

不連続面挙動を考慮したロックボルトメータの開発

Development of New Rockbolt Meter Considering Rock Discontinuous Behavior

山地 宏志 HIROSHI YAMACHI

高橋 直樹 NAOKI TAKAHASHI

土木技術部 中込 正貴 MASATAKA NAKAGOMI

トンネル周辺のロックボルトの支保効果を評価することはトンネル実務における最も重要な工学上の課題の一つである。しかしながら、従来の測定機器では実際のロックボルト挙動、特に岩盤不連続面を受ける挙動を現場計測で特定することが難しかった。

われわれは、ロックボルト挙動を評価し得る新しい概念のロックボルトメータを、OSVの概念を援用して開発した。本文はその測定原理と、実用性を検証するため実施した室内検証実験の結果を示すものである。

キーワード：ロックボルト挙動計測，OSV，岩盤不連続面，相互挙動

Evaluation of supporting effect of rock bolts around a tunnel is one of the significant engineering issues in practical tunneling. However conventional measuring devices can hardly detect practical behavior of rockbolts in filed measurements, especially when they are applied to rock discontinuities movements. The authors have been developed a new field measurement device for estimating the behavior of rockbolts using OSV(On-Site Data Visualization) technology. This paper shows its fundamental measuring mechanism and the result of the proof laboratory experiments in order to examine a practical applicability.

Key Words: Measurement for Rockbolt Behavior, OSV, Rock Discontinuity, Interaction Behavior

1. はじめに

ロックボルトは、高い支保効果が期待されるトンネル支保部材であるが、その支保効果は、地山変形との相互作用によって発現されるため、その挙動と効果を定量的に評価することが難しい。特に、地山の不連続面に打設されたロックボルトの挙動を正しく把握することは難しい。

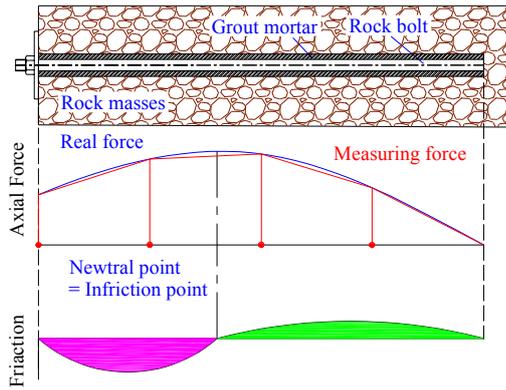
今日、一般的に用いられるひずみゲージを利用したロックボルト軸力計は、対象地山が比較的均質な連続体とみなせる場合、ほぼ実際の軸力分布に近い分布を得ることができるが、不連続面が存在する場合、実際とは大きく異なる分布を与える可能性があることに注意が必要である。ロックボルト微小要素の力のつりあいは次式のように示すことができる。

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = \frac{-2}{a} \tau_x \quad (1)$$

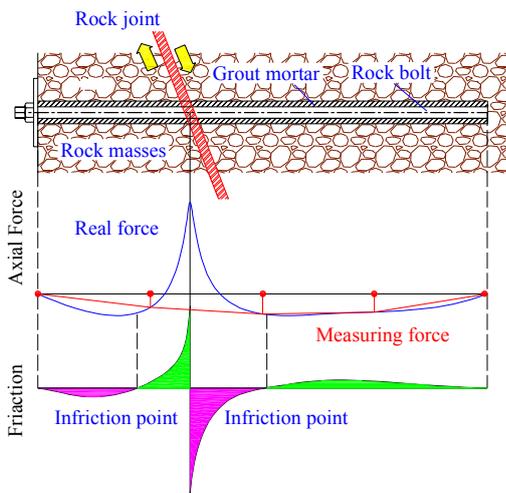
ここで、 σ_x はロックボルト軸方向の垂直応力を、また τ_x はロックボルト - グラウト境界に作用する付着抵抗を、また x はロックボルトに沿う局所座標系を示す。

式(1)の、 σ_x にロックボルト断面積を乗じた値はロックボルト軸力を示すから、式(1)から明らかなように、付着抵抗 $\tau_x = 0$ のときロックボルト軸力は極値を取る。ロックボルト周辺の地山が連続体とみなせる場合、ロックボルト軸力分布は図-1(a)のように、放物線状の分布を呈し、付着抵抗は最大軸力発生点を境に作用方向が逆となる¹⁾²⁾。この意味で、最大軸力発生点は中立点と呼ばれることもある。このとき、ひずみゲージタイプの軸力計が与える軸力分布(赤線)は、実際の軸力分布とはほぼ等価な分布を与えることが期待される。

一方、ロックボルトが打設された不連続面に相対変位が生じた場合、ロックボルト軸力は図-2(b)のように不連続面部で卓越し、付着抵抗も不連続面となり、その左右で作用方向が逆となる²⁾。今、図-2(b)に示す位置にゲ



(a) 連続性地山における軸力分布



(b) 不連続面に相対変位が生じた場合の軸力分布

図-1 ロックボルト軸力 - 付着抵抗分布の関係

ージが貼付されているならば、計測上から与えられる軸力は、図の赤線で示されるようにすべて圧縮力となる。当然のことながら、ゲージ貼付位置と不連続面の位置関係によって、計測上の軸力分布は異なるが、ロックボルト全体に圧縮の軸力が作用するような計測データが得られる原因の一つは、上記のような不連続面挙動に起因すると考えられる。

ロックボルトの支保効果は、多くの研究者が指摘するように、不連続面の挙動を拘束することによって発現される^{2)~8)}。したがって、ロックボルトの支保効果を計測によって評価しようとする場合、不連続面の挙動を受けたロックボルトの挙動を正しく評価する必要がある。われわれは、このように不連続面挙動を受けるロックボルトの挙動を計測するために新しい概念の測定装置を開発した。本文は、その新しいロックボルト計の測定機構を示し、検証実験結果を示すとともに、その実用性について考察を行うものである。

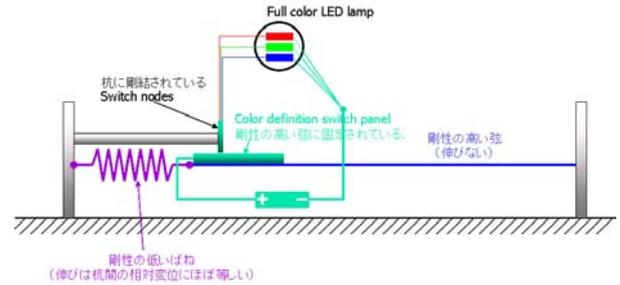


図-2 LEDS の測定原理

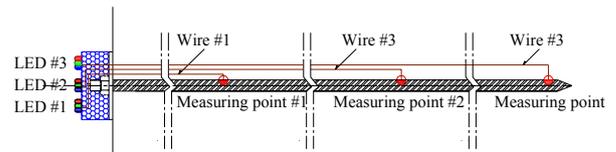


図-3 ボルト挙動測定概念図



写真-1 筐体外観

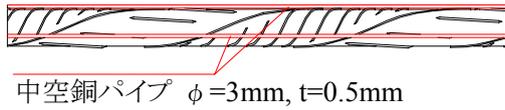
写真-2 ワイヤー連結部

2. ロックボルト計の測定機構と実装

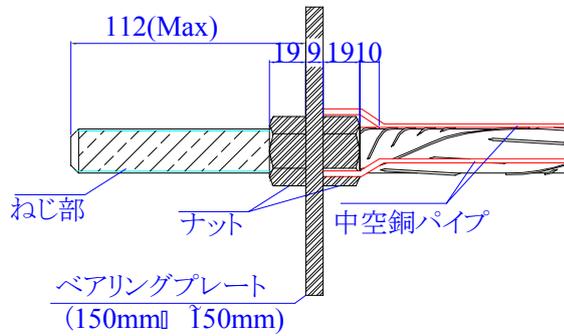
新しく開発したロックボルト挙動の計測機器は、神戸大学芥川真一研究室が開発した LEDS (Light Emitting Displacement Sensor) の機構を援用したものである。LEDS は、図-2に模式的に示すように、二点間の弦の変位を先端のばねが検知し、そのばねの伸びによってLED発光スイッチが切り替わり、変位をLED発光色によって表示する変位計である。

今回試作した測定器は、図-3に概念的に示すように、ロックボルト上の任意点間の相対変位をワイヤーによって測定し、このワイヤーを LEDS の先端ばねに連結することで変位を LEDS の発光色によって表示しようとするものである。ワイヤーと先端ばねは、写真-1に示す筐体内部で連結される。この筐体は、ベアリングプレート上に設置できるよう、ベアリングプレートと同一寸法 (150mm(W) × 150mm(L)) で作成され、内部には、写真-2に示すように3系統の先端ばねや回路、および表示LED等を実装される。なお、当然のことながら、当該の筐体は防湿・防塵性を有するものである。

また、ワイヤーはロックボルト定着材により固結しないよう、図-4(a)のようにφ1mmの中空アルミ管内部



(a) ワイヤー養生のための中空アルミ管設置要領



(b) ベアリングプレート取合い部加工要領

図-4 測定用ワイヤー養生方法

を通し、管体との接合部は図-4(b)のように中空アルミ管を加工した。ベアリングプレート上に装着できる寸法で実装した。

ベアリングプレートに設置する管体は、容易に取り外しが可能なため、何回でも再利用が可能である。また、ロックボルトへの測定用ワイヤーの設置も、従来のロックボルト軸力計加工に比べて容易である。さらに、取り付けや配線も、大幅に簡便化されるため、ボルト計測の大幅なコスト低減が可能となる。

3. ロックボルト挙動計測の機構と実装

前章で設計・実装した、ロックボルト挙動計測計の妥当性を検証するため、室内の引張試験を実施した。その結果と考察を以下に示す。

(1) ロックボルト母材引張試験

ロックボルトの伸び挙動に対する開発装置の変位検出性能を検証するため、ロックボルト母材のみを引張り、ロックボルトの伸びとLED発光色の変化を確認した。

図-5に試験方法を示す。試験ではL=3,000mmのロックボルトを使用し、このロックボルト上のP1=970mm, P2=1,960mm, P3=2,950mmの3点における相対変位を開発装置により測定する。ロックボルトは、内径25mmの鋼管中に挿入し、この鋼管を図-5の要領で反力壁に固定して、頭部をセンターホールジャッキにより引っ張り荷重する。なお、開発装置は荷重重に耐える構造ではないため、荷重と反対側端部のベアリングプレート上に設置

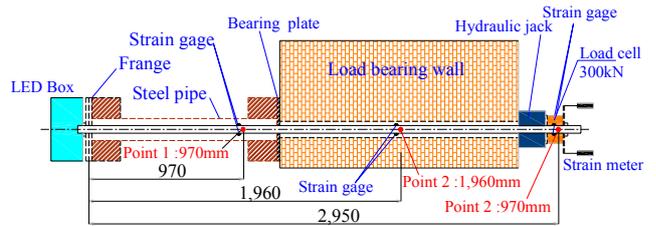


図-5 ロックボルト母材引張試験方法

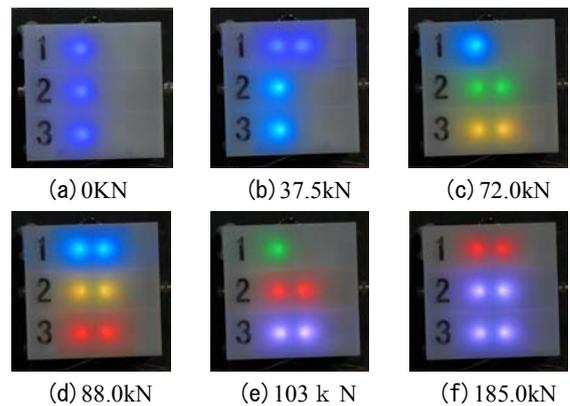


写真-3 荷重過程における発光色の変化

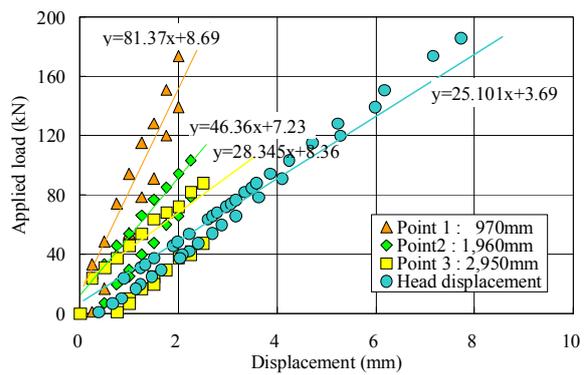


図-6 各測定点の荷重 - 測定変位関係

した。

荷重は、手動の油圧ポンプにより実施し、任意の測定点のLED発行色が変わった時点で、荷重を保持し、変化時の荷重と発光色を記録した。なお、最大荷重はロックボルト破断強度の90%にあたる185kNとし、最大荷重到達後、徐々に除荷を行った。除荷過程においてもLED発光色が変わった時点で、その荷重と発光色を記録した。写真-3に荷重過程における発光色の変化を示し、図-6に各測定点における荷重 - 変位関係を示す。なお、図-6は、各測定点のLED発光色変化時点の荷重荷重と各発光色の最小変位をプロットしたものである。

また、発光色と変位の関係は表-1に示すものであり、開発装置は任意の測定点の変位レベルを2つのLEDの発光色で示すため、11段階の表示が可能である。

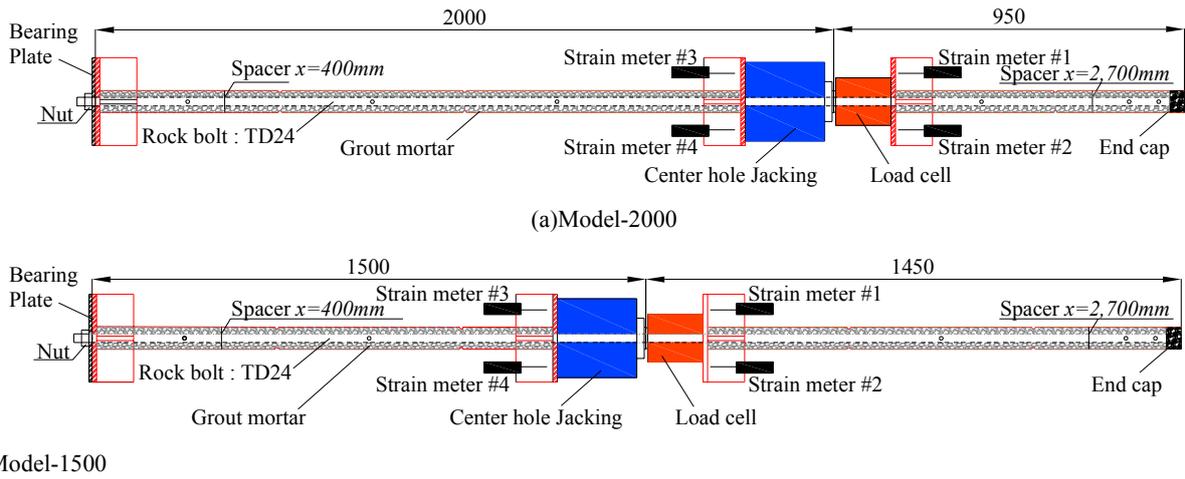


図-7 岩盤不連続面模擬試験模式図

図-6から、荷重過程における各測定点の荷重重と測定変位の関係は、良好な線形関係にあることが分かる。除荷過程では、若干、下側に凸な履歴をとるが、これは鋼材の引張試験で一般に見られる傾向であり、開発装置に

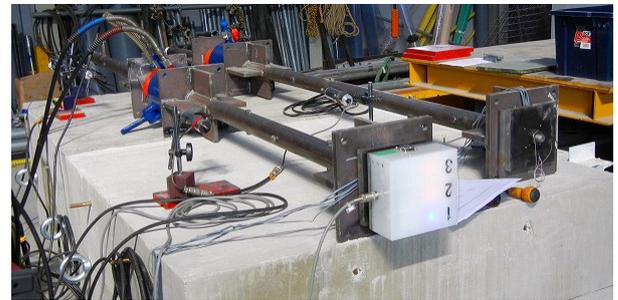


写真-4 岩盤不連続面模擬試験状況

はロックボルト母材の伸び挙動に追随するものと判断できる。

図-6中に、荷重過程の荷重重 - 測定変位関係の直線近似線とその近似式を示した。ストレインメータで測定した頭部変位と P3=2,950mm の変位は、いずれもロックボルト母材の全変位に相当し、二つの勾配は一致しなければならない。図-6をみると、その相対誤差は12.9%に収まっており、工学的に許容される誤差であると判断する。また、測定点1, 2, 3の測定長(ワイヤー)は、ほぼ1:2:3であるから、その勾配は3:2:1の比となることが求められ、図-6中の近似式の勾配が2.87:1.648:1.00であることから、ほぼこの比に従うことが示された。

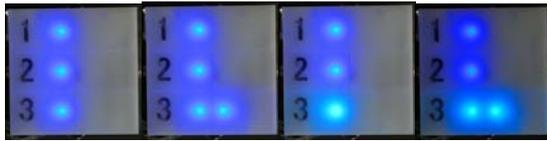
さらに、近似式の右辺第2項は、有意な変位の測定が開始される荷重を意味し、これ以下の荷重が作用しても測定範囲できない不感域となる。ストレインメータで測定した頭部変位に関しても、3.69kNの不感域が現れてい

るが、これは試験治具相互間の緩みやストレインメータの当たりによるものと考えられる。一方、開発装置の不感域は7.2~8.7kNであるが、この値には、頭部変位と同様に、試験治具相互間の緩み等に起因する不感域が含まれるから、これを考慮すると3.5~5.0kN程度の不感域を開発装置が独自に持つものと推測される。しかしながら、ロックボルトに5kN程度の荷重が作用しても、ロックボルトや地山の安定性に問題が発生する可能性はなく、現状の不感域でも現場計測機器としての実用性は担保されるものとする。

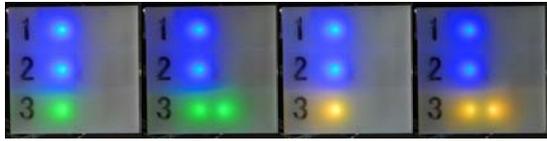
(2) 模擬不連続面開口試験

岩盤中の不連続面に打設されたロックボルトの挙動を、開発装置によりどのように測定されるかを検証するため、鋼管の継ぎ目部で不連続面を模擬し、これを油圧ジャッキにより開口させる実験を実施した。図-7、および写真-4に実験方法を示す。

図-7に示すように、ロックボルトは引張試験と同様にTD24を用い、内径50mmの二本の鋼管内を接続した状態で、モルタルで全面定着する。鋼管の接続部で開口するために、接続部両側にフランジを設け、このフランジにより反力を確保して、油圧ジャッキにより押し広げを行う。開発装置の筐体は、図-7の左端部にあるベアリン



(a) 1.3N (b) 58.9kN (c) 100.9kN (d) 192.4kN

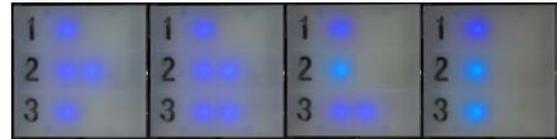


(e) 217.4kN (f) 245.8kN (g) 257.2kN (h) 270.2kN

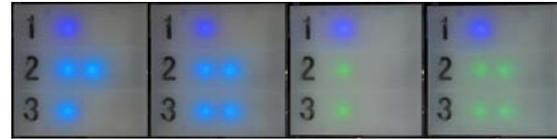


(i) 278.9kN (j) 298.1kN (k) 305.4kN

写真-5 Model-2000の発光色の変化



(a) 128.0kN (b) 163.2kN (c) 182.4kN (d) 208.0kN



(e) 231.6kN (f) 23.64kN (g) 250.8kN (h) 272.0kN



(i) 231.6kN (j) 23.64kN (k) 250.8kN (l) 272.0kN

写真-6 Model-1500の発光色の変化

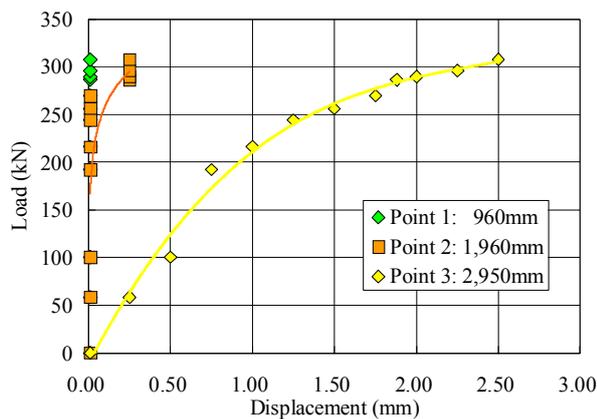


図-8 Model-2000の載荷重 - 測定変位関係

プレート上に設置し、計測点は、引張試験と同様に、 $P1=970\text{mm}$ 、 $P2=1,960\text{mm}$ 、 $P3=2,950\text{mm}$ の3点とした。荷重はロックボルトの破断まで載荷し、任意の測定点のLED発光色が変化した時点で、荷重を保持し、変化時の荷重と発光色を記録する。さらに、図-7に示すように、不連続面位置を端部から2,000mmと1,500mmの二つとし、それぞれModel-2000、Model-1500とした。

写真-7に実験時の発光色の変化を、また図-8にModel-2000の作用荷重と開発装置で測定された変位関係を示す。図-7(a)から予測されるように、当該実験の不連続面の開口に伴い相対変位が生じるのは、 $P3=2,950\text{mm}$ の点だけであり、写真-7、図-10に示されるように、明らかに破断付近まで、 $P3$ 以外の測定点に変位は生じておらず、ロックボルトは想定どおりの挙動を示し、これを開発装置が適格に測定し得たことが確認できる。なお、載荷重278.9kNで $P2=1,960\text{mm}$ に0.25mmの相対変位

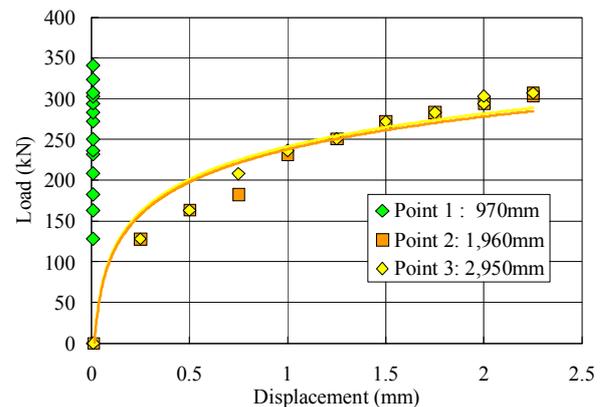


図-9 Model-1500の載荷重 - 測定変位関係

が生じたが、変位レベルが小さく、その理由は詳らかでない。また、比較的低い荷重レベルで載荷重 - 測定変位の勾配が傾くが、これはロックボルト母材周辺の定着モルタルにひび割れを生じため、ロックボルト - 定着材間の付着抵抗が低減するためと考えられる。

写真-6にModel-1500実験時の発光色の変化を、また図-9に作用荷重と開発装置で測定された変位関係を示す。図-7(b)から、この実験において不連続面の開口に伴い相対変位が生じるのは、 $P2=1,960\text{mm}$ 、 $P3=2,950\text{mm}$ の2点であり、その変位量が同一となることが予想される。写真-6に示されるように、 $P2$ のほうが、若干、早く発光色に変化する傾向があるが、これを図-9の載荷重 - 測定変位関係で見れば、その差異は無視できる程度であると判断され、一定の精度を持った測定が行えたと考える。

以上より、開発した測定装置は、不連続面挙動を受け

るロックボルトの挙動を適確に測定し得るものと評価する。

4. おわりに

岩盤不連続面挙動を受けたロックボルトの挙動は非常に複雑なものとなる。しかし、岩盤不連続面挙動を拘束することが、最も顕著なロックボルトの支保効果を発現させる。したがって、その挙動を適確に把握することがトンネル支保設計、ならびにその評価に不可欠であることは言を俟たない。

これまでのひずみゲージ測定を基にしたロックボルト軸力計は、計測される値が局所的な値にとどまるため、その値から合成される全体挙動が、実際のロックボルト挙動と整合する保証は与えられない。このような背景から、直接、ロックボルトの挙動を計測することの可能性を検証することを目的として開発した測定器が、本文で紹介したロックボルトメータである。

今回、開発に、LEDSを採用することで、*extensometer*等の地中変位計と同様の測定機構を、一般に打設されるロックボルト上に搭載することが可能となった。このことは、主要な測定機器を転用可能ならしめるものであり、大幅なロックボルト測定の低廉化につながるものとする。しかしながら、測定機構が単純なゆえに、測定精度に限界があることは否めない。特に、周辺地山の微少な挙動には感度が鈍く、適用可能な地山が限定される可能性がある。

なお、開発したロックボルトメータは北川第3トンネル工事において試験的に運用し、良好な運用結果を収めたことを記し、結びとする。

謝辞：神戸大学櫻井春輔名誉教授、芥川真一教授より、本研究に関する多大なご指導を賜りました。ここに、深甚の謝意を表します。また、その実証実験に当たっては株式会社ケー・エフ・シー羽馬徹様、阿波宏司、井本厚様、他皆様に真摯なるご支援を賜り、心より感謝いたします。

参考文献

- 1) Farmer, I.W.: Stress distribution along a resin grouted rock anchor, *Int. Journal of Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol.12, pp.347-351, 1975.
- 2) Dight, P.M.: The theoretical behavior of full contact bolts subject to shear and tension, pp.290-297, 1979.
- 3) 山地宏志, 櫻井春輔, 平井正雄, 中田雅夫: 現場計測結果に基づくロックボルトの作用効果の評価, 土

木学会論文集, No.529/ III -33, pp.1-9, 1995.

- 4) 櫻井春輔, 川嶋幾夫: ロックボルトによって補強された不連続性岩盤のモデル化について, *土木学会論文集*, No.457/m-21, pp.147-150, 1992.
- 5) Gerrard, C.M. and G.N. Pande: The Behavior of Reinforced Jointed Rock Masses under Various Simple Loading States, *Proceedings of 5th Congress on ISRM, Melbourne*, pp.217-223, 1983.
- 6) Bjurström, R. J. : Shear strength of hard rock joints reinforced by grouted untensioned bolts, *ISRM 3rd. Congress, Colorado, Denver*, 1974.
- 7) Goodman, R. E. (赤井浩一, 川本眺万, 大西祐三訳): *Method of Geological Engineering in Discontinuous Rocks* (邦題: 不連続性岩盤の地質工学), 森本出版株式会社, 1978.
- 8) Chapell B. A. : Rock Bolts and Shear Stiffness in Jointed Rock Masses, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 1 15, No. 2*, pp. 179-197, 1989.