

# 振動ローラ加速度応答法による地盤剛性評価装置 「 $\alpha$ システム」の開発と実用化

古屋 弘・藤山 哲雄

近年、各種研究開発の進展とともに調査や解析技術の進歩は当然めざましいものがあるが、施工管理における情報化施工の進展も著しいものがある。特に盛土工事においては工法規定方式のツールとして、GPSを用いた転圧管理システムや敷均しシステムも数多く用いられるようになった。今回開発した「 $\alpha$ システム」は、品質管理における情報化施工（ICT）ツールの一つであり、振動ローラに設置し鉛直加速度応答を解析することにより、施工中に施工エリア全体の品質を取得するシステムである。本システムは振動ローラの機種に依存せず設置でき、リアルタイムに品質管理ができるシステムで、施工管理の合理化と高品質化を目指したものである。本稿では、これらのシステムの実施例と利用効果に関して紹介する。  
キーワード：締固め、振動ローラ、加速度応答法、情報化施工、品質管理

## 1. はじめに

土木工事においては特に構造物の設計に信頼性設計法が早くから適用され、性能規定による構造物発注は必然的となりつつある。一方、土構造物においては主として材料（土）に起因する設計・施工上の不確実性の大きさから、単純化したモデルによる設計を行った後、工法規定法式とサンプル検査による品質管理により施工管理を行ってきた。盛土工事においてはこのようなサンプル検査が施工管理で実施され、現行の盛土の現場締固め管理は、RIや砂置換による現場密度計測、あるいは平板載荷試験等による地盤剛性計測が一般的に用いられている。しかし、これらは離散的な測定のため、施工面全体の品質を合理的に評価することが困難であることは言うまでもない。

一方、振動ローラの加速度応答が地盤の締固めに応じて変化してくる現象を利用し、施工中の振動輪加速度計測から逆に地盤の締固め具合を判定しようとする研究が従来から行われており、近年では米国でもIC（Intelligent Compaction）Projectとして研究開発が行われている<sup>1)</sup>。本手法によれば、施工中にリアルタイムかつ面的に締固め品質を評価できるため、従来の締固め管理を大きく合理化することが可能となるとともに、信頼性設計に用いることのできる十分なデータを提供できる可能性がある。

この手法の研究は北欧で先行し<sup>2)</sup>、1980年頃から我が国でも一部検討が進められたが<sup>3)</sup>、土質条件に関

する適用範囲や管理手法としての精度検証などが不十分であったことから、ブルーフローリング的な利用法を除き、未だに国内では本格的な実用化には至っていない<sup>4)</sup>。

以上のような背景から、盛土締固め管理の合理化を目的として、(株)大林組および前田建設工業(株)は一連の研究<sup>5)~8)</sup>を進めてきた結果を基に「 $\alpha$ システム」を開発・実用化した。本稿では、このシステムの概要と実用化の事例を紹介する。

## 2. 振動ローラ加速度応答による地盤剛性評価手法の概要

$\alpha$ システムにおける振動ローラ加速度応答を利用した地盤剛性評価手法<sup>5)</sup>の概要を以下に述べる。図-1は、道路路床材の転圧試験により得られた振動ローラ加速度波形とその周波数分析結果の一例である。図に示すように、転圧の進行による地盤剛性の増加とともに、地盤からの反発を受けることにより振動ローラの加速度波形が乱れ、その周波数分析結果は起振振動数に対するスペクトル以外に、高調波スペクトル $S_1, S_2, S_3, S_4, \dots$ 、あるいは1/2分数調波スペクトル $S'_1, S'_2, S'_3, S'_4, \dots$ 、が卓越してくる。この性質を利用し、加速度波形式の定量指標として式(1)に示す「乱れ率」を定義する。すなわち、乱れ率が大きいほど地盤が締固まっていることを表す。

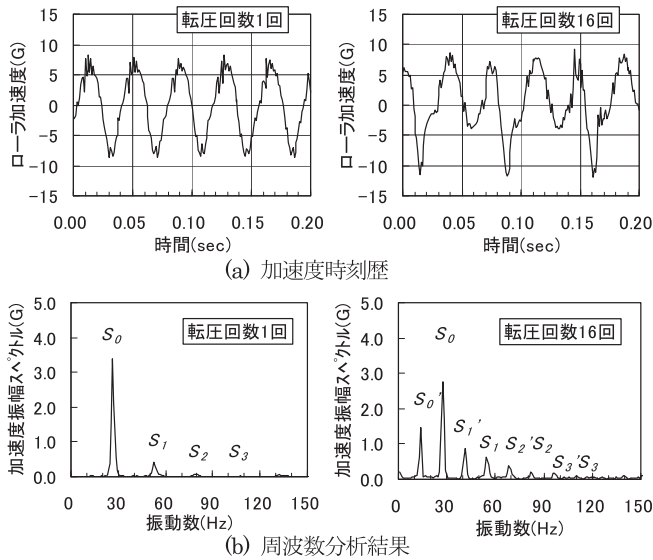


図-1 転圧にともなう加速度波形の計測例

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

$$E = \frac{2 \cdot (1 - \nu^2)}{B \cdot \pi} \cdot \frac{\left(\frac{4}{3} \text{乱れ率} + 1\right)^2 \cdot (2\pi f_0)^2 \cdot m_2}{1 - 0.32\alpha + \sqrt{0.1024\alpha^2 - 1.64\alpha + 1}} \quad \dots(2)$$

$$\alpha = 1 - \left(\frac{F}{(m_1 + m_2)g}\right)^2$$

さらに本システムにおいては、図-2に示すような振動ローラ～地盤系を2自由度振動モデルに置き換えた数値計算による検討を行い、乱れ率と振動ローラ機械諸元（フレーム質量  $m_1$ 、振動輪質量  $m_2$ 、振動数

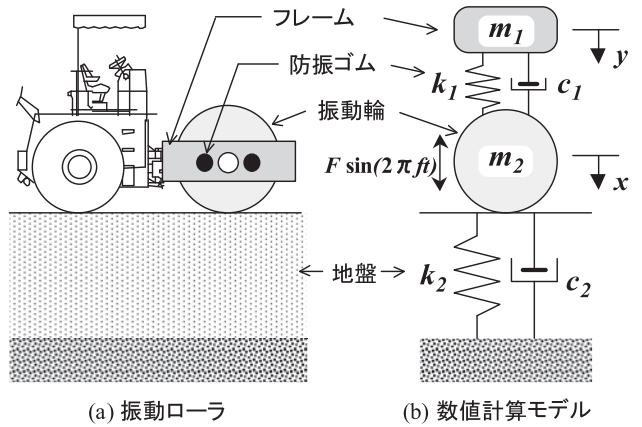


図-2 振動ローラ～地盤系のモデル

$f_0$ 、起振力  $F$ 、振動輪幅  $B$ ）、ならびに地盤の変形係数の関係を式(2)のように定式化し（ $\nu$ はポアソン比）、振動ローラの加速度応答値（乱れ率）から直ちに地盤剛性出力できる手法を採用している。一般に、振動ローラ加速度応答は地盤条件のみならず、振動ローラの機械条件によっても異なるため、乱れ率と地盤剛性の関係を転圧機種ごとに求めておく必要があるが、本システムではこの問題点を解決し、機械諸元を代入することによって任意の機種に対しても直ちに变形係数を算定可能であることが特徴である（詳細は文献5）参照。

ここで、式(2)を用いて乱れ率から地盤変形係数を求め、別途平板載荷試験（JIS A 1215）により評価した地盤変形係数との関係を整理した結果を図-3に示す。図には、上記路体材料の他、道路路床材料、フィルダムロック材料など複数の材料の転圧試験結果もプロットしている（材料物性や機械諸元は文献7）参照。図-3を見ると、高飽和度材料を含む多様な材料に

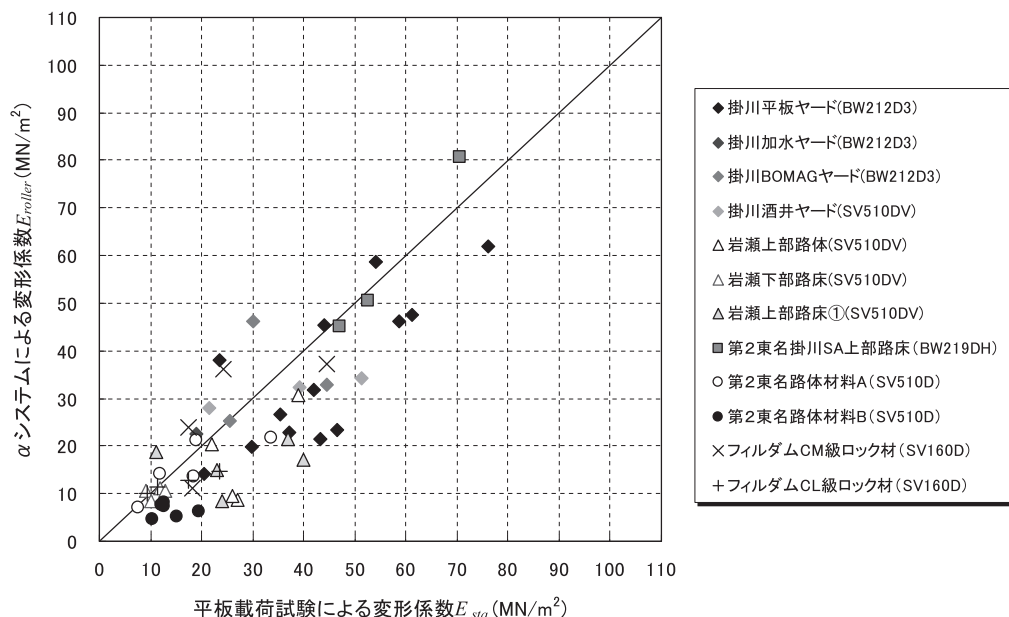


図-3 加速度による推定変形数と実測変形係数の比較

ついて、提案手法は平板載荷試験相当の地盤剛性を評価可能であることがわかる。しかも、**図-3**では転圧機種も数種類用いているが、機種が異なっても適切に地盤剛性を評価しており、理論的に導出した式(2)の妥当性を確認することができる。このように、提案手法は任意の材料、任意の機種について地盤剛性を適切に評価可能であり、例えば道路・空港路床、宅地造成など、転圧面の剛性確保が必要となる対象に対して非常に適用性が高いと考えられる(特に路床は局所的な弱部の存在が舗装機能に直結するため、面的管理が重要であると考え)。

以上の試験結果を踏まえ、加速度計測から地盤変形係数の判定までを一括して自動で行う管理装置「 $\alpha$ システム」を開発した。本装置の外観を**写真-1**に、また実機への加速度センサー設置状況を**写真-2**に示す。本装置は、取得した加速度データ、ならびにパラメータ入力する機械諸元から、先述した手法によって乱れ率ならびに地盤変形係数Eを2.0秒毎に逐次算出する機構となっている。また、別途転圧試験によって乱れ率～乾燥密度関係があらかじめ求められておれば、この関数形をパラメータとして入力することで、密度

の評価も行うことができる。この他、本装置は以下の特徴を有する。

- ①軽量かつコンパクト(W12 cm×L20 cm×H12 cm, 重さ3.0 kg)であるため、振動ローラ運転席内でスペースを取らない,
- ②内部のCFカードに大量の取得データを確実に保存可能,
- ③GPSからRS232C経由で振動ローラ座標を取り込み、締固めの判定値(乱れ率, 地盤変形係数, 密度)と同期させて保存する,
- ④無線LANを介して、PC等にリアルタイムに結果表示したり、GPSを用いた転圧管理システムと組み合わせたシステムで転圧管理を行うことが可能である。また、振動ローラ内にパソコンを設置すれば、オペレータも地盤の締固めの合否を確認しながら作業を行うことができ、不良箇所に対しては迅速な対処を行うことができる。

### 3. $\alpha$ システムによる地盤剛性評価の適用性の検証

$\alpha$ システムの適用性を検証するため、現場転圧試験を実施した。以下、試験と結果の概要を示す。

試験ヤード概要を**図-4**に示す。材料は最大粒径9.5 mmのまき土を用いた。システムによる低剛性箇所の検出精度を検証するため、ヤード内には人為的に加水した高含水比ゾーンを作成した(RIによる初期密度, 含水比を**図-4**中に併記した)。平板載荷試験, HFWDにより測定した地盤変形係数と管理装置の出力結果の比較例(転圧16回目におけるレーン方向地盤剛性分布)を**図-5**に示す。これより、管理装置が



写真-1 地盤剛性評価装置

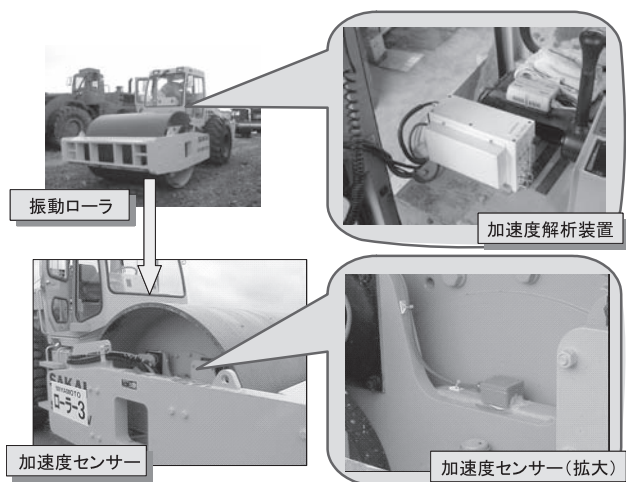


写真-2 加速度センサー設置状況

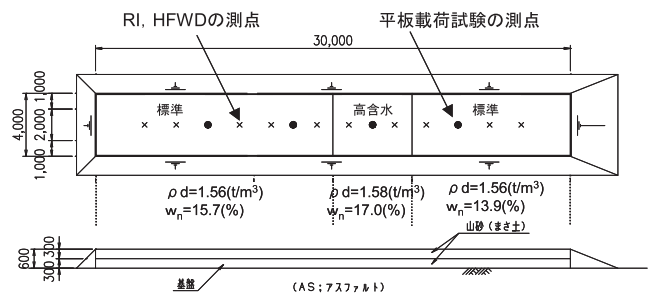


図-4 転圧試験ヤード概要

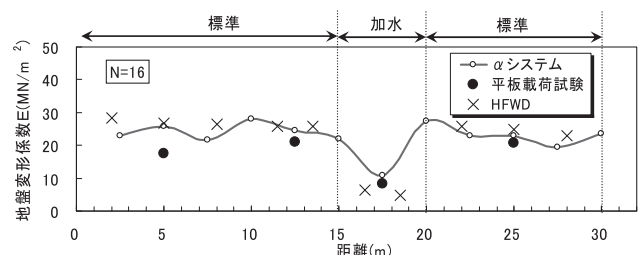


図-5 試験ヤードの地盤剛性評価結果

出力した変形係数 E は平板載荷試験, HFWD と良好に対応し, 特に高含水比ゾーンにて低剛性となっている状況を適切に捉えていることがわかる。また, 無線 LAN を介して数十 m 離れた場所からの転圧状況確認もスムーズに行え, 実用的な現場管理システムとしての現場適用性を確認した。

#### 4. 実務への適用 (試験施工)

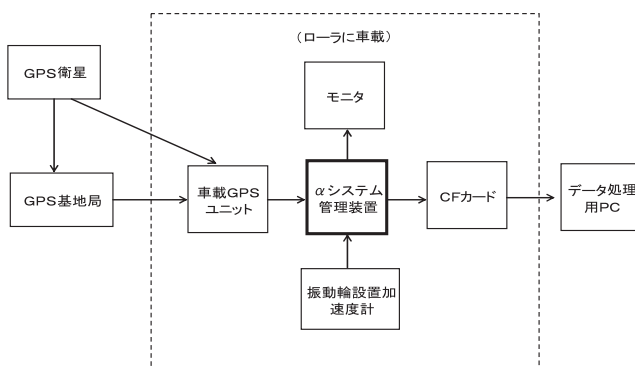
2 節でも述べたように, 本システムは面的な管理が行え, 剛性を直ちに評価することができることから, 道路舗装工事における品質管理への適用は大きなメリットを生むものと考えられる。ここでは道路舗装工事に  $\alpha$  システムを適用し, 品質管理の試行を行った事例を紹介する。

適用現場は, 山陽自動車道宮島 SA 内・スマートインター設置工事における舗装工事で, 舗装構成は, 基層  $t = 4 \text{ cm}$ , 上層路盤  $t = 10 \text{ cm}$ , 下層路盤  $t = 15 \text{ cm}$  であった。試験施工において実施した現地調査項目を表一に, 使用した  $\alpha$  システムを含む管理機器構成を図一六に示す。なお,  $\alpha$  システムによる盛土管理では一般的には土工用の大型振動ローラが使われているが, 今回は舗装の施工管理であることを考慮して, 舗装工事で一般的に使われている 4t コンバインドローラを使用した。

この工事では,  $\alpha$  システムの適用性を検証するために, 小型 FWD (HFWD) および大型 FWD を使用し

表一 振動ローラ～地盤系のモデル

調査項目	測定舗装体部位および測定数
$\alpha$ システム測定	路床面: 2測線, 下層・上層路盤面: 2測線 × 転圧4水準, 基層面: 2測線 × 温度3水準
FWD測定(小型)	路床面: 10箇所, 下層・上層路盤面: 10箇所 × 転圧4水準
FWD測定(大型)	基層面: 6箇所 × 温度4水準
RI密度測定	路床面: 10箇所, 下層・上層路盤面: 10箇所 × 転圧4水準
現場密度測定	路床面: 3箇所, 下層・上層路盤面: 2箇所 × 転圧4水準

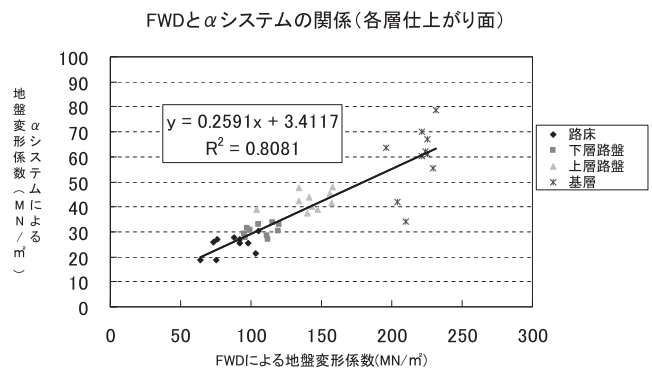


図一六  $\alpha$  システム機器構成

衝撃荷重と変位を測定し, 地盤弾性係数を算出して比較を行った。

$\alpha$  システムにより測定した各層上面の地盤変形係数 (Eroller) と FWD の測定値から算出される弾性係数 (E<sub>fwd</sub>) の関係を図一七に示す。図より, 物性 (変形係数等) の違う材料で構成された舗装体の Eroller と E<sub>fwd</sub> の間には高い相関性が認められた。特に, 路床から舗装の基層まで同一の施工機械で締固めを行い,  $\alpha$  システムで計測を行った結果が高い相関を示していることは非常に興味深い結果を示しており, この結果は  $\alpha$  システムの品質管理への適用の可能性が高いことを示している。近年では ICT (Information Communication Technology) 機器を用いた舗装工事の施工の高度化・合理化が急速に進んでいるが, 今回の  $\alpha$  システムを中心としたシステムは, 品質管理手法の ICT 化と言える。

ただし,  $\alpha$  システムは振動ローラを用いることが前提であるので, 舗装工事で従来から利用されているタイヤローラでの適用はできない。また,  $\alpha$  システムは表層から 60 cm 程度までの平均的な剛性を算出するので, 舗装工事のような薄層転圧の場合は下部の地盤の影響も計測することとなる。このような点を踏まえ, 今後さらに検証を行うことにより,  $\alpha$  システムを用いた舗装施工管理手法を構築することが今後の課題である。



図一七 Eroller と E<sub>fwd</sub> の関係

#### 5. おわりに

本報では振動ローラ加速度応答を利用した地盤剛性評価装置を開発し, その適用性を検証した結果を報告した。本装置はこれまでに大規模な海上埋め立て工事や, 造成工事, フィルダム堤体工事において, RI 等を補完し広大な転圧面を合理的かつ高精度に管理する手法として適用を進めてきた。これまでの適用工事では, 加速度による品質管理の他, GPS を用いた転圧回数管理手法を採用し, より均一かつ高品位な地盤造成を目指した管理を行っているが, これらの品質情

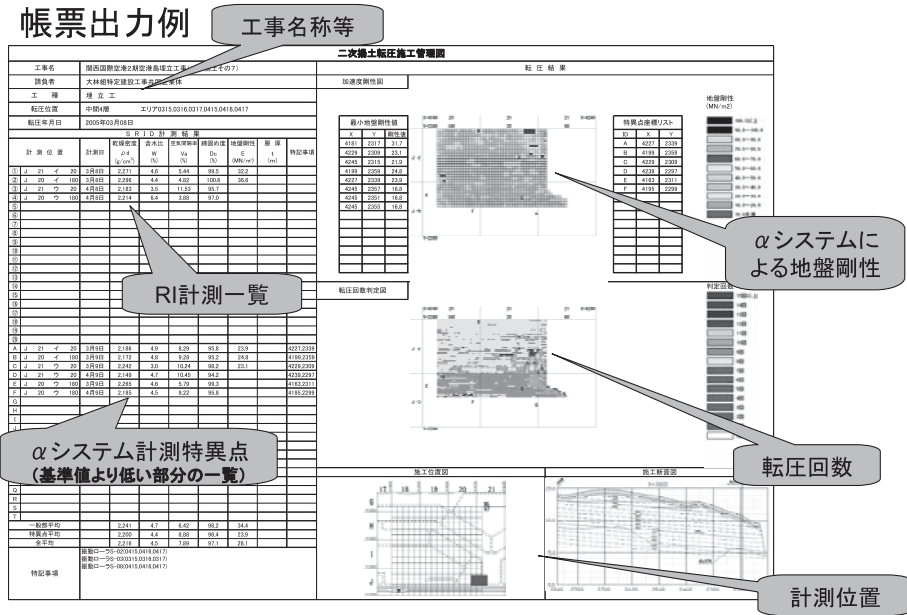


図-8 管理帳票の出力例

報, 施工情報, あるいは測量から得る出来型情報などをサーバーで一元管理すれば, Web を通じて関係機関で情報共有しつつ, 高品質な施工を達成するシステムへと拡張することもできる。このようなシステムを用いた帳票出力の例を図-8 に示す。

さらに, 空間的にデータベース化された各種情報は, 将来の維持管理戦略にも活用することが可能である。このような3次元の品質情報の取得手段の出現と近年のIT ツールの発達, 従来の現場管理の合理化のみならず, 将来の性能規定化の導入にも対応し得る可能性を有しており, 造成工事や道路(舗装)工事の合理化に大きく寄与するものと考えている。

土木施工におけるICTの活用は, 2008年7月に公表された「情報化施工推進戦略」<sup>9)</sup>に基づく国交省の試験施工プロジェクトにより, 大きく歩み出した感がある。GPS等を用いたブルドーザやローラ, バックホウ等の活用は急速に進みつつある。これらの活用は現場の省力化とともに, 施工の高品質化に大いに寄与している。このような施工手法の高度化に対して品質管理手法も迅速性を基本とし, 高度化に関する検討が必要な時期に来ているのかもしれない。施工方法と品質管理手法がともに進歩し, システム化が行えれば, 土木工事そのものにイノベーションをもたらす可能性がある。しかし, 最終的な判断は現場の技術者であることは十分肝に銘じなければならず, そのためには一技術者として, 取得した情報を有効に活用できる知識と技術力の向上が必要である。今後もαシステムの適用に関する検討と自己研鑽を怠らないようにすることを痛感する次第である。

JCMA

《参考文献》

- 1) <http://www.intelligentcompaction.com/>
- 2) Thurner, H., Sandstrom, A.: A New Device For Instant Compaction Control, Proceedings International Conference on Compaction, vol.2, pp.611 ~ 614, 1980.
- 3) 嶋津晃臣, 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.
- 4) 例えば, 古土井光昭, 福田幸司, 江村 剛, 池田憲造: 関西国際空港二期用地造成事業における埋立層厚管理および転圧締固め施工, 第54回地盤工学シンポジウム 平成21年度論文集, pp.145 ~ 152, 2009.11.
- 5) 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.652/Ⅲ-51, pp.115 ~ 123, 2000.
- 6) 藤山哲雄, 益村公人, 建山和由, 石黒 健, 三嶋信雄: 種々の土質条件に対するローラ加速度応答法の締固め管理への適用性, 土木学会論文集 No.701/Ⅲ-58, pp.169 ~ 179, 2002.
- 7) 横田聖哉, 益村公人, 藤山哲雄, 石黒健: 道路路床の施工管理の合理化に関する考察-(その1) ローラ加速度応答を利用した剛性評価手法の適用性-, 第37回地盤工学研究発表会講演集, 2002.
- 8) 古屋弘, 藤原宗一, 三好哲也: 加速度計とGPSを利用した締固めの管理方法の高度化, 建設の機械化, pp.20 ~ 25, 2003.
- 9) [http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha08/01/010221\\_4.html](http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha08/01/010221_4.html)

【筆者紹介】



古屋 弘(ふるや ひろし)  
 (株)大林組  
 技術研究所 生産技術研究部  
 主任技師



藤山 哲雄(ふじやま てつお)  
 前田建設工業(株)  
 技術研究所 技術開発土木グループ  
 主管研究員