

住宅に接近した小土かぶりトンネルの施工に伴う影響予測と評価

舟橋 孝仁*1・中尾 慎一*2・由布 壮一郎*2

概 要

住宅、道路、鉄道および構造物等に近接してトンネル掘削を行う場合、これらの周辺構造物に施工の影響が及ぶことがないよう配慮する必要がある。特にトンネル坑口付近や土被りが小さい箇所（以降、小土かぶり部と呼ぶ）では、直接的または間接的に地表面に影響が及ぶことが予想されるため、施工前には現場の条件に応じた近接工事に対する影響予測および評価を行い、施工段階では適切な計測管理基準値を設定して計測管理を徹底する必要がある。

本報告は、山岳トンネルが木造住宅近傍の小土かぶり箇所を通過する際の近接影響評価と、施工時の計測管理基準値の設定についての検討内容および計測結果について報告する。

キーワード：山岳トンネル・近接施工・影響評価・影響予測・計測管理基準値

PREDICTION AND EVALUATION OF IMPACT ON NEIGHBORING DWELLINGS AT
THE TIME OF CONSTRUCTING A TUNNEL UNDER SMALL EARTH COVER

Takahito FUNAHASHI *1, Shinichi NAKAO *2, Soichiro YUFU *2

Abstract

For tunneling projects in the proximity of structures such as dwellings, roads and railways, it is necessary for the constructor to consider how to prevent impact on these neighboring structures. Especially at the portal of a tunnel and at places with a small earth cover (hereinafter referred to as the small earth cover section), tunneling is prone to impact the surface, directly and indirectly. To cope with these issues, the constructor, prior to starting construction, is required to predict and evaluate possible impact on construction projects in the neighborhood taking into account of site conditions, and to manage measurements in-depth by setting appropriate measurement control criteria at the construction stage.

This paper reports first the evaluation of effect on the neighborhood when a mountain tunnel passes under small earth cover in the vicinity of wooden dwellings, and then discusses the content of the study and results of measurements relating to the setting of the measurement control criteria at the construction stage.

Keywords: mountain tunnel, neighborhood construction, impact evaluation, impact prediction, measurement control criteria.

*1 Tunnel Group, Engineering Department, Civil Engineering Division

*2 Kyusyu Branch

住宅に接近した小土かぶりトンネルの施工に伴う影響予測と評価

舟橋 孝仁*1・中尾 慎一*2・由布 壮一郎*2

1. はじめに

トンネル施工機械の大型化や補助工法技術の発達に伴い、トンネル施工技術が飛躍的に向上し、最近では山岳部のみならず都市部においても山岳工法（NATM）でトンネルが施工されることも多い。一般に山岳トンネルの施工は、軟岩以上の岩盤を掘削対象とすることが多いが、坑口部付近や土被りが小さい箇所（以降、小土かぶり部と呼ぶ）、都市部では、崖錐堆積物、強風化岩、第四紀層等の未固結地山を掘削対象とすることも少なくない。このような箇所においては、トンネルに近接して住宅、道路、鉄道、その他構造物等がある場合、トンネル掘削時の地盤の緩みや地下水位の変化等による地盤変状の影響を受けやすい（図-1）。そのため、施工前には工事に伴う近接構造物への影響予測と評価、施工方法および計測管理等について検討を行い、工事が周辺環境に及ぼす影響を最小限に抑える必要がある。しかし、近接構造物に対する施工の影響は、トンネル周辺の地質条件、立地条件および施工方法等によってもその度合いが異なるため、影響予測および評価を一律に行うことはできない。そこで、施工箇所単位で地質、立地、施工等の現場条件を適切に考慮した

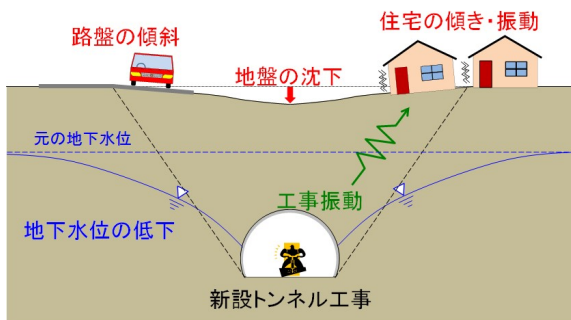


図-1 近接施工の模式図

検討を行うことにより、精度の高い影響予測結果が得られるとともに、信頼性の高い評価を行うことができると考えられる。

本報告では、山岳トンネルの近接施工の影響予測および評価について述べるとともに、実際の近接工事に対し、事前検討した近接影響予測および影響評価の結果、また、施工段階における計測管理基準値の設定と計測結果について報告する。

2. 近接施工における影響評価の考え方

図-2に近接施工における影響評価の流れを示す。住宅や道路等の構造物が近接したトンネル工事が行われる場合、まずはトンネルと近接構造物との位置関係を把握する。近接度区分の例を図-3に示す。近接度の区分は、①直接影

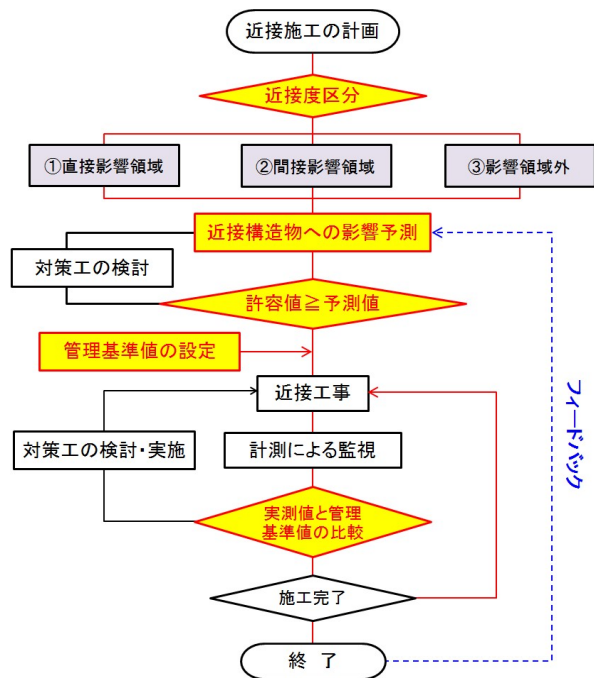


図-2 近接施工における影響評価の流れ

*1 土木本部 エンジニアリング部 トンネル技術グループ

*2 九州支店 JV 俵坂トンネル作業所

響領域，②間接影響領域，③影響領域外に分けられ，各区分の定義は表-1に示すとおりである。この段階では，新設するトンネルからの離隔距離により概略的に近接度を区分しているため，トンネル周辺の地質や立地等の環境条件を十分に考慮できておらず影響程度を把握するまでには至っていない。

次にトンネル掘削により近接構造物がどの程度影響を受けるかを予測する。影響を予測する手法には，①経験式によるもの（例えば，島田の式²⁾），②理論式によるもの（例えば，Limanovの式³⁾），③数値解析によるもの（FEM，FDM，DEM等）などがある。経験式によるものは，施工条件やトンネル周辺の地質条件等が類似している場合には，比較的信頼度が高い手法である。また，解析的手法は，解析モデルや解析条件が適切に表現できれば精度良く予測することが可能であり，近年ではよく採用される手法である。

予測された値は，近接構造物ごとに定められた許容値（制約条件）と比較し，その影響度合いを評価する。ここで，予測された値が，「予測値 \leq 許容値」の関係であれば，近接構造物はトンネル工事により影響を受ける可能性は小さい。一方，予測値が許容値を上回る場合には，近接構造物の安定性や安全性が確保されないため，「予測値 \leq 許容値」となるよう何らかの対策が必要となる。

施工段階における影響評価は，施工中の計測管理の指標となる管理値（以降，計測管理基準値と呼ぶ）を定め，計測値と比較することにより行われる。通常，計測管理基準値は，3段階

程度の管理レベルに分けられ，「計測値 \leq 計測管理レベル値」の関係であるかどうかにより評価が行われる。また，施工段階では，類似条件で近接工事が繰り返される場合，計測結果に応じて管理値の見直しが図られ，合理的な施工が実施される。

3. 実トンネルにおける近接施工影響評価の検討事例

ここでは，実トンネルにおける近接影響評価の検討事例として，木造住宅を近接対象とし，トンネルが住宅近傍の小土かぶり箇所を通過する際の影響予測および評価，住宅に対する許容値と計測管理基準値の設定について報告する。

3.1 近接施工の概要

近接施工の概要を表-2に示す。また，新設するトンネルと近接構造物の位置関係を示した平面図および断面図を図-4に示す。近接対象は木造平屋住宅（図-4中の「近接構造物①」）

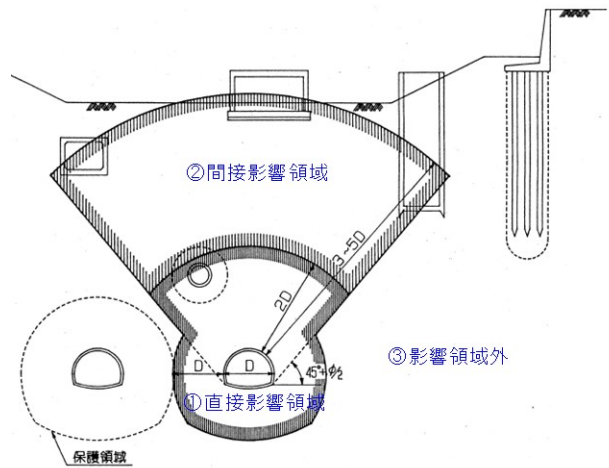


図-3 近接度区分の例¹⁾（一部加筆）

表-1 近接度の区分の定義（参考文献¹⁾を基に作成）

区分	区分の定義
①直接影響領域 (要対策範囲)	トンネル掘削による影響が，直接的に変形や応力として生じる可能性の高い領域
②間接影響領域 (要注意範囲)	トンネル掘削による影響が，直接的に生じる可能性は少ないが，すべり破壊などの間接影響で変形や応力の生じることが考えられる領域
③影響領域外	トンネル掘削による影響が，基本的には生じないと考えられる領域

であり、その近傍を新設トンネルが土かぶり約2.1m（トンネル中心直上）で通過する。A-A断面におけるトンネル中心と住宅との離隔距離は、約8.7mである。新設トンネルの掘削工法は上半先進ショートベンチカット工法、掘削方式は発破掘削（制御発破）である。

3. 2 地質状況

トンネル周辺の地質構成および風化状況等を把握するため、調査ボーリング（調査箇所は図-4参照）を実施した。ボーリングコア状況を図-5に示す。既往の地質調査結果より、当該トンネルの周辺地域の地質は、古第三紀漸新世の杵島層群に属する砂岩を基盤とするが、調査ボーリング箇所付近の地質は、それに貫入するた。ボーリングコア状況は、GL-0.6m～3.8m

の流紋岩は、風化の影響を受け褐色を呈しており、亀裂が比較的多く、亀裂に沿って粘土化した褐鉄鉱が介在する。一方、GL-3.8m以深では、一部で風化や亀裂の多い箇所もみられるが、亀裂に沿った風化介在物は認められず、岩石自体は比較的硬質（新鮮な箇所の一軸圧縮強度は約55MPa程度）であり良好な岩盤であることが伺える。

これらのことから、当該箇所の流紋岩の岩盤等級は、GL-0.6m～3.8mでCL級相当、GL-4.0m以深では、CM級と判断した。地質調査結果を基に推定した当該箇所の地質横断図を図-6に示す。

表-2 近接施工の概要

近接施設	構造物	木造平屋住宅
	離隔(A-A断面)	約8.7m (トンネル中心からの距離)
新設トンネル	種別	新幹線トンネル
	土かぶり	約2.1m
	掘削幅(D)	約10.5m
	掘削工法	上半先進ショートベンチカット工法
	掘削方式	制御発破

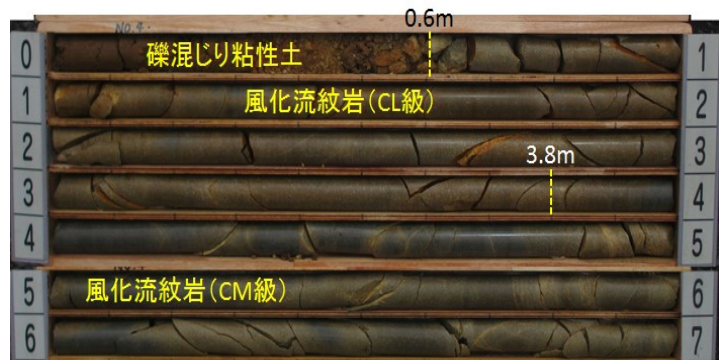


図-5 ボーリングコア状況

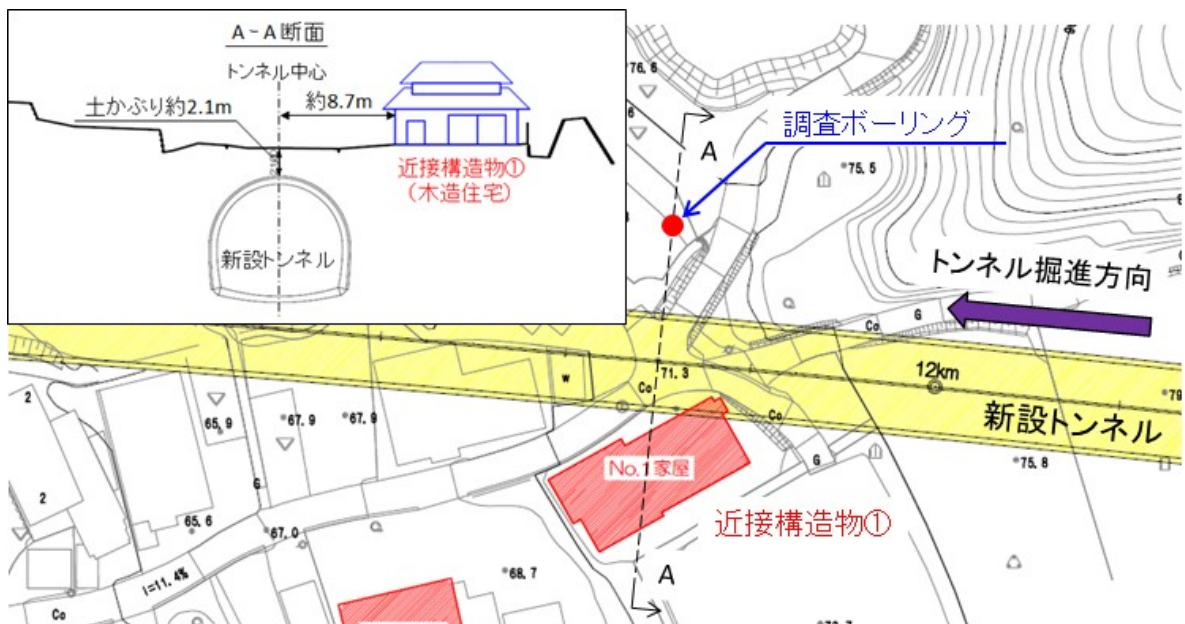


図-4 新設トンネルと近接構造物の位置関係（平面図および断面図）

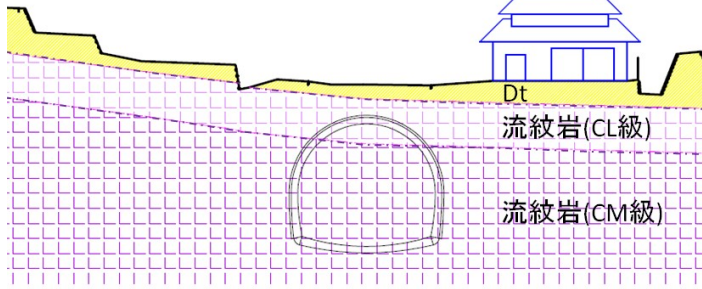


図-6 想定地質横断図

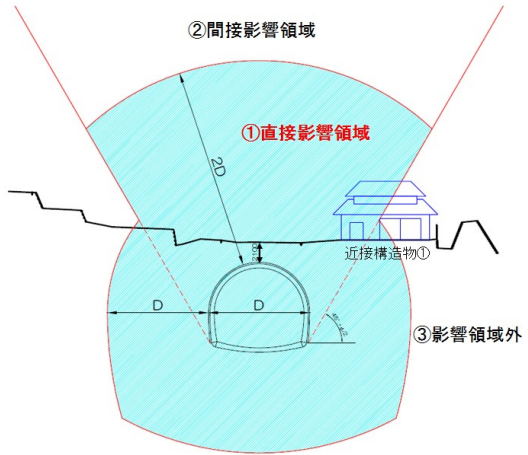


図-7 近接度の区分

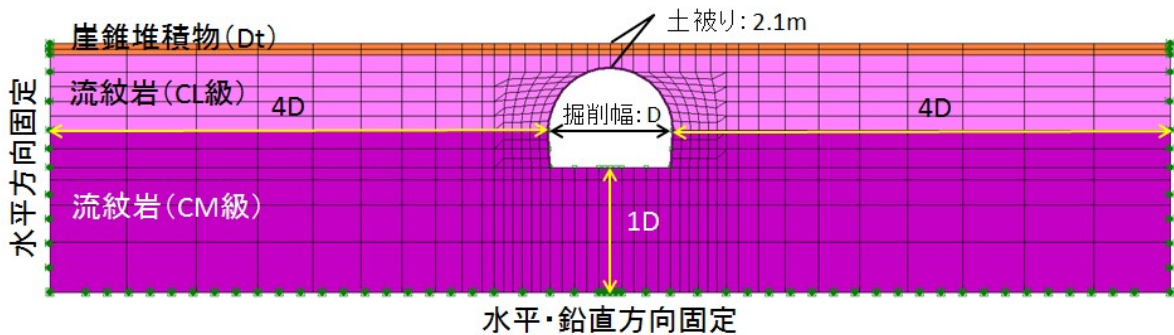


図-8 解析モデル

3. 3 近接度の区分と影響予測

(1) 近接度の区分

新設トンネルに近接する住宅に対する影響の有無および程度を把握するため、まず、図-2に示す影響評価の流れに従い、近接度の区分を行った。図-7に図-3で示した区分例を参考に各影響範囲を示す。図-7によれば、近接対象の住宅は、直接影響領域の範囲に位置しており、トンネル掘削により住宅は直接的に影響を受ける可能性があることがわかる。しかしながら、この近接度区分のみでは、周辺の地質状況を考慮できておらず、住宅が受ける影響程度を把握するには十分でない。また、地質調査結果よりトンネル周辺および住宅直下は、比較的硬質な流紋岩が分布することから、トンネル掘削時の坑内変位（内空変位および天端沈下）も小さくなることが予想され、周辺地山も弾性領域の変形で収まることが想定される。

(2) 影響予測

影響予測は、周辺の地質状況およびトンネル

の施工過程を表現できる数値解析を採用することとした。解析手法は、2次元 FEM（有限要素法）による線形弾性解析とした。

a) 解析条件

解析モデルを図-8に示す。解析モデルは想定した地質構成（図-6）を加味し、地表面形状はトンネル直上の土かぶり（ $H=2.1\text{m}$ ）を確保した上で平坦とした。また、流紋岩の地層境界は、当初の想定では上半断面の上部にあった（図-6）が、解析では安全側を考慮し、CL級岩盤を S.L 付近まで下げてモデル化した。

解析領域は、トンネル上部には土かぶり高さを確保し、トンネル側方および下方に関しては、既往の文献⁴⁾を参考にし、側方領域： $4D$ （ D ：トンネル掘削幅）、下方領域： $1D$ とした。下方領域を $1D$ とした理由は、解析上、掘削相当外力を掘削面に与えた際に生じる周辺地盤の浮き上がりによる地表面の隆起を最小限にするためである。境界条件は、側方境界を水平方向固定、下方境界を水平および鉛直方向固定、地表面は

表-3 地盤物性値

	変形係数	ポアソン比	単位体積重量
Dt (崖錐堆積物)	17,500 kN/m ²	0.35	15 kN/m ³
流紋岩 (CL級)	100,000 kN/m ²	0.33	24 kN/m ³
流紋岩 (CM級)	200,000 kN/m ²	0.33	24 kN/m ³

表-4 支保工物性値

	ヤング率	断面2次モーメント	断面積
等価剛性梁	8.04 × 10 ⁶ kN/m ²	2.11 × 10 ⁻⁴ m ⁴	0.15 m ²

表-5 解析ステップおよび応力解放率

Step	施工過程	応力解放率
1	初期応力解析	-
2	上半掘削	40%
3	上半支保工設置	60%
4	下半掘削	40%
5	下半支保工設置	60%

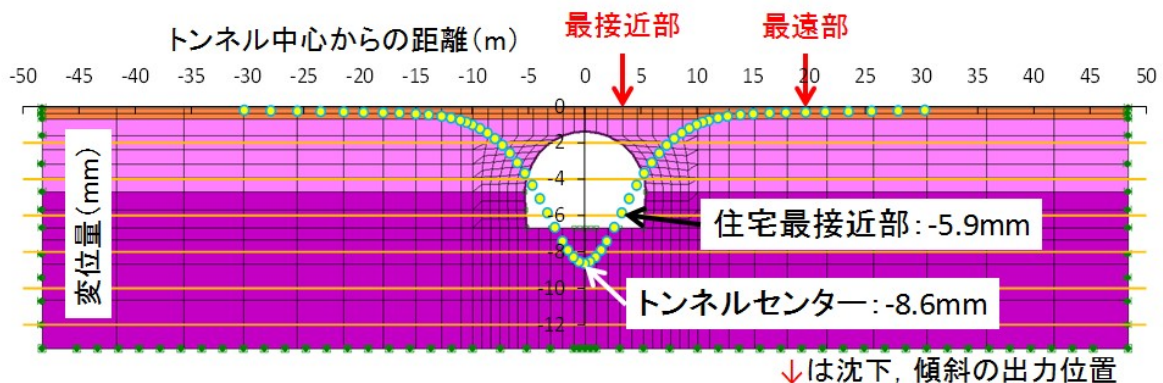


図-9 解析結果 (地表面変位量)

自由面とした。

解析で使用した地盤物性値を表-3に示す。崖錐堆積物 (Dt) の地盤物性値は、既往の地質調査で得られた値を採用した。CM 級流紋岩の変形係数は、「山岳トンネル設計施工標準・同解説」⁵⁾に示される R3 地山相当を想定した。一方、CL 級流紋岩の変形係数は、亀裂や風化状況を勘案し CM 級流紋岩の半分の値とした。ポアソン比および単位体積重量は、岩石試験結果を採用した。

トンネル支保工のモデル化は、当該箇所の支保構造に従い、吹付けコンクリート 15cm、鋼製支保工 H150 (上下半) を一体化させた等価合成梁⁴⁾とした。表-4に支保工物性値を示す。

解析ステップおよび応力解放率を表-5に示す。解析ステップは、上半先進ベンチカット工法を想定し、2次元解析における応力解放率は、一般に切羽到達時点で 30~50%とされている⁴⁾ことから、本検討では、切羽到達時点の解放率を 40%、支保建込後の解放率を 60%とした。

b) 解析結果

図-9に地表変位量についてトンネル中心からの距離と変位量の関係を示す。図-9に示した地表面変位量は、下半支保工設置後における値である。これによれば、トンネル直上における地表面沈下量は 8.6mm であり、住宅が最も近い位置における沈下量は、5.9mm であった。

一方、近接構造物が住宅の場合、不同沈下が問題となるため、傾斜角も重要な管理指標となる。解析結果における最大傾斜角は、0.0007rad(=0.7/1000rad)であった。

3.4 事前の影響評価

影響評価は、予測値と近接構造物 (今回の検討では住宅) に対する許容値 (制約条件) を比較することにより行う。

許容値とは、「既設構造物の機能および構造安定性を確保するように設定する変位・変形量、応力の条件値 (限界値)」⁶⁾として定義されている。住宅に対する管理項目は、地表面沈下の絶対値と傾斜角とする場合が多く、その許容値と

表-6 予測値と許容値

項目	住宅箇所の予測値		許容値
沈下量の絶対値	約6mm	<	15mm
傾斜量	0.7/1000rad	<	1.5/1000rad

表-7 計測管理基準値

	管理レベルⅠ	管理レベルⅡ	管理レベルⅢ
沈下量 (mm)	7.5	11.3	15
傾斜 (rad)	0.75/1000	1.13/1000	1.5/1000

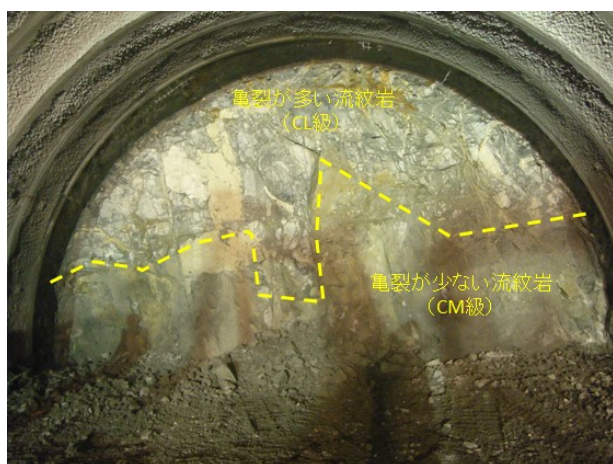


写真-1 切羽状況 (A-A断面付近)

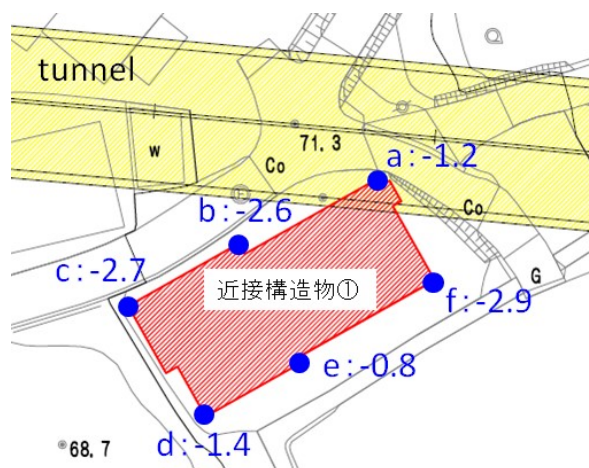


図-10 計測結果 (地表面変位量)

表-8 計測結果と管理基準値との比

	計測値		管理レベルⅠ
沈下量	最大約3mm	<	7.5mm
傾斜	e-f間 0.19/1000rad	<	0.75/1000rad

しては、地表面沈下の絶対値：10mm～30mm、傾斜角：1/1000rad～3/1000rad とする事例が多い⁶⁾。本検討における影響評価では、住宅に対する許容値を、地表面沈下の絶対値：15mm、傾斜角：1.5/1000rad と設定した。表-6に数値解析による予測値と許容値を比較した結果を示す。数値解析による事前予測値は、地表面沈下の絶対値および傾斜角ともに許容値に比べ十分小さい値であることがわかる。このことから、事前の近接影響評価としては、トンネル掘削による住宅の機能や安全性を損ねる程の影響はないと考えられた。

3.5 計測管理基準値の設定

図-2によれば、事前予測の段階で「予測値

≦許容値」の関係が得られ、近接構造物に影響がないと判断されれば、近接工事が行われるが、施工時には適切な計測管理基準値(変位, 変形量, 応力に対する計測管理上の指標値)を定め計測値と比較することにより影響評価を行う必要がある。計測管理基準値の設定にあたっては、事前予測値を用いて設定する場合や許容値を用いて設定する場合があるが、本検討においては、許容値を用いて計測管理基準値を定めることとした。表-7に沈下量の絶対値および傾斜角の計測管理基準値を示す。ここで、各管理レベル値は、管理レベルⅢを3.4で設定した許容値とし、管理レベルⅡを管理レベルⅢ×75%、レベルⅠを管理レベルⅢ×50%とした。

3. 6 計測結果および施工時の影響評価

当該箇所における切羽状況を写真-1に示す。上半切羽の中央付近を境にして、亀裂の発達程度が異なり、上部では亀裂面に粘土化した風化介在物が確認できる。これより本検討における検討モデルは概ね妥当であることが確認できた。

図-10に住宅の各箇所でも測定した地表面変位量を示す。図中に示した変位量は、住宅付近をトンネルの上下半が通過した後の最大変位量を示している。トンネルに最も近いa点の変位量は、b点、c点およびf点に比べ小さい値を示しているが、周辺の変位量から判断すると、トンネル近傍では3mm程度の沈下量で収束していると考えられる。表-8に沈下量および傾斜角の最大値と管理レベルIを比較した結果を示す。沈下量および傾斜角ともに、管理レベルI以内に納まっていることがわかる。現地においても住宅およびその周辺では、目視で確認できる変状は認められず、施工段階においても住宅への影響はほとんど無かったことが確認できた。

4. まとめ

本報告では、近接施工における影響評価の考え方を示すとともに、実際に行った近接施工の影響評価について検討事例を示した。本検討において得られた知見および結果を以下にまとめる。

- ・近接施工にあたり重要なこととして、現場条件（土かぶり、地形、地質等）を考慮した、近接構造物に対する影響予測を行うことが、適切な影響評価につながると考えられる。
- ・近接する既設構造物の許容値（制約条件）を十分に調査し、それに応じた管理基準値を設定することが重要である。
- ・住宅を近接対象とした実トンネルにおける近接影響評価事例では、数値解析による事前予測値は、設定した住宅の許容値に比べ十分に小さく、トンネル掘削が住宅に与える影響はほとんど無いことが確認できた。

- ・実際の近接工事における計測値は、許容値を用いて設定した管理基準値の管理レベルI以下で収束し、施工段階においてもトンネル掘削により住宅の機能や安全性を損ねる程の影響はないことが確認できた。

参考文献

- 1) 社団法人日本トンネル技術協会：構造物に接近した山岳トンネルの設計施工に関する研究報告書，pp.21-23，1992.3
- 2) 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.97-109，1980.4
- 3) 土木学会：トンネル・ライブラリー第24号 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評価と合理的対策工の選定，pp.31-32，2012.7
- 4) 土木学会：トンネル・ライブラリー第16号 山岳トンネルにおける模型実験と数値解析の実務，pp.159-164，2006.2
- 5) 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説，p.310，2008.4
- 6) 土木学会：トンネル・ライブラリー第24号 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評価と合理的対策工の選定，pp.79-94，2012.7