

豪雨による斜面崩壊が交通網に及ぼす被害を防止 するためのインターネット利用警報システムの開発

AN INTERNET BASED ALARM SYSTEM FOR MITIGATING RAINSTORM-INDUCED LANDSLIDES

王 林¹・R.オレンセ²
Lin WANG, Rolando ORENSE

¹ 中央開発株式会社 関東支社(〒332-0035 埼玉県川口市西青木 3-4-2)

² 中央開発株式会社 東京支社(〒169-8612 東京都新宿区西早稲田 3-13-5)

1. はじめに

写真-1 に示すような斜面崩壊による災害は、毎年のように豪雨の際に引き起こされている。交通路を土砂が塞いだり、道路や鉄道盛土が変形して通行に障害を起す場合も珍しくない。さらに、崩壊した土砂が土石流化して下流の地域住民に危険をもたらすことも、しばしば報告されている。従来の防災技術のワク組みの中において、豪雨時の斜面災害の軽減には、まず擁壁構築など危険斜面の事前補強があり、それが行えない場合には、危険にさらされる地域からの緊急時避難や危険と思われる交通路の閉鎖という手段が実施されて来た。そして「危険」の判断には、降り始めからの累積降雨量や単位時間あたりの降雨強度に基づく経験法則が使われている。

降雨の記録に基づいて危険の程度を判断することには、過去の経験を学習しているという長所がある。しかし、斜面崩壊の発生は降雨量だけで決まるものではなく、斜面勾配、斜面の土砂の材料強度なども当然、重要な影響因子である。現状の技術水準では、これらの因子を十分に考慮することができず、それにもかかわらず斜面崩壊の危険を回避しなければならないので、万一の誤判断を避けるために、かなりの安全余裕を見込んでいる。

現代の防災工学では、地震を中心としてリアルタイム防災という考え方が広まって来た。これは、対

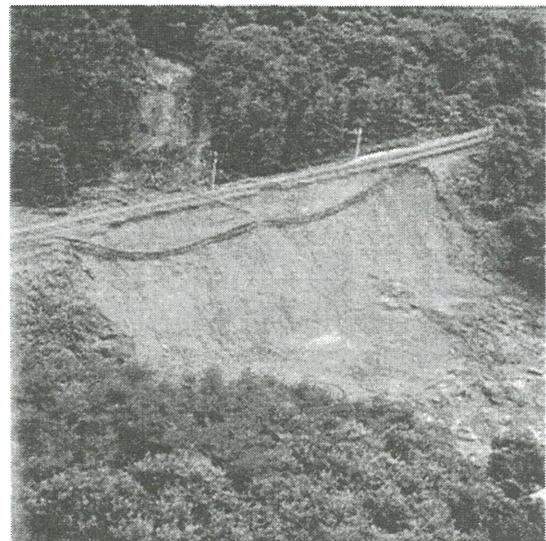


写真-1 豪雨によって崩壊した鉄道盛土

象地域の状況/情報を時々刻々に(リアルタイムに)収集し、的確な防災対応を速やかに実施しようという考え方である。その例として、地震や津波の前兆を計測して警告を発するシステム、社会施設の機能損傷を観測時震動から迅速に推定して二次災害の拡大を防止する技術などがある。このような考え方を豪雨時の地盤災害に適用すれば、事前の詳しい地盤調査をしなくても斜面崩壊の危険を直前に検知して警報発令、災害防止が可能となると考えられる。本

研究の目的は、現場観測用のセンサー及びインターネット経由の遠隔制御技術を組み合わせ、斜面の崩壊を直前に検知して対応を開始するリアルタイム斜面災害防止技術を具現化することである。

2. 土砂斜面の豪雨時崩壊を直前検知するロジック

(1) 既往研究の概要

オレンセラ^{1),2),3)}は、実際災害が発生した所の小見川砂と熊の平礫混じり砂を利用し、初期相対密度の影響・初期主応力の影響・水の浸透流速の影響・初期飽和度の影響を想定して室内せん断試験を行った。さらに崩壊手法(浸透流と人工雨)・相対密度・斜面勾配及び地盤形状(不透水層)を変えて合計10ケースの模型実験(長さ:197cm,高さ:90cm,幅:80cm)を行い、土砂斜面の豪雨時崩壊を直前検知するロジックを実験的に研究して来た。図-1は、上述したシリーズ試験に異方応力状態 $K=2.5$, $\sigma_3=25\text{kPa}$ の状態で水の浸透速度を変えながら得られた軸せん断ひずみと飽和度の関係の例を示す。即ち、三軸圧縮試験装置の中で試験体にせん断力を作用させ、この状態が常時の斜面に対応するとした上で、水分を浸透させて破壊を起させた実験例である。殆どの試験では、土粒子間隙の水による飽和度が90%に到達したところでせん断ひずみが急増し、破壊となった。また図-2は、小型の模型斜面に人工雨を降らせて崩壊させた実験の例である。水分含有率が飽和度にして90%程度に達したときに崩壊が起こったが、その様子は法尻に設置した変位計によって計測された。この変位記録には、崩壊に先立って微小な変位が起こったことも示されている。このような実験を積み重ね、現場斜面の飽和度=90%または微小な先行変位のいずれかが発生した時をもって、斜面の崩壊が切迫していると判定し、警報を発令すべきであるとの考え方に達した。実験をFEM解析で再現するため、不飽和・飽和浸透流解析(GMS-FEMWATER)⁴⁾を行った。図-3に示すように実験例の地下水位・体積含水率分布結果と不飽和浸透流解析の結果を比べるとほぼ一致する、即ち、不飽和浸透流解析で実験をほぼ再現できた。

(2) 本研究の概要

今回の研究開発の目的は、上記の先行研究を大型模型実験に適用して実用化可能な段階に成長させることである。そのためには、

I) 図-4に示すように現地に展開された水分計や変位センサーの信号をリアルタイムで収集し、これを

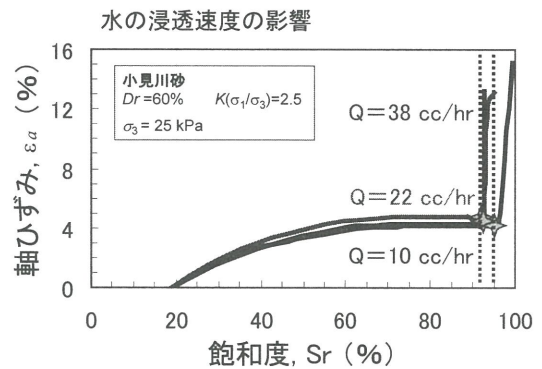


図-1 三軸せん断試験における水の浸透速度が軸ひずみに及ぼす影響

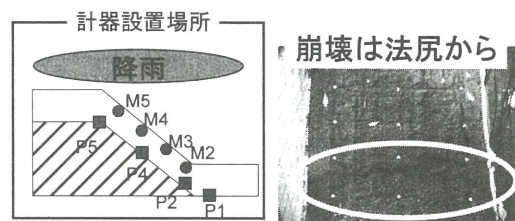
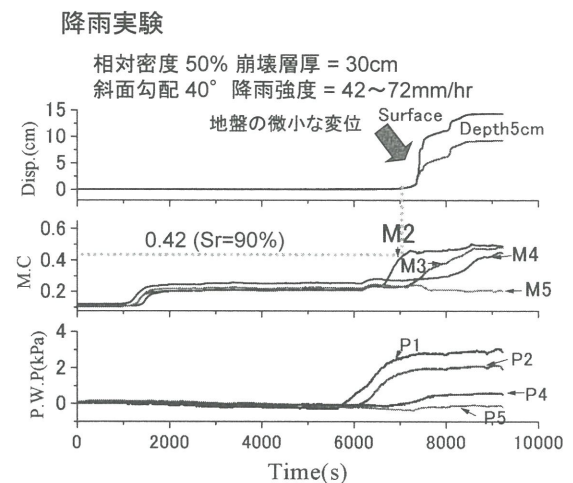


図-2 小型の斜面模型の降雨実験における法尻変位の時刻歴

フィードバック情報として雨水浸透の数値解析をもリアルタイムで計算し、斜面の危険度判定の信頼性を改善して警報を発令すること(現場観測と数値解析システムとのリアルタイム結合)、

II) システム設置の前提として既往の事例を分析し、リアルタイム観測の必要の無い斜面すなわち豪雨時にも崩壊しないと考えてよい斜面を交通路の沿線から抽出するロジックを構築すること、

III) 同じ事例分析から、センサー情報の如何によ

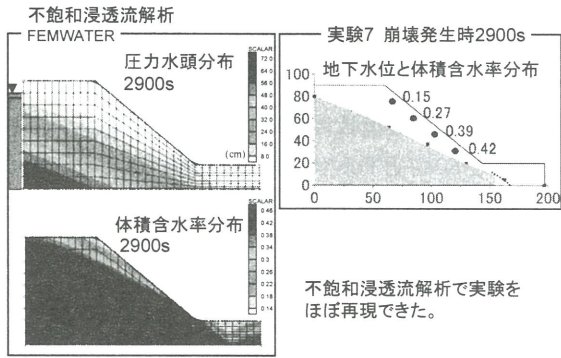


図-3 FEM 解析による試験再現

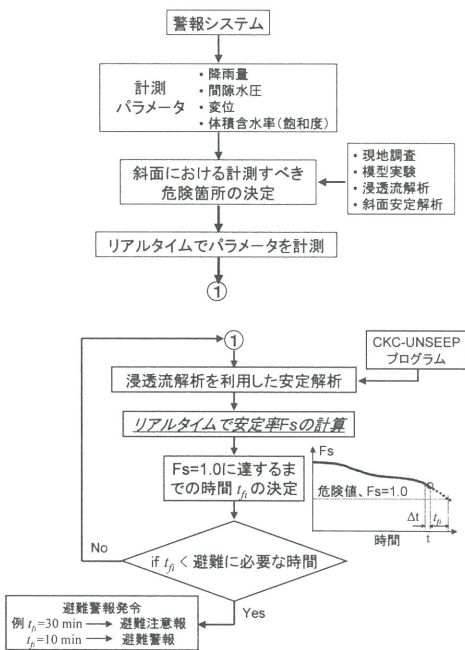


図-4 リアルタイム斜面防災警報システムのフローチャート

らず絶対に危険と考えられる降雨条件を導き出すことを実行する。

この技術を実用化することにより、豪雨時にも十分な安全を確保しながら交通機関のサービスを継続できる。危険な規模の斜面崩壊に対しては、その徴候を検出して警報を発令し、旅客の安全を確保する。従来安全確保の努力は現場の巡視など人力に依存して最高の安全度を確保して来たが、将来に向けて可能な作業はセンサーへの肩代わりを進行させる。警報と避難という行動は交通機関だけではなく、乱開発の進んだ山間の住宅地にも適用できるという成果

が期待される。

3. リアルタイム防災技術を構築した本研究開発の特色

既往の斜面崩壊／不崩壊の事例データを再分析し、豪雨時にも崩壊の起こらない斜面をリアルタイム計測の対象から除外するためのロジックを構築する。これによって現場で水分や変位などを観測する装置の設置投資から無駄を除く。またこれとは別に観測データの如何によらず交通路を停止／閉鎖しなければならない降雨条件も確定しなければならない。本研究で開発を目指しているのは、現状の技術では安全とも絶対危険とも言えない灰色ゾーンにおける交通路の運用技術なのである。

さて現場観測においてしばしば問題となるのは、測定情報の実用的な伝送手段である。本研究の中核を為すリアルタイム防災の考え方では、図-5に示すように、交通路沿いに布設されている回線の利用を考えているほか、携帯電話とインターネットを経由して現場計測データの収集と計測器の制御とが可能なシステムを開発する。さらに、このシステムを進化させ、変位計測GPSからデータの収集、雨水浸透の数値解析へのフィードバックとデータの交換、

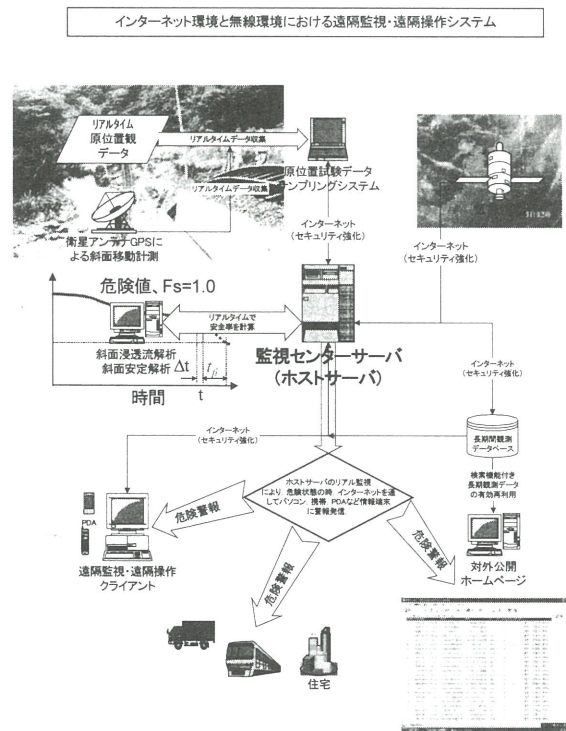


図-5 インターネット環境におけるリアルタイム監視・解析・警報システム

崩壊危険度判定と警報発信を行えるシステムに発展させる。警報発信では、システムとリンクする情報端末またはEメールを介した関係者への自動発信も可能である。

フィードバックとは、インターネットを通してデータ転送することにより、リアルタイムで現地観測と平行して行なわれる雨水浸透解析の結果を刻々に検証し、実測された水分量にあわせて解析内容を修正する（フィードバック）ことである。そして修正解析によって斜面崩壊開始までの時刻を推定できるようにする。現場斜面の崩壊危険度を正しく推定するためには、斜面全体にわたる水分増加を把握していることがきわめて重要であるが、水分計の測定は点のデータに過ぎず、やや不十分といわねばならない。この欠点を補うのが数値解析であり、解析につきものの情報不足による信頼性低下を補うため、フィードバック補正が時々刻々に繰り返されるのである。

交通路沿線の斜面災害防止に降雨観測以上の要素を導入することが、本研究の意義である。従来型の変形予測の数値解析には、入力データ収集に膨大な地盤調査が必要であるという限界があつて、広範な実用化がむずかしい。一方、現場の地盤挙動には、かならず崩壊前兆が現われるはずであり、それを検知しようとするリアルタイム防災は、詳細な地盤調査を必要としない利点がある。そして前兆現象の進展を連続してリアルタイム観測し、崩壊の程度と発生までの残余時間を予測して警報発令を決断するのは本研究開発の新しい試みである。データ通信に安価な携帯電話（サービス範囲内に限られるが、サービス範囲は年々拡大しつつある）とインターネットを利用することにより、データ観測地点や解析システムの設置位置に制約も無くなった。そして交通路の防災だけが対象ではなく、乱開発で雨期ごとに土砂災害の危険にさらされている住宅地の防災にも、避難勧告／警報等の発令を合理化、信頼性向上によって貢献できると考えられる。

4. 高度な IT 技術の地盤工学への応用（リアルタイム遠隔監視・遠隔制御システムの開発）

著者らは、ドットネット技術に基づき、二つ以上のプログラムをひとつのペアとして、長期監視を要する地盤沈下観測、地すべり発生地などの現場と遠隔監視側にそれぞれ動的配信し、これらが通信しながら遠隔監視・遠隔操作ができる GeoSoapService システムを開発した。さらに、近年まで開発した

Windows 土質自動制御システムも遠隔監視と遠隔操作システムに組み込んだ。本システムは、地すべり、地盤沈下観測などの監視対象の状況変化や遠隔ユーザからの要求に柔軟に対応できる遠隔監視・制御システムを SOAP と Web サービス技術の導入で可能にした。Microsoft 社の ADO.NET 技術でデータベースの開発により、社会貢献のため、原位置情報をリアルタイムに对外公開することが可能になった。

本研究開発コア技術のひとつとする GeoSoapService システムは、「.NET リモータリング技術」、「SOAP と Web サービス技術」、「ハードウェアの制御技術」を導入及び連携することによって、以下の機能を実現している。

- a) 世界中のどこに行っても、インターネットと接続が可能なパソコン・PDA・携帯が有れば、遠隔地の計測機器及び設備の稼動状況をコントロール・監視できる。
- b) 異常時には、email で即時にパソコン及び携帯に警報を発信する。
- c) リモートコントロール機能としては、サンプリング時間間隔の調整、警報を出す設定条件の遠隔調整、監視カメラ撮影方向の調整などのメンテナンスを行うことができる。

(1) システムに採用した遠隔制御の概況

図-6 は、RPC (Remote Procedure Call, リモートプロシージャコール) 技術の概念を示す。RPC とは、分散システムを構築する際に利用される基本技術である。クライアントアプリケーションは RPC 技術を利用して、別のコンピュータ上で動作しているサーバプログラムのプロシージャを実行させ、そのサービスを受ける。RPC の実行プロセスは、まずクライアントにより引数パラメータを含めて特定のプロシージャを識別できるような情報をサーバへ引き渡し、それによりサーバからクライアントへ実行結果が返される。このため、RPC 技術の本質は、プロセス間

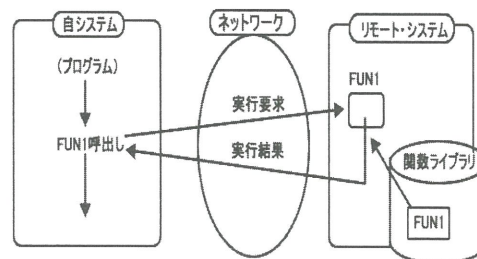


図-6 遠隔操作 RPC 技術の概念図

のデータ交換技術である。

RPCは、図-6に示すように一般の関数呼び出しをネットワークのリモートシステム内にまで広げたものである。RPCではクライアントとサーバ間の情報の受け渡しは、関数の引数という形で行うことになる。

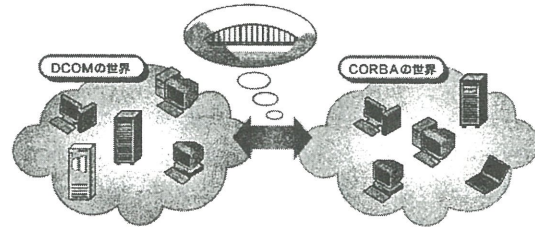


図-7 SOAP技術は、各種の分散技術の架け橋

(2) システムが使用した SOAP と Web サービスの概要

政府機関または企業の Web サーバはセキュリティ (Security) 上の理由で、通常ファイアウォール (Firewall) が設置されるので、上述した RPC の命令 (バイナリメッセージ) がこのようなファイアウォールを透過するのは殆ど不可能である。または、従来の RPC 技術は、OS (Operating system) に依存するため、特定のプラットフォーム (Platform) 上しか動作できない。上述した背景で、Microsoft、IBM などが主導する国際標準組織 W3C ワーキンググループは、SOAP という技術仕様を開発し、Web サービスのインターフェイスの国際標準化を行っている。SOAP は、Simple Object Access Protocol の略称であり、ここでの SOAP とは、Web サービスで使用されるメッセージのデータフォーマットや、メッセージの処理ルールを定めた通信規約のことである。また SOAP 規格に準拠した XML (Extensible Markup Language) 形式のメッセージのことを SOAP メッセージと呼ぶ。

上述した問題を解決するため、最近、SOAP と Web サービスという RPC 技術が提案された。Web サービスとは、簡単に言うと、従来型の DLL や ActiveX などのようなソフトウェアコンポーネントのインターネット版である。すなわち、インターネットを経由して、RPC の手段を提供するものである。これは、本システムが SOAP と Web サービスを採用した理由である。

広範囲な土砂災害を監視する場合は、異なる場所の分散監視と集中管理が必要である。分散オブジェクト技術は、異なるコンピュータ上に分散したアプリケーションをオブジェクトとしてとらえ、オブジェクト間でデータを交換することによって分散処理を実現する。しかし、これまでの分散オブジェクト技術には問題点があった。1 つ目の問題点は、異なるアーキテクチャによる分散オブジェクトシステム (例えば、CORBA で構築したシステムと DCOM で構築したシステム) の相互接続が容易でないことである。図-7 で示すように両者のプロトコルを変換して 2 つの世界を橋渡しするための仕組みが必要になってしまうことである。

これに対して SOAP を使用した場合には XML ベースでの通信になるので、既存の XML ツールや環境を応用することができる。したがって、すでに XML ベースで開発しているシステムからの移行もスムーズに行える。さらに SOAP は様々なプロトコルにバインディングして使用できるという利点がある。たとえば HTTP (Hyper Text Transfer Protocol)、SMTP (Simple Mail Transfer Protocol) といったサーバに標準的に実装されているプロトコルにバインディング (結合) して使用すれば通信相手は限定されないし、ほとんどのファイアウォールを通過できる。このように SOAP を使用すると環境に依存しない「開かれた」アプリケーションの作成ができる。

(2) インターネットでの情報公開

現場データサンプリング及び機器制御システムは、記録した原位置データ資料を将来の財産と考えており、またはインターネットのパワーを十分発揮するため、Windows SQL Server 2000 をサンプリングデータベースとして Microsoft 社の ADO.NET 技術により開発した。ADO.NET は、インターネットまたはローカルネットワークのデータアクセスコンポーネントであり、データプロバイダの機能も提供されている。

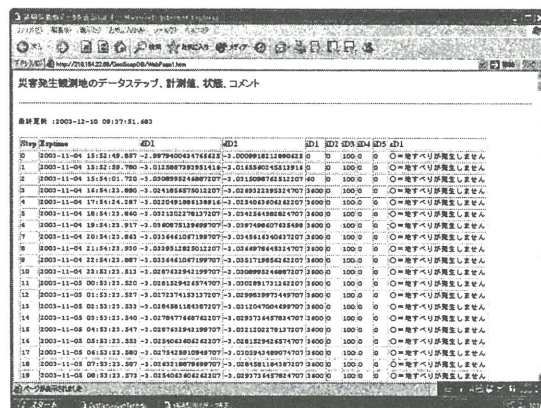


図-8 必要な情報をインターネット配信

このデータベースは、ホストサーバと同じようにインターネットの環境であれば、世界中にどこに置いても構わない。遠隔監視・遠隔制御が行われるシステムは、リアルタイムで原位置データ上をこのデータベースに書き込んで、Windows SQL Server は、Web サーバ (IIS) をインターネットに配信することになる、図-8 で示すようにブラウザで必要な情報を閲覧できる。一般的には、情報サービスのユーザが異なるため、ADO.NET 技術で種類別にユーザを分類して、特定の情報を配信するのは比較的簡単である。

(4) パソコン用クライアントシステム

図-9 は、Microsoft 社の開発ツール VC#.NET により開発した監視クライアントシステムを示す。主な機能は、以下の通りである。

a) TCP チャンネル通信の場合には Windows コンソールホストと Windows サービスホストで、HTTP プロトコル通信の場合には SOAP Web Service システムを通して世界中に分散している監視端末をグローバルの IP アドレスの切り替えにより個別管理及び集中管理と制御することができる。

b) クライアントシステムは、リモートサーバーを通して原位置における危険情報を随時にチェックし、危険が生じた場合には、画面上にある **Emerge Lamp** を点滅することにより、危険情報を知らせる。このときクライアント画面上にある終了ボタンを押すだけで、インターネットを通して原位置にある機械及び装置を終了させることができる。

c) クライアントシステムは、SOAP と Web サービスの技術を利用して、原位置にある監視制御プログラムのメソッドを制御することにより、ハードウェアに対する制御もできる。

5. おわりに

このシステムは、現場のセンサーからのデータ収集や制御および数値処理が中央計算機システムによって行える他、同じコンピュータで並列に実行される数値解析との結合にも拡張が可能である。同種のシステムはリアルタイム防災の分野で他にも存在するが、データの伝送に専用回線を設けたり、あるいは電話会社の一般回線に依存したりしているため、設置や回線使用料金が高価となる問題があった。これに対して本システムの特長は、データの伝送にインターネットネットワークを採用していることである。こ

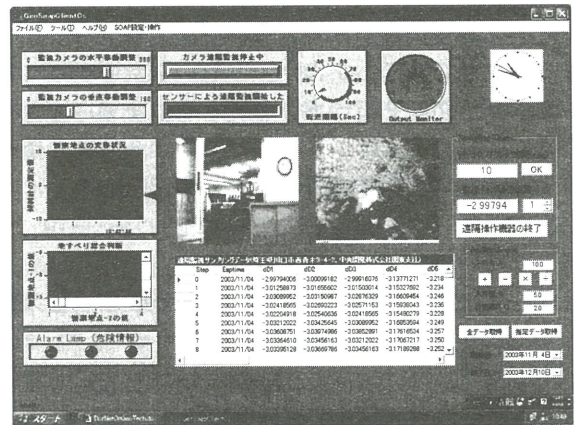


図-9 VC#.NET より開発した遠隔監視・遠隔操作クライアント

の技術によって高速データ伝送が安価に行えるだけでなく。インターネットに接続さえ可能であれば、中央システムの設置場所にも制約が無い。また現場のデータを携帯電話を介して送ることも安価かつ容易に対応できる。

参考文献

- 1) Farooq, K., Orense, R. P. and Tohata, I. (2004) : Response of Unsaturated Sandy Soils under Constant Shear Drained Condition, Soil and Foundations, Vol. 44, No. 2, 1-13.
- 2) Orense, R., Farooq, K., Shimoma, S., Honda, T. and Tohata, I. (2003) : Laboratory Experiments on Failure Initiation in Sand Slope due to Rainwater Infiltration, Proceeding, Soil and Rock America 2003, Cambridge, USA., Vol. 2, 2465-2470.
- 3) 下間英, Farooq, K., 本多剛, Orense, R., 東畑郁生 (2003) : 降雨時の斜面崩壊予測に関する室内要素試験・模型実験, 「降雨時の斜面崩壊のメカニズム及び危険予測」に関するシンポジウム論文集, 29-38.
- 4) Groundwater Modeling System, Brigham Young University (2000).
- 5) .NET Framework 「.NET リモート編」, 秀和システム出版, 2003 年.
- 6) Microsoft ADO.NET 実践講座, Rebecca M. Riordan 著, 日経 BP ソフトプレス出版, 2003 年.
- 7) SOAP, UDDI, WSDL Web サービス技術の基礎と実践, 日本ユニック Digital Xpress 編集部著, 技術評論者出版, 2002 年.

(2004. 6. 18 受付)