光る変位計の開発とその岩盤工学における適用の可能性について

芥川真一[1]＊・高野晃佑[2]・森翔矢[3]・金子勝[3]・高木加乃[3]

[1]正会員　神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）
[2]学生会員　神戸大学大学院自然科学研究科（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）
[3]非会員　神戸大学工学部建設学科（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）
＊E-mail : cadax@kobe-u.ac.jp

土砂災害，特に岩盤斜面の崩壊や，岩塊の落下等による被害は後を絶たず，毎年多くの犠牲者を生む結果となっている．それらへの対策工として，これまで様々なものが考案され，設置されてきたが，効果的なシステムはコストが大きくなる場合がほとんどで，日本国中のすべての危険地帯を補うことは事実上難しいと言える．

ここでは，「見るだけで分かる安価かつ効果的なシステム」を構築するために伸縮型の変位計と発光ダイオードを合理的に組み合わせた新しい「光る変位計」した．その基本的概念と岩盤工学における様々な応用の可能性について言及する．

Key Words : *observational method, real time back analysis, relative displacement, LED*

1. はじめに

岩盤工学に関係するあらゆる工事において施工中，供用時の安全管理，維持管理問題が重要視されるようになってきた．通常の変状監視体制においては，計測器が察知した情報をパソコンに転送し，それをスクリーン上などで図化して，専門技術者が現状を評価する．すべてが順調に進んでいる場合はこれで問題はないが，データ通信に問題があった場合，専門技術者が監視業務を怠った場合，あるいは予期せぬ問題が生じた場合などにおいては，変状に関する情報が正しく分析されない，あるいはその情報が周辺住民に正確に伝わらない可能性が出てくる．また，コストなどが主原因で，変状監視体制が取られていない現場は数多く存在するわけであり，変状が起きていても何も分からない，なにも知らされない場合のほうが圧倒的に多いのが現実である．

このような現状を改善するために，現場で変状が生じているときに，それを低コストの計測装置で捕らえ，視覚的に分かりやすい方法で周辺住民に直接開示する手法の構築を目指し，発光ダイオードを利用した「光る変位計」を開発した．本報では，この装置を用いて構築を予定している，低コストで分かりやすい現状把握の方法とリアルタイムの情報開示システムの構想（**Fig.1**参照）についてトンネルおよび斜面の例を挙げて紹介する．

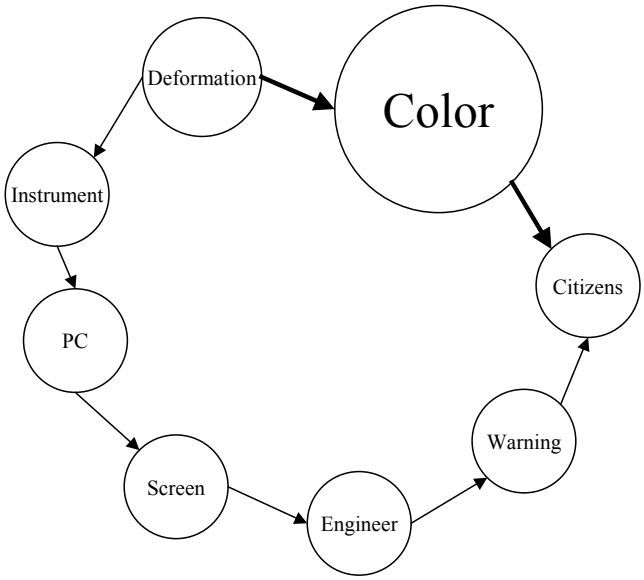


Fig.1　Direct signal flow from the site to citizens.

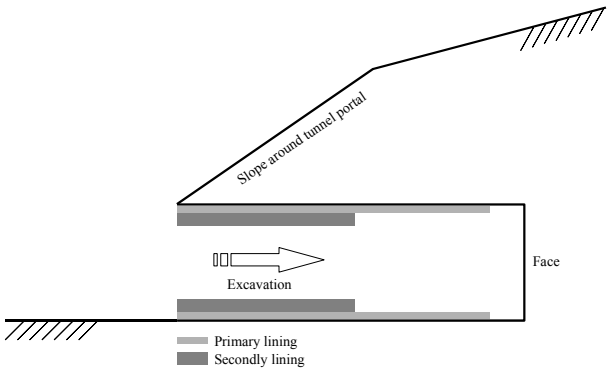


Fig.2 Typical tunnel construction.

2. トンネルの情報化施工[1)]の現状

(1) 通常の計測と安全監視体制

トンネルの工事においては**Fig.2**に示されるように，段階的に工事が進むため，施工段階のそれぞれにおいて，場所に応じた挙動観測とその結果を用いた変形挙動分析，安全監視体制の確立が望まれている．トンネル工事中の切羽周辺を拡大したものが**Fig.3**である．状態観測と安全監視の目的から，切羽周辺，切羽手前の鋼製支保工のみを設置した部分（A），吹付けコンクリート打設が終了した部分（B），2次覆工打設が完了した部分（C）に大別される．

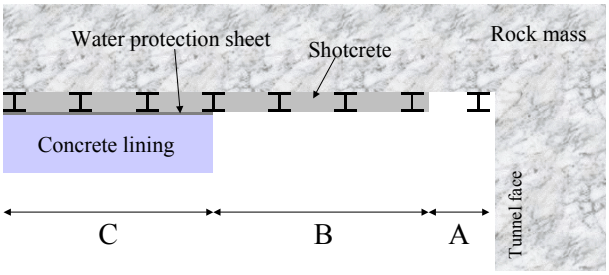
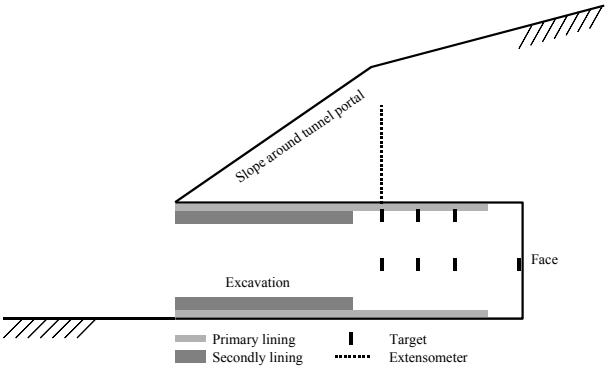


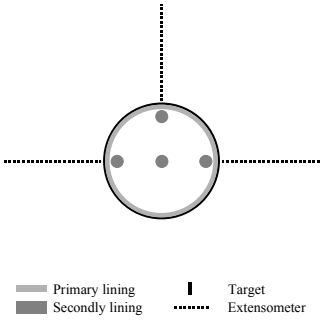
Fig.3 Different stage of construction in a tunnel.

それぞれの場所において工事中もしくは完成後に渡って変位計測などの目的で計測器が設置されるのが常である．**Fig.4**にその典型例を示す．光学測距器のためのターゲット，地中の変位を計測する装置などが適所に配置される．

このような計測器から得られる測定値は，安全管理のための基準値に照合され，直接利用される場合と，データ処理手順（逆解析や，それぞれの現場で準備されている一連の処理）に従って分析・処理される場合などがある．後者においてのデータ処理はほとんどの場合，パソコンなどのデータ処理機内で行われ，その結果をスクリーン，あるいは紙面に図示することによって技術者が現状の安全監視を実施する．また，当然のことながらこれらの処理にはその手順の内容に応じた処理時間が必要となる．この仕事の流れを**Fig.5**に示す．



(a) Side view.



(b) Cross sectional view.

Fig.4 Typical locations of measurement instruments.

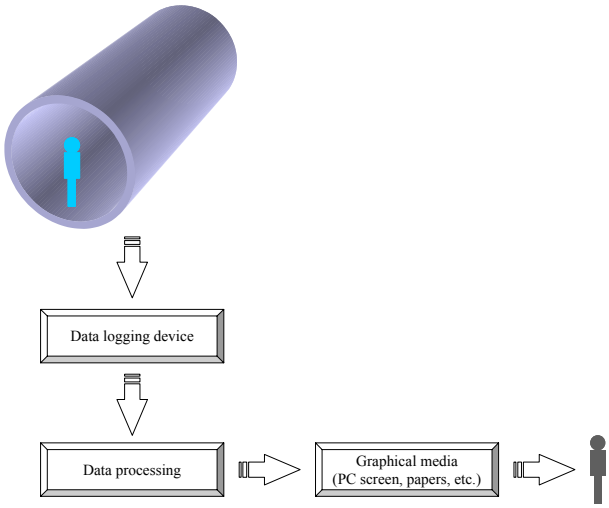
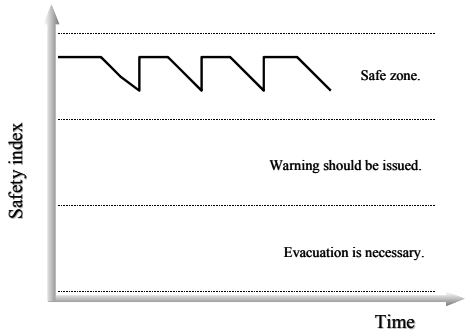


Fig.5 Data flow in a traditional observational method.

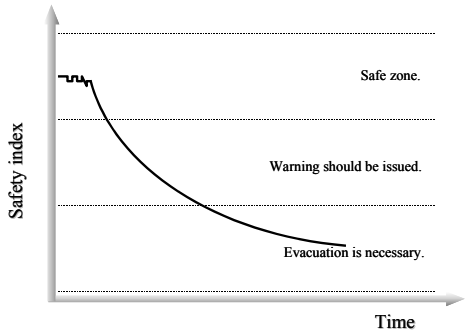
(2) 通常の方法論における問題点

地山の状態が良好で，トンネル掘削および支保の打設などが順調に進行している場合，全体の挙動に対する安全性インデックス（概念的なもの）と時間の推移を表現すると**Fig.6**のようになる．一定のピッチで同様の作業が繰り返されることから，インデックスは最大値と最小値の間を往復し，全体を通して，工事が安全に行われてい

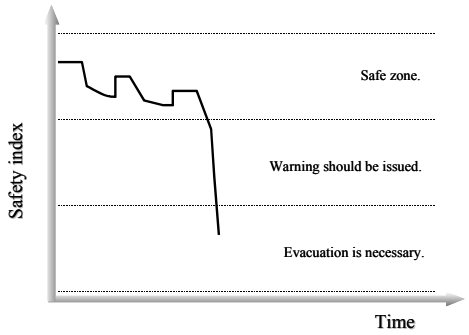
ることを確認することが出来る．このような状況の時には，計測データから安全性インデックスを導出する作業は瞬間的である必要はなく，必要な時間を掛けても良いものと捉えることができる．



(a) Structural performance under a normal circumstance.



(b) Structural performance in a long term.



(c) Structural performance in an emergency.

Fig.6　Deterioration of structural performance.

時間軸のスケールを変更し，トンネル完成後の長期的な挙動を観測する立場になった場合，**Fig.6(b)**のようなケースが想定されることがある．2次覆工コンクリートなどの長期的なパフォーマンスを正しく把握し，損傷の度合いに応じて適切な処理を行うことは重要である．しかし，この場合も変状を検知してから正しい安全性判断，対策を決定するために費やす時間は瞬間的である必要はなく，十分な時間を掛けることが出来る．

一方で，切羽の崩落，地下水の異常出水などの緊急時（**Fig.6(c)**）には地山，トンネル支保工などの変状を把握してから，安全性を判定するために費やしてもよい時間は非常に短いものとなる．場合によっては，数秒，あるいは瞬間的なデータ分析，および伝達システムが要求される．このようなケースにおいては，これまでに実施されているような（**Fig.5**），データの流れと時間を要しているようでは安全を確保できない恐れがある．

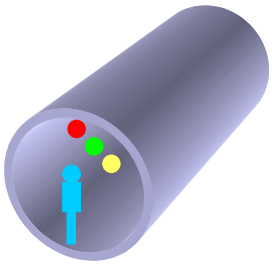


Fig.7　Imaginary illustration for data visualization on site.

3. データ処理と表示の新しい考え方

(1) 基本的概念と目的

トンネル工事，あるいは一般的な工事現場などにおいて，異常が発生することはまれではない，現場においては複雑な工程に基づき，多数の作業員が複数の作業を並行して進めており，そのどれかにおいて，事象が通常通りにならないことは十分に想定されることである．これらのことが，安全監視体制において正常に検知され，要求される時間内にその結果および安全性を関係者に告知できることが理想である．しかし，これは必ずしも現状の我が国の工事現場において完成されてはおらず，工事中の事故による犠牲者の例は後を絶たない．

そこで，本報では**Fig.7**に示すように，工事中の周辺環境における変形量（一般的なものであり，任意の2点間の相対距離を想定している）を計測し，その結果を原位置でLEDを用いた光の色で表示・周知するシステムを提案する．

(2) 変形量によって光の色が変化する変位計

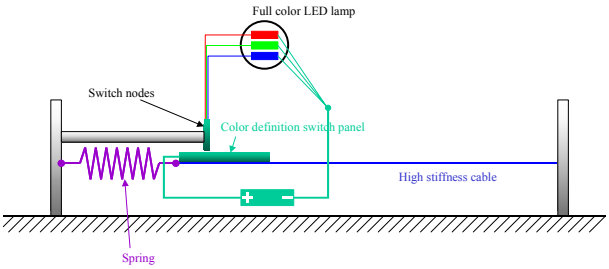


Fig.8　New displacement measurement device with LED lamps attached.

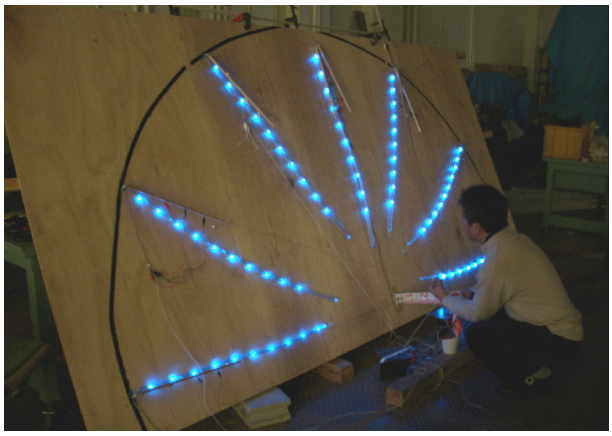
変状が生じた時にそれを感知して，早く，確実に，分かりやすく知らせる方法として，ここでは「変位を計測し，それを光の色にして表示する」ことを基本とする．

Fig.8に装置[2] の概観を示す．両端の杭間にばねと剛性の高い弦で変位計測部が設けられている．相対変位が生じると，スイッチパネルがその動きに同調して動く．スイッチパネルには，変位という一次元情報から変位レベルごとに割り当てられた光の色を発生させるための機能がある．変位レベルごとの色の設定はフルカラー発光ダイオードを利用しているため自在にコントロールできるが，できるだけ簡単なものが良いため，ここでは杭同士が遠ざかるにつれてシアン，紫，青と変化し，近づく場合には黄色，緑，赤と変化するようにしている．また，装置を取り付けた最初は白く光る設定にしている．また，色を変える変位レベルはスイッチパネルの製作時に自らが定めるものである．

(3) モデル実験

本装置の機能をデモンストレーションするために，切羽の押し出し変位の監視を想定した室内実験を実施した．ベニヤ板4枚（1枚の大きさは90cm*180cm）のスペースを利用し，2枚目と3枚目の境界線と床との交点を中心とし，半径 180 cm の円を描き，トンネル掘削時における切羽を想定した．その円周上に複数の点を取り，それらの点と中心点をそれぞれ測点として変位計（この実験ではおよそ10mmごとに色が変化する設定とした）を設置する．そして，円周上の測点を固定し，中心点の測点をベニヤ板から遠ざかる向きへ移動させる（今回は手に持って移動させた）．これは，トンネル掘削時における，切羽の掘削方向への変位を再現している．**Photo 1**に示すように，初期状態では白，押し出し変位が出た後は変位計が青く光っており，このような変化を簡易に作業員が目視確認できることが分かる．

(a) Initial state. White color indicates that the installation is just done and no displacement has been observed.

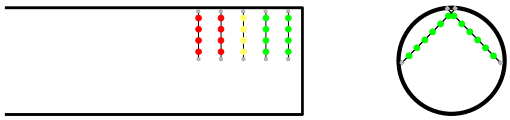


(b) Blue colored lines indicate that they are extended by the tunnel face deformation.

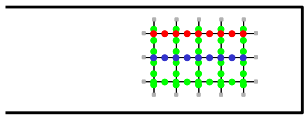
Photo 1 Demonstration of the deformation sensor with LED lamps attached.

(4) その他のアプリケーション例

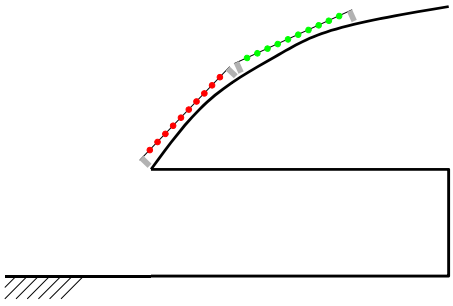
Fig.9に本装置の適用例をいくつか示す．工事中及び供用中に相対変位をモニタリングし，その動きを原位置に表示することのメリットは大きい．内空変位（a），吹きつけあるいは2次覆工の変状，クラック監視（b），あるいは坑口付近の斜面の監視（c）などにも容易に適用が可能となる．



(a) Convergence displacements. (Side and tunnel axis views).



(b) Roof concrete. (Plan view).

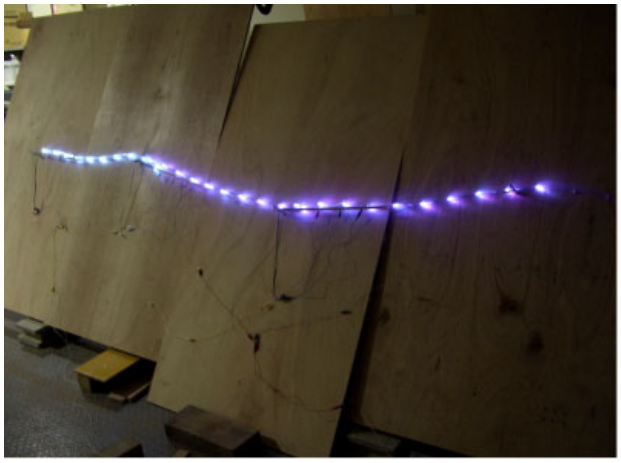


(c) Slope monitoring around tunnel porta.

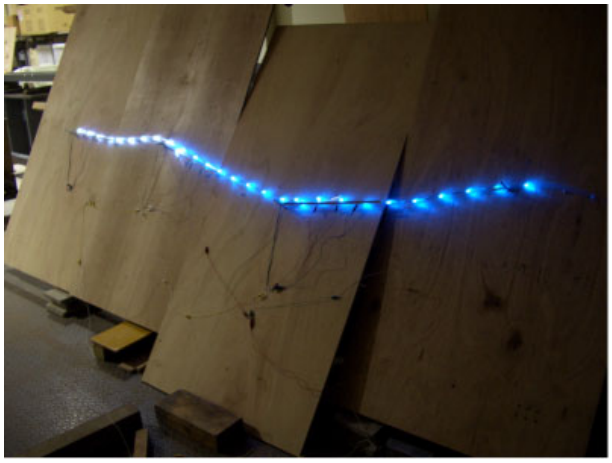
Fig.9 Various examples of possible applications.

4. 斜面のモニタリング実験例

Fig.10に斜面の変形をモニタリングする一例を示す．ここでは，幅90cm，高さ180cmのベニヤ板を4枚用意し，それを斜面の表面と見立てて簡単なデモンストレーション実験を行った．4枚の板の中央に変位モニタリングポイントを設け，それらの間の相対変位（3個の別々の相対変位）を計測し，発光ダイオードのロープに変位レベルに応じた色を発生するようにした．4枚の板のうち1枚だけを動かしたところ，まず(a)のように右側2本のラインの色が白から紫に変わった．さらに板を大きく動かすことによって，その色が(b)のように青に変わった．ここでは，変位を大きめに設定しているがスイッチの精度を上げることでさらに細かい変位に対しても同様の反応を実現することは可能である．

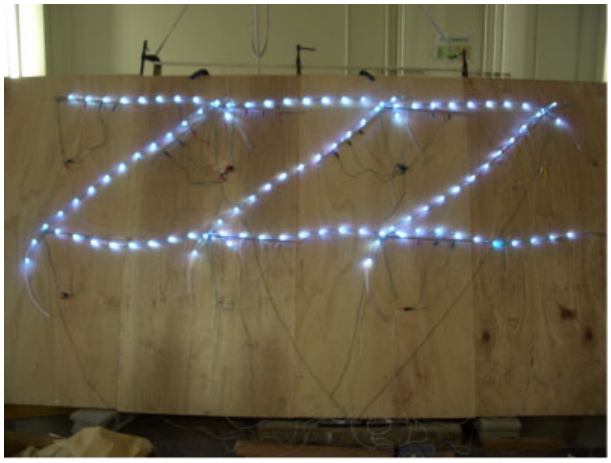


(a) New color appears as the modeled slope starts to move.

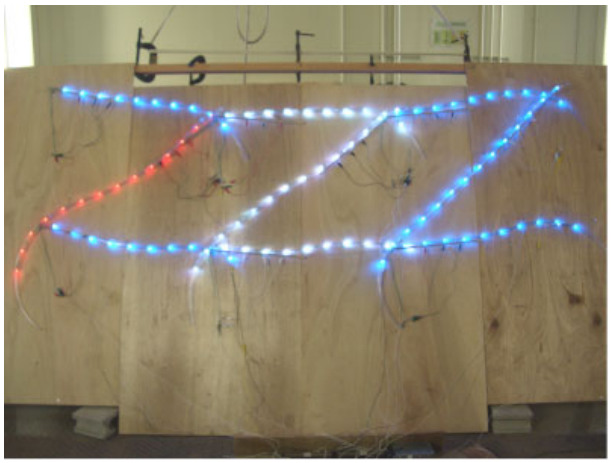


(b) Further movement is confirmed with the change of color.

Fig.10 Application example of the new device to a slope problem.



(a) A new layout at its initial condition.



(b) Colored slope due to its movement.

Fig.11 Identification of deformation mechanism by the color of the devices.

Fig.11に相対変位の計測線数を増やした場合の様子を示す．ここでは，9本の計測線を設けている．(a)が初期状態である．中央の2枚の板を動かすと，(b)のような色のパターンとなった．2枚の板は全く同じ動きをしているので，その中にある計測線には相対変位が生じず，白のままである．それに対し，動かない部分と動く部分に杭を設置されている計測線についてはそれぞれ伸び縮みに応じて色が変わっている．相対変位を色でモニタリングしたい領域の大きさと予算に合わせて計測線をネット状に組むことでさまざまな様式の「光るモニタリングシステム」を構築することが可能になる

5. 結論と今後の課題

岩盤構造物を対象としたこれまでの情報化施工においては，緊急時における対応などに不十分な点があった．その点を克服し，平常時ならびに緊急時に安全性

をいち早く判断するための「光る変位計」の概念を報告した．これまでのデータ処理方法と異なり，現場での動きをその場所に光の色によって表示することにより，誰にでも分かりやすい現状把握，および緊急時の迅速な対応が可能となる作業環境を整備することができる，今後はトンネルなどの地下工事，および斜面[3)]，橋梁などの明かりの工事においても本装置を用いた新しいデータ処理方法と安全な労働および生活環境の構築手法を検討してゆきたい．

謝辞：装置の作成，および実験の実施における竹中嗣人君（東京大学大学院，当時神戸大学）の貢献に謝意を表します．

参考文献

1) 地盤工学会：地盤工学・実務シリーズ　No.16　岩盤構造物の情報化設計施工，322p，報光社，2003.
2) 芥川真一：特願2007-130679　光の色による自然及び人工構造物の変状原位置表示装置，2007.5.
3) 芥川真一，高野晃佑，竹中嗣人：相対変位を光の色に変えて表示する装置の開発と斜面変位モニタリングの一例，平成19年度土木学会全国大会，広島，CD-ROM 3-015，2007.9.

DEVELOPMENT OF LED DEFORMATION SENSOR AND ITS APPLICATION TO ROCK ENGINEERING PROBLEMS

Shinichi AKUTAGAWA, Kosuke TAKANO, Syoya MORI, Masaru KANEKO and Kano TAKAGI

One of the new issues required for a modern observational method in rock-engineering is the speed of data interpretation. Under normal circumstances, time required for the data interpretation can be from tens of minutes to hours. In contrast, immediate or real time data processing is required in an emergency situation in which no time loss is allowed. In order to achieve an almost real time data processing on site and visual presentation of the data, a new device for displacement measurement is created. The device is for measuring relative displacement between two arbitrary points and is capable of showing the displacement by multiple colors of LED lamps attached to the device.