

鋼管膨張型ロックボルトのせん断補強効果の 把握実験と数値解析のためのモデル化

向山 博道¹・進士 正人²・田名瀬 寛之³・駒田 忠二⁴

¹学生会員 山口大学大学院 理工学研究科環境共生専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)
mukaiyama@rock.civil.yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 学博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

³正会員 名古屋道路エンジニア(株) (〒460-0008 愛知県名古屋市中区栄1-7-33)

⁴正会員 名古屋道路エンジニア(株) (〒460-0008 愛知県名古屋市中区栄1-7-33)

不連続岩盤におけるロックボルトのせん断補強効果は、ロックボルトの材質、径、あるいはロックボルトの種類によりそのせん断補強効果が異なるといわれている。本研究では、特に鋼管膨張型ロックボルトと通常のロックボルトに着目し、それらのせん断補強効果の相違を調べるために、室内せん断実験を実施しそのせん断特性を調べた。その結果、地山が比較的低強度の場合、ロックボルトは明確なせん断挙動を示さず、曲げや引張りの挙動が卓越することが分かった。また、その際のせん断特性は材質・形状により明確な違いが無いことが分かった。また、3次元数値解析などを行うために、ロックボルトのせん断補強効果を精度よく表現するための鋼管膨張型ロックボルトのモデル化についての検討および提案を述べる。

Key Words : rockbolts, water-expanded steel bolt, block shear test, discontinuity, reinforcing effects

1. はじめに

山岳トンネルにおける一般的なロックボルトは、ボルトと地山との間を定着材により全面を接着する全面定着方式が一般的である。しかし、この方式では定着材が硬化するまでの間、地山を補強する効果が十分に発揮されない可能性がある。また、ロックボルト削孔後に湧水があると定着材が流出し定着が図られず補強効果が低減する場合があることが指摘されている。そのため近年、湧水の多い地山や打設直後の早期補強効果を期待する場合、摩擦定着方式が採用される事例が増えてきている。その中でも特に施工実績の多いのが鋼管膨張型摩擦定着方式ロックボルトである。

鋼管膨張型ロックボルトは、鋼管内に水圧を加え膨張させることにより鋼管と孔壁との間に全長にわたって摩擦を生じさせ、定着効果を期待するものである。この方式は定着材を必要としないことから、打設直後より補強効果が発揮できる。しかし、鋼管内が中空であるため、従来の密実なロックボルトに比べてせん断強度が劣ることが問題とされてきた。加えて、鋼管の外表面が直接地山に接することから、鋼管そのものの腐食の影響が懸念さ

れ利用範囲が限定されていた。この腐食問題に関して、近年、高耐食溶融めっき鋼板“ZAM（溶融 Zn-6%A1-3%Mg 合金めっき鋼板）”等が開発され、腐食の影響に関する懸念は無くなりつつある。

本研究では、写真-1に示すような鋼管膨張型ロックボルト（日新鋼管社製）を用いて、せん断実験を行った。その結果と従来のロックボルトを比較することにより、鋼管膨張型ロックボルトのせん断補強効果に関する検証を行った。

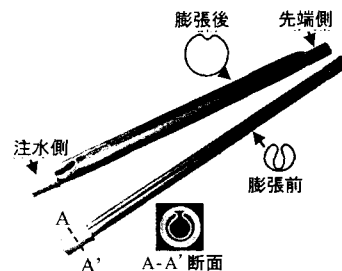


写真-1 鋼管膨張型ロックボルト

2. 実験概要

(1) 実験方法

本実験では、地山内の不連続面によるロックボルトのせん断を想定している。そこで写真-2に示すようなせん断試験を行った。模擬岩盤については、载荷によるボルトの変形に耐えられるよう高強度コンクリートを使用した。ボルトには水平方向にひずみゲージを設置することで、せん断時のボルトの変形挙動を把握した。実験にはアムスラー载荷試験機を用い、载荷時に载荷荷重、载荷部変位、水平方向ひずみ等を測定した。

(2) 供試体概要

せん断試験を行うにあたり、供試体を図-1のように製した。すなわち、中央200×200×200mmの载荷部と、両側235×235×200mmの母材部からなるコンクリートブロックの中心にロックボルトを設置し、载荷部を鉛直に押し下げるにより境界面にせん断を発生させた。また、本実験で使用したコンクリートは水セメント比25%で配合を行った。この時のコンクリートの圧縮強度を表-1に示す。

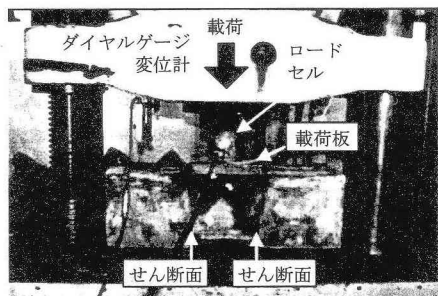


写真-2 せん断試験状況

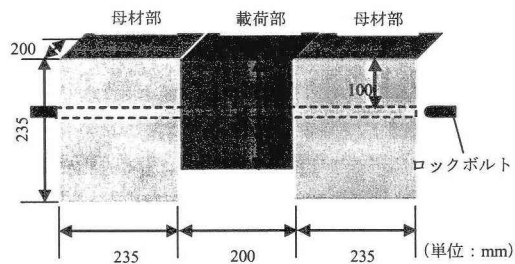


図-1 実験供試体

3. 鋼管膨張型ロックボルトのせん断試験

(1) 試験概要

せん断試験に使用するロックボルトは、鋼管膨張型ロックボルトと、従来のロックボルトとして異形棒鋼、ツイスト棒鋼の2種類、計3種類である。各ロックボルトの材料特性を表-2に示す。

また本実験では、水平方向ひずみゲージの設置位置を図-2のように配置した。これは境界面上にひずみゲージを設置するとせん断によりひずみゲージが早期に破損しやすいため、境界面より左右両側25mmの位置とした。また、载荷部中央に一箇所ひずみゲージ設置位置を増設した。実験時の载荷荷重は0～250kNを与えた。

表-1 コンクリートの圧縮強度

	母材部	载荷部
圧縮強度(N/mm ²)	68.5	64.4

表-2 ロックボルトの材料特性

	管長(mm)	管直径(mm)	断面積(mm ²)
鋼管膨張型	900	48	316.5 ^{注1)}
異形棒鋼	900	22.5 ^{注2)}	397.6
ツイスト	900	23.2 ^{注2)}	422.7

注1) 鋼管の中空洞を除く 注2) 最小径

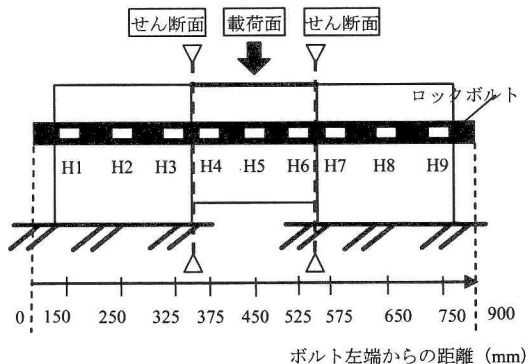


図-2 ひずみゲージ設置位置

(2) 実験結果と考察

a) ロックボルトのせん断による変形状況

せん断により、鋼管膨張型ロックボルトは、密実なボルトと異なった断面変形が予測される。まず、写真-3に鋼管膨張型ロックボルトとツイスト棒鋼の試験後の変形状況を示す。また、図-3に鋼管膨張型ロックボルトとツイスト棒鋼のせん断による変形挙動を示す。

ツイスト棒鋼は、荷重の載荷により主にボルトの中心に変形が生じていることがわかる。

これに対して鋼管膨張型ロックボルトは、その上面はせん断の影響を明確に受けているが、下面では、せん断による影響は外観上に現れていないことがわかる。

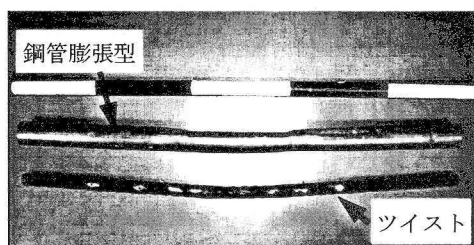


写真-3 試験後の変形状況

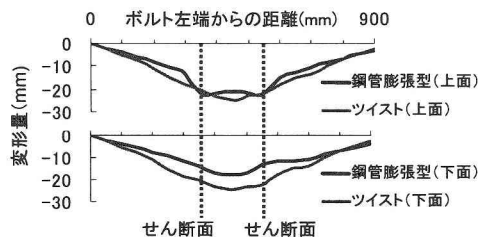


図-3 せん断による変形挙動

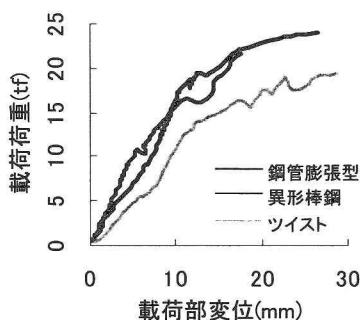


図-4 載荷部変位と載荷荷重の関係

b) 載荷荷重に対する載荷部変位進行状況

鋼管膨張型ロックボルトは断面内での変形の影響が大きいと考えられた。しかし、従来のロックボルトと荷重に対する変位の進行に差が生じなければ、同等のせん断強度を有すると考えられる。図-4に3種類のロックボルトについて、載荷部変位と載荷荷重の関係を示す。

この図に示すように3種類のロックボルトとも、ほぼ同様な載荷挙動を示す。また、載荷部変位10mmを境界に載荷荷重に対する載荷部変位の緩やかに増加傾向が変化するがわかる。

異形棒鋼供試体では、載荷荷重100kN付近で母材部中央にひび割れが生じた。このひび割れにより、載荷荷重100kN付近で載荷荷重に対する載荷部変位の発生が大きく増加したと考えられる。

ツイスト棒鋼は、他のロックボルトに比べて載荷荷重に対する載荷部変位が大きい。これは、供試体との密着性が高いがせん断に対する抵抗が最も大きいため、また載荷初期に供試体の局所的な破壊が生じたためと考えられる。

また、ボルトへの載荷荷重をせん断面の面積で除したせん断応力 (N/mm^2) を算出し、載荷部変位とせん断応力の関係を図-5に示す。各ロックボルトの載荷部変位は、載荷部変位10mm付近までの緩やかな増加と載荷部変位10mm以降の急激な増加を示す。特に鋼管膨張型と異形棒鋼は、載荷初期の線形的勾配が等しく、異形棒鋼が鋼管膨張型より早い段階で載荷部変位の急激な増加を示す。載荷部変位の急激な増加が生じるまでのせん断応力と載荷部変位の関係は、鋼管膨張型ロックボルトと異形棒鋼がほぼ一致することがわかる。このことから鋼管膨張型ロックボルトは従来のロックボルトと同様なせん断耐力を有していると考えてよいことがわかる。

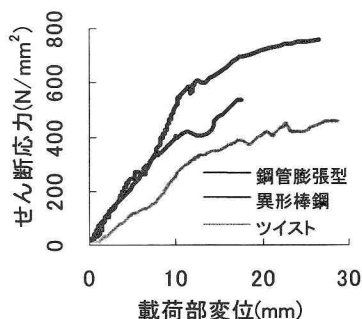


図-5 載荷部変位とせん断応力の関係

c) ロックボルトのひずみ発生状況

載荷部変位と載荷荷重の関係では、3種類のロックボルトはほぼ同様な傾向を示した。そこで載荷部変位に着目し、ロックボルトがせん断の影響を受ける様子をひずみにより把握する。水平方向ひずみ発生状況を図-6に示す。ロックボルトの各ゲージ位置のひずみを表すため、横軸にひずみゲージ設置位置を取り、載荷部変位5mm、10mm、15mmにおける3種類のロックボルトのひずみ分布を示している。

まず載荷部変位10mmまでは、主に、境界面でのひずみの増加が3種類のロックボルトとも同様に生じている。しかし、載荷部変位10mm以降では、ひずみ発生状況において3種類のロックボルトに違いが見られる。

すなわち、鋼管膨張型ロックボルトは、載荷部変位10mm以降に境界面でひずみが減少し、さらに境界面周辺においてひずみの増加を示している。これは鋼管膨張

型ロックボルトでは、ひずみの増加が境界面上から境界面付近へ移行していると考えられる。

それに対し、異形棒鋼は、載荷部変位10mm以降からボルト全体でのひずみの減少を示している。

また、ツイスト棒鋼は、載荷部変位10mmまでのひずみの増加から、載荷部変位10mm以降においてもボルト全体でひずみの増加を示している。

以上のことから、同様のせん断変形を与えても供試体は、異なるひずみ発現挙動を示すことがわかる。特に、鋼管膨張型ロックボルトのひずみが最も発生する位置は必ずしも境界面上ではなく、鋼管膨張型ロックボルトは広範囲にせん断の影響を受けていると考えられる。また、ロックボルトによって最大ひずみが生じる位置が異なるため、この結果から鋼管膨張型ロックボルトのせん断強度の低下は見られないと考えられる。また、ひずみが圧縮側に一部発生しているのは供試体のひび割れが原因であるとも考えられる。

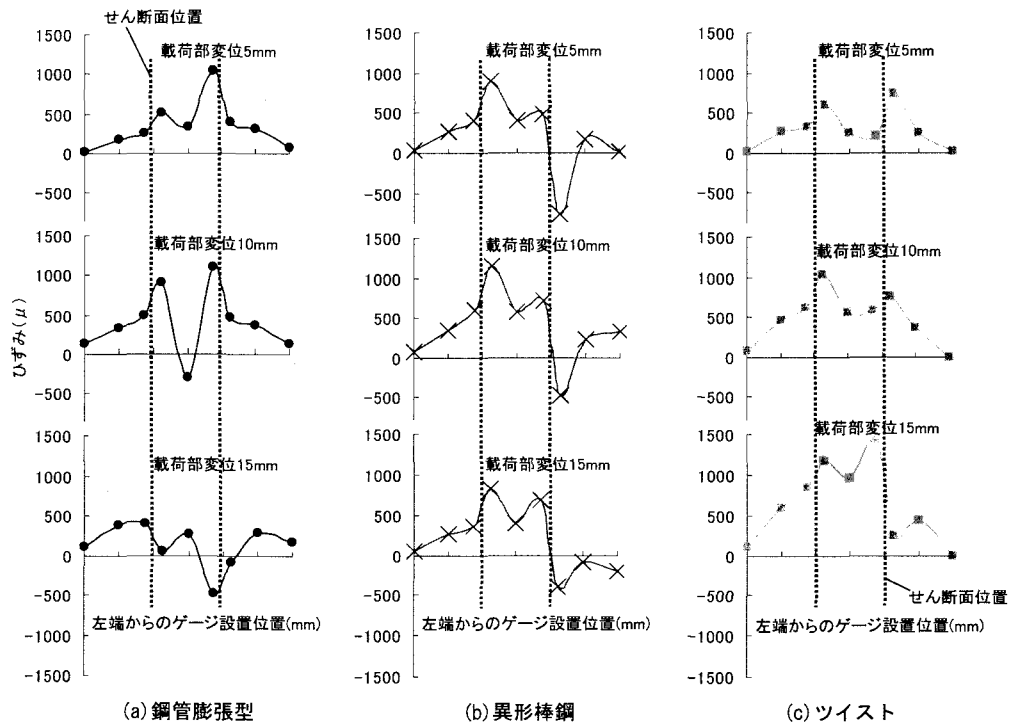


図-6 ボルト軸方向ひずみ発生状況

4.軟岩地山における鋼管膨張型ロックボルトのせん断試験

(1)試験概要

ロックボルトは、トンネル掘削から覆工完了までのトンネル及び地山周辺の安定を図るための主要な支保部材のひとつとして採用される。従って、ロックボルトは地山が軟弱で条件が悪い場合においても地山安定の効果を発揮することが求められる。そこで、試験供試体に用いるコンクリートの強度を低下させ軟弱地山を表現し、軟弱地山における鋼管膨張型ロックボルトのせん断補強効果の検証を行う。

本実験で使用したコンクリートは水セメント比45%配合設計を行った。この配合によるコンクリートの圧縮強度を表-3に示す。鋼管膨張型ロックボルトの供試体を2基作製し、3.の試験同様にせん断試験を行った。実験時の載荷荷重は0～150kNを与えた。

(2)実験結果と考察

水セメント比45%で配合した供試体の鋼管膨張型ロックボルトせん断試験について、載荷部変位と載荷荷重の関係を図-7に示す。なお、図中では比較のために3.での試験結果を「硬岩鋼管膨張型」、本試験結果を「軟岩鋼管膨張型1、2」と表示している。この図からわかるように、軟弱地山の方が荷重に対する変位の最大増加量発生が早く起こることがわかる。

次に、軟弱地山における鋼管膨張型ロックボルトの1回目と2回目試験とツイストボルト試験結果について、最大載荷荷重までの載荷部変位と載荷荷重との関係を図-8に示す。ここで、載荷荷重がピークに達するまでの範囲について、初期変位に限定して比較した。この場合、ボルトの種類の違い以外の条件の変更点はないことから結果は3.とほぼ一致することが予想された。しかし、両者の載荷荷重に対する載荷部変位の増加量は大きく異なった。この原因として、供試体が低強度であることが影響していると考えられる。

これらより、軟弱地山において鋼管膨張型ロックボルトやツイスト棒鋼へのせん断荷重は、せん断挙動と示すのではなく、曲げや引張り挙動を呈する。そのため、ボルト軸力の影響が大きいと考えられる。また、その際のせん断特性は材質・形状により明確な違いが無いことが確認できたといえる。

従って、数値解析のモデルとしては、地盤とロックボルトの弾性係数の比によりせん断が卓越するモデル及び曲げ、引張りを考慮すべきモデルが提案できる。今後、花崗岩を用いたせん断実験を行うことにより、この点について検討する。

表-3 コンクリートの圧縮強度

	母材部	載荷部
圧縮強度(N/mm ²)	49.2	46.7

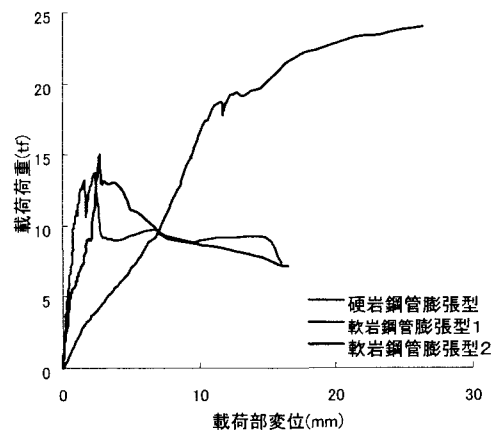


図-7 載荷部変位と載荷荷重の関係

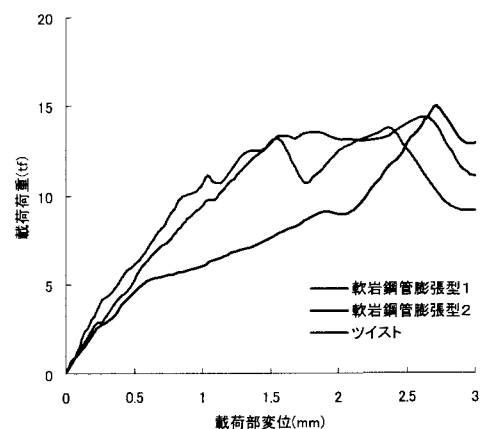


図-8 最大載荷荷重までの載荷部変位と載荷荷重との関係

6. まとめ

本研究では、地山の不連続面を想定した鋼管膨張型ロックボルトのせん断に対する強度を、室内実験を行うことにより検証した。本研究で行った実験は、ボルト周囲の剛性発現時間、拘束圧などの点から、異形棒鋼・ツイスト棒鋼に良条件、鋼管膨張型ロックボルトに悪条件で実施されていると考えられる。以下、実験結果をとりまとめる。

- ①鋼管膨張型ロックボルトは中空であるため、せん断が生じる初期の段階では、せん断を受けるボルトの上面でのみせん断による変形が生じる。
- ②载荷によりロックボルトにせん断が生じた際、ロックボルトのせん断による変位量は緩やかな増加から急激な増加を示す。
- ③変位が生じる初期の段階において、変位の増加量は鋼管膨張型ロックボルトと従来のロックボルト（異形棒鋼・ツイスト棒鋼）は同様な傾向を示す。
- ④従来のロックボルト（異形棒鋼・ツイスト棒鋼）は、

せん断により生じる境界面でひずみが増加する。これに対して鋼管膨張型ロックボルトは、境界面でひずみが増加するが、その後ひずみの増加は境界面付近へ移行し、ボルトの広い範囲でせん断の影響を受けていると考えられる。

- ⑤軟弱地山において、変位の増加量は、せん断挙動ではなく、曲げや引張りのようなボルト軸力の影響が大きい。従って地山とロックボルトの弾性係数の比の違いにより異なるモデルを検討する必要がある。

参考文献

- 1) 吉中龍之進, 阪口聡, 清水昭男, 加藤恵三: 低拘束圧下における不連続面のロックボルトによる補強効果に関する実験的研究, 第 18 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.96-99, 1987.
- 2) 中川光男, 太田英将: 鋼管膨張型ロックボルトの力学的メカニズムに基づく作用効果と適用性について, 第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.501-506, 2005.
- 3) 連載講座, 吹付けコンクリート・ロックボルトに関する Q&A, トンネルと地下, vol31, no.11, pp1080-1082, 2000.

LABORATORY TEST AND SIMULATION MODELS ON SHEAR REINFORCING EFFECTS OF WATER-EXPANDED STEEL BOLTS

Hiromichi MUKAIYAMA, Masato SHINJI, Hiroyuki TANAZE and Tadaji KODAMA

The shear reinforcement effect of the rockbolts in discontinuous rock mass shows different tendency by material, diameter and type of the rockbolts. In this study, laboratory shear test by using three kinds of rockbolt was carried out. Then, the difference of shear reinforcement effect about steel pipe expansion rockbolt and usual rockbolt was examined. As the result, it is clear that the tension and bending effect for the rockbolt exceeded than shear behaviour in case of the relative low stiffness ground. It became also clear that there was no difference by material and shape in the shear property.