

数値解析による c 系地山、 ϕ 系地山の挙動の比較

THE COMPARISON OF THE ACTION OF 'COHESION-GROUND' AND 'ANGLE OF INTERNAL FRICTION-GROUND' BY NUMERICAL ANALYSIS

岡部 正¹⁾・中川浩二²⁾

Tadashi OKABE, Koji NAKAGAWA

In recent year, NATM is demanded to construct of tunnel under this severe condition, such as soft un-harden ground and expansive ground. In such a case, examination cases by the numerical analytic model have been increasing. This research examines how these parameter are expressed by the numerical analytic for an plasticity natural ground paying attention for 'cohesion' and 'angle of internal friction'.

Key words : NATM、cohesion、angle of internal friction

1. はじめに

近年、山岳トンネルは未固結地山や膨張性地山のような厳しい地山条件の下でのトンネル掘削を要求される機会が増えている。そのような中、切羽周辺地山の不安定挙動の抑制、地表面沈下抑制等を目的とした各種対策工が採用されており、またその有用性についても認識されている。そして厳しい地山条件における地山安定計算や対策工の設計法がまだ十分確立していない現状の中で、FEMに代表される数値解析モデルによる検討する事例が多くなってきているようである。本研究では、数値解析モデルと実挙動の関連を図-1 に示すようなフローとして考え、数値モデルによる数値的評価の部分について解析的に地山評価を行うことを目的とした。

本研究では、塑性化するような軟質地山を対象として、その中でも特に、地山の粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ に着目し、砂質地山等にみられる粘着力 c の低い ϕ 系地山、粘質土系地山等にみられる内部摩擦角 ϕ の低い c 系地山について数値解析を行い、これらのパラメータが「数値モデル」ではどのように表現されるのか検討した。

尚、使用した解析コードは Itasca 社製 FLAC-3D である。

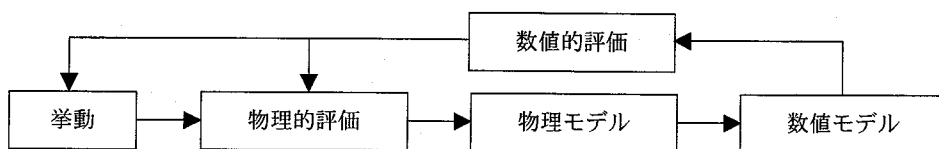


図-1 数値解析（数値モデル）の位置付け

2. ϕ 系地山と c 系地山^{1) 2)}

(1) ϕ 系地山

ϕ 系地山は、粘着力に乏しく掘削作業中、肌落ちや吹付けコンクリートがまだ硬化していない場合、剥離現象等がみられる。内部摩擦角は概ね 30° 以上である。また、 ϕ 系地山では前面切羽が剥離を繰り返し切羽自体が不安定化する恐れもあるため、鏡面の安定対策を施しておく必要がある。地下水のある場合には、砂の粒度分布状況により湧水による流砂現象を引き起こす場合もある。砂、砂礫、砂質凝灰岩、凝灰角礫岩等に代表される。

1) 正会員 関ケー・エフ・シー トンネル技術室

2) フェロー会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

(2) c系地山

c系地山は内部摩擦角が小さく、長期にわたり地山変位、土圧の増大が生じる膨張性地圧が発生し易い特徴をもつ。膨張性地圧については、吸水膨張説とせん断破壊説があるが、近年では主原因はせん断破壊説の方が有力であり、剛性の高い鋼製支保工による対策等が行われている。泥岩、凝灰岩、蛇紋岩、頁岩、千枚岩等に代表される地質である。

(3) φ系、c系地山の特性値^{3)~18)}

図-2 に地山強度の乏しい実現場における粘着力cおよび内部摩擦角φの関係の示す。図中で砂、砂礫等にみられるような砂質系地山を主体としたφ系地山、泥岩、凝灰岩等の粘質土系地山を主体としたc系地山におおよそであるが分類される。

4. 解析モデル¹⁹⁾

図-3 に解析領域図を示す。トンネル掘削断面は、2車線道路トンネルを想定した形状寸法とし、トンネル掘削半径を 5.7m、支保工としては DⅢパターン程度を想定して、鋼製支保工 H-200、吹付コンクリート t=25cm とした。

地山の入力物性値については、日本道路公団により分類されている DⅡ地山(表-1 参照)の値とし、この物性値の基とし、粘着力cおよび内部摩擦角φの解析的特性を把握するため、粘着力c、内部摩擦角φを変化させたパラメトリック解析を実施した。また、右に該当する代表物性値地質区分を示す。解析ケースを表-2 に示す。尚、吹付コンクリートと鋼製支保工は合成部材としてモデル化を行った。

解析における掘削は 20m までを一括掘削、その後 60m を 1m 逐次掘削として解析を行った。(上半のみ掘削)

3. c、φのパラメトリック解析結果

(1)地山変位量

図-3 に各ケースにおける (a) 天端沈下量、(b) 地表面沈下量を示す。図の横軸は評価断面と切羽距離、縦軸は沈下量である。

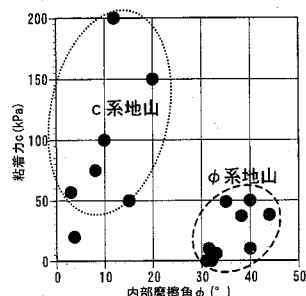


図-2 実現場における粘着力cと内部摩擦角の関係

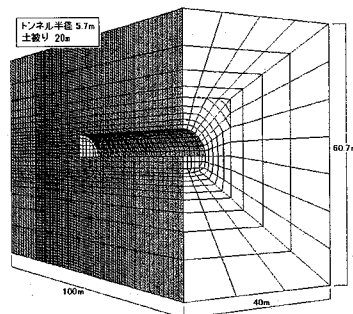


図-3 解析領域

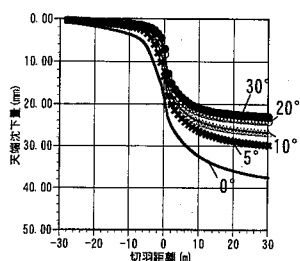
表-1 地山入力物性値

	単位体積重量 (γ) KN/m ³	弾性係数 (E) MPa	ポアソン比 (ν)
地山	21	150	0.35
吹付コンクリート+ 鋼製支保工	23.8	8,650	0.25

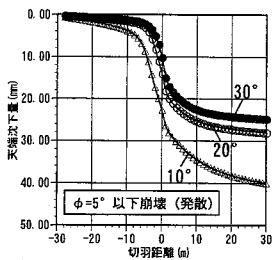
表-2 粘着力c、内部摩擦角パラメトリック解析ケース

解析 ケース	c (kPa)	φ (°)	
Case-1		30	
2	200	20	←(新第三紀中新世泥岩)
3		10	←(更新世相模層群)
4		5	
5		1	
6	100	30	
7		20	
8		10	←(第四紀未固結スコリア層)
9		5	
10	50	1	
11		30	←(第三紀鮮新世火山灰未固結)
12		20	←(浅間火山岩類転石質砂礫層)
13		10	←(吉倉泥岩層)
14	25	5	←(第四紀更新世二次堆積ローム)
15		1	
16		30	
17		20	
18		10	
19	10	5	
20		1	
21		30	←(洪積世成田層群)
22		20	←(中生代風化花崗岩：マサ化)
23	10	10	
24		5	←(風化泥岩礫混じり粘性土)
25		1	

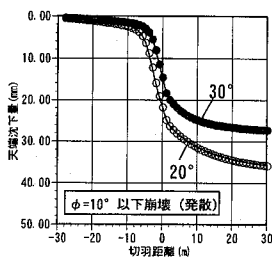
(粘着力 $c=200\text{kN/m}^2$)



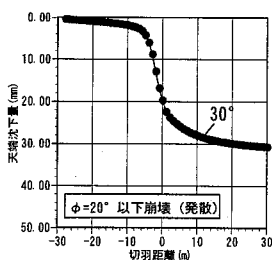
(粘着力 $c=100\text{kN/m}^2$)



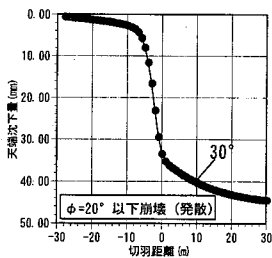
(粘着力 $c=50\text{kN/m}^2$)



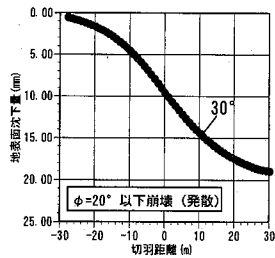
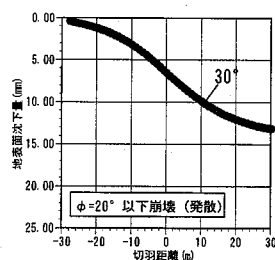
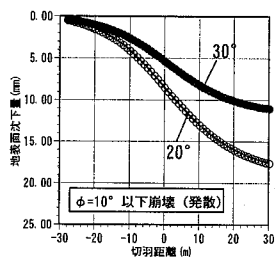
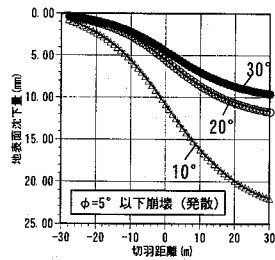
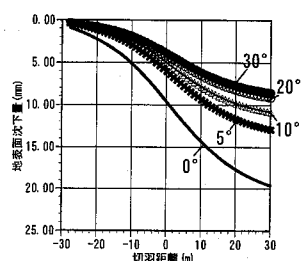
(粘着力 $c=25\text{kN/m}^2$)



(粘着力 $c=10\text{kN/m}^2$)



(a) 天端沈下量



(b) 地表面沈下量

図-3 トンネル掘削に伴う地山変位量

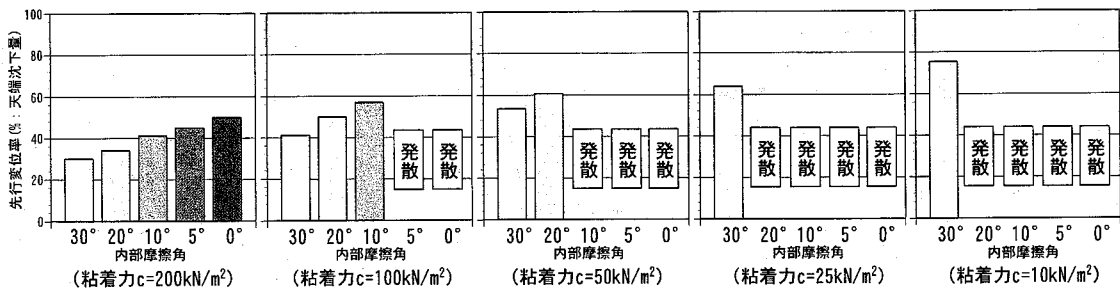


図-4 c、 ϕ と先行変位率

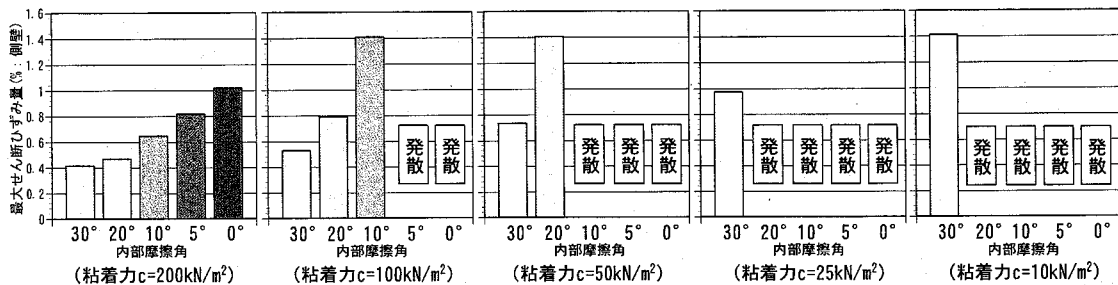


図-5 c、 ϕ と最大せん断ひずみ量 (トンネル壁面)

数値解析において弾性計算の際、一般に変形量は弾性係数、ポアソン比に依存するが、本解析のような極限状態に近い塑性解析では、粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ のせん断定数が変形量に大きく影響を及ぼすようである。粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ ともに値が小さくなると変形量は大きくなる。

(2) 先行変位率

図-4 に各ケースにおける先行変位率 (先行変位/全体変位 $\times 100\%$) を示す。図-3 より粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ が低くなるに伴い変位量 (全体変位) が増加する傾向がみられたが、先行変位についても同様である。

(3) 最大せん断ひずみ量

図-5 に各ケースにおけるトンネル壁面の最大せん断ひずみ量を示す。トンネル壁面に発生する最大せん断ひずみ量についても、粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ が低くなるに伴いひずみ量が増加する傾向がみられる。また、櫻井ら²⁰⁾による「みかけ弾性係数と壁面ひずみの関係」より、解析における弾性係数をみかけの弾性係数と想定した場合の切羽安定性判定結果を図-6 に示す。ひずみによる安定化判定で各ケースを区分すると粘着力 c と内部摩擦角 ϕ との関係も切羽安定についてのひとつの指標となり得る。また、限界ひずみによる崩壊域と解析による崩壊 (発散) の分布状況はほぼ一致している。

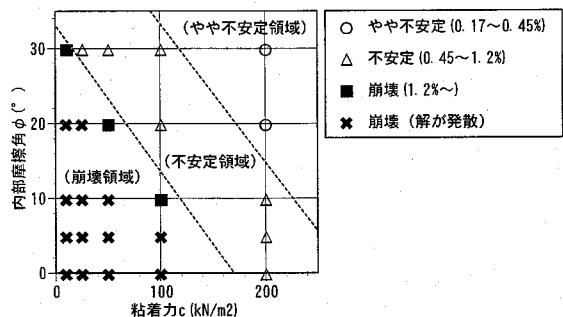


図-6 限界ひずみによる切羽安定性判定⁴⁾

4. c系地山、 ϕ 系地山の対策工に関する解析

c系地山と ϕ 系地山について、前章で示した解析ケース中より代表値 (ケース) を選定し、対策工を施した場合について解析を行った。c系地山の代表値については、c系地山については、内部摩擦角が最も小さく、かつ解析解が発散しなかった case-8 ($c=100\text{kN/m}^2$, $\phi=10^\circ$) を代表値とし、 ϕ 系地山については、粘着力

が最も小さくかつ解析解が発散しせず、内部摩擦角が 30° 以上である case-21 ($c=10\text{kN/m}^2, \phi=30^\circ$) を代表値とした。

対策工については切羽より前方地山挙動に対して有効であるとされる長尺先受け工+長尺鏡ボルト工を対策パターン①とし、また、早期併合により切羽後方の変形を拘束しようとする上半仮インバートを追加したパターン②として比較解析を行った(図-7 参照)。対策工に関する入力物性値を表-3 に示す。

(1) 天端沈下量

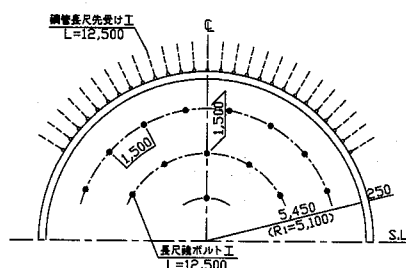
図-8 に各ケースにおける天端沈下量を示す。対策工無しのケースを比較すると、発生する天端沈下量は c 系地山、 ϕ 系地山ともに 40mm 程度とほぼ同等であるが、先行変位率については、c 系地山が 56%、 ϕ 系地山が 75% と異なる挙動を示す。 ϕ 系地山では発生変位の大きな要因な先行変位であるが、内部摩擦角の低い c 系地山では、先行変位だけでなく、切羽通過後の発生変位に対する対策工も考慮しなければならないことが想定される。c 系地山の方が対策工に対する効果は小さいが、本解析における対策工パターンでは、剛性が不足していると予想される。

(2) 最大せん断ひずみ量

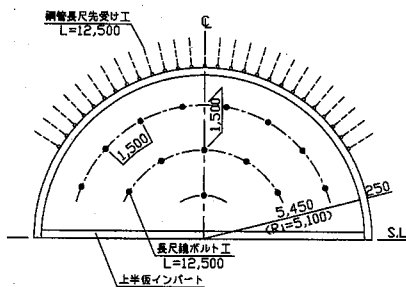
図-9 に各ケースにおけるトンネル切羽周辺の最大せん断ひずみ量の分布図を示す。ひずみについても変位量と同等の傾向がみられ、対策工により、c 系地山、 ϕ 系地山ともに発生するひずみ量は抑制できることが解析的に示された。

(3) 抑制変位量(先行変位と全体変位)

図-9 に各対策工パターンにおける対策工無しに対する抑制変位量を先行変位、全体変位について示す。c 系地山、 ϕ 系地山ともに上半仮インバートを施すことによる先行変位の抑制効果はあまりみられない。仮インバートは掘削後の支保であるため、先行変位への影響は殆ど無い。全体変位については、長尺先受け工+長尺鏡ボルト工に上半仮インバートを併用したケースをみると、 ϕ 系地山の場合、仮インバート無しと有りの割合は 1:1.8 程度であるが、c 系地山の場合、仮インバート無しと有りの割合は 1:3.1 程度と大きく違い、c 系地山の場合、上半仮インバートのような切羽通過後の対策を先行変位への対策工と併用することでより高い変位抑制効果が期待できると予想される。



① (長尺先受け工+長尺鏡ボルト工)



② (長尺先受け工+長尺鏡ボルト工)
+ (上半仮インバート)

図-7 対策工のパターン概要図

表-3 対策工の入力物性値

	構造要素	弾性係数 MPa	断面積 m^2
鋼管長尺先受け工	Beam	210,000	2.03E-3
GFRP 長尺鏡ボルト工	Beam	20,000	1.71E-3
上半仮インバート	Shell	8,650	—

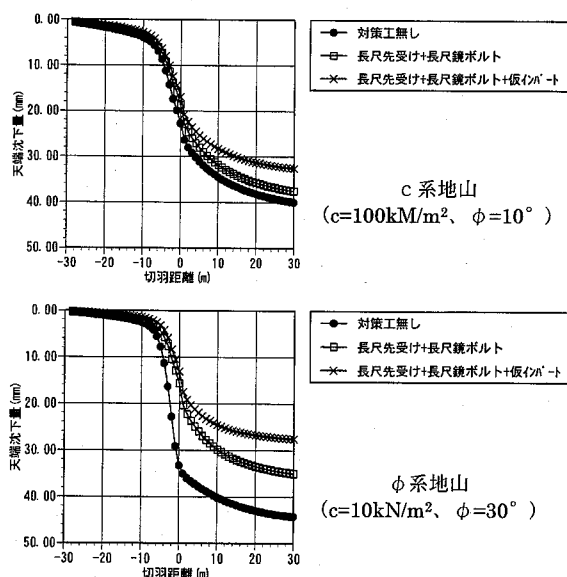
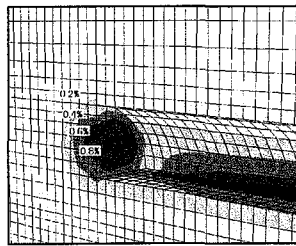
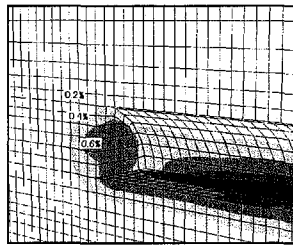


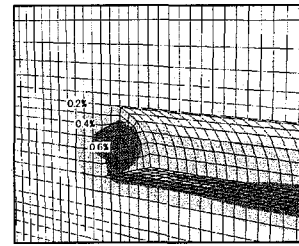
図-8 天端沈下量 (対策工比較)



(補助工法無し)

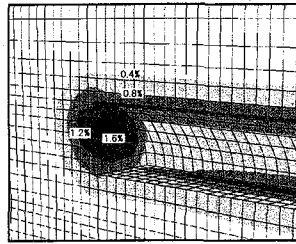


(長尺先受け+長尺鏡ボルト)

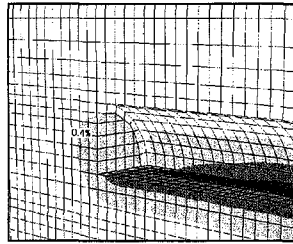


(長尺先受け+長尺鏡ボルト+仮インバート)

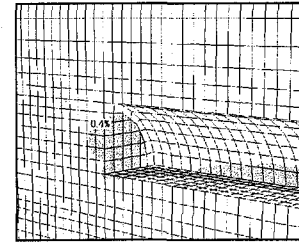
c系地山 : $c=100\text{kN/m}^2$ 、 $\phi=10^\circ$



(補助工法無し)



(長尺先受け+長尺鏡ボルト)



(長尺先受け+長尺鏡ボルト+仮インバート)

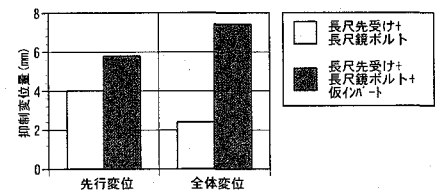
ϕ 系地山 : $c=10\text{kN/m}^2$ 、 $\phi=30^\circ$

図-8 最大せん断ひずみ量分布図

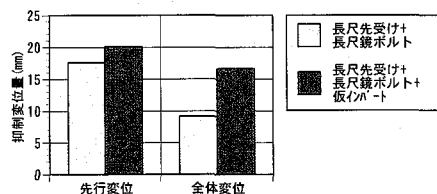
5. まとめ

以上、本解析条件におけるc系地山と ϕ 系地山の解析的挙動について、以下のような解析的知見が得られた。

- ・ 粘着力 c と内部摩擦角 ϕ は、トンネル掘削時の変位量に大きく影響を及ぼすパラメータである。
- ・ 粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ の組み合わせによる評価は、切羽安定化判定の指標のひとつとなり得る。
- ・ c系地山、 ϕ 系地山ともに長尺先受け工等の先受け補助工法は先行変位の抑制効果がみられる。
- ・ 内部摩擦角の低い ϕ 系地山については、 ϕ 系地山に比較し、より剛な対策工が必要であると想定される。
- ・ 内部摩擦角の低いc系地山については、切羽通過後の変位も無視できないため、早期併合等の対策も必要であると考えられる。



(c系地山 : $c=100\text{kN/m}^2$ 、 $\phi=10^\circ$)



(ϕ 系地山 : $c=10\text{kN/m}^2$ 、 $\phi=30^\circ$)

図-9 抑制変位量

参考文献

- 1) トンネルライブラリー第5号、山岳トンネルの補助工法、1994
- 2) 竹林、滝沢：トンネル掘削時の坑内変位に関する地質工学的研究、応用地質技術年報 No.22、2002
- 3)~18) トンネルと地下、1986.3.p7-15、1989.3.p51-55、1990.6.p43-51、1991.12.p7-14、1992.1.p15-19、1995.10.p25-32、1996.1.p19-25、1996.12.p19-23、1997.5.p7-16、1998.8.p7-12、1998.8.p7-12、1998.12.p7-17、1999.11.p17-23、2001.6.p17-26、2001.8.p17-25、2001.10.p15-17
- 19) 竹林、西崎、他：切羽安定対策工に関する解析的考察、トンネル工学研究発表会 2000.
- 20) 櫻井、都市トンネルの実際ー合理的な設計・施工法をめざしてー、鹿島出版社、1998