

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 —本州四国連絡道路・舞子トンネル北工事における計測データの分析・評価—

A study on the effect of umbrella method for tunnel based on field measurements

—in case of MAIKO TUNNEL (North Site)—

箱石 安彦¹⁾、岩野 政浩¹⁾、青木 俊彦²⁾、青野 宏³⁾、亀山 寿仁³⁾

Yasuhiko HAKOISHI, Masahiro IWANO, Toshihiko AOKI, Hiroshi AONO and Toshihito KAMEYAMA

Pre-reinforcement ahead of a face using long steel pipes and consolidation grouting, known as an *umbrella method*, is the promising method to sustain the stability of a tunnel face and to reduce the ground settlements. However, the rational design methodology has not yet been established. First of all, the behavior of the ground around the tunnel supported by the umbrella method due to tunnel excavation is described. Next, the behavior of support members is closely examined based on the field measurements. Finally, a couple of notes for the design and construction techniques regarding the umbrella method are described.

Key Words : *Umbrella Method*, NATM, field measurment, ground settlement

1. はじめに

アンブレラ工法(長尺先受け工法)は、土被りの薄い土砂地山での切羽安定対策や地表面沈下抑制の補助工法として、主として都市部近郊の山岳トンネル工法(NATM)トンネルでその採用が昨今急増している。鏡、天端が安定しない土砂山においては、掘削作業の安全性向上の面から、アンブレラ工法は効果的な補助工法と見なされている。しかし、その工法の効果は定性的にも十分に把握されておらず、設計法、施工法のいずれもまだ一般化されていない現状である。一方、トンネルの大断面化と都市部における需要が高まる中、アンブレラ工法は切羽安定対策や地表面沈下抑制の補助工法として採用される事例が増すものと予想される。

本稿は、日本で最初にアンブレラ工法が適用された本州四国連絡道路・舞子トンネル工事のうち北工事・アンブレラ工区間の現場計測データ¹⁾に基づいて、アンブレラ工法に期待された効果の一つである地表面沈下抑制効果について、沖積層と洪積層を対象に、事後検討・評価を行ったものである。なお、検討は、アンブレラ工区間の周辺地山の地表面沈下の他に、アンブレラ・ウォール応力や吹付けコンクリートおよび鋼製支保工の応力についての検討も加え、今後の設計・施工にあたって留意すべきと思われる点を幾つかまとめた。

2. 舞子トンネル北工事・アンブレラ工の概要

(1) 工事概要と採用したアンブレラ工法の特徴

本州四国連絡道路・舞子トンネルは、明石海峡大橋へのアプローチ(神戸側)となる道路トンネルで、その工事は、地下水を含んだ未固結な大阪層群中に、掘削断面積約 150m^2 (標準部:トンネル掘削幅約 16m 、トンネル掘削高約 12m)の扁平大断面トンネルを山岳トンネル工法(NATM)で構築するものである。トンネルの標準工法は、切羽の自立性を考慮して、中壁分割工法(CD工法)であったが、 $4\sim 7\text{m}$ の低土被りとなる中学校グラウンド直下の 200m 区間においては、近

1) 正会員 大成建設(株)土木本部土木設計第一部

2) 正会員 舞子トンネル北工事特定建設工事 大成・西松・東急・住友・地崎共同企業

3) 正会員 本州四国連絡橋公団 第一建設局

接する校舎(位置関係は図-3 (a)参照)への影響を考慮して、アンブレラ工法を併用した上半ベンチ工法を採用した。

アンブレラ工法とは、長尺の鋼管を切羽前方のトンネルアチに沿って密に打設し、さらに鋼管内から周辺地山に注入を施すことにより、切羽前方にアーチを形成し、掘削前に地山の支保効果を高めようとする補助工法である。トンネル掘削は先行構築されたアンブレラアチの下を掘削していくことになる。本工法の目的は、天端防護、切羽安定および地表面沈下抑制を図るものであるが、施工面では大断面掘削を可能にし作業の効率化も図られている。

舞子トンネル北工事で採用したアンブレラ工法の概要図を、図-1に示す。採用工法は、下記特徴を持つ。

- ①鋼管打設削孔方式にダブルロータリー方式を採用：削孔水やスラムを内返しにし、鋼管周辺地山の乱れを極力抑制する。
- ②水平ジェットグラウト工による先行脚部補強：アンブレラ工専用機にジェットグラウト工機能を追加し、そのジェットグラウト工によりアンブレラ・フォアパイル群先端と同奥までの前方地山の上半脚部にあたる部分を先行改良する。(設計強度： $\sigma_{30}=26\text{kgf/cm}^2$)。
- ③プレロードシェル工による荷重伝達機能の早期形成：予め鋼製支保工に脱水性の布ホスを設置し、支保工建込みと同時にその布ホス内に比較的にゲルタイムの早い(60分)無収縮モルタルを充填する。この手法により、鋼製支保工地山側ラッパ面と先受け鋼管群の凹凸のある隙間を容易にかつ確実に充填し、アンブレラ・フォアパイル群から鋼製支保工への荷重伝達機構の早期形成を図る。

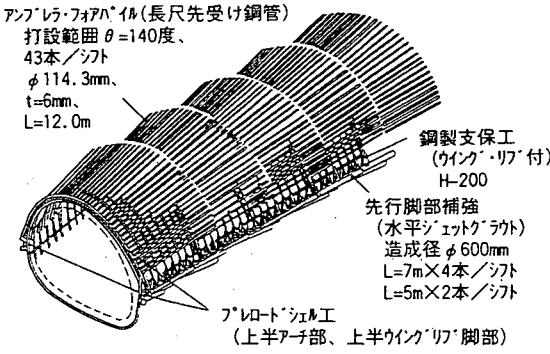


図-1 舞子トンネル北工事・アンブレラ工法の概要図

(2) 地山状況

周辺の地形は、開析の進んだ谷部と残存した尾根部が入り組んだ地形を示し、溜池や崩落跡が各所で見られる。周辺の地質は、新第三紀の神戸層群を基盤とし、その上層に第四紀の大阪層群、さらにその上層に段丘堆積物が分布し、これらの侵食凹部に沖積層が分布する。周辺の地下水は、当初本坑天端約+10mまでであったが、本坑掘削に先立ち水抜きシールドおよび水抜きシールド内からの水抜きホーリング工により本坑天端約-2mまで水位低下させた。

アンブレラ工法区間は地形上は谷部に位置し、掘削対象地山は以下の2つに大別された。

- ①沖積層部：沖積砂礫層と盛土層。この区間は、切羽に地層の不連続面や木根等が見られたことから、過去にグラウンド造成のため沖積層谷部が掘削整形・埋戻しされた箇所と推定された。なお、この沖積層部では地表面沈下が増大したため、水平ジェットグラウト杭を鏡補強として切羽前方に実施すると共に、アンブレラ・フォアパイル鋼管内(奇数孔)注入では注入材を早強セメントミルク(W/C=75%)から速硬性超微粒セメントミルク(W/C=150%)に変更し、周辺地山の注入改良ゾーンの拡大を図った。
- ②洪積層部：主にシルト混り砂礫と粘土を主体とした大阪層群。

表-1 周辺地山の土質定数

地層	記号	色調	土質	N値	変形係数 kgf/cm ² [MPa]	透水係数 (cm/s)
沖積層部	盛土	Bk 黄褐 ～褐灰	砂礫	3 ～40	5～40 [0.5～4]	—
	沖積層	A1 灰 ～赤褐	砂礫	3 ～7	5～30 [0.5～3]	—
洪積層部	大阪層群	Og2 青灰 ～灰	砂礫	30 ～60	200～500 [20～50]	約10 ⁻⁴
		Oc2 青灰 ～褐灰	粘土	28 ～60	100～600 [10～60]	—
		Og4 灰白 ～灰	シルト混 砂礫	20 ～60	200～500 [20～50]	10 ⁻⁵ ～ 10 ⁻³

表-1に、周辺地山の主な土質定数を示す。また、図-3 (b)に地質縦断面図を示す。

(3) アンブレラ工区間の計測工

当工法区間は、中学校グラウンド部の沈下を極力抑制する目的から、通常のトンネル計測工に加えて、下記の計測(自動計測：測定間隔1時間)を実施した(図-2)。

- ①トンネルセンター直上の地表面沈下測定
- ②アンブレラ・フォアパイル(天端部)応力測定

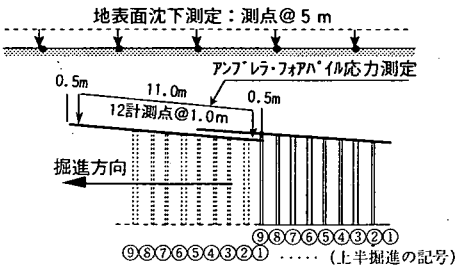
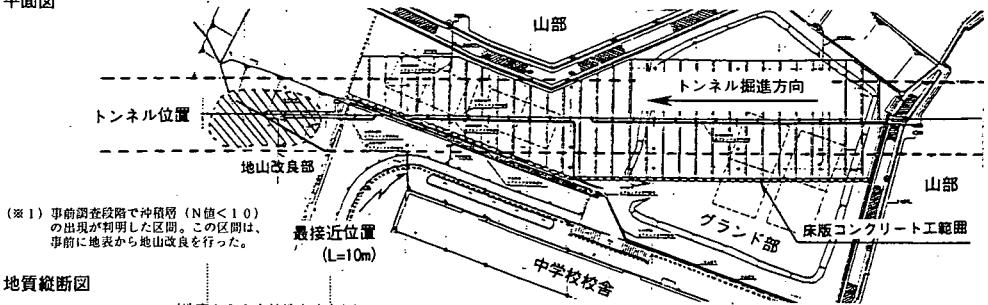


図-2 地表面沈下測定とアンブレラ・フォアパイル応力測定

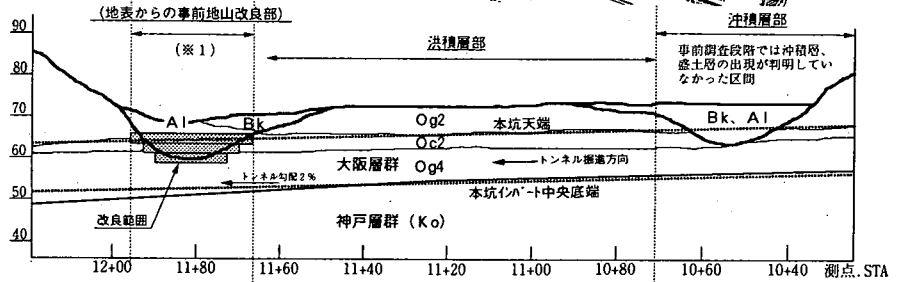
3. 地表面沈下の計測結果

アンブレラ工法区間のトンネル直上の地表面沈下の最終沈下分布（トンネル軸方向分布）を、図-3 (c)に示す。また、図-3 (d)に、アンブレラ工区間の支保と計測項目を示す。

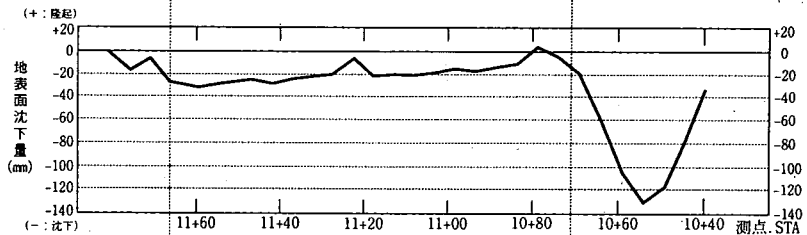
(a) 平面図



(b) 地質縦断面図

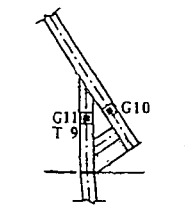
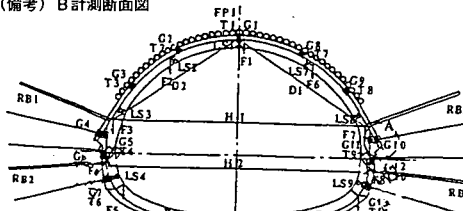


(c) トンネル直上での地表面沈下 (最終変位)



(d) 一次支保と計測工

区間延長		アンブレラ工法区間：200m＝掘進8m/77t×2577t（専用機械SM605DT）																				CD 工法		
		25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6		5	4
		中学校グラウンド部（地表＝床版コンクリート(t=15cm、金網入)で事前補強)																						
アンブレラFP仕様		アンブレラ77t仕様：φ114.3mm、t=6.0mm、L=12.0m×43本（打設ピッチ=40cm）/77t、上半掘進長/77t=8m（ラブ長=4m）																						
支	一次支保	吹付けコンクリート=25cm、ロックボルト：L=6m×4本（上半）、6本（下半）、H鋼：H200-ギンクリ付																						
	荷重伝達	アンブレラ工（布設寸法）：上半アーチ（φ230mm×9.5m×2本）、上半脚部（φ320mm×1.0m×2本）																						
保	上半脚部の先行補強	水平シールドカット(JG)/噴射削孔圧＝約350kgf/cm ² ：改良径φ=600mm、L=7m×4本/77t、L=5m×2本/77t																				試験区間		
	FP注入モルト(早強)	普通										超微粒子										普通		
	鏡補強工											水平JG杭、他												
計測	地表面沈下測定	差圧式沈下計、測点@約5m（全29点）																						
	坑内B計測断面	○																				○		
(地山状況)		事前地山改良部					洪積層部（大阪層群：粘土と砂礫）										沖積層部（盛土を含む）							
(備考) B計測断面図																								



(拡大図) ウィング・リブ部

計測項目：断面STA.10+50、STA.11+40			
計測項目		記号	測点数
計測 A	天端沈下、坑壁沈	F	9
	内空変位(上半斜)	D	2
	内空変位(水平)	H	2
	吹付けコンクリート応力	T	11
計測 B	鋼製支保工応力	G	13
	ロックボルト軸力	RB	4
	77tボルト応力	FP	1
	(覆工コンクリート応力)	(LS)	(10)

図-3 アンブレラ工法区間の地質縦断面図と地表面沈下（トンネル軸方向の最終分布）など

(1) 先受け鋼管群の削孔時の沈下

図-4は、地表面沈下を上半切羽離れとの関係で整理した沈下特性曲線である。同図には沖積層部と洪積層部の代表的断面のものを示した。

沖積層部での沈下発生に着目すると、アンブレ・フォアパイル群の削孔時に最大約30mmの地表面沈下が生じた。この沈下は鋼管打設切羽の前方で先行沈下として顕著に見られ、その影響範囲は鋼管先端位置まで及んだ。なお、この沈下は切羽が止まった状態での沈下となるため、切羽離れで整理した特性曲線においては鉛直直線となって表される。このような鋼管群削孔による沈下量の累計は、大きいところでは最終沈下量の約50%にも及んだ。

このような削孔時の沈下については他工事においても同様な報告があり、その報告事例では削孔時の沈下は切羽後方でも見られている²⁾。これに対して、本工事区間では、沖積層部では切羽前方での沈下は比較的顕著に見られたものの、切羽後方での沈下は顕著には見られなかった。これは、文献2)の報告事例との比較から、上半脚部の先行補強の併用により切羽通過後に吹付けコンクリートや鋼製支保工が早期に効果を発揮できたためと考えられる。

今回沖積層部で見られたようなアンブレ・フォアパイル群削孔時の沈下を極力無くするには、削孔・注入を極端には1本ずつ行う等の前方地山をできるだけ乱さないような鋼管打設サイクルの考慮が必要であろう。

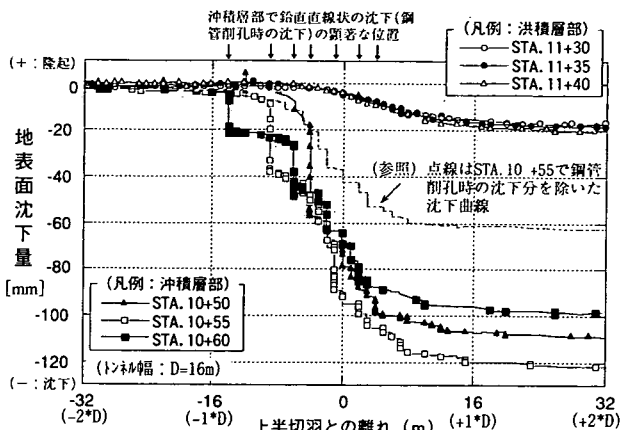


図-4 地表面沈下と上半切羽位置との関係

(2) 先行沈下率

NATMトンネルでは、一般的に「地山の変形は切羽前方で収束変形量の約30%(β)が発生し、支保効果を発揮し始めるまでに50~70%にもなる。従って、支保工で拘束できる変形量はわずか30~50%になる。」³⁾ 本節では、地表面沈下の発生割合変化図を作成し(図-5、図-6)、先行沈下率 β (=上半切羽到達時の沈下量/最終沈下量)について考察を行った。

先行沈下率は、沖積層部では35%~65%であったのに対し、洪積層部では10%~20%と比較的に小さい値であった。洪積層部での先行沈下率は、アンブレ工法の無い場合の一般的な値($\beta \approx 30$)に比べて小さい値であり、アンブレ工法による先行沈下抑制効果として評価できる。先行沈下を抑制した場合、支保で拘束できる変形量が多くなり結果的に最終沈下抑制を図ることができる。なお、沖積層部の沈下発生割合は、アンブレ・フォアパイル群削孔時の沈下を差し引いても殆ど変わらなかった(図-4の破線に相当)。

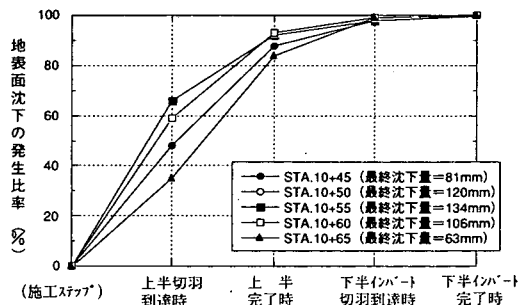


図-5 地表面沈下の変位発生割合図(沖積層部)

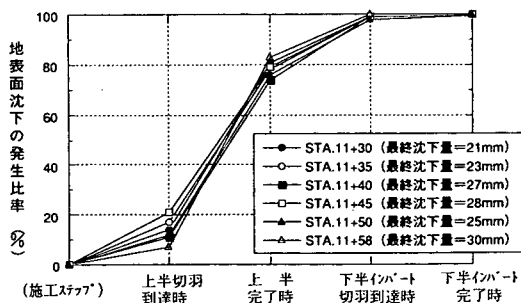


図-6 地表面沈下の変位発生割合図(洪積層部)

(3) 1掘進毎の地表面沈下

アンブレ工法では、先受け鋼管群の打設位置から次シフトの先受け鋼管群打設位置へ到達するまで上半掘削を進めるが、切羽が先受け鋼管群の先端に近づくため切羽面からの先受け長が1掘進毎に1掘進長だけ短くなっていく。つまり、各掘進時で先受け工の長さが異なることになる。舞子トンネル北工事での1掘進長は1.0m、1シフト掘進長は8mであり、図-2に示すように、各シフトにおける各上半掘進を記号②~⑨で示す。ここで、記号①はアンブレ・フォアパイル打設用が1'支保工の建込みを意味し掘進には含まない。図-7~図-8は、計測結果を差分処理することにより各上半掘進に伴う地表面沈下増分を求めたものである。

図-7に示す沖積層部での計測結果では、前シフトとのアンブレ・フォパル群のラップ区間直下の掘進時の沈下増分（図中、凡例②～⑤）と、同ラップ区間を過ぎてからの掘進時での沈下増分（図中、凡例⑥～⑨）とでは、後者の沈下増分が大きい傾向であった。先受けとしての剛性の比較的に大きなラップ区間で地表面沈下増分が小さかったことは、アンブレ・フォパルの剛性が大きいほど地表面沈下抑制効果も大きいものと考えられる。なお、洪積層部では同様な沈下傾向は特には見られなかった。また、掘進が②、③、……、⑨と進むに従ってアンブレ・フォパルの残長は短くなっていくが、 $\Delta\delta\text{-}② < \Delta\delta\text{-}③$ 、 $\Delta\delta\text{-}③ < \Delta\delta\text{-}④$ 、……、 $\Delta\delta\text{-}⑧ < \Delta\delta\text{-}⑨$ というような傾向は、沖積層部、洪積層部のいずれにおいても見られなかった。つまり、アンブレ・フォパル群の残長が長いほど地表面沈下抑制が大きいという傾向は、同図からは見られない。沈下抑制効果はアンブレ・フォパルの長さとは殆ど関係ないものと考えられる。

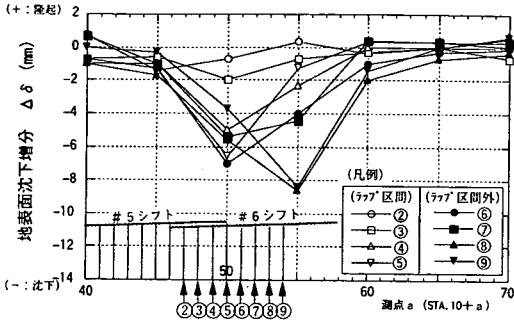


図-7 上半掘進毎の地表面沈下増分 [沖積層部]

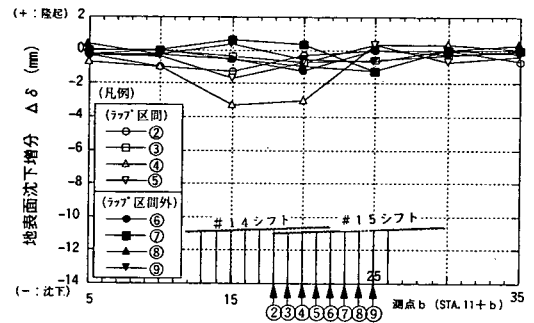


図-8 上半掘進毎の地表面沈下増分 [洪積層部]

(4) 地表面沈下と天端沈下

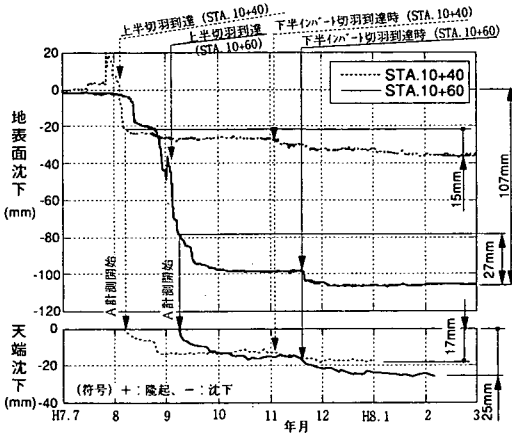


図-9 地表面沈下・天端沈下の経時変化 [沖積層部]

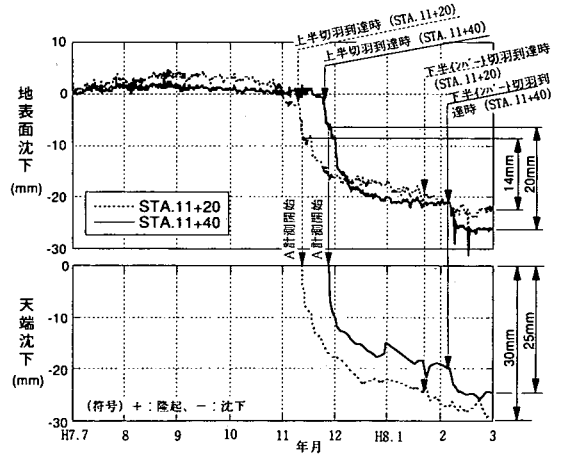


図-10 地表面沈下・天端沈下の経時変化 [洪積層部]

図-9～図-10に、地表面沈下および天端沈下の経時変化を示す。坑内変位計測（A計測）開始後の地表面沈下増分と天端沈下から、以下の知見が得られる。

(7) 切羽通過後に測定を開始した天端沈下は、沖積層部および洪積層部のいずれにおいても、地表面沈下とはほぼ同様な発生挙動が観測され、いわゆる共下がり挙動が見られた。

(イ) 沖積層部では先行沈下が大きいので、例えば、測点STA. 10+60では天端沈下は全沈下量の約23%（ $=\delta 1 / \delta 2 = 25\text{mm} / 107\text{mm}$ ）しか測定されなかった。ここで、 $\delta 2$ は上半切羽到達時の全天端沈下量で、同時刻の地表面沈下量に等しいものと仮定した（上記(7)の共下がり挙動の考察結果から）。なお、 $\delta 1$ はA計測で測定できた変位量である。このような軟弱地山において、天端沈下から地表面沈下を推測するには、一般的な天端沈下計測（A計測）だけでは不十分で、全天端沈下量を把握するために先行沈下測定（例えば、水平傾斜計の利用⁴⁾）が必要となる。

4. アンブレ・フォアパイル（先受け鋼管）および一次支保の計測結果

(1) アンブレ・フォアパイル（先受け鋼管）応力

①一掘進毎のアンブレ・フォアパイルの発生曲げモーメント増分と梁モデル例

一掘進毎のアンブレ・フォアパイルの曲げモーメント増分から、アンブレ・フォアパイル群直下の上半掘進時に、アンブレ・フォアパイルに梁の曲げの挙動が見られた¹⁾。その曲げモーメント増分の分布から想定される梁モデルの一例を、図-11～図-12に示す。

アンブレ・フォアパイル群直下の上半掘進時のアンブレ・フォアパイル断面力発生等に関する計測結果は、以下の通りである。

(ア) 切羽付近の仮想支点位置は、切羽前方1.5～2.5m以奥に形成され、各掘進時で殆ど変わらず、切羽前方のアンブレ・フォアパイルの残長に関係しない。

(イ) 負の曲げモーメント増分（内空に凸変形に対応）のピークの出現位置は、地山状況によって異なり、沖積層部では切羽前方で生じたのに対して、洪積層部では切羽手前で生じた。沖積層部のように切羽前方の地山が不良の場合には、仮想支点位置が比較的に切羽奥になるためピークが比較的に切羽奥に出現する。

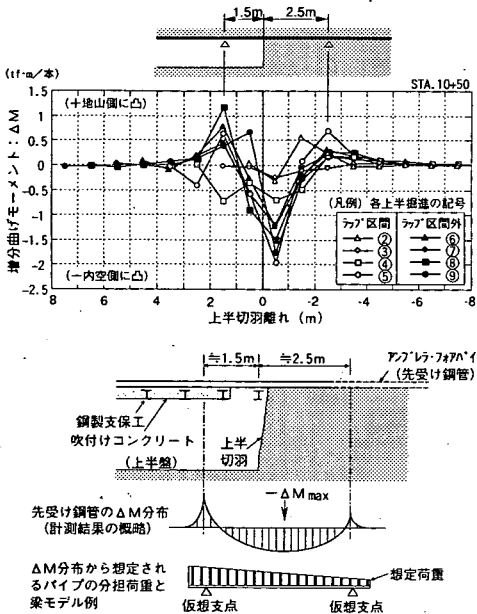


図-11 曲げモーメント増分分布と梁モデル例 [沖積層部]

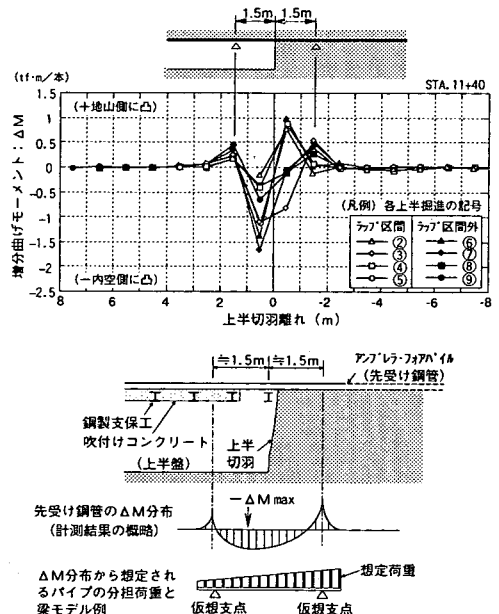


図-12 曲げモーメント増分分布と梁モデル例 [洪積層部]

②曲げ抵抗と地表面沈下増分との相関

図-13は、アンブレ・フォアパイル群直下の上半掘進に伴うアンブレ・フォアパイルの負の曲げモーメント増分と地表面沈下増分の関係を示したものである。アンブレ・フォアパイルに発生する曲げモーメント増分は、洪積層部、沖積層部のいずれにおいても、2 tf·m以下で、さらにラップ区間外での値（図中、凡例添字.6～9）がラップ区間での値（図中、凡例添字.2～5）より大きい傾向にあった。一方、増分変位に関しては、沖積層部では、梁の曲げモーメントとたわみが比例するのと同様に、両者に正の相関が見られた。しかし、洪積層部ではそのような比例関係は見られず、増分変位は沖積層部における最小値とほぼ同等またはそれ以下である。

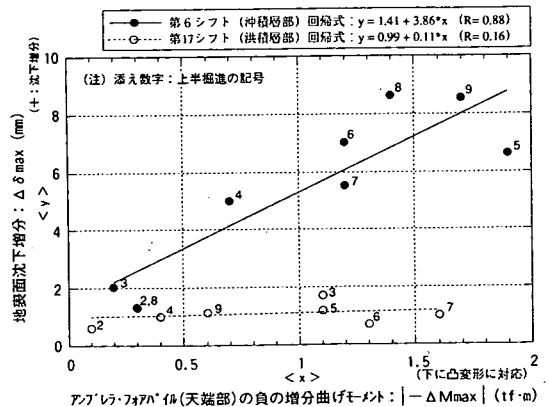


図-13 アンブレ・フォアパイル(天端部)の発生曲げモーメント増分 ΔM と地表面沈下増分 $\Delta \delta$ の関係

沖積層部、洪積層部において、梁モデルで想定する曲げ剛性がほぼ同じで、かつ、増分荷重もほぼ同じという条件下で、地表面沈下増分に違いが見られたことから、地表面沈下抑制効果とアンブレ・フォアパイルのトンネル軸方向曲げ抵抗の関係は殆どないものと考えることができる。一方、ラップ区間で地表面沈下増分が小さかったことから、地表面沈下抑制効果は切羽前方付近でのトンネル・アーチ方向の剛性と関係しているものと考えられる。

(2) 吹付けコンクリートおよび鋼製支保工の断面力

①吹付けコンクリートおよび鋼製支保工の軸力

図-14、図-15に、アンブレ・フォアパイル群下の吹付けコンクリートおよび鋼製支保工の天端部の軸力発生経時変化図である。図-14から、吹付けコンクリートや鋼製支保工の建込み直後の初期段階において、以下のような挙動が見られた。

(ア) 吹付けコンクリートおよび鋼製支保工等の一次支保の完了している切羽位置から次間の掘削（素掘り）を行うと、素掘り部手前の間の吹付けコンクリートと鋼製支保工に圧縮軸力が発生し、横断面内では天端付近に集中した。この軸力の集中時期は、吹付けコンクリートや鋼製支保工がアンブレ・フォアパイルの切羽後方の仮想支点となる位置と時期にはほぼ一致することから、天端付近の軸力集中は仮想支点反力荷重によるものと想定される。なお、この挙動はトンネル周辺のせん断方向地盤バネを考慮した骨組モデルに天端付近から鉛直荷重が作用したモデルで事象説明できる。

(イ) 素掘り部手前の吹付けコンクリートの天端付近での軸力集中は、二次吹付けコンクリート工完了時からその軸力が抜け始める。この軸力の低下現象は、主に吹付けコンクリートが支保部材として効果を発揮する時期に、仮想支点が移動しそれまで支点反力として作用していた荷重の除荷によるものと想定される。

(ウ) これに対して鋼製支保工の軸力は抜けない。これは、アンブレ・フォアパイル群が、地山からのトンネル掘削外乱荷重を吹付けコンクリートよりも剛性の大きな鋼製支保工への荷重分担を助長しているためと考えられる。

上記挙動は、図-15においては、一次支保設置から2間目(⑨間)の掘削・支保段階で見られる。吹付けコンクリートの変形係数や強度の発現に関して材齢約6時間(=0.25日)でその約80%が発現する⁵⁾ことを加味すれば、吹付けコンクリートと鋼製支保工が一体的な支保部材となる時刻以降は、沖積層部、洪積層部のいずれにおいても、基本的には上記挙動が見られたと考えることができる。

②鋼製支保工の曲げモーメント

図-16は、鋼製支保工の天端部に発生した曲げモーメントの経時変化図である。アンブレ・フォアパイル群直下の掘進における初期段階で、鋼製支保工・天端部で負の曲げモーメント(内空側凸変形に対応)の集中が見られ、この集中からも天端付近で鉛直下方向の荷重が卓越したことが分かる。

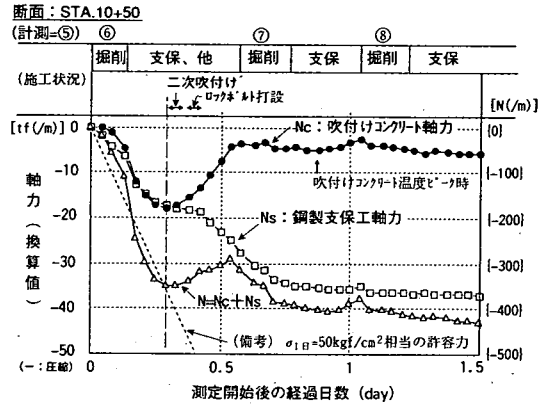


図-14 一次支保部材(天端部)の軸力発生 [沖積層部]

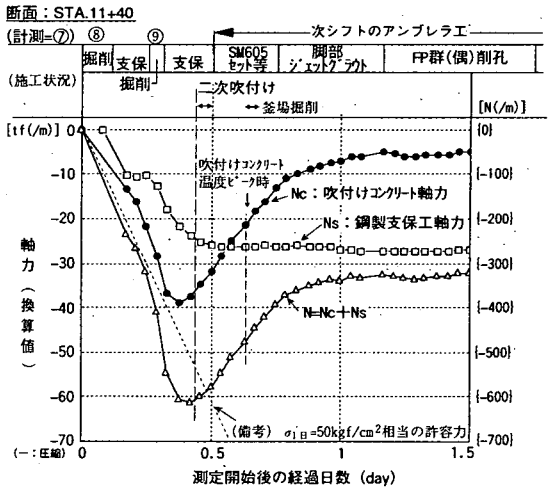


図-15 一次支保部材(天端部)の軸力発生 [洪積層部]

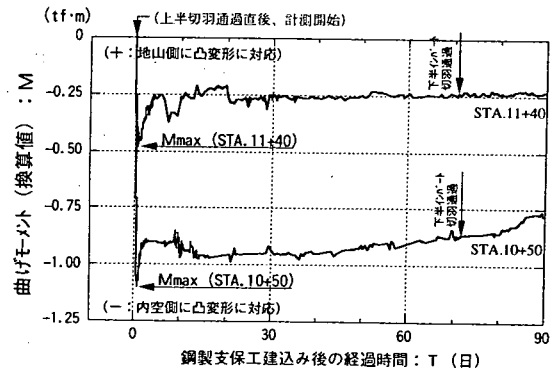


図-16 鋼製支保工(天端部)の曲げモーメントの経時変化図

5. まとめ

アンブレ工法の地表面沈下抑制のメカニズム等に関する定性的な考察結果を、地山条件の「良／不良」の場合に分けて、以下に示す。また、トンネル支保の設計・施工に関して留意すべきと思われる点についても幾つか加える。なお、本考察はあくまで一工事例からの一考察結果であり、アンブレ工法の効果に関して統一的な見解を見いだすには、今後、様々な地山条件や施工条件でのデータ分析等を含めた検討が必要である。

(1) 地山条件が「良」の場合（洪積層地山での分析結果）：

①地表面沈下の抑制効果：アンブレ工法によって切羽到達までの先行沈下が抑制される。

②施工上の留意点：

(7) 掘削直後の初期段階（掘進想定距離：1～2m）において、天端付近で鉛直下方向の荷重が卓越し、かつ、一時的に集中する挙動が見られる。この荷重は、掘削解放力や緩み土圧のような周辺地山からの荷重ではなく、アンブレ・フォアパイル群から伝達される一時的な仮想支点反力荷重であると考えられる。この荷重により、トンネル変形はいわゆる共下がり挙動になりやすいため、掘削に先行した脚部補強の併用が望ましい。

(i) 上記(7)の荷重に対しては、アンブレ・フォアパイル群と鋼製支保工の隙間の荷重伝達のための当たり取りを早期に行うこと（プレト・シェル工など）で鋼製支保工が早期に荷重を分担できる。

(u) 先行沈下抑制を期待できるアンブレ工法では、上記(7)および(i)の荷重に対して脚部補強等を併用して一次支保が効果的に支保効果を発揮できれば、結果的に地表面沈下の抑制につながる。

③設計上の留意点：トンネル支保設計は、掘削直後の初期段階においては主にアンブレ・フォアパイル群の仮想支点反力に対する設計が必要で、掘削直後の初期段階の以降の掘進においては主に掘削解放力や掘削に伴う緩み荷重に対する設計が必要である。例えば、前者の設計においては吹付けコンクリートの初期強度の確保等の対策が必要である。

(2) 地山条件が「不良」の場合（沖積層地山での分析結果）：

①地表面沈下の抑制効果：アンブレ工法によっても先行沈下の抑制を期待することは難しい。鋼管削孔時に切羽前方地山を緩める危険性が高く、削孔時に先行沈下が発生することにもなる。従って、削孔・注入を極端には1本ずつ行う等の前方地山を極力痛めないような鋼管打設サイクルの考慮も必要である。

②施工上の留意点：掘削直後の初期段階およびそれ以降におけるトンネル作用荷重やトンネルが共下がり挙動になりやすい点は、基本的に地山条件が「良」の場合と同じである。地山条件が「良」の場合と異なる点は、以下の点である。

(7) アンブレ・フォアパイルの仮想支点（切羽前方側）が比較的切羽奥になる分、切羽前方のアンブレ・フォアパイルに作用する合計荷重も大きくなる。このとき前方地山が仮想支点反力荷重を支持できない場合には、周辺地山の沈下影響範囲は1掘進でアンブレ・フォアパイル先端にまで及ぶ危険性がある。

(i) 上記(7)に対して、切羽前方地山の補強または改良は、地山状態を「良」化するため、アンブレ・フォアパイルの仮想支点の切羽奥方への出現を避け、有効な併用対策工と思われる。

(u) アンブレ・フォアパイル群の鋼管剛性を大きくすれば、沈下抑制効果も大きいと考えられる。ただし、鋼管のトンネル軸方向曲げ抵抗が直接的に地表面沈下を抑制する効果であるとは考えられない。（切羽前方付近におけるトンネル横断面内のトンネルアーチ構造の剛性増大によって周辺地山の沈下抑制に寄与すると考えることはできる。）

③設計上の留意点：トンネル支保設計は、基本的に基本的に地山条件が「良」の場合と同じである。しかし、仮想支点反力荷重、緩み土圧のような周辺地山からの荷重のいずれも、大きくなることが予想される。

謝辞：計測工においては（株）東横エルメスにご尽力頂いた。論文作成においては、本四公団・原崎氏（前舞子工事事務所長）および関係各位の皆様にご指導を頂いた。ここに厚く感謝の意を表する次第である。

参考文献： 1) 青野、亀山、原田、松田、青木：長尺先受け工法の設計、施工法に関する提案、トンネル工学研究論文・報告集第6巻、1996年11月、pp. 31-38、 2) 山本、林、坂口、石井：盛土地盤中の長尺鋼管フォアパイルリングによるアンブレ工法の施工と地山挙動、トンネル工学研究論文・報告集第6巻、1996年11月、pp. 229-234、 3) 中西：新しいフォアパイルリング工法、トンネルと地下、1988年2月、 4) 岡部、近藤、庄野、杉田：水平傾斜計によるトンネル切羽前方地山の変位挙動の計測例、第19回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、1987年2月、pp. 326-330、 5) 吉田、柴田、須藤：高炉セメントを用いた吹付けコンクリートの緒性状について、第39回土木学会年次講演概要集（第5部）、1984年、pp. 91-92