

引抜試験におけるボルトの付着破壊

尾原祐三¹・前野保一²・川野龍一²・伊藤文雄³・中原史晴⁴

¹正会員 工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

²熊本大学大学院学生 自然科学研究科博士前期課程 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

³正会員 PhD 大成建設(株) 土木本部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1)

⁴正会員 大成建設(株) 土木本部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1)

ロックボルトおよびケーブルボルトの支保効果を検討する際、岩盤、グラウト材、ボルトの付着特性を評価する必要がある。ボルトの付着特性は、岩盤、グラウト材の強度およびボルトの表面形状に大きく影響されることが知られている。そこで、本論文ではボルトの付着破壊メカニズムを明らかにするため、室内引抜試験の供試体をX線CTスキャナにより画像撮影を行い、内部で発生した破壊面を2次元および3次元的に可視化し、それらを基にボルトの付着破壊メカニズムを検討した。

Key Words: rock bolt, cable bolt, pull-out test, bond failure, visualization, X-ray CT

1. はじめに

NATM (New Austrian Tunneling Method)が提案されて以来、ロックボルトは地下空間の主要な支保部材の1つとして実用に供されている。ロックボルトの支保効果は、縫付け効果(吊下げ効果)、はり形成効果、内圧効果、アーチ形成効果、地山改良効果などと説明されているが¹⁾、これらの説明は概念的であり、定量的に十分解明されているとはいいがたい。これまでに、ロックボルトの支保効果を明らかにするために、原位置ではボルトの軸力や岩盤変位などの種々の計測が行われるとともに、室内においては引抜試験やせん断試験などが行われてきた。とくに、ボルトと岩盤の力学的挙動とそれらの相互作用の解明を目的に室内試験が行われ、試験結果を基に種々の構成式が提案されている。例えば、ロックボルトが有する作用の解析解を誘導するとともに、鋼棒、グラウトおよびそれらの境界の挙動を考慮した有限要素法の定式化がなされている²⁾。また、軸対象問題として弾塑性理論解を用いて設計もなされている³⁾。さらに、有限差分法により解析される岩盤の特性曲線および支保メンバーの特性曲線を用いて設計がなされ⁴⁾、ボルトの根入れ長さやボルトの打設密度の影響も論じられている⁵⁾。また、動的载荷におけるロックボルトの挙動も論じられている⁶⁾。

ロックボルトの他に、最近ではケーブルボルトも地下空間の新しい支保部材として用いられるようになってきている。ケーブルボルトはもともと鉱山で使用されてきたものである^{7),8)}が、最近では土木構造物にも

導入されている。日本においても同様で、最初は鉱山で用いられ、最近では第二東名高速道路の大断面トンネル(約200m²)の建設において、ロックボルトとケーブルボルトを併用した合理的な支保システムを確立するために種々検討が行われてきている⁹⁾。ケーブルボルトの支保機構についても様々な研究が実施され、引抜試験を行いグラウト内に発生する放射状の破壊、ボルトとグラウトの境界での破壊などが分析され、構成式も種々提案されている¹⁰⁾⁻¹²⁾。その1つに、ボルトとグラウトとの境界面での破壊、グラウトの破壊およびそれらの相互作用を考慮して、ケーブルボルトの付着破壊に対する構成則を提案している研究¹³⁾があり、グラウト内部における破壊が scanning electron microscope (SEM)によって観測されている。しかし、観察のためには供試体を切断しなければならず、切断による破壊を発生させないためには非破壊的な検査を行なうことが望ましい。また、SEMの可視範囲は狭いため、ボルト全体の付着破壊のメカニズムを検討しようとするより広範囲の可視化が不可欠であると考えられる。

そこで、本論文では、ロックボルトとケーブルボルトの付着破壊の様子をX線CT法を用いて可視化し、その画像を基に付着破壊のメカニズムを検討した。具体的には、ロックボルトとケーブルボルトを用いた室内引抜試験を実施する。つぎに、X線CTスキャナを用いて引抜試験後の供試体の撮影を行い、内部で発生している破壊面を2次元¹⁴⁾および3次元的に可視化した。さらに、それらの画像を基にボルトの付着破壊のメカニズムを検討した。

2. 引抜試験

室内引抜試験は人工岩盤に4タイプのボルトをセメントペーストのグラウトで打設した試料を用いて行われた。人工岩盤はコンクリートで作成し、寸法は50cm×50cm、高さ100cmである。14日間の人工岩盤の養生後、ボルト打設のために直径65mmのボーリングを深さ40cmまで作孔した。まず、ボーリング孔内に水セメント比が0.35のボルトランドセメントペーストを注入し、その後4つのタイプのボルトを根入れ深さ35cmで打設した。ボルト打設後17日で引抜試験を実施した。なお、人工岩盤とグラウトの力学的特性を表-1に示す。

試験に用いたボルトは、図-1に示すように、4タイプであり、それらをケース1～4と名づけた。また、ボルトの力学的特性を表-2に示す。ロックボルトの2タイプ、すなわち、ケース1では直径25mmの異型

表-1 人工岩盤とセメントグラウト材の力学的特性

	γ [kN/m ³]	UCS [MPa]	UTS [MPa]	E [GPa]	ν
人工岩盤	23.6	82.3	4.83	35.1	0.22
グラウト	20.2	89.7	3.59	21.2	0.25

γ :単位体積重量, UCS:一軸圧縮強度

UTS:一軸引張強度, E :ヤング率, ν :ポアソン比

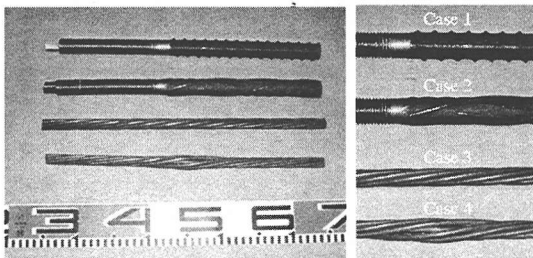


図-1 試験に用いたボルト

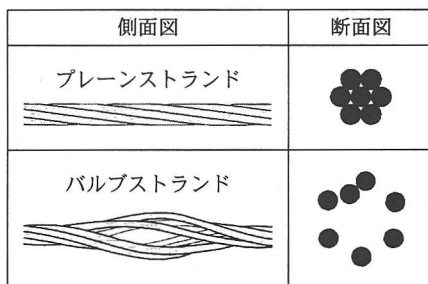


図-2 ボルトの側面図と断面図

棒鋼を、ケース2では直径24mmのねじり棒鋼をそれぞれ使用した。7本の直径5mmのストランドを結ったケーブルボルトの2タイプ、すなわち、ケース3ではプレーンストランドケーブルボルトを、ケース4ではバルブストランドケーブルボルト(ガーフォードバルブケーブルボルトとも呼ばれる)をそれぞれ使用した。これらの概観と断面の模式図を図-2に示す。直径はともに15.2mmであるが、バルブストランドケーブルボルトでは打設の際にケーブルの中心部分にグラウトは入るようになわみを持たし、この部分の直径は約19mmと大きくなっている。これらのケーブルボルトはカナダやオーストラリアなどの鉱山で使用されているものと同型である。

引抜試験装置を示すと図-3のようである。ボルトはベアリングプレート上に置かれたセンターホールジャッキによって引き抜かれる。また、引抜試験中にボルトが回転しないように先端に固定治具をセットした。試験中の引張荷重は油圧ポンプに連結した電動油圧ポンプに取り付けられている圧力計によって測定される。また、ボルトの変位は図の左右に設置された2つの変位計によって測定され、2つの測定値の平均値を変位とした。なお、試験における引張荷重速度は0.05kN/minであり、荷重と変位のデータは0.5kNごとにパソコンに記録される。

表-2 ボルトの力学的特性

	断面積 [mm ²]	破壊荷重 [kN]	降伏荷重 [kN]
ケース1	506.7	248	174
ケース2	445.9	308	227
ケース3	138.7	261	222
ケース4	138.7	261	222

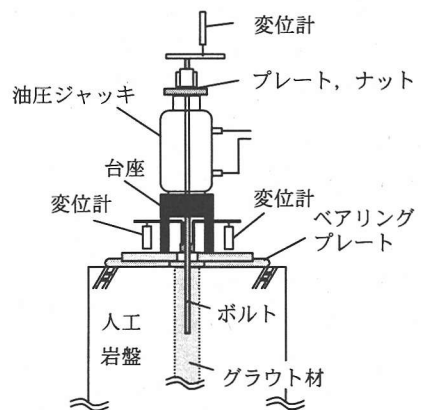


図-3 引抜試験装置概略図

3. 引抜試験結果

荷重・変位曲線を示すと図-4 のようである。横軸に変位、縦軸に引抜荷重を示している。荷重・変位曲線はボルトのタイプによって大きく異なっている。すなわち、荷重・変位曲線が弾性挙動からそれ始めた点を降伏点とすると、ケース1とケース2における降伏荷重はそれぞれ170kNと215kNであり、それらの値はケーブルボルトを使用したケース3とケース4の降伏荷重よりも大きい。また、それらの初期剛性はケース3とケース4のそれよりも大きく、降伏点における変位は小さい。

ケース1とケース2においては、変位が2mm程度で最大荷重を示し、ナット部分のネジが降伏した。このように、わずかな変位で大きな引張荷重を発揮するロックボルトは硬岩に対して有効であると考えられる。

つぎに、ケース3では、荷重49kNで降伏した後、変位が増加しても荷重の増大はほとんど見られず、2本の直線で近似が可能である。一方、ケース4の降伏荷重は89kNであり、降伏点を過ぎると変位の増加とともにほぼ双曲線的に荷重が増大している。この傾向はロックボルトのそれと良く似ている。荷重・変位曲線はボーリング孔壁面に作用する垂直応力、すなわち周圧に関係しており、ケース4の曲線はHyettらの研究¹²⁾での引抜試験における高い周圧に対するものと酷似している。したがって、ケース4におけるバルブストランドケーブルボルトは大きな周圧を発生させる効果を有していると考えられる。一方、プレーンストランドケーブルボルトも周圧を発生させる効果を有していると考えられるが、プレーンストランドケーブルボルトにおける周圧効果はバルブストランドケーブルボルトにおけるそれよりも小さいために、降伏点を過ぎて小さな荷重増分で引き抜かれると考えられる。

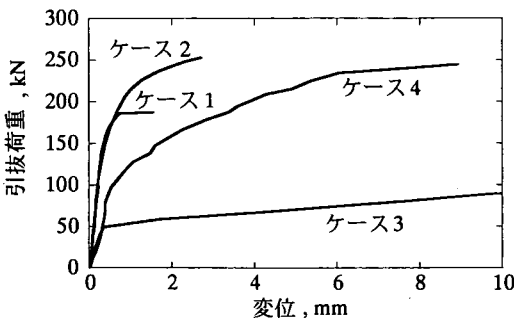


図-4 荷重変位曲線

以上のように、ロックボルトやケーブルボルトのように異なったタイプを用いると引抜試験時の荷重・変位曲線が異なる。これは付着破壊のメカニズムが異なるためと考えられる。また、一般に、ケーブルボルトのような縫り線に引張荷重が作用すると直径が小さくなり、周圧の効果は小さくなると考えられるが、実際には周圧が発生していると考えられる。この原因も付着破壊にあると考えられる。したがって、付着破壊の様子やそのメカニズムを明らかにする必要があり、内部の可視化が不可欠である。

4. 破壊の可視化

(1) X線CTスキャナ

X線CT(X-ray Computed Tomography)は医療検査技術の1つとして広く日常的に用いられており、様々な方向から得られた被検体を通過するX線の投影データを用いて逆解析により被検体内部の構造を再構成する方法である。

X線強度が初期値 i_0 で均質等方の長さ P の被検体を通過する場合の様子を模式的に示すと図-5のようである。X線は被検体を通過すると、被検体のX線吸収係数に比例して減衰した後、強度は i に変化する。この関係を示すと次式のような¹⁵⁾。

$$i = i_0 \exp(-f_m P) \quad (1)$$

ここに、 f_m は被検体のX線吸収係数であり、単位長さ当たりの量として定義されており、主に被検体の密度に比例することが知られている。式(1)の両辺を i_0 で除して対数を取ると投影関数 p が次式で定義される。

$$p = -\ln(i_0/i) = f_m P = \int f_m dr \quad (2)$$

ここに、 r は光路の直線座標である。投影は互いに独立な多数の方向の投影が断層撮影法により計測され、

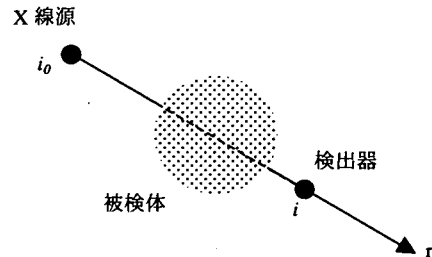


図-5 X線CTの原理

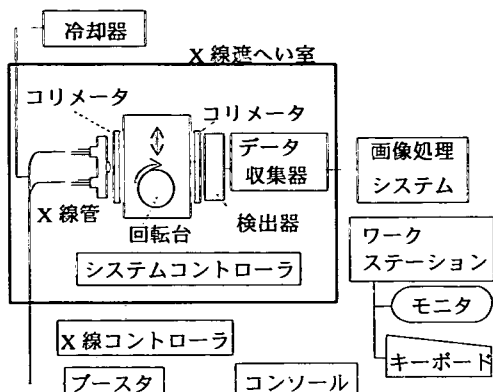


図-6 システム構成

表-3 X線CTスキャナの仕様

スキャン方式	トラバース・ローテーション
X線管電圧	300kV or 200kV (2mmA)
X線ビーム形式	扇形(広がり 30度)
検出器	176チャンネル
最大試料寸法	直径 40cm or 15cm, 高さ 60cm
最大試料重量	981N
X線ビーム厚さ	0.5mm, 1mm, 2mm
表示画素数	512×512
ピクセル寸法	0.293mm or 0.781mm
自動スキャン	最大 100 画像

断層内の X 線吸収係数の分布はフィルタ補正逆投影法により再構成される。また、X 線吸収係数の 3 次元分布は多くの平行な断層を撮影し、それらを順次つなぎ合わせて得ることができる。

本研究で使用した X 線 CT スキャナーシステム¹⁶⁾⁻¹⁹⁾ (東芝製:TOSCANER-23200mini)の構成を図-6 に、その仕様を表-3 に示す。X 線管と 176 個の検出器 (Detector) は同一水平面上に固定され、上下方向に可動である。被検体は試料台(Turntable)に置かれ、試料台の回転と平行移動によって一方向からの X 線を被検体の全周方向から照射できるようになっている。断層の厚さは視準儀 (Collimator) により、0.5mm, 1.0mm, 2.0mm の 3 通りを選択できる。撮影領域は 15cm×15cm と 40cm×40cm の選択が可能であり、フィルタ補正逆投影法により再構成された画像はワークステーションのモニターに表示される。このとき、表示画素数はどちらも 512×512 であるため、画素 (Pixel) の 1 辺の長さはそれぞれの撮影領域で 0.293mm, 0.781mm となる。

フィルタ補正逆投影法により再構成される X 線吸収係数は断層の厚さ当たりの平均値に相当し、その表示は一般に次式で示す CT 値と呼ばれる数値に変換される。

$$CT \text{ 値} = \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w} K \quad (3)$$

ここに、 μ_t は求める点の X 線吸収係数、 μ_w は水の X 線吸収係数、 K は比例定数である。 $K=1000$ とすると、空気の X 線吸収係数は 0 であるので空気の CT 値は -1000、水のそれは 0 となる。2 次元 CT 画像では、CT 値を白黒の 256 階調濃淡レベルに置き換えられて表示され、CT 値が低い領域はグレイもしくは黒く、高い領域は明るいグレイまたは白く表示される。なお、本研究では断層の厚さを 2.0mm としている。

(2) 2 次元画像

引抜試験後、X 線 CT 撮影を行なうために人工岩盤からコアリングを行い、図-7 に示すような供試体を採取した。供試体の直径は 100mm であり、断層撮影は供試体の上面から 10mm 下がった位置から 110mm まで 1mm ごとに撮影した。したがって、各供試体の断層画像の総数は 100 枚である。

各供試体の 2 次元断層画像を 256 色階調レベルで例示すると図-8 のようである。図は供試体上面から 60mm の深さの断層画像であり、上部から見た図である。また、図中の暗い部分は低密度領域を示し、明るい部分は高密度領域を示している。したがって、円形に表示されている供試体外側の黒い領域は空気であり、内側に向かって、人工岩盤、グラウトであり、中心部分の最も明るい領域がボルトである。

異型棒鋼を使用したケース 1 の断層画像を示すと図-9(a)のようである。大きな破壊面は反時計回りに回転して発生しており、その破壊面は人工岩盤とグラウトとの境界面に達し、それに沿って進展している。

図-9(b)はねじり棒鋼を使用したケース 2 の断層画像である。破壊面は反時計回りに発生していることが確認できる。破壊面の回転の程度はケース 1 に比較して大きく、ねじり棒鋼の表面に存在するらせん状のラグおよびリブの影響を受けていると考えられる。また、ボルトとグラウトの境界面で発生した破壊面は人工岩盤とグラウトの境界面まで進展し、それらの境界面に沿って進展していることが確認できる。

つぎに、プレーンストランドケーブルボルトを使用したケース 3 の断層画像を示すと図-9(c)のようである。グラウト内には 4 ないし 5 個の開口量の小さな放射状の破壊面が確認でき、その破壊の進展は人工岩盤とグラウトの境界で停止している。

最後に、バルブストランドケーブルボルトを使用し

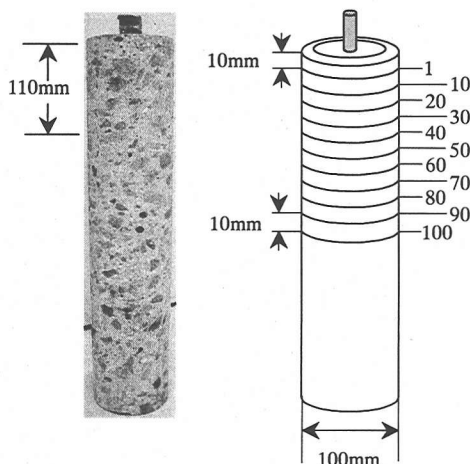


図-7 供試体と断層撮影位置

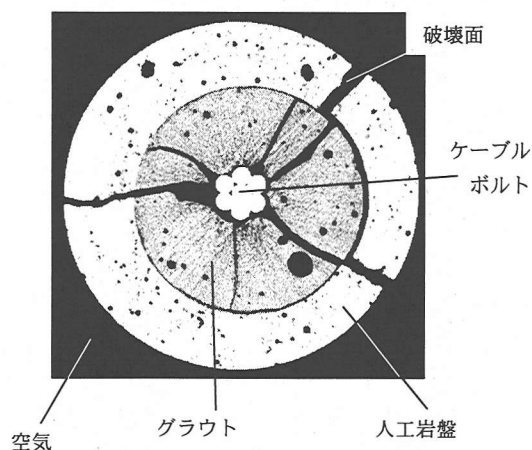


図-8 2次元断層画像例

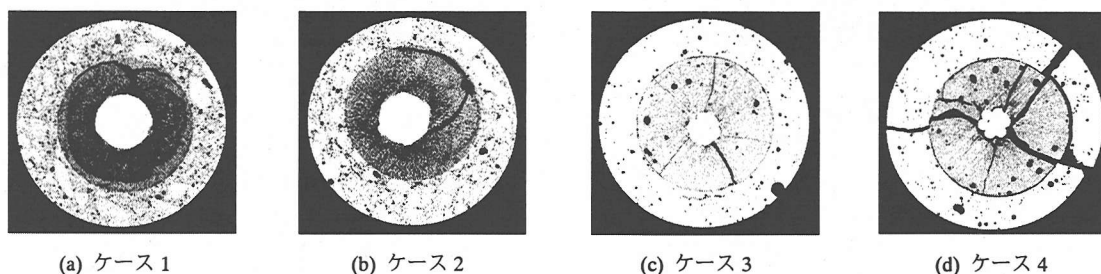


図-9 各ケースにおける X 線 CT 断層画像

たケース 4 の断層画像を図-9(d)に示す。バルブは人工岩盤の上面から深さ 150mm に位置している。したがって、図はバルブより上側の断面図である。ケース 3 と同様、破壊面はボルトに対して放射状に進展しており、3つの大きい破壊面が認められるが、これらの破壊面はグラウトだけでなく人工岩盤を貫いている。

ここで示したように、2次元画像だけでは破壊面の広がり様子を把握することは困難であるため、3次元的に可視化することが必要となる。

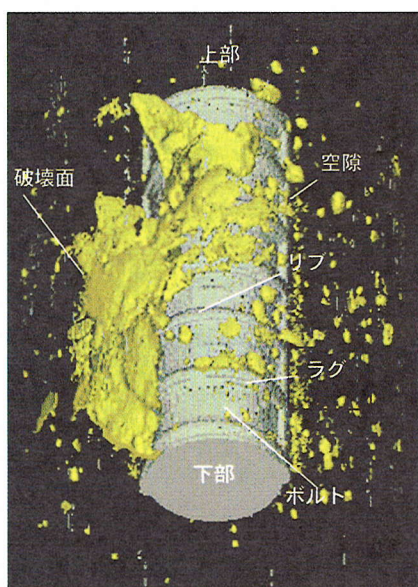
(3) 3次元画像

各供試体における 100 枚の 2次元画像を基に、3次元画像を構成して供試体内部を可視化すると図-10、図-11 および図-12 のようである。図は4つの異なる視点から見たものであり、中心部分にある棒状の物体がボルトであり、面状のものが破壊面である。また、多数点状のものはグラウト内の空隙である。なお、ケース 4 においてはコアリングの際、図-13 に示すように放射状破壊が供試体外部に達したため示していない。

まず、ケース 1 の破壊の様子を図-10 に示す。引

抜荷重は上部の方向に作用している。図-10(a)および図-10(b)によると、上部から見ると反時計回りにボルトを取り巻くようにらせん状の破壊面が生じ、図-10(d)からはその破壊面はボルト軸方向に広がっていることが確認できる。また、図-10(c)に注目すると、下部における破壊面はボルトのリブ部分から発生し、それらをまたぐように連結してグラウトと人工岩盤の境界まで達し、さらにその境界に沿って進展していることが確認できる。

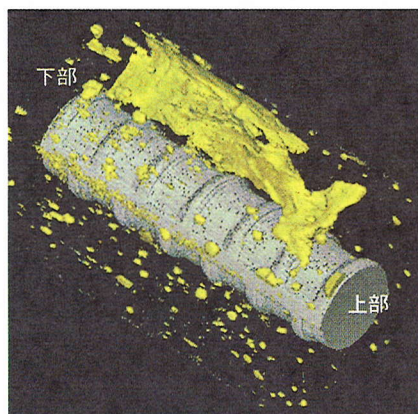
つぎに、ねじり棒鋼を使用したケース 2 の 3次元画像を図-11 に示す。図-11(b)によると、破壊面は上部から見ると反時計回りに進展しているのが確認できる。さらに、ケース 1 と同様にボルトとグラウトの境界から発生した破壊面はらせんを描いてグラウトと人工岩盤の境界まで達し、さらにその境界に沿って進展している。ボルトとグラウトの境界の破壊面を拡大すると図-11(d)のようである。破壊面はラグ部分から発生し、二つのリブをまたぐように連結していることがわかる。また、グラウト内に発生した破壊面のねじりの程度はケース 1 に比較して大きい。これらはらせん状に入ったリブおよびラグのため、ボルトのねじ



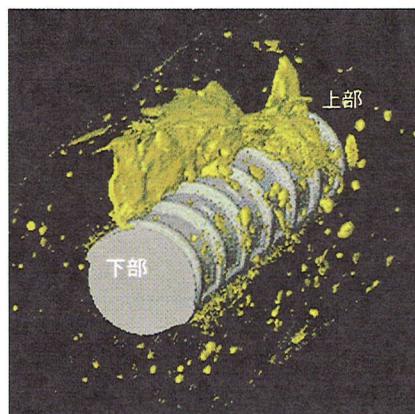
(a)



(b)

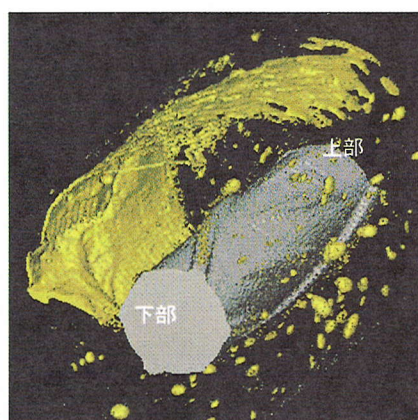


(c)

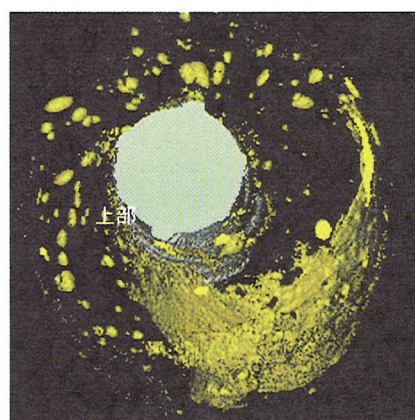


(d)

図-10 ケース 1

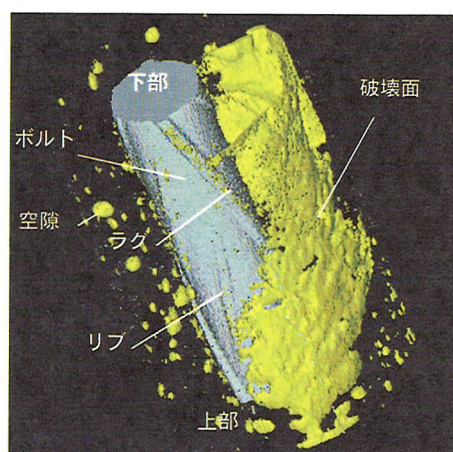


(a)

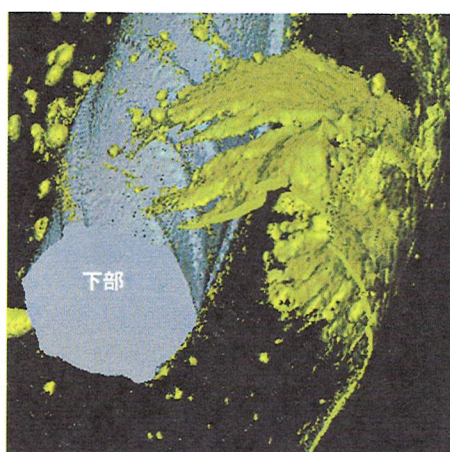


(b)

図-11 ケース 2 (その 1)

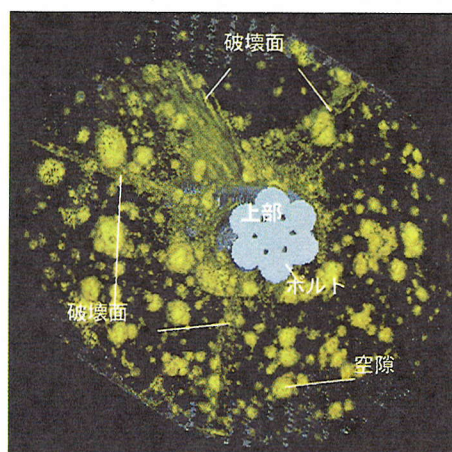


(c)

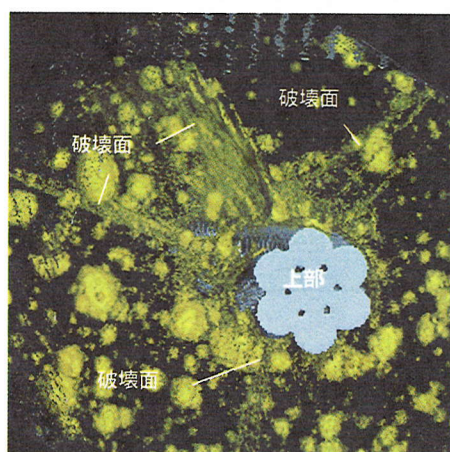


(d)

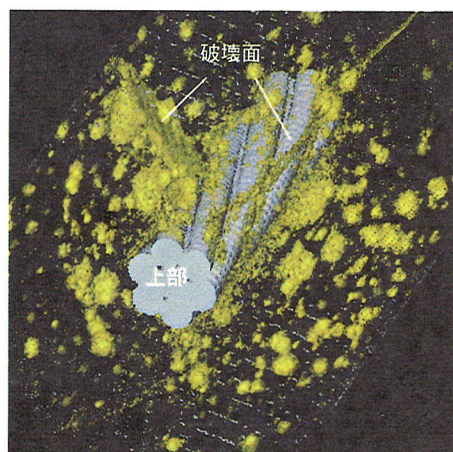
図-11 ケース 2 (その 2)



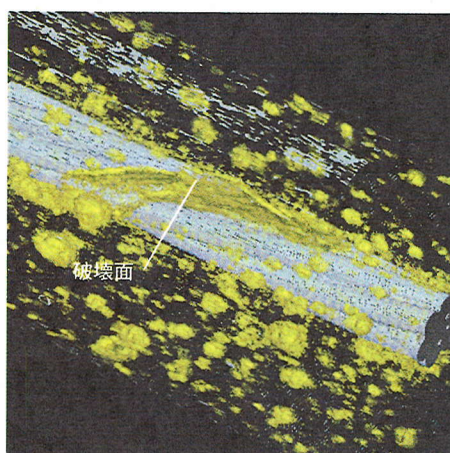
(a)



(b)



(c)



(d)

図-12 ケース 3

りによって発生するグラウト内のせん断応力がケース1に比較して大きいと考えられる。このように、ロックボルト表面に存在するリブやラグの形状によって破壊メカニズムが異なることがわかる。

最後に、ケース3の結果を図-12に示す。他のケースに比較して破壊面が明瞭ではないが、ボルトから放射状に雲のように広がっているのが破壊面である。図-12(b)は図-12(a)を拡大したもので、破壊面はボルトとグラウトの境界面で発生しボルトに対して放射状に進展していることが確認できる。また、破壊面の発生・進展はグラウト内に数多く存在する空隙に影響されていない。図-12(c)によると、放射状の破壊面は上部から下部まで軸方向全域で発生していることが確認できる。さらに、最も大きな破壊面に注目した図-12(d)においては、破壊面はストランド間の溝で発生し、その溝に沿ってわずかにねじれながら進展していることがわかる。

5. 付着破壊メカニズムに関する考察

前章に示したように、引抜試験における付着破壊は、使用しているボルトの種類やボルトの表面に存在するリブやラグの形状に依存しているということは明らかである。

ケース1における異型棒鋼表面のリブはボルト軸に垂直な平面内に配置されているが、それらはラグを挟んで互い違いに配列されている。このために破壊面はねじれて発生していると考えられる。また、ケース2におけるねじり鋼棒表面のラグはらせん状であり、グラウト内部における破壊面もねじれて発生している。これらの破壊状態はボルトとグラウトの摩擦によるせん断破壊だけで説明することは困難で、これまで考えられてきた以上にねじりによるせん断破壊が支配的であると考えられる。

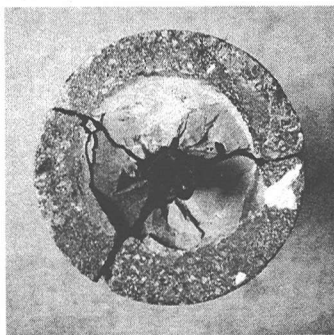


図-13 ケース4における破壊状況

一方、引抜試験におけるケーブルボルトの破壊モードは2つに区分される¹²⁾。一つはボルトの引抜きによって生じるボルトとグラウトの境界でのせん断破壊であり、他の1つは周方向の引張応力による放射状破壊である。ボルトが引き抜かれると、ボルトとグラウトの境界において、ラグのくさび効果によってせん断破壊が発生すると共に、ダイレタンスーによって内圧が発生し、これによってグラウト内に円周方向の引張応力が発生して放射状の破壊が生じると考えられている。

そこで、ケース3およびケース4の供試体に発生した破壊面に注目すると、これらは放射状に発生している。この結果は上述の破壊の様子と同様であり、内圧の効果により発生した破壊と考えられる。そこで、円孔に内圧が作用したときの破壊の様子と比較する。円筒岩石を用いた孔内破壊試験における破壊の様子を示すと図-14のようである²⁰⁾。供試体は外側の直径が130mm、内側のそれが31mmの安山岩の円筒形であり、孔内に静的破碎剤を注入して内圧を作用させて破壊させたものである。破壊面は孔内の壁面から放射状に発生し、供試体を3分割している。この破壊モードはケーブルボルトにおけるそれに酷似している。したがって、ケーブルボルトにおける破壊はボルトとグラウトの境界において発生する内圧によって生じたと考えられる。

ケース3における放射状の破壊面はケーブルボルトのらせん状の溝に沿って回転していた。これはケーブルボルトのねじれの影響がわずかながら存在するという示唆している。これらの結果を総合すると、ケーブルボルトにおける付着は、ねじりよりもむしろ内圧による効果が支配的であると結論できる。

ケース4の破壊はコアリングの際に発生しており、この事実は引抜試験で除荷してもグラウトおよび人工岩盤内に残留応力が存在していたことを示唆して

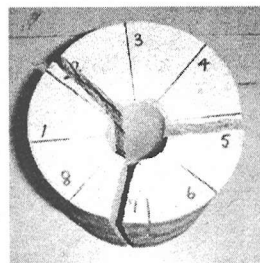
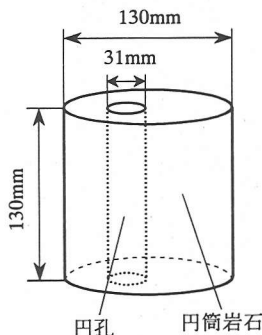


図-14 孔内載荷試験

いる。すなわち、釣り合いを保っていたコア周辺の残留応力はコアリングによって解放され、この結果、コア内部の残留応力によって破壊面が発生し、人工岩盤まで進展したと考えられる。これは、ストランドケーブルボルトに備え付けられたバルブが原因であり、これによって内圧が増大したと考えられる。

以上要するに、ロックボルトは内圧よりむしろボルトに入ったリップやラグの影響によってねじりが起こり、このために大きなせん断応力がグラウト内に発生する。一方、ケーブルボルトではわずかにねじりは発生するものの、主に大きな内圧がグラウト内に発生すると考えられる。さらに、バルブは内圧の発生を増大させるために有効であると考えられる。

なお、本研究ではボルトを十分に引き抜いた後に破壊の可視化を行ったが、荷重・変位曲線と対応しながら破壊の可視化を行い、破壊発生の時期やそのときの様子を検討する必要があると考えられる。これらの検討は今後の課題と考えられる。

6. おわりに

本論文は、ロックボルトとケーブルボルトの室内引抜試験を行い、引抜試験後に人工岩盤からコアリングした供試体に対して X 線 CT を適用し、内分で発生した破壊の様子を可視化すると共に、付着破壊メカニズムを分析したものである。

本研究で得られた成果を要約すると以下のである。

- 1) 引抜試験により得られた荷重・変位曲線はボルトのタイプによって異なることを示した。また、わずかな変位で大きな引張荷重を発揮するロックボルトは硬岩に対して有効であると論じた。
- 2) X 線 CT を用いてグラウト内に発生した破壊の様子を 2 次元および 3 次元的に可視化した。この結果、異形棒鋼とねじり棒鋼をそれぞれ用いたケース 1 と 2 における破壊面はらせん状に発生し、一方、プレーンストランドとバルブストランドをそれぞれ用いたケース 3 と 4 における破壊面は放射状であることを明らかにした。
- 3) 上記の結果を分析し、異形棒鋼とねじり棒鋼をそれぞれ用いたケース 1 と 2 における破壊状態はねじりによるせん断破壊が支配的であり、これまで考えられてきたようにボルトとグラウトの摩擦によるせん断破壊だけで説明することは困難であると論じた。また、プレーンストランドとバル

ブストランドをそれぞれ用いたケース 3 と 4 における破壊状態は、ねじりよりもむしろ内圧による効果が支配的であると論じた。

- 4) 付着破壊のメカニズムを明らかにするため X 線 CT スキャナを適用し、その有効性を明らかにした。また、本論文ではボルトを十分に引き抜いた後に破壊の可視化を行なったが、荷重・変位曲線と対応しながら破壊の可視化を行うこと、破壊発生の時期やそのときの様子を可視化することなどによって、ボルトの付着破壊のメカニズムを総合的に評価することが今後の課題であると論じた。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書（山岳工法編）・同解説，pp.79-85，1999。
- 2) Aydan, O.: The stabilisation of rock engineering structure by rock bolts, 名古屋大学学位申請論文，1989。
- 3) Indraratna, B. and Kaiser, P.K.: Design for grouted rock bolts based on the convergence control method, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.27, No.4, pp.269-281, 1990。
- 4) Brady and Lorig, B.L.: Analysis of rock reinforcement using finite difference methods, Computer and Geotechnics, Vol.5, pp.123-149, 1988。
- 5) Oreste, P.P. and Peila, D.: Radial passive rock bolting in tunneling design with a new convergence-confinement model, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.33, No.5, pp.443-454, 1996。
- 6) Tannant, D.D., Brummer, R.K. and Yi, X.: Rockbolt behavior under dynamic loading: field tests and modeling, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.32, No.6, pp.537-550, 1995。
- 7) Goris, J.M., Duan, F. and Pfarr, J.: Evaluation of cable bolt supports at the Homestake Mine, CIM Bulletin, Vol.84, No.947, pp.146-150, 1991。
- 8) Goris, J.M., Martin, L.A. and Brady, T.M.: Field evaluation of cable bolt supports, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.30, No.7, pp.1431-1434, 1993。
- 9) Tanaka, H. and Aoyama, S.: Trial construction of a tunnel having a large cross sectional area in the Second Tomei Highway, -The third Shimizu tunnel-, J. Tunnels and underground, Vol.31, No.9, pp.15-23, 25-35, 2000 (in Japanese)。
- 10) Yazici, S. and Kaiser, P.P.: Bond strength of grouted cable bolt, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.29, No.3, pp.279-292, 1992。

- 11) Kaiser, P.P., Yazici, S. and Nose, J.: Effect of stress change on the bond strength of fully grouted cables, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.29, No.3, pp.293-306, 1992.
- 12) Hyett, A.J., Bawden, W.F. and Reichert, R.D.: The effect of rock mass confinement on the bond strength of fully grouted cable bolts, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.29, No.5, pp.503-524, 1992.
- 13) Hyett, A.J., Bawden, W.F., Macsporrn, G.R. and Moosavi, M.: Constitutive law for bond failure of fully-grouted cable bolts using a modified Hoek cell, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.32, No.1, pp.11-36, 1995.
- 14) Ito, F., Nakahara, F., Kawano, R., Kang, S.S. and Obara, Y.: Visualization of failure in a pull-out test of cable bolts using X-ray Ct, *Construction and Building Materials*, to be appeared.
- 15) Hagiwara, T. and Nanba, T.: Generation of Proximity function for Naturally Fractured Reservoir Simulator Using X-ray CT Scanner System, presented at the Eleventh Workshop for the IEA, Collaborative Project on EOR, Paris, 1990.
- 16) 菅原勝彦, 小島隆輔, 尾原祐三, 佐藤晃, 島田秀樹: X線CTによる亀裂開口解析, *資源と素材*, Vol.114, No.12, pp.881-887, 1998.
- 17) Sugawara, K., Obara, Y. and Sato, A.: Visualization of Water Saturation Process in Rock by X-rays CT, *Proc. of '99 Japan-Korea Joint Symposium on Rock Engineering, Japan(Fukuoka)*, pp.503-508, 1999.
- 18) Ohtani, J., Mukunoki, T. and Obara, Y.: Application of X-ray CT method for characterization of failure in soils, *Soils and Foundations*, Vol.10, No.2, pp.111-118, 2000.
- 19) 大谷順, 尾原祐三, 菅原勝彦, 棕木俊文: 地盤工学における産業用X線CTスキャナーの適用, *地盤工学会誌*, 第48巻, 第2号, pp.17-20, 2000.
- 20) 福田耕二, 森清隆, 平田篤夫, 尾原祐三: 静的破砕剤を用いた円筒岩石の破壊実験, *応用力学論文集*, Vol.4, pp.251-258, 2001.

(2001.5.11 受付)

BOND FAILURE OF ROCK BOLTS AND CABLE BOLTS IN A PULL-OUT TEST

Yuzo OBARA, Yasukazu MAENO, Ryuichi KAWANO, Fumio ITO
and Fumiharu NAKAHARA

The patterns of failure in a pull-out test are visualized by X-ray CT scanner to supply the basic data on the bond failure of rock bolt and cable bolt. In the pull-out test, a comparison was made between two types of cable bolts and rock bolts. From the results, it is shown that the microscopic failure mechanism is classified as the different failure mode. Then the supporting effect of rock bolts and cable bolts are discussed.