
	進士正人	山口大学
	菅原健太郎	株式会社地層科学研究所
	高橋 浩	三井住友建設 (株)
	田中康弘	(株) ダイヤコンサルタント
	玉村公児	鹿島建設 (株)
	辻村幸治	株式会社東亜測器
	福田 毅	株式会社地層科学研究所
	森田 篤	前田建設工業 (株)
	森崎泰隆	(株) 熊谷組
	山本雅広	中央復建コンサルタンツ株式会社
アドバイザー	久武勝保	近畿大学
アドバイザー	城間博通	株式会社高速道路総合技術研究所

(3) 検討課題

調査・計測、予測・評価、対策の各ワーキングで調査、研究した検討項目は以下のとおりである。

(a) 調査・計測に関して

表-1 調査・計測WGの検討項目

事前調査	地山条件(物性値, 初期応力, 変形特性, ポアソン比, セン断特性など)の把握
	周辺環境条件(近接条件, 地下水条件)
	予測解析のための必要調査項目と調査法
計測	目的に応じた計測項目と計測手法
	管理基準値の整理と設定方法
	計測管理のフロー(計測時期, 計測頻度, 管理レベル, 計測結果に基づくFB)
	調査計測手法の新技術の導入と適用性
評価	調査結果, 計測結果の分析・評価と活用

事前予測解析および対策工の選定を行うために必要となる調査と、その結果の解釈、対象物への影響、地山挙動、対策工の効果の評価に必要となる計測工の選定と評価、管理基準に基づく計測管理フローの検討が特に重要である。

(b) 予測・評価に関して

表-2 予測・評価WGの検討項目

予測手法	地表面沈下予測手法の現状と課題
	理論および模型実験に基づく予測手法
	実験・事例に基づく沈下発生メカニズム
予測解析	数値解析法の種別と沈下問題への適用性
	解析条件(二次・三次元, 境界条件, 物性値)とモデル化(材料特性, 不連続性)
	支保工, 補助工法のモデル化
	数値解析予測精度と精度向上および適用限界
再現解析	計測データ分析による逆解析, 再現解析
	計測結果との比較, 再現精度, 再予測精度
	再現解析による管理値の再設定, 対策工選定フローへの活用, 対策効果確認・検証
評価	事前予測手法, 再現解析手法等の評価

事前予測を行う場合の適切な予測手法、モデル化、および施工中における計測データの活用による対策工選定フローへの反映、対策効果の検証等が特に重要である。

(c) 対策に関して

表-3 対策WGの検討項目

対策分類	地表面沈下対策の現状と課題
	地山(小土被り, 低強度), 対象物, 地下水等の対象ごとの沈下対策の現状
	対策工の沈下抑制メカニズム
	工法分類(加背割, 早期閉合, 先受け工, 脚部対策, 地山改良, 遮断壁等)と効果
対策選定	検討条件(地質・地形条件, 周辺環境条件, 近接条件, 管理値)による対策工選定
	対象地山, 土被り, 沈下対策対象物件などの優位性に基づく対策選定
	対策工の選定フロー
	計測, 再現解析による対策工選定の評価
評価	施工中の対策工選定評価および事後評価

対策工の分類と効果、検討条件に応じた対策工選定のフロー、対策工効果の検証評価などが特に重要である。補助工法の選定は経済性への影響が大きいことから、実務においては常に頭を悩ませる要因であり、実用的な選定フローについての考え方を示すことを目指している。

2 計測手法の選定および許容値の設定と管理

(1) はじめに

調査・計測WGの活動の一環として、地表面沈下が問題となったトンネル現場の施工事例を収集、分析し、具体的な調査・計測手法やその選定方法、様々な現場条件への適用性などについての調査、研究を行っている。本報では、これらの調査過程で得られた地表面沈下が問題となったトンネル現場の現場条件、管理方法、計測手法を整理し、計測手法の適用性や選定における要点について考察した。また、これらの調査過程で得られたデータに基づき地表面沈下に関する許容値を定義し、収集した許容値を整理した。

(2) 地表面沈下と現場条件の実態

地表面沈下の計測が実施された53事例を対象に地上条件、対象地質および地下水条件について分析した。なお、1つの事例で複数の条件があるものは重複してカウントし、論文に記述がない事例はカウントしていない、などのため各データの合計は53事例と一致していない。

(a) 地上条件の実態

図-1に示すように、トンネルの地上条件として最も多いのが家屋や学校その他の施設であり、全体の49%（36事例）を占めている。次いで道路・鉄道が28%（20事例）、河川・水路・埋設管が10%（7事例）と続く。

これらの割合は、地上条件の重要度を反映していると思われる。既設構造物や道路、ライフラインなどの保安物件が存在する場合に地表面沈下計測が重視されている傾向がうかがえる。これに対し、山林や耕作地は重要度が比較的低いことから、地表面沈下計測の対象となっている事例が少ない、あるいは論文の対象とされにくいことなどが考えられる。

(b) 地質条件の実態

図-2は地表面沈下計測事例の対象地質を分類したものである。これによると、砂層や粘土層などの未固結層が53%（32事例）を占めた。次いで、砂岩・泥岩・凝灰岩などの堆積岩が26%（16事例）、破碎帯・混在岩・変成岩が8%（5事例）、崖錐層と硬岩・火成岩がそれぞれ5%（3事例）となっている。このことは、地表面沈下が

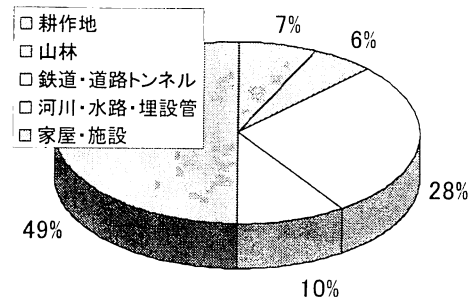


図-1 地表面沈下計測事例の地上条件

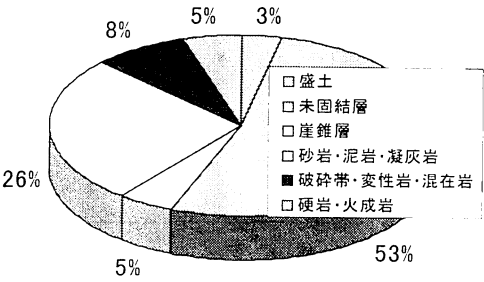


図-2 地表面沈下計測事例の対象地質

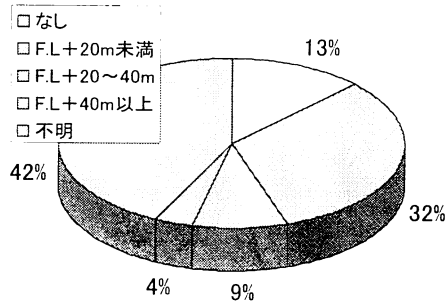


図-3 地表面沈下計測事例の地下水条件

問題となる事例の背景として、主に坑口部に代表される小土被り区間における施工や、都市部における補助工法を併用した山岳工法適用事例が増えていることなどが考えられる。

(c) 地下水条件の実態

地下水条件は、脱水压密に伴う地表面沈下の発生や掘削時における地下水を伴った切羽崩落など、地表面沈下に大きく影響を及ぼす要因のひとつと考えられる。今回の文献調査によれば、図-3のように全体の半数近い45%（25事例）で地下水位がトンネルF.L.より高位（F.L.+20m未満～+40m以上）にある結果となった。この結果のみで地表面沈下と地下水位の関係を把握することは難しいが、今回の調査では、地下水位低下に伴う地表面沈下計測事例などもあり、今後の分析対象としたいと考えている。

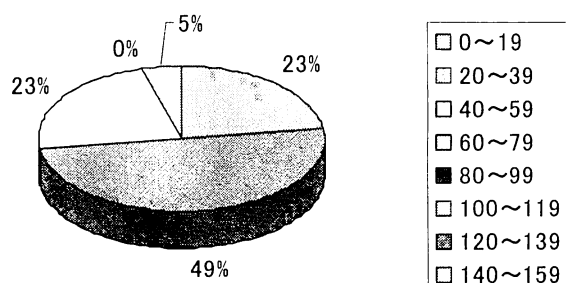


図-4 事例における地表面沈下の許容値

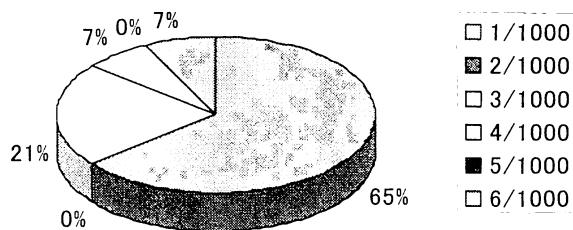


図-6 事例における傾斜角の許容値

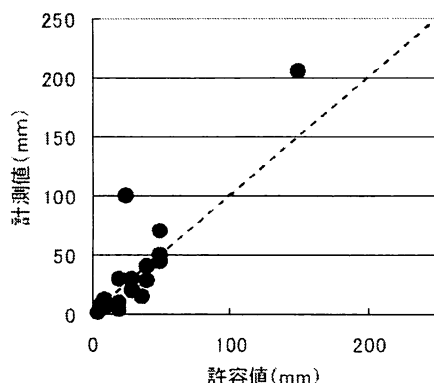


図-5 地表面沈下の許容値と計測値

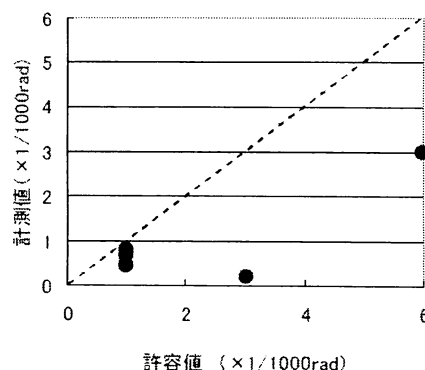


図-7 傾斜角の許容値と計測値

(3) 地表面沈下の管理方法と実態

(a) 地表面沈下の管理方法

トンネル上部の地表面沈下は、本章4節で述べる手法により管理されているが、計測値の管理項目としては、地表面沈下の絶対値と傾斜角の2項目が一般的である。

(b) 地表面沈下量の絶対値の実態

実施例によれば図-4に示すように、地表面沈下量の許容値は、60mm未満の事例が95%（22事例中の21事例）である。そのうち、20~39mmを許容値としている事例が50%（11事例）でもっとも多い。

図-5には地表面沈下の計測値と許容値の関係を示しているが、地表面沈下については計測値が許容値を超えた事例が26.3%（19事例中の5事例）あった。

(c) 地表面沈下の傾斜角

地表面に住居や施設がある場合は地表面沈下の総量に加えて傾斜角が管理されている。対象構造物によって傾斜角の許容値は異なるものの、図-6に示すように1/1000radを許容値としている事例が64%（14事例中の9事例）であった。

構造物の傾斜角については、図-7に示すようにデータ数は少ないが、報告されているすべての事例において、計測値は許容値以下に収まっている。図-5および図-7から、構造物の傾斜角を抑制することに比べ、地表面沈下

の絶対量を抑制する方が難しいという傾向が認められる。

(d) 地表面沈下と天端沈下の関係

図-8は計測結果が示されている事例のうち、地表面沈下と天端沈下の関係を示したものである。図によると、地表面沈下は同一箇所における天端沈下よりも大きく、1.5倍~2.0倍程度の範囲となっている。この要因としては、地表面沈下は先行変位（切羽が計測断面に到達する以前に生じる変位）を含んでいることが考えられる。また、天端沈下が大きい場合は地表面沈下も大きくなる傾向がうかがえる。

図-9は地表面沈下量と土被り比（土被り／トンネル幅）の関係を示したものである。図によると、地表面沈下が顕著に表れるのは土被り比が概ね1.0以下の場合である。また、同程度の土被り比であっても地表面沈下量は大きくばらついている。この要因としては、地質条件の違いのみならず、近接構造物の有無等により採用される掘削工法や対策工に違いがあるためと考えられる。これらのことから、土被り比1.0以下のトンネルでは、地表面沈下が顕著となる可能性が高いため、施工方法や対策工について十分な検討が必要であると言える。

図-10は天端沈下量と土被り比の関係を示したものである。図-9に示した地表面沈下と同様に、土被り比が概ね1.0以下の場合に天端沈下が顕著になっている。これらから、天端沈下を抑制できれば、地表面沈下の抑制も

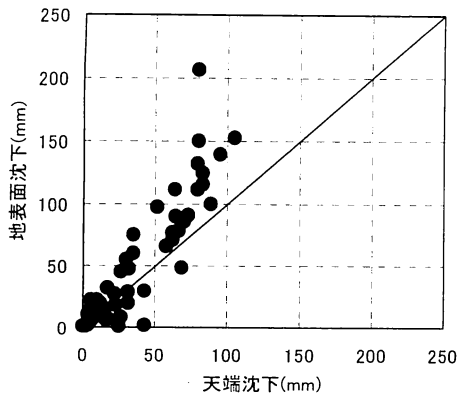


図-8 地表面沈下と天端沈下

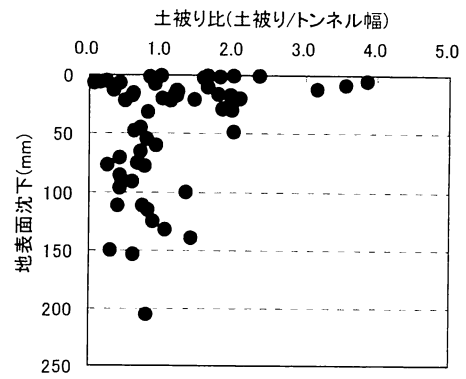


図-9 地表面沈下量と土被り比

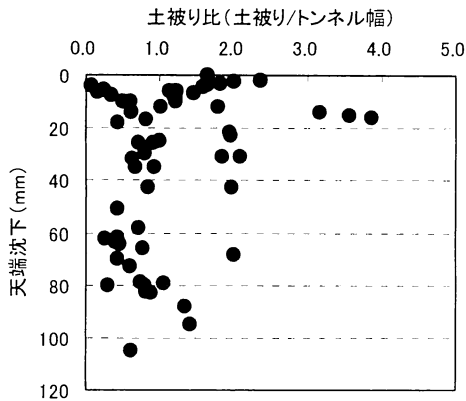


図-10 天端沈下量と土被り比

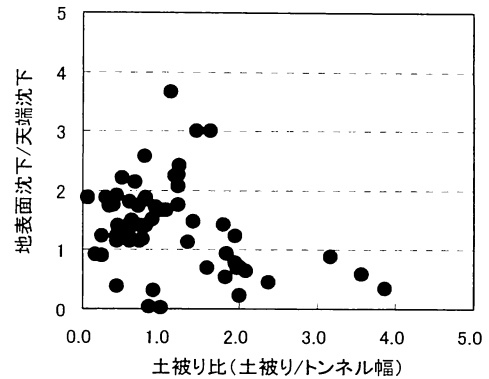


図-11 地表面沈下/天端沈下と土被り比

可能となることが示唆される。

図-11は地表面沈下と天端沈下の比に対する土被り比の関係を示したものである。図によると、土被り比が概ね1.0以下の範囲で、地表面沈下と天端沈下の比が概ね1.0～2.5の範囲に分布している。また、土被り比が小さいほど地表面沈下と天端沈下の比が大きくなるとは限らず、地質条件、施工方法や対策工の差異による影響が生じていると考えられる。傾向として、土被り比2.0を超えると、地表面沈下と天端沈下の比が1.0倍を下回る結果となっていることから、トンネル掘削による地表への影響は2D以下の場合に顕著になることが分かる。このことは、一般に土被り2D以下ではグラウンドアーチ形成が難しいと言われていることと一致している。

(4) 計測手法の現状と計測手法の選定の要点

(a) 計測手法の現状

地表面沈下の計測手法の現状について、過去10年（1998～2008年）に発表された既往の文献を対象とした調査を実施したところ、地表面沈下計測に関する具体的な記述があったのは53事例であった。

調査結果から、地表面沈下の計測手法について整理し、計測手法の現状を分析した。分析に当たり、文献中

に計測手法について特に明記されていないものをレベル測量やトータルステーションによる水準測量として集計すると、図-12のようになった。測量機器による手動計測は、従来からA計測などの日常管理で実施されており、全体の半数を占めている。また、25%の事例において自動追尾式トータルステーションによる自動計測が採用されていることも特徴的であり、この背景には、測量機器の性能向上に加え、近年の都市部での山岳工法採用による監視計測事例が増加していることなどが考えられる。

ここで図-13に、自動追尾式トータルステーションや沈下計による構造物の常時監視など、自動計測実施事例における地表条件について整理してみた。これによると、全体の90%が鉄道や道路、家屋、建物、ライフラインなどの重要構造物であり、自動計測が採用されるケースでは、これら公共性の高い保安物件に対する安全監視が目的として重視されていることがうかがえる。

(b) 計測手法の分類と選定の要点

施工時における計測手法の選定は、道路や埋設物、構造物など測定対象となる保安物件に対して、トンネル施工に伴い生じる挙動を正確かつ速やかに把握出来るよう留意する必要がある。また、計測機器や測定ポイントの

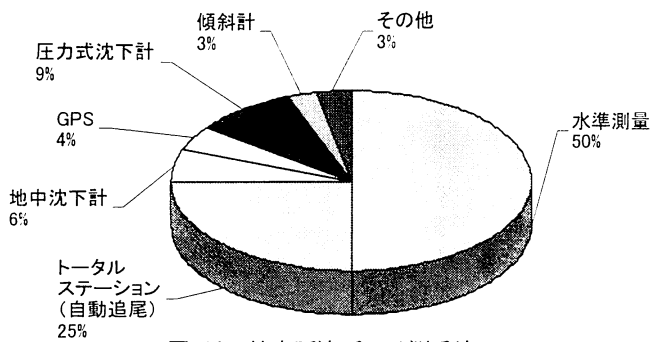


図-12 地表面沈下の計測手法

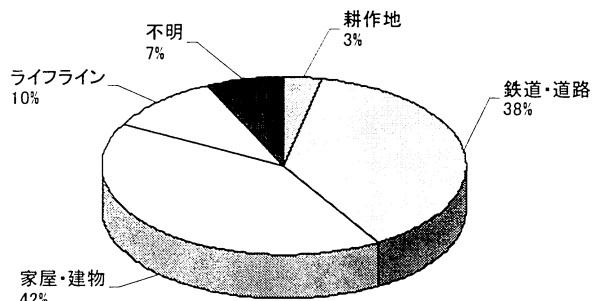


図-13 自動計測が実施された事例の地表条件

設置により、測定対象の構造や機能に支障をきたすことがないように十分に配慮し、地表条件や周囲の制約条件、許容値や必要精度、保安物件の公共性の高さによる監視の重要性などを総合的に勘案し、適切な計測手法を選定する必要がある。図-14に考慮すべき主な条件を示す。

前項の調査結果などを参考に、主な地表条件に対して比較的良く採用されている計測手法について表-4に整理し、その傾向から選定の要点を考察する。

①計測対象となる物件が公共交通機関である道路や鉄道の場合、車両または列車走行時に建築限界内へ立ち入ることが出来ないため、一般的なレベル測量や光波測量などでこれらの挙動を直接的に計測することが難しい。この様な場合は、路肩や軌道外路盤などの建築限

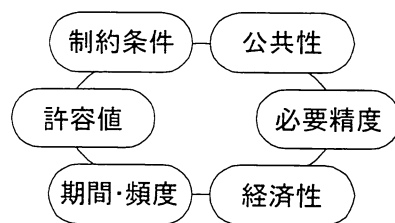


図-14 考慮すべき条件

表-4 主な地表条件に対して採用される計測手法

地表条件		道路 (路面)	鉄道 (軌道)	河川・水路	橋梁 (橋桁)	橋梁 (橋脚)	鉄塔	埋設管	家屋・建物	山林	耕作地	斜面・傾斜地	主な計測機器
地表面 の計測	レベル計測	△	△	△	△	○	○	○	○	△	○	△	レベル、標尺 電子レベル
	光波(TS)計測	○	○	○	○	○	○	△	○	○	○	○	トータルステーション、プリズム 自動追尾トータルステーション
	GPS計測	○	○	△	△	△	○		○	△	○	○	GPS計測システム
	地盤沈下計測	○	○	○							△		水管式沈下計 ワイヤ式沈下計
	*地盤傾斜計測	△	△									△	直読(気泡管)式傾斜計 電気式傾斜計
	*地表面伸縮計測											○	自記式伸縮計 電気式伸縮計
構造物 の計測	構造物沈下計測				○	○	○	○	○				水管式沈下計 ワイヤ式沈下計
	*構造物傾斜計測				△	○	○	△	○				直読(気泡管)式傾斜計 電気式傾斜計
地中 の計測	地中(層別)沈下計測	△	△			○	○	△	△	△	△	○	層別沈下計
	*地中傾斜計測	△	△			○	○	△	△	△	△	○	挿入式傾斜計 埋設型傾斜計
	*地下水水位計測	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	水位計
坑内からの計測	孔内沈下(傾斜)計測	△	△				△	○					孔内沈下計(水管式) 孔内水平傾斜計

* は間接的に地表面沈下に関連する計測項目

○: 良く採用 △: 場合により採用

界外に標点を設けたり、橋桁などに水管式沈下計などの変位変換器を連続的に設置し、電氣的に挙動を監視するなどの手法が用いられている。また、PC制御による自動追尾トータルステーションやGPSセンサなど、無人測量技術も採用されている。

- ②保安対象物件が建物や鉄塔、埋設管などの構造物の場合、その管理者と十分な協議を行った上で、建物や基礎などに沈下計や傾斜計などの変位変換器を直接取り付けられる場合が多い。これには、構造物の重要度による違いもあるが、構造物の計測管理では事前に設定された許容値や事前の影響解析などで厳しい管理基準となる場合が多く、自動追尾トータルステーションやGPSセンサなどでは必要精度が得られない場合があること、さらに市街地における計測や対象物が埋設管などの場合、見通しの問題などで光学的測量手法の採用が難しいことなどの理由が挙げられる。また、特殊な場合を除いてトンネル工事は一般に昼夜施工となることから、構造物の変状に対する常時監視の必要性なども計測手法選定の要点といえる。
- ③さらに制約の厳しい地表条件で直接地表面の計測が出来ない場合や、地下構造物同士の近接施工などでは、地中内（地盤内）の変位を計測する場合がある。これは地表もしくは坑内からボーリングを行い、孔内に計器を埋設して地中内の水平または鉛直変位を検出するものである。地中変位の計測は、地表の計測だけでは把握出来ないトンネル周辺地山の変位挙動を地層別に得られ、さらに通常のA計測では把握出来ないトンネル直上の先行沈下を捉えることができ、計測結果は予

表-5 地表面沈下に関わる許容値を定めた基準類

保安物件	計測項目	許容値の例	出典	発行年月
構造物※1	相対沈下量(mm)	15	日本建築学会:建築基礎構造設計指針	2010.10
	変形角(×10 ⁻³ rad)	1		
	総沈下量(mm)	35		
鉄道※2	軌間	+8,-6	鉄道総合技術研究所:都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル	2007.1
	水準	7		
	高低(mm/10m)	10		
	通り(mm/10m)	6		
	平面性(mm/2.5m)	7		
高速道路	わだち掘れ(mm)	25	NEXCO:設計要領第一集舗装編	2007.8
	段差(mm)※3	30		

※1) 支持地盤が砂層で、構造物基礎が独立で、RC構造の場合の最大値

※2) 新幹線で、速度275km/hの場合の整備基準値の例

※3) 横断構造物取付部の補修目標値

測解析結果などと比較、分析することで、塑性領域の把握や先行変位率の推定、先受け工など対策工の効果の検証などに用いることが出来る。

- ④建物や構造物に有害な影響を及ぼす要因として不等沈下（不同沈下）があり、これを表す指標として傾斜角による許容値や管理目標が示されている場合がある。このような場合、地表面沈下の計測と並行して建物や構造物などに傾斜計を取り付け、構造物に生じる傾斜角を直接計測する手法が採用される。
- ⑤地下水位計測は直接的な地表面の計測ではないが、トンネル施工に伴う地下水位の低下は圧密沈下の発生や地下水を伴った切羽崩落など、地表面沈下に大きく影響を及ぼす要因のひとつと考えられ、特に都市部における未固結含水地山などでは重要な計測項目のひとつである。

表-6 地表面沈下に関わる許容値の実績

用途	形式	許容値		用途	形式	許容値	
鉄道	RCラーメン高架橋 軌道	高低	7mm/10m	建築物	研究施設	相対沈下	10mm
		沈下	±9mm			変形角	1/1000rad
道路	国道	傾斜角	9/1000rad	学校	老人ホーム	沈下	30mm
		沈下	±50mm			傾斜角	1/1000rad
		沈下	30mm			沈下	40mm
		傾斜角	6/1000rad			傾斜角	1/1000rad
	県道	沈下	40mm	変電所 構造物	沈下	50mm	
		沈下	30mm		沈下	36-52mm	
	高速道路	沈下	50mm		傾斜角	3/1000rad	
		沈下	30mm		傾斜角	3/1000rad	
	道路(種別不明)	沈下	50mm	公園	沈下	50mm	
		沈下	20mm		鉄塔	相対沈下	5mm
沈下		20-22mm	傾斜角	1/1200-1/800rad			
傾斜角		1/1000rad	ライフライン	沈下	20mm		
沈下		30mm		沈下	200mm		
建築物		家屋	沈下	30mm	その他	ガス、電気・通信、上下水 地中埋設物	傾斜角
	傾斜角		1/1000rad	沈下			40mm
	沈下		10mm	その他	史跡 崩壊跡地 古墳群	沈下	30mm
	傾斜角		3/1000rad			沈下	65mm
	沈下		30mm			地すべり	100mm
	沈下		150mm			沈下	30mm
	沈下		17-20mm				
	沈下		20mm				

(5) 地表面沈下の許容値

(a) 許容値の定義

トンネルの地表に計測対象となる保安物件がある場合、トンネル施工に伴い対象となる保安物件の利用や機能に支障を与えない値を「許容値」と定義する。施工に際しての「管理値」は、許容値を超えないように計測管理に用いられる管理基準値と定義する。一般的に管理値は、以下のように設定される場合が多い。

管理レベルⅠ：管理レベルⅢの50% 管理レベルⅡ：管理レベルⅢの75%，管理レベルⅢ：許容値とする。

(b) 許容値設定の実績

地表面沈下に関わる許容値は、保安対象物の許容値、類似条件下での実績、事前予測解析結果などにより、対象物件ごとに設定される。表-5には、保安対象物として許容値が定められている基準類と許容値の一例を示す。また、表-6には、今回の調査で得られた地表面沈下に関する許容値の実績を示す。

表-5には、代表的な保安物件として、建築構造物、鉄道の軌道および高速道路の舗装に関わる基準値を記載した。山岳トンネル施工に伴う地表面沈下に関わる許容値は、これらの基準値を参考にして、関係機関と協議の上で設定されるのが一般的である。なお、同表に示す許容値は一例である。

次に、表-6に示した許容値の実績から以下のことが分かる。

- ①道路の沈下については、沈下量に関する許容値は20～50mmの範囲である。また、傾斜角は1/1000～6/1000radの範囲である。
- ②家屋の沈下量の許容値は、10mm～30mmの範囲であり、傾斜角は1/1000～3/1000radの範囲である。なお、沈下許容値150mmは地すべり地帯の施工事例である。
- ③研究施設の沈下については、相対沈下10mm、変形角1/1000radの事例がある。
- ④学校、老人ホーム、変電所およびその他構造物の沈下の許容値は概ね30～50mmであり、傾斜角は1/1000～3/1000radである。
- ⑤鉄塔基礎の許容沈下は、相対沈下で5mm、傾斜角で1/1200～1/800radの事例がある。
- ⑥地中埋設物の許容沈下としては、20～40mm（最大値200mm）の設定事例がある。
- ⑦その他として、史跡、古墳群等の保安物件に対して、沈下の許容値は30～65mmである。

また、地表面沈下に関する許容値の実績としては、過去に文献で取りまとめられているが、関係機関との協議の際には、表-6の実績も参考になると考えられる。

(6) 考察と得られた知見

- (a) 地表面沈下の計測が実施されたトンネルの地上条件として最も多いのが家屋や学校その他の施設であり、全体の49%を占めている。次いで道路・鉄道が28%、河川・水路・埋設管が10%（7事例）と続き、地上条件の重要度を反映し、既設構造物や道路、ライフラインなどの保安物件が存在する場合に地表面沈下計測が重視されている。
- (b) 地表面沈下の管理方法としては、地表面沈下の絶対値と傾斜角の2項目が一般的である。また実態としては、構造部の傾斜角を抑制することに比べ、地表面沈下の絶対量を抑制する方が難しい。
- (c) 地表面沈下の計測手法について整理すると、測量機器による手動計測が全体の半数を占め、25%の事例において自動追尾式トータルステーションによる自動計測が採用されている。また自動計測実施事例における地表条件について整理すると、全体の90%が鉄道や道路、家屋、建物、ライフラインなどの重要構造物であり、自動計測が採用されるケースでは、これら公共性の高い保安物件に対する安全監視が目的として重視されていることがうかがえる。
- (d) 計測手法の選定に関する提案として、文献調査結果などを参考に、主な地表条件に対して比較的良く採用されている計測手法について整理し、その傾向から選定の要点を考察した。
- (e) 地表面沈下の許容値として、一般的に管理値は、管理レベルⅠ：管理レベルⅢの50% 管理レベルⅡ：管理レベルⅢの75%，管理レベルⅢ：許容値と設定される場合が多い。
- (f) 地表面沈下に関わる許容値の実績より得られた知見を示した。

3. 予測・評価手法の現状と課題

(1) 実測値による地表面沈下発生状況の考察

地表面沈下の予測精度向上、効果的な対策工の選定にあたっては、地表面沈下の発生機構を想定することが重要である。ライブラリーでは模型実験、理論式、解析、施工時の実測データなどに関する既往の文献を参考に地表面発生機構の考察結果をとりまとめる予定であるが、ここでは施工時の実測データに関する文献の一部を整理した。

(a) 矢板工法の場合の地山挙動

矢板工法で施工されたトンネルにおける計測例を示す。地質はシラス、安山岩、土被りは約 1.6D（D：トンネル幅、10.7m）である¹⁾。切羽が測点に到達する 10m 手前

(-10m) から通過後 20m の地点に進むまでの、トンネルセンターにおける地山の沈下量の深さ方向分布を図-15 に、切羽が測点を 20m 通過した時点の地表面および深さ 13.66m (トンネル天端上方 3m 地点) の沈下量の水平方向分布を図-16 に示す。

図-15 からトンネルセンターにおける沈下量は切羽の進行に伴って増加しているが、トンネル近傍と地表面で大きな差はないことがわかる。特に切羽距離 10m~20m 間の沈下量増分は地表面で 30mm、深さ 12m 地点で 35mm となっており、トンネル上方の土塊が全体に沈下している状況が伺える。

地表面沈下の側方への広がりはありませんが、図-16 に示すように沈下が大きい範囲は概ねトンネル幅程度にとどまっている。

(b) NATMの場合の地山挙動

NATMで施工された2つのトンネル(新幹線断面)における地盤の変位計測例を、図-17、図-18 に示す²⁾。地質は前者が第四紀更新世の砂、シルト層、土被りは1.3D、後者は第四紀更新世の砂、シルト、砂礫層(扇状地堆積物)、土被り2.2Dである(D:トンネル幅、いずれも約10m)。

図-17 では、トンネルセンターの沈下量は、トンネル天端から3m離れた地点で約3mm、地表面から深さ3mの地点で約4mmとなっている。この区間では沈下量は深さによって大きな違いはなく、土塊全体が沈下していることがわかる。また、トンネルセンターから水平方向に1.5D程度以上離れた地点の沈下量は非常に小さくなっており、矢板工法で施工されたトンネルと同様の傾向となっていることがわかる。

図-18 では、トンネル天端からの距離が0.5D以内における変位の絶対値、切羽の進行にともなう変位増分ともにトンネルに近いほど大きくなっており、トンネル直上の土塊全体が剛体変位(沈下)している状況とはなっていない。ただし、トンネルからの距離が0.5D地点から地表面にかけての土塊は一体となって沈下している様子が伺え、図-17と同様の傾向となっている。

(c) 地表面沈下の発生状況

土被りが大きい場合にはトンネル横断面内にグランドアーチが形成され、掘削による沈下はトンネル周辺部にとどまる。これに対し、土被りが小さい場合にはグランドアーチが形成されず、掘削による沈下が地表面まで直接及ぶことが予想され、前述の計測結果はこの考えに合致するものである。この結果、小土被り部における地表面沈下には土被り比との関連が見られることになる。トンネル坑内の(地表面沈下/天端沈下)と土被り比の関係の計測例を図-19 に示す³⁾。土被り比が1.0以下になる

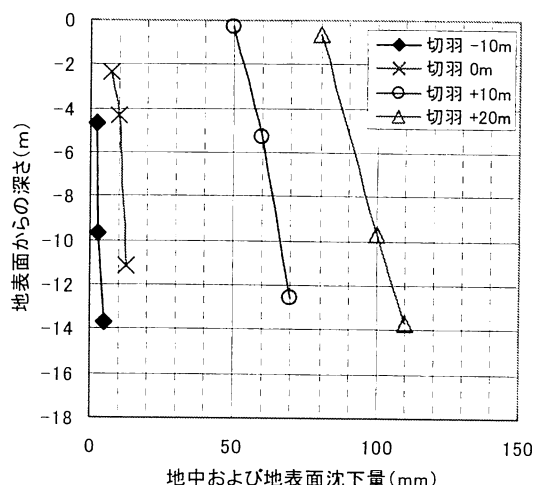


図-15 深さ方向の沈下量分布の推移(矢板工法)

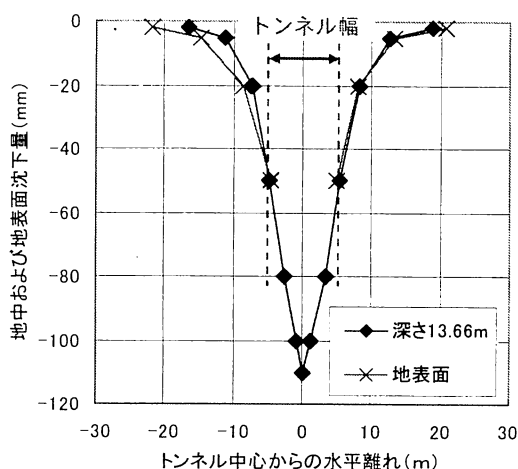


図-16 沈下量分布(矢板工法, トンネル横断方向)

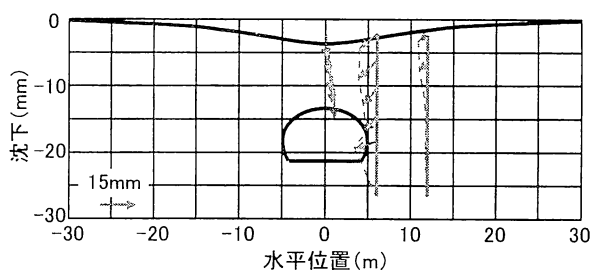


図-17 沈下量分布(NATM, トンネル横断方向)

と天端沈下が地表面に伝わる割合が大きくなっており、土被りが小さい場合にはグランドアーチが形成されにくくなっている様子が伺える。

土被りが1.3D~2.2D、 ϕ が卓越した地山という限られた計測結果からの推測となるが、土被りが小さい地山においてNATMで施工されたトンネルの場合、沈下量分布は、トンネル近傍(距離0.5D以内)とそれ以外の区間で異なった傾向を示すものと考えられる。これは、村山・松岡がアルミ棒積層体により地山をモデル化した

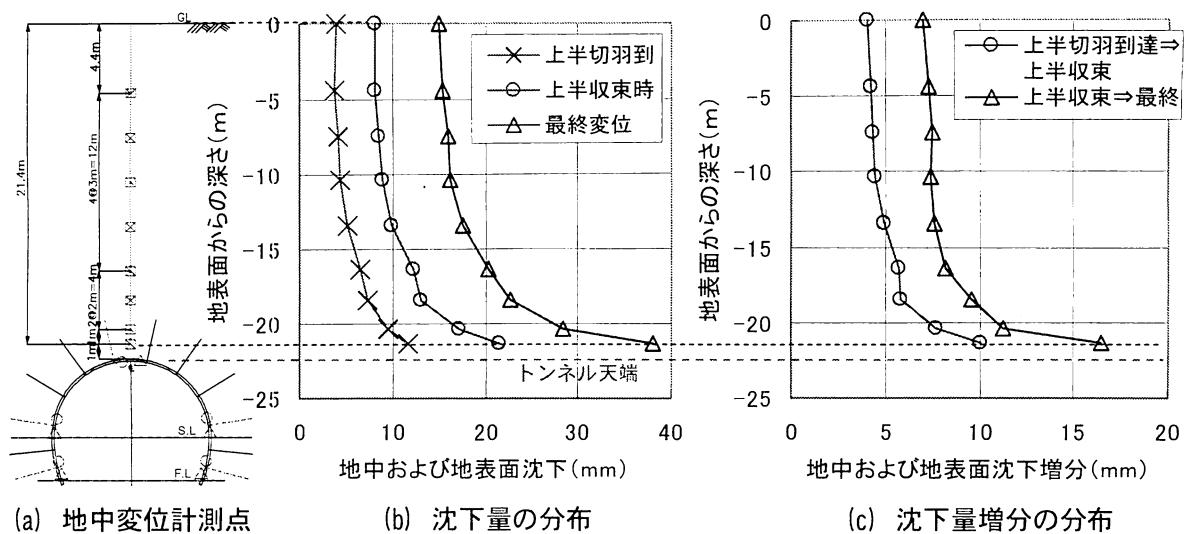


図-18 地盤の変位状況

降下床実験に基づき提案した図-20 に示す形態に近いことがわかる⁴⁾。1次領域は降下床に追従して沈下する部分でトンネル上部近傍に対応する。すなわち、0.5Dまでの範囲では、沈下の絶対値、切羽の進行に伴う沈下の増分が0.5Dより離れた領域よりも大きくなっており、この部分が1次領域に対応していると考えられる。また、実測データでは、トンネルセンター上方では、トンネル天端から0.5Dより離れた領域の沈下量は深さ方向にあまり変化しないことが確認できた。この領域が2次領域に対応していると考えられる。その水平方向の幅は、静止領域よりも沈下量が相対的に大きいトンネルセンターから左右1.0~1.5Dのまでの範囲と考えることができる。静止領域は沈下が小さい領域である。実測データより、トンネルセンターから左右1.0~1.5Dよりも離れた領域と考えることができる。

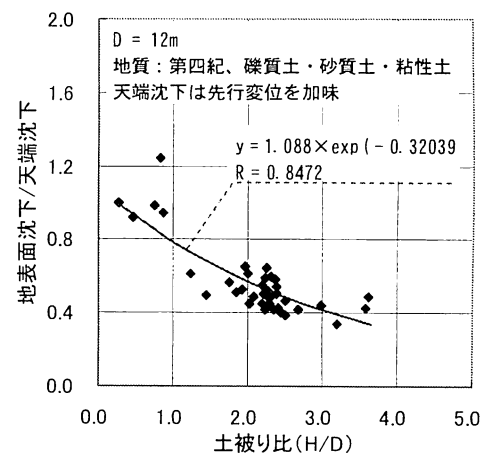


図-19 地表面沈下/天端沈下と土被り比の関係

(2) 理論および実験による予測・評価

(a) 既往の研究の概要

NATM 以前のいわゆる在来工法時代ではあるが、地表面沈下の原因や影響因子等に関して明らかにしなければならない項目を当時次のように挙げている⁵⁾。

①沈下の原因および発生機構と現実の沈下現象との対比

- i) 影響範囲および最大沈下量
- ii) 沈下の形状
- iii) 沈下現象の経時的変化

②沈下予測のための沈下に影響を及ぼす因子（地質、土被り、施工方法など）およびその重み付け

③沈下の原因、発生機構を考慮に入れた適切な対策工法の提示

その後、山岳工法における中心的な工法は在来工法か

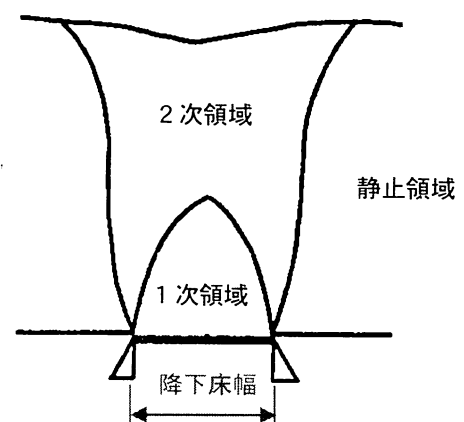


図-20 降下床実験において観察された三つの領域

ら NATM へと推移し発展してきたが、現在では、都市部山岳工法として従来はシールド工法が対象としてきた土被りが小さく地山の固結度が低い地山にも適用される

表-7 本学会で概観した既往の予測・評価式

手法	解明した機構・現象		紹介事例
理論	最大沈下量		Limanov
	沈下形状・曲線	トンネル横断	Jeffery 木山・藤村 正規分布曲線 (Peck ほか)
		トンネル縦断	近似式 西村ら
		三次元	Atterwell & Woodman New & Bowers
模型実験	沈下メカニズム		島田
	地下水位の影響		小嶋ら
	補助工法効果	鏡ボルト	高橋ら
		AGF	武内ら
		サイドパイル	北川ら

までに至っている。この要因としては切羽の安定化、地表面沈下の抑制等を目的とした補助工法の積極的な開発と施工への適用が挙げられるが、これに伴いここ数年は補助工法による地表面沈下抑制効果に関する研究成果が多くなっている。

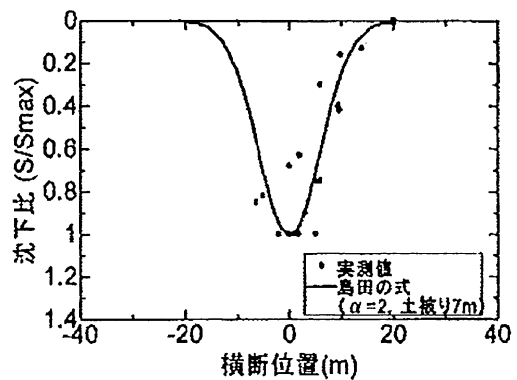
本来、適切な補助工法の選択にあたってはトンネル掘削による地山の挙動を含めた地表面沈下の発生メカニズムを明らかにし、それをふまえて補助工法の沈下抑制効果を明確にする必要がある。しかしながら、掘削による地表面沈下は地形、地質、地下水などの要因が複雑に影響するため、地表面沈下メカニズムおよび補助工法の効果については明確に分類できていないのが現状である。このような背景から、解明されるべき地表面沈下に関する項目には、補助工法の種類と地表面沈下抑制効果の影響を加えて、沈下の原因、影響因子さらにはメカニズムまでも明らかにしなければならないと考えられる。

本学会では、山岳トンネルを対象とした地表面沈下に関する課題を克服するために行われた既往の研究のうち、代表的なものとして表-7 に示すものを取扱い、理論的バックグラウンドや実験手法等について概観した。ここに示した既往の予測評価手法は、NATM が普及する以前に研究されたものが多く、さらに近年では理論解析や模型実験で仮定されるような理想的で単純な条件とはかけ離れた複雑な条件下でのトンネル施工が増加しており、既往の予測評価手法を直ちに現場に適用することが困難なケースが多くなってきている。しかし、これまでの研究により明らかにされた地表面沈下のメカニズム等は、現代の NATM においても地表面沈下メカニズムの解明に資する知見を有するとともに、それを応用することで、補助工法の効果に関する評価⁶⁾や、めがねトンネル施工時の地表面沈下の予測評価⁷⁾等にも適用できる可能性があること等が指摘されている。

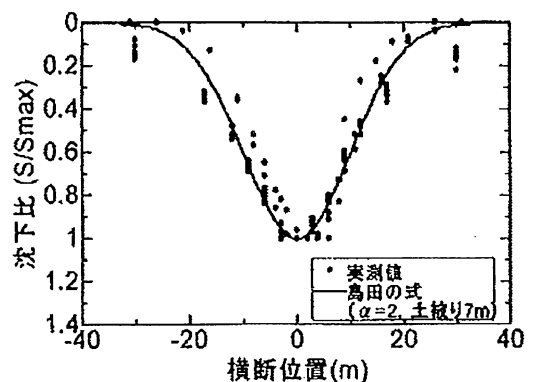
表-8 トンネルの概要⁸⁾

トンネル名	延長 (m)	平均土被 (m)	地質	主な補助工法
五戸	1,090	22	第四紀	フルパイル
六戸	3,810	13	更新世	デューブウェル(DW)
三本木原*	1,265	23	の砂	DW, 長尺鋼管先受
牛鍵	2,070	8	層・シルト層を主体	地盤改良, DW 鋼管鋼矢板先受 サイドパイル

※：三本木原トンネルについてはNATMで施工される区間のみ



(a) 土被り 0.5~1D



(b) 土被り 1~2D

図-21 地表面沈下曲線⁴⁾

(b) 島田式の NATM への適用

北川ら⁸⁾は、小土被り土砂地山における NATM トンネルで、実際に計測した地表面沈下の横断方向分布を島田式と比較している。計測した 4 トンネルの地質は、第三紀鮮新世から第四紀更新世にかけて堆積した細粒分含有率が低く粒径の均一な未固結の砂層を主体として、同時期に堆積したシルト層が互層として分布している。また、表層には八甲田山由来の火山灰層が堆積している。対象としたトンネルの概要は表-8 のとおりである。

図-21 は横断方向の地表面沈下計測の結果である。縦軸については、沈下量 S を断面の最大沈下量 $S_{\max}$ により除して正規化し、沈下比として示されている。図中には島田⁹⁾の提案式による予測沈下量が実線で示されている。

$$\begin{aligned} S &= S_0 e^{-\alpha X} \\ X &= (x/z)^2 \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 S は地表面沈下量、 S_0 はトンネル中心直上における地表面沈下量、 x はトンネル中心からの水平距離、 z はトンネル中心における土被りである。 α は地質によって定まる定数で、シルト質の砂質土で $\alpha=2\sim6$ 、粘土で $\alpha=0\sim4$ とされている。実測値は概ね $\alpha=2$ で近似できており、シルト質の砂質土のうちでも比較的粘土に近い分布形状となっている。

(c) 補助工法の効果に関する評価

Coulter ら⁸⁾は、地表面沈下の横断方向分布が正規確率分布に従うとする Peck の式¹⁰⁾で近似し、地山ロス率 V_l (%) を算出して補助工法の効果の評価している。地山ロス率は、地表面沈下曲線を積分して求めた沈下面積（単位奥行きあたりの沈下体積）と掘削断面積の比として定義され、次式で表される。

$$V_l = \frac{\sqrt{2\pi} i S_{\max}}{A_t} \times 100 \quad (2)$$

ここに、 $S_{\max}$ は最大沈下量、 i はトンネル中心から沈下変曲点までの距離である。 A_t は掘削断面積である。補助工法採用時の計測結果をもとに算定した V_l を、他の工法における V_l （例えば¹¹⁾）と比較することで、補助工法の効果について議論されている。

(d) 理論・実験による予測評価式のまとめ

上記に一部例示したように、理論式や経験式を用いて実施工現場における地表面沈下を予測・評価した事例は多く存在する。しかしこれらの式は、多くの仮定に基づいて抽象化した理論に基づいて定式化されているため、適用範囲は限定的であり、複雑な地形・地質条件や掘削工法等まで再現することは困難である。

近年では、計算機の高度化と汎用化さらにはその計算

機で扱うことのできる計算コードの飛躍的な進歩を背景として、複雑な地形や施工方法をモデル化した数値解析手法が実用化されている。一方で、数値解析手法も多く、の仮定に基づいて成り立っており、なお実現現象を再現しきれない部分も課題として残されている。山岳工法の適用条件の広がりや工法の多様化が進む現在においては、数値解析手法を用いつつも、ここで述べたように理論や実験、実測データに基づいた予測評価式も利用しながら、総合的に予測・評価することが重要となってくると考えられる。

なお、本部会の成果品となるトンネルライブラリーにおいては、表-7 に示した予測・評価式についてそれぞれ概説するとともに、実際に NATM トンネルに適用した事例をいくつか紹介する予定である。

(3) 数値解析による予測評価

(a) 地表面沈下の予測手法の課題と事例の整理

地表面沈下予測評価 WG では、数値解析手法の課題について議論し、それぞれの課題に対応した検討事例を近年の文献より収集し、その解析事例を整理した。表-9 に課題に対応する事例を示す。ライブラリーにおいては、収集した解析事例の一覧表を提示するとともに、実務への適用性が高いいくつかの事例について紹介することを考えている。

(b) 地表面沈下に着目した解析領域の設定とリバウンド問題について

一般に、解析領域は「地盤は無限に広がっていると考え、境界からの影響を取り除くために解析領域は十分大きくとる」という思想を基本とし、下方領域については 2~4D (D: トンネル代表径) 程度、側方領域については 4~5D 程度とする場合が多い。しかし、土被りの浅いトンネルを対象とした解析では、「リバウンド（トンネルの浮き上がり）」が課題となることが知られている。つまり、解析領域の設定によってはこのリバウンド現象により地表面沈下量を過小評価する可能性が懸念されるため、側方・下方領域の設定に工夫がなされる。

ここに、下方領域を変数とした地表面への影響を定量的に評価した事例を図-22 に示す。この検討結果は、地表面沈下量を評価する上で解析領域の設定には十分な注意が必要であることを示している。

(c) 二次元解析と三次元解析の違い

トンネル掘削や地表面沈下の現象は、本来三次元的な事象であるため三次元解析で検討することが望ましい。しかし、時間的制約のため現在でも二次元の力学問題に置換する特性曲線法を利用して解析される場合がある。

このとき、二次元解析を実施する上で注意しなければならない点は、「特性曲線法による二次元解析が必ずしも三次元逐次掘削解析と同等の結果となるわけではない」ということである。

この点について検討した事例を紹介する。この事例は、三次元解析結果と応力解放率等をパラメータとした二次元解析結果を比較することで、トンネル掘削時の挙動に対する二次元解析の適用性を検討している。検討結果を図-23に示すとともに、次のことが指摘されている。

- ・ 三次元解析結果に一致する応力解放率は、着目点の相違(先行変位か最終変位か、地表面沈下か天端沈下か)によって異なる。
- ・ 三次元解析結果に一致する応力解放率は「一次インパートの閉合時期」、「支保工剛性」、「地山のモデル化」、「物性値」、「土被り」等によって影響を受けるため、二次元解析はあくまでも大まかな目安を得るものである。

(d) 地表面沈下における情報化施工について

一般に、トンネルにおける情報化施工では、調査やそれに基づく解析などを用いた事前検討結果と施工時の計測結果との「整合性」や「差」を観測し、必要に応じて対策を実施する。この事前検討との「差」を評価するため、施工前に許容値を設定しておくのが一般的である。施工中に得られる観察・計測結果は、この許容値と比較することで「差」の大きさや想定されていた挙動との相違が評価される。「差」が大きい場合には、設計の見直しも含め、種々の対策が検討・実施される。近年、この情報化施工の予測手法において、数値解析が採用されることが多くなってきている。

施工中の地表面沈下挙動を数値解析を用いて予測・評価する場合、はじめに、施工中の観察・計測結果と事前検討との「差」を確認する。必要に応じて物性値の見直し、既施工区間や未施工区間の沈下を予測し、「適切な支保パターンや補助工法の検討」を実施する。最後に、予測解析結果から許容値の見直しを実施し、施工中の観察・計測結果をフィードバックする作業を繰り返す。

地表面沈下に関連してトンネル軸方向の地表面の傾斜変化が問題となる場合、解析において二次元あるいは三次元モデルを選定するかにより、その後の評価方法が異なることや評価そのものが難しくなる場合があるので注意が必要である。

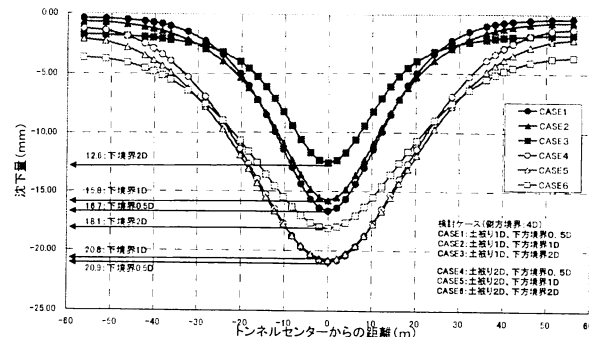
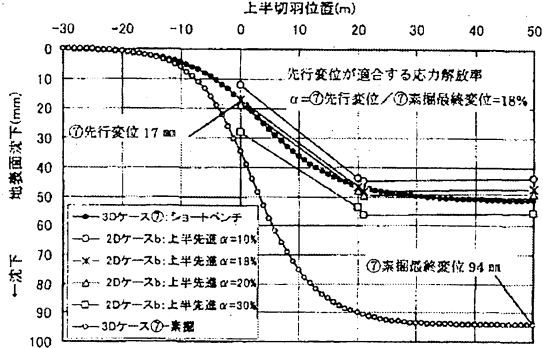
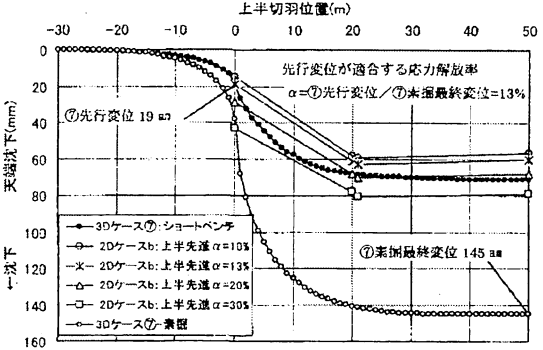


図-22 下方境界と地表面沈下量の検討事例



【地表面沈下に着目】



【天端沈下に着目】

図-23 ショートベンチ工法における二次元解析と三次元解析の比較

地表面沈下の予測・評価を実施する際に、解析モデルの次元の違いによる特徴を表-10に示す。また、以下にその違いによる特徴を述べる。

②先行変位の評価

二次元解析では、切羽到達時点での最終先行変位量を把握することが可能である。三次元解析を採用した場合、切羽の進行に伴う経時的な変化を把握することが可能となる。ただし、二次元解析においても1掘進毎に細分化した解放率を用いることで、経時的な変化を予測することが可能となる場合もある。

③最終沈下量の評価

地表面沈下量の評価は、解析結果としての鉛直変位を

表-9 地表面沈下予測手法の課題と解析事例

数値解析手法の課題	解析事例	概 要
①解析次元数の決定、 解析領域、境界条件	・ 解析領域の地表 沈下への影響検討 事例 ¹²⁾	・ 解析領域の設定が地表面沈下の計算結果に与える影響をパラメータ 解析により検討 ・ 解析領域を設定する際の留意点を検討
	・ 一次インバートの 閉合距離が地表 沈下を与える影響 の検討事例 ¹³⁾	・ 閉合距離が地表面沈下へ与える影響について検討するために三次元 掘削解析を実施 ・ 特に、地山の強度特性や長尺フォアパイリング、長尺鏡ボルト等の 補助工法の有無、あるいは一次インバートの1シフト当たりの施工 延長が地表面沈下を与える影響について考察
②すべりなど不連続挙 動の評価	・ ひずみ軟化モデ ルを適用した事例 ¹⁴⁾	・ 共下がりのような局所的な地表面の沈下の評価手法の一つとして、 せん断ひずみ量に応じたせん断剛性の低下（誘導異方性の発現） と、強度定数の低下（軟化現象）を力学モデルに導入した非線形 FEM解析 ・ 土被りの浅いトンネルにひずみ軟化モデルを適用し、その優位性について検討
③計測データ分析による 再現解析	・ 二次元解析による 施工時(事後)の 再現解析の事例 ¹⁵⁾	・ 2次元FEMにおいて、掘削過程の表現方法が解析結果に与える影響 を、計測値と比較して検討 ・ 2次元解析において、切羽進行を表現するいくつかの海外の手法を紹介
④施工中の管理手法および 対策工選定への数 値解析の活用	・ 二次元有限要素 法による沈下影響 予測事例 ¹⁶⁾	・ 対策工の有無による地表面沈下量の比較検討 ・ 類似条件のトンネルの計測データと解析結果を比較
	・ 地下水を考慮した 解析事例 ¹⁷⁾	・ 事前設計段階においてトンネル通過に伴う地表面沈下量を、FEM掘 削解析を用いて予測し、近接構造物に対する影響を評価 ・ 目標値を満足するために必要な改良幅を浸透流解析により決定
	・ めがねトンネルの 解析事例 ¹⁸⁾	・ センターピラーを共有しためがねトンネルについて、数値解析を用 いて、支保部材、周辺への影響、施工時の安全性を確認しながら設計・ 施工を実施した事例

採用することが多い。トンネル線形に平行方向の変位（トンネル縦断の水平変位）が卓越するような問題においては、二次元解析ではその変位は再現することができない。このような問題においては、解析次元による差が生じる可能性がある。

④、⑤ 傾斜角の評価

三次元的な傾斜方向が問題となる場合は、二次元解析での対応は難しい。トンネルの掘削影響が横断方向に卓越していると判断できる場合は、二次元解析での評価は可能であると判断する。

⑥切羽面の評価

切羽の挙動（例えば、切羽面の押出し量）の違いにより、特に小土被りの場合は地表面への影響が懸念される。このような問題は、現象が三次元的であることから、三次元解析での対応が望ましい。

表-10 解析次元の違いによる特徴の比較

項 目	二次元	三次元
① 解析時間	○	△
② 先行変位量の評価	○	○
③ 最終沈下量の評価	○	○
④ 傾斜角（横断）の評価	○	○
⑤ 傾斜角（横断以外）の評価	×	○
⑥ 切羽面の評価	×	○
⑦ 切羽前方の評価	△	○
⑧ 加背割の影響評価	△	○

4 地表面沈下対策の現状と課題および合理的な対策工選定について

(1) 地表面沈下対策の現状

近年の地表面沈下対策の現状を把握するために表-11に示す文献をもとに事例を調査した。これらの文献より地表面沈下対策を実施している事例を抽出し、データの整理を行った。調査結果について以下に示す。

(a) 対策工が実施される環境

事例調査結果より、地表面沈下対策が実施される土被りは20m以下の場合が多く、全体の約77%を占めている。一般に、小土被りでは地質が脆弱なため、グラウンドアーチの形成が不十分となることが想定され、トンネル掘削に伴う地表構造物への影響が懸念されるためと考えられる。地山条件については変形係数が50MPa以下の場合が約73%を占めるが、地上の構造物の種類や土被り等によっては変形係数500MPa以上であっても対策が実施される場合も約4%あることが調査結果より示された。

対象構造物はさまざまであるが民家、道路が最も多い。特に民家を対象とする場合には先受け工、鏡面補強および脚部補強を組み合わせより慎重な対策を講じる例が多い(図-24)。また、道路やライフラインでは種々の組合せの事例が採用されており、道路の等級やライフラインの重要度さらには地山の性状などにより対策工の組合せが検討されていると考えられる。

(b) 対策工パターンの傾向

地表面沈下対策工の工種としては先受け工が採用される事例が多く、調査対象の約94%を占めている。これは、天端の安定確保や天端沈下抑制が直接的な地表面沈下対策であるためと考えられる。ただし、先受け工を単独で採用する事例は少なく、鏡面補強や脚部補強などを併用する場合が多い。併用パターンとしては先受け工、鏡面補強、脚部補強のすべてを組み合わせる事例が最も多い(図-25)。これらのことから、地表面沈下対策では天端の安定のみでなく、鏡面の安定確保や地耐力確保の対策が重要であるといえる。

また、先受け工はL=6.0m以上(パイプルーフを除く)のフォアパイリングがおよそ半数を占めることが把握された。鏡面の補強対策としては鏡吹付け、鏡ボルトが挙げられ、近年では、長尺鏡ボルトの採用事例が増加している。長尺先受け工や長尺鏡ボルトは先行変位を抑制する観点において効果的な対策であると考えられる。脚部補強としては脚部ボルトや脚部パイルが約44%、仮インバートが約30%あり、ウィングリブ付きの鋼製支保工の採用事例も多い。なお、補助ベンチ付き全断面掘削工法において仮インバートにより早期閉合する場合には

ほとんど鏡ボルトが併用されている。これは仮インバートで早期閉合する際、切羽解放面積が大きくなるため、

表-11 事例調査文献一覧

文 献 名	発 行	調 査 期 間
施工体験発表会	(社)日本工術技術協会	1993～2009年
土木工学論文集 報告集	(社)土木学会	1994～2009年
土木と地下	(株)土木工学社	1994～2009年
土木技術	(株)土木技術社	1997～2009年
土木施工	(株)山海堂	1997～2009年

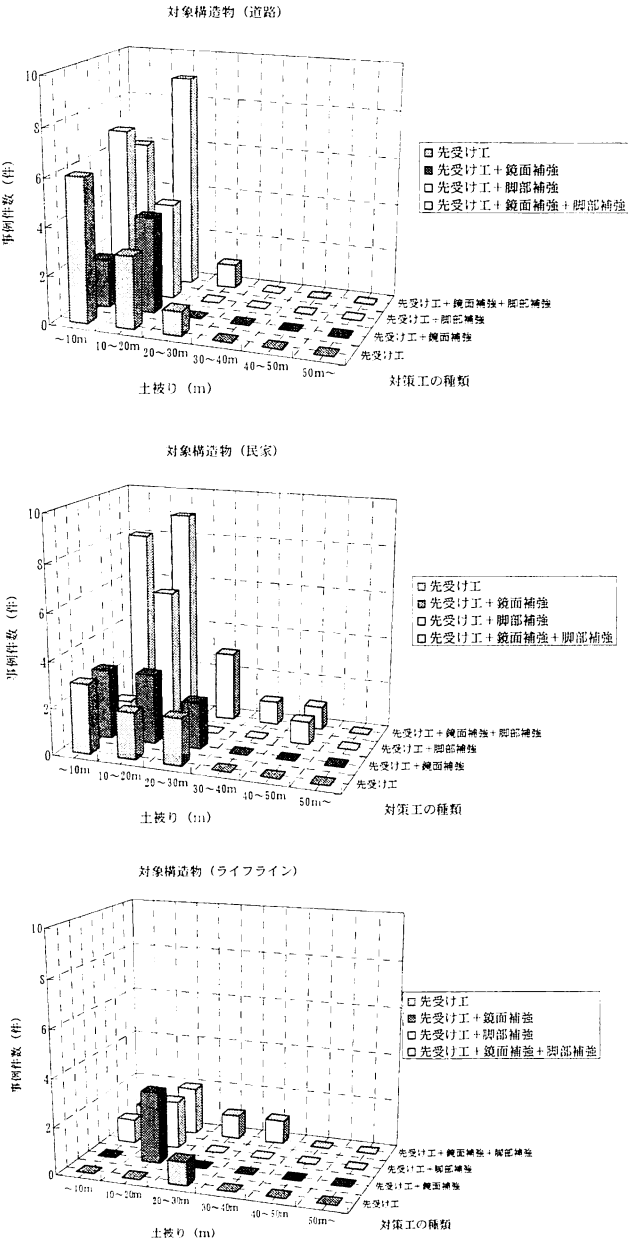


図-24 対象構造物別の対策工の組み合わせと土被り

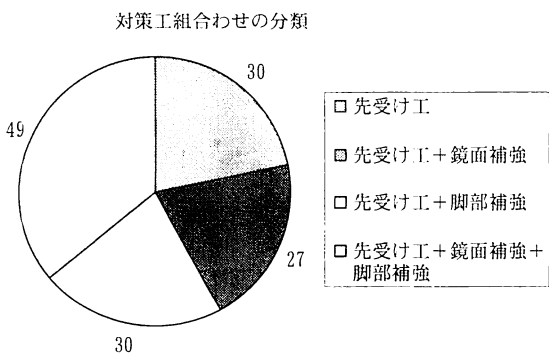


図-25 事例調査における対策工の組合せの種類

鏡面および前方地山の不安定化を抑制する対策として適用されるものと考えられる。

(2) 地表面沈下対策工の検討における要因と課題

地表面沈下対策工を選定する上で関係する要因にはさまざまな側面があり（表-12），これらは相互に関係し合う。合理的な対策工を選定する上では，規制や施工上の制約などの条件を整理した上で費用対効果も考慮しながら検討することとなる。

前述の調査結果のように，地表面沈下対策は複数の工法を組み合わせる用いられることが多く，対策工の選定においては，地表面沈下発生要因毎に，その要因を抑制するための効果的な対策を検討することになる。そのためには対策工を分類し，各工法に期待できる効果がある程度定量的に評価することが望まれる。対策工の効果は，類似条件の施工実績を収集・整理して参考にする他，事前の地質調査結果にもとづいた数値解析を用いて予測する方法もある。数値解析の実用性，有用性は過去の検討実績で裏づけされているものの，設計への適用には留意すべき点や課題が多い。対策工選定上の課題を選定要因別にまとめると表-13 のようになる。事前に得られる地山情報の限界，対象地山における効果発現の不確実性を考慮すると，事前に最適な対策工を設計することは難しい。

したがって，より合理的な対策工を選定するためには施工開始後の新たな情報反映，効果の確認および計測結果のフィードバックといった段階的な検討が必要であると考えられる。検討段階としては，事前情報にもとづいて検討する段階，施工開始時のより詳細な最新情報を盛り込んで検討する段階，施工状況をフィードバックして検討する段階に加え，将来の施工・工事のために実績を評価・整理する段階が求められる。

(3) 地表面沈下対策工の分類と目的

地表面沈下対策工としては，掘削工法による対策と補

表-12 対策工選定に関わる主な要因

要因	具体例
規制	近接構造物，許容沈下量
地山条件	地形，土被り，地山特性，地下水等
施工上の制約	用地，アクセス
発生原因	地山の緩み，地耐力不足，地下水，圧密
工法，手法	補助工法（天端安定対策，脚部沈下対策，鏡面安定対策），掘削工法（加背割，早期閉合）
対策工の効果	地山への適用性，計測管理
設計手法	数値解析，類似条件の実績，計測値結果の反映
経済性	工費，工期

表-13 対策工選定上の課題

要因	課題と対応方法
規制	環境条件を整理することで，必要な対策やその要求レベルが明確にされる。対策工の効果や経済性によっては規制に関する見直しを協議することもあり得る。
地山条件	対策工の効果を予測する上で重要である。調査・設計段階で得られる情報に限界があるため，施工段階で得られる情報を随時反映して精度を高めることが必要となる。
発生原因	観察，計測結果をもとにトンネルの挙動および地表沈下を引き起こすメカニズムを確認するとともに想定外の現象についても評価することが重要である。
工法，手法 対策工の効果	どの対策がどの程度効果があるか，対策工効果の順位づけは工法選定の際に最も直接的に関わる要因であると同時に最も事前評価が難しい要因でもある。段階的な検討・効果確認が有効である。
設計手法	地山条件に応じて適切な手法を選定することが重要であるとともに，必要に応じて施工時に得られる情報を反映して精度を高めることが大切である。

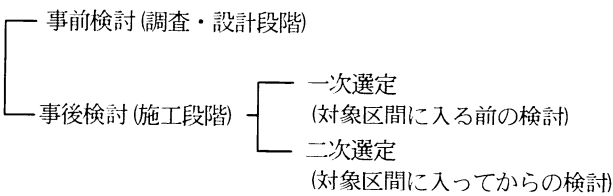


図-26 検討(対策工選定)段階の区分

助工法による対策に大別できる。

掘削工法による対策は，地表面沈下対策という観点から掘削工法を選定する手法であり，仮インバートを用いた断面閉合を行う方法，ベンチカット工法においてインバートによる早期閉合を行い，地盤の支持力などを確保する方法，側壁導坑先進工法を採用し，側壁コンクリートによって本坑掘削時の脚部の支持力を確保する工法などがある（表-14）。

表-14 掘削工法による対策

目的	掘削工法による対策工の例
断面閉合	仮インバート
早期閉合	ベンチ長の短縮およびインバートによる閉合
脚部補強	側壁導行先進工法による側壁コンクリートの構築

表-15 補助工法による対策

目的	補助工法による対策工の例
直接的沈下抑制	長尺先受け工, 脚部補強工, 鏡面補強
地山改良	ジェットグラウト, 薬液注入, 深層混合改良
その他の対策	止水注入, 坑外からの垂直縫地ボルト

また、補助工法による対策は、先受け工、脚部補強工、鏡面補強などの補助工法により地表面沈下の抑制効果を直接的に期待する手法、地山自体を薬液注入などで改良し地山の安定性を図る手法などがある（表-15）。さらに、地山条件や掘削断面の形状寸法により選定した掘削工法だけでは掘削時における切羽の安定性が問題となる場合、掘削工法と補助工法を併用する場合が多い。

(4) 地表面沈下対策の選定

地表面沈下対策のための工法の適用にあたっては、地山条件、沈下の影響を受ける地表、地中構造物などの調査を行い、各工法の効果、適用性、周辺環境に与える影響およびトンネル工事工程、施工方法などを十分考慮した上で選定しなければならない。施工時においては、変化する現場状況・目的に応じた適切かつ迅速な対策工の選定が要求される。対策工の選定を行う際には、切羽観察記録や計測データなどより現場状況をよく吟味し、各種の対策工の施工条件や費用対効果などについて比較検討する必要がある。対策工の選定では、類似条件における実施事例を参考に比較対象となる対策工の選定を行う経験的手法や FEM などを用いた数値解析手法が用いられている。

対策工の選定に関して、調査・設計段階においては対策工に要求される効果の程度や施工上の制約などから、ある程度対策工が絞り込まれる。しかし、事前に得られる地山情報が限られることや、対象とする地山での効果の発現には不確実性があるので、最適な工法とその諸元を決定することは容易ではない。また、トンネルの施工開始後に新たな情報や条件の変更が生じることもある。より適切な対策工を選定するには、調査、設計、施工の流れの中で条件、適用性、効果を確認しながら、段階的に検討することが大切である。対策工選定に関わる検討を時間的に段階分けすると、大きくは図-26 のように区分される。参考として地表面沈下対策の一次選定時（施工段階）における対策工法選定までの一般的な全体の検討の流れを、図-27 に示す。

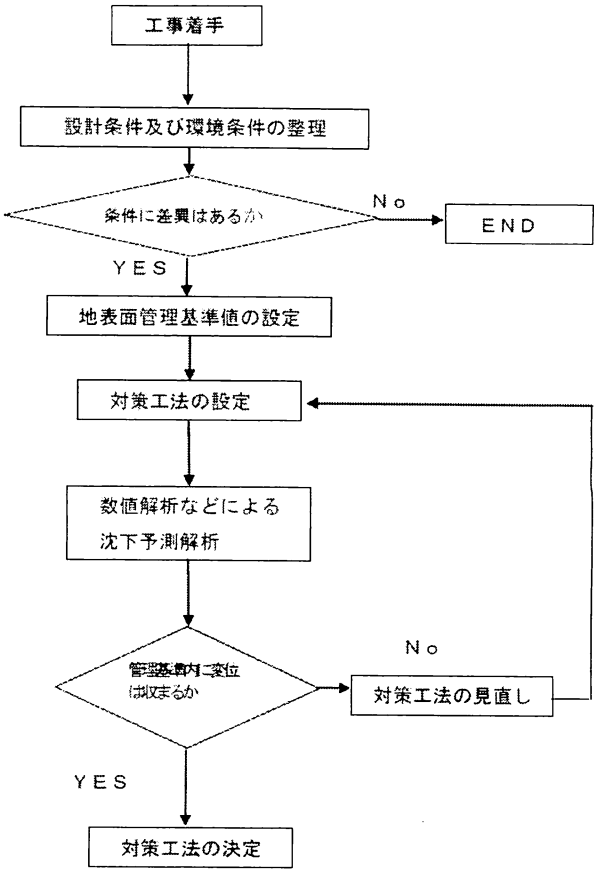


図-27 対策工の一次選定（施工段階）の流れ

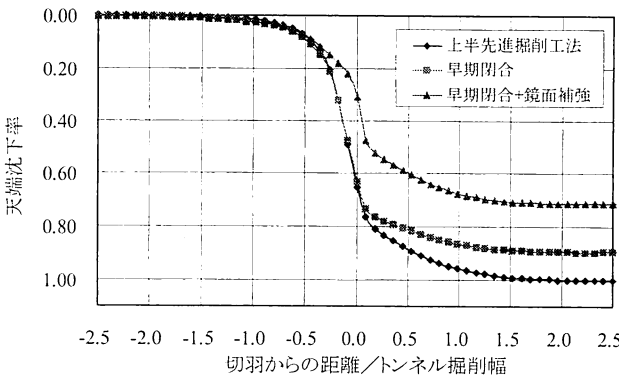


図-28 三次元解析による対策工の効果評価例

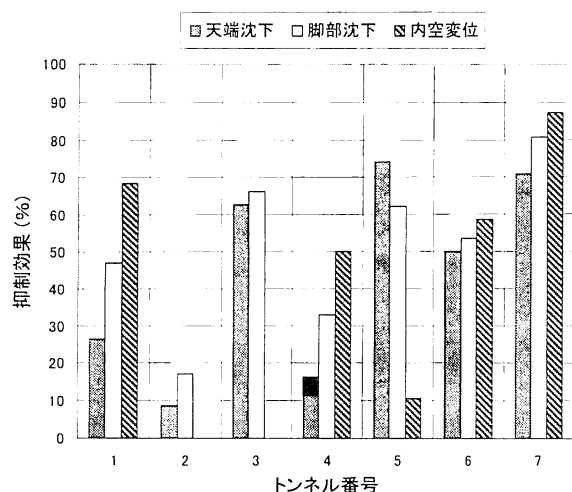


図-29 早期閉合の変位計測抑制効果例

表-16 事例調査による地表面沈下対策としての早期閉合事例

期間	早期閉合事例数	鏡面補強との併用事例数
～2000	0	0
2001～2005	5	3
2006～2009	23	20

※事例調査対象文献

・施工体験発表会	(社) 日本トンネル技術協会	1993～2009 年
・トンネル工學論文集報告集	(社) 土木学会	1994～2009 年
・トンネルと地下	(株) 土木工学社	1994～2009 年
・土木技術	(株) 土木技術社	1997～2009 年
・土木施工	(株) 山海堂	1997～2009 年

また、対策工の効果は、主目的とする効果とそれに付随した二次的効果を併せ持つことが多く、複数の対策工を組み合わせて用いることも少なくないことから、数値解析を実施することで、実際の施工時の効果をケーススタディすることが可能となる。選定時における対策工の効果について三次元解析で評価した例を図-28に示す。解析例では、上半先進掘削工法、早期閉合、早期閉合+鏡面補強工の3ケースについて比較をおこなっている。早期閉合は上半先進掘削工法に比較し、切羽通過後の変位を抑制する効果がみられる。また、早期閉合と鏡面補強を併用することによって、先行変位も抑制していることから、地表面対策として全体変位を抑制する場合においては、切羽前方地山との補強（補助工法）と切羽通過後の対策（掘削工法）との組み合わせによる効果について十分考慮し、選定を行う必要がある。

(5) 近年の事例に見られる地表面沈下抑制対策

これまで、標準的な掘削工法は上半先進掘削工法で行われ、天端安定対策や地表面沈下対策は、長尺鋼管先受け工法を主流とする補助工法が一般に用いられてきた。しかし近年では、さらに対策効果が期待できるものとし

て、早期閉合を目的とした対策工が行われるようになっており、掘削工法として補助ベンチ付き全断面掘削工法の採用事例が多く、鏡面補強などの補助工法と併用して施工されるケースも見られるようになった（表-16）。早期閉合を目的として補助ベンチ付き全断面掘削工法を採用する際には、切羽面が上半先進掘削工法に比べて大きく、切羽面の自立や安定性が要求されるため鏡面補強などの補助工法が必要となる場合がある。よって、鏡面補強などの対策規模が上半先進掘削工法より大きくなる場合があるため、安全性や経済性など総合的に比較検討することが必要となる。

道路および鉄道トンネルの小土被り部で早期閉合を行った場合の変位計測抑制効果の例を図-29に示す。なお、抑制効果については変位計測結果の値を評価する一方法として、抑制効果（％）＝{1－（閉合後最終値÷閉合前最終値）}×100で算出した。この結果から早期閉合はある程度の変位抑制効果を期待でき、地表面沈下抑制にも効果があるものと考えられる。

5. おわりに

以上のように山岳トンネル掘削にともなう地表面沈下影響の評価と合理的な対策工選定について、部会で検討した結果の一部を述べた。

これらの結果を以下の目次構成でライブラリーとして取りまとめる予定である。

「実務者のための山岳トンネルにおける地表面沈下の予測と合理的対策工の選定」

第1章 はじめに

第2章 地表面沈下の実際と地山挙動

第3章 考慮すべき制約条件

第4章 地表面沈下評価のための事前調査

第5章 事前予測手法と評価

第6章 計測による情報化施工と管理

第7章 地表面沈下対策の分類と効果

第8章 実務における合理的対策工の選定と抑制効果の評価

第9章 今後の展望

土木学会、トンネル工学小委員会における当部会への支援に感謝するとともに、部会での活動成果が、地表面沈下の予測評価や対策工選定で苦慮している現場実務者の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) (社)日本トンネル技術協会：山岳トンネル施工に伴う地表面沈下の防止対策に関する調査研究報告書，1980.3.
- 2) 北川隆，後藤光理，田村武，木村亮，岸田潔，崔瑛，野城一栄：サイドパイルによるトンネル沈下抑制効果に関する実験的研究，土木学会論文集F，Vol. 65, No. 1, pp. 73-83, 2008.
- 3) 居相好信，瀬戸口嘉明，関本宏，谷口信博，藤井剛：住宅密集地・含水未固結地山でのアンブレラ工法選定と施工結果，トンネル工学研究論文・報告集第 13 巻，pp.275-280, 2003.11.
- 4) 村山朔郎，松岡元：砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究，土木学会論文集第 187 号，95-108, 1971.3.
- 5) 島田隆夫：トンネル掘削に伴う地表沈下について，土と基礎，Vol.27, No.7, pp.1-4, 1979.
- 6) Coulter, S., Martin, C.D.: Effect of jet-grouting on surface settlements above the Aeschertunnel, Switzerland, *Tunnelling and Underground Space Technology*, No.21, pp.542-553, 2006.
- 7) 進士正人，小原勝巳，若狭紘也，青木宏一，中川浩二：めがねトンネルにおける最終地表面沈下量の簡易予測法の提案，土木学会論文集F，Vol.64, No.3, pp.218-226, 2008.
- 8) 北川隆，後藤光理，磯谷篤実，野城一栄，松長剛：トンネル工学報告集，Vol.15, pp.203-210, 2005.
- 9) 島田隆夫：土被りの浅い山岳トンネルの地表沈下，土木学会論文報告集，No.296, pp.97-109, 1980 年 4 月.
- 10) Peck, R.B.: Deep excavation and tunnelling in soft ground, *Proc. 7th International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering Mexico City*, Vol.1, pp.225-290, 1969
- 11) Mair, R.J., Taylor, R.N.: Bored tunnelling in the urban environment, *Proc. of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering Hamburg*, Vol.4, pp.2353-2385, 1998.
- 12) 森崎泰隆，蔣宇静：数値解析による地表面沈下の評価に関する一考察，トンネルと地下，38 巻 2 号 pp.115-122, 2007.
- 13) 森崎泰隆，御手洗良夫，蔣宇静：一次インバートの閉合距離が地表面沈下に与える影響に関する解析的検討と適用事例，土木学会論文集F，Vol. 64, No. 3, pp.227-236, 2008.
- 14) 北川隆，中山範一，松長剛，芥川真一，小西真治：ひずみ軟化モデルによる地表面沈下予測の適用性に関する研究，トンネル工学論文集，第 14 巻，pp.53-60, 2004.
- 15) M. Karakus and R. J. Fowell : Effects of different tunnel face advance excavation on the settlement by FEM, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 18, Issue 5, pp. 513-523, 2003.
- 16) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 都市部山岳工法トンネル編，丸善，2002.
- 17) 河村洋治，吉光康夫，尾畑洋，中川浩二：脆弱化地盤の地下水を制して変電所直下を突破 広島高速 1 号線（安芸府中道路）福木トンネル，トンネルと地下 433 号，Vol. 37, No. 9, pp. 7-15, 2006 年 9 月
- 18) 山田浩幸，宇田隆彦，川端康夫，石橋照久，橋爪大輔：都市部における長大メガネトンネルの設計と施工，トンネル工学研究論文・報告集，第 13 巻，pp.163-168, 2003.

PREDICTIVE ESTIMATION AND RATIONAL COUNTERMEASURES FOR GROUND-SURFACE SUBSIDENCE BY TUNNEL EXCAVATION

Yujing JIANG, Toru YASUDA, Hideo KINASHI, Tsuyoshi DOMON
and Hiroyuki YAMADA

The prediction of the ground-surface subsidence is not easy for the problem of the modeling. And it is necessary that rational counter-measurement is selected corresponding to the construction condition. Therefore, in committee of JSCE, the study of prediction method for subsidence, observational method under construction, and selection method for rational countermeasures, is carried out in middle level.