材質の異なるロックボルトの力学的性能に関する研究

後藤　優斗[1]・松本　卓馬[2]・砂金　伸治[3]

[1]正会員　矢作建設工業株式会社　土木事業本部　鉄道施工本部　(元首都大学東京)
（〒461-0004　愛知県名古屋市東区葵三丁目 19 番 7 号）
E-mail: yuto-goto@yahagi.co.jp

[2]学生会員　東京都立大学大学院　都市環境科学研究科（〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1）
E-mail: matsumoto-takuma@ed.tmu.ac.jp

[3]正会員　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）
E-mail: nisago@tmu.ac.jp

ロックボルトの性能には引張抵抗性能とせん断抵抗性能の 2 つがあるが，これら以外にも圧縮性能や腐食等に関する性能も考慮すべきである．近年，様々な材質を有するロックボルトが開発されているが，支保部材としての性能が満足されているか不明であることや過去の実績が乏しいなど，使用の可否の判断が困難な状況が続いている．本研究では引張耐力以外の性能指標を明確にすることを目標に，設計に資する基礎的なデータを取得する目的で，ゆるみ領域，定着域の大きさを変化させた室内模型実験と，原位置で引抜き試験を実施した．その結果，定着が期待できない状況下ではロックボルトに圧縮力を生じる可能性があることが分かり，弾性係数の小さい材料のロックボルトでは定着長による影響が大きくなることが確認された．

Key Words: *rock bolt, pull-out performance, loosening area, model experiment, pull-out test*

1. はじめに

NATM で用いられる支保工の 1 つにロックボルトが使用されている．その性能には引張抵抗性能とせん断抵抗性能の 2 つがある．しかし，それらの性能以外にも圧縮性能や，腐食等に関する耐久性能なども考慮すべきであると考えられる．また一般的なトンネルの施工に用いられる標準支保パターンではロックボルトに対する定量的な値としては引張耐力が示されているが，実際の現場では引張性能以外の必要な性能については具体的な考え方の提示が少ないまま施工が行われている．加えて，近年，ファイバーボルトなど新たな材料によるロックボルトの適用が試みられつつあるが，支保部材としての性能を満足するかを確認する手法が乏しいことも併せ，使用する際の判断基準が少ない状況にある．その理由として，実際の地山内におけるロックボルトの挙動の把握が難しいことに加え，その性能を定量的に論じることが困難であることが挙げられる．

本研究ではロックボルトに関して引張耐力以外に求められる性能指標を明確にすることを目標とし，施工管理の中で汎用的に用いられる引抜き試験を通じてロックボルトの設計に資する基礎的なデータを取得することで，材質による引き抜き挙動の基本的な違いについて明らかにし，ロックボルトの合理的な設計・施工法に資する性能の提案を目指すことを主たる目的とする．そこでゆるみ領域を模擬した材料，定着域を模擬した材料，2 種類のロックボルトを用いて，トンネル現場の避難連絡坑の貫通前切羽にて原位置引抜き試験を行うとともに，ゆるみ領域と定着域の大きさを変化させた室内模型実験を実施し，それぞれのロックボルトの基礎的な力学的挙動の差異を把握を試みた．

2. 原位置引抜き試験の概要

(1) 試験材料

a) ロックボルト

本実験の対象としたロックボルトは，同一径での異形棒鋼(D22)と GFRP ボルト(CG22S)の 2 種類である．本試験においては，実験等の制約からボルトの長さを 1m と

した．**表-1** にロックボルトの材料諸元を示す．

b) 定着材

定着材にはドライモルタルを使用した．**表-2** に配合等を示す．

c) 対象地山

本試験施工では建設中の新東名高速道路高取山トンネル避難連絡坑にて行った．避難連絡坑は坑口からの距離1269m，岩石は凝灰角礫岩，地質時代は第三紀層である．**写真-1** に試験の実施状況を示す．避難連絡坑の切羽は鏡吹付けコンクリートで保護されており，その面に試験用のロックボルトを打設し，引抜き試験を実施した．

試験実施の切羽は全体的に硬質であるが天端付近はもろく，掘削中に多数の抜け落ちが見られたと報告されていた．また切羽からは滴水程度の湧水も見られた．

表-1 ロックボルト材料諸元

	引張耐力 (kN)	単位重量 (kg/m)	弾性係数 (N/mm²)
異形棒鋼 D22	190	3.04	205
GFRP CG22S	196	0.75	44

表-2 定着材の配合

	重量 (kg)	比重	容量 (リットル)
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-1 引抜き試験の実施状況

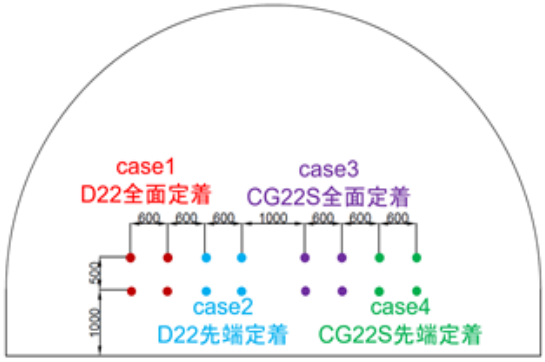

図-1 ロックボルト配置図

表-3 試験ケース

case	RB 仕様	定着長	長さ (m)	打設本数
1	異形棒鋼 D22	全面	1	4
2	異形棒鋼 D22	先端 250 ㎜	1	4
3	GFRP CG22S	全面	1	4
4	GFRP CG22S	先端 250 ㎜	1	4

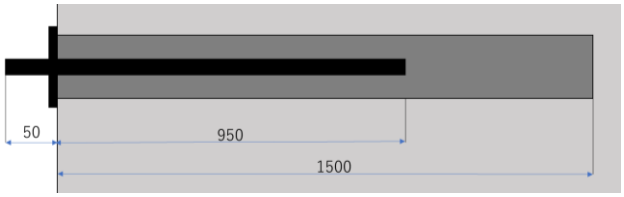

図-2 全面定着概略図

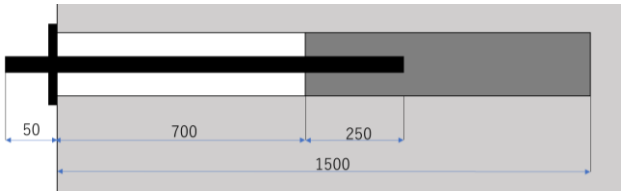

図-3 先端定着概略図

(2) 試験手順

a) 試験準備およびボルトの打設

図-1 にロックボルトの配置を示す．打設間隔に関しては左右に施工機械等の設置の制約があったことから芯芯で 60cm とした．削孔は汎用のドリルジャンボを用いて，深さ 150cm，径 51mm で行い，削孔した穴の奥から MAI ポンプでモルタルを注入した．全面定着では**図-2** のようにロックボルト全体がモルタル内に挿入されるようにを注入した．先端定着では**図-3** のようにロックボルトの先端 25cm がモルタル内に挿入されることを目標に，ロッド先端から 70cm を計測し挿入孔から 70cm までモルタル

が充填されていることを確認しながら注入した．モルタル注入後すぐにロックボルトを挿入し，吹付け面とプレートの間にモルタルを詰め，吹付け面とプレートの一体化を行い，最後にナットを締めた．

b)　ボルトの引抜きおよび計測項目

ロックボルト打設から定着材の養生期間として 24 日間を確保し，ロックボルト引抜きのためにスマートジャッキを取り付けた．スマートジャッキは充電式ポータブル油圧ポンプで管理されており，トリガーを引くことで載荷を行うものである．1回の試験で15回まで測定ができるため，本試験では10kNごと150kNまで10kN毎に載荷を行い，荷重と変位を記録した．また，試験終了後にロックボルト付近および切羽表面の鏡吹付けコンクリートの状況の観察を行った．

(3)　試験ケース

試験ケースはロックボルトの仕様と定着材の長さによる違いを検証するために**表-3**のように4つのcaseを設定した．先端定着の定着長はロックボルトの先端を 25cm として，後述の方法で定着を管理した．全てのケースで**図-1**にも示すように各 4 本，計 16 本で試験を行った．なお，本研究での検討ケースの標記についてであるが，本章の原位置引抜き試験はcaseとして記載し，次章で詳述する室内模型実験はケースとして記載してある．

3.　室内模型実験の概要

(1)　実験材料

a)　実験状況

写真-2 に実験状況を示す．土槽として底付き塩ビ管（Φ=30cm，h=30cm）を用いた．塩ビ管の内側に 0.1 ㎜テフロンシートを 3 枚，底に 2 枚設置して実験を行った．室内の温度は 20 度で管理し，温度が結果に影響しないように配慮した．

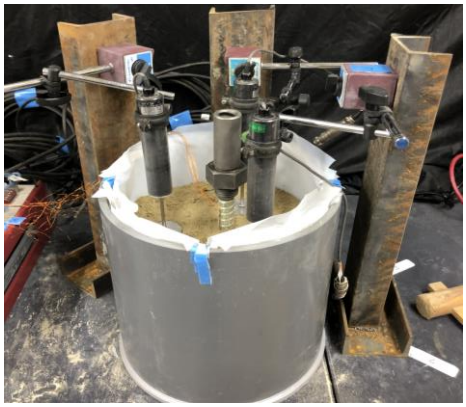

写真-2　模型実験状況

b)　ロックボルト

本実験の対象としたロックボルトは，前章で述べたものと同じ材質のロックボルトを使用した．径は同一とし，模型実験の制約より長さを 30cm に切断して用いた．なお，ロックボルトには約3cm間隔，片面6点ずつ計12点にひずみゲージを貼り付け，ひずみを測定するとともに，ゆるみ領域表面となる土槽の表面の変位を計測した．

c)　定着域を模擬する材料

定着域の模擬にはドライモルタルを使用した．このドライモルタルを水セメント比 36.3%として，練混ぜた．ドライモルタルの配合表を**表-4** に示す．

d)　ゆるみ領域を模擬する材料

ゆるみ領域の模擬にあたっては，豊浦砂と静的破砕剤を使用し，それらを**表-5** に示す重量比で混合し模擬地山材料を作製した．以降，本実験では「ゆるみ領域」と称する．

(2)　実験ケース

ロックボルトの種類や定着域の有無と大小，ゆるみ領域の大小によって 14 ケースの実験を行った．**表-6** と**図-4** に実験ケース一覧と実験ケース概要について示す．

ケース 1～2 は比較の対象として，ロックボルトを設置せず，ゆるみ領域等，地山の挙動を把握するために行ったものである．また，ケース 3～6 は地山の模擬として豊浦砂とゆるみ領域を仮定し，ロックボルトを設置したもの，ケース 7～14 は定着域を設置し，地山の模擬としてケース 3～6 と同様の考えで豊浦砂とゆるみ領域を配置したものである．

表-4　ドライモルタル配合表

	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-5　ゆるみ領域の配合（重量比）

	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

表-6　実験ケース一覧

	定着域無		定着域小	定着域大
ゆるみ領域小	ケース 1 RB 無	ケース 3 D22	ケース 7 D22	ケース 11 D22
		ケース 4 CG22S	ケース 8 CG22S	ケース 12 CG22S
ゆるみ領域大	ケース 2 RB 無	ケース 5 D22	ケース 9 D22	ケース 13 D22
		ケース 6 CG22S	ケース 10 CG22S	ケース 14 CG22S

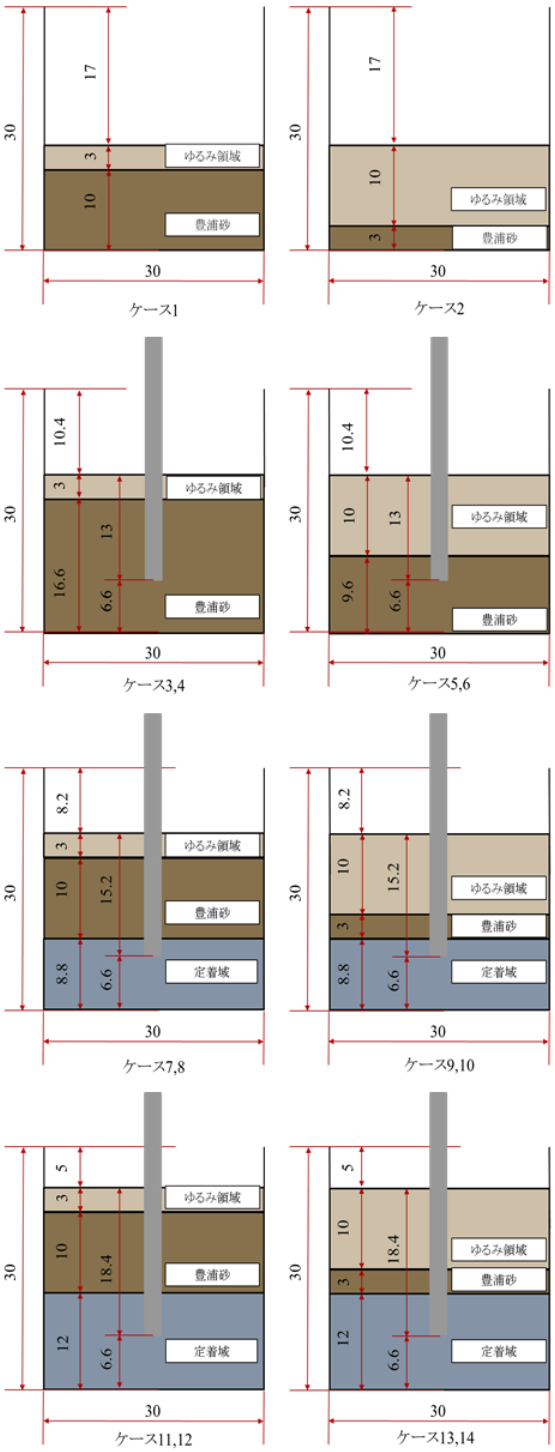

図-4　実験ケース概要（単位:cm）

(3)　実験手順

ドライモルタル打設後すぐに写真-3 のようにロックボルトを設置し，24 時間経過後に硬化を確認した後に豊浦砂とゆるみ領域を所定の位置まで打設した．定着域が無い場合はこの段階でロックボルトを設置する．ロックボルトに貼り付けたひずみゲージによりひずみを，また写真-4 のようにゆるみ領域表面に直径 5cm の鋼製の円盤を 3 枚置き，その上に変位計をそれぞれ設置することによりゆるみ領域表面の変位を測定した．

写真-3　ロックボルト設置

写真-4　変位計設置

4. 検討結果

(1) 原位置引抜き試験

a) 引抜き試験結果

引抜き試験を各 case それぞれ 4 回ずつ行い，得られた荷重と変位の関係の Case 1 から Case 4 をそれぞれ**図-5** から**図-8** に示す．試験の観察結果からすべての case においてロックボルトの破断や降伏したような挙動は見られず，ロックボルトとモルタルの間の付着が切れた形でロックボルトが引き抜けた可能性が高いと考えられる．またロックボルトのジャッキを取り付けるねじ部分が短かったことにより，引抜き時にねじ部がつぶれてしまい，最後まで引き抜けないケースがあった．

Case 1，2 の異形棒鋼ロックボルトの結果では引抜きに必要な最大荷重も変位量もあまり差はない結果となった．また，Case 3，4 の GFRP ロックボルトの結果ではどちらも荷重が 150kN に達しており引抜きに必要な最大荷重の差を比べることが不可能であった．変位量を比べると全面定着より先端定着の方が大きくなっていることが分かる．

また，Case 1 の異形棒鋼ロックボルト全面定着と Case 3 の GFRP ロックボルト全面定着を比べると引抜きに必要な最大荷重は Case 3 の方が大きくなっている．これよりドライモルタルとロックボルトの付着性は本試験においては異形棒鋼ロックボルトよりも GFRP ロックボルトの方が良い可能性があると考えられる．変位量を比べると Case 3 の方がかなり大きくなっているが，これは GFRP ロックボルトの方が弾性係数が小さいため変形しやすく，このような結果が得られたと考えられる．

b) 地山等の状況

ロックボルト引き抜き後，ロックボルト周辺の吹付けコンクリートにはひび割れなどの変状は無く，見た目は引抜き前と全く同じ状況であった．

c) 見かけの弾性係数の考察

引抜き試験の荷重と変位量の結果からボルトの見かけの弾性係数を求めたものと，材料自体の弾性係数を比較したものを**表-7** に示す．異形棒鋼ロックボルトでは全面定着と先端定着ともに材料自体の弾性係数より大きくなったが定着長による差はわずかであった．GFRP ロックボルトでは全面定着は材料自体の弾性係数より大きくなったが，先端定着では変わらなかった．よって異形棒鋼ロックボルトは材料自体の弾性係数が大きいためモルタルで定着されても見かけの弾性係数はあまり変わらないが，GFRP ロックボルトは材料自体の弾性係数が小さく変形しやすいためモルタルで全面定着することで変形しにくくなると考えられる．このことから弾性係数の小さな材料をロックボルトとして使う場合には定着長の影響が大きく現れる可能性があると考えられる．

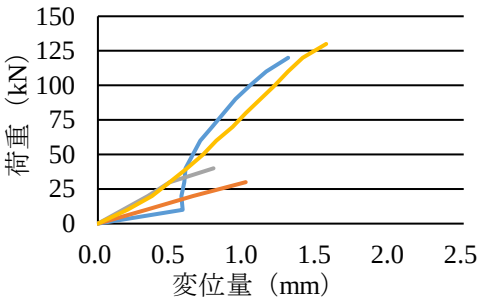

図-5 荷重変位曲線 Case1

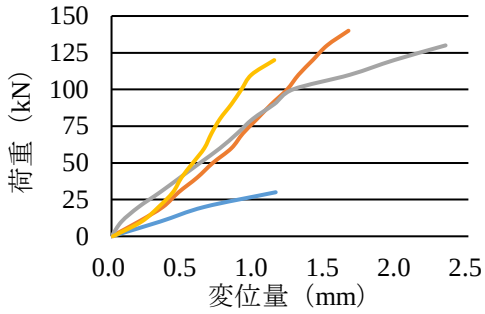

図-6 荷重変位曲線 Case2

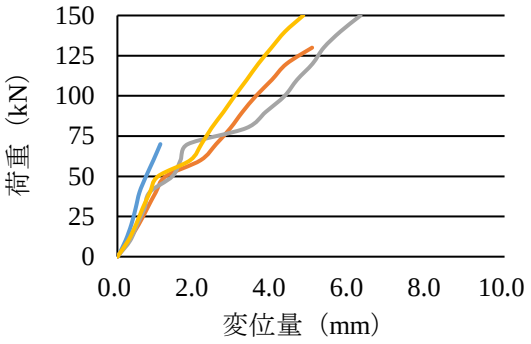

図-7 荷重変位曲線 Case 3

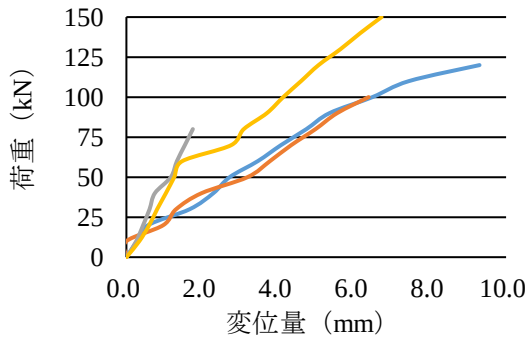

図-8 荷重変位曲線 Case 4

(2)　室内模型実験

a)　変位

図-9 および図-10 にロックボルトが無いケースと異形棒鋼と GFRP のそれぞれのケースの平均変位量を示す．これらの図より，全てのケースでロックボルトを設置することによって，変位抑制効果が見られ，変位が減少していることが分かる．図-9 より，異形棒鋼は定着域がある場合に特に大きな変位抑制効果があることが確認された．しかし，ケース 11 と 13 において定着域の大小で比較するとゆるみ領域が小さい場合は定着域が大きい方が効果が高いが，ゆるみ領域が大きい場合は定着域が小さい方が効果が高い結果となった．このことから定着域の大小は発生する変位への抑制効果(以降，変位抑制効果)の発揮に関係が乏しい可能性が考えられる．これに対し図-10 より，GFRP は定着域がない場合でも一定程度の変位抑制効果があるが，定着域がある場合でも変位は約 5 割減までとなっており，GFRP の変位抑制効果に定着域の有無，大小は関連していない可能性が考えられる．以上より，異形棒鋼は大きな変位抑制効果を発揮させるためには定着が重要であること，GFRP は定着の有無，大小は関係なく効果を発揮するが，変位の大幅な抑制を期待できるかに関してはさらなる検証が必要であることが確認された．

表-7　見かけの弾性係数の比較

ロックボルト種類		弾性係数 (kN/mm²)
異形棒鋼 ロックボルト	全面定着	229
	先端定着	212
	材料自体	205
GFRP ロックボルト	全面定着	71
	先端定着	44
	材料自体	44

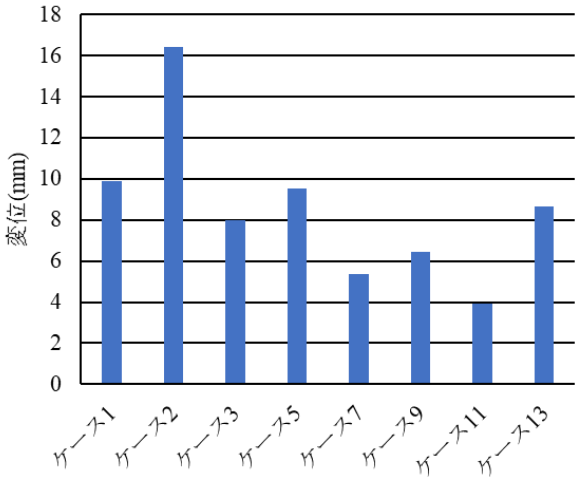

図-9　異形棒鋼平均変位量

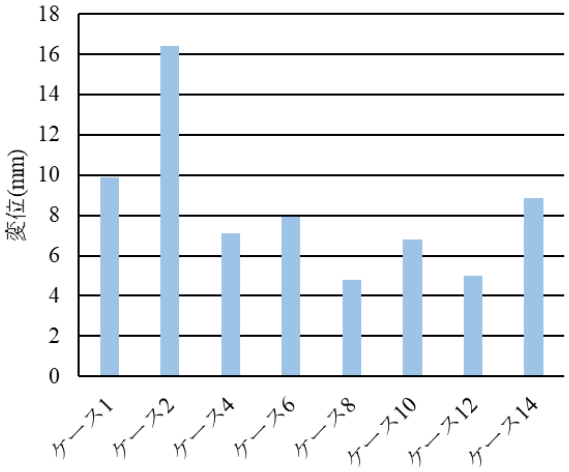

図-10　GFRP 平均変位量

b)　ひずみ

図-11 および図-12 に異形棒鋼と GFRP それぞれの 48 時間後のひずみゲージで測定されたひずみの平均の分布図を示す．これらより，ケース 3，4，6，9，10 では圧縮ひずみが生じる部分があることが確認される．ケース 3，4，6 は定着域がないケースであるので，ロックボルトが固定されず模擬地山材料の膨張による圧縮量によって圧縮ひずみが生じた可能性があると考えられる．しかしケース 5 では引張ひずみが生じているため，実験の再現性も考慮した検討が必要であると考える．ケース 9，10 は定着域があるケースのため引張ひずみが生じると考えられるが，圧縮ひずみが生じたため，圧縮ひずみが生じるケースであるのか否かを確認するために，上記と同様，再現性を含めて実験する必要がある．

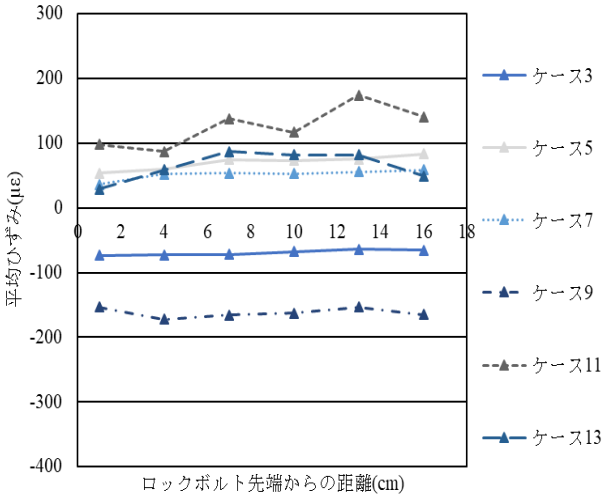

図-11　異形棒鋼の 48 時間後平均ひずみ

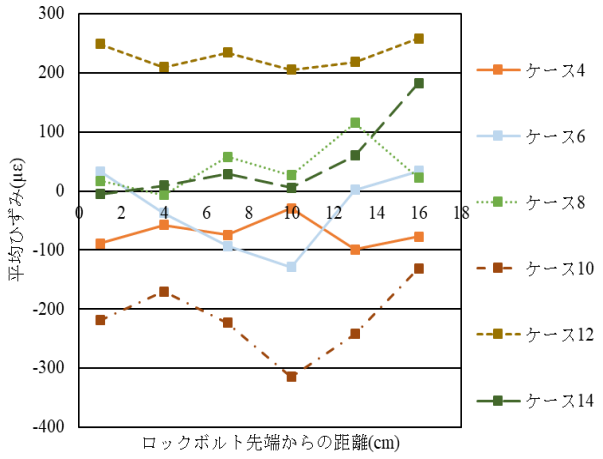

図-12 GFRP の 48 時間後平均ひずみ

5. まとめ

原位置引抜き試験より，異形棒鋼ロックボルトは定着長による引抜き荷重の差がほとんどなく，全面定着と先端定着でみかけの弾性係数の差もわずかであった．また GFRP ロックボルトは異形棒鋼よりもドライモルタルとの付着性が良く引抜き荷重が大きくなった．ロックボルトと定着材を含めた見かけの弾性係数に着目すると，全面定着では材料自体の弾性係数より大きくなったが，先端定着では変わらなかった．以上のことから弾性係数の小さな材料をロックボルトとして使う場合には定着長の影響が大きく現れる可能性があると考えられる．

また，室内模型実験の結果より，GFRP は本実験の条件下では変位抑制効果が一定程度確認できること，異形棒鋼は定着域の大小に関わらず，定着がある場合に変位抑制効果を発揮することが確認された．また，定着が期待できない地山ではロックボルトに圧縮力が生じる可能性があることも確認され，圧縮に関する何らかの性能の必要性も示唆されると考えられる．

両者の結果を総合的に判断すると，ロックボルトの定着はロックボルトの引抜き挙動や変位抑制効果に影響があることが分かった．しかし，定着の大小による差はロックボルトの種類によって異なると考えらえる．

今後の課題をまとめると，室内模型実験に関しては，長期間にわたって継続する外力の作用や圧縮力を生じる条件下を含め，種々の地山状態や定着状況の再現をしたうえで複数回の実験を行うことで検討をしていく必要があると考えられる．また，ベアリングプレート等の拘束の影響を考慮した検討する必要があること，より実際の施工条件に近づけた上で力学的挙動に関する検証が必要であると考えられる．

原位置引抜き試験に関しては，新たな種類のロックボルトやロックボルト本体の長さを変えた実験を実施することや数値解析を行い，実験結果との比較を行っていく必要があると考えられる．

そして将来的には，様々な種類のロックボルトの引抜き挙動等の引抜き特性も考慮しながら力学的性能についての検討を深度化させ，室内模型実験によって明らかになった変位の抑制効果と性能の指標との関連性，圧縮に関する何らかの性能が必要か否かについて検討を進めていく必要があると考えられる．

謝辞

原位置引抜き試験の実施にあたっては中日本高速道路株式会社のご協力に対して謝意を表します．また試験全般の実施にあたって，国立研究開発法人土木研究所森本智氏，清水建設淡路動太氏，ケー・エフ・シー岡部正氏らのご協力，ご助言に謝意を表します．

(2020. 8. 7 受付)

STUDY ON MECHANICAL PERFORMANCE OF ROCK BOLTS MADE OF DIFFERENT MATERIALS

Yuto GOTO, Takuma MATSUMOTO and Nobuharu ISAGO

The tensile resistance and shear resistance are shown as performance of rockbolt, however, other performance such as compression and erosion should be examined. Various types of rockbolt have been developed recently. Judgement for its adoption is difficult du to the lack of past experience in tunneling and unclearness of satisfaction as use of support member in tunneling. In-situ model test considering the influence of ground loosening are and fixation area and pull-out test on site were carried out to gain the basic data of rockbolt behavior for the purpose of clarifying the performance index of bolting, in addition to the tensile capacity. The result indicated that the compressive force may occur under certain condition and influence of fixation with low elastic modulus may be large.