# 鋼管間の抜け落ちに着目したトンネル 先受け工の最適間隔に関する研究

佐藤 翼1・土井 勇介<sup>2</sup>・進士 正人<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>株式会社熊谷組九州支店古江トンネル作業所(〒889-0301宮崎県延岡市北浦町古江1912-1)
<sup>2</sup>復建調査設計株式会社(〒732-0052 広島県広島市東区光町二丁目10-11)
<sup>3</sup>山口大学大学院理工学研究科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目16-1)
\*E-mail: shinji@yamaguchi.ac.jp

山岳トンネル工法において、坑口部や土被りの小さい沢部などでは、切羽安定対策や地表面沈下対策を 目的としてアンブレラ工法と総称される「先受け工法」が補助工法として採用されることがある.しかし、 先受け工法の設計は経験的で、過去の施工実績への依存度が高い.そのため、先受け工法施工後に鋼管間 の土砂が抜け落ち、鋼管そのものがむき出しになってしまうなどの期待している支保効果が得られない場 合も考えられる.本研究では、個別要素法に基づく粒状体解析を一般的なAGF工法の数値シミュレーショ ンに適用し、最適な鋼管打設間隔を地山物性と抜け落ち高さとの関係から明らかにし、地山物性の変化に 伴う最適な打設間隔の決定手法を提案する.

Key Words : roof umbrella method, weak rock, tunnel face stability, Distinct Element Method

#### 1. はじめに

山岳トンネル工法において,坑口部や土被りの小さい 沢部などでは,切羽安定対策や地表面沈下対策を目的と して AGF やフォアポーリング,あるいはアンブレラエ 法と総称される「先受け工法」が補助工法として採用さ れることがある.これらは,トンネル施工に先立ち,鋼 管をトンネル位置上部からトンネル掘削方向外側に向か って施工し,場合により鋼管を利用して薬液注入による 地山改良を行う.その後,鋼管部直下にトンネルを構築 する.特に,都市部のトンネルにおいては地表面沈下の より確実な沈下抑制が要求される場合,直径 2m程度の 鋼管をトンネル位置上部に施工するパイプルーフ工法が 先受け工法として採用される場合もある.

これら先受け工法の基本的な設計法はこれまでいくつ か提案されているものの,過去の施工実績に基づく設計 がほとんどでありそのため施工上のトラブルも多い<sup>D</sup>. 特に,**写真-1**に示すようにトンネル掘削時に鋼管間の 土砂に抜け落ちが発生し鋼管そのものがむき出しになっ てしまう場合があり,このようなケースでは鋼管挿入に よる鋼管の支保効果はほとんど期待できなくなる.

本研究では、特に AGF 工法に着目し、個別要素法に



**写真-1** 鋼管間の地山の抜け落ち状況 基づく粒状体解析を適用することで地山強度が低下した 場合の地山の抜け落ち現象を数値シミュレーションによ り再現し,地山物性による先受け工法の最適な鋼管打設 間隔の考え方を明らかにする.

## 2. 数値シミュレーション

## (1) 粒状体解析

トンネル掘削後のトンネル直上地山の部分的な抜け落 ちを再現するには従来の連続体解析の適用は難しいこと が十分想定される.そのため、本研究では個別要素法に 基づく粒状体解析プログラムPFC2D(Itasca 社製)を用い



図-1 粒子の結合方法

表-1	マイク	ロパラ	メータ	入力	一覧表
-----	-----	-----	-----	----	-----

r <sub>lo</sub>	最小粒子半径 (m)
r <sub>hi</sub> /r <sub>lo</sub>	最大粒子半径と最小粒子半径の比(-)
ρ	粒子密度 (kg/m <sup>3</sup> )
E <sub>c</sub>	接触係数 (Pa)
$K_n/K_s$	鉛直方向剛性と水平方向剛性の比(-)
μ	摩擦係数(−)
σ <sub>c</sub> (mean)	鉛直方向強度の平均値 (N)
T <sub>c</sub> (mean)	せん断方向強度の平均値 (N)

数値シミュレーションを行う. PFC2Dは、円形(3次元で は球形)の剛体粒子の集合体でモデルを表現した上で, 粒子の変位、粒子間の力の伝達は接触点のみで伝達され るとして, 粒子ごとに独立な運動方程式を立てて, 時間 領域で前進的に解く数値解析手法である.また、PFC2D では地山の弾性係数、ポアソン比といった一般的な物性 値(本論文では以下「マクロパラメータ」と呼ぶ)を直 接入力することはできず, 粒子間の力の伝達は, 粒子間 のバネとダッシュポット並びに接着強度(本論文では以 下「マイクロパラメータ」と呼ぶ)などにより表現され る. PFC2Dの粒子同士の接着方法には, Contact Bondと Parallel Bondを選択できる. 図-1に示すように, Contact Bondは粒子間を点接着で伝達する. それに対し, Parallel Bondは, Contact Bondに加えてモーメント力も粒子間で 伝達する事ができる.本研究では, Contact Bondを採用 し、粒子間強度が設定した値を超えた時、Contact Bond が機能しなくなるように物性値を設定した.表-1に, 本解析で用いるマイクロパラメータを入力値の一覧表を 示す.

# (2) 二軸圧縮要素試験によるマクロパラメータとミクロ パラメータとの関係把握

先にも述べたように、粒状体解析プログラムではマク ロパラメータを入力値として与えることはできない.そ のため粒状体解析プログラムを利用した要素試験を実施 した.すなわち、マイクロパラメータを仮定した粒状供 試体モデルを作成し一軸および二軸圧縮試験の数値シミ ュレーションを行った.そして、供試体モデルの応力-ひずみ関係からマクロパラメータとマイクロパラメータ



図-3 軸差応力-ひずみとの関係の例

の関係を調べた.

要素試験に用いた数値解析モデルを図-2 に示す.砂 や粘土などの低強度の地山を再現するため,二軸圧縮試 験では側圧 σ<sub>3</sub>を0.05MPa,0.1MPa,0.4MPaと設定した. 数値シミュレーションは側圧 σ<sub>3</sub>を一定に保った状態で 定ひずみ載荷試験を行い,載荷板反力から軸方向応力 σ 1を算出した.また軸方向応力が最大圧縮応力を過ぎて 最大値の80%に低下した時点で解析終了とした.図-3に 二軸圧縮試験の応力-ひずみ関係図の一例を示す.要素 試験によって決定されたマイクロパラメータとマクロパ ラメータをまとめた結果を表-2に示す.この表に基づき, 粘着力のようなマクロパラメータを変化させた時のマイ クロパラメータを設定し,数値シミュレーションを実施 した.

マイクロパラメーター						
r <sub>lo</sub>	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
r <sub>hi</sub> ∕r <sub>lo</sub>	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
ρ	2200	2200	2200	2200	2200	2200
Ec	300	300	300	300	300	300
Kn/Ks	7	7	7	7	7	7
μ	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
$\sigma_{c}$ (mean)	0.036	0.35	0.75	1.17	1.70	2.20
т <sub>c</sub> (mean)	0.45	0.77	1.20	1.80	2.00	2.50
マクロパラメーター						
c(MPa)	0.05	0.21	0.41	0.60	0.81	1.00
φ(°)	21.1	20.3	19.0	21.1	20.3	22.2
E(MPa)	137	142	143	145	146	147
ポアソン比	0.31	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30

表-2 マイクロパラメータとマクロパラメータ

#### 表−3 解析物性值

物性値	case0	case1	case2	case3	case4	case5
c(MPa)	0.05	0.21	0.41	0.60	0.81	1.00
φ(°)	21.1	20.3	19.0	21.1	20.3	22.2
E(MPa)	137	142	143	145	146	147
ポアソン比	0.31	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30





## (3)鋼管間地山の抜け落ちシミュレーション

トンネル天端及び肩部を解析モデルとして取り出し, 図-4のようにモデル化した.以下,それぞれの解析モデ ルを「並列モデル」,「斜めモデル」と呼ぶ.図からわ かるように,鋼管は3本配置し,土被りは5m,用いた鋼 管径は代表的なAGP鋼管の径である114.3mm<sup>2</sup>とした.並 列モデルについては鋼管中心間隔Lを40,60,80cmの3パタ ーンとし、斜めモデルについてはLを40cmと固定し、鋼 管打設角 θ を12°, 31°,50°の3パターンと肩部の位置 の違いをシミュレーションした.採用した物性値は表-3 に示したとおりである.この数値シミュレーションにお いて、鋼管は座標を固定した大きな粒子の一つとして表 現し、地山を表現する粒子とは一緒に落下しない条件と した.



図-8斜めモデルの評価方法

抜け落ちシミュレーションは、鋼管粒子および壁で囲 まれた領域内に地山を再現する粒子を発生させた後重力 解析を行い粒子間に接触力を発生させた.そして、重力 解析終了後にモデル底に固定していた壁要素を取り除き トンネル掘削状態を再現した.そして次節に示す解析終 了条件を満たすまで繰り返し計算を行った.



図-10 粘着力と抜け落ち高さの関係(斜めモデル)

#### (4) 解析終了と抜け落ち粒子の評価方法

解析結果を図-5に示す.図から明らかなように、抜け 落ちシミュレーションでは粒子が徐々に落下するため、 定常状態を把握することが難しい.そこで、図-6に示す ように個々の粒子に着目し、他の粒子と接触のない粒子 を見つけ出し、それを「浮遊粒子」として黒色で塗り区 別した.浮遊粒子は他のどの粒子とも接触していない粒 子であるため、いずれ落下する粒子と判断できる.その 上で、図-7に示す並列モデルでは、浮遊粒子を除いた状 態で鋼管中心から鋼管間の最高点の粒子までの距離をモ デル左側部分ではHL、モデル右側部分ではHRと定義し、 両者のより大きな値を抜け落ち高さHとして決定した. また、図-8に示す斜めモデルの場合ではモデル左側部分 に着目し、右方鋼管中心から鋼管間の最高点の粒子まで の距離をHとして決定した.

繰り返し計算は 10 万回毎に,繰り返し計算中のモデ ル全体の粒子数と抜け落ちた粒子数を算出し,抜け落ち た粒子数がモデル全体の粒子数の 1%以下になった時を 解析終了条件とした.



図-11 斜めモデル解析結果(*θ*=31°)

#### 3. 数値シミュレーション結果

#### (1) 並列モデル

並列モデルの数値シミュレーション結果を図-9 に示 す.この図からわかるように、粘着力 c と抜け落ち高さ Hの関係は、どの打設間隔においても右下がりの相関を 示し、打設間隔 L を拡げると抜け落ち高さ H が高くな る.また、粘着力が 200KPa 以下では抜け落ち高さが急 に高くなり、打設間隔が広くなるとさらに極端に抜け落 ちることがわかった.したがって、この図から抜け落ち 高さを設定すると地山条件に応じた最適鋼管間隔の設定 が可能となる.また、鋼管と合わせて地山改良を行う場 合には改良の目的強度および注入範囲の設定が可能とな る.

#### (2) 斜めモデル

打設間隔 L を L=40cm と固定した斜めモデルの数値シ ミュレーション結果を図-10 に示す. この図からわかる ように、鋼管打設角 $\theta$ が 0°, 12°の場合では並列モデ ルと同様抜け落ち現象が発生するが、 $\theta$ が 31°, 50° の場合では抜け落ちが発生しない. 図-11 に θ =31°の 解析結果を示す. この図に示すように,地山の抜け落ち 角度と鋼管の設置角度がほぼ同程度となる場合は,抜け 落ちが発生しにくいことがよくわかる.

なお,内部摩擦角 φ と抜け落ち高さ H に関しては, 内部摩擦角が大きくなると若干抜け落ち高さ H は小さ くなるものの,粘着力ほどの影響はないことを確認して いる<sup>3</sup>.

### 4. おわりに

本研究は、AGF やフォアポーリング、あるいはアン ブレラエ法と総称される「先受け工法」が補助工法とし て採用される強度の小さい地山において、トンネル施工 中の地山の鋼管間からの抜け落ちを粒状体解析でシミュ レーションすることで、地山物性と抜け落ち高さとの関 係を明らかにした.

その結果, 図-7 に示す並列モデルにおける抜け落ち 高さを考慮すると,地山状態に対応した最適鋼管間隔の 設定が可能となる.鋼管と併用して地山改良を実施する 場合には改良の目的強度および注入範囲の設定が可能と なる.また,斜めモデルにおける数値シミュレーション では,鋼管打設角θが 30°を超える範囲においては抜 け落ちが発生しないことから,その範囲には鋼管を打設 しないか,間隔を拡大して打設しても良いとも考えられ る.

#### 参考文献

- 武内秀木、御手洗良夫、鈴木雅之、松重宗徳、中川浩二: 長尺鋼管フォアパイリング(AGF 工法)の設計法の提案、土 木学会論文集、No.623/VI-43、pp.191-202、1999.
- 2) GFRP 切羽補強研究会:長尺切羽補強工技術資料, p8,2009.
- Doi, Y., Otani, T. and Shinji, M.: The optimum distance of roof umbrella method for soft ground by using PFC, *Proc. of 9th Int. Conf. on Analysis of Discontinuous Deformation*, pp.461-468, Nov. 25-27, Singapore, 2009.

## THE OPTIMUM DISTANCE OF ROOF UMBRELLA METHODS CONSIDERING DISCONTINUOUS BEHAVIOUR BETWEEN ROOF PIPES

#### Tsubasa SATO, Yusuke DOI and Masato SHINJI

The roof umbrella method has been adopted as an auxiliary method to minimize the surface settlement of ground. However, an ordinary design method of roof umbrella method established based on an experiential technique, so that all the ground soil between each forepolling pipes along the tunnel cross section has intend to falling out through roof pipes, so that the support of the ground by roof umbrella method cannot be expected. In this study, the numerical simulation by using PFC in which the change of location and distance between pipes was carried out the relationship between the cohesion and the height of shape. Finally we propose the optimum design of the roof umbrella method using this correlation.