

# デリー地下鉄工事における On Site Visualizationの適用例

楠井 彩子<sup>1</sup>・芥川 真一<sup>2</sup>・阿部 玲子<sup>3</sup>・泉 千年<sup>4</sup>・高橋 厚志<sup>5</sup>

<sup>1</sup>学生会員 神戸大学大学院 工学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)  
E-mail: ayako\_kusui@hotmail.com

<sup>2</sup>正会員 神戸大学教授 工学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

<sup>3</sup>非会員 株式会社オリエンタルコンサルタンツ GC事業本部  
(〒151-0071 東京都渋谷区本町3-12-1住友不動産西新宿ビル6号館8F)

<sup>4</sup>非会員 株式会社オリエンタルコンサルタンツ DELHI METRO Project Office  
(Khasra No.334/206, Press Enclave Road, Near Saket 'A' Block Bus Stop, New Delhi-110017)

<sup>5</sup>非会員 株式会社 環境総合テクノス 土木部 (〒541-0052 大阪市中央区安土町1-3-5)

計測装置の高度化、データ管理の進化・IT化が進む一方で、トンネル掘削中の崩落事故などによる人的被害は少ないながらも存在し続けている。高価な計測システムを切羽周辺や大きな変位が予想される個所に常時設置することは不可能であり、新しい方法論が必要とされている。ここでは、On Site Visualizationというコンセプトのもとで開発している「見えるモニタリング技術」をインドのデリー地下鉄プロジェクトにおける開削工事現場で適用した例を紹介する。

**Key Words :** On Site Visualization, monitoring system, open cut, Delhi Metro

## 1. はじめに

現在、デリー地下鉄やバンガロール地下鉄の建設が日本の有償資金援助プロジェクトとして実施されている。デリー地下鉄1期工事以降、実施機関、コンサルタント、コントラクターが工事中の安全対策に取り組んでおり、一定の成果はあがってきている。デリー地下鉄1期工事では、安全帽、安全チョッキ、安全靴で作業する習慣が定着していなかったインドの工事現場において、作業員各自がそれらを着用するとともに、工事現場の整理整頓も徹底する等、安全性および効率性といった意識を浸透させ、インド国内工事における安全管理に関わる革新を起こしたといわれており、2期工事でも同様の取り組みが行われている。

しかしながら、依然として工事中の事故は発生しており、安全対策実施は喫緊の課題になっている。人口の密集した街中や重要構造物近傍における地下鉄駅建設のための掘削工事、および運用中の道路や鉄道の上空での高架橋工事においては、その人的被害、周辺住民に与える

影響を考えると安全に対する細心の注意が必要となる。

近年日本では、供用中の道路斜面や工事中のトンネル断面において、地盤計測データを光デバイスを用いて光の色で表示し、道路使用者や工事関係者が独自の判断で避難できるようなOn Site Visualizationとよばれる新たなシステム導入の試みが始まっており、実施例が増加しつつある<sup>1)~6)</sup>。こうした日本の技術を活用し、安全対策を進めることについて、円借款事業の実施機関であるデリー地下鉄公社(Delhi Metro Rail Corporation)から強い支援要望が出されている。

本報告は、2010年3月から6月にかけて実施した「デリー高速輸送システム建設事業フェーズ2」の地下鉄建設工事現場におけるOn Site Visualizationの試験的適用の概要とその成果を紹介するものである。

## 2. On Site Visualizationについて

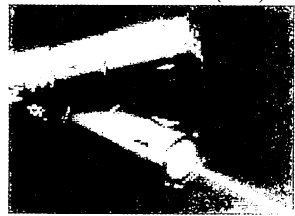
On Site Visualization (以下OSV) とは、観測結果を判断プロセスを経由することなくその場で色で表示するシス



光る変位計 (LEDS)



光るコンバーター (LEC)



レーザーポインター

図-1 光る計測デバイス

テムである。従来の観測手法と比較して時間的な遅れはほとんどなく、確実に情報を伝えることが可能となり、管理面においても効率性・経済性の面で優れている。

OSVの概念に基づくモニタリングを実施するためのツールとしては図-1のような装置が挙げられる。変位を色で表す光る変位計 (Light Emitting Deformation Sensor, 省略してLEDS) に加え、既存の計測装置 (ひずみゲージ, 差動トランス型の計測装置) に視覚的アウトプット機能を付加した光るコンバーター (Light Emitting Converter, 省略してLEC), そしてその直進性, 反射特性を合理的に利用した直接的変状表示方法であるレーザー光線の利用等がある。光る変位計は任意2点間の相対変位を2mmごとに5色の光で表示できるものである。標準ストロークは10mmで, 特殊アタッチメントをつけることで疑似ストロークを2mmから50mmまで変化させることができる。設置や移動が簡単であるため, 作業員が最も気になる場所に簡単に設置することができる。また, 新規に開発したLECと既存の計測装置をペアで用いる方法では信頼度の高いデータ処理を行うことができ, それに基づいて, これまでにはない視覚的アウトプットが得られるため, 重要度の高い監視箇所のモニタリングに適している。LECを用いたモニタリングは変位だけでなく傾斜, 圧力, 温度, 水圧等多種のデータ計測に対応している。これらの視覚的アウトプット機能を有するツールを用いて実施するOSVによるモニタリングの大きな特徴として, 「そこにいる人々」, すなわち現場作業員や周辺住民が, 「安全度」を, 「その場で確認」できるということが



図-2 日本におけるOSVの適用箇所 (2006年度以降)

挙げられる。従来計測では, 計測終了から安全か危険かを人々に知らせるまでに, いくつかのステップがあり, どうしても時間的な遅れが発生してしまう。その点, On Site Visualizationでは, リアルタイムな表示が現場において行われるので, 発生する光の色に対するアクションプランを定めておけば, 危険を避ける迅速な行動が可能となる。2006年以降, 様々な室内シミュレーション実験, および現場試行が展開されている (図-2参照)。

### 3. デリー地下鉄プロジェクトにおける適用

#### (1) プロジェクト現場の概要

光デバイス計測を用いた建設現場および周辺建物の安全管理について, その技術の有効性, 優位性の確認, および実施機関の現場管理者, 現場指揮者や作業員, 周辺住民の安全意識の改善, 向上について確認するためには, 次の条件を満たす建設現場がもっとも適当であると考えられた。

- ・掘削深度が10m程度以上と深く, 掘削に伴い地盤が動いた場合, 現場作業員や周辺建物住民の安全を脅かす恐れのある, 山留め掘削工事
- ・オペレーション中の既設道路や鉄道をまたいでおり, その基礎地盤が動いた場合に, 橋梁の上部構造に挙動変化 (設計値以上の傾斜や沈下) が生じ, 公共交通に大きな被害を与える可能性のある大規模橋梁架設工事

上記の条件を満たし, なおかつ本調査開始時期である2010年2月において, 工事の進捗に影響を与えることなく, 光デバイス計器の速やかな設置および計測が開始できる現場を検討した結果, AIIMS駅の南西部出入口における山留め掘削工事とJASOLA駅北部に位置し, 鉄道幹線上空に架設される現場打張出し架設橋梁の二か所が選定された (図-3参照)。本報告ではAIIMS駅での適用例について述べる。

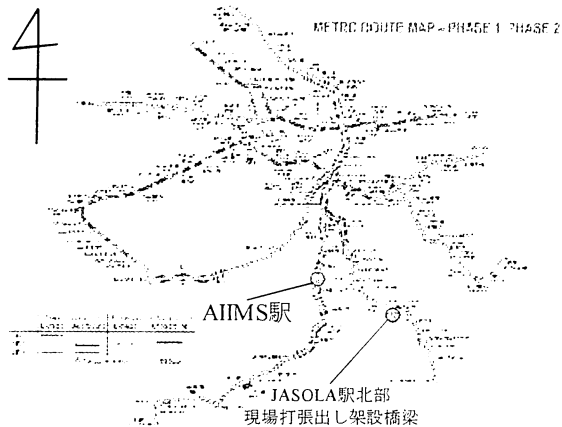


図-3 デリー地下鉄のルート図とモニタリング対象地域

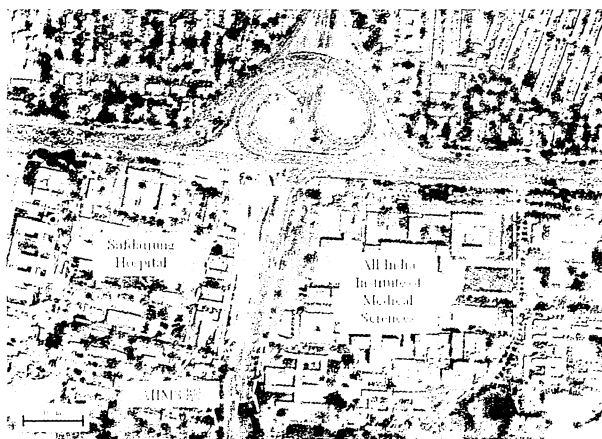


図-4 AIIMS 駅周辺地図

## (2) 現地におけるOSV計測

### a) 問題認識

発展途上国の建設現場における計測管理は、日本国内

に比べて計測器の種類・精度・設置数、計測頻度、計測結果の伝達システム、計測結果のフィードバックシステム等に課題があり、「施工中の作業員、住民の安全確認」という観点から、それらが十分に機能しているとは言いがたい。これらの原因としては、入手できる計測器の限界、限られた工事予算、プロジェクトとして計測管理に対する取り組みの不足などの問題点が考えられる。その結果、現場計測管理を安全管理に結び付ける概念がなく、現場監督員、作業員ともに計測結果、計測管理値を知らないままに作業を続けている場合が見受けられる。また図-4にみられるように、AIIMS駅工事現場周辺にはデリー市内を南北方向に縦断しているAurobindo Marg道路と東西方向に横断しているMahatma Gandhi Marg道路のジャンクションやAll India Institute of Medical Sciences, Safdarjung Hospitalといった医療関係施設があり、約300人の現場作業員に加え、昼夜問わず多くの一般市民が存在する。そのため、工事現場において何らかの事故が発生した場合、現場作業員や周辺住民に対して大きな被害を与える可能性が懸念されている。

本適用例では施工中の作業員、住民の安全確認という観点から、OSVシステムを用いた計測、安全度の現地表示に取り組んだ。また、作業員や住民が、危険度（「要注意」、「現場から離れる」等）を簡単に識別できる色表示の仕方とした。

### b) 準備したOSVのための計測装置

計測には、変位をその場で光の色によって表示する光る変位計であるLEDS、既存の計測器（変位計、ひずみゲージ計、傾斜計）にLECを接続したもの、任意の場所に固定して離れたスクリーンに投射することでその角度変化を投影位置の変化によってみるレーザーポインタ

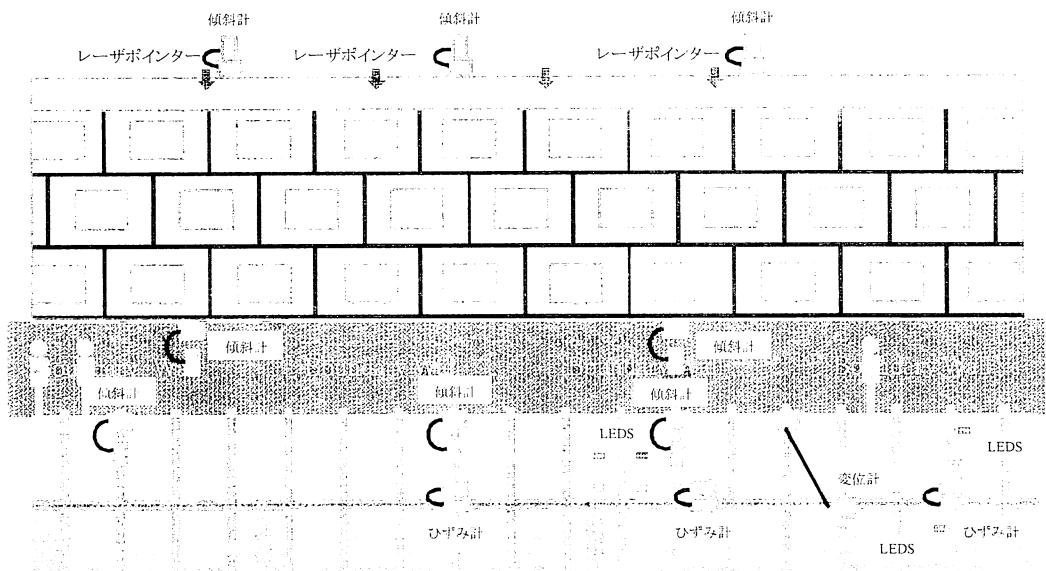


図-5 AIIMS 駅に設置した光る計測機器の断面配置図

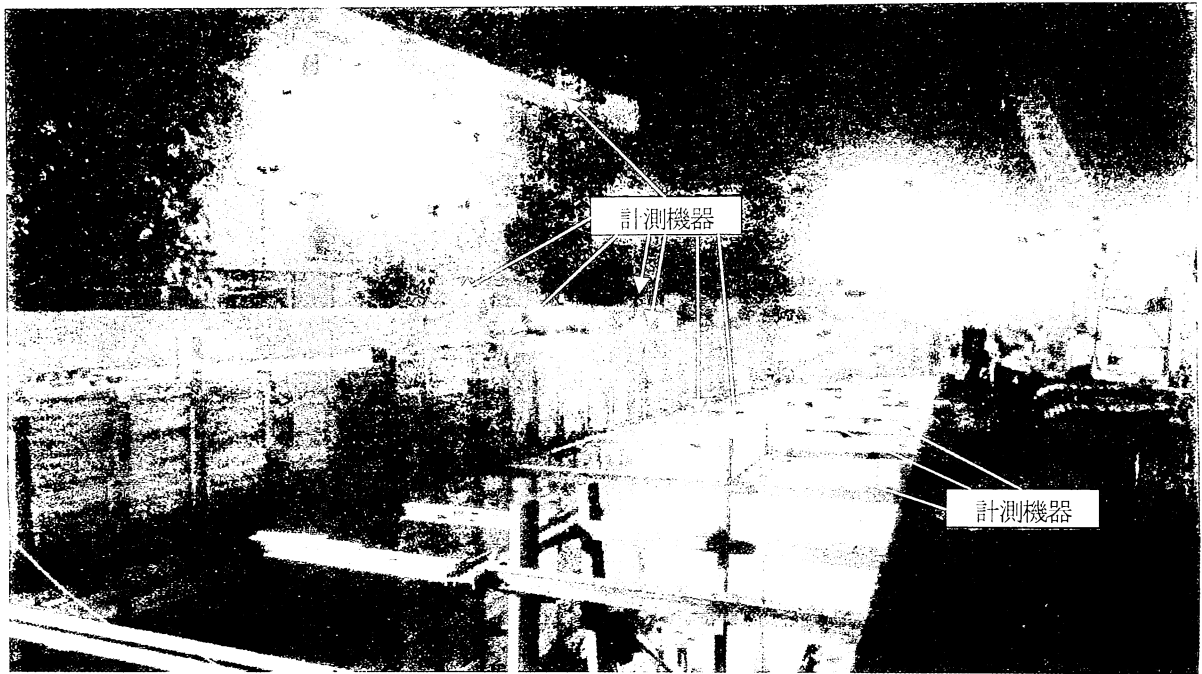


図-6 AITMS 駅に設置した光る計測機器

一の計20セット（表-1参照）を用いた。

LEDSは簡易の計測装置に発光ダイオード（LED）を用いた光出力機能を付加したものであり、任意の場所に設置でき、その場所に何らかの変化（動き）があれば、発光の色によってその程度を表示する機能を有している。2006年より、企業との共同開発を行う過程において、数回のモデルチェンジを行い、現場環境に耐える仕様となっている。最も最新のモデルは計測可能範囲が10mmに対して2mm毎に色が青、シアン、緑、黄、赤の順に5色変化するようになっている。現場の状況に合わせて、調整器具を用いることによって計測可能範囲を変化させることが可能である。

LECは光出力機能を備えたコンバータ（変換器）であり、既存の計測装置に接続することで、現状のデータを視覚的に確認することを可能にする装置である。5色の表示が可能であり、その設定は接続したパソコンによって行う。LECの特徴は、信頼性が確立されている既存の計測装置に連結できる上に、変位、傾斜、圧力、温度など多種のデータ計測に対応可能であり、パソコンに記録が可能である点である。

レーザーポインターを用いた計測方法はレーザー光線の直進性、反射特性を利用した直接的変状表示方法である。対象の計測箇所固定し、表示スクリーンに照射し、その位置の変化を測ることで計測箇所の変位、角度変化を計測する方法である。一般的に入手が簡単であり、主に夜間の変状確認に主眼を置いたものである。

表-1 計測に用いた光デバイスの設置状況

| 計測器                   | 設置状況 | 設置箇所                                     |
|-----------------------|------|------------------------------------------|
| 変位計+LEC<br>(1セット)     |      | 掘削中の山留め壁の水平変位                            |
| 傾斜計+LEC<br>(8セット)     |      | 掘削中の山留め壁の傾斜変化、住民建物との境界壁の傾斜、山留め背面の住民建物の傾斜 |
| ひずみゲージ計+LEC<br>(3セット) |      | 掘削中の山留めサポートの軸力                           |
| 変位計（LEDS）<br>(最大4セット) |      | 掘削中の山留め壁の土圧による腹み                         |
| レーザーポインター<br>(4セット)   |      | 山留め背面の住民建物の沈下や傾斜                         |

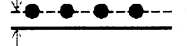
c) 計測の実施

AIIMS駅工事現場において、以下の項目に対して計測を実施した（図-5参照）。

- 掘削中の山留め壁（親杭）の水平変位
- 掘削中の山留め壁（親杭）の傾斜変化
- 掘削中の山留めサポート（切梁）の軸力
- 掘削中の山留め壁（横矢板）の土圧による腹み
- 山留め背面の住民建物との境界壁の傾斜
- 山留め背面の住民建物の沈下や傾斜

また計測に用いた光デバイスの設置状況を表-1に示す。

表-2 計測管理値の設定

| 計測箇所                           | 設計値      | 表示色の設定                                                                                            |
|--------------------------------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 掘削中の山留め壁の水平変位                  | 50mm     | Red 1.10×設計値<br>Green 0.75×設計値<br>0.50×設計値<br>Blue 0.25×設計値                                       |
| 掘削中の山留め壁の傾斜変化                  | 15/3300  | Red 1.10×設計値<br>Green 0.75×設計値<br>0.50×設計値<br>Blue 0.25×設計値                                       |
| 住民建物との境界壁の傾斜，<br>山留め背面の住民建物の傾斜 | 0.9/1000 | Red 1.10×設計値<br>Green 0.75×設計値<br>0.50×設計値<br>Blue 0.25×設計値                                       |
| 掘削中の山留めサポートの軸力                 | 1535kN   | Red 1.10×設計値<br>Green 0.75×設計値<br>0.50×設計値<br>Blue 0.25×設計値                                       |
| 掘削中の山留め壁の土圧による腹み               | 50mm     | Red 1.00×設計値<br>Green 0.75×設計値<br>0.50×設計値<br>Blue 0.25×設計値                                       |
| 山留め背面の住民建物の沈下や傾斜               | 0.9/1000 |  初期設定位置<br>設計値 |

d) 計測管理値の設定

計測を行うにあたって、光る変位計、LECの表示色は5色とし、計測管理値は表-2のように設定した。なお、設計値に関してはデリーメトロ公社のGeneral Consultantsの設計者によって設定された。図-6に実際にAIIMS駅でLEC、光る変位計が発光している様子を示す。

(3) 安全管理活動の実施

また、現場での計測実施にあたって、安全管理活動の取り組みとして、デリー地下鉄公社とコントラクターとの安全管理活動に関しての打ち合わせ、現場作業員に対する安全集会の実施、本調査の趣旨を記載した看板の設置、日々の安全確認シートの記入、緊急避難訓練等を行った。

5色表示の計器に関して、青色、シアン、緑色（ここまでは安全色）から黄色に変わった場合、現場責任者に報告、さらに赤色に変化した場合はその計器周辺から離れるよう指導を行った。

4. アンケート調査及びセミナーの実施

(1) アンケート調査の実施

約1カ月の計測を実施したのち、安全意識とOSVシステムについてCRRRI（Central Road Research Institute）の協力により、現場作業員、周辺住民・通行人、現場管理者・施工業者の現場指揮者の3パターンにわけてアンケート調査を行った。アンケート結果から、掘削山留め、切梁・腹起こし、周辺建物の挙動が、正常な状態かどうか、常に現場監督員、作業員の目に届くようになり、さらに日々の安全管理手順の中に、「光デバイス計測の色の確認義務」を盛り込むことで、現場作業員においては、安全意識の向上及び、現場環境の改善に寄与しているという結果を得られた。また周辺住民等に関しては、現場の安全性に関する情報開示の有用性を確認した。



図-7 現場作業員に対する安全集会

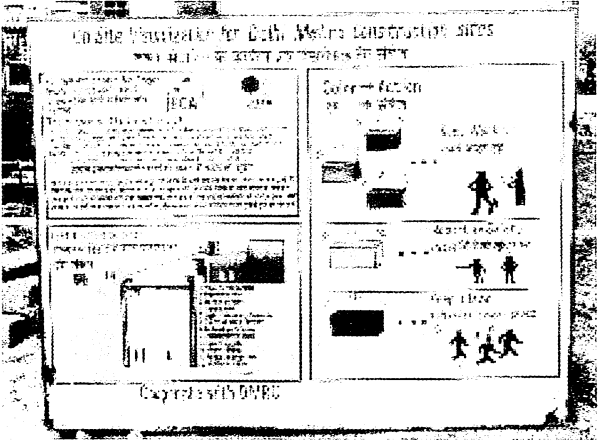


図-8 現場に設置された看板

## (2) セミナーの実施

アンケートの実施後、OSVを用いた安全管理活動に関する情報の共有、デリー地下鉄公社の安全管理技術の向上を目的として、デリー市内においてセミナーを開催した。セミナーにはデリー地下鉄公社のプロジェクトマネージャーをはじめ、施工業者の現場監督者、計測専門会社関係者に加え、インド国内他都市の地下鉄事業関係者を交えて意見交換を実施し、安全管理のためのOSV技術の効果的な適用について有益な議論を行った。

## 5. おわりに

工事現場における様々な情報を、「光の色という見える情報」に置き換えて現位置に表示することは安全管理上重要な意味を持つ。日本で適用を進めてきた成果を踏まえて、海外での初めての試行をインドで実施した。日中40度代後半という過酷な環境の現場であったが、最終的にはすべての計測機器が正常に稼働し、変位、軸力、傾斜を光の色によって現場で確認することが可能となった。また光の色は当初、炎天下の元では視認が困難であったが、LECのカバーを改良することによって視覚上の問題点は改善された。

現場の状況を光の色によって表示することで、情報を現場関係者だけではなく、一般市民にもリアルタイムで共有するというのはデリー地下鉄工事現場において、初めての試みであった。しかし安全管理活動を行うことで計測の目的、表示色の意味、光の色が変化したときの対応等が定着していき、施主、施工担当者、労働者のそれぞれが「今までになかった新しいモニタリング技術により安心して作業ができた」と評価を得た。

今回の成果をもとに、今後の課題として情報開示の在り方や、運用ルール等、OSVを用いた安全管理活動のあ

り方について検討し、社会基盤施設の維持管理、自然災害に対する対策等他の現場での適用を検討してゆきたい。

謝辞：デリー地下鉄工事におけるOSVモニタリングの適用については、JICAの調査プロジェクト「円借款支援による地下鉄事業における安全対策調査にかかる案件実施支援調査（インド、デリー）」として、プロジェクトの施主であるデリー地下鉄公社の監督のもとで実施した。光る計測装置の製作においては東亜エルメス（株）、北斗電子工業(株)、オフィスひもろぎ、（有）牛方商会、ユビロンファクトの方々の支援を得た。また、現場でのモニタリング実施については現地コントラクターのCEC-SOMAに協力いただいた。また、アンケート実施についてはCentral Road Research Institute of Indiaの支援を得た。関係各位に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Akutagawa, S., Takano, K., and Takenaka, T.: Development of a new device to translate relative deformation into color of light and its application (in Japanese), General Convention for Japan Society for Civil Engineers, Hiroshima, CD-ROM 3-01. 2007.
- 2) Akutagawa, S. and Mori, S.: Development of new deformation sensors for monitoring of infrastructures, Proceedings of the EIT-JSCE Joint Seminar on Rock Engineering, September 16-17, Bangkok, pp.192-195, 2008.
- 3) Akutagawa, S. and Yamada, H.: Visualization of tunnel risks by use of light emitting deformation sensor, Proceedings of the First China-Japan workshop on tunneling safety & risk, August 28-29, pp.49-55, 2009.
- 4) Akutagawa, S.: Light emitting deformation sensor and its application to geotechnical problems, Proceedings of EIT-JSCE Joint International Symposium 2009, pp.1-4, 2009.9.
- 5) Akutagawa, S., Mori, S., Kusui, A. and Nomura, M.: New concept for rock structure monitoring by light emitting sensors, pp.347-356, Proceedings of 2009 Korea-Japan Joint Symposium on Rock Engineering, 2009.
- 6) Akutagawa, S., Kusui, A. and Nomura, M.: Light emitting sensors as new visual tool for rock structure monitoring, Proceedings of EUROCK

## APPLICATION EXAMPLE OF ON SITE VISUALIZATION AT DELHI METRO CONSTRUCTION

Ayako KUSUI, Shinichi AKUTAGAWA, Reiko ABE, Chitoshi IZUMI  
and Atsushi TAKAHASHI

Despite of the advancement of monitoring devices at construction sites and the rapid progress of data management and IT, accidents in underground construction such as a face collapse is still threatening workers. It is difficult to cover all of dangerous regions by expensive devices. To overcome these problems, a new monitoring method, called On Site Visualization (OSV), has been developed. This paper describes the application example of OSV monitoring system at open cut station entrance site in Delhi Metro in India.