

現場計測結果に基づく垂直縫地工法の補強効果に関する研究

Study on the Supporting Effect of the Vertical Forepoling Bolt Method

by using Field Measurements

徳永 理*・進士 正人*・中田 雅博**・京谷 孝史***

Aya TOKUNAGA, Masato SHINJI, Masahiro NAKATA, Takashi KYOYA

Abstract

“Vertical Forepoling Method” is an effective countermeasure for the large subsidence of the ground surface, the collapse of cutting face or the landslide of slope around a tunnel adit. However, there were no data to clarify the effectiveness of this method from field measurements.

In this study, the homogenization method has been applied to evaluate the effect of strain restraint by rockbolting and elastic coefficients of the improved ground.

Consequently, the effect of “Vertical Forepoling Method” has been evaluated qualitatively from field measurement data.

1. はじめに

トンネル坑口部や、土被りが小さい箇所においてトンネルを計画する場合、大きな地表面沈下、切羽の不安定化、地すべりの発生といった一連の地山変状が予想される場合がある。これらの変状を未然に防止する施工法のひとつに、トンネル掘削前にロックボルトを地表面から適当な施工間隔で打設することにより地山を積極的に改善する「垂直縫地工法」がある。

垂直縫地工法はその効果が認められ^{1),2),3)}実績も多いが、補強効果の定量的な評価は確立しておらず、その設計法には今後検討すべき点が多く残されている。そこで本論文では均質化法⁴⁾により、垂直縫地ボルトの補強効果の定量的な評価を試みる。

本文では均質化法についての概要を示し、これを垂直縫地工法に適用してボルトピッチを種々に変化させたときの地盤の改良効果についての検討を行う。さらにこの検討の妥当性を確かめるため、実際の施工事例と同じモデルでFEM解析を行い計測結果との比較検討を行った。

2. 均質化法

均質化法とは微視的周期構造を有する材料の平均的な物性を評価する数学的な一手法である。

今、図1のような微視的周期構造を示す材料を考える。材料は最小単位の繰り返りで構成され、その最小単位

* 応用地質株式会社 川本地盤工学研究所

** 日本道路公団試験研究所

*** 東北大学工学部 土木工学科

は複数の材料で構成されていると仮定する。均質化法ではこの最小単位をユニットセルと呼ぶ。

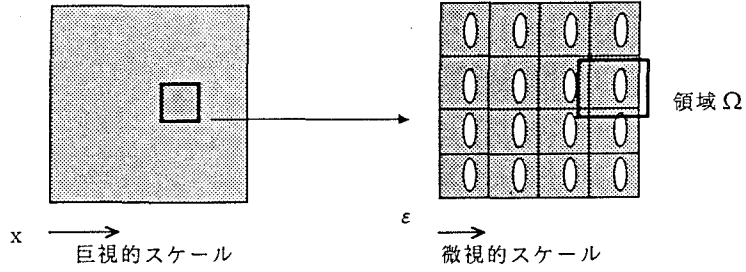


図1 周期的微視構造を有する材料

巨視的なスケール x に対し、ユニットセル一辺の長さを ε とし、これを微視的スケールとする。微視的スケール ε において弾性係数は材料により変化する値であり、これを $E_{ijk}^\varepsilon(x)$ 、物体力を $f_i^\varepsilon(x)$ 、それらにより決定する変位を $u_k^\varepsilon(x)$ と表す。領域 Ω 内でのこの材料に対するつり合い式は(1)式のように表される。

$$\int_{\Omega} E_{ijk}^\varepsilon(x) \frac{\partial u_k^\varepsilon(x)}{\partial x_j} \frac{\partial v_i(x)}{\partial x_i} dx = \int_{\partial\Omega} t_i v_i(x) dx + \int_{\Omega} f_i^\varepsilon(x) v_i(x) dx \quad \forall v_i(x) \quad (1)$$

ここで、 t_i は境界 $\partial\Omega$ に働く表面力であり、 v_i は任意関数である。

微視的スケール ε で変化する関数を扱うために、新たに $y = x / \varepsilon$ なる変数を導入するとユニットセルの均質化弾性係数 E^H は以下の(2)式で表すことができる。

$$E_{ijk}^H(x) = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left(E_{ijk}^\varepsilon(x, y) - E_{ijpq}^\varepsilon(x, y) \frac{\partial \chi_p^k(x, y)}{\partial y_q} \right) dy \quad (2)$$

ここで $|Y|$ はユニットセルの体積である。 χ_p^k はユニットセルの特性関数と呼ばれ、ユニットセルの微視的な乱れをあらわすものである。このとき、(1)のつり合い式の解は巨視的スケールでの平均挙動 u_0 が得られる。この平均挙動 u_0 をもとに任意のユニットセル内の局所的応力を(3)式のように近似的に求めることができる。

$$\sigma_{ij}^0 = E_{ijk}^\varepsilon e_{kl}^0 = \left(E_{ijk}^\varepsilon - E_{ijpq}^\varepsilon \frac{\partial \chi_p^k}{\partial y_q} \right) \frac{\partial u_k^0}{\partial x_i} \quad (3)$$

これを均質化応力と呼ぶ。この手法を垂直縫地工法に適用すると、ボルトの配置形状からユニットセルの形状が決まり、ボルトピッチからユニットセルの一辺の長さ ε が決まることになる。この手法を用い、次節では垂直縫地ボルトを施工した地盤の均質化弾性係数、均質化応力を算定する。

3. 均質化法の垂直縫地ボルト施工区間への適用

垂直縫地工法は地山に一定の間隔で鉄筋を地表からトンネル施工基面（通常は上半断面）まで施工する工法である。従って微視的にはボルトと地山を周期的構造として垂直縫地ボルト施工範囲の地山材料を評価することができる。そこで今回は垂直縫地工法の補強効果の評価に均質化法を適用する。

3.1 均質化弾性係数の算定

垂直縫地ボルトの施工パターンの模式図を図2に示す。この施工パターンをもとにユニットセルを決定し、ユニットセルの形状と地盤、ボルトの弾性係数、ポアソン比からユニットセルの均質化弾性係数を決定する。この均質化弾性係数がユニットセルを代表する弾性係数となる。今回はボルトピッチが均質化弾性係数に与える影響

を検討するため、ボルトピッチを3ケース設定した。各ケースのユニットセルの諸元を表1に示す。また、使用したユニットセルを図3に示す。

表1 ユニットセルに使用した物性値

	ボルトピッチ (m)	地盤の縦弾性係数 とポアソン比	ボルトの縦弾性係数 とポアソン比	ボルト径 (cm)
パターン1	1.5	$E=800\text{ kgf/cm}^2$ $\nu=0.3$	$E=2100000\text{ kgf/cm}^2$ $\nu=0.17$	2.5
パターン2	2.0			
パターン3	2.5			

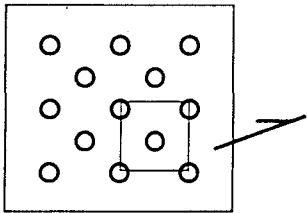


図2 垂直縫地ボルトの施工パターン

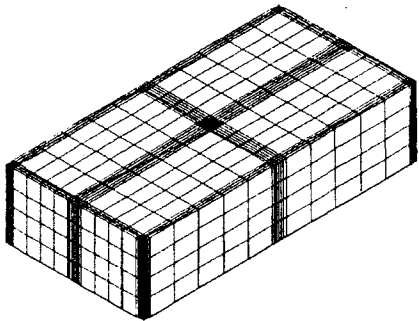


図3 ユニットセル

解析結果を以下に示す。図4、5では均質化縦弾性係数と均質化せん断弾性係数を地盤のそれで正規化したものとボルトピッチとの関係を示す。以下では正規化した値を均質化弾性係数比と呼ぶ。図4から、ボルト方向(E_z)の均質化縦弾性係数比はボルトピッチを変えることにより大きく変化することがわかる。パターン1の場合、均質化縦弾性係数比は約1.8となり、約80%の補強効果があることがわかる。それに対してボルト断面方向(E_x 、 E_y)に関しては5%程度の補強効果である。

図5に均質化せん断弾性係数比について示す。均質化せん断弾性係数比はいずれのパターンでもボルト直交断面方向(G_{xy})よりボルト断面方向(G_{yz} 、 G_{zx})の値がやや大きい傾向を示す。

以上から垂直縫地ボルトで地山を補強した場合、垂直縫地ボルト方向の補強効果が期待でき、その効果はボルトピッチに大きく影響されることがわかった。

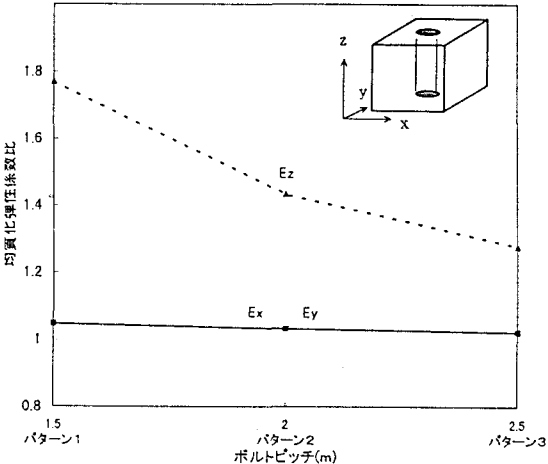


図4 ボルトピッチと均質化縦弾性係数比の関係

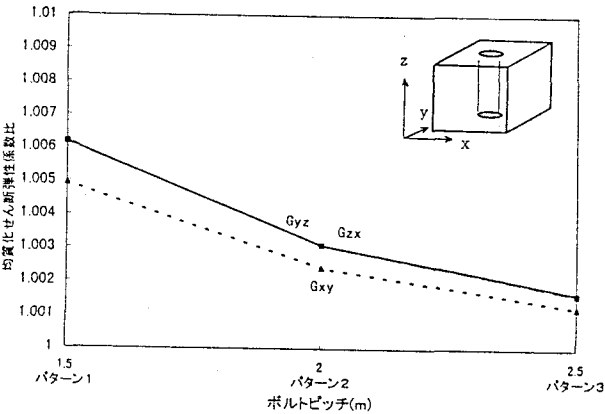


図5 ボルトピッチと均質化せん断弾性係数比の関係

表2に各パターンのボルトピッチと均質化弾性係数比について整理する。

表2 ボルトピッチと均質化弾性係数比の関係

ボルトピッチ	Ex	Ey	Ez	Gyz	Gzx	Gxy
1.5m (パターン1)	1.05	1.05	1.77	1.006	1.006	1.005
2.0m (パターン2)	1.03	1.03	1.43	1.003	1.003	1.002
2.5m (パターン3)	1.02	1.02	1.28	1.002	1.002	1.001

補強効果はユニットセルと地盤の弾性係数に固有のものである。従って現場のボルトピッチと地盤の弾性係数から均質化弾性係数比を決定し、補強された地山の弾性係数として扱う必要がある。

3.2 均質化弾性係数を使用したトンネル掘削時の解析例

前節に示した補強効果の妥当性の検証のため、決定した均質化弾性係数を用いて FEM 解析を行い、トンネルの掘削時の補強効果について検討した。垂直縫地ボルトの施工条件、地山の材料定数等は垂直縫地工法を採用したあるトンネル坑口の現場をもとに決定した。なお、前節のボルトピッチ 2m のユニットセル（パターン2）はこの現場のパターンを再現したものであり、FEM 解析時の均質化弾性係数にはパターン2の値を使用した。

FEM 解析に使用した材料物性を表3に示す。地盤1、地盤2の弾性係数は試験結果から決定し、補強範囲の弾性係数に関しては、表2の値を採用しxとy方向の弾性係数を変化させた。

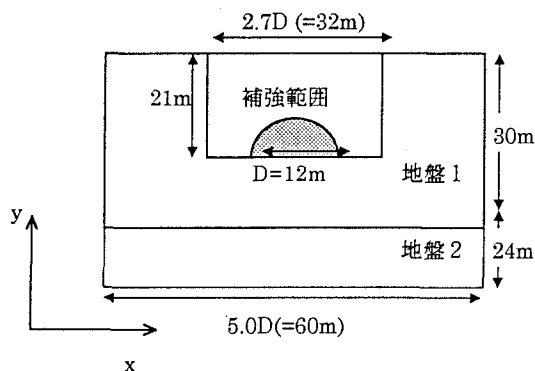


図6 各解析ケースの全体図

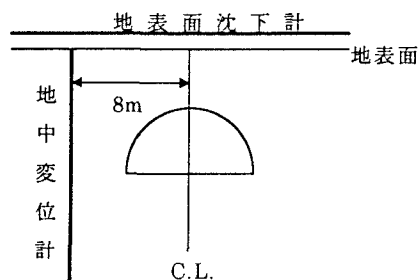


図7 計測点とトンネル断面の関係

表3 解析に使用した材料物性値

	x 方向弾性係数 (kgf/cm ²)	y 方向弾性係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比	単位体積重量 (kgf/cm ³)
補強土	805	1150	0.3	0.20
地盤1	800	800	0.3	0.20
地盤2	5000	5000	0.3	0.22

この現場ではトンネル掘削時に地表面沈下、地中変位計、ボルト軸力計の計測を行っている。

この現場計測値と解析結果（補強した場合、無補強の場合）を比較した。解析結果との比較に使用した計測点とトンネルとの位置関係を図7に示す。以下では、地表面沈下、地中鉛直変形の分布形状を解析結果と比較する。

3.2.1 地表面沈下

図8に地表面沈下の比較図を示す。

補強した場合と無補強の場合では変形のモードは似ているが、その絶対沈下量は異なる。当現場の補強パターンの場合、無補強の場合に比べ最大沈下量を約40%抑制できる結果となった。

計測値は補強された場合と無補強の場合の中間に位置し、変形のモードも解析値とよく似た傾向を示す。

解析での補強された場合はボルトと地山が完全に一体化しているときを再現したもので、実際の地山の動きは補強した解析結果より弾性係数の改善効果は小さく、より大きな沈下量を示すと考えている。

3.2.2 地中変位（鉛直変位）

図9に鉛直変位の比較図を示す。補強された場合と無補強の場合を比較すると、トンネル付近で補強による沈下抑制効果が顕著に認められる。当現場の補強パターンの場合、無補強の場合に比べ最大沈下量を約40%抑制できる結果となる。

解析値と計測値に共通して、トンネル底盤よりも下から沈下が生じる傾向がある。このことより、ボルト長をトンネル底盤より長くすることで沈下を減少させる効果が期待できるものと考えられる。

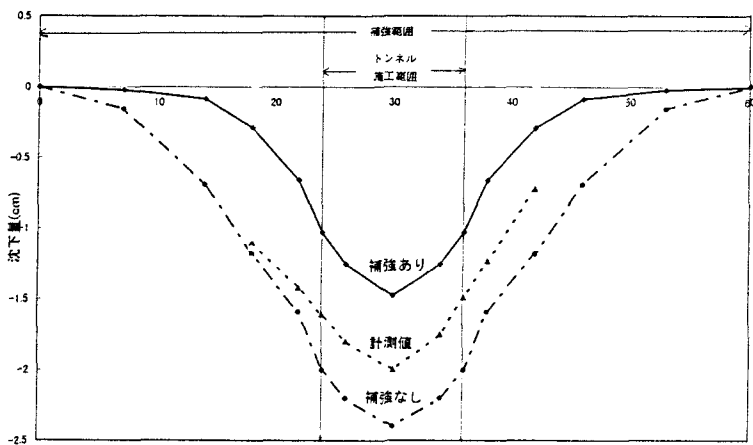


図8 地表面沈下の解析値と計測値の比較図

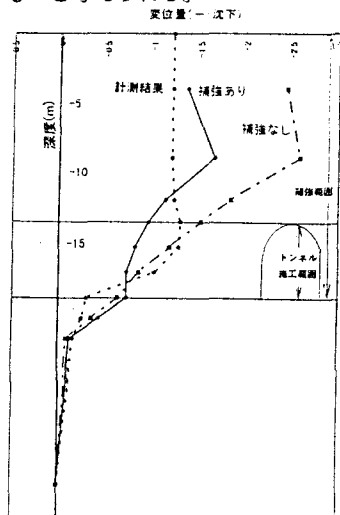


図9 鉛直変位の解析値と計測値の比較図

4. 結論

本論文では垂直縫地ボルトの効果を評価するために均質化法と弾性 FEM 解析を行った。その結果、ボルトピッチと地山の均質化弾性係数との関係を明確にすることができた。将来的にはユニットセルの解析を数多く行うことで、地山の弾性係数に対して最適な径とピッチが決定できるものとする。

また、均質化法により決定した均質化弾性係数を用いた解析結果を現場の計測値と比較し、良好な結果が得られた。この手法を用いることで垂直縫地ボルト施工前に沈下量等の予測がある程度可能になるものとする。また、本手法の特徴である局所的な応力状態を決定できる点も今後の垂直縫地ボルトの設計法の検討に役立つものと思われる。

5. 謝辞

本論文の作成に当たり御指導いただいた、日本道路公団、城間氏、株式会社くいんと、石井氏、李氏、横田氏、応用地質株式会社の大塚氏、森氏、奥井氏をはじめとする関係の方々に深く感謝致します。

6. 参考文献

- 1) 中田雅博、三谷浩二、西村和夫、進士正人：「現場計測による垂直縫地ボルトの補強効果に関する基礎的研究」、第6回トンネル工学研究発表会、1996、論文・報告集第6巻、p.163-168
- 2) 嘉指登志也、西村和夫、進士正人：「逆解析手法に基づく垂直縫地工法の補強効果に関する研究」、第9回岩の力学国内シンポジウム、1994、p.665-669
- 3) 奥田庸、石渡徳久、阿部敏夫：「垂直縫地ボルトの地表面沈下抑止効果とボルトの軸力挙動に関する実験結果」、トンネル工学研究発表会、1995、論文・報告集第5巻、p.9-16
- 4) 京谷孝史：「Homogenization 法の岩盤力学への応用」、資源・素材学会秋季大会、1993