

# フィルダムロックゾーンのリアルタイム盛立品質管理システムの開発

矢野 康明・大浦 篤・藤山 哲雄

神流川上部ダムでは、転圧面の品質をリアルタイムかつ面的に評価できる手法として、振動ローラの加速度応答を利用した締固め管理手法に着目し、本手法とGPSを併用したロックゾーンのリアルタイム転圧管理システムを開発・導入した。本システムでは、振動ローラ加速度応答により転圧面の品質を施工を行いながら判定、これを現場内に構築した無線LANを通じて現場管理室にリアルタイムにモニタ表示し、施工状況の監視、ならびに次工程へのフィードバック等を行いつつ、合理的かつ綿密なロックゾーンの品質管理を実施している。本報文では、神流川上部ダムに導入したリアルタイム盛立品質管理システムの内容、導入からの運用結果について報告する。

キーワード：ダム、フィルダム、ロック材料、振動ローラ、加速度計、品質管理、全数管理、無線LAN、情報化施工

## 1. はじめに

一般に、フィルダムロックゾーンの品質管理は水置換法による密度管理が行われるが、大粒径を含むロック材の現場密度試験は多大な手間と労力を要するために測定頻度が希薄にならざるを得ず（通常数か月に1回）、材料のばらつき等に起因する堤体品質の不均一性までを評価した合理的な管理は困難である。

そこで神流川上部ダムでは、ロックゾーン転圧面の品質を面的かつリアルタイムに評価できる手段として、振動ローラ加速度応答を利用した締固め管理手法<sup>1)</sup>（以下、ローラ加速度法と称する）に着目し、堤体品質の全数管理によって管理精度向上を図るためのリアルタイム盛立品質管理システムを導入した。本システムは平成14年4月に導入後、約1年の稼働を経て現場品質管理の合理化に大きく貢献している。以下では、システムの概要、ならびに実施工での運用結果について報告する。

## 2. 神流川上部ダムにおけるローラ加速度法導入の背景

### (1) 神流川上部ダムの概要

神流川上部ダムは、東京電力株式会社が建設中の中央土質遮水壁型ロックフィルダムであり、平成11年10月より盛立てに着手し、平成14年12月現在で約90%の盛立進捗となっている。ダム概要、ならびに

標準断面図をそれぞれ表-1、図-1に示す。堤体土量は722万 $m^3$ 、このうちロックゾーンは約78%の体積を占めている。

表-1 神流川上部ダムの概要

工事名	神流川水力発電所新設工事上部ダム工区
形式	中央土質遮水壁型ロックフィルダム
形状	堤高：136 m、堤頂長：444 m、堤体積：722万 $m^3$
建設地点	長野県南相木郡南相木村
計画	着工 平成9年3月、竣工予定 平成17年6月

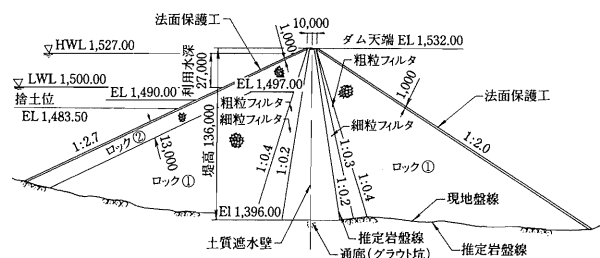


図-1 神流川上部ダム標準断面図

### (2) ロックゾーンの品質管理方法

盛立開始当初に設定したロックゾーンの施工・品質管理基準を表-2に示す。品質管理基準は、事前の室内強度試験（大型三軸圧縮試験）と転圧試験結果を総

表-2 神流川ロックゾーンの施工・品質管理

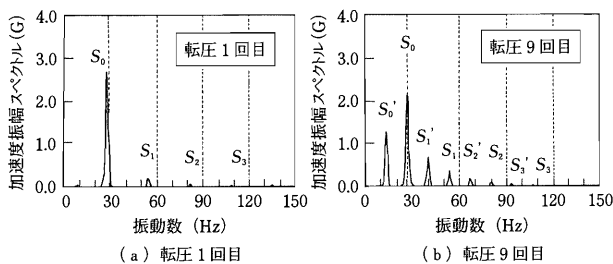
施工管理基準	撤出し厚	150 cm
	敷均し機械	38 t級ブルドーザ
品質管理基準（基本）	転圧機械	18 t級振動ローラ
	転圧回数	4回
	管理基準	$\rho_d \geq 1.99 t/m^3$
	測定法	水置換法（直径2 m×深さ1 m）
	測定箇所	転圧面
	測定頻度	1回/1か月

合評価し、現場転圧密度  $\rho_d = 1.99 \text{ t/m}^3$  以上を水置換法により確認するものとした。しかし、置換孔直径 2 m、深さ 1 m にもなるロック材の現場密度測定には多大な労力と時間を要するため、現実的には多点の測定を行うことは不可能である（本ダムでは既往ダムの実績等を参考に、測定頻度は 1 か月に 1 点）。しかしながら、本ダムでは多様なロック材料の発生が予想されたことから、これらの撒出し材料のばらつき等に起因する堤体品質の不均一性を評価し、綿密な品質管理を行う必要性が考えられた。

そこで、施工面全体の品質を面的に、かつ施工しながらリアルタイムに評価できる手法として、近年その研究が進展しているローラ加速度法<sup>1)~3)</sup>に着目し、これを用いたリアルタイム盛立品質管理システムを構築して、盛立品質管理をより厳密に行うこととした。

### (3) ローラ加速度法の概要

ローラ加速度法は、地盤の剛性が增大するにともない振動輪の鉛直方向加速度が変化してくる現象を利用した手法であり、あらかじめ地盤の密度や剛性と加速度応答の関係を掴んでおくことにより、振動輪の加速度計測から転圧中にリアルタイムに地盤の締固め度合いを判定することができる。ここでは、振動ローラ加速度の定量指標として、加速度波形の周波数特性を利用した図-2 に示す乱れ率を用いる<sup>2)</sup>。乱れ率が大きいほど加速度波形の変化が激しく、地盤が固いことを表す。



$$\text{乱れ率} = \frac{\sum_{i=1}^3 S_i + \sum_{i=1}^3 S_i'}{S_0 + S_0'} \times \frac{F}{(m_1 + m_2)g} \dots\dots\dots (1)$$

$m_1$ : フレーム重量,  $m_2$ : 振動輪重量,  $F$ : 起振力

図-2 加速度の FFT 解析結果と乱れ率の定義

### (4) 振動ローラ加速度応答とロック材品質の関係

本ダムの数種類のロック材を用いて転圧試験を実施し、振動ローラ加速度応答（乱れ率）と大型 RI を用いて測定した転圧面の乾燥密度の関係を調べた結果、乱れ率と乾燥密度は比較的良好な正の相関を有するものの、ロック材の岩種毎にその関係が異なることがわかった。すなわち、乱れ率から地盤の密度を推定する

ためには、発生する全ての材料に対し両者の関係をあらかじめ用意する必要がある。しかしながら、多大な費用がかかる転圧試験を数多く実施することは現実的ではない。

一方、乱れ率（ここでは転圧 4 回目の加速度を計測）と転圧面の含水比（大型 RI を用いて測定）の関係を整理すると、図-3 に示すように材料の種類によらず比較的良好な相関を有することがわかった。さらに、室内三軸圧縮試験結果から、ロック材の自然含水比  $w_n$  と内部摩擦角  $\phi$  の関係が図-4 に示すように岩種によらず一意的な関係を有することを見出した。すなわち、振動ローラ加速度を計測することで、転圧面の含水比を判定し、さらに図-4 を介して転圧面の強度定数（内部摩擦角  $\phi$ ）を推定することができる。乱れ率と含水比が相関を有するのは、含水比が低い材料ほど粒度が粗く、大粒径を含む材料であり、より転圧面剛性が大きい（すなわち乱れ率が大きい）ことに起因すると思われる。これらロックの材料特性、強度特性と振動ローラ加速度応答に関する土質力学的な考察については、別途報告する予定<sup>4)</sup>である。

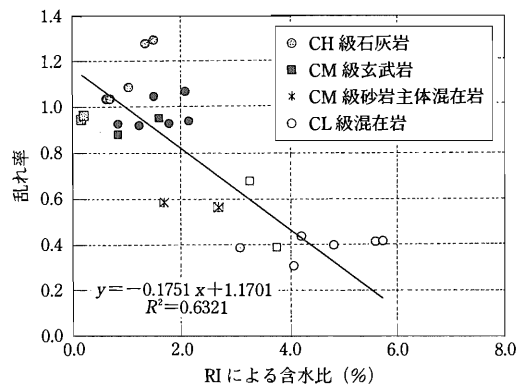


図-3 ロック転圧面の含水比と乱れ率の関係

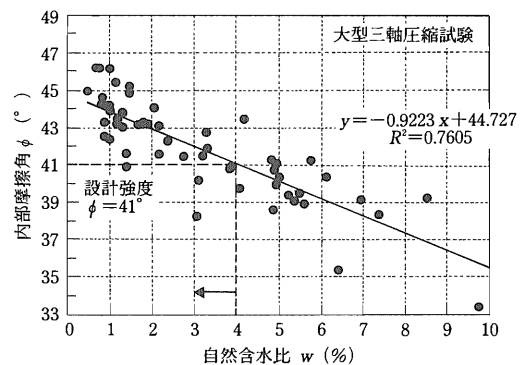


図-4 室内試験による含水比と内部摩擦角  $\phi$  の関係

## 3. リアルタイム盛立品質管理システム概要

(1) ローラ加速度法を用いたロック品質管理方法  
 神流川上部ダムでは、ローラ加速度法を用いた日常

品質管理を以下のように行う。まず、施工中のローラ加速度（乱れ率）から図-3、図-4を用いて転圧面の含水比と内部摩擦角の面的な情報を取得、所要品質（設計内部摩擦角 $\phi \geq 41^\circ$ ）を確保していることをリアルタイムに確認する。

次に、転圧面の品質のばらつきを考慮し、強度の小さい箇所への次の撒出し層には良質材（低含水比材料）を、逆に強度の大きい箇所への次の撒出し層には比較的高含水比の材料を選択し配置することで、堤体全体として所要品質を確保しつつ、掘削材料を効果的に活用するものとした。採取場での材料の選択は、フライパン法を用いて測定が簡易に行える含水比を指標として行った。

(2) 盛立品質管理システムの基本構成

開発した盛立品質管理システムの概要を図-5に示す。以下にシステム各部の概要並びに特徴を述べる。

(a) 加速度演算処理部

振動輪に加速度計を接着し、加速度データを運転席内の演算処理装置（写真-1）に取込み、A/D変換、FFT（Fourier Fast Transform）を行って(1)式に従い乱れ率を2.0s間隔で計算する。演算処理装置には、あらかじめ実験的に得ている乱れ率-含水比関係（図-3）、および含水比-内部摩擦角関係（図-4）を記憶させることができ、計測した乱れ率から転圧面の含水比および内部摩擦角を逐次リアルタイムに演算す

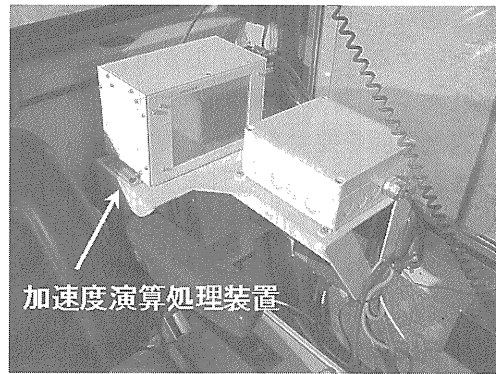


写真-1 加速度演算処理装置

る。本装置の大きさは幅23cm×奥行12cm×高さ14cm、重量約3kgのコンパクトな設計となっており、振動ローラ運転席内において多くのスペースを必要とせず、また400Gの衝撃にも耐える設計としている。

(b) GPS

振動ローラの位置情報を取得するため、RTK-GPSを搭載した。GPSによる位置情報は、加速度情報（乱れ率、含水比、内部摩擦角）と同期されて結果表示・保存用車載ノートパソコンに取込まれる。

(c) 結果表示・保存部（車載ノートパソコン）

振動ローラの運転席内には防塵・耐振型タイプのノートパソコンを設置し、ここから出力される加速度情報と位置情報を同期して取込み、50cm×50cmメッシュに分割した画面上の転圧平面において、含水比や内部摩擦角の大きさに応じて色の違いによりリアルタイム

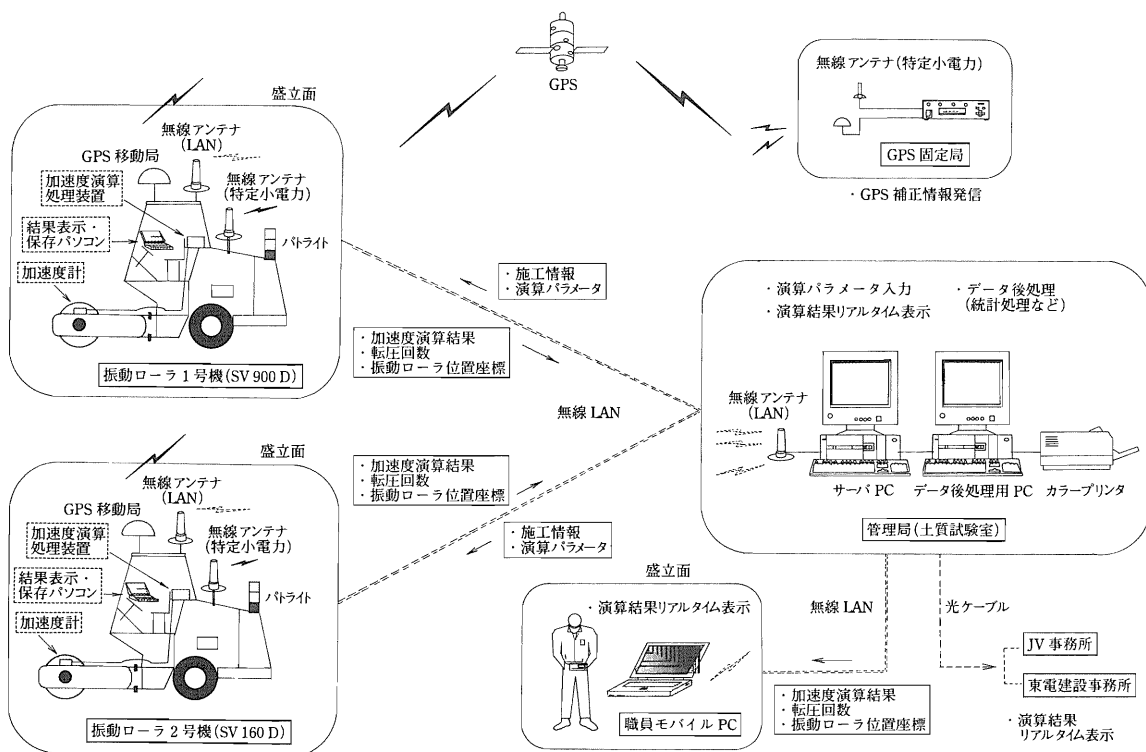


図-5 盛立品質管理システム概要

に表示させる。含水比のリアルタイムモニタによる表示例を図-6に示す。

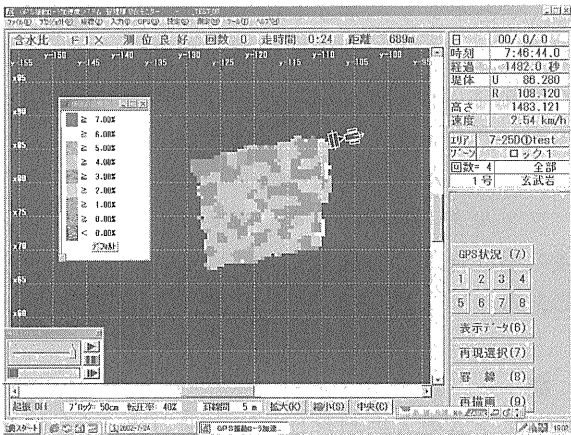


図-6 リアルタイムモニタ表示例(含水比の場合)

取得された加速度データは転圧終了と同時に自動的にファイル化され、CFカードに記録すると同時に、無線LAN(後述)を通じて土質試験室に伝送される。

なお、本システムでは振動ローラの走行位置情報から転圧回数を自動判定するアプリケーションを装備しており、画面を転圧回数表示に切替えることで、オペレータは転圧回数を確認しつつ、確実な施工を行うことができる。

### (2) 現場内LANの構築

①転圧面品質のリアルタイムな確認、および②昼夜連続施工のスピードに対応して次層撤出し材料の迅速な決定を可能にするため、図-7に示すように振動ローラ車載PCと、盛立を管理する職員の携帯PC、ならびに1.2km離れた土質試験室、約12km離れたJV事務所・東電建設事務所間でLANを構築し、取得データをリアルタイムに送受信できる体制とした。すなわち、振動ローラ車載PCに表示される図-6の画面を無線LANで接続された各PC画面上に同時に表示することで、転圧中の材料が想定材料であるか否かを関係職員が随時チェックする(写真-2)。

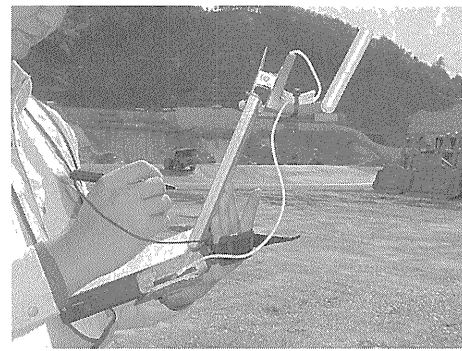


写真-2 携帯PCによるリアルタイムでの確認状況

さらに、取得結果ファイルは転圧終了と同時に直ちに土質試験室に伝送されるようにしており、この結果をもとに試験室の専門管理員が次層に撤出すべき材料を迅速に判断する。これに伴う各種設定入力情報の変更は、無線LANを介して土質試験室側から遠隔で即座に変更できるシステムとしている。

堤体内での無線LAN構築においては、2.4GHz帯小電力データ通信用無指向性アンテナをダム軸付近の左右岸天端に設置した。ここでは、ダム盛立面がV字谷形状下に位置するために送受信ができないデッドゾーン(図-8)を、重機位置に応じて左右岸天端の使用アンテナを自動切替える2波同時通信型無線LANカードを使用することで、ダム盛立施工範囲約350m全域の電波送受信を可能とした。また、指向性アンテナは後部に反射板を組合せて設置し、電波送受信効率を高めている。

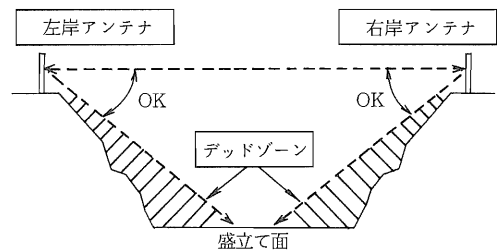


図-8 堤体内の無線LAN通信デッドゾーン

### (3) データ後処理ソフトの開発

日々取得される振動ローラ加速度データは膨大な量になるため、これを効率よく処理するツールの開発は、日常管理業務の中で必須となる。今回、出力情報をデータベース化し、50cm×50cmメッシュで得られる加速度情報を任意のメッシュサイズで平均化処理して、平面・断面的に表示・出力でき、かつ平均値や標準偏差算出などの統計処理を容易に行えるデータ後処理ソフトを開発した。これにより、現状の盛立面上における任意の場所に対して容易に含水比の状況を把握し、次層の撤出し材料を迅速に決定することができる。

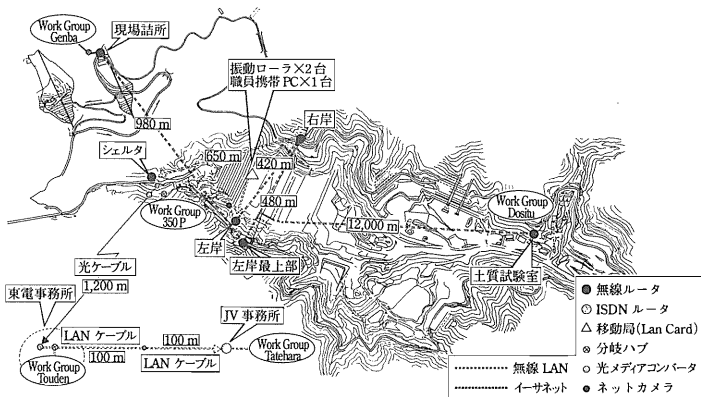


図-7 現場内LANの構築

### 3. システム適用結果

本システムにより推定された内部摩擦角の平面分布の一例（EL. 1,475 m 平面）を図-9 に示す。また、標準断面の上流側における内部摩擦角の分布を図-10 に示す（ただし縦 3 m×横 6 m メッシュに平均化して表示）。設計強度が大きいロックゾーン②（図-1 参照）には CH 級の良質岩を選択的に配置したが、この領域の内部摩擦角が大きめとなっていることがわかる。このように、実施工データに基づいて堤体強度の詳細な分布を 3 次元的に評価した事例はこれまで皆無であろう。図-10 の内部摩擦角分布を用いて円弧すべり安定計算を行えば、設計に対して現行堤体がどの程度の安全率を有するかを定量的にチェックしながら盛立を進捗させることができる。

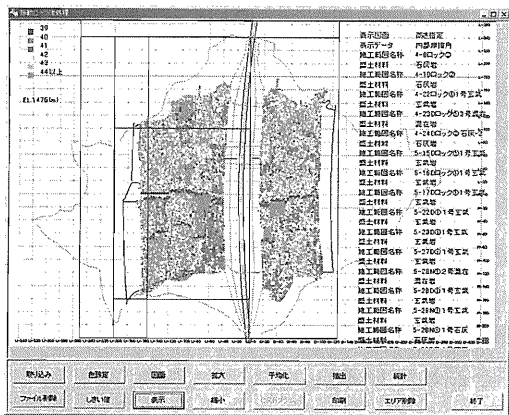


図-9 取得した内部摩擦角平面分布の例

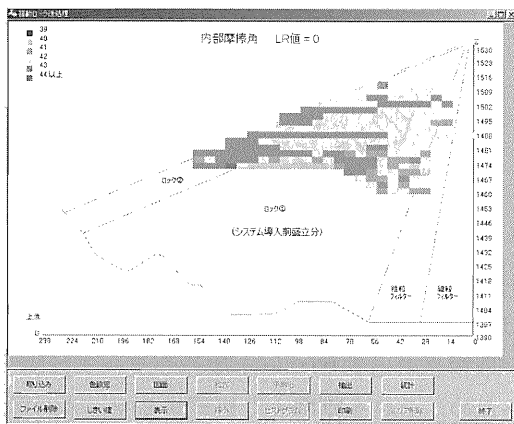


図-10 ダム標準断面における内部摩擦角の分布

### 4. おわりに

神流川上部ダムに導入したローラ加速度法によるリアルタイム盛立て品質管理システムについて報告した。本システムを従来の密度管理と併用することによって、品質管理精度が格段に向上するとともに、品質のばら

つきを考慮した効果的なゾーニング配置による材料の有効活用も実現することができた。また、現場内の無線 LAN とインターネット接続によって、携帯 PC から現場にいながらの気象情報等の取得、構内無線電話と外部電話の接続、CCD カメラの場内設置による遠隔監視なども可能となり、現場作業の効率化にも寄与している。これら新技術を駆使した施工管理システムが、フィルダムのみならず、様々な土構造物に対する今後の盛立管理の合理化に貢献していくことを望む次第である。

### 謝 辞：

本システム導入に当たり、東京電力株式会社の角江俊昭、谷中保男、内田善久の各氏、前田建設工業株式会社の小原好一、石田信秀、吉田純也の各氏ほか多くの方々のご助力を得た。また、本システムの加速度演算・表示部は、株式会社大林組が開発した盛土管理システム COMPACT を本ダム用にカスタマイズして適用したものであり、古屋弘氏には惜しめないご支援を頂戴した。多くのご協力を頂いた関係各位にこの場を借りて謝意を表する次第である。



### 【参考文献】

- 1) 嶋津 晃, 見波 潔, 中田公基, 嶋田 功, 足立賢一: 振動ローラによる盛土の締固めに関する調査, 土木研究所資料, 第 2184 号, pp. 37-76, 1985.
- 2) 藤山哲雄, 建山和由: 振動ローラの加速度応答を利用した転圧地盤の剛性評価手法, 土木学会論文集, No. 487/III-26, pp. 237-245, 2000.
- 3) 古屋 弘, 藤原宗一: 加速度センサーと GPS を組み合わせた締固め管理システムの開発, 土と基礎, No. 507, pp. 21-24, 2000.
- 4) 谷中, 矢野, 鶴田, 梅園, 石黒, 高橋, 藤山: 振動ローラ加速度応答によるロックフィルダムの品質管理, 第 58 回土木学会年次学術講演会 (投稿予定).

### 【筆者紹介】

矢野 康明 (やの こうめい)  
東京電力株式会社  
建設部  
土木総括・水力土木グループ  
グループマネージャー



大浦 篤 (おおうら あつし)  
東京電力株式会社  
建設部  
土木・建築技術センター  
ダム技術グループ  
主任



藤山 哲雄 (ふじやま てつお)  
前田建設工業株式会社  
技術本部  
技術研究所  
技術開発土木グループ  
主任

