

粒状体解析を用いた先受け工法の適切な鋼管間隔に関する検討

土井 勇介¹・大谷 達彦² 進士 正人³

¹学生会員 山口大学大学院 理工学研究科 社会建設工学専攻 (〒755-8611山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: doi@rock.civil.yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 西松建設 土木設計部 (〒105-8401 東京都港区虎ノ門1-20-10)

³正会員 山口大学大学院 理工学研究科 (〒755-8611山口県宇部市常盤台2-16-1)

都市トンネルでは周辺環境へのトンネル掘削の影響を極小化することを目的として、トンネル施工に合わせてパイプルーフ工法や、AGF などに代表される先受け工法が実施されることが多い。しかし、その地山に最適な先受け工法を設計するための解析的評価手法はいろいろ提案されているものの、経験的な手法に依存している事例が多い。加えて、パイプルーフ工法やAGF工法では、先受け鋼管の間の土砂がすべて抜け落ち、鋼管がむき出し状態になる事例もよく生じている。本研究は、粒状体解析を用いて、地山状態と鋼管間隔、鋼管径との関係から地山の抜け落ち状況をシミュレーションし、地山条件に適した先受け工法の支保工間隔を検討する。

Key Words : Numerical Analysis, Pipe roof method, NATM

1. はじめに

都市部では、土地利用上の制約により既設構造物の直下や近接してトンネルが計画される事例が多くみられる。また近年では、土被りが十分でない地山条件においてもNATMを採用しトンネル施工を行う事が増加している。その際、周辺環境へのトンネル掘削の影響を極小化することを目的として、写真-1に示すようなパイプルーフ工法やAGFなどに代表される先受け工法を補助工法として併用する事例が多い。しかし、地山に最適な先受け工法を設計するための解析的評価手法は種々提案されているものの、経験的な設計手法に依存している事例が多い。加えて、パイプルーフ工法やAGF 工法では、写真-2に示すように先受け鋼管の間の土砂がすべて抜け落ち、鋼管そのものがむき出しになってしまう状態もよく発生している。このような状況では先受け鋼管が本来発揮すべき変形抑制効果を発揮できないだけでなく設計時の想定した地山条件とも異なるものと考えられる。

本研究では、合理的な先受け工法の設計手法を提案することを目的として、従来、鋼管中心間隔 L と鋼管径 R の比 L/R が経験的に2程度とされている鋼管間隔に対し、地山物性値と鋼管間の土砂の抜け落ち現象との関係を粒状体による数値シミュレーションから明らかにする。そ

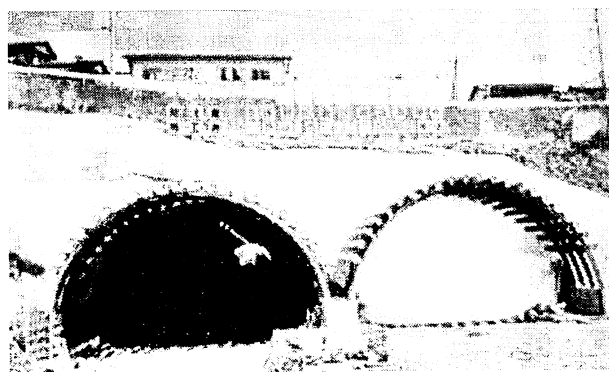


写真-1 パイプルーフ施工したトンネル

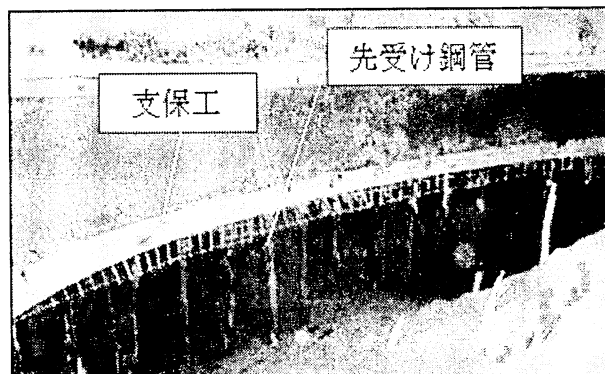


写真-2 鋼管間の土砂の抜け落ち

して、地山物性値の違いによる不連続地山の抜け落ち状態から、材料ごとの最適支保間隔を検討する。

(1) 従来のパイプルーフ工法の設計手法

図-1は日本におけるパイプルーフ工法の施工年と鋼管径の関係を表した図である。この図から明らかなように、鋼管径は1960年代には200mmまたはそれ以下であったのに対し、近年では1000mm近くの鋼管も採用されるようになっている¹⁾。大口径鋼管採用の理由のひとつは、大口径鋼管の場合は転石・巨礫の鋼管内からの除去が可能なことなどが挙げられる。このようにパイプルーフの鋼管径の採用理由には施工条件がその径の決定要因の一つになるケースも散見される。また、鋼管間隔を決定する一般的な設計の考え方を図-2に示す²⁾。この図からわかるように土砂の許容抜け落ち高さを鋼管の半径とした時の、内部摩擦角 ϕ による最大鋼管間隔の決定方法が提案されている。しかし、概ね鋼管中心間隔は鋼管径の2倍以下とされることがほとんどである。この比率は経験上鋼管間の土砂の抜け落ちが生じない間隔とされている³⁾。

2. 本研究で用いた解析手法

地山の不連続挙動を再現するため、個別要素法に基づく粒状体解析プログラムPFC2D(Itasca 社製)を用い数値シミュレーションを行った。個別要素法は、各要素自身を剛体と考え、要素の変位、要素間の力の伝達は接触点のみで伝達されるとして、要素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、2つの粒子が接触あるいは衝突するとき、粒子は完全な弾性体ではないし、また接触近傍は局所的な塑性変形が生じ、完全弾性衝突とはならない。そこでPFC2Dでは粒子同士の接着条件を表す様々な物性値（以下、これをマイクロパラメータと呼ぶ）を用い図-3に示すような粒子の持つ弾性的、非弾性的性質は、接触点間に挿入した弾性スプリングで表現すると考えている。最も基本的な粒子間の接触条件には、Contact BondモデルとParallel Bondモデルを選択できる。これらのモデルでは図-4に示すように粒子間の接触力はContact Bondモデルの場合、粒子間の点接着状態、Parallel Bondモデルの場合、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、粒子を点接着で接合しモーメントを伝達しないという特性から土粒子や結合力の小さい軟岩地山を再現するのに適しているのでContact Bondモデルを採用し、粒子間の引張力が、bondの指定強度を超えた時、接着力がゼロになるように設定した²⁾。

また、粒状体解析手法の特徴として、ヤング係数やポ

アソン比、粘着力、内部摩擦角などの地山の一般的な地山物性条件（以下、マクロパラメータと呼ぶ）を直接入力パラメータとして与えることができないため、実際にはマイクロパラメータを入力することになる。表-1に

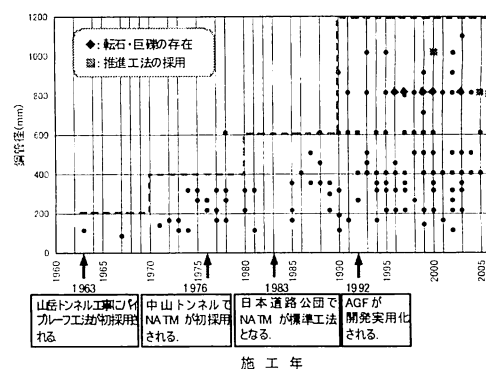


図-1 パイプルーフ工法の施工年と鋼管径の関係

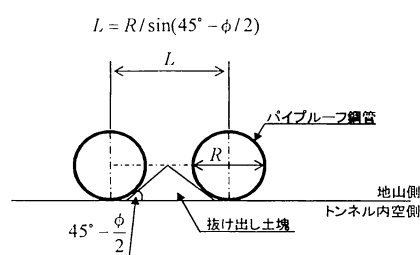


図-2 従来の鋼管間隔の設計法

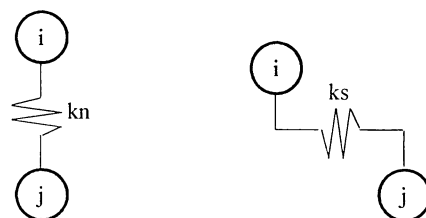


図-3 接触点モデル

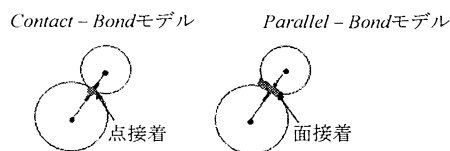


図-4 粒子間の接着方法の概要

表-1 マイクロパラメータ

Micro parameter	
密度(kg/m ³)	ρ
接触係数(GPa)	E_c
垂直方向剛性とせん断方向剛性の比	K_n/K_s
摩擦係数	μ
垂直方向強度の平均値(MPa)	$\sigma_c(\text{mean})$
垂直方向強度の標準偏差(MPa)	$\sigma_c(\text{std.dev})$
せん断方向強度の平均値(MPa)	$\tau_c(\text{mean})$
せん断方向強度の標準偏差(MPa)	$\tau_c(\text{std.dev})$

PFC2Dで入力するマイクロパラメータの一覧を示す⁴⁾。

3. 粒状体数値シミュレーション

(1) 要素試験の概要

はじめに本章では本研究の対象とする都市部の低土被り地山の特徴である，結合力の小さい軟岩地山を想定したモデル化を試みた。

2章でも述べたように粒状体解析手法では連続体解析手法とは異なり一般的な地山物性条件を直接入力パラメータとして与えることは出来ない．そのためPFC2Dで入力されるマイクロパラメータを調節して数値シミュレーションによる要素試験を実施した．すなわち粒状体数値シミュレーションに用いるマイクロパラメータを仮定し，一軸と二軸圧縮要素試験を行い，作用する軸応力，軸差応力とひずみの発生状態から地山の物性（マクロパラメータ）を求めた⁴⁾。

(2) 解析条件

二軸圧縮試験では側圧を一定に保ち軸方向に等変位載荷を行い，軸方向応力が最大応力を過ぎて最大応力の80%に低下すると載荷を終了するものとした．供試体モデルサイズは，図-5に示すように縦10cm×横5cmである．モデル作成にあたり領域に適切な間隙率を与え粒子を領域範囲内に均等分布で発生させた．なお，二軸圧縮要素試験において，側圧 σ_3 は0.05, 0.1, 0.4 (MPa)を用いて数値シミュレーションを行った⁴⁾。

(3) 要素試験によって作成された材料

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との関係を表-2，表-3にとりまとめる．表-2は内部摩擦角のみを変化させ，表-3においては粘着力のみを変化させた．ただし表-2においては，内部摩擦角を主に変化させる目的であったが同時に粘着力も多少減少する物性となっている．また図-6にマクロパラメータとマイクロパラメータとの関係図の一例として表-3に示す粘着力の垂直方向平均強度と粘着力との関係図を示す．この図から，地山の粘着力のようなマクロパラメータをうまく表現するマイクロパラメータが決定できていることがわかる．

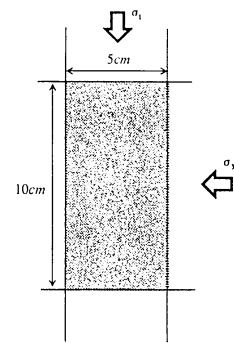


図-5 二軸圧縮試験モデル

表-2 マクロパラメータとマイクロパラメータとの関係
(内部摩擦角を変化させた物性値)

micro parameter	case0	case1	case2	case3	case4	case5
ρ	2200	2200	2200	2200	2200	2200
E_c	2.4	3.0	3.0	2.2	1.8	1.8
Kn/Ks	4	4	4	4	4	4
μ	0.25	0.3	0.4	0.7	0.6	0.6
$\sigma_c(\text{mean})$	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.1
$\sigma_c(\text{std.dev})$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.45	0.5
$\tau_c(\text{mean})$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.7	0.6
$\tau_c(\text{std.dev})$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.35	0.40
macro parameter						
$c(\text{Mpa})$	0.31	0.30	0.29	0.28	0.25	0.24
$\phi(^{\circ})$	5.0	8.5	11.5	15.5	18.5	20.0
$E(\text{Mpa})$	12.0	10.0	10.0	10.4	14.0	11.0
Poisson ratio	0.33	0.32	0.32	0.33	0.34	0.34

表-3 マクロパラメータとマイクロパラメータとの関係
(粘着力を変化させた物性値)

micro parameter	case0	case1	case2	case3	case4	case5
ρ	2200	2200	2200	2200	2200	2200
E_c	3.05	2.80	3.00	3.00	3.00	3.00
Kn/Ks	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
μ	0.08	0.10	0.08	0.08	0.10	0.08
$\sigma_c(\text{mean})$	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
$\sigma_c(\text{std.dev})$	0.005	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050
$\tau_c(\text{mean})$	0.60	0.65	0.80	1.00	1.10	1.40
$\tau_c(\text{std.dev})$	0.060	0.065	0.080	0.100	0.110	0.140
macro parameter						
$c(\text{Mpa})$	0.07	0.11	0.15	0.20	0.25	0.32
$\phi(^{\circ})$	20.9	19.3	20.0	21.8	20.8	19.4
$E(\text{Mpa})$	23.0	28.9	28.0	25.5	26.4	23.3
Poisson ratio	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30

micro parameter	case6	case7	case8
ρ	2200	2200	2200
E_c	3.00	3.30	3.30
Kn/Ks	3.5	3.5	3.5
μ	0.08	0.08	0.10
$\sigma_c(\text{mean})$	0.60	1.00	2.00
$\sigma_c(\text{std.dev})$	0.060	0.100	0.200
$\tau_c(\text{mean})$	1.50	1.90	3.30
$\tau_c(\text{std.dev})$	0.150	0.190	0.330
macro parameter			
$c(\text{Mpa})$	0.37	0.60	1.00
$\phi(^{\circ})$	21.6	19.2	21.8
$E(\text{Mpa})$	23.4	25.2	25.0
Poisson ratio	0.30	0.30	0.31

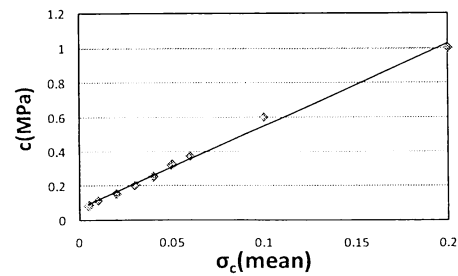


図-6 粒子間の垂直方向接着強度と粘着力との関係

(4) モデル化の概要

数値シミュレーションでは写真-3 に示すように、パイプルーフ施工したトンネルの一部分として、天端付近の一部を解析モデルとして取り出し図-7のようにモデル化した。このとき、モデルの土被りは $0.5D$ (m) とした。また用いた鋼管径 R は $R=812.6, 609.6, 406.4\text{mm}$ を採用し³⁾、打設間隔 L は打設間隔/鋼管径 (L/R) =1.8, 2.5, 3.1の3 パターンとした。解析物性パターンは表-2、表-3 に示したように粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ それぞれを変化させたマイクロパラメータを用い数値シミュレーションを実施した。

(5) 数値シミュレーションの実施方法

数値シミュレーションでは、壁要素で囲まれた領域範囲内に適当な間隙率を与え粒子を領域範囲内に均等分布で発生させたモデルに重力解析を行い、粒子間に接触力を発生させた。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鋼管（大きな粒子）間の粒子の抜け落ちの計算をモデル全体の力のつり合いが成り立つ（前全粒子の不釣り合い力が許容値以下になる）まで実施した。また、この時鋼管は座標を固定しており、地山部分の粒子と一緒に落下しない条件とした。

4. 数値解析結果

(1) 解析結果とその整理方法

底板をはずした状態での粒子分布図（表-3中case3）を図-8に示す。この図からトンネル掘削後の天端付近に作用する重力作用により先受け鋼管間の粒子が落下し始めている様子がよくわかる。また図-9には、図-8の一部分（落下していない地山部分）を拡大した結果を示す。この図からわかるように、この部分は落下していないにも関わらず、要素内の粒子には他の粒子との接触がない粒子が多く存在し、いずれ落下することがわかる。本研究ではこれら粒子間に垂直方向の接触力が発生していない粒子を浮遊粒子と定義し、それらも合わせた地山の抜け落ち部分と定義することとした。すなわち、モデルに発生している全ての粒子に対して粒子間の垂直方向の接触力を計算し、接触力が無い粒子を黒色で着色し区別した。この結果を図-10に示す。この図と図-8を比較するとよくわかるように、地山の抜け落ち状況が上手く表現されていることがわかる。この抜け落ち領域を抜け落ち高さ H と定義し以下のように解析結果を整理することとした。

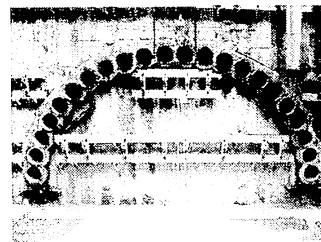


写真-3 粒状体解析でのモデル化部分

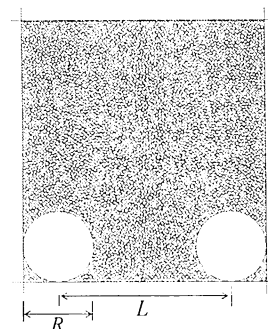


図-7 粒状体解析モデル

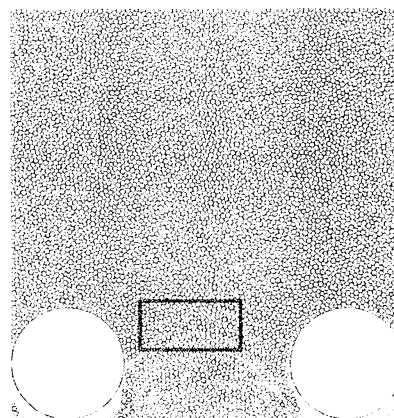


図-8 解析終了後の粒子分布図
(表-3 : case3)

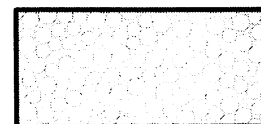


図-9 図-8の一部分を拡大した図

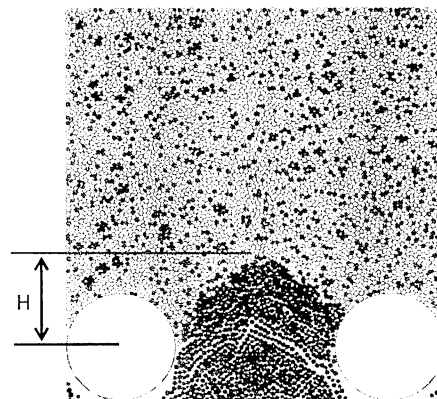


図-10 抜け落ち高さ H の定義

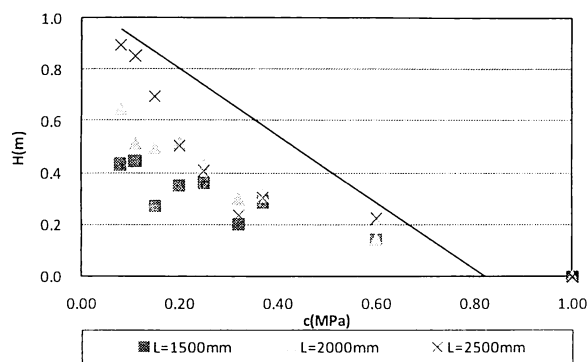


図-11 粘着力と抜け落ち高さとの関係

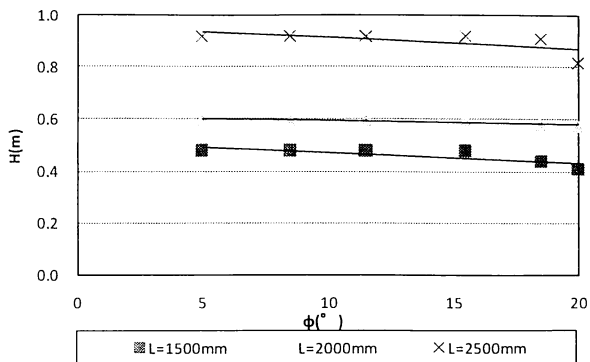


図-12 内部摩擦角と抜け落ち高さとの関係

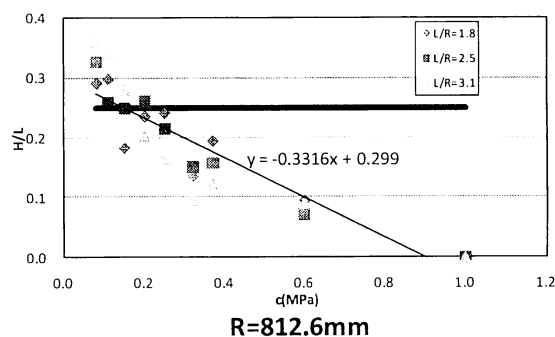
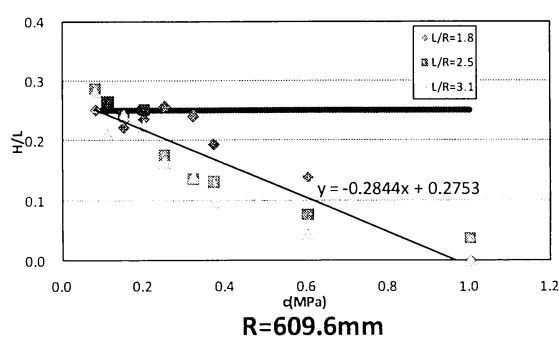
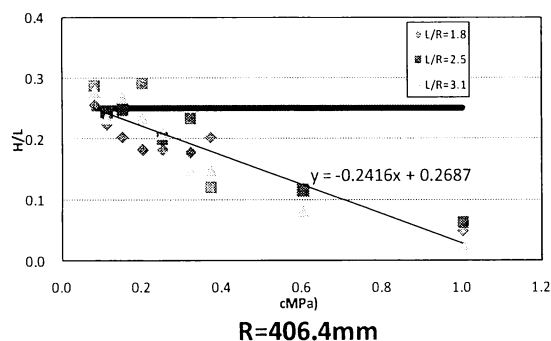


図-13 各鋼管径Rにおける粘着力とL/Rの関係図

(2) 地山物性値と抜け落ち高さの関係

鋼管間隔を変化させた時の地山の粘着力 c （表-3に示すマイクロパラメータを用いた）と抜け落ち高さ H との関係を図-11に示し、内部摩擦角 ϕ （表-2に示すマイクロパラメータを用いた）と抜け落ち高さ H の関係を示した結果を図-12に示す。これらの図から明らかなように、鋼管間隔が広がるにつれ抜け落ち高さ H が徐々に増加する。また、図-11からわかるように、粘着力と抜け落ち高さの間には右肩下がりの相関があり、ほぼ0.8MPa程度の粘着力があるとほとんど抜け落ちが発生しないことがわかる。しかし、内部摩擦角 ϕ においては若干右肩下がりの傾向はみられるものの、粘着力で見られたほどの相関関係はなく、図-2に示す内部摩擦角 ϕ による最適支保間隔の決定は本解析手法では明確でない。

(3) 粘着力とH/Lの関係

図-13からわかるように各鋼管径とも、鋼管間隔 L と鋼管径 R との比 L/R がどのような値をとっても、粘着力との間におおよそ同様な相関関係を示すという事がわかる。さらに図中に示した太い実線は、鋼管間隔がおおよそ $L/R=2$ とした時に、許容抜け落ち高さを $H=R/2$ とした場合の H/L の値である。この図からわかるように地山の粘着力が大きくなると、抜け落ち高さが小さくなるため適切な鋼管間隔をより広くとることが出来る可能性が明らかとなった。

鋼管径および地山の粘着力を決定すれば、これらの図を利用して適切な鋼管間隔を決定することができると考えられる。

5. 結論

以下に、本研究より明らかになったことを列挙する。

1) 鋼管間隔 L が広くなるにつれ抜け落ちる高さ H は増加する。また、従来の支保間隔 L の設計方法では内部摩擦角 ϕ に着目した方法が提案されているものの、本研究では粘着力 c と H/L との間に明らかな相関関係が認められたが、内部摩擦角との関係は明確ではなかった。

2) 図-13 から、支保間隔 L と鋼管径 R の比 L/R は、鋼管径が今回の数値シミュレーションで検討した範囲であれば、地山の粘着力 c との間におおよそ同様の相関を示す。従って、地山の粘着力 c を事前に評価し、採用する鋼管径 R を設定するとこれらの図を用いて適切な鋼管間隔 L の決定を行う事が出来る、同時に、おおよその抜け落ち高さ H を事前に推測することも可能である。

これらの検討結果を用いて鋼管の打設間隔の提案が出来ると考えている。しかし、検討範囲がパイプルーフ鋼管を中心としたものであり、今後は AGF 鋼管のようなより細い口径に関する抜け落ち高さの検討も進めていきたい。

参考文献

- 1) 大谷達彦, 進士正人, 千々和辰訓: パイプルーフ設計法としての弾性支承上梁モデルとその設計パラメータの提案, 土木学会論文集F, vol.64, No.4, pp.450-462, 2008
- 2) ITASCA: PFC2D Version 3.1 Manual, THEORY AND BACKGROUND, 2004
- 3) THパイプルーフ協会: パイプルーフ工法 工法説明・積算資料, p.41, 2002
- 4) 米田直広: 粒状体解析手法による硬岩のモデル化と大深度立坑の掘削解析への適応, 山口大学大学院理工学研究科修士論文, 2009

THE OPTIMUM DISTANCE OF ROOF UMBRELLA METHOD FOR SOFT GROUND BY USING PFC

Yusuke DOI, Tatsuhiko OTANI and Masato SHINJI

the roof umbrella method has been used 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. Moreover, all the ground soil between each forepolling pipes along the tunnel cross section has intend to falling out by the roof umbrella method. In this study, the numerical simulation by using PFC in which forepolling pipe diameter and distance between pipes change was carried out the relationship between the cohesion and the height of shape. Finally we propose the rational design of the roof umbrella method using this correlation.