

ロックボルト付着せん断強度の実験的評価法

EXPERIMENTAL EVALUATION FOR ADHESION SHEAR STRENGTH OF ROCKBOLT

蒋 宇静*・棚橋 由彦*・佐久間 敦之**・谷口雄一郎***

Yujing JIANG, Yosihiko TANABASHI, Nobuyuki SAKUMA and Yuuichirou TANIGUCHI

Rockbolt is used as the indispensable support components in tunnel, underground cavern and so on. On site, drawing-out examination is carried out for evaluating the fixing force, and the evaluation is performed by drawing-out intensity. However, there are various problems in this method, and adhesion intensity cannot be evaluated exactly. Moreover, although the numerical analytical method is used in order to evaluate the support effect of rockbolt quantitatively, it is difficult to set the input values objectively, such as adhesion intensity, shear stiffness. In order to estimate the support effect of rockbolt exactly, we proposed a new examination method of adhesion shear strength between rockbolt and grout by considering the effect of deformational ability of the surrounding rock masses.

Key Words : rock bolt, grout, adhesion characteristic, direct shear test, normal stiffness

1. はじめに

近年、ロックボルトは山岳トンネルや地下発電所空洞、不連続性岩盤斜面などの補強対策において不可欠な部材として用いられている。しかしロックボルトの作用効果を定量的に評価する手法は作用機構が複雑なため未だ提案されておらず、支保設計の多くは施工実績に基づいて作成された標準支保パターンの適用が一般的である。そして現場におけるロックボルトとグラウトの定着力の評価は、引抜き試験を行うことにより求まる引抜き強度をもって評価することが通常である。しかしながら、この試験方法にはいくつかの問題点が指摘されている。

1つ目にロックボルトを引抜く際に生じる周辺地山への反力によって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(図-1 参照)。2つ目にこの試験方法では引抜き力は求まるが、ボルト-地山、地山-グラウトのせん断力や境界面のせん断剛性を求めることができない問題点がある。3つ目にロックボルトを引抜く際に、境界面凹凸(リフ)の乗り上げに応じて垂直変位(ダイレーション)が生じ、垂直応力が変わることが考えられる。これにより周辺岩盤の拘束圧が変わり、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、この垂直応力増分を考慮するべきである¹⁾。

また近年では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。その手法として有限要素法がよく用いられるが、この解析手法では地山を連続体としたうえでロックボルトも要素として取

* 正会員 長崎大学工学部社会開発工学科

** 学生員 長崎大学大学院生産科学研究科

***学生員 長崎大学工学部社会開発工学科

り込んだものになっている。ロックボルトを有限要素の節点に結合する場合には、地山の変形がロックボルトによって完全に拘束されることになる。この場合ロックボルトの地山を連続体として挙動させる支保機構に加え、変形拘束の評価が加わることになる。一般にロックボルトの支保効果として、①地山を連続体として挙動させる、②地山変形を拘束できないこと、が知られている²⁾。よってこの手法では実際の支保効果より過大に評価する恐れがある。この解決方法として、ロックボルトと地山要素の接点とをせん断バネで結合する手法がある。この手法を用いるとバネ定数を変化させることにより、地山を連続体として挙動させる役割に加え、変形拘束する場合からしない場合までロックボルトの受け持つ変形拘束の役割を連続的に表現できる²⁾。しかしながら、入力値としてのボルトとグラウトの境界面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、ロックボルトの支保効果を的確に評価するために、NATM 工法を用いた山岳トンネルを対象として、まずは地山との付着強度に注目し、ピーク時および残留段階、せん断剛性について評価をおこない、周辺地山からの拘束条件を考慮できるロックボルト付着強度の新しい試験法を提案する。

2. 試験概要

(1) せん断試験を用いた付着強度の評価

ロックボルトと地山の付着強度を的確に評価するために一面せん断試験を用いる。一般的なせん断試験は垂直応力を一定として行う垂直応力一定制御 (CNL: Constant Normal Load) 試験である。しかし、せん断に伴い発生するダイレイタンスにより周辺岩盤の拘束条件に変化が生じ、付着面のせん断抵抗が変わる可能性がある。よって周辺地山の拘束効果を考慮した垂直剛性一定制御 (CNS: Constant Normal Stiffness) 試験を行う必要がある。本試験では周辺地山の拘束効果による影響を考慮するため、ロックボルトと地山との付着面に作用する垂直応力を一定とし周辺地山の变形特性を考慮しない垂直応力一定制御試験(CNL)と周辺地山の拘束効果の影響を考慮する垂直剛性一定制御試験(CNS)に分けてせん断試験を行う。

せん断試験について著者らが岩盤不連続面のせん断試験用に開発した試験機を用いた³⁾。この試験機的主要特徴

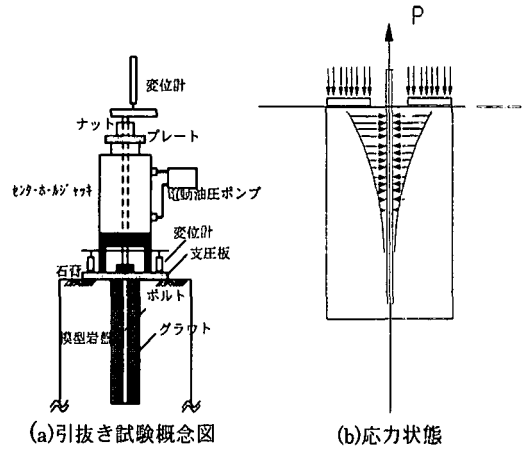
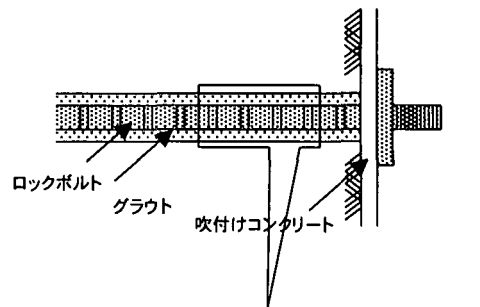
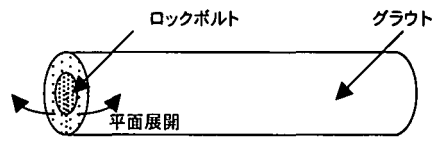


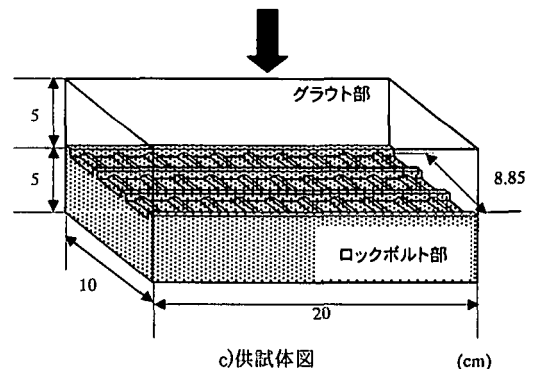
図-1 ロックボルトの引抜き試験における応力分布



a) ロックボルトの打設状況



b) ロックボルトを取巻くグラウトの展開



c) 供試体図 (cm)

図-2 供試体作成概念図

としては制御パソコン上に任意の剛性値を入力するだけで剛性制御が自動にできるようにシステム構成されている点である。両者ともせん断速度を 0.5mm/min に設定し、5mm までせん断を続け、垂直荷重、垂直変位、せん断荷重、せん断変位、付着面に作用する垂直応力とせん断応力などを 5 秒おきに記録した。

(2) 供試体の作成

せん断用供試体としては、ロックボルトとそれを取り囲むグラウトだけを取り出して平面に展開したものを考える(図-2(b))。この供試体の作成方法により、グラウト部から供試体に均等な垂直応力を作用させることができ、周辺地山の拘束効果を表現できるため、現場と同様の応力状態で試験が可能となる。

ボルト部(本研究では KFC 異形棒鋼ロックボルト D25 を対象としている)の表面形状をレーザー変位計で計測し、付着面の形状を忠実に作成した(図-2(c))。試験に用いる供試体寸法は 10cm(幅)×10cm(高さ)×20cm(長さ)である。ロックボルトの周長は 8.63cm であるが、両サイドに余白を設けることにより供試体寸法にフィットさせた。

グラウト部は石膏で代用し、圧縮強度(σ_c)、弾性係数(E)などが実現場で用いられているグラウトの物性値に近い配合設計を行った(石膏：水：遅延材=1：0.23：0.005 の重量比。14 日養生で $\sigma_c=56.8\text{MPa}$ 、 $E_s=20\text{GPa}$)。

供試体の作成手順は、以下のとおりである。

- ① 幅 10cm、奥行き 20cm、高さ 10cm の型枠を用意し、その中にロックボルト平面展開模型を設置する(高さ 5cm)。
- ② 型枠の内側(高さ残りの 5cm)にグリスを塗る。
- ③ 石膏：水：遅延材=1：0.23：0.005 の重量比でこれらを混ぜ合わせる。
- ④ ③を 3 層に分けて型枠に流し込むが、その度ゴムハンマーで叩くことにより振動を与え、気泡を取り除く。
- ⑤ ④の固化後、型枠上部を整形し脱型後に 14 日間気中養生する。

以上の手順により、図-2 のようにロックボルト部とグラウト部の一体化した供試体を作成される。

(3) 試験ケース

本研究では垂直応力と垂直剛性を変化させることで試験ケースを決定する。初期垂直応力(σ_n)の設定については、NATM 工法を用いた山岳トンネルを対象とするため、土被り(H)は 50~100m とし、周辺岩盤は単位体積重量を $\gamma=25\text{kN/m}^3$ の堆積岩と想定した。以上よりトンネル周辺の最大垂直応力は 2.5~5MPa となり、本試験では、 σ_n を 1, 3, 5 MPa と設定する。

垂直剛性一定制御試験に必要な剛性値は次式で求まる。

$$K_n = \frac{E}{(1+\nu)r} \quad (1)$$

ここに、 K_n ：垂直剛性、 E ：弾性係数、 ν ：ポアソン比、 r ：影響範囲である。ここで想定した堆積岩は日本道路公団分類による C、D I 級物性値を用いて⁴⁾、 $\sigma_c=30\sim100\text{MPa}$ 、 $E=(10\sim30)\times10^3\text{MPa}$ 、 $\nu=0.3$ から K_n が 256~769MPa/m と求められるため、 K_n を 0, 300, 500, 700, 1000MPa/m と変化させた。これにより付着面せん断試験ケースは計 15 ケースとなった。

3. 試験結果と考察

(1) ピークせん断応力の比較

せん断に伴うせん断応力の変化の一例として、 $\sigma_n=1\text{MPa}$ の試験結果を図-3 に示す。各ケースにおいて、せん断の進行に伴いピークせん断応力が増加するという傾向は顕著に見られた。一方で、垂直剛性の増加に対するピークせん断応力の増加傾向はあまり顕著に現れず、相関関係は見られなかった。またその大小関係も CNL が最大と

なり、剛性による拘束効果がピークせん断強度に与える影響を示す結果とはならなかった。この原因として、せん断ひずみの影響が考えられる。せん断初期には供試体のせん断ひずみにより収縮の挙動を示す。よって剛性制御を行ったケースではマイナス方向の垂直変位に対応して初期垂直応力から差し引いた垂直応力となり、CNL よりも初期の拘束条件が低くなったことが原因であると考えられる。その他のケースでも垂直剛性とピークせん断強度の明確な相関関係は見られなかった。

(2) 残留段階におけるせん断強度の比較

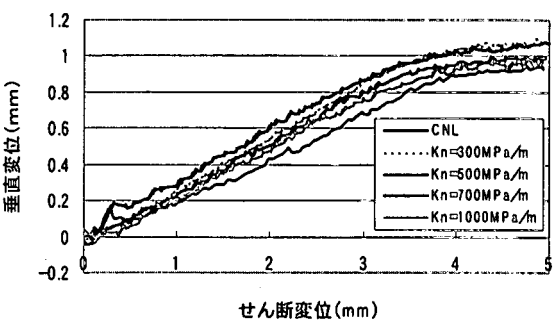
ロックボルトの打設によるトンネルや地下空洞の安定性は、ピークせん断強度よりも残留強度に依存する場合が多く、残留強度を如何に的確に評価するかは合理的な設計を行う場合において重要な課題である。一般的に行われる垂直応力一定せん断試験では、ピークせん断強度発現後の残留強度は延性的もしくはぜい性的に挙動する。一方、周辺地山の拘束効果を考慮した垂直剛性一定せん断試験の場合、せん断変位の増加に伴ってせん断強度も増加の傾向を示す。よって垂直応力一定試験によるせん断強度の評価では実際の強度よりも過少に評価する恐れがあり、垂直剛性一定制御下試験において残留強度を評価すべきであると思われる。

付着面せん断試験ではすべてのケースにおいてせん断変位が約 1mm に達すると、それ以降はほぼ一定の残留強度を示し、ピークせん断強度に比較して約 50~60%の強度に低減した。今回はすべてぜい性的に挙動したが、原因として境界面凹凸(リブ)が約 1.3mm であり、剛性の影響があまり出なかったことが考えられる。

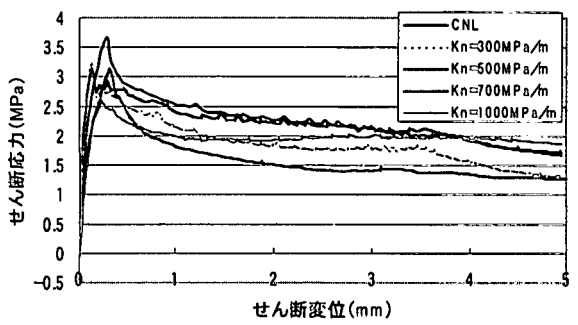
(3) 破壊形態とダイレイタンスの比較

せん断の進行に伴うグラウトの挙動は乗り上げと表面損傷に分類される。そのうち表面損傷を引起す破壊には 2 つの形態が考えられる。1 つは境界面凹凸(リブ)の乗り上げに伴いリブの傾斜部が接触面を削るせん断破壊である。他の 1 つは残りの付着面で発生する引張破壊である。これら破壊形態はせん断方向により決定されるが、発生箇所の概念は図-4 に示す。つまり、せん断変位の増加に伴い、ロックボルトとグラウトの境界面凹凸(リブ)の乗り上げに起因して発生するダイレイタンスと乗り上げに起因した拘束圧の増加により境界面がせん断破壊もしくは引張破壊を起こし、グラウト自体が塑性化したことに起因するダイレイタンスが発生する。

本試験において上記のことを考慮して破壊形態を 3 タイプに分類することにする。タイプ 1 にグラウト部がほぼ完全に乗り上げたケースで、リブ傾斜部の乗り上げ跡を確認することができる。このケースは $\sigma_n=1\text{MPa}$ のケースで確認された。タイプ 2 にグラウト部に乗り上げとせん断破壊が混在するケースで、中央部で乗り上げ、境界部で



a) 垂直変位



b) せん断応力

図-3 せん断変位に伴う付着面のせん断応力及び垂直変位の推移($\sigma_n=1\text{MPa}$)

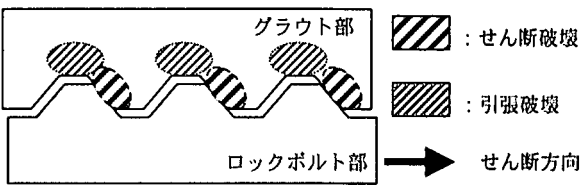


図-4 付着面の破壊形態と破壊箇所の概念図

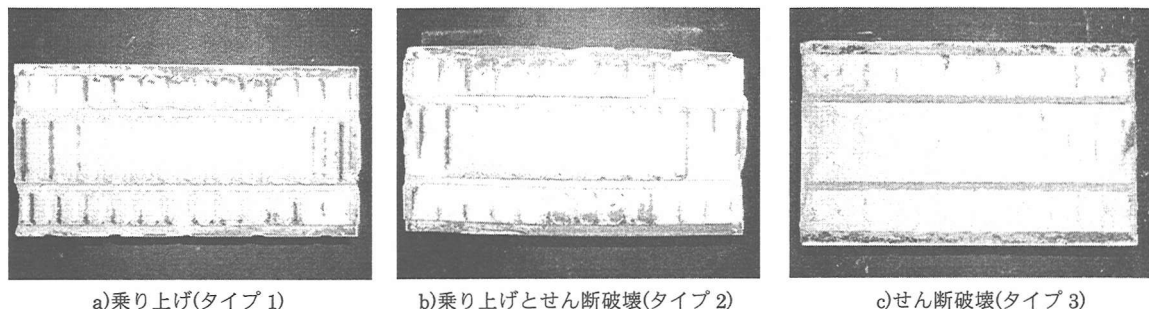


図-5 供試体の破壊形態分類

せん断破壊を確認することができる。このケースは $\sigma_H=3\text{MPa}$ のケースで見られた。タイプ 3 は完全に表面がせん断破壊されるケースで、 $\sigma_H=3\text{MPa}$ 以降のケースで確認された。

$\sigma_n=1\text{MPa}$ ではタイプ①の破壊形態を示すが、約 3mm せん断後、垂直変位約 1mm で一定となっている。これは、ボルト模型の表面形状が示すように、歯の斜面部分の長さが 3.1mm、歯の高さ 1.3mm となっているためであり、垂直変位から見ても乗り上げていることが判断できる。

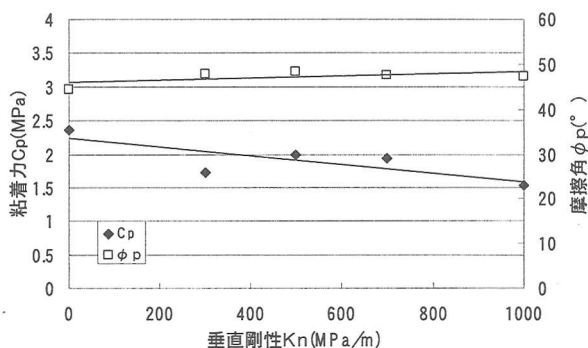


図-6 垂直剛性の変化に伴う粘着力と内部摩擦角の推移

(4) 付着面の見掛け粘着力 C 、摩擦角 ϕ の比較

ピークせん断応力における付着面の粘着力 C_p 、摩擦角 ϕ_p の垂直剛性の変化に伴う影響を図-6 示す。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、次の関係式が求められる。

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

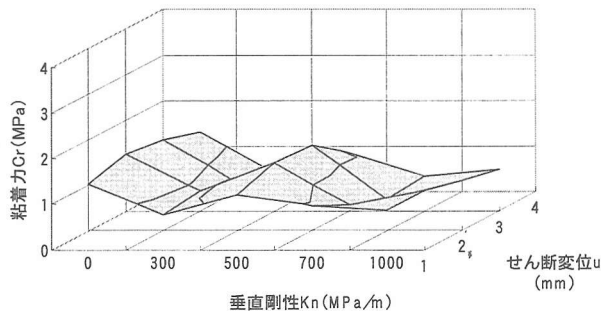
$$\phi_p = 46.0 + 0.0023K_n \quad (3)$$

同様に残留段階(せん断変位 1,2,3,4mm)における粘着力 C_r 、摩擦角 ϕ_r の垂直剛性とせん断変位の変化に伴う影響を図-7 a)および b)に示す。各ケースとも垂直剛性の変化に対しては影響を受けるが、残留変位の増加に対してはほぼ一定の強度を示した。よってそれぞれのケースで残留段階の強度の平均をとり回帰式を導いた(図-8)。その結果、次の関係式が得られた。

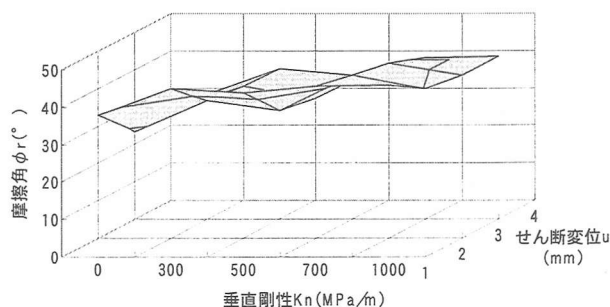
$$C_{r,ave.} = 1.3 - 0.007K_n \quad (4)$$

$$\phi_{r,ave.} = 32.7 + 0.0098K_n \quad (5)$$

ピークせん断強度の回帰式と比較すると強度に差はあるものの、全体としては同様の傾向を示している。



a)粘着力と垂直剛性との関係



b)摩擦角と垂直剛性との関係

図-7 残留段階における粘着力と摩擦角の変化

(5) せん断剛性 K_s の比較

せん断剛性 K_s はせん断方向に変位を起こしにくさを評価する指標であり、一般的にはせん断方向変位の増分に対するせん断応力の増分の比となるが、今回 K_s はピーク時まで線形として取り扱い算定した。

せん断剛性と垂直剛性の関係を図-9a)に、垂直応力との関係を図-9b)に示す。垂直剛性の増加に対してせん断剛性は減少の傾向を示した。全ケースでほぼ同じせん断変位時にピークせん断強度を発現しており、垂直剛性の増加に対してせん断剛性が減少していることは、先に述べたピークせん断強度が垂直剛性にあまり依存しなかったことを示す結果である。

また垂直応力の増加に対しては増加の傾向を示した。これは初期垂直応力の増加に対してピークせん断強度が顕著に増加したことを示す結果である。

4. まとめ

本研究では、一面せん断試験によるロックボルトとグラウトとの付着強度および変形剛性を求める新しい試験法を示した。提案した試験法では垂直応力のみならず、地山の変形特性を考慮した垂直剛性の制御も可能となった。また数値解析に必要な入力値として付着面のせん断試験を実施することにより、付着面のピーク及び残留段階におけるせん断強度と垂直剛性との関係、垂直剛性とせん断剛性との関係を明らかにすることができた。今後はロックボルトの表面形状を変化させ付着強度を効果的に発揮できる表面形状を検討し、提案した試験法によってロックボルトの付着特性を考慮した支保効果の定量的評価を行っていく。

参考文献

- 1) 棚橋由彦, 蔣宇静, 佐久間敦之, 原廣敬: 第 57 回土木学会年次学術講演概要集, 第三部門, CD-ROM, 2002.
- 2) 山本稔: ロックボルトの地山支持機構を考える, トンネルと地下, pp.6-19, 1989.
- 3) Jiang, Y., Tanabashi, Y. and Mizokami, T.: Shear Behaviour of Rock Joints under Constant Normal Stiffness Condition, Proc. of the 2001 ISRM International Symposium-2nd Asian Rock Mechanics Symposium, pp.247-250, 2001.
- 4) 土木学会: トンネル標準示方書[山岳工法編]・同解説, 1996.

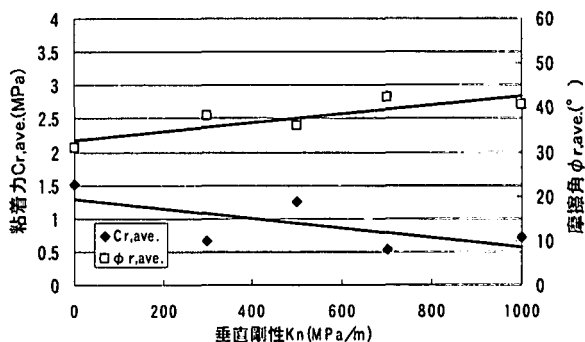
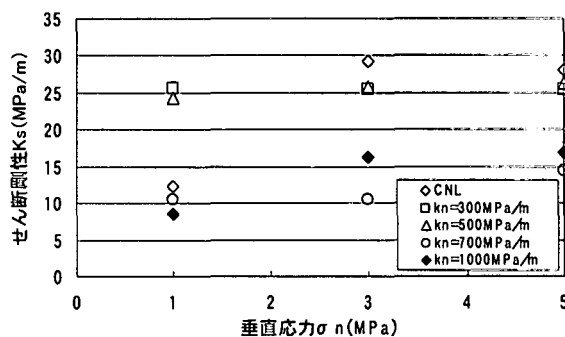
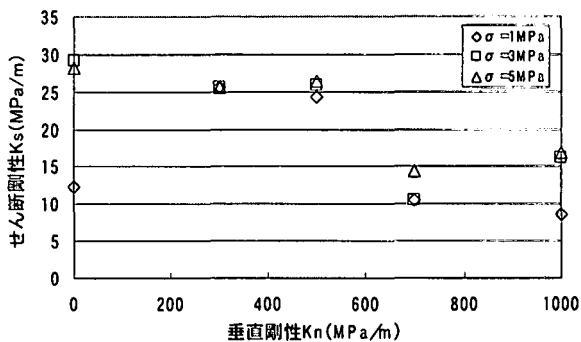


図-8 残留段階における粘着力と
内部摩擦角の変化



a) 垂直応力による推移



b) 垂直剛性による推移

図-9 せん断剛性と垂直応力、垂直剛性との関係