

## 塑性地山のトンネル工事における先行地山改良の効果について

飛島建設 土木本部 土木技術部 正会員 ○ 安 素賢  
 飛島建設 名古屋支店 土木部 武市 直人  
 飛島建設 名古屋支店 土木部 秋田 祥吾  
 飛島建設 土木本部 土木技術部 正会員 熊谷 幸樹

### 1. はじめに

NATM によるトンネル施工が困難な塑性地山において、本坑に先行して導坑を施工する場合、トンネル外周の塑性地山を事前に改良しておくことが得策となる可能性があると考えた。そこで本研究では、塑性地山で先進導坑を施工する場合の先行地山改良について2次元 FEM 非線形解析によるケーススタディを実施し、改良幅の大小が地山変位や支保工応力の抑制効果に与える影響を検証したので報告する。

### 2. 解析条件と解析ケース

トンネル断面は図 1 に示すように掘削幅  $D=4\text{m}$  の円形を想定する。土被り  $H=200\text{m}$ 、側方領域と下方領域は  $5D$  以上の  $30\text{m}$  とする。掘削工法は全断面工法とする。解析モデルの土被りは  $100\text{m}$  とし、残り  $100\text{m}$  に見合った鉛直荷重を作用させて土被り  $200\text{m}$  をモデル化する。応力解放率については、支保工が設置されるまでの素掘り時を  $40\%$  とし、支保工設置後を  $60\%$  とする。施工ステップは 1) 初期状態、2) 地山改良、3) 全断面掘削、4) 支保工設置とする。

地山は Mohr-Coulomb の破壊基準に従う弾塑性体とし、変形係数は NEXCO のトンネル数値解析マニュアルに記載の DII 地山の最低値の  $E=50,000\text{kN/m}^2$  を採用し、土被り  $H=200\text{m}$  の側圧係数は  $K_0=1$  とする<sup>1)</sup>。表 1 に地山の入力物性値を示す<sup>1)</sup>。

地山改良の規模としてはトンネル外周の幅 ( $D'$ )  $1\text{m}$ ,  $2\text{m}$ ,  $3\text{m}$ ,  $5\text{m}$ ,  $10\text{m}$  を改良する。地山改良効果は土木学会の「山岳トンネルの補助工法」を参考にして、地山改良後の変形係数を改良前の  $1.5$  倍とする場合(溶液型水ガラス系の薬液注入)を CASE1<sup>2)</sup>、改良前は  $0.1\text{MN/m}^2$  の一軸圧縮強度が改良後  $2\text{MN/m}^2$  とする場合(特殊シリカ系の薬液注入)を CASE2 とする<sup>3)</sup>。

支保工は、吹付けコンクリートと鋼製支保工が梁要素とし、ロックボルトはトラス要素でモデル化した。支保工の入力値は表 2 に示す。

キーワード トンネル, NATM, 塑性地山, 地山改良, FEM 解析  
 連絡先 〒108-0075 東京都港区港南 1-8-14 W ビル 4F TEL 03-6455-8328

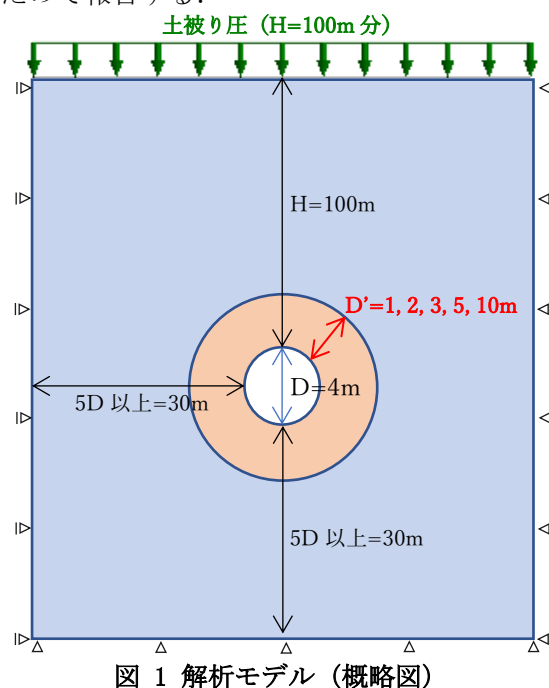


図 1 解析モデル (概略図)

表 1 地山の入力物性値

	変形係数 ( $\text{kN/m}^2$ )	ポアソン比	単位体積重量 ( $\text{kN/m}^3$ )	粘着力 ( $\text{kN/m}^2$ )	内部摩擦角 (deg)
地山	50,000	0.35	21	200	30
CASE①	75,000	0.35	21	200	30
CASE②	160,000	0.35	21	1,000	30

表 2 支保工の入力物性値

	変形係数 ( $\text{kN/m}^2$ )	ポアソン比	単位体積重量 ( $\text{kN/m}^3$ )	仕様
吹付けコンクリート	4,000,000	0.2	24	$t=20\text{cm}$ , $\sigma=18\text{N/mm}^2$
鋼製支保工	200,000,000	0.3	77	H-150, SS400
ロックボルト	210,000,000	0.3	77	10本, L=2m, TD24

### 3. 解析結果

図2に坑内変位の解析結果を示す。図中の天端沈下は沈下する方向を正、内空変位は収縮方向を正とし、いずれも計測遅れを考慮しない全変位とする。

幅1mを地山改良すると、変位量は大きく減少し、改良幅3mまでは変位の減少量は大きい。しかし、改良幅が3mより大きくなると減少量が小さくなるのが分かる。なお、解析結果の分析によりCASE1の変位抑制はCASE2の半分程度で減少傾向は同様であったことから、以下の考察はCASE2に着目する。

坑内変位と支保工の相関関係を図3、図4に示す。吹付け応力は耐力の18N/mm<sup>2</sup>以内に収まり、鋼製支保工応力は耐力の

400N/mm<sup>2</sup>を超える結果となった。吹付けコンクリートと鋼製支保工は一体となって支保機能を発揮するため、実施工では計測をしながら施工する必要がある。

### 4. 二重支保工の効果検証

高強度で高耐力の二重支保工を施工する場合を想定して追加解析を実施した。

支保工の物性値は一重・二

重支保工ともに $\sigma=36\text{N/mm}^2$ の吹付コンクリートとHT590の鋼製支保工とし、改良幅は3mとする。施工ステップは1)初期状態、2)地山改良、3)全断面掘削、4)一次支保工設置、5)二次支保工設置とする。応力解放率は素掘り時を40%、一次・二次支保で各々30%とする。

表3に示すように、改良幅が3mの一重支保工では支保工の最大圧縮応力は、吹付けコンクリートが11.7N/mm<sup>2</sup>、鋼製支保工が582.5N/mm<sup>2</sup>と、鋼製支保工の応力が耐力を超える。二重支保工の最大応力は、一次吹付けコンクリートが11.0N/mm<sup>2</sup>、二次吹付けコンクリ

ートが3.8N/mm<sup>2</sup>、一次鋼製支保工が366.9N/mm<sup>2</sup>、二次鋼製支保工が127.3N/mm<sup>2</sup>となり、一重支保工に作用した負荷が一次と二次支保工に分担され、一次・二次いずれとも支保工の発生応力は耐力以下になることが分かる。このことから、二重支保工は支保工の安定化対策として有効であると判断される。

### 5. まとめ

塑性地山の先行地山改良の効果について解析的検討を実施した結果、以下のことが分かった。

- ① 改良幅3mまでは変位抑制効果が大きく、3m以降は変位抑制効果が小さくなる。
- ② 支保工の安定化対策としては、支保耐力の向上や支保工の多重化が効果的である。

### 参考文献

- 1) 高速道路総合技術研究所：トンネル数値解析マニュアル（2017年度版），2017
- 2) 土木学会：トンネル・ライブラリー 第5号 山岳トンネルの補助工法，p.93，1994
- 3) 土木学会：トンネル・ライブラリー 第20号 山岳トンネルの補助工法 -2009年版-，p.237，2009

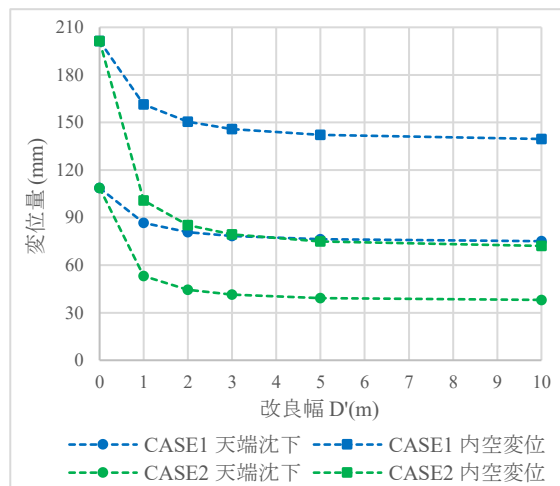


図2 坑内変位の解析結果

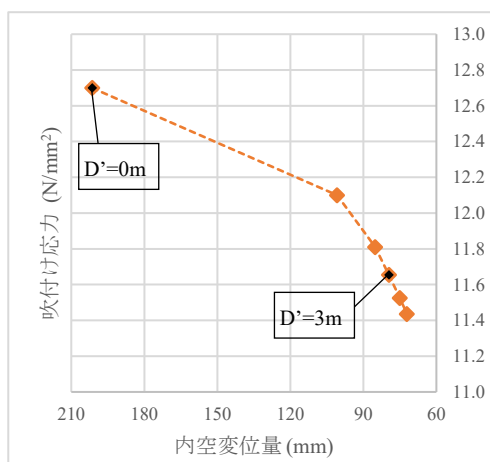


図3 内空変位と吹付け応力の関係

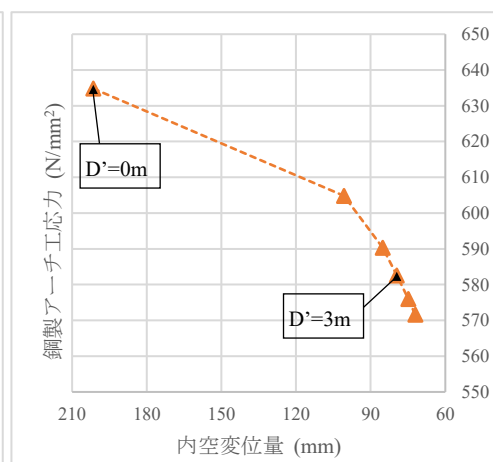


図4 内空変位と鋼製支保工応力の関係

表3 D'=3mで一重支保と二重支保の最大応力の比較

吹付け応力 (N/mm <sup>2</sup> )		鋼製支保工応力 (N/mm <sup>2</sup> )			
一重 支保工	二重支保工		一重 支保工	二重支保工	
	一次工	二次工		一次工	二次工
11.7	11.0	3.8	582.5	366.9	127.3