

都市における地下工事—近接施工による既設トンネルへの影響—

Underground Construction in Urban Areas
—Influence of Construction Works Adjacent to an Existing Tunnel—朝倉 俊弘 (あさくら としひろ)
(財)鉄道総合技術研究所 主幹技師清水 満 (しみず みつる)
東日本旅客鉄道(株) 副課長齋藤 貴 (さいとう たかし)
(財)鉄道総合技術研究所 技師

1. はじめに

近年、土地の高度利用・有効利用が進み、従来では考えられなかったような既設構造物に対する近接工事が急増している。最近の近接工事の特徴は、従来の近接工事と比較して、工事規模が大きくなったこと、既設構造物との離隔が著しく小さくなったこと等があげられる。このため影響予測や対策工の設計等の技術的な検討に、より高い精度が求められるようになってきている。また、近接施工が計画された時点での影響予測と近接施工対策の進め方に、担当者の主観の相違による差が少なからず生じており、また、経験を有する専門家に判断を委ねざるを得ないケースも増えている。

これまで、都市部における鉄道トンネル工事は、比較的土被りの浅い駅部は開削工法、駅間はシールド工法によることが主流であるが、最近では、山岳工法トンネル(いわゆる都市 NATM)の適用も増大している。また、大深度地下鉄道が再度注目され、都心部への鉄道乗入れを具体的に検討する気運も高まっている。

現在、(財)鉄道総合技術研究所(以下、鉄道総研と略す)では、鉄道事業者が、都市 NATM により経済的なトンネル設計を行えるよう、都市域での所要条件(近接施工、地震、地下水等)を満足した都市 NATM の技術基準の整備を行っている。

また、鉄道総研では、山岳工法で建設されたトンネルに近接して新設工事が計画・実施された場合に、近接施工による影響を的確に予測し、列車運行の安全を確保することを目的として、「既設トンネル近接施工対策マニュアル(平成7年1月)」¹⁾(以下「マニュアル」と略す)を作成した。「マニュアル」では、近接工事の種類ごとに近接度を「無条件範囲」、「要注意範囲」、「制限範囲(要対策範囲)」に区別し、この区分に応じて事前調査、影響予測、対策工、安全監視等が行えるよう構成されている。

この報文では、今後都市部での都市 NATM の増大を考慮し、近接度の区分と影響予測を中心とした「マニュアル」の骨子および既設トンネルに近接した施工事例を紹介する。

2. 近接施工および近接度の分類

2.1 近接施工の分類

既設の鉄道トンネルに対して行われる近接工事は、下記のように分類される。

- ① トンネルの併設
- ② トンネルの交差
- ③ トンネル上部の開削
- ④ トンネル上部の盛土
- ⑤ トンネル上部の構造物基礎
- ⑥ トンネル側部の掘削
- ⑦ トンネル上部の湛水
- ⑧ 地盤振動

これらの想定される工事に対して、現場の地形、地質、環境条件や既設トンネルの健全度、予測される影響等を勘案して対策工事や影響監視を実施する必要がある。

既設トンネルでは一般に、盛土や構造物基礎のように荷重が増加する場合は、その方向から押されるような変形モードとなり、逆に上部開削や側方掘削のように荷重を除去する場合には、掘削される方向に引張られるような変形モードとなる。表-1は、近接工事の分類ごとに、想定される変形挙動を示したものである。

2.2 近接度の分類

「マニュアル」では、近接工事が下記のどの範囲に含まれるかにより、事前調査、影響予測、対策工、安全監視、工事記録の進め方を具体的に提示している。

- ① 無条件範囲…新設構造物の施工により、既設構造物に変位や変形等の影響が及ばないと考えられる範囲。
- ② 要注意範囲…新設構造物の施工により、既設構造物に変位や変形等の影響が及ぶ可能性がある範囲。
- ③ 制限範囲(要対策範囲)…新設構造物の施工により、既設構造物に変位や変形等の影響が及ぶため、必要な対策工を行うか、計画変更を要する範囲。

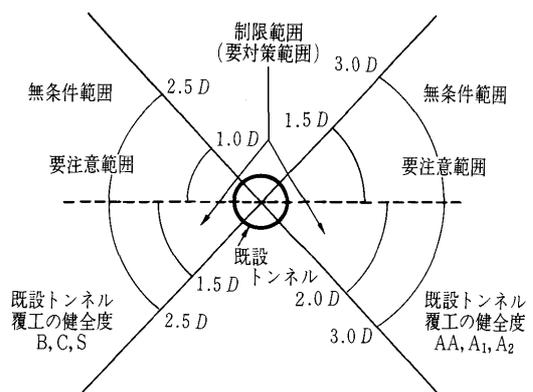
表-2 および図-1は、トンネルを併設した場合における無条件範囲、要注意範囲、制限範囲(要対策範囲)を示したもので、既設トンネルの健全度と併設トンネル

表—1 近接施工による既設トンネルの変形挙動

近接施工の種類	想定される既設トンネルの挙動
トンネルの併設	・既設トンネルが、近接した併設トンネルの方に引張られるように変形する。 ・併設トンネルの施工により、既設トンネルの周辺地山が緩み、その結果、覆工に作用する荷重が増加する。
トンネルの交差	・一般に、新設トンネルが既設トンネルの上部を通過する場合は、影響が少ない。ただし、離隔が小さいと、アーチアクションが損なわれ、覆工に作用する荷重が増加する。 ・新設トンネルが既設トンネルの下部を通過する場合は、既設トンネルを沈下させることになり、影響を受けやすい。
トンネル上部の開削	・トンネル上部の開削により、土被り圧が除荷され、鉛直土圧に対する側圧の比が大きくなり、天端への突き上げが生じる。 ・土被りが小さいと地山のアーチアクションが損なわれ、覆工に作用する鉛直土圧が増加する。
トンネル上部の盛土	・トンネル上部盛土により、覆工に作用する鉛直荷重が増大。 ・土被りが大きい場合には、増加荷重が分散し、影響は小さい。 ・盛り立てが均等でない場合には、覆工に偏圧が作用する。
トンネル上部の構造物基礎	・基礎の掘削時は、上部開削と同様であるが、その程度は一般的に小さい。 ・上部構造物施工時は、上部盛土と同様、上載荷重が増加する
トンネル側部の掘削	・掘削される方向に引張られるようにトンネルが変形する。
トンネル上部の湛水	・動水勾配が上昇し、水圧が作用、あるいは漏水量の増加
地盤振動	・近接して大量の火薬を使用するような工事が行われると、動的荷重が覆工に作用し、覆工にひびれが生じたり、すでにひび割れや剥離がある場合には、覆工片が落下したりする。

表—2 近接度の区分 (トンネルの併設)

既設トンネルの覆工の健全度	両トンネルの位置関係	トンネルの離隔	近接度の区分
AA A ₁ A ₂	新設トンネルが既設トンネルより上に位置する。	1.5D以内 1.5~3D 3D以遠	制限範囲 (要対策範囲) 要注意範囲 無条件範囲
	新設トンネルが既設トンネルより下に位置する。	2D以内 2~3D 3D以遠	制限範囲 (要対策範囲) 要注意範囲 無条件範囲
B C S	新設トンネルが既設トンネルより上に位置する。	1D以内 1~2.5D 2.5D以遠	制限範囲 (要対策範囲) 要注意範囲 無条件範囲
	新設トンネルが既設トンネルより下に位置する。	1.5D以内 1.5~2.5D 2.5D以遠	制限範囲 (要対策範囲) 要注意範囲 無条件範囲



図—1 近接度の区分 (トンネルの併設)

の位置関係によって判定区分を行うことが可能となる。なお、判定区分における D (トンネル幅) は、トンネル覆工外面の鉛直高さ、水平幅のうち、大きい方の値を採ることとした。

表—3 および図—2 は、既設トンネル上部を開削した場合における無条件範囲、要注意範囲、制限範囲 (要対策範囲) を示したものである。ここで、残存土被り比とは、切取りによって残る土被りの、もとの土被りに対する比で、 h/H で表す (h : 残る土被り, H : 元の土被り)。

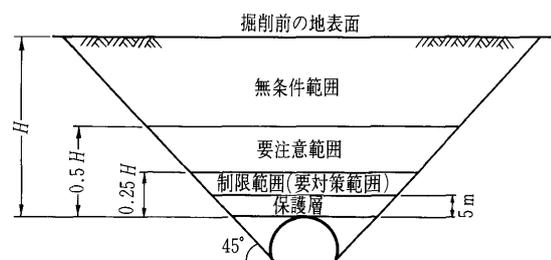
3. 影響予測²⁾

3.1 近接施工事例の分析

近接施工における影響予測を行う上で、過去における類似の施工条件のデータは貴重な参考資料となる。図—3 は、過去の実績に基づき、土被りの変化とその影響を示したもので、何らかの変状が生じたトンネルは、切取り領域のみに見られることがわかる。また、図—4 は、対象工事の離れと変位量の関係を示したもので、何らか

表—3 近接度の区分 (トンネル上部の開削)

残存土被り比 h/H	近接度の区分
0.25 未満	制限範囲 (要対策範囲)
0.25~0.5	要注意範囲
0.5 以上	無条件範囲



図—2 近接度の区分 (トンネル上部の開削)

の変状を生じたトンネルは側方掘削によるもののみであり、併設トンネルでは生じていない。また側方掘削では、 $2D$ 以下に接近すると、変位の増加と変状の発生が認められ、併設トンネルでは $4D$ 以上の離れでも $2\sim 3\text{ mm}$

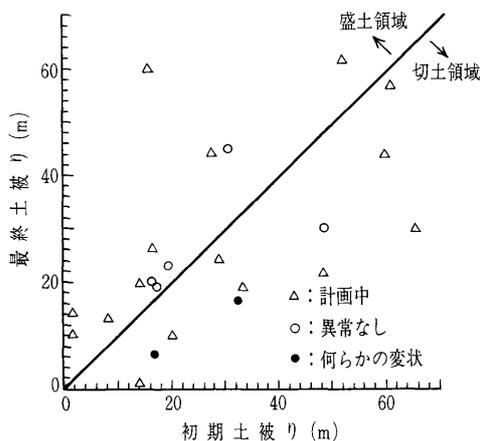


図-3 近接工事とその影響 (土被りの変化とその影響)

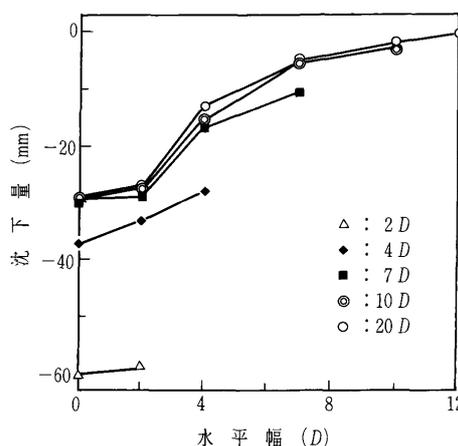


図-5 解析領域の影響 (水平方向)

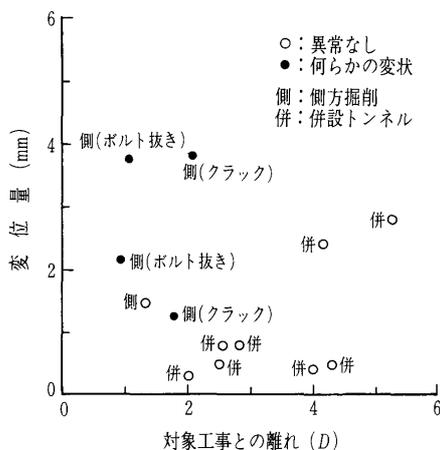


図-4 近接工事とその影響 (対象工事の離れと変位量)

表-4 覆工の増加応力の許容値

既設トンネル覆工の健全度判定区分	増加引張応力 kgf/cm^2	増加圧縮応力 kgf/cm^2
A, A	3	10
A ₁ , A ₂	5	20
B, C, S	10	50

中の安全監視を行う場合には、(1)構造物の安定、(2)軌道管理、(3)建築限界のそれぞれの立場から許容値を設定して列車運行の安全確保に努める必要がある。

構造物の安定は、これまでの施工実績から判断して、表-4に示す覆工の応力増加の許容値を目安として判定することとしている。これは、現状の覆工応力状態の把握が甚だ難しく、覆工の健全度判定により大まかに区分し、許容値を設定しなければならないためである。

また、軌道管理は、トンネルの沈下、浮上がり等により軌道狂いが生じると、列車の安全運行に悪影響を生じるので、軌道整備基準を侵さない範囲内で許容値を設定する必要がある。

建築限界は、近接施工の影響により、定められた建築限界を侵すようなトンネル断面変形が生じることを避けなければならない。したがって、建築限界を侵さない範囲で許容値を設定する必要がある。ただし、一般には、建築限界が侵されるほど変形するよりも覆工応力の許容値を越える方が早いことが多い。

4. おわりに

表-5に既設トンネルに近接して、トンネルの交差、上部切り取り等が施工された際の、事前の影響予測、計測結果等の事例を示す。

都市部では、シールド、開削トンネルのイメージがあるが、これらに対する基準類は、個々の事業者ごとに策定されているのが現状である。鉄道総研としても、今後、シールド、開削等のトンネルを対象とした近接施工マニュアル策定に向け検討を進める予定である。

の変位が生じる場合がある。

3.2 影響解析

近接工事に伴う影響予測の手段として、FEM(有限要素法)など数値解析方法が一般的に用いられている。数値解析は、複雑な地形や地盤条件、施工条件等を考慮することができるため、近接工事を事前にシミュレーションする手段として有効である。しかし、解析方法の選択や解析領域の設定、入力する物性値の吟味などの問題もあり、結果の解釈においてはこれらの点を十分考慮した上でその妥当性を判断する必要がある。

FEMで解析を行う場合には、その解析領域の大きさを決定することが必要になる。このため、水平方向について片側を $2D$ (D :トンネル幅)~ $100D$ 、垂直方向はトンネル下端より $1\sim 5D$ まで変化させ、トンネルを掘削した際の地表面沈下形状がどの範囲まで影響を及ぼすか検証を行った。その結果、水平方向については、片側 $7D$ 、垂直方向についてはトンネル下端より $3D$ 程度の解析領域が確保されていれば実用上十分であることがわかった。水平方向の解析領域が解析値に与える影響を図-5に示す。

3.3 許容値

近接施工が計画され、影響予測を行う場合および工事

表-5 既設トンネル近接施工例

トンネル概要	地形・地質	近接工事概要	位置平面図	影響予測, 実績等
延長: 579m 建設: 昭和5年 形式: 単線非電化 覆工: コンクリートブロック, コンクリート 巻厚: 23~64cm インバート: 無し 軌道: バラスト 工法: 不明 土被り: 25m	丘陵地形 砂岩 石英安山岩	電化工事に伴うJR新設トンネルとの交差及び既設トンネルの改築 交差角: 約10° 平面交差		影響予測 BEM解析 最小幅 0.7m FEM解析 ・地中変位 0.4mm ・内空変位 1.4mm 計測結果 ・地中変位 1.55mm ・内空変位 3.20mm
延長: 3502m 建設: 昭和52年 形式: 新幹線 覆工: コンクリート 巻厚: 50~90cm インバート: りょう盤有 軌道: スラブ 工法: 底設導坑先進上部半断面 土被り: 93m	新第三紀 凝灰角礫岩 安山岩 砂岩	ゴルフ場新設に伴う新幹線トンネル上部の切取 切取後土被り: 35m		影響予測 発破振動 計測結果 ・振動速度 0.3kine ・内空変位 0.1mm ・クラック長さ 変化無し
延長: 1430m 建設: 昭和58年 形式: 複線電化 覆工: コンクリート 巻厚: 40cm インバート: 無し 軌道: スラブ 工法: NATM 土被り: 17m	新第三紀 中新世 凝灰角礫岩 切取面程度まで風化	駅前広場整備工事によるトンネル上部の切取 切取後土被り: 6.6m		影響予測 FEM弾性解析 ・天端上昇 +3.0mm ・覆工応力 -15kgf/cm ² 計測結果 ハアックの進展
延長: 866m 建設: 昭和50年 昭和60年補強 形式: 単線 覆工: 鉄筋コンクリート 巻厚: 30~50cm インバート: 有り 軌道: スラブ 工法: シールド 土被り: 23m	市街地 洪積世 砂礫 土丹	トンネル上部への構造物基礎建設に伴う切土と基礎杭に近接施工 ・地上19階地下1階建て ・基礎杭 鋼管杭 ・トンネル直上施工		影響予測 FEM弾性解析 ・内空変位 5.95mm 縮小 ・覆工応力 検討無し 計測結果 変状無し

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所: 既設トンネル近接施工対策マニュアル, 1995.
- 2) 朝倉俊弘・小野田滋・安東豊弘・佐藤 豊: 鉄道総研報告, Vol. 7, No. 6, pp. 33~40, 1990.

(原稿受理 1999.3.8)