

材質の異なるロックボルトの力学的性能 に関する実験的考察

河田皓介^{1*}・松本卓馬¹・砂金伸治¹・森本智²・淡路動太³・岡部正⁴

¹東京都立大学 都市環境学部都市基盤環境学科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

²国立研究開発法人土木研究所 トンネルチーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

³清水建設株式会社 土木技術本部 地下空間統括部 (〒160-0004 東京都新宿区三矢六丁目13-5)

⁴株式会社ケー・エフ・シー 技術部 (〒160-0004 東京都港区芝公園2丁目4番1号芝パークビル B館 11F)

本研究では、標準と異なる材質のロックボルトを支保部材として活用するにあたって、その性能を評価する目的で、異形棒鋼およびGFRPの2種類のロックボルトを用いた原位置引抜試験と室内模型実験により、材質による挙動の違いを把握し、使用条件を整理するものとした。その結果、GFRPのロックボルトは見かけの弾性係数が小さく、通常のロックボルトに比べ地山内の拘束下でも変形が大きく生じる可能性があること、ボルト長が変形性能に影響を及ぼす可能性があることが明らかとなった。さらに、ロックボルトと岩盤の定着の効果が期待できない、もしくは小さい条件下ではロックボルトに圧縮力が生じる可能性があること、挙動を検討する際は引抜耐力だけではなく要素についても考慮する必要があることが分かった。

Key Words : *Tunnelling, Rock bolt, Pull-out test, On-site test, Model experiment*

1. はじめに

岩盤内に構築されるトンネル・地下空洞の支保部材のひとつであるロックボルトは、引張抵抗やせん断抵抗性能により、単体もしくは他の支保部材との相互作用によって空間を保持するとされている¹⁾。近年、ロックボルトは、鋼材(例えば、異形棒鋼)だけでなく同等の耐力を有するガラス繊維強化樹脂(GFRP)などの材質の異なるものが開発され、使用されている。GFRPのロックボルトは、切断が容易であることから、大変形が生じるような地山条件下での切羽面の鏡ボルトとして使用されている事例が多い。このような材質の異なるロックボルトを、支保部材として使用するためには、これまで使用されてきたロックボルトの材料固有や地山と一体となった場合の性能と、実際得られている効果を明らかにする必要がある。

これまでの研究においては、ロックボルトと地山との相互作用による効果が報告されている^{2)~4)}ものの、実際に用いられる基準等^{5)~6)}において規定されている条件は、耐力が主であり、その他の性質が明確に定義されてるとは言い難い。このような考え方の下、これまでのロックボルトを新たな材質に置き換えた場合には、想定していなかった不具合が生じる可能性も否めない。そのため、一般的なロックボルト(鋼材)と新たな材質のロックボ

ルトの挙動のメカニズムを把握することで、その使用条件を整理するとともに、新たな材料を使用する場合の力学的な挙動に関する評価方法を検討することが望ましいと考えられる。

本研究では、山岳トンネルの支保部材として一般的に用いられることが多い異形棒鋼と新たな材質として可能性のあるGFRPのロックボルトを用いて、引抜き時および地山変形時の挙動とそのメカニズムを把握するため、実トンネルにおける原位置引抜試験と室内模型実験を行った。

2. 研究の方法

(1) 原位置引抜試験

本研究では実トンネルにおいてロックボルトの引抜試験を実施した。写真-1に現場での引抜試験の状況を示す。表-1に原位置引抜試験を実施したトンネルの概要を示す。試験は条件の異なる2つの道路トンネルで実施した。対象1のトンネルの試験箇所は、地質が第三紀層の凝灰岩で支保区分はCII区間で実施した。対象2の試験箇所は、後期中新世の礫岩で土被り59.1m~65.3mの支保区分がDI区間で実施した。いずれのトンネルも本坑に影響の小さい避難坑において試験を行った。



写真-1 現場での引抜試験の状況

表-1 原位置試験を実施したトンネルの概要

	対象1トンネル	対象2トンネル
地質	第三紀層, 凝灰角礫岩	後期中新世, 礫岩
試験箇所の土被り	-	59.1m~65.3m
支保パターン	CII-H-B-L (避難坑)	DI-L(H)2-B
ボルト長さ	1.0m	0.5m, 1.0m, 2.0m
埋め込み長さ	0.85m	0.35m, 0.85m, 1.85m
プレート	あり	なし
充填材強度	34.4 N/mm ²	58.3 N/mm ²

表-2 ロックボルト材料諸元

	規格	引張耐力 (kN)	弾性係数 (N/mm ²)
異形棒鋼 (SD345)	D22	190	205
GFRP	CG22S	196	44

表-3 充填材料の配合

	重量 (kg)	比重	容量 (l)
普通セメント	9.36	3.16	2.96
特殊添加剤	0.64	2.2	0.29
細砂	10	2.67	3.74
合計	20	-	6.99



写真-2 本試験で使用したロックボルト (1.0mの例)

表-2に本研究に使用したロックボルト材料の諸元を示す。表-3に充填材の配合を示す。写真-2に本試験で使用したロックボルト (1.0mの例) を示す。本研究で用いたロックボルトは、鋼材 (SD345) の異形棒鋼D22 (以降、異形棒鋼とする) とガラス繊維強化樹脂のボルトCG22S (以降、GFRPとする) の2種類である。

図-1にボルト挿入状況の概要図を示す。ロックボルトの設置は標準的な施工方法にならない、ドリルジャンボによる削孔 (φ45mm) の後、モルタル充填を行い、ロックボルトを挿入した。ロックボルト長さは、試験箇所により異なるが、0.5m, 1.0m, 2.0mを用いた。ボルトの埋

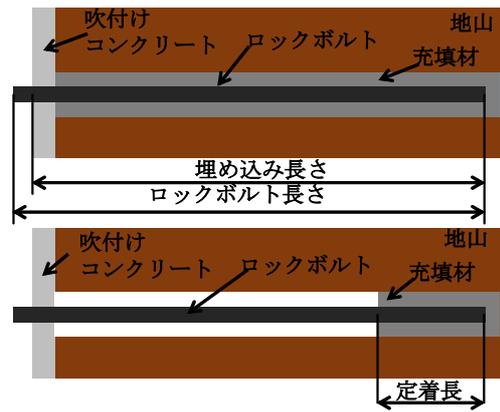


図-1 ボルト挿入状況の概要図

表-4 原位置引抜試験のケース (対象1)

Case	ボルト仕様	ボルト長さ (m)	定着長 (m)	定着
1-1	異形棒鋼	1.0	0.95	全面
1-2	異形棒鋼	1.0	0.25	先端
1-3	GFRP	1.0	0.95	全面
1-4	GFRP	1.0	0.25	先端

表-5 原位置引抜試験のケース (対象2)

Case	ボルト仕様	ボルト長さ (m)	埋め込み長さ (m)
2-1	異形棒鋼	0.5	0.45
2-2	異形棒鋼	1.0	0.95
2-3	異形棒鋼	2.0	1.95
2-4	GFRP	0.5	0.45
2-5	GFRP	1.0	0.95
2-6	GFRP	2.0	1.95

め込み長さは、引抜試験の掴み箇所 (50mm) を除く長さとした。充填材料の試験当日の強度は、対象1トンネルが材令24日で34.4N/mm²、対象2トンネルが材令22日で58.3N/mm²であり、対象2トンネルの方が強度はやや大きい。

引抜試験は、スマートジャッキを用いて行った。本引抜試験ではボルトを存置するため、材料の引抜耐力までを目標に試験を行い、異形棒鋼は120kN、GFRPは150kNまでを一つの目安とした。一部の材料は、目安を超過して引抜試験を実施した。また、引き抜き時は、対象1ではプレートあり、対象2ではプレートなしで実施した。

計測項目は引抜時の荷重及び引抜時の変位とした。

表-4と表-5に引抜試験のケースを示す。対象1トンネルでは定着長の影響を考慮するため、モルタル充填量を変化させた2種類を異形棒鋼とGFRPで比較した。ボルト長はいずれも1.0mであるが、定着長は0.25m (先端定着) と0.95m (全面定着) である。また、対象2トンネルではロックボルトの長さによる影響を検討するため、長さ0.5m, 1.0m, 2.0mのボルトにより試験を行った。ロックボルトの1ケースあたりの打設本数は、現地条件により対象1トンネルが4本、対象2トンネルは3本とした。



写真-3 室内模型実験の状況



写真-4 室内模型実験で用いたボルト

表-6 定着域を模擬したドライモルタルの配合

	重量 (kg)	比重	容量 (l)
普通セメント	9.36	3.16	2.96
特殊添加剤	0.64	2.2	0.29
細砂	10	2.67	3.74
合計	20		6.99

表-7 ゆるみ領域を模擬した地盤材料の配合

	豊浦砂	水 (豊浦砂)	静的破砕剤	水 (静的破砕剤)
重量比	60	6	10	3

(2) 室内模型実験

本研究では、地山の変形に対するロックボルトの性能を確認するため、掘削時のゆるみ領域を想定した室内模型実験を行った。

写真-3に室内模型実験の状況例を示す。写真-4に試験に使用したボルトを示す。実験用の装置は、円柱の塩化ビニル製の土槽（φ=300mm, h=300mm）と地山を模擬した材料、ロックボルトで構成した。地山を模擬した材料は、一般的に変化する地山部分を想定した豊浦砂と、ゆるみ領域を想定した材料として静的破砕剤を混合した豊浦砂、ロックボルトの定着域を模擬したドライモルタルにより構成した。ゆるみ領域は、静的破砕剤を混合した豊浦砂が膨張することで模擬するものとした。地山材料と土槽の間にテフロンシートを設置し、土槽との摩擦による膨張時の変形の抑制に配慮した。表-6にドライモルタルの配合および、表-7にゆるみ領域を模擬した地盤材料の配合を示す。表-8に室内模型実験のケースの概要

表-8 室内模型実験のケースの概要図

		ゆるみ領域					
		小		大			
無							
	Case 3	異形棒鋼		Case 5	異形棒鋼		
	Case 4	GFRP		Case 6	GFRP		
着	小						
		Case 7	異形棒鋼		Case 9	異形棒鋼	
		Case 8	GFRP		Case 10	GFRP	
	大						
Case 11		異形棒鋼		Case 13	異形棒鋼		
Case 12		GFRP		Case 14	GFRP		

を示す。土槽内で地山材料の投入量を変えることで、ゆるみ領域の範囲や定着域の有無を表現し、ロックボルトの効果の確認を試みた。Case1とCase2は表-8に示すCase3～Case6と同様の条件においてロックボルトがない場合のケースである。なお、実験条件を統一するため実験室内の温度を20℃とした。

模型実験に用いたロックボルト材料は、原位置引抜試験で使用した異形棒鋼およびGFRPと同じものを用いた。ボルトの長さは全長300mmとした。

計測項目は、ゆるみ領域を想定した地山材料の膨張量およびロックボルトのひずみとした。ロックボルトにはひずみゲージを対面で2か所に30mm間隔で6か所、合計12点張り付けた。

3. 研究の結果

(1) 原位置引抜試験

図-2に対象1および図-3に対象2の試験結果として、荷重変位関係を示す。何れのケースにおいても、荷重に

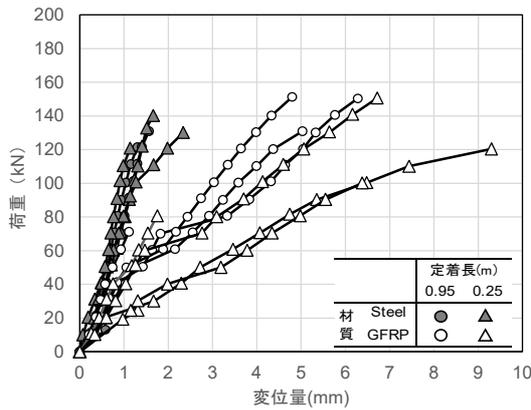


図-2 原位置引抜試験の荷重変位関係 (対象1)

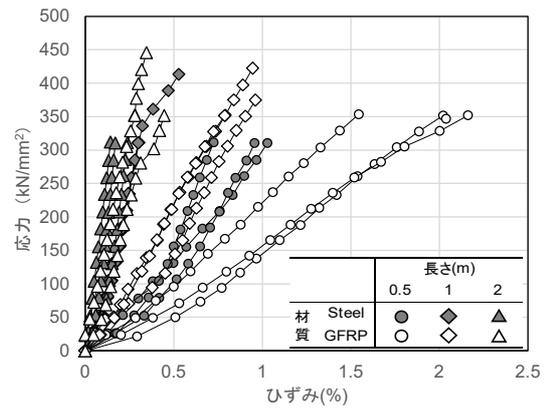


図-4 対象2の応力-ひずみ関係

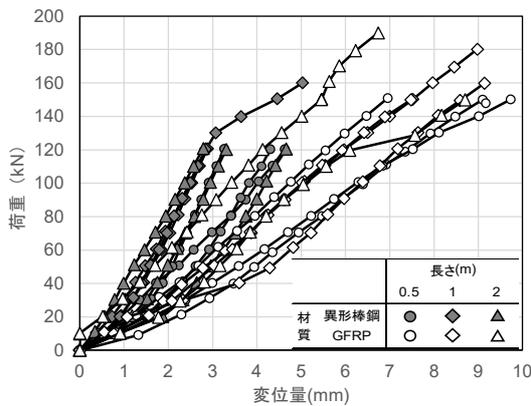


図-3 原位置引抜試験の荷重変位関係 (対象2)

対する変位はおおむね線形に変化している。

図より、異形棒鋼に比べ、GFRPの方が荷重の増加に対する変位は大きい。また、異形棒鋼の場合は、定着長さの違いによる変位量の違いは小さいが、GFRPの変位量は、定着長が0.95mの場合に比べ0.25mの方が違いが大きくなっている。対象2トンネルの試験の結果においても、異形棒鋼に比べGFRPの方が荷重の増加に対する変位は大きくなる。変位量は対象1トンネルに比べ、やや大きい傾向にある。現場ごとの条件は異なるが、対象2トンネルでは引抜時にプレートがなかったこと、ロックボルト設置時に吹付コンクリートとボルトの間の縁切りを行ったことが一つの要因であると考えられる。

図-4に対象2トンネルの応力-ひずみ関係を示す。また、図-5および図-6に両トンネルの見かけの弾性係数を示す。対象2トンネルは、埋め込みのボルト長が異なることから、図-4に示すように荷重変位だけではなく応力-ひずみ関係を整理した。また、各ケースの見かけの弾性係数を比較することで各種材料と条件による変形性能を考察した。なお、見かけの弾性係数は、引抜荷重が100kNとなる時点での応力-ひずみ関係の傾きから求めた。図-4より、長さが0.5m、1.0m、2.0mの順である応力値に対するひずみは大きくなる。この結果は、程度は違うものの

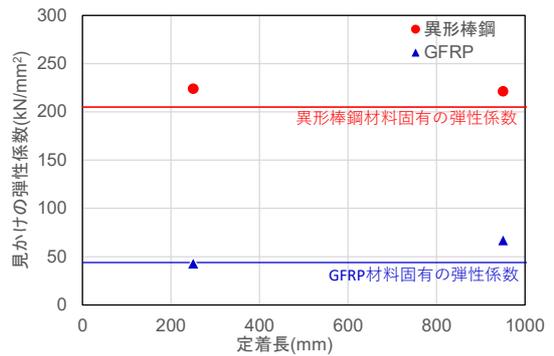


図-5 見かけの弾性係数と定着長 (対象1のみ)

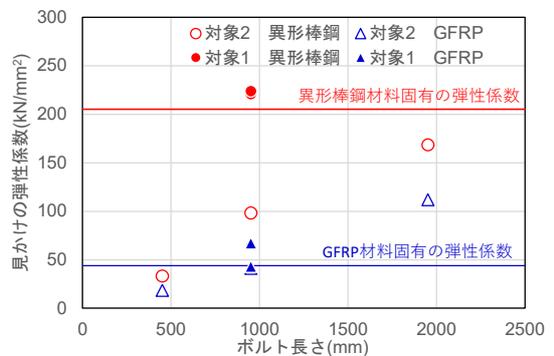


図-6 見かけの弾性係数とボルト長さ

異形棒鋼とGFRPともに同様の傾向にある。図-5より、定着長さの違いによる見かけの弾性係数の違いは、異形棒鋼では小さく、GFRPは定着長が長い方が見かけの弾性係数が大きい。図-6より、ボルトの長さで見かけの弾性係数の関係は、両材質共にボルト長さに応じて見かけの弾性係数が変化する傾向にある。また、見かけの弾性係数の値は、GFRPが異形棒鋼に対して4割~7割程度小さい。さらに、対象2の結果では、材料固有の弾性係数に対する見かけの弾性係数が、異形棒鋼では2割~8割程度小さく、GFRPでは埋め込み長さ0.5mで5割程度小さくなり、1mで同等程度、2mでは2.5倍程度大きくなった。これらの結果は、異形棒鋼はボルト単体の引張強度よりも

付着強度が小さかったため、充填材とボルト間の付着切れが生じ、見かけの弾性係数が材料固有の弾性係数よりも小さくなったと考えられる。また、GFRPボルトは、ボルト長が短い場合には異形棒鋼と同様に付着切れの影響を受けるが、ボルト長が長くなるとボルト単体の引張強度よりも付着強度が大きくなるため、見かけの弾性係数が材料固有のものよりも大きくなったと考えられる。

これらのことから、ロックボルトと充填材との付着状況が、変形性能に影響を与えていることが示唆され、ロックボルトの埋め込み長さが変位の抑制に寄与する可能性があると考えられる。この、ボルトと充填材の関係性から、材料固有の弾性係数とは異なる特性を示すため、ロックボルトによる変位抑制効果を考えるうえでは注意が必要である。さらに、GFRPのロックボルトは、見かけの弾性係数が異形棒鋼に比べて小さいため、変位の抑制効果は小さいと考えられる。一方で、変形を許容する性能を有すると考えることもできる。

以上より、ロックボルトは材質や埋め込み長さ、充填材との付着状態によって変形性能が異なる可能性があるため、通常と異なる材料や条件で使用する場合には、これらの条件に注意する必要がある。

(2) 室内模型実験

図-7および図-8に各ケースの隆起量と低減率を示す。

図-7はゆるみ領域が小さい場合、図-8はゆるみ領域が大きい場合を整理した。隆起量は模擬地山の表面で計測した結果の平均値を示す。また低減率は、ロックボルトなしの隆起量 (Case1とCase2) に対する各ケース (Case3～Case14) の隆起量の割合を示している。これらの結果は、地山材料を設置し計測開始から48時間後の値を取りまとめた。

図より、ロックボルトがない場合の隆起量は、ゆるみ領域が小さい場合 (Case1) が9.91mm、大きい場合 (Case2) が16.45mmであり、ゆるみ領域が大きい方が地山の変形が大きいという想定通りの結果となった。ロックボルトを設置した場合の結果は、全体的に隆起量の低減がみられた。また、異形棒鋼と、GFRPの材質の違いによる結果の違いは顕著に確認できなかった。さらに、ゆるみ領域が大きい方が、ゆるみ領域が小さい場合と比較して低減率は小さく、ゆるみ領域が大きいほどロックボルトの変位抑制効果が高いと考えられる。

図-9、図-10に各ボルトのひずみ分布を示す。本結果も隆起量と同様に地山材料設置から48時間後の値である。図より、材料の耐力で規定されている引張だけでなく圧縮のひずみが発生している場合がある。定着長域が大きい場合 (Case11～Case14) は、ひずみ分布は引張となる。一方で、ゆるみ領域が大きく定着域がないもしくは、定着域が小さい場合のひずみ分布は圧縮となるケースがあ

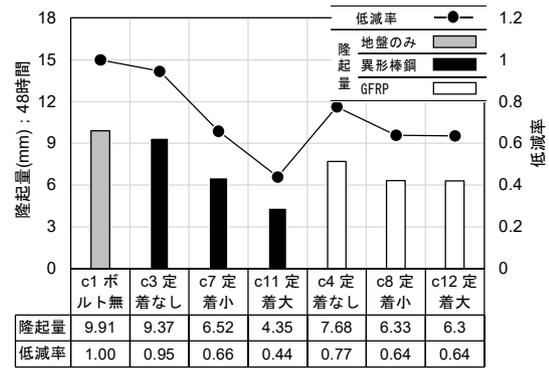


図-7 隆起量と低減率 (ゆるみ領域小)

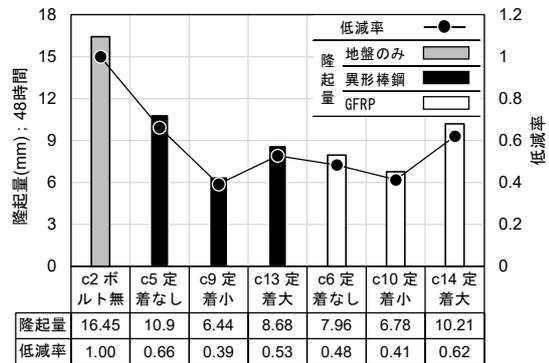


図-8 隆起量と低減率 (ゆるみ領域大)

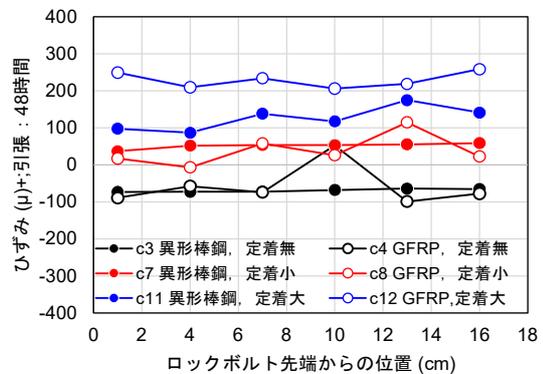


図-9 ひずみ分布 (ゆるみ領域小)

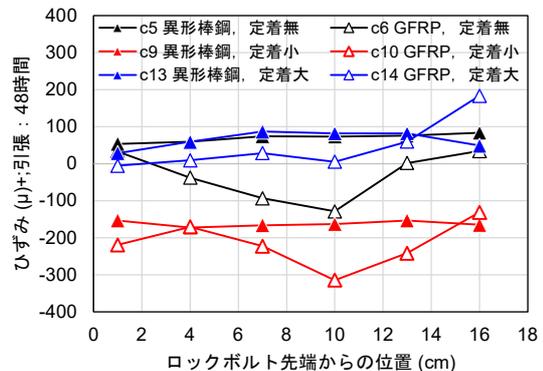


図-10 ひずみ分布 (ゆるみ領域大)

る。また、ゆるみ領域が小さく、定着域も小さい場合 (Case7, Case8) は、引張となっている。さらに、定着域が小さく、ゆるみ領域が大きい場合 (Case9, Case10) は、圧縮となっており、定着の効果が小さいと考えられる。これらの結果から、定着がしっかりと確保できている (定着域が大きい) 場合には、ゆるみ領域が拡大 (地山材料が土槽表面に向かって膨張) することで固定部と膨張の差によってボルトに引張ひずみが生じる。一方で、定着がしっかりと確保できていない (定着域がないもしくは小さい) 場合は、ゆるみ領域の膨張が地山側にも生じることで、圧縮ひずみが生じた可能性があると考えられる。

以上の結果から、ロックボルトの打設範囲の内側の地山にゆるみが生じる場合にはロックボルトは引張応力が生じるが、ゆるみ範囲がロックボルトの打設範囲の外側の場合にまで及ぶ場合は、ロックボルトに圧縮応力が生じる可能性があると考えられる。

4. おわりに

本研究では、山岳トンネルの支保部材として使用する標準と異なる材質のロックボルトの適用に関してその評価方法を整理するため、異形棒鋼とGFRPのロックボルトを用いて、原位置引抜試験および室内模型実験により、挙動を把握した。その結果、ロックボルトの性能として地山のゆるみによる変形を抑制する効果がある。一方で、圧縮ひずみが生じたことにより、従来考えられている引張抵抗やせん断抵抗だけではない性能についても評価を検討する必要があると考えられる。また、ロックボルト

は、地山や充填材との相互作用により材料固有の変形性能と異なる挙動となることが想定される。

GFRPのロックボルトの引抜性能は、材料固有の弾性係数に比べて見かけの弾性係数が大きくなるが、変形を抑制する効果は異形棒鋼と比較して小さいと考えられる。一方で耐力に達するまでは異形棒鋼に比べ変位を許容するとも考えられる。しかしながら、適用に当たっては終局段階の破壊形態に不明確な部分があるため、今後、破壊を考慮した試験や数値解析等による検討を行い、評価法を確立する必要があると考えられる。

謝辞：本研究で実施した原位置試験は、中日本高速道路株式会社の実施場所のご提供いただいた。ここに深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会：2016 制定トンネル標準示方書山岳工法編・同解説，pp.88-96，2016.
- 2) 山本稔：ロックボルトの作用効果について，土木学会論文報告集，第277号，pp.95-104，1978.
- 3) 蔣宇静，江崎哲郎，横田康行：軟岩地山トンネルの安定におけるロックボルトの力学的作用効果，土木学会論文集，No.561/III-38，pp.19-31，1997.
- 4) 土門剛，今田徹，西村和夫：ロックボルトによる支保内圧効果を考慮した低強度地山トンネルの簡便モデル，土木学会論文集，No.722/III-61，pp.149-167，2002.
- 5) 日本道路協会：道路トンネル技術基準・同解説（構造編），pp.112-118，2003.
- 6) 建設物価調査会：国土交通省土木工事標準積算基準書（河川，道路編）令和3年度版，2021.

STUDY ON ROCK BOLT WITH DIFFERENT MATERIAL BY ON-SITE AND MODEL EXPERIMENT

Kosuke KAWATA, Takuma MATSUMOTO, Nobuharu ISAGO, Satoshi MORIMOTO, Dohta AWAJI and Tadashi OKABE

In this study, on-situ pull-out tests and model experiments using deformed steel bars and GFRP rock bolts were conducted to evaluate a performance for a tunnel support member. As a result, it was clarified that the GFRP bolt has a small apparent elastic modulus, and that the large deformation may occur more even under confining stress from a ground than a deformed steel bar. Furthermore, it was found that the fixing length may affect the deformation performance. In addition, if the rock bolt and the bedrock are not fixed, compressive force may be generated in the rock bolt. Therefore, when evaluating a performance, it is necessary to consider other factors in addition to the tensile strength.