

軟弱地盤に対するロックボルトの効果 に関する一考察

保田 尚俊¹・塚田 和彦²・朝倉 俊弘³

¹正会員 京都大学助教 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C)

E-mail: yasuda.naotoshi.3x@kyoto-u.ac.jp

²非会員 京都大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C)

E-mail: tsukada@kumst.kyoto-u.ac.jp

³正会員 理事長 NPO法人トンネル工学研究会 (〒101-0044 東京都千代田区鍛冶町1丁目5-6 第3大東ビル)

E-mail: asakura@tunnel-eng.or.jp

ロックボルトは山岳トンネルの主要な支保部材の一つとして用いられているが、連続体と見なせるような軟弱地盤に対しての効果に関しては、議論の余地がある。そこで、ロックボルトの効果を評価するための一助として、軸対称弾性論を用いて考察を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。一般的なロックボルトの打設を想定した場合、ロックボルトによる地盤変位の抑制効果は、地盤が軟らかいとボルト近傍では大きい。しかしながら、ボルトの影響範囲は限定的であるため、ボルトから離れた位置ではその効果はあまり期待できない。ボルト近傍では軸応力よりもせん断応力が卓越していることから、ボルトによる塑性領域の抑制効果はあまり期待できないものと予想される。

Key Words : rock bolt, axisymmetric elasticity, weak ground, tunnel

1. 研究の目的

ロックボルトは山岳トンネルの主要な支保部材の一つとして用いられているが、連続体と見なせるような軟弱地盤に対しての効果に関しては、議論の余地がある。ロックボルトの効果を評価するための理論モデルとしては、ボルトを1次元のロッド、地盤を地盤ばねで表現したモデル^{1),2)}や静水圧を受ける円形トンネルの問題にボルトの影響を組み込んだモデル^{3),4),5)}などがこれまでに考案されている。しかしながら、これらのモデルの是非に関してはあまり考察されておらず、得られた結果の妥当性は不明である。そこで本研究では、ロックボルトの効果を評価するための一助として、軸対称弾性論を用いて理論的な計算を行い、その結果をもとに、軟弱地盤でのロックボルトの効果について考察する。

2. 理論

以降では、地盤内に1本のボルトが挿入されている問題を考え、ボルトがある場合とない場合とでどのような差異が生じるのかについて考察する。

(1) 問題設定

図-1にあるように、地盤内に円筒形のロックボルトが挿入されている問題を考える。地盤は無限に広がる厚肉円筒、ボルトは有限円柱とし、両者は等方均質の弾性体と仮定する。ボルトの長さおよび半径は $2h, a$ とする。ここでは、軸対称問題を仮定し、また、 $z=0$ に対しても対称な変形が生じると仮定する。ボルトの長さ h は十分に長く、 $z=0$ 付近では、地盤やボルトには変形は生じないものとする。座標系は図-1のように定めるものとし、引張を正とする。地盤とボルトの境界面は完全に固着していると仮定し、ボルトのベアリングプレートや地盤とロックボルト間のグラウトに関しては、本研究では考慮しない。

(2) 解法の流れ

図-1の問題を扱うに当たって、地盤系とロックボルト系の2つの系に分けて考える。以降では、地盤に関するものには下付き添え字の(1)を、覆工に関するものには下付き添え字の(2)をつける。また、一般的なものに対しては、下付き添え字をつけない。

初期地盤変位として、ロックボルトが挿入されていない状態で $\mathbf{u}_{(1)}^i$ が与えられているとすると、地盤とボルト

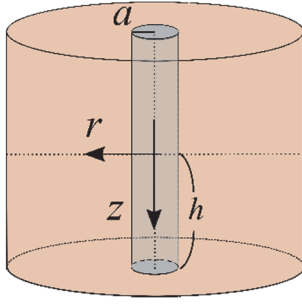


図-1 地盤内のロックボルト

の相互作用の結果として最終的に生じる地盤変位 $\mathbf{u}_{(1)}$ は次式で表わすことができる。

$$\mathbf{u}_{(1)} = \mathbf{u}_{(1)}^i + \mathbf{u}_{(1)}^r \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{u}_{(1)}^i$ は任意に与えることができる初期変位場であり、 $\mathbf{u}_{(1)}^r$ はロックボルトからの反力 $\mathbf{f}_{(1)}$ によって生じた2次変位場である。それに対し、ロックボルトにはボルトに作用する表面力 $\mathbf{f}_{(2)}$ によって変位 $\mathbf{u}_{(2)}$ が生じる。

問題を解くにあたり、2つの系の境界での変位および表面力の境界条件を満足するものを見つける必要があるが、そのような条件を厳密に満たす解を見つけるのは非常に難しい。そこで、境界面上の有限個の点で境界条件を近似的に満足させることで、解を導出する。

(3) 軸対称弾性問題の基本的な式

軸対称弾性問題の変位や応力の一般解は、Loveの応力関数 χ を用いることで下記のように表現できる。

$$\left. \begin{aligned} u_r &= -\frac{1+\nu}{E} \frac{\partial^2 \chi}{\partial r \partial z} \\ u_z &= \frac{1+\nu}{E} \left\{ (1-2\nu) \nabla^2 \chi + \frac{\partial^2 \chi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \chi}{\partial r} \right\} \\ \sigma_{rr} &= \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu \nabla^2 \chi - \frac{\partial^2 \chi}{\partial r^2} \right\} \\ \sigma_{rz} &= \frac{\partial}{\partial r} \left\{ (1-\nu) \nabla^2 \chi - \frac{\partial^2 \chi}{\partial z^2} \right\} \\ \sigma_{zz} &= \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (2-\nu) \nabla^2 \chi - \frac{\partial^2 \chi}{\partial z^2} \right\} \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu \nabla^2 \chi - \frac{1}{r} \frac{\partial \chi}{\partial r} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで ∇^2 はラプラス演算子、 E や ν はヤング率、ポアソン比とする。なお、ここでの応力関数 χ は次式を満たすものである。

$$\nabla^2 \nabla^2 \chi = 0 \quad (3)$$

(4) ロックボルトからの反力により地盤に生じる応答

地盤系が満たすべき境界条件は下記のように表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} f_{r(1)}|_{z=\pm h} &= \sigma_{rz(1)}|_{z=\pm h} = 0 \\ f_{z(1)}|_{z=\pm h} &= \sigma_{zz(1)}|_{z=\pm h} = 0 \\ f_{r(1)}|_{r=a} &= -\sigma_{rr(1)}|_{r=a} = \sum_{n=0}^{\infty} F_{r,n(1)} \cos k_n z \\ f_{z(1)}|_{r=a} &= -\sigma_{rz(1)}|_{r=a} = \sum_{n=0}^{\infty} F_{z,n(1)} \sin k_n z \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$k_n = \frac{n\pi}{h} \quad (5)$$

ここで、 $F_{r,n(1)}$ や $F_{z,n(1)}$ はフーリエ級数展開の係数である。なお、 $F_{z,0(1)}$ はゼロと仮定する。

境界条件 $f_{z(1)}|_{z=\pm h} = 0$ を満足するような応力関数 $\chi_{(1)}$ は次式で表わすことができる⁶⁾。

$$\begin{aligned} \chi_{(1)} &= B_{0(1)} a^2 z \log r + \sum_{n=1}^{\infty} \sin k_n z \{ A_{n(1)} K_0(k_n r) + B_{n(1)} k_n r K_1(k_n r) \} \\ &+ \int_0^{\infty} \frac{C_{(1)}(\beta)}{\beta^3 \cosh \beta h} [\beta z \cosh \beta z - \{ \beta h \coth \beta h + 2\nu_{(1)} \} \sinh \beta z] V_0(\beta r) d\beta \end{aligned} \quad (6)$$

$$V_0(\beta r) = J_0(\beta r) Y_1(\beta a) - Y_0(\beta r) J_1(\beta a) \quad (7)$$

ここで、 J_0 , Y_0 , J_1 , Y_1 はそれぞれ、0次および1次のベッセル関数である。また、 K_0 , K_1 は0次および1次の第2種の修正ベッセル関数である。 $A_{n(1)}$, $B_{n(1)}$ や $C_{(1)}(\beta)$ は式(4)の境界条件から定められる係数である。これらの係数が定まると、任意の地点の変位や応力が計算できる。

$r=a$ 上のある位置 p における変位は次式で表現できる。

$$\left. \begin{aligned} u_{r(1)}^{r,p}|_{r=a} &= \sum_{n=0}^{\infty} (U_{r,m(1)}^p F_{r,n(1)} + U_{r,zn(1)}^p F_{z,n(1)}) \\ u_{z(1)}^{r,p}|_{r=a} &= \sum_{n=0}^{\infty} (U_{z,m(1)}^p F_{r,n(1)} + U_{z,zn(1)}^p F_{z,n(1)}) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ここでの $U_{i,jn(1)}^p$ は境界 $r=a$ 上で n 次の単位表面力を j 方向に作用させた際に生じる p 地点での i 方向変位である。

(4) ロックボルトに生じる応答

ボルト系が満たすべき境界条件は次式で表現できる。

$$\left. \begin{aligned} f_{r(2)}|_{z=\pm h} &= \sigma_{rz(2)}|_{z=\pm h} = 0 \\ f_{z(2)}|_{z=\pm h} &= \sigma_{zz(2)}|_{z=\pm h} = 0 \\ f_{r(2)}|_{r=a} &= \sigma_{rr(2)}|_{r=a} = \sum_{n=0}^{\infty} F_{r,n(2)} \cos k_n z \\ f_{z(2)}|_{r=a} &= \sigma_{rz(2)}|_{r=a} = \sum_{n=0}^{\infty} F_{z,n(2)} \sin k_n z \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここで、 $F_{r,n(2)}$ や $F_{z,n(2)}$ はフーリエ級数展開の係数である。なお、 $F_{z,0(2)}$ はゼロと仮定する。

ボルト系の応力関数 $\chi_{(2)}$ は次式で表わすことができる⁷⁾。

$$\begin{aligned} \chi_{(2)} &= \frac{1}{6} B_{0(2)} z^3 + \frac{1}{2} D_{0(2)} r^2 z \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_{n(2)} \frac{I_0(k_n r)}{I_1(k_n a)} + B_{n(2)} r \frac{I_1(k_n r)}{I_1(k_n a)} \right] \frac{\sin(k_n z)}{k_n^2} \\ &+ \sum_{j=1}^{\infty} \left[C_{j(2)} \frac{\sinh(\lambda_j z)}{\sinh(\lambda_j h)} + D_{j(2)} z \frac{\cosh(\lambda_j z)}{\sinh(\lambda_j h)} \right] \frac{J_0(\lambda_j r)}{\lambda_j^2 J_0(\lambda_j a)} \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、 I_0, I_1 は0次および1次の第1種の修正ベッセル関数である。 $A_{n(2)}, B_{n(2)}, C_{n(2)}, D_{n(2)}$ は式(9)の境界条件から定められる係数である。これらの係数が定まると、任意の地点の変位や応力が計算できる。

$r=a$ 上のある位置 p における変位は次式で表現できる。

$$\left. \begin{aligned} u_{r(2)}^p|_{r=a} &= \sum_{n=0}^{\infty} (U_{r,rn(2)}^p F_{r,n(2)} + U_{r,zn(2)}^p F_{z,n(2)}) \\ u_{z(2)}^p|_{r=a} &= \sum_{n=0}^{\infty} (U_{z,rn(2)}^p F_{r,n(2)} + U_{z,zn(2)}^p F_{z,n(2)}) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

ここでの $U_{i,jn(2)}^p$ は境界 $r=a$ 上で n 次の単位表面力を j 方向に作用させた際に生じる p 地点での i 方向変位である。

(5) 地盤—ロックボルトの相互作用を考慮した解

地盤とボルトの境界面は完全固着しているものと仮定すると、境界条件は下記のように表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} f_{r(1)}|_{z=\pm h} &= f_{r(2)}|_{z=\pm h} = 0 \\ f_{z(1)}|_{z=\pm h} &= f_{z(2)}|_{z=\pm h} = 0 \\ f_{r(1)}|_{r=a} + f_{r(2)}|_{r=a} &= 0 \\ f_{z(1)}|_{r=a} + f_{z(2)}|_{r=a} &= 0 \\ u_{r(1)}^i|_{r=a} + u_{r(1)}^r|_{r=a} &= u_{r(2)}|_{r=a} \\ u_{z(1)}^i|_{r=a} + u_{z(1)}^r|_{r=a} &= u_{z(2)}|_{r=a} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式(4), (9)が成り立つ場合、式(12)の1番目、2番目の境界条件は常に満たされる。式(12)の3番目、4番目を満足するには、次式が必要となる。

$$F_{r(1)} = -F_{r(2)}, \quad F_{z(1)} = -F_{z(2)} \quad (13)$$

式(12)の5番目、6番目の境界条件は、厳密に満足させることは難しい。そこで、有限個の点で近似的に満足させることを考える。式(8), (11), (13)を考慮すると、式(12)の5番目、6番目の境界条件は次式で表現できる。

$$\left. \begin{aligned} u_{r(1)}^{i,p}|_{r=a} + \sum_{n=0}^{N-1} (U_{r,rn(1)}^p F_{r,n(1)} + U_{r,zn(1)}^p F_{z,n(1)}) \\ = - \sum_{n=0}^{N-1} (U_{r,rn(2)}^p F_{r,n(2)} + U_{r,zn(2)}^p F_{z,n(2)}) \\ u_{z(1)}^{i,p}|_{r=a} + \sum_{n=0}^{N-1} (U_{z,rn(1)}^p F_{r,n(1)} + U_{z,zn(1)}^p F_{z,n(1)}) \\ = - \sum_{n=0}^{N-1} (U_{z,rn(2)}^p F_{r,n(2)} + U_{z,zn(2)}^p F_{z,n(2)}) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

ここで、 $u_{r(1)}^{i,p}|_{r=a}$ および $u_{z(1)}^{i,p}|_{r=a}$ は境界 $r=a$ 上での p 地点における r 方向および z 方向の初期地盤変位である。最終的に、式(14)は $F_{r,n(1)}, F_{z,n(1)}$ を未知数とした線形代数方程式となる。以降では、 $N=400$ とし、0から $0.998h$ の間で等間隔に選んだ400点で境界条件を満足させるものとする。なお、 $z=h$ のごく付近では地盤の解の収束が非常に悪かったため、 $z=0.998h$ としている。この仮定が大きな問題とならないことは確認をしている。

表-1 入力物性値

	軟岩地山	ロックボルト
ヤング率 (GPa)	0.5	200
ポアソン比	0.40	0.30
ロックボルトの長さ (m)		15
ロックボルトの半径 (m)		0.015

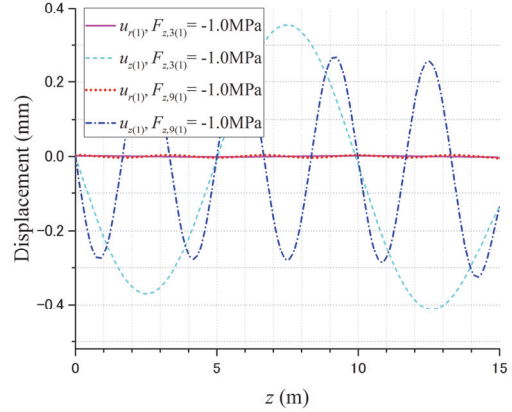


図-2 正弦波状のせん断力を地盤の境界面 $r=a$ に与えた際に生じる $r=a$ の位置での地盤の変位

3. 解析結果および考察

解析に用いた入力物性値を表-1に示す。ここでの地盤は軟岩地山を想定している。また、ロックボルトの半径は実際にはグラウトがあることを考慮して、普通よりも若干大きな値としている。

図-2は正弦波状のせん断力を地盤の境界面 $r=a$ に与えた際に生じる $r=a$ の位置での地盤の変位を示したものである。図では、 $n=3$ と $n=9$ の場合の結果を示している。図より、せん断力を境界に与えた際の地盤変位は z 方向変位 $u_{z(1)}$ が r 方向変位 $u_{r(1)}$ よりも卓越していること、 $u_{z(1)}$ の振幅は与えた正弦波状せん断力の波長に依存すること、自由表面 ($z=15\text{m}$ の位置) の影響は与えたせん断力の波長の4分の1程度であることが分かる。地盤に生じる変形は、せん断力の与え方に依存しており、さらに、自由表面近傍ではその影響を強く受けている。同じ振幅の荷重を与えたとしても、与え方や場所によって応答が異なることから、地盤の影響を地盤ばねのような単純なモデルで表現することは困難と予想される。

図-3は正弦波状のせん断力を境界面 $r=a$ に与えた際に生じる $r=a$ の位置でのロックボルトの軸方向変位を示したものである。ここでの $F'_{z,3(2)}$ および $F'_{z,9(2)}$ はロックボルトを有限円柱ではなく、1次元のロッドモデルとして扱った際の応答である。1次元のロッドモデルを仮定すると、自由度が不足しているため、式(9)の境界条件をすべて満足させることはできない。そのため、ここでの

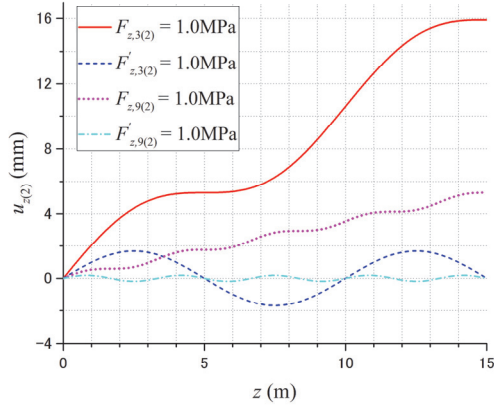


図-3 正弦波状のせん断力を境界面 $r=a$ に与えた際に生じる $r=a$ の位置でのロックボルトの軸方向変位

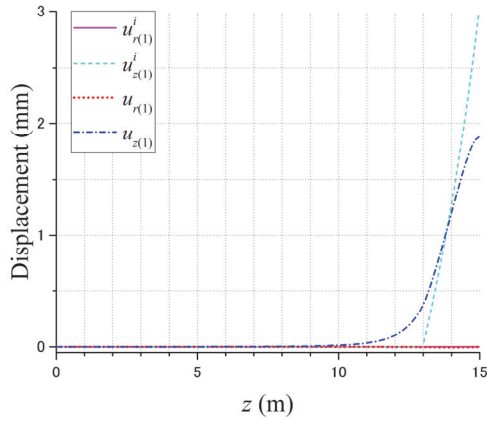


図-4 $r=a$ の位置での地盤に与えた初期変位と地盤—ロックボルトの相互作用の結果生じた地盤変位

ロッドモデルの解は、 $r=a$ での境界条件は満足しているが、 $z=\pm h$ での境界条件の一部は満足していない ($\sigma_{zz(2)}|_{z=\pm h} \neq 0$ となっている)。図より、有限円柱を仮定したものは $z=0$ から離れるにつれて軸方向変位の変位量が増大していることが分かる。一方、ロッドモデルを仮定したものは振動が見られるだけである。したがって、両者のモデルには大きな違いがあることが分かる。1次元のロッドモデルでは、有限長の棒のせん断力に起因する変形を扱うことは不適となる。

図-2と図-3の結果を比較すると、同じ荷重に対する変形量はロックボルトの方が地盤よりも大きい。したがって、せん断応力を境界に作用させた場合、ロックボルトの剛性は地盤よりも小さいことが分かる。

図-4は $r=a$ の位置での地盤に与えた初期変位と地盤—ロックボルトの相互作用の結果として地盤に生じた変位を示したものである。初期変位は軸方向変位のみを与えるものとし、実際は2m程度の長さのボルトが挿入されていることを加味して、 $z=0$ で地盤変位が生じないよう

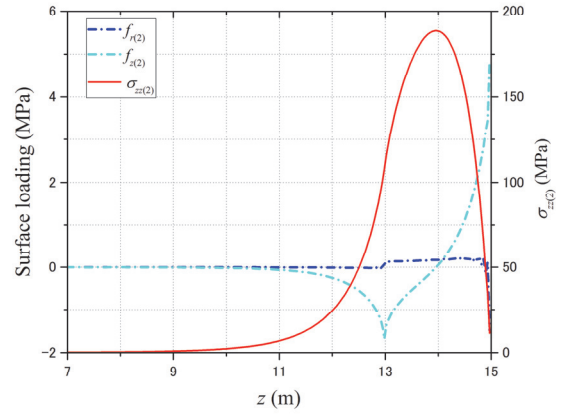


図-5 $r=a$ の位置でのロックボルトに作用する表面力とそれによって生じた軸応力

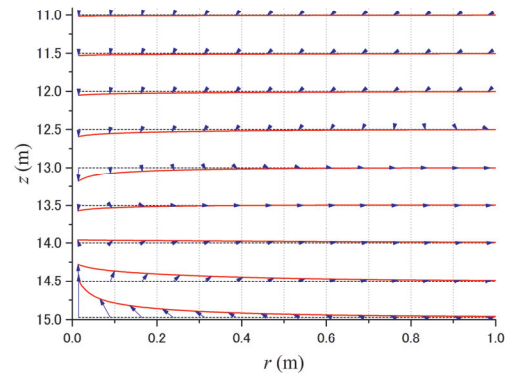


図-6 ロックボルトからの反力によって地盤内に生じた変位場

に、13m～15m間のみに与えている。図より、ロックボルトがある場合、自由表面の位置 ($z=15\text{m}$) での変位は約40%抑制されることが分かる。ここではかなり長いロックボルトを仮定しているが、この場合、地盤に最終的に生じる変位は与えた地盤変位よりもかなり奥側まで広がる事が分かる。

図-5は $r=a$ の位置でのロックボルトに作用する表面力とそれによって生じた軸応力を示したものである。 $f_{z(2)}$ は式(4)からわかるように、 $z=h$ で常にゼロとなる解の重ね合わせで表現しているにも関わらず、 $z=h$ ごく近傍でも大きな値となる。このことから、 $f_{z(2)}$ は $z=h$ ごく近傍で急激に減少するものと考えられる。ロックボルトに生じる軸応力 $\sigma_{zz(2)}$ を見ると、最大180MPa程度となっていることが分かる。ここでの $f_{r(2)}$ は $z=h$ のごく近傍で境界条件を満たしていないが、これは解の収束が非常に悪かったためである。なお、 $f_{r(2)}$ の局所的な誤差が軸方向の応答に及ぼす影響は小さく、問題とはならない。

図-6はロックボルトからの反力によって地盤内に生じた変位場を表わしたものである。ここでの図は、実際の変位量を500倍に拡大して表示している。図より、ボル

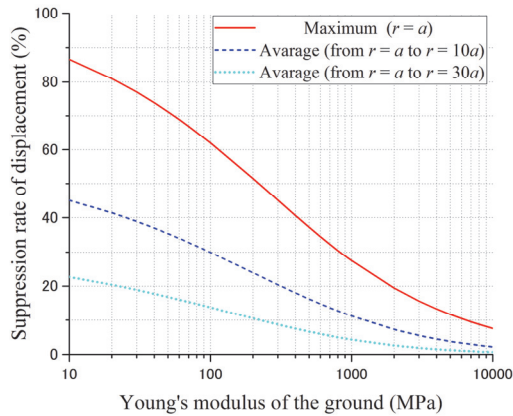


図-7 ロックボルトによる自由表面近傍での地盤変位の抑制率

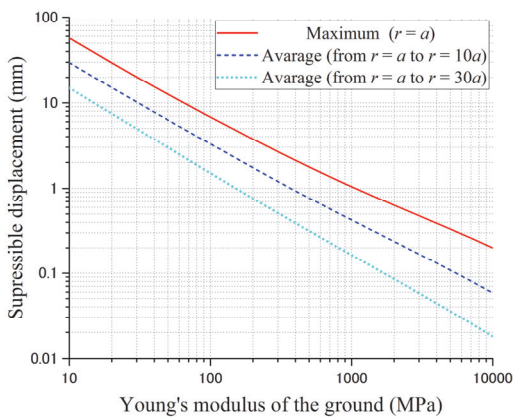
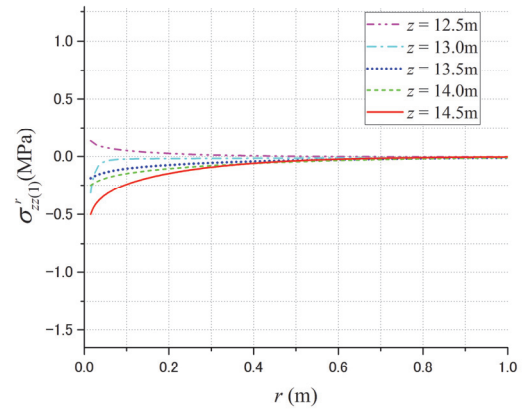


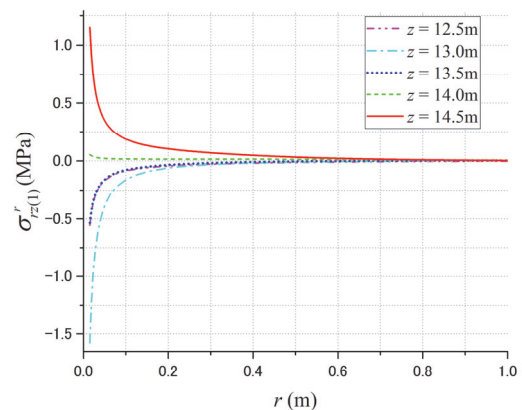
図-8 ロックボルトによる抑制可能地盤変位量

トによる影響範囲は自由表面近傍で最も広く、ボルトの半径の大きさと比較すると、かなり広い範囲に影響が及んでいることが分かる。

図-7はロックボルトによる自由表面近傍での地盤変位の抑制率を示したものである。ここでの自由表面近傍での地盤変位の抑制率とは、 $z=0.998h$ の地点での、初期値として地盤に与えた変位 $u_{z(1)}^i$ の変位量とロックボルトからの反力によって地盤内に生じた変位 $u_{z(1)}^r$ の変位量の比をとったものである。この値が1に近いほど、ロックボルトの変位の抑制効果が大きいと解釈できる。ここでは、この抑制率を地盤のヤング率を変化させながら計算している。図より、地盤のヤング率が小さくなるほど抑制率が大きくなることが分かる。例えば、地盤のヤング率が100MPaの場合では、ボルト近傍での抑制率は約60%、ボルトから10倍離れた地点(=0.15m)までの平均値は約30%、30倍離れた地点(=0.45m)までの平均値は約15%となる。一般的なロックボルトの打設を想定した場合、ロックボルトによる地盤変位の抑制効果は、ボルト近傍では大きくなる可能性があるが、ボルトから離れた位置ではあまり期待できないことが分かる。



(a) 軸方向応力



(b) せん断応力

図-9 ロックボルトからの反力によって地盤内に生じた応力

図-8はロックボルトによる抑制可能地盤変位量を示したものである。ここでの抑制可能地盤変位量とは、ロックボルトの許容応力を300MPaと仮定した場合に計算されるものである。図より、地盤のヤング率が非常に小さい場合を除けば、ロックボルトによる地盤変位の抑制可能量はそれほど大きくないことが分かる。例えば、地盤のヤング率が100MPaの場合では、ボルト近傍での抑制可能量は約7mm、ボルトから10倍離れた地点(=0.15m)までで平均値で約3mm、30倍離れた地点(=0.45m)までの平均値で約1.5mmとなる。

図-9はロックボルトからの反力によって地盤内に生じた応力を示したものである。ボルト近傍では軸応力よりもせん断応力が卓越していることが分かる。ここでの解析は、弾性解析であるため、塑性化については考慮できていないが、ボルト近傍ではせん断応力が卓越していることから、ボルトによる塑性領域の抑制効果はあまり期待できないものと考えられる。静水圧を受ける円形トンネルの問題にボルトの影響を組み込んだモデルでは、ボ

ルト近傍に生じるせん断応力を適切に評価できていないので、実際では、これらのモデルから予想されるほどの塑性域の抑制効果はないものと考えられる。

- ロックボルト近傍では軸応力よりもせん断応力が卓越していることから、ボルトによる塑性領域の抑制効果はあまり期待できないものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、ロックボルトの効果を評価するための一助として、軸対称弾性論を用いて理論的な計算を行い、それに基づき軟弱地盤でのロックボルトの効果に関しての考察を行った。その結果は以下のようにまとめる事ができる。

- 地盤に生じる変形はせん断力の与え方や自由表面の影響を強く受ける。そのため、地盤の影響を地盤ばねのような単純なモデルで表現することは困難である。
- せん断力をロックボルトの境界面に与えた際の応答は、ボルトを有限円柱と仮定した場合と一次元のロッドと仮定した場合とで大きく異なる。このことから、1次元のロッドモデルでは、有限長の棒のせん断力に起因する変形を扱うことは不適となる。
- 一般的なロックボルトの打設を想定した場合、ロックボルトによる地盤変位の抑制効果は、ボルト近傍では大きくなる可能性があるが、ボルトから離れた位置ではあまり期待できない。

参考文献

- 1) Farmer, I.: Stress distribution along a resin grouted rock anchor. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol.12. pp.347-351,1975.
- 2) Li, C., Stillborg, B.: Analytical models for rock bolts. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.36. pp.1013-1029,1999.
- 3) 蒋宇静, 江崎哲郎, 横田康行: 軟岩地山トンネルの安定性におけるロックボルトの力学的作用効果, 土木学会論文集, No.561/III-38, pp.19-31,1997.
- 4) 土門剛, 今田徹, 西村和夫: ロックボルトによる支保内圧効果を考慮した低強度地山トンネルの簡便モデル, 土木学会論文集, No.722/III-61, pp.149-167,2002.
- 5) 江崎哲郎, 蔡躍, 蒋宇静: 地山との相互作用を考慮したロックボルトの支保効果の理論的評価, トンネル工学論文集, No.2, pp.9-15,2004.
- 6) Chandrashekhara, K., Muthanna, S.: Stress analysis of a thick plate having a circular hole under axisymmetric radial load. *Ingenieur-Archiv*, Vol.49, pp1-9, 1978.
- 7) Meleshko, V., Tokovyy, Y.V.: Equilibrium of an elastic finite cylinder under axisymmetric discontinuous normal loadings. *Journal of Engineering Mathematics*, Vol.78, pp.143-166, 2013.

(2017. 8. 11 受付)

A CONSIDERATION OF ROCKBOLT SUPPORT FOR WEAK GROUND

Naotoshi YASUDA, Kazuhiko TSUKADA and Toshihiro ASAKURA

Theoretical solutions based on the axisymmetric elasticity are derived. The ground and the rockbolt are modeled as an elastic finite thick-walled cylinder with infinite outer radius and as an elastic finite cylinder, respectively. Numerical results show that rockbolt can suppress most of ground displacement around the rockbolt when the Young's modulus of the ground is very low. However, the area of the influence of the rockbolt is limited. Therefore, rockbolt can suppress a little ground displacement around the middle of rockbolts. Moreover, shear stress is larger than axial compressional stress around the rockbolt. it has probably little effect on preventing the expansion of plastic region.