

室内せん断試験によるロックボルトの岩盤補強効果について

日本道路公団 正会員 伊藤 哲男 赤木 渉
大成建設 正会員 ○伊藤 文雄 青木 智幸 大塚 勇
東京大学工学部 正会員 堀井 秀之

1. 目的

山岳トンネルで支保部材として施工されるロックボルトは、近年、高速施工やコスト縮減などの理由で、降伏耐力や径の異なる材料を使用することが多くなってきた。日本道路公団では、第二東名・名神高速道路のような大断面トンネルに対して、より合理的で経済的な支保部材として高耐力ロックボルトを採用している。しかしながら、高耐力ボルトを含むロックボルトのせん断補強効果については明らかではなく、定量的な評価が望まれている。

本研究では、岩盤の不連続面を貫くロックボルトの岩盤補強効果を調べるために、室内せん断試験を行った。また、数値解析により試験結果のシミュレーションを行い、ロックボルトのモデルパラメータを推定し、補強効果の定量的な評価を行った。

2. 室内せん断試験

せん断試験の模式図（平面図）を図1に示す。模擬岩盤のコンクリート供試体は、縦 700×横 1000×厚 500 で、中央部に角度 45° で不連続面を作成した。この不連続面に対して、打設角度が 45° となるようにロックボルト孔を設けた。岩盤およびロックボルトの強度が、試験結果に及ぼす影響を調べるために、模擬岩盤は地山等級 B～D に対応させ、圧縮強度の異なる 3 種類のコンクリート供試体とした。ロックボルトの仕様は、耐力 170kN の普通ボルトと 290kN の高耐力ボルトの 2 種類で試験を行った。試験は 6 ケースであり、各ケースを表 1 に示す。

試験は、供試体中に予め設けておいたφ64 の孔に、セメントミルクを充填し、ロックボルト D25 を打設した。セメントミルクの圧縮強度は、平均 35N/mm² である。載荷装置は、100ton の油圧ジャッキを用いた。岩盤変位の計測箇所は、不連続面に沿って 3 箇所とし、不連続面に垂直な成分と平行な成分を測定した。

3. せん断試験のシミュレーション

数値解析により、せん断試験のシミュレーションを行った。解析には、個別要素法プログラム（UDEC¹⁾）を使用し、岩盤は弾性体とした。岩盤ブロック間の不連続面の変形は、不連続面の垂直方向とせん断方向の 2 種類のバネで表現される。垂直方向については、変位－応力関係は線形である。また、せん断方向については、クーロンの破壊規準でバネの降伏が判定され、せん断滑りを生じる。岩盤および不連続面の物性値を表 2 に示す。

ロックボルトのモデルとしては Lorig²⁾ による Reinforce element を採用した。これは、図 2 に示すように、線要素では表現しにくい不連続面での局所的な補強効果をモデル化したものであり、不連続面とボルトの交差部におけるボルト軸方向および直交方向の 2 種類のバネで表現されている。バネの剛性は、グラウトの剛性および削孔径などから求められる^{1) 2)}。

キーワード ロックボルト、室内せん断試験、数値シミュレーション、UDEC、不連続面

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 新宿センタービル 大成建設（株） TEL03-5381-5283 FAX03-5381-5295

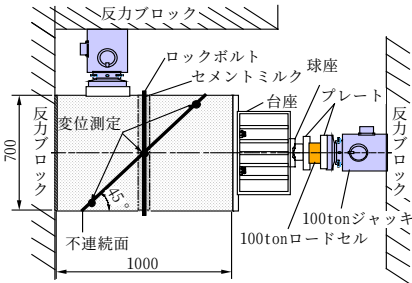


図1 せん断試験模式図（平面図）

表 1 試験ケース一覧表

試験ケース	模擬岩盤		ロックボルト
	目標圧縮強度 (N/mm ²)	地山等級	耐力 (kN)
ケース 1	80 (92)	B級	170 (普通ボルト)
ケース 2	50 (72)	C級	
ケース 3	20 (25)	D級	
ケース 4	80 (93)	B級	290 (高耐力ボルト)
ケース 5	50 (75)	C級	
ケース 6	20 (24)	D級	

○ は実際の強度

表 2 模擬岩盤の物性値

項目		値	単位
岩盤	密度	2410	kg/m ³
	弾性係数	33.9	kN/mm ²
	ポアソン比	0.2	
不連続面	垂直バネ定数	1.0E+12	N/m ³
	せん断バネ定数	1.0E+10	N/m ³
	粘着力	4000	N/m ²
	内部摩擦角	30	°
	引張強度	0	N/m ²

表3にロックボルトのモデル物性値を示す。ロックボルトの軸方向耐力が解析結果に大きく影響を及ぼすため、軸方向耐力をパラメータにして、普通・高耐力ボルトともに3ケースの解析を実施した。解析ケースを表4に示す。せん断方向の耐力は、Von Mises の基準により求まる、降伏強度 $\div \sqrt{3}$ とした。

試験結果とシミュレーション結果を図3に示す。試験結果は細線、解析結果は太線である。試験結果を見ると、模擬岩盤の強度による差はほとんど見られない。これは、グラウト材として使用したセメントミルクの強度が、全ての試験ケースで同程度であったために、セメントミルクの強度に依存したものと考えられる。また、ボルトの強度による差は、高耐力ボルトの試験結果の方が若干大きなせん断荷重を示しているものの、耐力仕様から期待されるほどの効果は見られなかった。一方、解析結果では、ボルトの高耐力化の影響が顕著に現れた。普通ボルトでは、ケースBが、最も試験結果と一致しているのに対して、高耐力ボルトでは、ケースBは、試験結果よりも上回っている。

ボルトの破断状況を見ると、写真1に示すように、普通・高耐力ボルトともに、不連続面のせん断変位によってボルトが局所的な曲げ変形を受けてせん断されていることが分かった。高耐力ボルトの材質はSD585であり、このような高張力鋼は局所曲げに弱いことが知られている。高耐力ボルトが、普通ボルトより軸耐力がかなり大きいものにも関わらずせん断荷重があまり増加しなかったのは、このことが原因であると考えられる。

今回実施した解析ケースで、普通ボルト、高耐力ボルトのどちらも全ての試験結果の最小値を上回ることのないのはケースCである。すなわち、本研究で使用したロックボルトのモデルを使用するときには、軸方向バネの耐力パラメータをケースCのように低減して設定することにより、ボルトの補強効果について安全側の評価ができる。

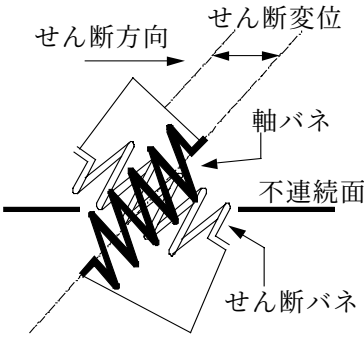


図2 Reinforce element モデル

表3 ロックボルトの物性値

項目	単位	普通ボルト	高耐力ボルト
軸方向剛性	N/m	1.54E+09	1.54E+09
せん断方向剛性	N/m	1.36E+08	1.36E+08
軸方向破断強度	kN	248	405
軸方向降伏強度	kN	170	290

表4 解析ケース一覧表

解析ケース	軸方向耐力	せん断方向耐力
ケースA	破断強度	降伏強度 $\div \sqrt{3}$
ケースB	降伏強度	
ケースC	降伏強度 $\div \sqrt{3}$	

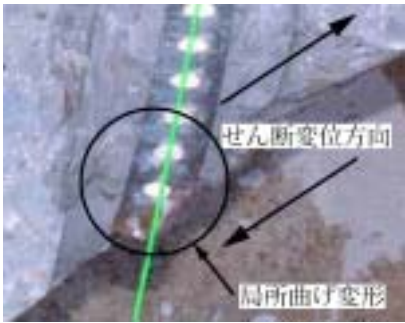


写真1 ボルトの破断状況（ケース4）

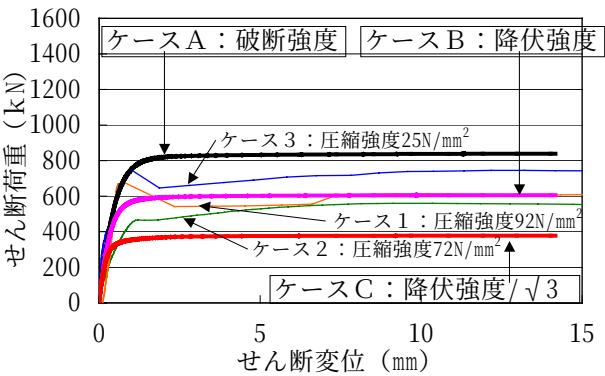


図3 (a) せん断荷重－変位関係（普通ボルト）

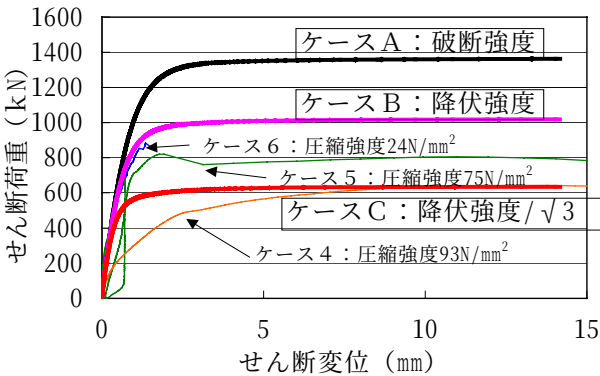


図3 (b) せん断荷重－変位関係（高耐力ボルト）

参考文献

1) ITASCA: Universal Distinct Element Code(UDEC), ver.3.01, 2000.
2) Lorig, L.: Computers and Geotechnics, Vol.1, pp.79-97, 1985.