

2. 施工上の課題

終点側坑口部のNo.210+10では、民家の下を土被り約11mでトンネルが通過する計画となっていた。当初設計では、民家は用地取得範囲内のため保全対象から外しており、地表面沈下の影響は検討されていなかった。しかしながら、現地を確認した際には、民家は用地範囲内から用地境界に接した用地範囲外へ移設されており、居住している状態であった。トンネルと民家との離隔は、鉛直方向に約11m、水平方向にトンネルセンターから約22mであった。なお、本工事では、民家の許容値を、沈下量20mm、傾斜角0.002radと定めた。

当該地点の設計支保パターンはDⅢ-3で、補助工法として小口径長尺鋼管先受け工（φ76.3mm、L=12.5m）が採用されていたものの、地表面沈下対策として効果が高い一次インバートによる早期閉合は採用されていなかった。このため、地表面沈下対策の不足によりトンネル掘削時に沈下量が増大し、民家に変状が発生することが懸念された。

また、地表面沈下の計測間隔は土被り1D未満であれば5m程度、計測頻度は切羽離れや変位速度に応じて1回/日から2回/日程度とするのが一般的である。しかしながら、本トンネルにおいては、一般的な計測間隔および計測頻度とした場合、計測結果を速やかに施工にフィードバックすることが難しく、地表面沈下が増大した際の対処が遅れることが懸念された。

以上から、トンネル掘削時には、地表面沈下の計測体制を強化するとともに、適切な地表面沈下対策を実施して民家の変状を防止することが課題であった。

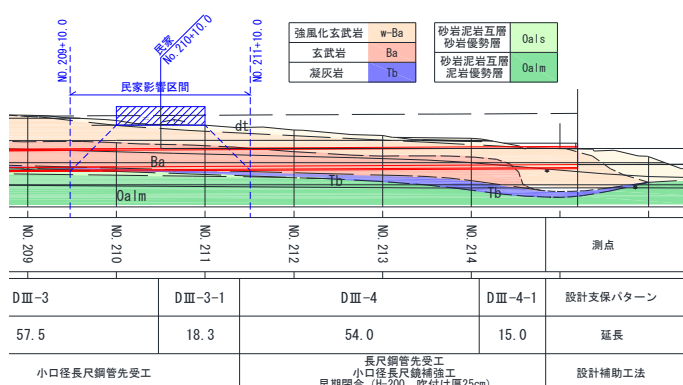


図-2 民家部の縦断面図

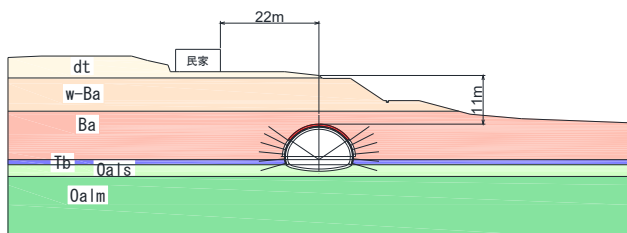


図-4 解析モデル (No.210+10)

3. トンネル掘削時の民家への影響予測

トンネル掘削が民家に影響を与える区間（以下、民家影響区間と記す）の掘削開始前に、民家と最も近接する断面（No.210+10）において二次元 FEM 解析を実施し、現設計で施工した場合の民家の沈下量と傾斜角を予測するとともに、追加対策工の効果の検討を行った。坑口部の縦断面図を図-2に示す。

なお、地山の構成則は非線形弾性モデル（電中研式モデル）とした。

(1) 現設計の妥当性検証

a) 設計支保パターン

解析断面の設計支保パターンは、DⅢ-3 パターンで計画されていた。補助工法として、小口径長尺鋼管先受け工（φ76.3mm、L=12.5m）が採用されていた（図-3）。

b) 解析モデル

図-4に解析モデルを、表-1に解析に用いた地山物性値を示す。吹付けコンクリートと鋼製支保工は合成梁要素でモデル化した。応力開放率は、支保工が設置されるまでの素掘り時を40%、支保工設置後を60%と設定した。

解析断面での地質は、トンネル部は玄武岩（Ba）、トンネルより上部は強風化玄武岩（w-Ba）が主体となると想定されていた。しかしながら、トンネル掘削を開始すると、トンネル部に出現した玄武岩層は風化が著しく土砂化したものであった。このため、本解析では安全側を考慮し、トンネル部の玄武岩（Ba）についても強風化玄武岩（w-Ba）と同等の物性値とした。

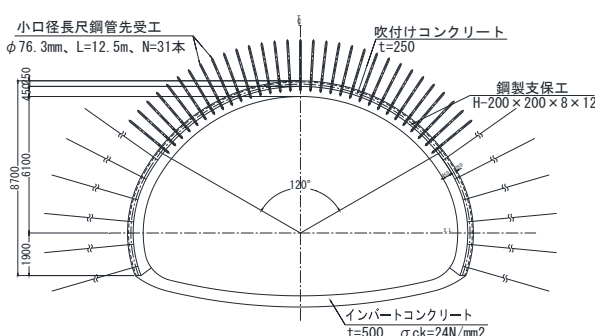


図-3 支保パターン図 (DⅢ-3)

表-1 地山物性値一覧

名称	ポアソン比	変形係数	粘着力	内部摩擦角	単位体積重量
	ν	E kN/m ²	c kN/m ²	ϕ	γ kN/m ³
dt (崖堆積物)	0.35	20000	20	30	16
w-Ba、Ba (強風化玄武岩、玄武岩)	0.3	50000	70	25	19
Tb (凝灰岩)	0.35	20000	20	30	16
Oa1s (砂岩泥岩互層砂岩優勢)	0.3	729000	644.01	45	19.43
Oa1m (砂岩泥岩互層泥岩優勢)	0.3	2710000	1803.37	43	22.08

c) 解析結果

図-5に解析結果を示す。設計支保パターンで施工した場合、トンネル掘削に伴い発生する民家の沈下は最大で21mm、傾斜角は最大で0.0021radとなり、沈下量および傾斜角ともに許容値を超過する結果となった。なお、トンネルセンターでの地表面沈下量は103mm、トンネルの天端沈下量は134mmであった。

以上から、民家影響区間の掘削時には、地表面沈下により民家に変状が発生することが懸念された。

(2) 追加対策工の効果の検証

a) 追加対策工の検討

現設計の支保パターンおよび補助工法で施工した場合、民家に変状が発生する可能性があるため、追加の地表面沈下対策を検討した。

検討の結果、地表面沈下対策として効果が高く、数多くの実績がある一次インバートによる早期閉合の追加を検討した。一次インバートの仕様は、鋼製支保工（H-200）および吹付けコンクリート（吹付け厚さ25cm）とし、本設インバートの外側に設置する構造とした。

なお、追加対策工の採用にあたっては、事前に二次元FEM解析を実施し、期待される地表面沈下の抑制効果を確認した。

b) 解析モデル

解析モデルは図-4に準じ、一次インバートは合成梁要素でモデル化した。解析に用いた地山物性値は表-1に準

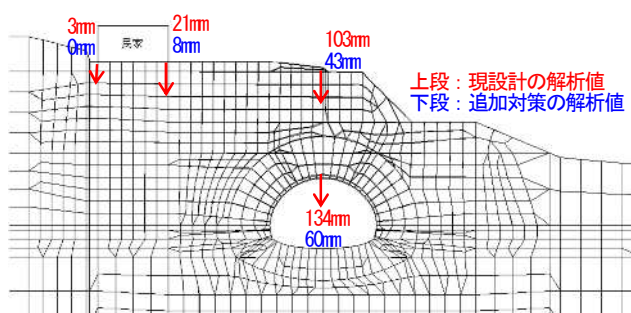


図-5 解析結果

表-3 各管理レベルにおける対策工1

管理項目	管理レベル	体制	作業体制	具体的な対策工	
				DⅢ-4、DⅢ-4-1	DⅢ-3、DⅢ-3-1、DⅠ-1、DⅠ-3
地表面沈下 天端沈下 内空変位	I以下	通常体制	通常施工 定期計測工	・長尺鋼管先受工 (φ114.3mm、9mシフト) ・小口径長尺鋼管鏡補強工 (φ76.3mm、9mシフト) ・早期閉合 (閉合距離15m(1D)以内)	・小口径長尺鋼管先受工 (φ76.3mm、9mシフト)
	I～II	注意体制	通常施工 現場点検 計測頻度強化 作業員への注意喚起	—	—
	II～III	要注体制	対策工の検討・実施 計測体制強化 作業員への注意強化	・早期閉合の閉合距離短縮 (閉合距離8m程度)	・小口径長尺鋼管鏡補強工 (φ76.3mm、9mシフト) ・早期閉合 (閉合距離8m程度)
	Ⅲ以上	厳重注意体制	作業の停止を含めた 対応 大規模対策の検討・実施	・早期閉合の閉合距離短縮 (閉合距離3m程度) ・下半への小口径長尺鏡補強工 (φ76.3mm、9mシフト)	・早期閉合の閉合距離短縮 (閉合距離3m程度) ・下半への小口径長尺鏡補強工 (φ76.3mm、9mシフト)

ずる。早期閉合の応力開放率は、全断面掘削を30%、全断面の支保工設置後を70%と設定した。

c) 解析結果

図-5に解析結果を示す。早期閉合を追加対策として実施した場合、トンネル掘削に伴い発生する民家の沈下は最大で8mm、傾斜角は最大で0.0007radとなり、沈下量および傾斜角ともに許容値を満足する結果となった。なお、トンネルセンターでの地表面沈下量は43mm、トンネルの天端沈下量は60mmであった。

以上から、民家影響区間については、地表面沈下対策として早期閉合を追加で実施することとした。

4. 24時間計測による情報化施工

地表面沈下計測の実施にあたっては、自動追尾式のトータルステーションを使用した24時間の自動計測とし、計測間隔を2.5m間隔とした。これにより、沈下量に応じて必要な対策工を迅速に追加できる情報化施工とした。

(1) 管理基準値の設定

表-2に管理基準値の一覧を、表-3および表-4に管理レベルごとの対策工の案を示す。なお、民家の許容値は、沈下量20mm、傾斜角0.002radと定めた。

トンネル掘削に起因する地表面沈下は、以下に示す①～③に示す沈下が合わさって発生する。

表-2 管理基準値の一覧表

	上半通過前 (先行変位)	上半通過後 ～下半通過前	下半通過後 ～インバート通過前	最終収束変位
地表面沈下	管理レベルⅠ	7mm	15mm	20mm
	管理レベルⅡ	10mm	22mm	30mm
	管理レベルⅢ	15mm	30mm	40mm
天端沈下	管理レベルⅠ	—	15mm	20mm
	管理レベルⅡ	—	22mm	30mm
	管理レベルⅢ	—	30mm	40mm
内空変位	管理レベルⅠ	—	30mm	40mm
	管理レベルⅡ	—	45mm	60mm
	管理レベルⅢ	—	60mm	80mm

表-4 各管理レベルにおける対策工2

管理項目	管理レベル	体制	作業体制	具体的な対策工	
				DⅢ-4、DⅢ-4-1	DⅢ-3、DⅢ-3-1、DⅠ-1、DⅠ-3
先行変位	I以下	通常体制	通常施工 定期計測工	・長尺鋼管先受工 (φ114.3mm、9mシフト) ・小口径長尺鋼管鏡補強工 (φ76.3mm、9mシフト) ・早期閉合 (閉合距離15m(1D))	・小口径長尺鋼管先受工 (φ76.3mm、9mシフト)
	I～II	注意体制	通常施工 現場点検 計測頻度強化 作業員への注意喚起	—	—
	II～III	要注体制	対策工の検討・実施 計測体制強化 作業員への注意強化	—	・長尺鋼管先受工 (φ114.3mm、9mシフト)
	Ⅲ以上	厳重注意体制	作業の停止を含めた 対応 大規模対策の検討・実施	・長尺鋼管先受工(ダブルラップ) (φ114.3mm、5mシフト)	・長尺鋼管先受工(ダブルラップ) (φ114.3mm、5mシフト)

- ① トンネル掘削に伴う先行変位
- ② 上半, 下半, およびインバート掘削時の沈下
- ③ 一連の掘削作業終了後の切羽進行による応力開放による支保工脚部の沈下

以上から, 各管理レベルにおける対策工については, 「地表面沈下における先行変位」に対する対策工, および「トンネル通過後の変位」の2種類に区分することとした。

(2) 情報化施工の結果

民家影響区間については, 設計どおりのDIII-4パターンにて掘削を開始した。補助工法として, 長尺鋼管先受け工(9mシフト), 小口径長尺鏡補強工(9mシフト), および早期閉合が採用されていた。

掘削開始後, 地表面沈下が増大したため, 以下に示す地表面沈下対策工を追加で実施した。

a) 長尺鋼管先受け工のシフト長短縮

民家影響区間の掘削開始直後, No211+2.5において先行変位が18.4mm発生し, 管理レベルⅢを超過した。このため, 先受け工の仕様を長尺鋼管先受け工(5mシフト)に変更した。

b) 早期閉合の閉合距離短縮

追加対策を実施してトンネル掘削を進めたが, 切羽がNo210+12.8まで到達した際に, No210+17.5の計測点にお

いて一次インバート施工までの地表面沈下が50.6mmに達し, 管理レベルⅢを超過した。さらに, トンネル直上の地表面を観察したところ, 用地取得範囲内のブロック積み擁壁にひび割れが発生していることを確認した。これ以上地表面沈下を増大させた場合, 民家にも同様の変位が発生することが懸念されたため, No210+12.8以降の掘削においては早期閉合の閉合距離を3mに短縮した。また, これに伴い, 下半鏡面にも小口径長尺鋼管鏡補強工を追加した。

最終的に民家直下を施工したDIII-3-4パターンを図-6に示す。なお, 閉合距離3mでの早期閉合は, 写真-1に示すとおり鏡面の高さが約10mと非常に高くなる。一次インバートの鋼製支保工の設置にあたっては切羽作業員が鏡面直下に立ち入る必要があるため, 作業員の安全を担保するために, 下半鏡面へも小口径長尺鋼管鏡補強工を追加で実施している。

(3) 民家影響区間の施工結果

民家影響区間のトンネルセンターにおける地表面沈下, および天端沈下の最終変位量の一覧を表-5に示す。なお, 民家の沈下量は最大6mmに収まっており, 懸念されていた不等沈下や変状も発生しなかった。

早期閉合の閉合距離を3mに短縮したNo210+12.8以降の掘削においては, 地表面沈下が管理レベルⅢを超過することがなくなり, 天端沈下も概ね管理レベルⅠ以内に収まった。このことから, 民家影響区間の掘削においては, 早期閉合の閉合距離を3mに短縮したことが特に効果的であったと考えている。

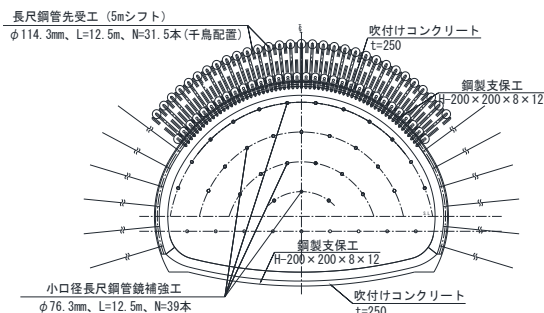


図-6 支保パターン図 (DIII-3-4)



写真-1 閉合距離3mでの早期閉合

表-5 計測結果一覧

		民家影響区間																			
測点		7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	0.0	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	0.0	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0
土盛り(m)		209	209	209	209	209	210	210	210	210	210	210	210	210	211	211	211	211	211	211	211
		14.3	14	13.7	13.5	13.2	12.7	11.9	11.3	10.8	10.9	10.8	10.8	10.2	10.4	10	9.6	9.2	9.3	9.4	9.2
地表面沈下量(mm)	切羽到達までの先行変位	-8.7	-8.0	-9.1	-11.0	-9.2	-15.4	-20.6		-22.6	-20.3	-28.3	-14.8	-23.4	-22.2	-18.4	-14.5	-10.5	-11.0	-27.9	-15.0
	上半掘削～下半掘削前	-16.6	-9.7	-10.5	-12.8	-12.1	-17.2	-22.3		-26.5	-27.4	-33.2	-29.6	-40.5	-28.0	-37.9	-25.9	-27.1	-25.0	-33.9	-26.7
	下半掘削～インバート施工前	-19.7	-11.3	-11.9	-12.8	-12.4	-20.5	-24.4		-30.2	-32.7	-40.2	-36.0	-50.6	-45.4	-49.8	-28.8	-35.4	-37.9	-52.0	-43.6
	全変位量	-39.2	-29.5	-26.8	-29.1	-27.6	-33.5	-31.2		-37.4	-40.7	-48.7	-52.3	-64.3	-60.1	-70.4	-72.3	-72.4	-75.2	-88.2	-86.1
天端沈下量(mm)	初期値～下半掘削前	-3.5	-2.3			0.0								-1.4						-8.6	-10.1
	下半掘削～インバート施工前		-3.5		-2.3	-3.4	-3.8		-1.4		-1.5		-15.8					-10.0		-20.9	-34.5
	全変位量		-21.9		-16.2	-20.2	-17.5		-12.3		-24.5		-34.0					-39.2		-49.1	-55.8
支保パターン		DIII-3-4										DIII-3-3					DIII-4				
実施補助工法		長尺鋼管先受け工(5mシフト) 小口径長尺鋼管鏡補強工(上下半) 早期閉合(閉合距離:3m)										長尺鋼管先受け工(5mシフト) 小口径長尺鋼管鏡補強工 早期閉合(閉合距離8m)					長尺鋼管先受け工(9mシフト) 小口径長尺鋼管鏡補強工 早期閉合(閉合距離8m)				

【管理レベル凡例】■: 管理レベルⅠ未満、■: 管理レベルⅠ～Ⅱ、■: 管理レベルⅡ～Ⅲ、■: 管理レベルⅢ以上

5. 各対策工の地表面沈下抑制効果の検証

本章では、民家影響区間を含む坑口部の施工を通じて得られた、各対策工の地表面沈下抑制効果について述べる。地表面沈下の抑制効果については、各支保パターンのトンネルセンターでの地表面沈下の収束値を比較することで検証した。

なお、検証に用いた計測データは、先行変位について、変位量が増大傾向となったNo211+17.5 から民家影響区間終点のNo209+7.5 までのデータとした。地表面沈下については、沈下量が増大傾向となったNo212+5.0 から民家影響区間終点のNo209+7.5 までのデータとした。

(1) 長尺鋼管先受け工のシフト長短縮による効果

DⅢ-4 パターンと DⅢ-3-3 パターンの違いは長尺鋼管先受け工のシフト長であり、DⅢ-4 パターンは 9 m シフト、DⅢ-3-3 パターンは 5 m シフトである（表-5）。したがって、各支保パターンの先行変位および地表面沈下を比較することで、長尺鋼管先受け工のシフト長短縮による効果を把握できると考えた。各支保パターンにおける先行変位、および地表面沈下の平均値を表-6 に示す。

先行変位については、DⅢ-4 パターンの平均値が 15.8mm であるのに対して、DⅢ-3-3 パターンは 19.7 mm であった。シフト長を短縮した DⅢ-4 パターンの方が先行変位が大きい結果となり、今回は優位な先行変位抑制効果を確認することができなかった。

一方、地表面沈下の全沈下量については、DⅢ-4 パターンの平均値が 76.5mm であるのに対して、DⅢ-3-3 パターンは 61.8 mm であった。この結果から、全沈下量に関しては約 19%の沈下抑制効果が認められた。

(2) 早期閉合の閉合距離短縮による効果

DⅢ-3-3 パターンと DⅢ-3-4 パターンの違いは早期閉合の閉合距離であり、DⅢ-3-3 パターンは閉合距離 8 m、DⅢ-3-4 パターンは閉合距離 3 m である（表-5）。したがって、各支保パターンの先行変位および地表面沈下を比較することで、早期閉合の閉合距離短縮による効果を把握できると考えた。各支保パターンにおける先行変位、および地表面沈下の平均値を表-6 に示す。

先行変位については、DⅢ-3-3 パターンの平均値が 19.7mm であるのに対して、DⅢ-3-4 パターンは 15.3 mm であった。この結果から、先行変位に関しては約 22 % の変位抑制効果が認められた。

一方、地表面沈下の全沈下量については、DⅢ-3-3 パターンの平均値が 61.8mm であるのに対して、DⅢ-3-4 パターンは 34.4 mm であった。この結果から、全沈下量に関しては約 44 % の沈下抑制効果が認められた。

(3) 検証結果の考察

図-7 および図-8 にNo210+10 の計測結果を示す。

先行変位に関しては、長尺鋼管先受け工のシフト長短縮では明確な先行変位の抑制効果を確認できなかった。その一因としては、今回のような大断面トンネルでは、鏡面の押出しによる切羽前方の緩み範囲も大きくなっているためと想定される。図-7 に示す経時グラフからも、切羽の約 10 m 前方から先行変位が発生し始めているのが確認でき、民家影響区間では長尺鋼管先受け工より前方から先行変位が発生していたと考えられる。一方、早期閉合の閉合距離短縮については、約 22 % の先行変位抑制効果が認められた。その一因としては、閉合距離の短縮に伴い鏡ボルトの打設本数が 19 本から 39 本に増

表-6 各計測結果の平均値一覧

支保パターン	DⅢ-3-4	DⅢ-3-3	DⅢ-4
実施補助工法	長尺鋼管先受け工(ダブル) 小口径長尺鋼管鏡補強工 早期閉合(閉合距離:3m)	長尺鋼管先受け工(ダブル) 小口径長尺鋼管鏡補強工 早期閉合(閉合距離8m)	長尺鋼管先受け工 小口径長尺鋼管鏡補強工 早期閉合(閉合距離8m)
地表面沈下(mm)	-34.4	-61.8	-76.5
天端沈下(mm)	-17.6	-29.3	-49.8
先行変位(mm)	-15.3	-19.7	-15.8

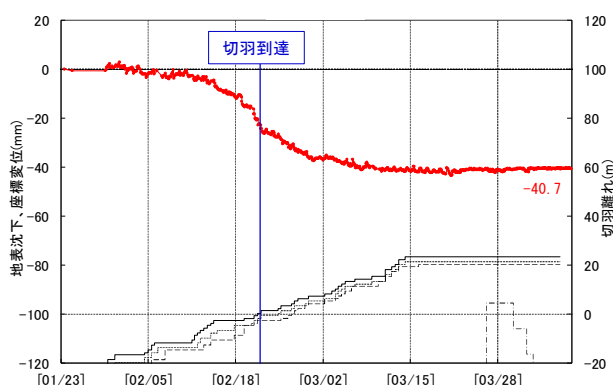


図-7 地表面沈下 (No210+10)

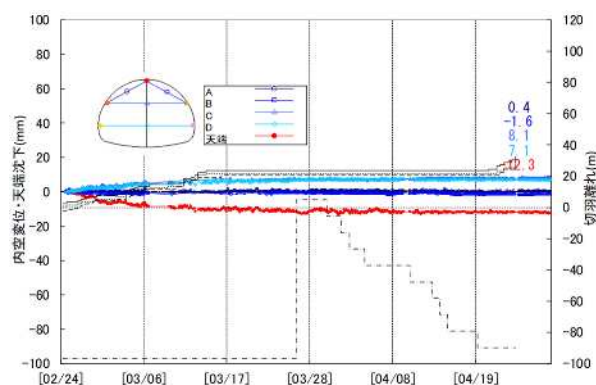


図-8 天端沈下・内空変位 (No210+10)

加し、鏡面の押出しによる切羽前方の緩み拡大を抑制できたためと考えられる。

一方、地表面沈下の全沈下量に関しては、長尺鋼管先受け工のシフト長短縮で約 19 %、早期閉合の閉合距離短縮で約 44 %の沈下低減効果を確認できた。長尺鋼管先受け工のシフト長短縮については、シフト長を 5 m に短縮したことで鋼管が常にラップする構造となったため、支保の剛性が向上したためと考えられる。また、早期閉合については、閉合距離が変位抑制効果の大きな要因であることが一般的に知られているが、本施工で改めてその効果を確認することができた。

6. おわりに

本トンネルでは、民家に近接する坑口部の掘削において、24 時間計測による情報化施工を行い、沈下量に応じて適切な対策工を迅速に実施することができた。その結果、民家の沈下量を最大 6 mm に収めることができ、民家の不等沈下や変状を防止することができた。

また、施工を通じて、長尺鋼管先受け工のシフト長短縮、および早期閉合の閉合距離短縮による地表面沈下抑制効果を定量的に評価することができた。

本報告が今後の類似工事の参考になれば幸いである。

(2020. 9. 2 受付)

COUNTERMEASURES FOR GROUND-SURFACE SETTLEMENT BY TUNNEL EXCAVATION CLOSE TO THE PRIVATE HOUSE, AND VERIFICATION OF THEIR EFFECTS

Junichi TATSUMI, Yoshikazu MURAKAMI and Akira OOBAYASHI

Matsuura No.2 tunnel is a mountain tunnel with an extension of 1,287 m, and is a large-section tunnel with an inner width of about 14 m. In this tunnel, there is a section close to the private house at the portal, and there was a possibility that the private house might be deformed due to Ground-surface Settlement by tunnel excavation. Therefore, as countermeasures for Ground-surface Settlement, forepiling and early closure by primary invert were adopted, and excavation of the affected area of a private house was started. Since the settlement increased during excavation, the shift length of forepiling was shortened to 5 m and the closing distance was shortened to 3 m. As a result, the settlement of the private house could be kept up to 6 mm, and unequal settlement and deformation did not occur. In this paper, we report the effect of each countermeasure for Ground-surface Settlement.