

# 加速度計とGPSを利用した 締固めの管理方法の高度化

古屋 弘・藤原宗一・三好哲也

一般に盛土の品質管理は材料別に試験盛立てを行い、この結果に基づいて工法規定で管理することが多く、施工方法、施工手順を定め、それを確実に遵守することが施工管理項目となる。近年ではこの手法に、GPSを用いて転圧機械の位置や軌跡を計測し、転圧エリアと転圧回数を管理するシステムが導入されることも多くなってきている。

筆者らはこのような施工管理手法を発展させ、品質規定にも適用可能な新たな加速度センサとGPSを組合わせた新しい締固め管理手法を開発し、フィルダムの現場等に適用した。この新しい管理システムにおいて加速度データを解析した結果、これらのデータは締固め評価の指標となり得ることが確認できた。

キーワード：ダム、盛土、締固め、フィルダム、施工管理、品質管理、GPS、加速度計、GIS

## 1. はじめに

建設工事における施工管理は、工事管理の中で安全管理や原価管理等とともに重要な管理であり、その管理項目としては、

- ① 工程管理、
- ② 品質管理、
- ③ 出来型管理、
- ④ 現場計測による盛土の沈下・安定管理、

がある<sup>1)</sup>。

ここで、①の工程管理は、所定の構造物を定められた工期内に所定の予算内で完成させるといった、いわゆるマネジメント管理の項目であり、③の出来型管理は、所定の位置に所定の大きさの構造物を造成する管理項目である。また④の計測管理による管理項目は、施工中の安全と周辺への影響抑止を目的としたものであり、計測装置の高性能化やコンピューターの導入も進み、各種オンライン計測技術やデータ通信技術と相まって、計測とその結果の算出までの時間の短縮が図られるようになってきている。

ところで、建設工事においてもISO 2394（構造物の信頼性に関する一般原則）に基づく信頼性設計法が適用されつつあり<sup>2)</sup>、建築基準法<sup>3)</sup>や土木学会のコンクリート標準示方書では性能規定の方向を打出している。このような社会の流れの中で、土木工事においても性能規定による構造物発注は必然的となりつつある。

本報文では、この「土構造物の性能を保証する」性

能規定に対して十分対応しうる施工管理手法の一つとして、施工に用いる振動ローラに取付けた加速度センサを用いて地盤の締固め度等を面的にリアルタイムに判定するシステムの開発と、この施工管理技術を適用した事例に関して報告する。

## 2. 土工事における品質管理の問題点

前述のように、土工事においてその性能を規定するうえで重要なのは材料である土の均一性である。特に土にかかわる工事は材料そのものが自然を相手とすることから、その強度や変形特性をコントロールすることは困難なことが多く、このため、従来最低限の性能を満足する仕様規定を前述②の品質管理手法としてきたことは否めない。これらは土工事特有の以下のような点に起因する。

- ① 構造物全数量の管理は困難である
- ② 施工途上のプロセス管理によらざるを得ない
- ③ 施工のやり直しが困難である
- ④ 室内試験や事前調査等との対応が不明確である

すなわち、土構造物を対象とした工事における品質管理は、事前の調査結果や試験施工をもとに管理値を設け、それに従って施工を行い、施工終了後にサンプル試験を実施するということが一般的であった。しかし、このような管理手法では試験およびその結果を出すまでに時間がかかることが多く、その間に施工が進んでしまい結果をフィードバックすることができない場合もしばしばあり、必ずしも構造物の品質を保証す

るものではないといった問題点もあった。

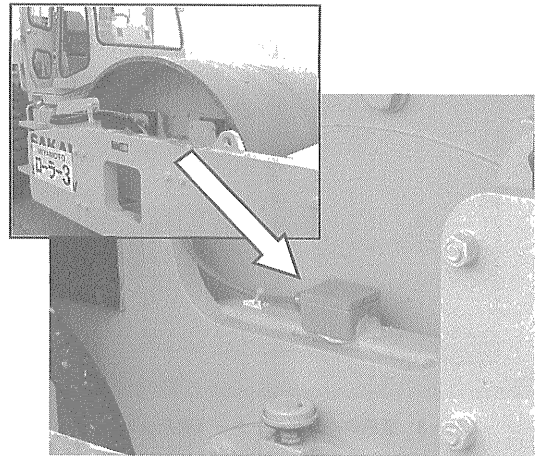
これらを解決する一つの手段として、粗粒材料を用いた土工事において振動ローラの振動輪で計測される加速度を解析し、GPSによる位置計測技術と組み合わせる事により、締固め状態を把握する技術「土工支援システム COMPACT」を開発し、現場適用とシステムの改善を行ってきた<sup>4)</sup>。

### 3. 計測システムの概要

#### (1) システム構成

加速度センサとGPSを組合わせた締固め管理システムを図一1に示す。加速度データは、写真一1、写真二に示すように、振動ローラの非減衰部に取付けた加速度センサで締固め作業中の振動ローラの鉛直方向の振動を取得する。このアナログ信号は、車載された記録ユニット内のアンプ回路で加速度原波形を増幅したダイレクト信号と、フィルタ回路で振動ローラの基本振動成分(24~30 Hz付近を中心とした周波数帯域;後述のフィルタ法で用いる)を除去した二つのアナログ信号に分離し、A/D変換器でデジタルデータに変換する。

このデータを、GPSからの時刻および空間座標とともに重機に搭載したコンピューターに取り込み、締固め度判定の情報として処理を行い、結果はオペレータおよび無線LAN等を用いて管理室に送信し記録する。なお、写真一3に示すように、振動ローラ運転席のディスプレイ上には振動ローラの転圧軌跡および転圧回数を表示できるため、オペレータは工法規定に則った施



写真一1 振動ローラに設置した加速度センサ

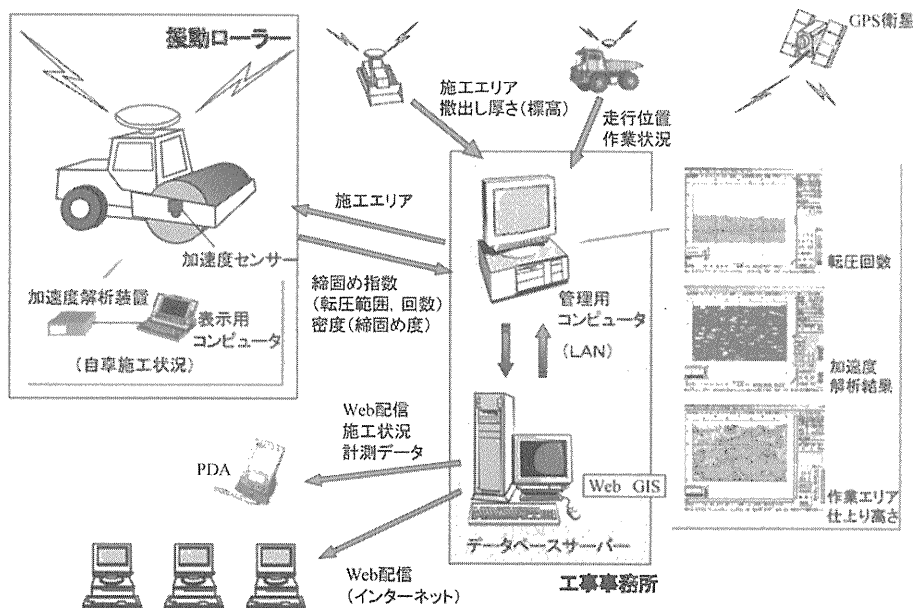


写真二 GPSユニット

工を効率よく行うことができる。

#### (2) 加速度データ解析の概要

一般に、振動ローラにおいて計測した加速度データ



図一1 システム構成

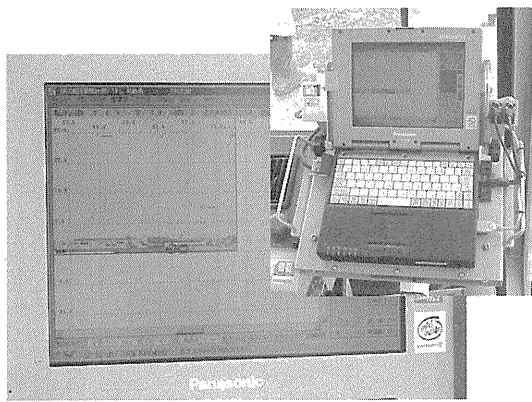


写真-3 重機内コンピューター (表示ユニット)

法もあり<sup>6)</sup>、本手法もこの特徴を考慮して、加速度データの解析は以下の3種類の方法で実施した<sup>7)</sup>。

(a) PSD (FFT) 法:

振動ローラの基本振動数と  $n$  倍振動の比率 (乱れ率  $p$ ) を調べる手法である。

(b) 積分値比較法:

基本振動数のピークを中心とした±数 Hz の帯域の振幅の積分値と、2次、3次の帯域 (一般に 50~90 Hz) の積分値の比率を比較する手法である。

(c) フィルタ法:

加速度データの調和解析を行わずに直接周波数成分で比較を行うもので、計測された加速度波形と基本振動成分をフィルタでカットした波形のそれぞれの積分値を比較する手法である。

#### 4. 現場適用事例と密度との相関に関する考察

以上の特徴を利用し、筆者らは1997年より兵庫県神谷川水系のフィルダムである神谷ダムにおいて、前述のシステムの基本部分を開発し現場適用を行った。ロックフィルの各材料に関しては表-1に示すが、転圧仕様は、試験盛立の結果から、転圧機械は15t級振動ローラで、撒出し厚さ (仕上がり厚さ) はフィルタ30cm, トランジション60cm, ロック材100cm, 転圧回数はフィルタおよびトランジションゾーンが4回, ロックゾーンが6回と定められていた。また、品質管理試験は、細粒フィルタ材で1回/週, 粗粒フィルタ材で1回/月, トランジション, ロックゾーンは1回/4か月の頻度により現場密度試験を実施することになっており、定期的実施する現場密度試験によって密度 (内部摩擦角) を確認し、この現位置試験を実施しない部分については工法規定による品質管理であった。

現場密度はRIとテストピット法により密度を直接測定して管理しているが、特に後者はフィルダムの場合、水置換法が用いられ、粗粒材料の場合、試験孔が大きくならざるを得ず、労力、時間、コストがかさむといった問題点がある。また、試験頻度もこのような理由から増やすことはできず、膨大な土工量に対して僅かなサンプルで品質を管理せざるを得なかった。

表-1 フィルダムの材料土

	細粒フィルタ	粗粒フィルタ	トランジション	内部ロック	外部ロック
最大粒径 (mm)	60	150	300	800	800
比重 (平均)	2.37	2.42	2.33	2.44	2.45
吸水率 (%)	4.5以下	3.75以下	5.0以下	3以下	3以下

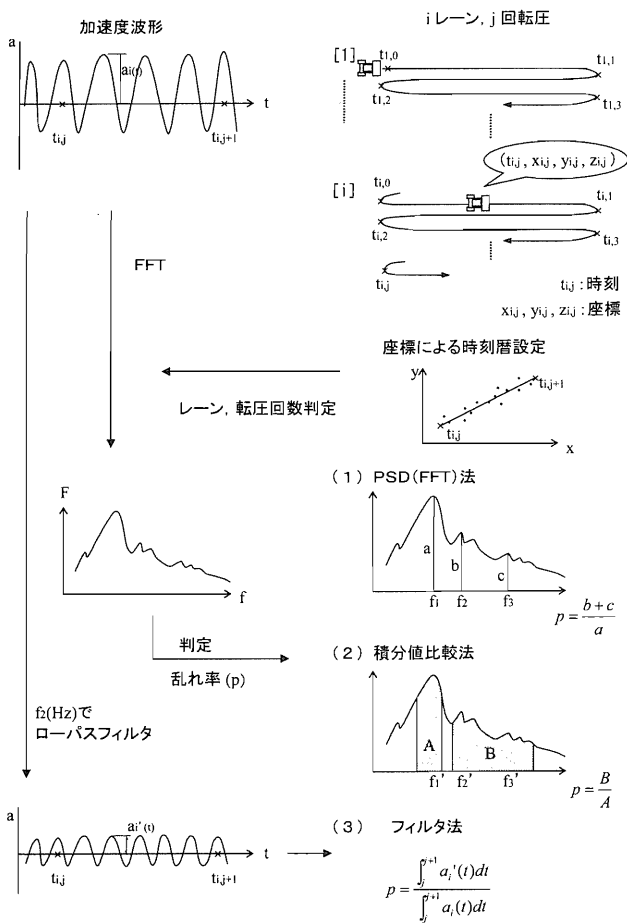
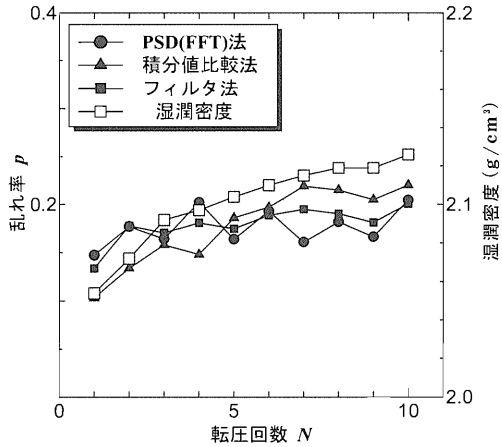


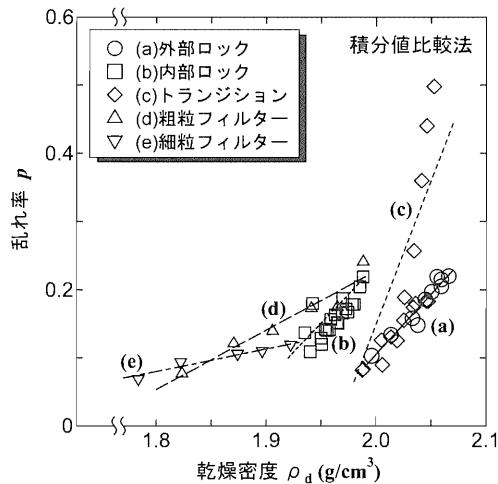
図-2 加速度データ解析概念図 (乱れ率  $p$  の定義)

は図-2に示すような手順でスペクトル解析を行うと、振動ローラの起振振動数 (基本振動数  $f_0$ ) と  $f_0$  の  $n$  倍振動 ( $n=1, 2$ ) にピークが発生する。この  $n$  倍振動は盛土材料の密度の増大に伴ってこの値が大きくなっていく特徴があることから、既往の研究<sup>5)</sup>でもこの特性を利用して盛土の締固め度の判定に利用している。また、地盤の反発が大きいつきに現れてくる  $f_0$  の  $1/2$  の振動数の  $(2n-1)$  倍振動 ( $n=1, 2$ ) を考慮する手

そこで、転圧機械である振動ローラに加速度センサを取付け、面的に全エリアの締固め度を判定するシステムの開発と現場適用を試みた。当現場において適用した事例のうち、前述 (b) の積分値比較法による加速度データの解析結果の一例を現場計測密度と共に図—3、図—4に示す。解析結果より、粗粒材料にお



図—3 解析結果の例 (フィルダム外部ロック)



図—4 全材料解析結果 (乱れ率と乾燥密度の関係)

ては密度と乱れ率  $p$  の間に相関関係が認められ、材料ごとに乱れ率の増分に特徴があることがわかる。

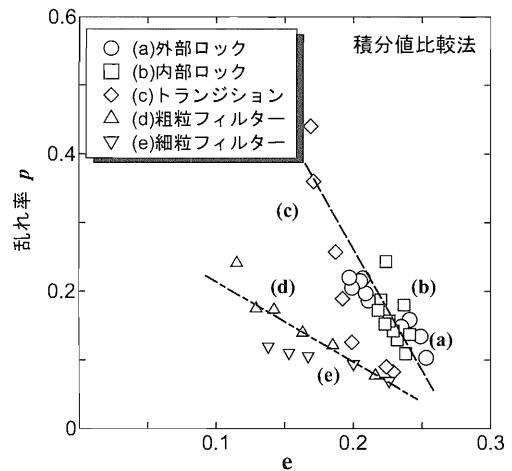
本システムは、その後もシステムの改良を行い、「土工支援システム COMPACT」として国内で5箇所適用事例を持ち、施工管理の新しい提案を行うとともに数々のデータを収集・検討を行っている<sup>8)</sup>。システムによって計測された事例を図—5に示す。

図では施工中の転圧回数と締固め度を施工エリアの中で面的に表示しているが、これはあらかじめ試験施工を行った結果より加速度の解析指標を設定し、その値を基にリアルタイム判定を行った結果を示したものである。

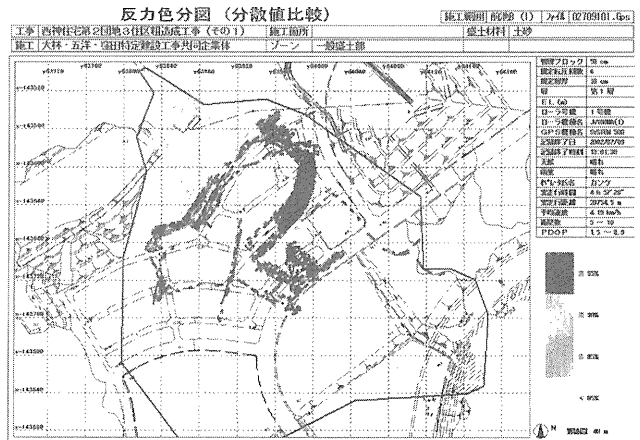
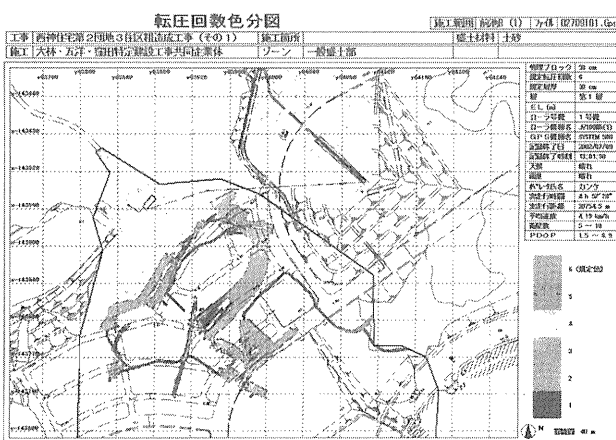
### 5. 密度以外の関係に関する考察

前述の神谷ダムにおいての加速度解析の結果を密度との相関のみならず、間隙比に関して整理したものを図—6に示す。

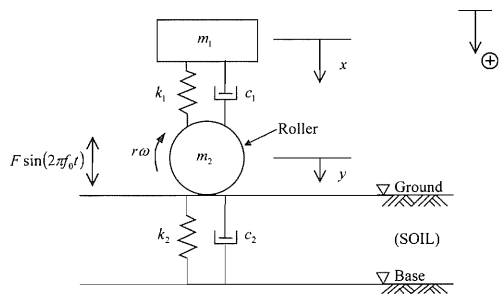
さらに、加速度解析の結果は密度との相関のみなら



図—6 全材料解析結果 (乱れ率と間隙比の関係)



図—5 管理室における施工結果の表示 (左: 転圧回数表示 右: 締固め度表示)



$$m_1 \frac{d^2x}{dt^2} + k_1(x-y) + c_1 \left( \frac{dx}{dt} - \frac{dy}{dt} \right) = m_1 g \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$m_2 \frac{d^2x}{dt^2} + k_2 y + c_2 \frac{dy}{dt} - k_1(x-y) - c_1 \left( \frac{dx}{dt} - \frac{dy}{dt} \right) = m_2 g + F \sin(2\pi f_0 t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$c_1 = 2h_1 \sqrt{m_1 k_1}, \quad c_2 = 2h_2 k_2, \quad h = \sqrt{\frac{m_1}{2m_2(1+m_1/m_2)}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、

$$k_2 y + c_2 \frac{dy}{dt} < 0 \text{ のとき, } k_2 = c_2 = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

図-7 振動ローラと地盤のモデル化

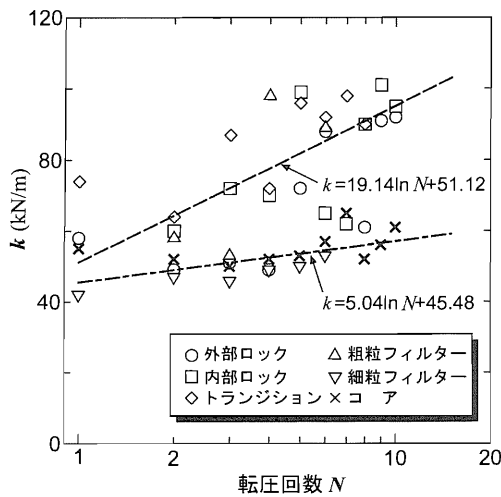


図-8 転圧回数と地盤鉛直ばね係数 k の関係

ず、地盤の鉛直ばね係数との関連を考察する目的で、図-7 に示す 2 質点系モデルによるシミュレーション解析を行い、解析結果を転圧回数と地盤ばね係数に関して整理したものを図-8 に示す。

解析結果は盛土材量の最大粒径を因子として大きく二つの相関をもって表すことができ、この結果はフィルダム等粗粒材料を用いた盛土工事における D 値（締固め度）管理や、道路土工での強度・変形（剛性）管理にも適用できる可能性を示している。

### 6. GIS を用いたシステムへの発展

ところで、工事における施工管理は、上記の品質管理のみではなく種々の管理項目があり、この管理を行うための多くの情報が施工プロジェクトの中で発生し、利用されている。すなわち、発注者側から受渡された設計図書（設計図ならびに仕様書等）をもとに施工計画を作成し施工を行うわけであるが、報告書や管理図書を作成発生するための情報量は建設プロジェクトの中で施工時にピークとなり、この部分の情報化を行うことにより業務の効率化を行うことができ、建設工事というプロジェクトの中で、ワークフローの改善できる余地があるものと考えた。

そこで、施工管理における改善すべき点を解決するひとつの試みとして、COMPACT を発展させ、図-9、図-10 に示すような Web-GIS を用いた施工管理システムを構築し現在、現場適用試験を実施中である<sup>9)</sup>。

本システムの導入により、CAD を中心としたデータをサーバで一元管理することから、現場内のみなら

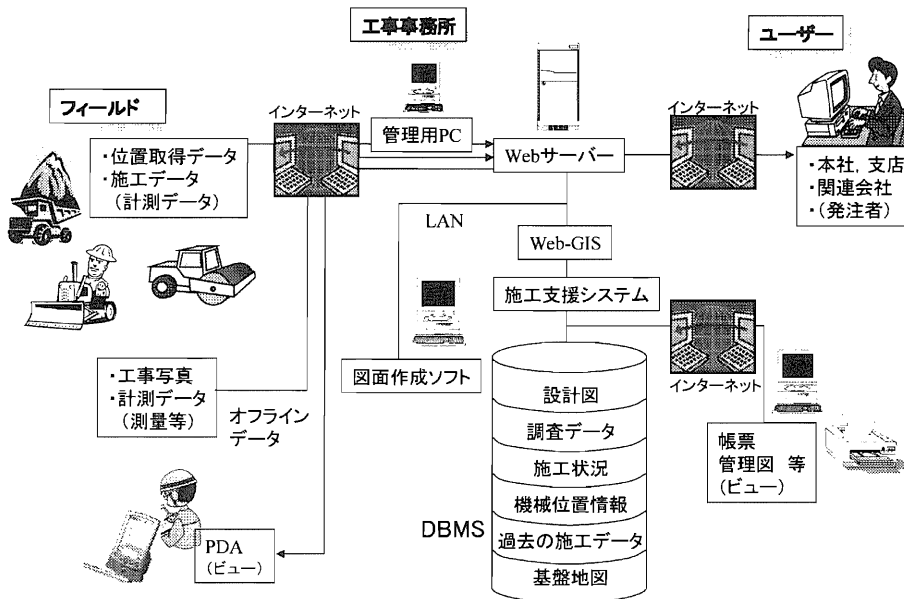


図-9 システム構成（実装例）

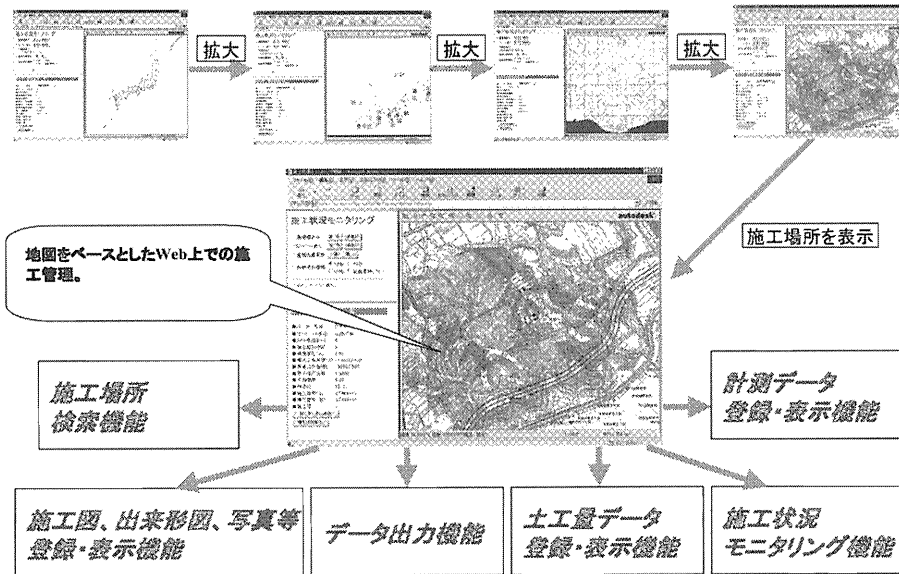


図-10 システムの機能 (実装例)

ず常設機関とも情報を共有することができ、品質情報や出来形情報も同一のサーバで空間情報と共に属性データとしてデータベースに格納するため、情報の信頼性が高く高品質な管理を行うことができるようになった。

## 7. ま と め

本システムは「品質管理」の新しい手法の一つとして開発したものであり、品質の向上のみならず、Web-GISを用いた施工管理システムへの発展によって土工工事における一種のBPRを目指している。

今回の事例はまだ実験的要素の強い部分もあるが、新しい土工工事の施工管理の手法の一つとして今後の参考になれば幸いである。



### 【参考文献】

- 1) 佐用泰司：工事管理，鹿島出版会，1978.
- 2) ISOにおける性能照査型設計とCENにおけるCPD（建設製品指令）：「ISOへの対応」に関する第2回シンポジウム，1998.
- 3) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説JASS5鉄筋コンクリート工事，1997.
- 4) 古屋 弘ほか：加速度計とGPSを利用した締固め管理システムの開発，第34回地盤工学研究発表会，1999.
- 5) 建設省土木研究所機械施工部施工研究室：振動ローラーによる盛土の締固めに関する調査，pp.1-76，1985.
- 6) 建山和由・藤山哲雄・西谷誠之：締固め施工における振動ローラーの振動挙動に関する考察，土木学会論文集，No.544，Ⅲ-37，pp.231-

237，1996.

- 7) 古屋 弘ほか：加速度計を利用した締固め管理システムにおける解析手法の比較，第54回土木学会年次学術講演会，1999.
- 8) 例えば，古屋 弘ほか：振動ローラーを用いた締め固め管理手法に関する考察（その2：加速度データと現場密度の関係），第36回地盤工学研究発表会，2001.
- 9) 古屋 弘：Web-GISを用いた土工工事の施工管理システム，2002年度土木情報システム論文集，Vol.11，pp.67-76，2002.

### 【筆者紹介】



古屋 弘（ふるや ひろし）  
株式会社大林組  
東京本社土木技術本部  
技術第一部  
技術課長



藤原 宗一（ふじむら むねかず）  
胆沢ダム本体工事監理試行業務  
建設技術研究所・大林組設計共同体  
主任技術者



三好 哲也（みよし てつや）  
株式会社大林組  
東京本社土木技術本部  
技術第三部  
部長