

LED ロックボルト変位計の開発と性能試験

Development and Performance Test of New Rock Bolt Displacement Meter (GENESIS-RBM)

戸村 豪治 GOJI TOMURA
 山地 宏志 HIROSHI YAMACHI
 高橋 直樹 NAOKI TAKAHASHI

当社が開発した新しいロックボルト変位計 (GENESIS-RBM) は、神戸大学芥川真一教授の提唱する OSV(On-Site data Visualization)の概念による光る変位計 LE DS (Light Emitting Displacement Sensor)の機構を援用したものである。GENESIS-RBM の基本性能を把握するためのロックボルト引張試験と、実際の地山において局所的な不連続面挙動を評価できるかどうかを検証するための亀裂挙動模擬実験を実施した。両者の試験結果から、GENESIS-RBM はトンネル計測機器として、十分、実用に耐える精度であること、さらに、局所的な不連続面挙動を示す地山においても正しい挙動を計測することが可能であることが分かった。

キーワード：ロックボルト，LED

The authors developed a new rock bolt displacement meter (GENESIS-RBM) using mechanism of LE DS (Light Emitting Displacement Sensor), which had been developed by Professor Shinichi Akutagawa of Kobe University.

In order to examine the basic performance of GENESIS-RBM, tensile tests of the rock bolts were carried out. And, a model test simulating rock discontinuity was also conducted to verify a measuring ability of the system under the locally jointed rock condition. From both test results, we could confirm that GENESIS-RBM has sufficient accuracy as a displacement measurement for tunnel and is also applicable to measuring the behavior of the locally jointed rock in natural ground.

Key Words : Rock bolt, LED

1. はじめに

ロックボルトは、NATMにおける最も重要な支保部材であり、その挙動を把握することは、トンネルの安定性を評価するうえで非常に重要となる。現在、主として図-1に示すようなひずみゲージによるロックボルトの軸力測定が実施されているが、ひずみゲージによる測定はロックボルト加工に多大な工数が掛かるだけでなく、設置やケーブル配線などにも多大な費用を要するため、費用対効果の面から実施例が年々減少傾向にある。

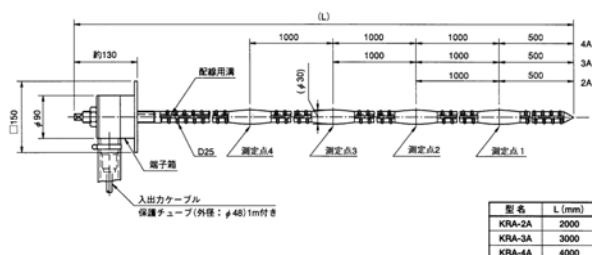


図-1 ひずみゲージ式ロックボルト

また、測定データの評価に着目すると、汎用的に用いられる全面定着式ロックボルトは、定着モルタルとロックボルト間の相対変形によってロックボルト軸力が誘起されるため、連続体的な地山にロックボルトが打設される場合、局所的なひずみゲージ測定によってもロックボルト全体の挙動を評価することは可能である。ところが、不連続面の挙動が卓越する地山においては、その挙動や支保効果を評価することが著しく困難になる。

ロックボルトの大きな支保効果は、地山の不連続面の挙動を拘束することにより、ロックボルトと地山境界部ではその相互作用により、大きな相対変位が発生するが、その影響範囲は限定された区間にしか及ばない。したがって、その影響範囲にひずみゲージが貼付されていなければ、ロックボルトの挙動や支保効果を評価することは困難である。

本報は、このようなロックボルト計測の現状を鑑み、簡便で安価、かつロックボルトの全体挙動を評価するこ

とのできる計測システムの開発とその実用性を検証したものである。開発に当たっては、神戸大学芥川真一教授の提唱するOSV（On-Site data Visualization）の概念と、この概念を実現した光る変位計LEDS（Light Emitting Displacement Sensor）の機構を援用した。OSVは、従来の計測管理手法が、計測データを現場事務所などで管理し、一部の技術者が評価していたのに対し、施工現場で計測データを可視化し、施工に携わる全員が情報を共有しようとする概念である。光る変位計は、変位量に応じてLED表示灯が青⇒シアン⇒黄色⇒オレンジ⇒赤⇒白と変化する新しい変位計である。なお、開発したロックボルト計は、当社が開発を進める新しい地盤施工管理システム GENESIS（Geo-Engineering Network Sensors and Intelligent System）を構成するセンサーの一つとして GENESIS-RBM（Rock Bolt Measure）と名づけた。

2. GENESIS-RBM の概要

(1) GENESIS-RBM の測定原理

前述のように、GENESIS-RBMは、神戸大学芥川真一教授の提唱する光る変位計LEDS（写真-1）の機構を援用して開発した。LEDSの測定原理は、図-2に示すように、2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、その変位をLED発光色によって表示するというものである。現在、商品化されているLEDSは、写真-1に示すように測定部とLED発光制御部・LED発光部が一体となったコンパクトな変位計であり、その設置・運営に専門家などを必要としない。また、測定区間は測定ワイヤ長により自由に設定できる。



写真-1 光る変位計 LEDS の外観

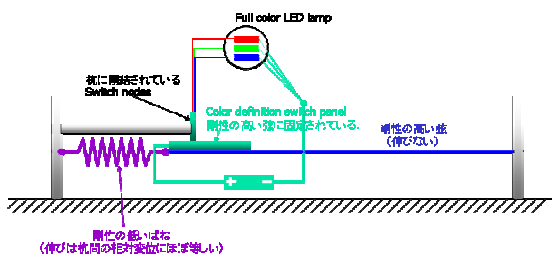


図-2 LEDS の測定原理概念

(2) GENESIS-RBM の機構

GENESIS-RBMは、LEDSのLED発光部とLED発光制御回路をロックボルト頭部のベアリングプレート上のボックス内に実装し、計測ワイヤをロックボルトに沿った小口径パイプ内に装着することで、ロックボルトの挙動をダイレクトに測定し、その測定変位をその場で表示することを可能にした。図-3に、GENESIS-RBMの測定機構概要を、また、写真-2にボックスの外観と内部の機器実装状況を示す。

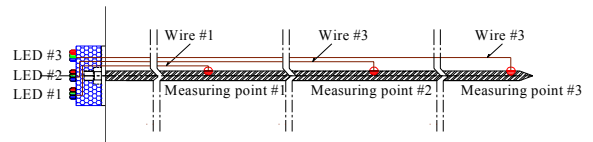
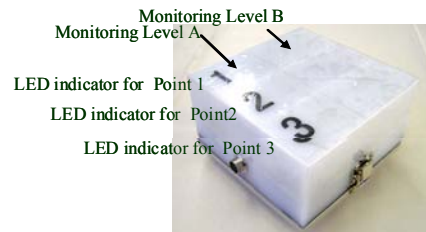
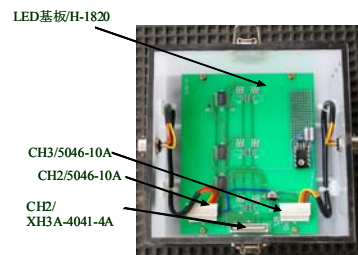


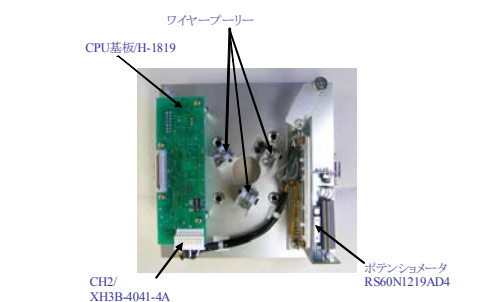
図-3 GENESIS-RBM の測定機構概要



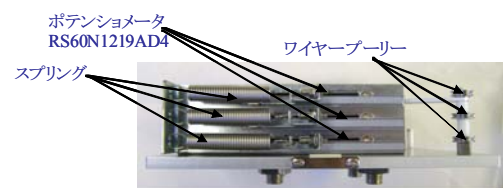
(a) 格納ボックス外観



(b) LED基盤



(c) CPU基盤とポテンシオメータ



(d) ポテンシオメータ配置

写真-2 GENESIS-RBMの外観と内部の機器実装状況

図-3に示すように、GENESIS-RBMは、一本のロックボルトに対して3区間の変位計測が可能であり、各区間の変形は2つのLEDの発光色によって表-1のように10段階の表示が可能である。また、各発光色の閾値はディップスイッチの切り替えによって4段階に変更できる。

表-1 発光表示と区間変位量

Color	Displacement (mm)
B-	0.00-0.25mm
BB	0.25-0.50mm
C-	0.50-0.75mm
CC	0.75-1.00mm
G-	1.00-1.25mm
GG	1.25-1.50mm
Y-	1.50-1.75mm
YY	1.75-2.00mm
R-	2.00-2.25mm
RR	2.25-2.50mm
WW	RangeOver

格納ボックスは、機器カバーとLED表示部が一体で製作されており、トンネルの坑内環境から電子機器を保護する防塵・防湿構造となっている。ボックス内部には、LED基板と電子部品基盤が固定されており、コネクタで立体的に電子基板を配置することで、ベアリングプレートと同寸法(150mm×150mm)で、高さ50mmとコンパクトな設計を可能としている。

写真-2に示すように、GENESIS-RBMの主たる電子機器構成は、計測ワイヤで検出した変位を電気信号に変換するポテンシオメータ部、電気信号を受けて閾値に従いLEDスイッチの切り替え・発光制御などを行うCPU基板、およびLED基板から構成される。そのシステムブロック図を図-4に示す。

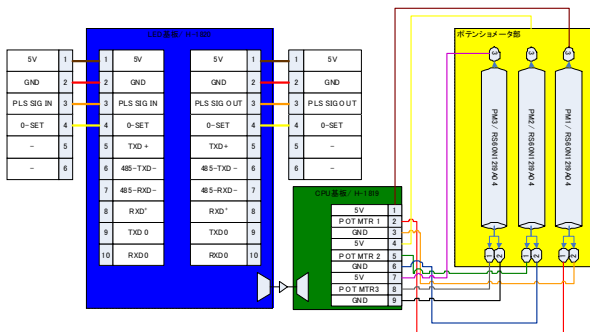
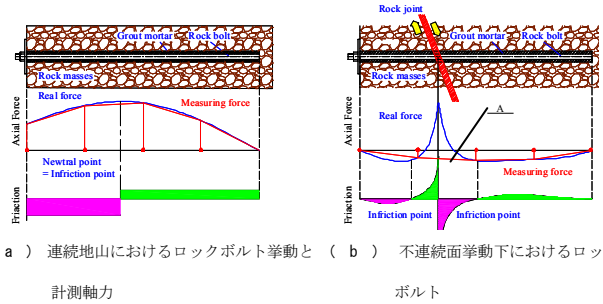


図-4 GENESIS-RBM 発光制御システムブロック図

(3) GENESIS-RBM 開発経緯とその特徴

図-5に連続地山と不連続面挙動が卓越する地山におけるロックボルト挙動と計測軸力の模式図を示す。図-5

(b)のように、地山の不連続面挙動が卓越するような地山では、不連続面との交差部周辺でロックボルトに局部的に大きな相対変形が発生するが、その影響は限定された範囲にしか現れない。従来のロックボルト軸力計はひずみゲージにより測定点のひずみを測定するため、測定点以外の挙動を把握することができず、図-5 (b)のA線で示されるような全面圧縮挙動が計測上現れることになる。実際にこのようなロックボルト軸力分布は、割れ目の多い硬岩地山でしばしば計測されている。



(a) 連続地山におけるロックボルト挙動と (b) 不連続面挙動下におけるロックボルト

図-5 地山条件におけるロックボルト軸力測定の評価

このように不連続面が卓越する地山においては、従来のロックボルト軸力計測では十分な評価が困難であった。しかしながら、不連続面挙動を抑制することは、ロックボルトに期待される最も大きな支保効果の一つであるため、不連続面でのロックボルトの挙動を測定することは現場計測上重要な課題である。

GENESIS-RBMは、LEDSの測定機構をロックボルト計測に適用することで、ロックボルト上の相対変位を直接測定し、不連続面の存在にかかわらず、正しい挙動を計測することを目的として開発したものであり、その測定機構の他、以下の特徴を有している。

- ① 変位計測による定量的評価は、通常は専門知識を持つ技術者がパソコンの画面上などで確認する必要があるが、GENESIS-RBMは、変状を捉えた瞬間に、発光色によりその場で、ロックボルト挙動を確認することができ、情報の共有化が図ることが可能である。
- ② 電源接続だけで計測が可能で、信号配線などが不要であるため、計測専業者でなくても、現場職員などで計器の設置が可能である。
- ③ 持ち運びや取り扱いが容易で、また何度でも転用が可能である。
- ④ 十分な防塵性・防水性・耐久性を有し、メンテナンスが容易である。
- ⑤ 十分な輝度を有するフルカラーLEDを使用しており、離れたところからでも確認ができる。

3. GENESIS-RBMのロックボルト引張試験

(1) 試験方法

開発した GENESIS-RBM の基本性能を実証することを目的として、GENESIS-RBM とストレインメータを設置したロックボルトの引張試験を行った。試験は図-6に示すように、フランジで両端を補強した鋼管と反力壁の中に、ロックボルト母材（TD31）を通して、母材を引張り、ストレインメータで測定した頭部変位と GENESIS-RBM で測定した区間変位の比較を行った。写真-3に試験状況を示す。

GENESIS-RBM は、表-1のようにロックボルトの変位が 0.25mm 増大する毎に、ベアリングプレートに設置されたLEDの発光色が変化し、一つの測定区間の表示に二つのLEDを配することで、10段階のモニタリングを可能としている。

(2) 試験結果

図-7、8に引張荷重とボルト変位計発光履歴を、図-9に引張荷重と各点変位の関係を示す。

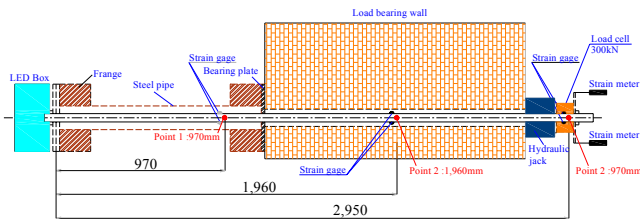


図-6 ロックボルト引張試験



写真-3 ロックボルト引張試験状況

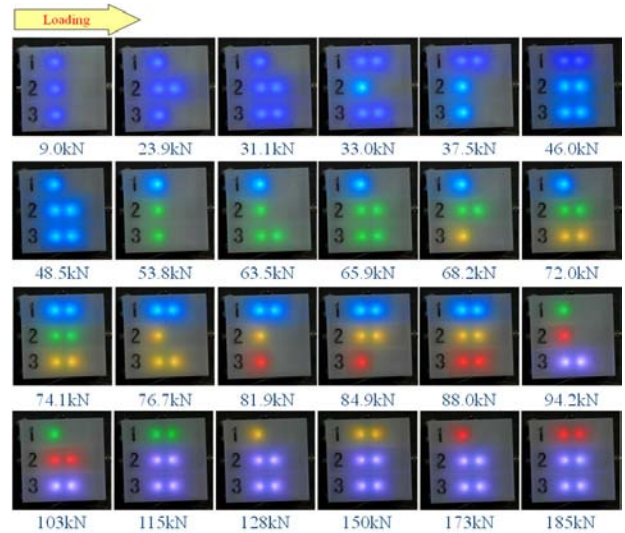


図-7 引張荷重とLED発光履歴（引張過程）

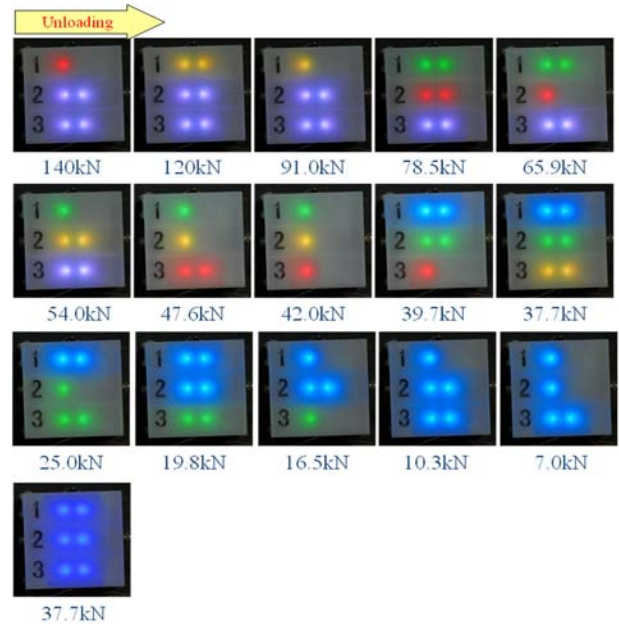


図-8 引張荷重とLED発光履歴（除荷過程）

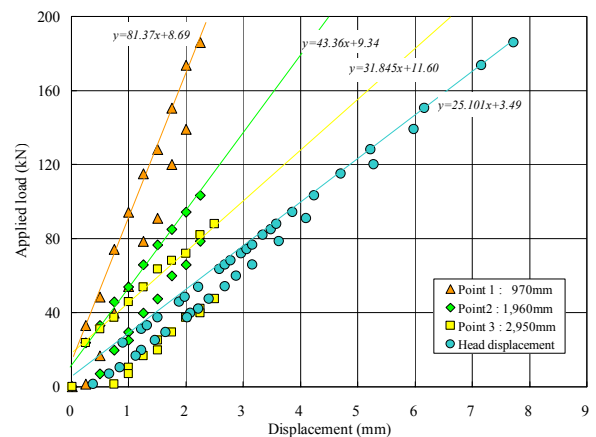


図-9 引張荷重と各点変位

図-9において、Point1, Point2, Point3はLED発光色の变化から読み取ったロックボルト各測定区間の変位を、頭部変位はロックボルト頭部の変位をストレインメータで測定した変位を表している。図-9をみると 頭部変位勾配とPoint3 (2,950mm) の変位勾配はほぼ一致しており、また、Point1, 2, 3の勾配の比は測定区間長さの比 (970mm:1,950mm:2,950mm) に反比例していることが分かる。これはPoint1, 2, 3の各測定値が、ロックボルト全体の引張荷重と変位の関係から得られる理論上の各測定区間の変位を正確に表現していることを示すものである。治具間の弛みや、ケーブル緩みなどのために変位の発生が、若干遅れるが、GENESIS-RBMは工学的に十分に優れた精度を有しており、トンネル計測機器として、実用に耐える精度であるといえる。

4. GENESIS-RBMの亀裂挙動模擬試験

(1) 実験方法

3. で実施したロックボルト引張試験で GENESIS-RBM の基本性能を確認し、トンネル計測機器として、十分、実用に耐える精度であることを確認した。次に、実際の地山において局所的な不連続面挙動を GENESIS-RBM で評価できるかどうかを検証するため、亀裂挙動模擬実験を実施した。

実験は、図-10に示すように、割れ目のある鋼管内にロックボルト (TD-24) を充填定着し、割れ目部をセンターホールジャッキで押し広げることで、岩盤不連続面の挙動を再現した。割れ目位置は、ベアリングプレートから2,000mm (Model 2000) と、1,500mm (Model 1500) の二つとした。また、相対変位測定区間は3. のロックボルト引張試験と同一である。写真-4に亀裂挙動模擬実験状況を示す。



写真-4 亀裂挙動模擬実験状況

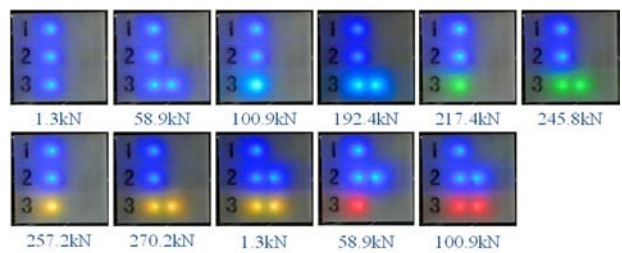


図-11 LED発光履歴 (Model 2000)

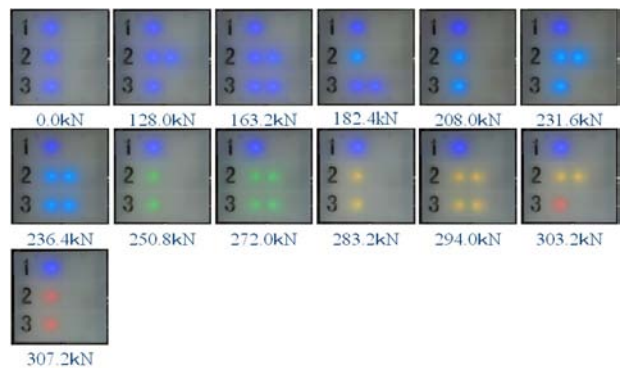


図-12 LED発光履歴 (Model 1500)

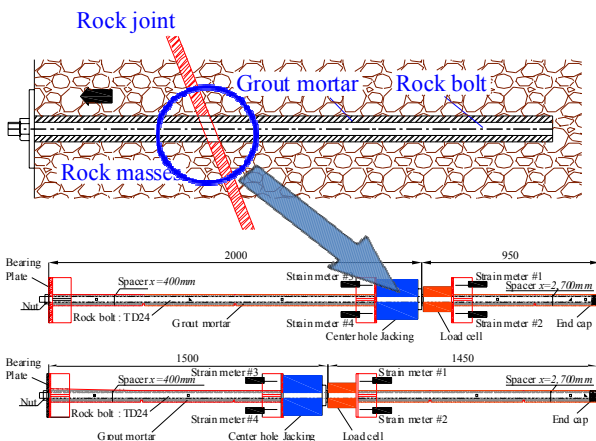


図-10 亀裂挙動模擬実験

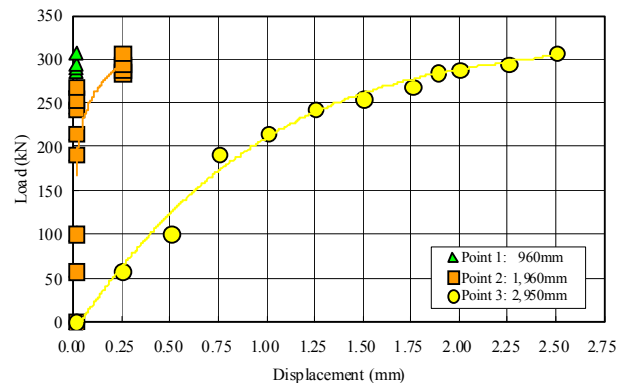


図-13 荷重と相対区間変位 (Model 2000)

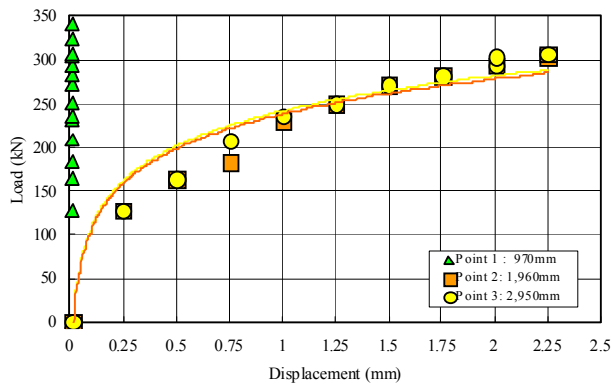


図-14 荷重と相対区間変位 (Model 1500)

(2) 実験結果

図-11, 12に Model 2000 と Model 1500 のそれぞれのケースにおけるLED発光履歴を, 図-13, 14に同様に荷重と相対区間変位の関係を示す。

図-13をみると, Model 2000は2,000mmの位置にある模擬亀裂が変位するためPoint 3の相対変位だけが増大し, また図-14においてModel 1500の模擬亀裂位置は1,500mmであるため, Point 2とPoint 3の相対変位だけが増大することが分かる。これは不連続面を有する地山におけるロックボルトの挙動を正しく表現しており, Model 2000,1500とも想定どおりの変形が得られているといえる。

また, 図-13, 14において, Model 2000におけるPoint 3, Model 1500におけるPoint 2とPoint 3は, それぞれ, 初期の相対変位が線形で増大し, 定着モルタルの破壊進行に伴って相対変位が非線形の増大を呈している。これは模擬亀裂の変形が, 定着モルタルを介してロックボルトに伝達することによるものである。さらに全面定着されたロックボルトの変形は小さく, 模擬亀裂に300kNの荷重が作用しても2.5mm程度の相対変形しか現れていない。したがって, 局所的な不連続面挙動を示す地山においても GENESIS-RBM を現在の設定閾値で使用することで, 十分に実用的な測定が可能であるものと考えられる。

5. まとめ

神戸大学芥川真一教授の提唱するOSV (On-Site data Visualization) の概念による光る変位計LEDS (Light Emitting Displacement Sensor) の機構を援用して開発した新しいロックボルト変位計 (GENESIS-RBM) の概要と実証試験の結果について紹介した。

実証試験ではストレインメータとの比較によって基本性能を把握するためのロックボルト引張試験と, 実際の地山において局所的な不連続面挙動を評価できるかどうか

か検証するための亀裂挙動模擬実験を実施した。両者の試験結果から, GENESIS-RBM はトンネル計測機器として, 十分, 実用に耐える精度であること, さらに, 局所的な不連続面挙動を示す地山においても正しい挙動を計測することが十分に可能であることが分かった。

参考文献

- 1) 芥川真一, 南裕輔, 山地宏志, 羽馬徹, 廣嶋孝也, 野澤忠明: 地盤補強材のための光る変位計の開発, 第40回岩盤力学に関するシンポジウム, 土木学会, 2011.