

## トンネル掘削解析に用いる吹付けコンクリートの弾性係数に関する一考察

大成建設(株) 正会員 大塚 勇, 板垣 賢, 横畑 友幹, ○植野 雄貴

## 1. はじめに

山岳トンネルの掘削解析において吹付けコンクリートの弾性係数は、剛性変化やクリープ変形等を考慮した弾性係数を用いることが一般的である<sup>1)</sup>。しかし、当社で開発した超高強度吹付けコンクリート<sup>2)</sup>のように一般的な吹付けコンクリートと材料特性が異なるものについては、新たに検討する必要がある。既往研究<sup>3)</sup>では、3次元解析で吹付けコンクリートの材齢に応じて弾性係数を逐次変更する手法が報告されているが、解析業務を効率的に行う観点から、2次元解析にも適用可能な弾性係数を求めることが望ましい。本稿では、トンネル掘削解析に用いる吹付けコンクリートの弾性係数について考察した結果を報告する。

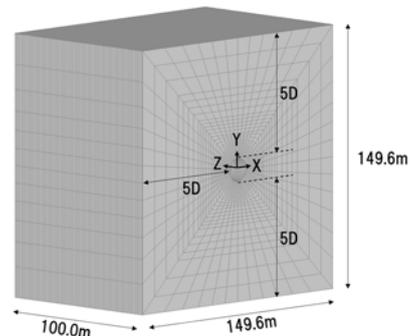


図1 解析モデル

## 2. 検討方法

本稿では、はじめに既往研究<sup>3)</sup>と同様に、吹付けコンクリートの材齢に応じて弾性係数を逐次変更する3次元解析を行い、理論解を用いて2次元解析に適用可能な弾性係数を求める。次に、理論解にて求めた弾性係数を用いた2次元解析を行い、先に実施した3次元解析と比較することで妥当性の検証を行う。以降に詳細を述べる。

## 3. 2次元解析に用いる超高強度吹付けコンクリートの弾性係数の算定

## (1) 解析条件

3次元解析モデルを図1に示す。トンネル断面は、直径13.6mの円形とし、解析ステップは、初期地圧(等方等圧)を与えた状態から、全断面で掘進長を1mとして掘削・支保設置のステップを繰り返すものとしている。支保部材は、吹付けコンクリートのみをシェル要素でモデル化し、地山は弾性体のソリッド要素でモデル化している。吹付けコンクリートの弾性係数は、超高強度材の一軸圧縮試験より得られた弾性係数を、図2に示すように対数曲線で近似し、1ステップ(サイクルタイム:8.3時間)毎に変更している。解析ケースを表1に示す。

## (2) 弾性係数の算定方法

3次元解析結果から吹付けコンクリートのトンネル半径方向応力、壁面変位を求め、以下の式に代入することで吹付けコンクリートのリング剛性を求める。

$$K_c = a \frac{\sigma_r}{U_a} \quad (1)$$

ここに、 $K_c$ :リング剛性[kN/m],  $a$ :掘削半径[m],  $\sigma_r$ :吹付けコンクリートの半径方向応力[kN/m<sup>2</sup>],  $U_a$ :壁面変位[m]  
このリング剛性は、以下の式として表すこともでき、式(1)と連立させて $E_c$ (吹付けコンクリートの弾性係数)を求める。

$$K_c = \frac{E_c(a^2 - a_i^2)}{(1 + \nu)\{(1 - 2\nu)a^2 + a_i^2\}} \quad (2)$$

ここに、 $E_c$ :吹付けコンクリートの弾性係数[kN/m<sup>2</sup>],  $a_i$ :吹付けコンクリート内側までの半径[m],  
 $\nu$ :吹付けコンクリートのポアソン比

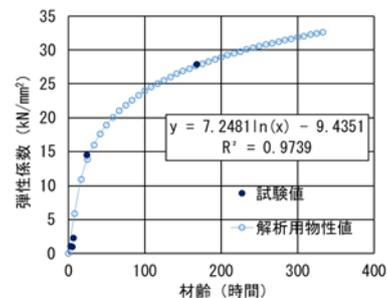


図2 弾性係数

表1 解析ケース

解析ケース	トンネル		地山			
	断面形状	吹付厚(m)	土被り(m)	変形係数(MPa)	ポアソン比	側圧係数
CASE1-1	円形	0.1	500	200	0.3	1.0
CASE1-2	円形	0.1	500	200	0.3	1.0
CASE1-3	円形	0.3	1400	200	0.3	1.0
CASE1-4	円形	0.3	1400	500	0.3	1.0

キーワード 3次元掘削解析, 吹付けコンクリート, 超高強度, 弾性係数

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 大成建設(株)土木本部土木設計部 TEL 03-5381-5296

**(3) 弾性係数の算定結果**

各解析ケースについて、吹付けコンクリートの弾性係数を求めた結果を表 2 に示す。本解析では、吹付けコンクリートの厚さ、初期地圧、地山の変形係数を解析ケースごとに異なる値として設定したが、これらの値によらず、弾性係数は約 14.7GPa となった。

**表 2 解析結果**

解析ケース	弾性係数 (GPa)
CASE1-1	14.7
CASE1-2	14.7
CASE1-3	14.9
CASE1-4	14.4

**4. 3次元解析と2次元解析の比較による検証**

以降では、先に求めた弾性係数 (14.7GPa) の妥当性を検証することを目的に、上述の解析モデルからトンネル断面形状や側圧係数を変更した場合について、3次元解析と2次元解析を比較した結果を述べる。表 3 に解析ケースを示す。

**表 3 解析ケース**

解析ケース	解析種別	トンネル		地山		
		断面形状	吹付厚 (m)	変形係数 (MPa)	ポアソン比	側圧係数
CASE2-1	2次元	円形	0.2	2000	0.3	2.0
CASE2-2	2次元	馬蹄形	0.2	2000	0.3	1.0
CASE2-3	2次元	馬蹄形	0.2	2000	0.3	2.0
CASE2-4	3次元	円形	0.2	2000	0.3	2.0
CASE2-5	3次元	馬蹄形	0.2	2000	0.3	1.0
CASE2-6	3次元	馬蹄形	0.2	2000	0.3	2.0

**(1) 解析条件**

トンネル断面は、図 1 に示した円形と、それと同等の断面積を有する馬蹄形とする。3次元解析は、吹付けコンクリートの弾性係数を逐次変更する解析とし、2次元解析は、弾性係数を 14.7GPa として解析を行い、両者を比較する。なお、2次元解析においては吹付けをビーム要素でモデル化し、応力解放率は既往研究<sup>4)</sup>に従い、素掘り時に 50%、支保設置時に 50%とする。

**表 4 解析結果**

解析ケース	変位 (mm)		吹付け応力 (N/mm <sup>2</sup> )	
	天端	S.L	天端	S.L
CASE2-1	-79.2	-354.9	300.4	116.9
CASE2-2	-160.5	-111.4	123.9	156.7
CASE2-3	-104.2	-283.0	269.6	144.5
CASE2-4	-79.9	-353.7	322.6	94.5
CASE2-5	-160.4	-112.8	112.6	153.7
CASE2-6	-105.1	-283.6	275.4	138.5

**表 5 解析結果 (誤差率)**

比較ケース	変位 (%)		吹付け応力 (%)	
	天端	S.L	天端	S.L
CASE2-1, 2-4	0.9	0.3	6.9	23.7
CASE2-2, 2-5	0.1	1.2	10.0	2.0
CASE2-3, 2-6	0.9	0.2	2.1	4.3

※誤差率=|2次元解析結果-3次元解析結果|/|3次元解析結果|×100

**(2) 解析結果**

3次元解析と2次元解析を比較した結果を表 4、表 5 に、変位図と吹付けコンクリートの応力分布図の比較 (一部抜粋) を図 3 に示す。2次元、3次元の解析結果を比較すると変形モードと吹付けコンクリートの応力の分布は概ね良い一致を示していると考えられる。

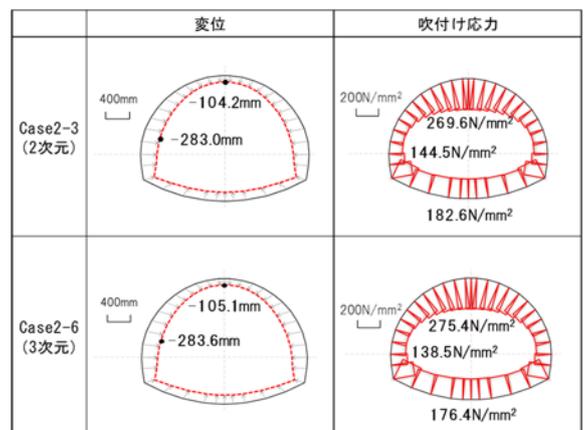
**5. おわりに**

本稿では、2次元解析に用いる超高強度吹付けコンクリートの弾性係数について考察するとともに、その検証結果を示した。本稿で述べた結果を踏まえると、吹付けコンクリートの剛性発現を室内試験で事前に得ていれば、3次元解析を行うことで、2次元解析に用いる弾性係数を求めることができる。

本検討では、3次元解析と2次元解析の比較を行い、結果が概ね良い一致を示すことを述べたが、クリープ変形や乾燥収縮にともなう変形を考慮できていない。これらの材料特性を解析モデルへ反映させることは今後の課題である。

**参考文献**

- 1) 独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説，2008
- 2) H. Takeda, T. Kawaguchi, H. Yoshimoto, S. Fujiwara, K. Sato : Material properties and construction performance of ultra-high strength sprayed concrete, Proceedings of the WTC 2019 ITA-AITES World Tunnel Congress (WTC 2019), May 3-9, 2019, Naples, Italy
- 3) 岡崎泰幸, 林久賢, 森本慎吾：トンネル掘削解析における吹付けコンクリートの等価弾性係数の適用限界に関する一考察，土木学会年次学術講演会講演概要集，vol.74, III-186, 2019
- 4) 大塚勇, 板垣賢, 横畑友幹, 蔭山凌：トンネルの2次元解析におけるパラメータ設定に関する一考察，土木学会年次学術講演会講演概要集，vol.74, III-279, 2019



**図 3 解析結果**