

超長尺先受け(0-STEP)工法の打設精度向上 の取り組み

吉永 浩二¹・小吹 章²

¹ 法人会員 西松建設(株) 本社 土木設計部 (〒105-8401 東京都港区虎ノ門 1-20-10)

² 法人会員 西松建設(株) 東関東支店 安房白浜トンネル出張所 (〒295-0102 千葉県南房総市白浜町白浜 5909)

山岳トンネル工法(NATM)で用いられる注入式長尺先受工法(AGF工法)は、標準的な掘削設備を用いて簡便に施工できる切羽安定対策(天端)を目的とした補助工法の一つであり、通常1シフト12~13mの施工延長で実施されている。今回報告する超長尺先受工法(0-STEP工法^{※1)})は、坑外からガイドを使用してAGF工法の1シフト長以上の長さとなる先受工を施工するものであり、施工延長が長いために施工時には鋼管打設精度の向上が課題となる。

※1) 0-STEPとは、Optimum-Speedy Treatment by Elongated Piling(長尺鋼管による最適・迅速な工法)の略である。

キーワード：補助工法，長尺先受工法，0-STEP工法，打設精度向上

1. はじめに

今回0-STEP工法を採用した安房白浜トンネル工事は、館山市と南房総市を結ぶ農用道トンネルをNATMによって施工する新設工事である。掘削開始地点の終点側坑口の低土被り区間(土被り2D以下)には、地すべり地形も見られ、崖錐が厚く堆積している。また、この低土被り区間のトンネル上部には、林道が横断しており、施工時の歩行者や通行車両の安全確保と林道への影響抑制が課題であった。

当初設計では、当該区間においてAGF工法が予定されていたが、低土被り部における安全性に配慮した施工方法として、林道を越えて一度に施工できる0-STEP工法を採用した。

2. 工事概要

工事位置を図-1に示す。

本工事は、(独)森林総合研究所 森林農地整備センター(旧緑資源機構)が農用地総合整備事業安房南部区域の事業計画に基づき、農業用道路3工区に係るトンネル工事および付随する明かり工事を実施するものである。本トンネルは、終点側(南側)から起点側(北側)へ向かって3.5%の上り勾配で施工する。

工事件名：18 安房 農用道3号トンネル工事

発注者：(独)森林総合研究所

森林農地整備センター(旧緑資源機構)

安房南部建設事業所

工事場所：千葉県南房総市白浜町地内

工期：平成18年12月28日～平成21年2月21日

全工事延長：L=1,190.83m

トンネル概要：

トンネル延長 L=1,137.83m

支保方式 NATM

掘削工法 ショートベンチカット工法

掘削方式 機械掘削

運搬方式 タイヤ方式

道路幅 B=7.5m(車道幅員6.0m)

内空断面積 A=46.5m²(覆工後)



図-1 工事位置図

3. 地形・地質概要

当該トンネルは、房総丘陵南部の館山丘陵に位置する。丘陵を構成する地層は更新世～鮮新世後期の千倉層の砂岩・泥岩層であり、全体的にほぼ東西方向の走向で北斜面構造になっている。このため北側（起点側）ほど新しい地層になる。

今回 0-STEP 工法を採用するトンネル終点（掘削開始）側坑口付近は、表層を崖錐性堆積物（dt）が覆っており、その先には、砂岩・泥岩互層が分布している。砂岩・泥岩互層は、dt 層より先では、酸化し黄褐色を呈した風化状態にあるが、更にその先は暗灰色の還元状態になっている。

終点坑口付近の林道脇では裂罅水と思われる湧水が見られる。また、計画線の丘陵と低地との地形変換点付近では、崖錐性堆積物から伏流水が流れ出ている箇所も見られ、低地が湧水のため湿地となっている水路も見られる。

4. 0-STEP 工法採用の経緯

本工事では、総合評価落札方式による技術提案において、「低土被り部における安全性に配慮した施工方法」についての VE 提案が求められた。そこで、その提案内容の 1 つとして、終点側坑口から 6 シフト計画されていた AGF 工法のうち坑口側 2 シフト分を 0-STEP 工法（NETIS 登録番号：KT-980660-A）にて施工することを提案した。

0-STEP 工法は、トンネル施工の汎用機である油圧削岩機を使用して簡便に小口径（ $\phi 70 \sim 114.3 \text{ mm}$ ）の長尺先受け工を施工することができる工法であり、最長 36m の長尺施工の実績がある。

今回 0-STEP を採用することによる利点を以下に示す。

- ① 坑内からの AGF 工法に比べ、打設角度が小さいことから、トンネル天端と打設鋼管との離隔が小さく、切羽（天端）の安定性に優れる。
- ② 坑口部の不安定な崖錐堆積物区間と林道下の補強を坑外より一括施工できるため、崖錐堆積物中や林道下で切羽を止めての次シフトの先受け工を施工する必要がなく、切羽の安定性に優れる。
- ③ トンネル坑内での鋼管打設作業を減少させる事ができるため、作業の安全性に優れる。
- ④ 0-STEP 工法区間は、養生時間が長く確保できる事から、注入材によるホモゲル強度が高くなり、天端の安定に優れる。
- ⑤ AGF 工法と比較して施工時間を短縮することができる。

以上の利点により、本工事では 0-STEP 工法の採用を決定した。

0-STEP 工法の概要図を図-2、図-3 に示す。

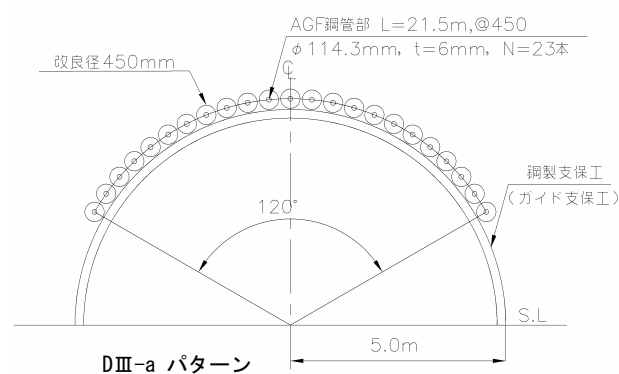


図-2 0-STEP 工法 A-A 断面図

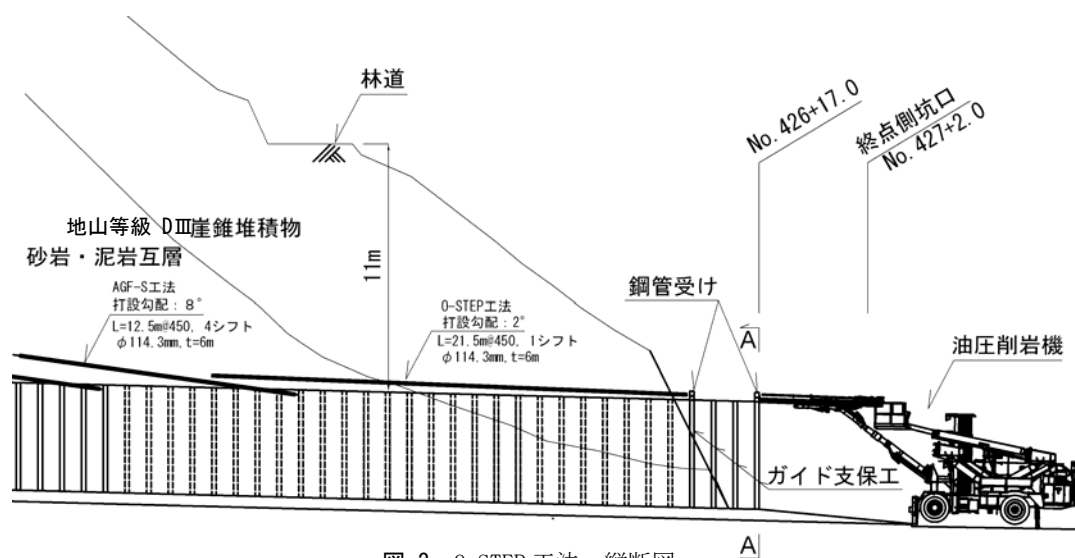


図-3 0-STEP 工法 縦断面図

5. 打設精度向上の取組み

(1) 打設精度向上のための対策

0-STEP 工法は、トンネル施工の汎用機である油圧削岩機を用いるため、専用のボーリングマシンを用いるパイプルーフ工法等に比べ打設精度が劣る。

20m を超える超長尺鋼管を 0-STEP 工法によって施工するには、高い打設精度の確保が要求される。そこで 0-STEP 工法の打設精度向上のために、以下の a)～f) の対策を行った。

a) ガイド支保工 4 基 (H-200) の設置 (図-4)

通常 3～4 基のガイド支保工を設置するが、今回は DIII-a パターンの支保工 4 基を利用して、打設時の鋼管受けを 3m 間で両端に固定できるようにした。また、鋼管打設時の振動や衝撃で打設角度がずれないように、ガイド支保工には、やらずの設置や鋼材での水平継ぎ、脚部の根巻きコンクリートによる補強を施した。



図-4 鋼管打設状況

b) ガイド支保工への鋼管受けの設置 (図-5, 図-6)

鋼管受けは取り外し式とし、端部のガイド支保工 1 基目と 4 基目にシャコ万で固定する。鋼管打設中に次打設の鋼管受けを設置することで、設置時間によるロス削減した。



図-5 鋼管受け設置状況

また、鋼管の打設角度を確保するために、4 基目の鋼管受けには、10.5cm (=ガイド支保工設置距離 (3m) × sin (打設角度 2°)) の高さを設けた。

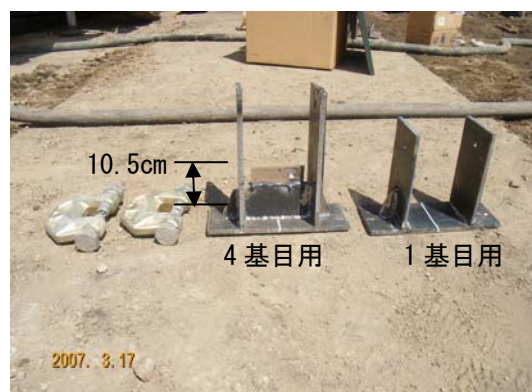


図-6 鋼管受け

c) ロストビット方式の採用

今回、長尺の穿孔を行うことから、穿孔能力に優れた削孔システムを採用することが重要となる。本工事では、拡径ビットと比較して穿孔能力の優れたロストビット方式を採用した。その特徴と図 (図-7, 図-8) を以下に示す。

- ・リングビットとパイロットビットを一体化したトップビットを使用する。
- ・トップハンマーの打撃力、回転力の伝達ロスが少なく、精度の高い穿孔が可能となる。
- ・ビットの構造が簡素なことから、くり粉の排出が良好で穿孔時のトラブルが大幅に低減する。

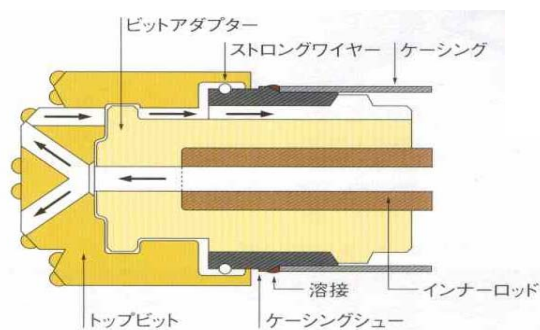


図-7 ロストビット方式 (NSX ビットシステム)

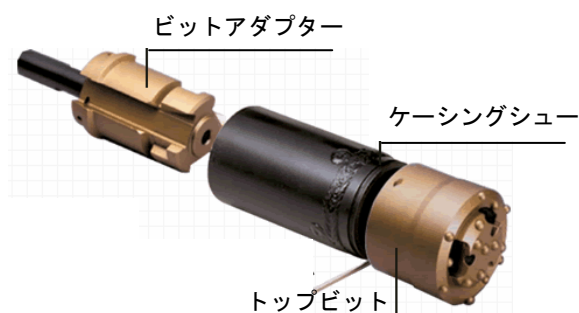


図-8 ロストビット方式 (NSX ビットシステム) 写真

d) スタビライザーの設置 (図-9)

孔壁と鋼管との隙間ができることにより鋼管打設時に鋼管の振れが生じる。その振れを抑制するため、溶接にて、長さ $L=100\text{mm}$ 、厚み $t=5\text{mm}$ 程度の鋼板を溶接した。

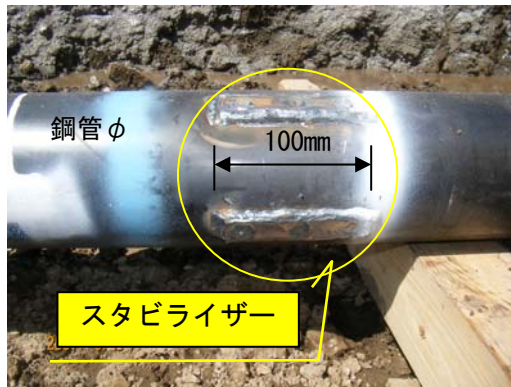


図-9 スタビライザー

e) 先行削孔ビットの工夫

通常の AGF 工法で用いられる先行削孔ビット (図-10) は、ロッドに接続した状態で使用する。0-STEP 工法では、削孔箇所と油圧削岩機との間にガイド支保工があり、油圧削岩機のドリフターを削孔位置に近づけることができない。そのため、先行削孔位置の施工精度を確保することが困難である。そこで、0-STEP 工法の削孔時と同様に鋼管受けを利用して削孔精度を確保できるようにするため、鋼管に接続できる先行削孔ビット (図-11) を作成し使用した。



図-10 通常の先行削孔ビット 図-11 今回の先行削孔ビット

f) ジャイロ計測^{※2)} による計測

鋼管打設後、鋼管内にジャイロを挿入して孔曲がりを測定し、次打設にフィードバックした (図-12)。

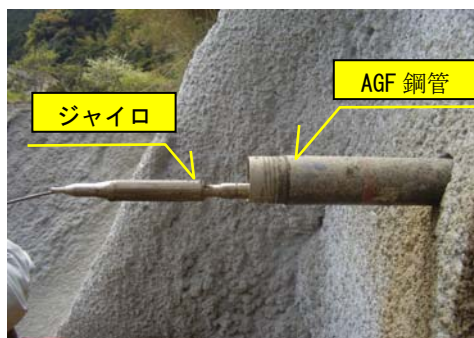


図-12 ジャイロ挿入状況

※2) ジャイロ計測の原理を下記に示す。

ジャイロ計測は鋼管打設精度を 3 次的に計測することを目的とする。ジャイロ計測概要図は図-13 に示す通りである。

計測概念を以下に示す。

まず、プローブが孔の奥に静止しているときに、図-14 に示すようにマルチセンサーの検出した軸の加速度を使ってプローブの初期姿勢角 (傾斜角: ピッチ角, ロール角) 及び相対方位角 (初期値=0 にセット) が定められる。

次にプローブの走向時にはマルチセンサーで検出した 3 軸の角速度を水平座標系に変換, 積分してピッチ角, ロール角および相対方位角の加速変化を得る。

この座標変換によりプローブにローリングを生じても常に水平面に対する角度 (ピッチ角, ロール角) および水平面内の回転角 (相対方位角) が得られ, これにより水平, 鉛直面内の変位が確実に求められる。

この角度変化 (相対方位角: $\Delta\Psi$, ピッチ角: $\Delta\theta$) とそれに対応するケーブル長 ($\Delta\tau$) とをもとに, プローブ (管路) の水平, 鉛直の変位を得る。初期ピッチ角を θ_0 とすると変位は次式から求まる。距離 x はケーブル長より得る。

$$\text{水平変位: } y = \sum_{n=1}^n \Delta\tau_n \times \Delta\Psi_n$$

$$\text{鉛直変位: } z = \sum_{n=1}^n \Delta\tau_n \times (\Delta\theta_n + \theta_0)$$

n_x : x 軸加速度 p : x 軸回り角速度
 n_y : y 軸加速度 q : y 軸回り角速度
 n_z : z 軸加速度 r : z 軸回り角速度

ϕ : x 軸回り角度: ロール角

θ : X-Y 面 (水平面) に対する x 軸の角度: ピッチ角

Ψ : z 軸回り角度: 相対方位角

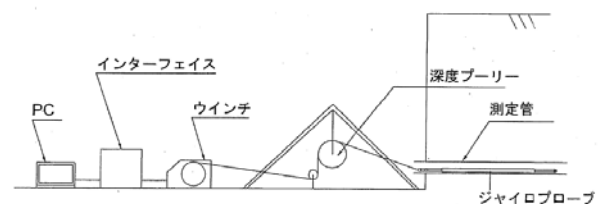


図-13 ジャイロ計測概要図

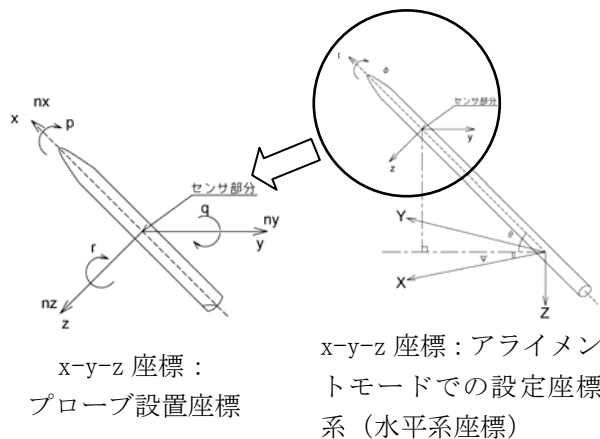
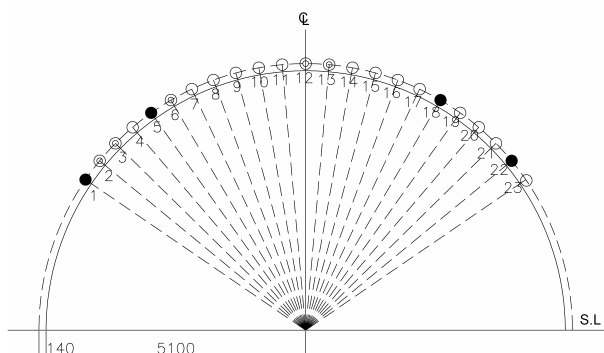


図-14 ジャイロ計測の座標系

(2) 打設精度の測定

ジャイロによる鋼管打設精度測定は、図-15 に示す 9 箇所で行った（図中○、●箇所）。



○：計測箇所(5 箇所)

●：計測箇所およびスタビライザー設置(4 箇所)

図-15 鋼管打設および測定箇所

ジャイロでの測定により、3次元での変位が求められる。求めた X, Y, Z 変位は鋼管口元に対する相対座標であり、X 変位はトンネルの縦断方向の水平座標、Y 変位はトンネル横断方向の水平座標、Z 変位は鉛直座標を示す。

6. 測定結果

打設計画位置と実施工位置との関係を明確にするために、L=5, 10, 15, 20m の 4 断面について、平均打設精度を整理した。結果を表-1 に示す。

表中の打設精度は、打設計画位置からの離れ

$$(R = \sqrt{Y^2 + Z^2}) \text{ を鋼管口元からの距離で除した値と}$$

した。

データ整理の結果、打設延長が長くなるほど打設精度が若干低下するものの、L=20m 時の打設精度範囲は 1/100~1/250 であり、平均打設精度は 1/160 であった。

また、打設延長 5m 毎の計画線からの離れ(R)をトンネル縦断方向にグラフ化し、直進性を見るための基準線を破線で示した。結果を図-16 に示す。このとき、鋼管打設の計画線（グラフ横軸）は、トンネル縦断勾配 3.5%+2° とした。

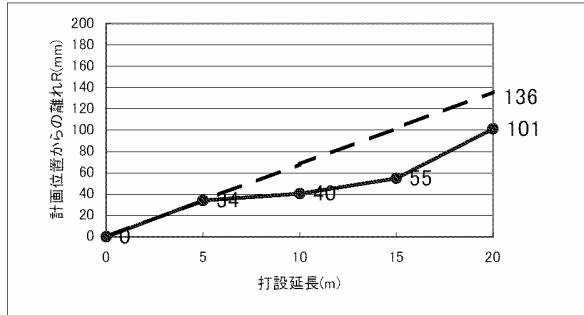
図-16 より、鋼管口元からの距離（打設延長）が長くなる程、計画位置からの離れがほぼ直線的に増加していく箇所と、離れが大きくなるにつれ、孔曲がりが増幅する箇所（No.1, 12, 18, 22）があることがわかる。

表-1 打設精度の集計表

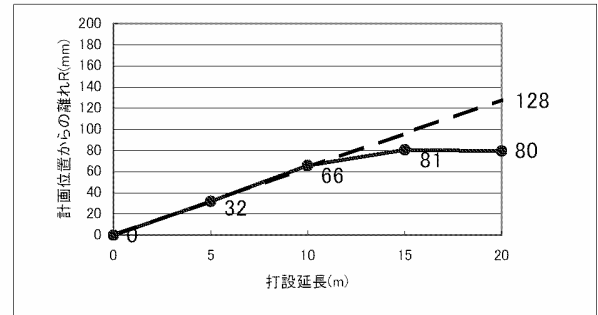
Y:水平方向 Z:鉛直方向 R: $\sqrt{Y^2+Z^2}$ [mm]											
鋼管口元からの距離	No.	1※	2	3	5※	6	12	13	18※	22※	
5m	Y	0	-6	-5	-2	0	2	7	8	-1	1/190
	Z	34	25	33	46	7	32	15	14	26	
	R	34	26	33	46	7	32	17	16	26	
	打設精度	1/147	1/194	1/150	1/109	1/714	1/156	1/302	1/310	1/192	
10m	Y	14	-30	-13	-15	17	12	30	32	2	1/170
	Z	38	42	51	82	41	65	40	54	68	
	R	40	52	53	83	44	66	50	63	68	
	打設精度	1/247	1/194	1/190	1/120	1/225	1/151	1/200	1/159	1/147	
15m	Y	50	-58	-30	-20	47	24	58	60	13	1/170
	Z	23	53	61	115	60	77	57	108	121	
	R	55	79	68	117	76	81	81	124	122	
	打設精度	1/273	1/191	1/221	1/129	1/197	1/186	1/184	1/121	1/123	
20m	Y	101	-87	-54	-20	82	32	96	88	28	1/160
	Z	-6	53	63	144	54	73	47	169	188	
	R	101	102	83	145	98	80	107	191	190	
	打設精度	1/198	1/196	1/241	1/138	1/204	1/251	1/187	1/105	1/105	

※:スタビライザー有

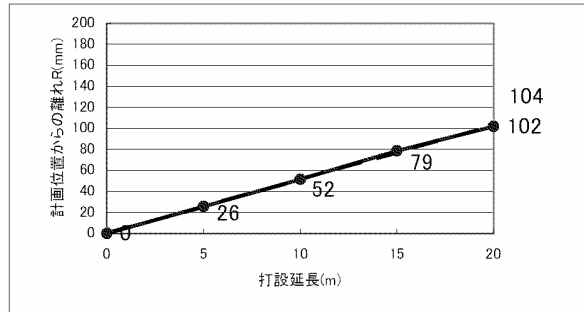
No. 1※



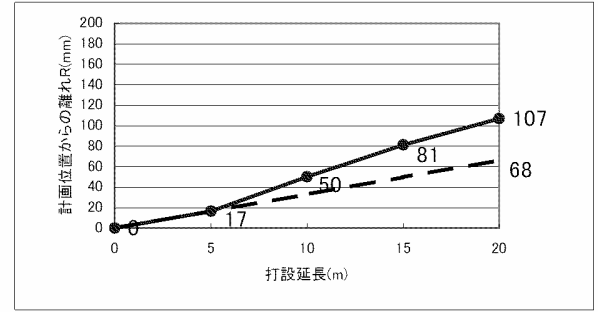
No. 12



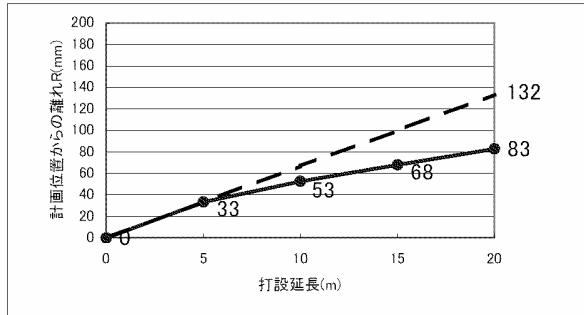
No. 2



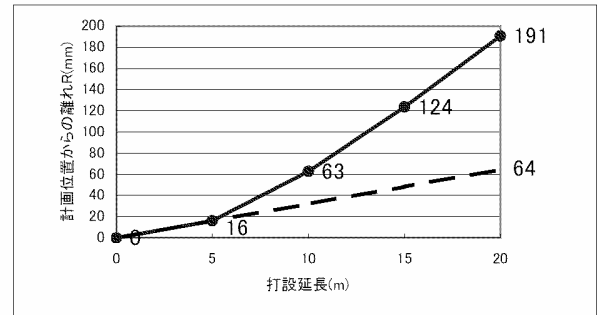
No. 13



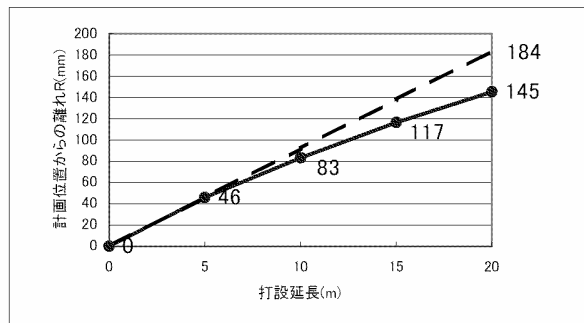
No. 3



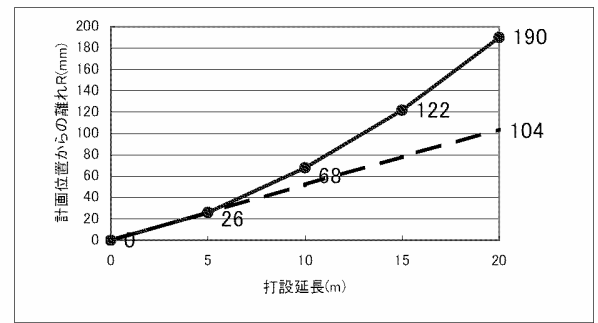
No. 18※



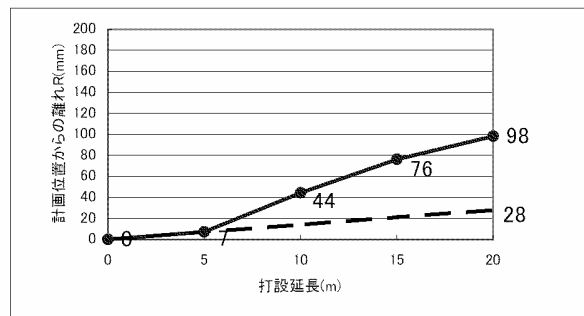
No. 5※



No. 22※



No. 6



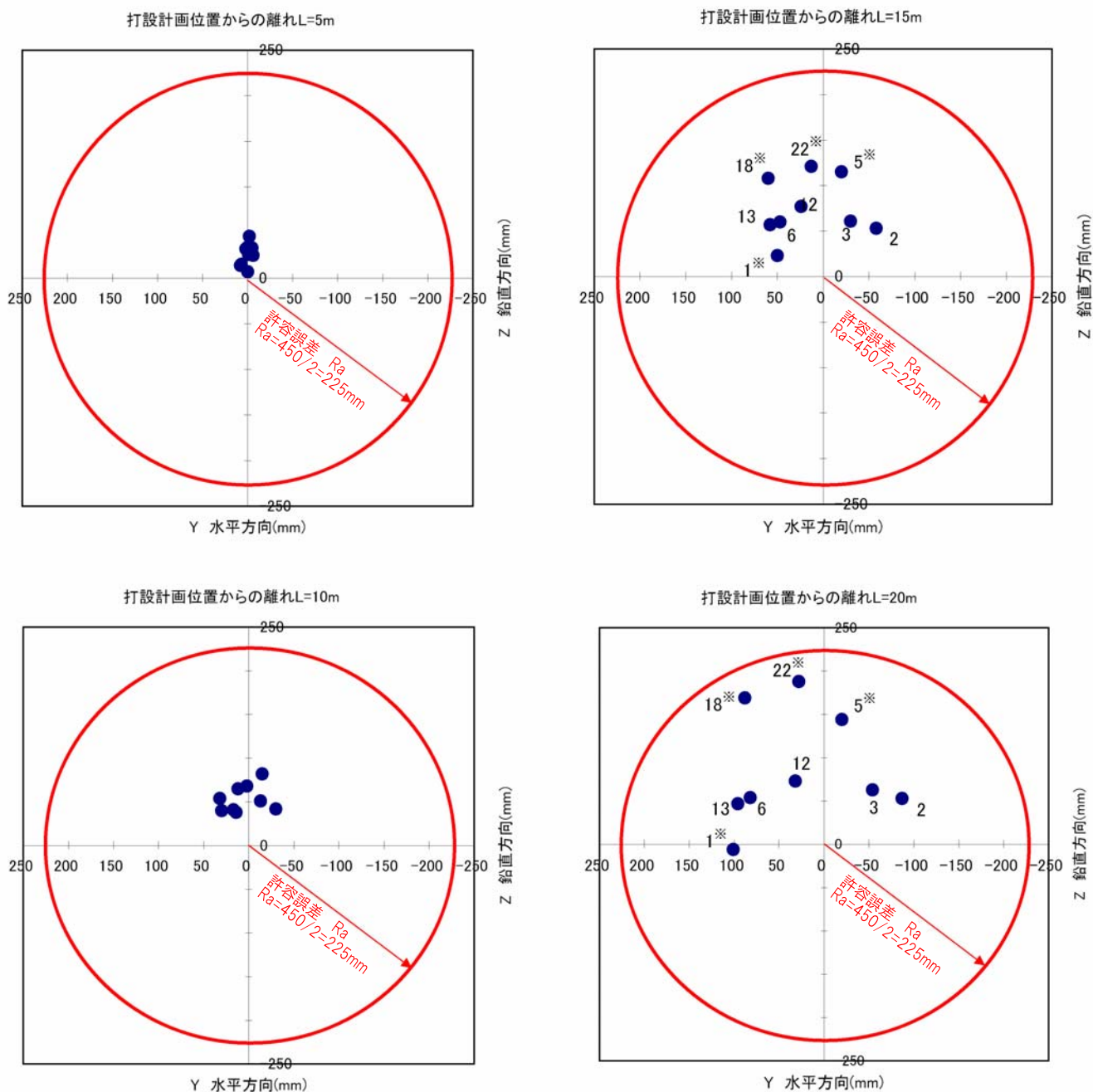
※付数字はスタビライザー設置鋼管

グラフ中の破線は、直進性を見るために 0～5m までの勾配を延長した基準線を示す。

図-16 各鋼管の打設計画線からの離れ

次に、打設計画位置に対する施工位置散布図を図-17に示す。図中には、隣り合う鋼管との打設間隔(450mm)を考慮し、許容誤差範囲 R_a を $450/2=225\text{mm}$ として図中に円で示した。

これらの図から、打設位置からの離れが大きくなると誤差は大きくなるが、いずれの断面についても、すべての鋼管が許容誤差範囲内に収まっていることがわかる。また、スタビライザー設置鋼管の精度の優位性は認められず、逆に、平均的には誤差が大きくなっている。



※付数字はスタビライザー設置鋼管

図-17 打設計画位置に対する施工位置散布図

7. 考察

データ整理の結果を踏まえ、以下のように考察した。

(1) 打設精度結果について

0-STEP の打設精度は、先行して行った奇数孔削孔終了時点で、打設延長 $L=20\text{m}$ に対し $1/183$ という高い精度が得られた。隣り合う鋼管との打設間隔 450mm を考慮し、鋼管同士が干渉しないよう許容誤差を $450/2=225\text{mm}$ とすると、許容精度は $0.225\text{m}/20\text{m} \approx 1/90$ となる。今回の施工では、奇数孔削孔精度 ($1/183$) は十分な精度であったため、同条件で偶数孔の削孔を続けた。そして、奇・偶数孔打設の結果、最終的に平均 122mm の施工誤差であり、 $1/160$ ($0.122\text{m}/20.0\text{m}$) の打設精度が得られた。許容誤差 ($1/90$) と比較しても十分な精度である。精度の最も悪いものでも $1/105$ であり、所要の精度は確保できた。地質や施工方法は多少違うが、弊社の既往の実績である津田トンネルでの 36m 施工の打設精度 $1/50$ 、岩戸トンネル¹⁾での 37m 施工の打設精度 $1/100$ と比べても非常に良い結果が得られた。また、孔曲がりも小さく良好な結果であると言える。ただし、打設延長 L が 20m を超えると孔曲がりが増幅する傾向があるという報告²⁾もあり、今回の結果にも、打設延長が伸びると直進性が低下し、その傾向を示す箇所 (No.1, 12, 18, 22) が確認されたため、課題が残る。また、初期の段階から誤差が増幅する傾向もあり、打設初期にいかに関精度を確保するかも課題である。

今後、打設長の延長、地山条件の悪い箇所 (玉石、部分的な硬岩の出現する地山あるいは削孔水により孔荒れがひどくなるような軟質な地山等) におけるデータの収集を行い、施工精度、孔曲がりの状況を確認し、得られたデータにより各条件での打設精度向上の工夫を検討する必要がある。

(2) スタビライザーの効果について

スタビライザーの有無による打設精度の差は見られなかった。ただし、鋼管打設時の施工状況から、スタビライザー無しのもものと比べ、打設時の鋼管の回転が少ないという利点がみられた。今回スタビライザーの突出高を 5mm 程度にしたが、次の施工ではスタビライザーの突出高を調節 (大きく) することも検討する。

(3) 鋼管受け部の効果について

鋼管削孔中、鋼管受け部が鋼管を積極的に制御し、打設精度を向上させるような様子は確認できなかった。これは、鋼管受け部と鋼管との余裕幅が大きかったせいと思われる。したがって、次の施工では余裕幅を小さくすることで打設角度を積極的に制御で

きるか、鋼管受け部の効果の確認が必要である。

(4) ガイド支保工の効果について

ガイド支保工は、3~4 基設置することが一般的であり、鋼管の打設精度の観点からは、4 基の方が望ましい。当初 4 基設置すると鋼管設置の際のドリフターの取り回し等の施工性が劣ることが懸念されたが、2 方で全本数 (23 本) の打設を完了しており、さほど施工性に影響はなかった。

(5) 先行削孔ビットの改良について

鋼管に接続できる先行削孔ビットを作成し使用することで、削孔オペレーターの技量に関係なく正確な先行削孔ができ、施工性も良好であった。

(6) 孔曲がり傾向について

全体的に打設計画位置より上側、やや左側に反れた。上昇要因は、スラッジが鋼管下に周り、鋼管を押し上げた事や、鋼管内のロッドが、自重により垂れ下がることで、ビットに上向きの力が働いたことが考えられる。鋼管内でのロッドの垂れ下がり防止するために、ロッドの剛性を高めたり、鋼管内壁とロッドとの間隔を一定に保つためにガイドスリーブ (スタビライザー) を使用するなどの対策を検討する必要がある。また、左側に反れた原因としては、ビットの回転方向に起因することが考えられ、修正方法については今後の検討課題である。

8. おわりに

最近、都市部においても補助工法を用いて山岳工法によりトンネルを施工する事例が増えている。都市部での施工となると、住宅密集地や重要構造物に近接して施工する等の制約が生じ、これらへの影響を抑制することが要求されてくる。このような施工難易度の高い案件が増える中、トンネル掘削時の変形を抑制し、安全・確実に施工を行うための補助工法は必須である。今後も 0-STEP 工法のより高い精度を追求し、社会のニーズに応えていく所存である。

最後に、本工事の施工・本報文の作成にあたり、ご協力いただいた関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松岡 謙介：低土被りトンネルにおける超長尺先受け工 (0-STEP 工法) の施工, 中部地方整備局 管内事業研究発表会, 2007 年 7 月
- 2) ジェオフロンテ研究会：注入式長尺先受工法 (AGF 工法) 技術資料 (五訂版), 2006 年 12 月