

ロックボルト付着強度特性の評価と合理的支保設計

長崎大学工学部 正会員 蔣 宇静 長崎大学工学部 正会員 棚橋 由彦
 長崎大学工学部 学生員 佐久間 敦之 長崎大学工学部 学生員 〇谷口 雄一郎
 九州大学大学院工学研究院環境システム科学研究センター 学生員 蔡 躍

1. はじめに

ロックボルトは山岳トンネルや地下空洞などの補強対策として不可欠な支保部材として用いられているが、その定着力の評価は、現場引抜き試験を実施し引抜き強度により行っている。しかしながら、引抜き試験では周辺地山への反力により、ロックボルトの周囲には一様分布な垂直応力は作用せず、ロックボルト表面に沿ったせん断応力も局部的集中を起こしやすくなり付着強度を的確に評価することができない問題点がある。また、ロックボルトの支保効果を定量的に評価するために数値解析的評価法が用いられているが、入力値としての付着強度や変形剛性が客観的に設定できない課題が未だに残されている。

本研究では、NATM 工法を用いた山岳トンネルを対象として、ロックボルトの支保効果を定量的に評価するため、グラウトとの付着強度に注目し、周辺地山からの拘束条件を考慮した、ロックボルトの付着強度および変形剛性を求める新しい試験法を提案する。それによって得られた試験結果を独自に開発したプログラムに取り入れ、ロックボルトの支保効果に関する考察を行う。

2. 試験概要

ロックボルトとグラウトとの境界面の付着強度を求めるために、著者らが試作した一面せん断試験機を用いる。せん断供試体としては、ロックボルトとその周囲のグラウトを平面展開したものを考える(図-1)。NATM 工法を用いた山岳トンネルを対象としているので、初期垂直応力 σ_n の設定において、土被り(H)は、50~100mと想定し、トンネル周辺の最大垂直応力が2.5~5MPaとなるため、せん断試験では、 σ_n を1、3、5MPaと変化させた。また、ボルト表面には凹凸があるため引抜きに伴い周辺地山を押し広げるようにダイレイションが生じることから、周辺岩盤の拘束効果が定着部グラウトの付着強度に影響を及ぼし、ロックボルトの引抜き抵抗が変わる可能性があるため、周辺地山の垂直剛性(K_n)を一定に制御しなければならない。ここで堆積岩を想定した地山は日本道路公団分類によるC、D I級物性値を用いて、 $\sigma_c = 3 \sim 10 \text{ MPa}$ 、 $E = 1.0 \sim 3.0 \text{ GPa}$ 、 $\nu = 0.3$ から、 K_n が256~769MPa/mと求められるため、せん断試験では K_n を0、300、500、700、1000MPa/mと5段階に変化させる。

3. 試験結果と考察

それぞれの試験条件におけるピークせん断応力の比較を図-2に示す。初期垂直応力の増加に伴いピークせん断応力はほぼ比例して増加するが、垂直剛性の増加とピークせん断応力の間に相関は見られない。ここで、ピークせん断

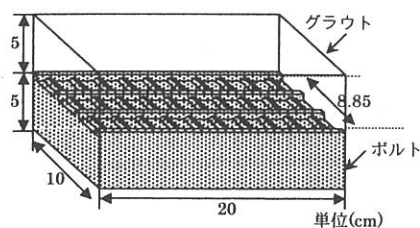
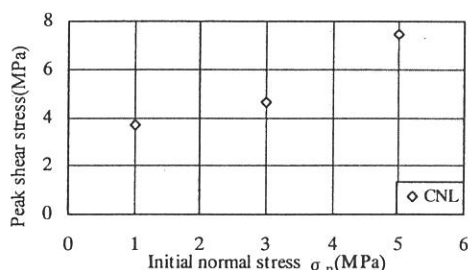
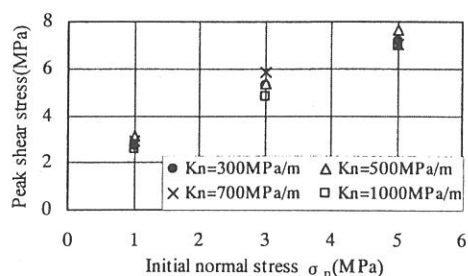


図-1 ロックボルトの展開図



a) CNL



b) CNS

図-2 ピークせん断応力の比較

応力は線形的に増加しているので、a)、b)の点に対する回帰式より、それぞれの見かけ粘着力 c_p 、摩擦角 ϕ_p は、CNL で c_p は 2.43MPa、 ϕ_p は 43.2° であった。また、CNS での平均値として c_p は 2.09MPa、 ϕ_p は 45.8° となるが、 K_n との関係に着目し、それぞれの試験ケースでのピークせん断応力における見かけ粘着力 c_p と、摩擦角 ϕ_p を図・3 に示す。

ここで、図・3 に着目すると、ピーク時においては、垂直剛性値の増加に伴い粘着力 c_p はやや増加、摩擦角 ϕ_p は減少の傾向を示し、次の回帰式が求められる。

$$c_p = 2.2 - 0.0006K_n \quad (2)$$

$$\phi_p = 46.0 + 0.0023K_n \quad (3)$$

上式より、見かけ粘着力は、 K_n によって低下するが、1.5~2.5MPa にある。また、 ϕ_p は K_n の影響をほとんど受けず 46° である。

次に、せん断変位 ($u=1, 2, 3, 4\text{mm}$) における見かけ粘着力 c_r 、摩擦角 ϕ_r を図・4~6 に示す。ここで、図・4、5 では、残留段階において、各ケースとも垂直剛性の増加に対しては影響を受けるが、せん断変位の増加に対してはほぼ一定の強度を示した。よって、各せん断変位の強度に対する平均をとり K_n の推移に伴う c_r 、 ϕ_r のグラフを図・6 に示す。回帰式を求めると次のようになる。

$$c_r = 1.3 - 0.0007K_n \quad (4)$$

$$\phi_r = 32.7 + 0.0098K_n \quad (5)$$

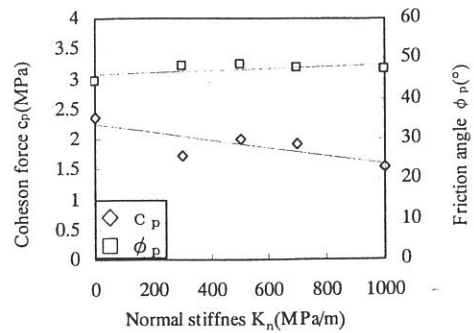
残留段階では、ピーク時に比べて見かけの粘着力は約 50%、摩擦角は約 80% に減少していることがわかる。

4. おわりに

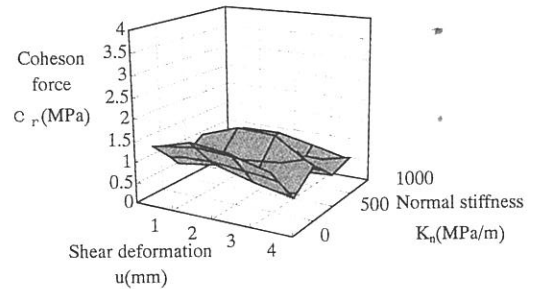
本研究では、ロックボルトの付着強度特性の新しい試験法を示し、付着強度と周辺地山の变形特性 (K_n) などの関係を考察した。今後は、著者らが独自に開発した解析手法に試験結果を取り入れて、ロックボルトの作用効果を定量的に説明していく。

参考文献：1) 棚橋由彦、蔦宇静、佐久間敦之、原廣敬：第 57 回土木学会年次学術講演概要集，札幌，第Ⅲ部門，Ⅲ-660，CD-ROM，2002

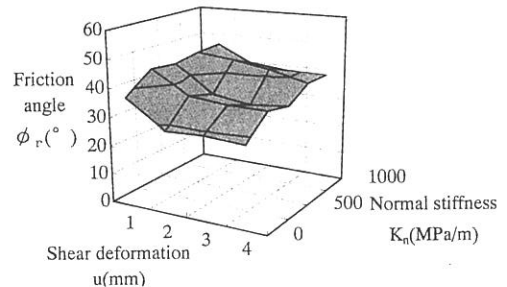
2) 棚橋由彦、蔦宇静、元尾秀行、竹下揚子：第 57 回土木学会年次学術講演概要集，札幌，第Ⅲ部門，Ⅲ-200，CD-ROM，2002



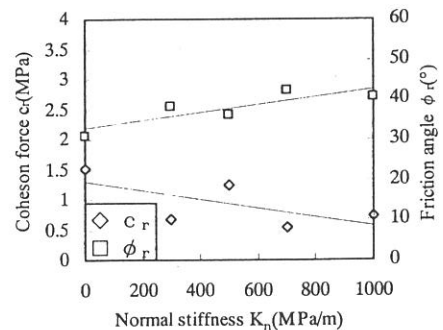
図・3 K_n の推移に伴う c_p 、 ϕ_p の比較



図・4 見かけの粘着力の垂直剛性とせん断変位の関係



図・5 摩擦角の垂直剛性とせん断変位の関係



図・6 平均値における K_n の推移に伴う c_r 、 ϕ_r の比較