

(57) ロックボルトに対する地山およびモルタルの拘束効果に関する実験的および解析的研究(その1)

東急建設(株) ○ 齋 光司
 熊本大学工学部 尾原 祐三
 名古屋大学工学部 市川 康明
 名古屋大学工学部 川本 隆万

1. はじめに

NATMに代表されるロックボルト工法は、ロックボルトと周辺地山との複合構造をトンネル周辺に構築することによりトンネルを支保しようとする工法である。ロックボルトの作用効果の一つは、ロックボルトと地山間の相対変形によつて生じる地山への3軸拘束効果と考えられる。したがってロックボルトと地山間の付着・せん断特性を解明することは、ロックボルトの作用効果および設計等におけるロックボルトのモデル化を行なう際に重要な問題である。しかし、ロックボルトと地山間の付着特性は、ロックボルト・グラウト(充填材)・地山の3層の材料特性、3層相互間の寸法等の幾何学的条件、および地山内での応力状態等に影響され極めて複雑である。

従来の研究としては、ロックボルト引抜き試験時におけるロックボルト変位とロックボルトに沿うせん断応力の関係を Farmer¹⁾ が導いており、Hagedorn²⁾ は種々のロックボルト押抜き実験を行ないピーク強度等を測定している。Coates³⁾ らは、ロックボルト引抜き試験の場合のロックボルトに沿う3次元応力分布を有限要素法により計算し、応力分布とロックボルトおよび岩石の弾性係数との相関を述べている。また、長野、高木⁴⁾ は、ロックボルトの形状、グラウト材、岩質等を変化させた各種のロックボルト引抜き試験を実施している。その結果、ロックボルトの定着力は必ずしもグラウトの接着力に依存せず、ロックボルトのふしに大きく支配されることを報告しており、ふしの形状や寸法がロックボルトの付着および拘束に及ぼす効果が推察されている。

本研究では、ロックボルトの付着および拘束効果に対してロックボルトの特性が、ヒリワケダイレイタニール特性がどのような影響を及ぼすかについて調べるため、ロックボルト押抜き実験を行なうとともに、有限要素法による実験結果のシミュレーションを行なった。

2. 実験概要

2.1 実験方法

実験は図-1に示すように直径120mm、高さ200mmの円柱形岩石供試体の中央を穿孔し、ロックボルトを挿入してグラウトを固め、ロックボルトを三軸セル内で押抜くことにより行なった。岩石として大谷石(凝灰岩)を用い、穿孔したボアホール径は50mm、27mmの2種類である。岩石にはゴムスリーブを付け、側圧は0~20%の範囲で加えた。グラウト材としてモルタルを用いた。モルタルおよび岩石の材料試験結果を表-1に示す。実験に使用したロックボルトは径19mmの異形および丸棒鉄筋、径13mmの異形鉄筋の3種類とした。異形鉄筋のふしの形状、寸法を図-2に示す。なお、鉄筋の押抜きには高剛性圧縮試験機(max100tf)を用い変位制御載荷により行なった。

2.2 実験の種類および測定項目

本実験では鉄筋径、鉄筋の形状、岩石のボアホール径、岩石の拘束圧の4項目を変化させて行なった。表-2に実験の種類を示す。

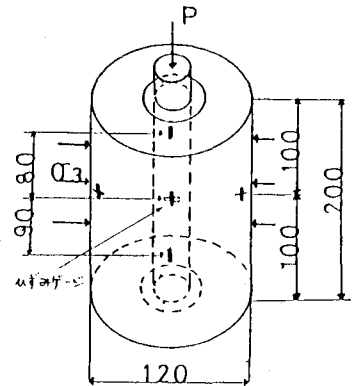


図-1 実験方法

表-1 モルタルおよび岩石の物性値

	一軸圧縮強度 (kg/cm ²)	引張強度 (kg/cm ²)	C (kg/cm ²)	φ (%)	E (kg/cm ²)
モルタル	147	13	30	43	38000
岩石	110	15	30	37	18000

測定は主として鉄筋頭部での載荷重および変位を行なった。一部の測定項目として図-1に示したように鉄筋のひずみ分布、岩石表面でのひずみの測定を行なった。鉄筋のひずみは鉄筋の両側に溝をほり、ひずみゲージを貼付した後コーティング材を埋め戻すことにより測定した。また、実験後の供試体の状況も観察した。

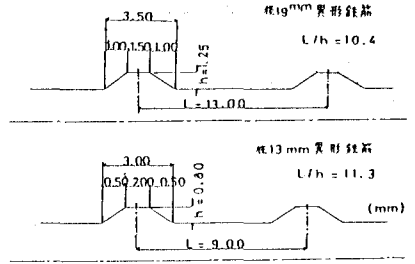


図-2 異形鉄筋のひし寸法・形状

3. 実験結果

3.1 載荷荷重-鉄筋変位曲線

図-3(a),(b),(c)に鉄筋ごとの載荷荷重-鉄筋頭部変位曲線を示す。図より、2.2に述べた4種類のパラメータの変化によりピーク強度、残留強度、曲線の形状等が複雑に変化することが認められる。図-4(a),(b),(c)に岩石の拘束圧を0, 10, 20 MPaと変化させるときの荷重-変位曲線をそれぞれのピーク強度で正規化した図を示す。図より、異形鉄筋はその径にこだわらずほとんど類似の曲線となるのに対し、丸棒鉄筋は異形鉄筋と異なる曲線を示すのがわかる。また、岩石の拘束圧の増加に伴いピーク強度時の鉄筋頭部変位量が異形鉄筋ではいずれも増加しているが、丸棒鉄筋では変化が少ない。ただし、いずれのケースにおいても岩石の拘束圧の増加に伴いピーク強度に対する残留強度の比が増加し、じん性を帯びることが認められる。

表-2 実験の種類

名称	鉄筋径	拘束圧 (MPa)	ピーク強度 (kgf/cm ²)	残留強度 (kgf/cm ²)
13-27-0	13	異形	27	0
13-27-5	13	異形	27	5
13-27-10	13	異形	27	10
13-27-15	13	異形	27	15
13-27-20	13	異形	27	20
13-58-0	13	異形	58	0
19-27-0	19	異形	27	0
19-27-5	19	異形	27	5
19-27-10	19	異形	27	10
19-58-0	19	異形	58	0
①9-27-0	19	丸棒	27	0
①9-27-10	19	丸棒	27	10
①9-27-20	19	丸棒	27	20
①9-58-0	19	丸棒	58	0

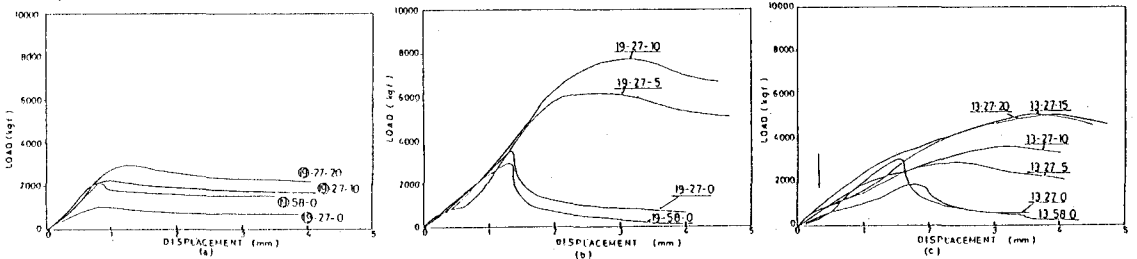


図-3 載荷荷重-鉄筋頭部変位曲線 (a), (b), (c)

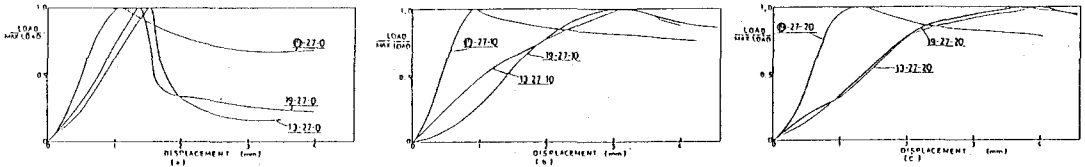
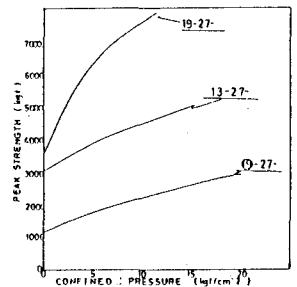


図-4 正規化した荷重-頭部変位曲線 (a), (b), (c)

図-5にピーク強度と拘束圧との関係を示すが、拘束圧に対するピーク強度の増加率(グラフの勾配)が異形鉄筋と丸棒鉄筋とで異なり、異形の方がより鉄筋の拘束力が発揮されることがわかる。これは、鉄筋のひしにより鉄筋とモルタル肉のせん断挙動が変化することを示唆しているものと考えられる。

図-5 ピーク強度 ~ 拘束圧 関係図



3.2 鉄筋および岩石供試体のひずみ

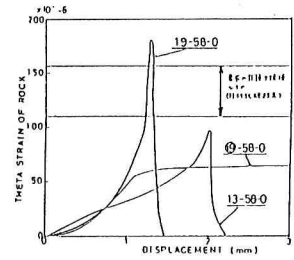
図-6に鉄筋頭部変位と岩石供試体の周方向ひずみの関係を示す。図より、異形鉄筋と丸棒鉄筋とは同一鉄筋変位量に対する岩石の周方向ひずみ量に差異が生じ、異形鉄筋の方がより大きな σ - ϵ - $Tension$ を岩石に与えていることがわかる。なお、異形鉄筋の場合、急激にひずみが減少するのは、岩石が割れることによる応力の解放によるものである。

図-7に岩石の拘束圧が 0.43 kg/cm^2 の場合の径 19 mm の丸棒鉄筋および異形鉄筋の軸方向ひずみ分布と鉄筋頭部荷重別に示す。丸棒鉄筋の場合、鉄筋頭部より約 100 mm の間ですべりの進行が頭著であり、荷重レベルが増大するに伴ないモルタルと鉄筋間の付着力が弱くなることが認められる。しかし、異形鉄筋では丸棒鉄筋と同じ荷重レベルに対して鉄筋頭部より約 100 mm の間のモルタルの付着力は大きく、これは鉄筋の荷重(あるいは変形)の進行に対してそれほど低下しない。このことは、図-4に示した曲線の変形挙動に対する異形鉄筋と丸棒鉄筋の違い、あるいは図-6で示した岩石供試体に作用する周方向ひずみ量の違いと関連して、鉄筋と周辺材料のせん断に対して異形鉄筋と丸棒鉄筋とは周辺材料の拘束・付着作用が大きく異なることを示す結果となっている。

3.3 実験後の状況

実験後の供試体の状況を見ると、丸棒鉄筋ではすべてのケースにおいて写真-1にみられるように、鉄筋のみがすべっており、モルタルは岩石供試体と付着したままほとんど動いていない。一方、異形鉄筋では岩石のポアホール径により状況が異なっている。ポアホール径が 27 mm の場合は鉄筋径にほぼ等しい鉄筋とモルタルは岩石から抜け落ちている。(写真-2) 付着破壊はモルタルと岩石の両方で生じているが、これは両者の強度が同レベルによるものであろう。ポアホール径が 58 mm の場合は鉄筋がすべり落ちることが認められた。(写真-3) ただし、この場合でも後述するように鉄筋とモルタル間で相対変形が生じており、異形鉄筋のせん断挙動が丸棒鉄筋のそれと比べて極めて複雑であることが観察された。

異形鉄筋の場合は他のパラメータの違いにもかかわらずすべて岩石の破壊が生じているのに対し、(写真-4)、丸棒鉄筋では破壊がみられず、図-6のひずみ挙動とよく説明している。また、実験後のモルタル付着状況と写真-5に示す。(異形の場合)



(岩石の引張り破壊ひずみは $110 \sim 160 \times 10^{-6}$ 程度)

図-6 鉄筋頭部変位と岩石供試体の周方向引張ひずみの関係

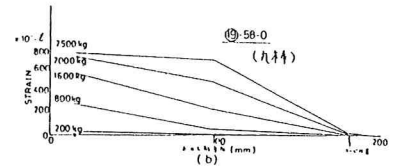
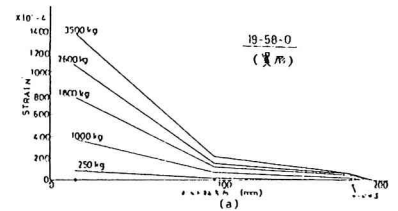


図-7 鉄筋軸方向ひずみ分布 (a), (b)

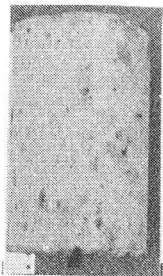


写真-1

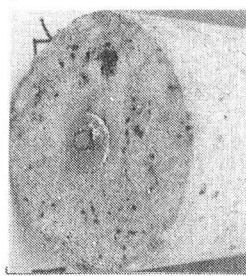


写真-2

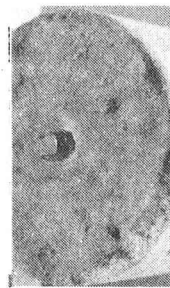


写真-3

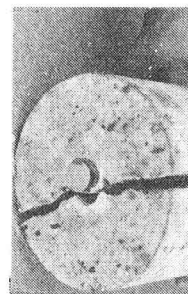


写真-4

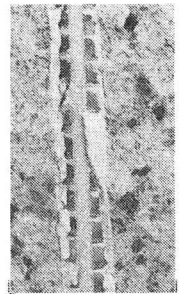


写真-5

4. 考察

図-8(a),(b)に岩石供試体のボアホール径が27mmと58mmの場合の実験後の鉄筋およびモルタルの状況を示す。なお、(a)、(b)ともに径19mmの異形鉄筋の場合である。ボアホール径が58mmのときには(a)で示すように鉄筋の小しの下部にモルタルが圧縮・付着しており、このモルタルの界面でモルタル同士のせん断が行なわれていると考えられる。すなわち、鉄筋とモルタルの相対変位に伴い、小しの下部にモルタルのくさびが生成され、このくさびのすべりにより構造的なダイレイタンスが生じ、モルタルおよび岩石供試体に拘束(内圧)作用が働くものと思われる。事実、モルタルの側にも傾斜したせん断面がくっきりと浮かびあがっていた。一方、ボアホール径が27mmと小さいときには、(b)にみられるようにモルタル間ですべりが起こっているものの、モルタルのくさびは(a)に比べて小さい。このくさび(a)、(b)の大きさの違いは次のように考えられる。

(i) (a)の場合はボアホール径が小さいため、モルタルから伝達されるせん断応力は大きく、くさびが成長する前にモルタルと岩石間で付着破壊が生じ、そのすべりが支配的になる。逆に(b)の場合は伝達されるせん断応力が小さく、鉄筋とモルタル間のすべりが卓越することによりくさびが成長する。なお、構造的なダイレイタンスは回も回も生じており、異形鉄筋で岩石が破壊するのは、このダイレイタンスによる岩石の *Form-Tension Failure* によるものだろう。このダイレイタンスは図-8(a)において $d \cdot \sin \theta$ の水平方向強制変位としてモルタルに作用することになる。

- (ii) 図-9において示すように、鉄筋とモルタルの相互寸法条件により、厚肉あるいは薄肉円筒と仮定することができ、厚肉の場合、モルタルの内部でせん断応力の径変化が生じる。⁵⁾
- (iii) 同様に、モルタルの厚さの変化により、モルタル自身の材料的なダイレイタンス特性が変化する。

5. 解析

実験を有限要素法によりシミュレートした。解析結果については当日発表する。

6. おわりに

本実験により、異形鉄筋と丸棒鉄筋の付着作用の違いは鉄筋の小しによる周辺材料の構造的なダイレイタンスに伴う拘束効果があることが明らかになったと思われる。しかし、材料自身の特性による拘束も大きいと考えられ、その挙動は複雑である。今後、岩石や鉄筋寸法などを変化させた実験および解析を詳細に行なうことにより、定量的な説明をする必要があると思われる。本研究を進めるにあたり、名古屋大学工学部4年 井田宏正、伊東孝君、および岐阜工業高等専門学校5年 後藤敦君の多大の協力を得た。ここに感謝の意を表します。

参考文献 1) Farmer, I.W.; Stress Distribution along a Resin Grouted Rock Anchor, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 12, 1975
 2) H. Hagedorn; Synthetic Resin Grouted Tube Anchors, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1983
 3) Conley, D.F. and Yu, Y.S.; Three Dimensional Stress Distributions around a Cylindrical Hole and Anchor, *Int. Soc. Rock Mech.*, 1970
 4) 長野, 高木; ロックボルトの引抜き試験, トンネルと地下, 1982年11月
 5) 比角, 面村; ロックアンカーと岩盤の相互作用機構に関する基礎的研究, 柳井村組 技術研究年報, No. 8

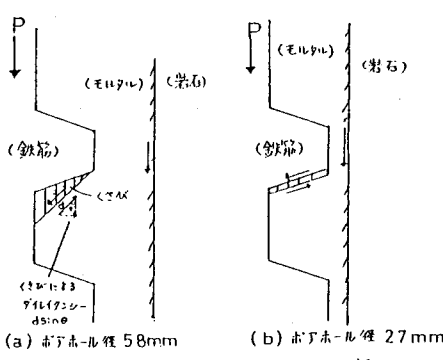


図-8 実験後のモルタルと鉄筋の状況

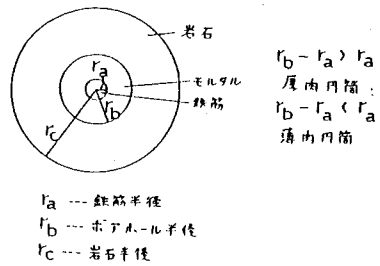


図-9 相互寸法条件

(57) Experiments and Analyses on confining effect to Rock Bolt considering Mortar and Rock (Part 1)

by Kouji Tei (Tokyu Institute on Const. Technology)
Yuzo Obara (Civil Eng. Dep., Kumamoto Univ.)
Yasuaki Ichikawa, Toshikazu Kawamoto
(Dep. of Geotechnical Eng., Nagoya Univ.)

The supporting effect of rock bolts used in Tunnel excavations is considered to be a lateral confinement on the Tunnel walls which caused a triaxial state of stress, increasing the stability of Tunnel excavations. The confinement effect of the bolt is largely influenced by the interaction between bolt and surrounding medium. However, this phenomena is not still well known. The confinement effect of the bolts depend upon many factors such as rock mass properties, state of stress, bonding of bolts and rock mass and their relative movements, etc.

Of these, the bonding of rock bolts and rock has been studied by carrying out some push out test in this reserch. Push out test on the rock bolts which installed with cement mortar in a hole in the centre of Oya-Tuff specimens of 120mm in diameter and 200mm in length.

The results obtained from the experimental studies are;

- 1) Bonding strength of the deformed bar is grater than the bar which has smooth surface.
- 2) The ratio of the diameter of bolt to the diameter of the hole has also effect on the bonding strength.
- 3) As the bonding of the bolt - mortar - rock decrease with increased deformation the Dilatancy of the mortar and wedge action comes into effect.
This Dilatancy and wedge action cause lateral pressure which give a strength between bolt and rock, though bonding has been destroyed.