

# 道路工事におけるインテリジェントコンパクションシステムの開発

古屋 弘 小関 裕二

(大林道路 技術研究所)

## Intelligent Compaction System for Road construction

Hiroshi Furuya Hiroji Koseki

### Abstract

Intelligent compaction (IC) technologies that have been recently implemented in USA and Japan can improve compaction quality, and the process can be adapted for quality control and quality assurance (QC/QA) applications to subgrade, base course, and asphalt pavements. Conventional QC/QA criteria for pavement are based on a limited number of field density tests, but the new IC system provides more compaction information, such as roller passes based on GPS and elasticity based on acceleration during compaction. IC systems sample almost 100% of the data from the rolling area. It might be more beneficial if the data was processed statistically to obtain relative values when evaluating the compaction quality of an entire pavement.

We developed a new IC system using the “Alfa-system” for road construction. We report a new IC technology that improves the quality and construction efficiency and present its implementation. The systematization of execution management using the IC system was able to help verify the quality control during road construction.

### 概要

インテリジェントコンパクションは、近年アメリカや日本で土工の締固め管理に用いられるようになり、道路工事における品質管理と品質保証システムとして実用化されつつある。従来は道路工事における品質管理手法として、現場密度試験によるサンプル検査を行っていたが、インテリジェントコンパクションを用いれば、GPSを用いた転圧回数管理や加速度センサーを用いた舗装の剛性管理を施工エリア全面で行う事が可能となる。特に、施工エリア全面の品質データの取得は、道路全体の品質に対する統計的な評価を可能とし、品質保証に関する有益な情報となるとともに、施工技術の差別化にも繋がるものである。

著者らは、社会インフラの中でも中心的な道路工事に関して、施工速度の向上とプロセス管理を中心とした客観的な品質管理を行うことにより、品質の向上と施工効率を20%程度向上させることを目標に、新しいインテリジェントコンパクションシステムを開発した。このシステムは、筆者が開発した「 $\alpha$ システム」を統合した施工管理システムとした。試験施工等により、振動ローラの活用は舗装工事の効率化と品質向上を可能とすること、加速度応答を用いた施工管理のシステム化は品質管理手法として適用可能であることを検証した。

## 1. はじめに

道路は社会基盤の中でも重要な役割を担うものであり、施工時の所定の機能の確保はもちろん、LCCを考慮しての高機能・高性能化は発注者にとって重要な課題となりつつある。それらを実現するために、施工時やリニューアル工事における舗装の品質の確保と施工の効率化は、施工者のみならず発注者や道路利用者にとって重要なテーマである。道路は路体から路床、路盤、表層工(舗装)の順に施工され、品質の確保に関してはそれぞれのプロセスの品質の担保が重要であり、施工の効率化に関しては、新しい管理手法の導入や新しい施工機械の導入が考えられる。しかし一般的に、施工品質の確保と施工の効率化は一見相反するように考えられており、高品質を担保するための施工管理は効率を低下させ、コスト増の要因とされることが多い。そこで、著者らは道路工事にお

ける舗装施工(路床・路盤・舗装)で、プロセス管理を中心とした客観的な品質管理を行うことによる品質の向上と施工速度の向上を同時に行う事を目標に、ICTを用いた施工支援システムおよび加速度センサー等による品質管理を統合し、施工システムを構築することを検討した。新しい施工システムはインテリジェントコンパクションシステムの一つであり、2回の屋外実験を実施し、システムの概念設計を行った。

本論文ではこのシステムを構築するにあたっての実験の内容とそれらの結果、およびそれらに基づく道路舗装工事の施工の効率化に関する施工システムの提案、ならびにシステム運用における知見をまとめる。

## 2. 研究開発対象

本研究は、道路工事の施工の効率化を目指すものであ

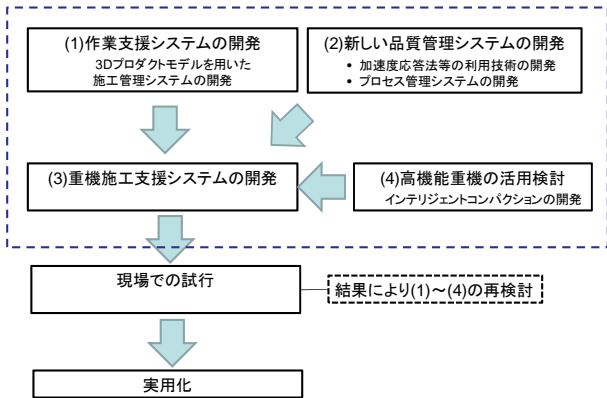


Fig. 1 研究開発項目の概要  
Outline of research and development item

り, Fig. 1 に示すように, (1)作業支援システムの開発, (2)新しい品質管理システムの開発, (3)重機施工支援システムの開発, (4)高機能重機の活用検討, に関して開発を行う事としたが, 道路工事, 特に舗装工事(路床工・路盤工・舗装工)の施工プロセスを分析し, 従来の施工における効率化の可能性を検討することとした。施工プロセスは, 従来から行われている工事をBPMN(Business Process Modeling Notation: ビジネスプロセス・モデリング表記法)<sup>1)</sup>により分析することとした。Fig. 2 にはこの手法による道路工事の作業フロー, Fig. 3 は詳細な作業分析を行い各施工プロセスの作業項目とアクターの関連付けをモデル化したもののうち路盤工のモデルである。この後, 各施工プロセスの項目とアクターの関連づけをアクティビティ表に示し, 施工の効率化に対してインパクトのある部分を抽出した。

近年, 情報化施工は国土交通省の「情報化施工推進会議」の提言<sup>2)</sup>を受け, 土工や道路工事にて急速に現場に浸透しつつある。出来型管理へのトータルステーション(TS)やGPSの活用のほか, ブルドーザなどの敷均し機械の自動化(GPSを用いた敷均し管理システム等)や振動ローラの転圧管理(GPSを用いた転圧管理システム: 工法規定)が用いられるようになり, 施行の精度向上や省力化に寄与している。本研究では, これらの効果も十分考慮した上で, さらなる省力化の適用可能な作業を抽出する目的で, Fig. 2, Fig. 3, Table 1 を用いた要因分析を行った。この結果, 重機の施工支援システムのほかに, 施工管理(品質管理)の省力化にまだ余地がありそうな点, 従来から用いられている施工法(マカダムローラによる低速な施工)を高速化することによる施工速度の向上, すなわち工期の短縮の可能性を見いだした(Table 1 のハッチ部分)。以上より, 筆者らは, 新しい施工法・特に振動タイヤローラを用いた新しい舗装の施工, および施工を行いながらの品質管理による工期短縮を目指すこととし, 次章以降ではそれらの実験に基づく品質管理システムの提案と施工方法に関して報告する。

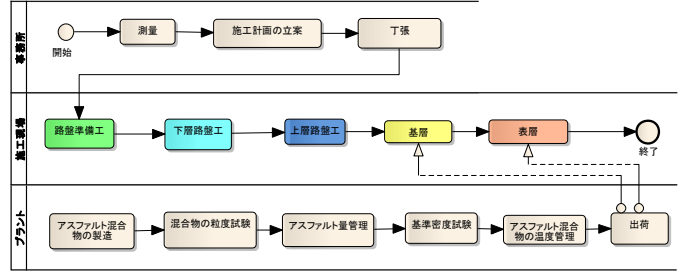


Fig. 2 道路工事全体のフロー  
Flow of the entire road construction (BPMN)

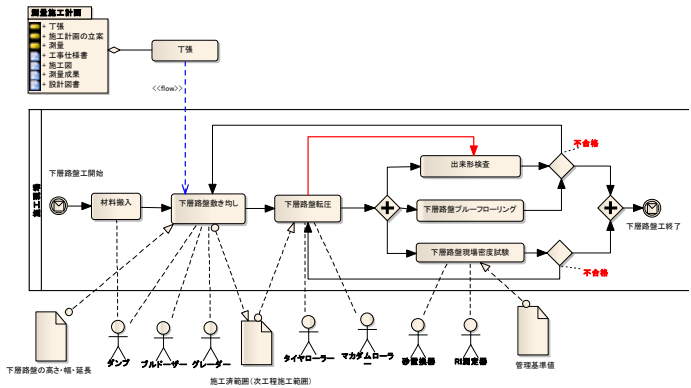


Fig. 3 下層路盤工  
Subbase course construction (BPMN)

Table 1 本研究のターゲット(アクティビティ表)  
Target of the research

工種	作業内容	工種	作業内容	
測量施工計画	施工計画の立案	アクティ ティ	アスファルト混合物転圧	
	測量		アスファルト混合物敷き均し	
	下張		アスファルト混合物密度試験	
路盤準備工	ブルーフローリング		基 層	プライムコート散布
	転圧			温度管理
	路盤準備工出来形検査			基層
下層路盤工	散布量管理			
下層路盤敷き均し	出来形検査			
材料投入	撤去			
下層路盤工	下層路盤敷き均し		表 層	アスファルト混合物転圧
	下層路盤現場密度試験			アスファルト混合物敷き均し
	下層路盤転圧			アスファルト混合物密度試験
上層路盤工	上層路盤材料投入	タックコート散布		
	上層路盤転圧	温度管理		
	上層路盤敷き均し	出来形検査		
アスファルトプラント	アスファルト混合物の温度管理	撤去(切削)		撤去
	アスファルト混合物の製造	表層		表層
	アスファルト量管理	敷き均し後温度管理		平坦性試験
	基準密度試験			
	混合物の粒度試験			
	出荷			

### 3. インテリジェントコンパクションとは

インテリジェントコンパクションとは, 道路の舗装工事の高品質化と効率化を目指した施工・品質管理を意味する。一般にはICプロジェクトとして認知されており, このプロジェクトは米国 FHWA(Federal Highway Administration; 連邦道路局)の政府方針(IC Strategic Plan, 2005. 4), 指導に基づく活動である<sup>3)</sup>。

インテリジェントコンパクションは主に振動ローラによる転圧に関するシステム化の試みであり, 以下の5つの目標が掲げられている。

- 1) 転圧中にローラ側で材料(土, アスファルト)の品質, 特に剛性を測定する
- 2) ローラ位置と材料剛性情報等を連続記録する
- 3) 剛性値と転圧回数等の締固め情報をリアルタイム表示する(オペレータ・検査官用)
- 4) 舗装管理システムのデータベースとリンク可能なシステム, データ構造とする
- 5) 振動ローラの締固めパラメータ(振幅・振動数等)を自動制御する

上記の1)に関してはNCHRP(全米協力研究プロジェクト)のICプロジェクト(土工用振動ローラ)と並行実施されており, 舗装工事のみならず路体への適用も視野に入れている。

このようなシステムを導入することにより, 以下のような効果をもたらすものとしている。

- 1) 情報化技術(ICT)によるより良い品質管理と品質保証
- 2) 面的なデータの取得による締固め品質の均一化
- 3) 上記の実現による道路構造物の長寿命化
- 4) 施工の無駄を省くことと高品質化によるコスト削減
- 5) 施工中に得られた情報をプロダクトデータとしての活用し, 道路の維持管理に活用

ところで, ICプロジェクトに先駆けて, 振動ローラの施工中に各種のデータを取得し, それを締め固めた土の品質管理に用いる試みは1975年に創設されたGeodynamikのThurner博士により本格化し, Dynapac社, Geodynamikが共同して[CMV](Compaction Measured Value)を開発したことに始まる。1980年代にはCaterpillar社, Ingersoll Rand社が相次いでCMVに基づいたシステムを自社機械に採用してきた<sup>4)</sup>。さらに, 1980年代後期に, Bomag社は[Omegaシステム]を開発し, 1990年代後期にはBomag社は土の動的係数を測定する[Eviv]を, Ammann社は土の剛性[ks]の取得手法を2004年に開発した<sup>4)</sup>。

国内では, 酒井重工業が[CCV]を1990年後期に開発し, 重機メーカー以外では藤山, 古屋らによる振動ローラ施工時の剛性管理を行うことのできる[αシステム]が2000年初期に開発されている<sup>5)</sup>。

これらの手法は一部の工事における品質管理に用いられてきたが, 一般的な品質管理が密度管理を基本とすることから普及には至らなかった。しかし, 道路設計の性能規定化やICTの導入による高度な管理と品質の向上の要求により, ICプロジェクトの始まった2005年以降, 再び脚光を集めつつある。

#### 4. 道路の剛性の評価手法 ー理論的背景ー

近年, 急速に情報化施工の現場導入が進展し, GPSやTS等を用いた施工管理, 特に出来形管理の技術が飛躍的に進歩しつつある。しかし, 舗装工事における品質管理にまでは適用されておらず, 従前からの締固め度を測点

毎に測定するサンプル管理の手法に拠っている現状にある。一方, 前述のように米国FHWAではICプロジェクトにて, 転圧中に材料剛性を測定・記録し, ローラを自動制御することで, 情報化によるQC/QAの向上および舗装工事を合理化するプロジェクトが進行中である<sup>3)</sup>。

そこで筆者らはこれらの状況をふまえ, 現在, GPSと振動ローラの加速度応答による施工管理技術を組み合わせ, 舗装工事における品質の全体管理を実現するシステムを構築することを最終目的とした研究開発に取り組むこととした。

ところで, 『舗装設計便覧((社)日本道路協会)』<sup>5)</sup>には, 「経験に基づく設計方法」と「理論的設計方法」が記載されている。「経験に基づく設計方法」において用いられる材料特性値は等値換算係数であり, 実際の力学的特性を示す $E_{roller}$ とは異質のものである。これに対して「理論的設計方法」は, 舗装材料の弾性係数とポアソン比を設定し, 疲労破壊回数を計算して舗装断面を設計するものである。このため, 地盤弾性係数である $E_{roller}$ は理論的設計方法によって設計された舗装の施工管理に適していると考えられる。

そこで, 舗装の理論的設計方法で設定される弾性係数と $E_{roller}$ の関係を利用した品質管理手法を検討した。

#### 4.1 加速度応答を利用した地盤剛性の評価

**4.1.1 評価手法の概要** 振動ローラで地盤の締固めを行った場合, 転圧の進行による地盤の剛性の増加にともない, 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, その周波数を分析することで締固め度の変化を計測することが可能となる<sup>5)</sup>。土工事では, この加速度応答を利用して締固め度をリアルタイムに全体管理する評価手法が一部実用化されているが<sup>6)</sup>, 本研究では, この土工事で採用されている方法を舗装工事に適用し, 舗装工事の品質管理の合理化とリアルタイムに品質を評価することで, 不具合の修正を容易にする手法を検討した。

**4.1.2 評価手法の原理** 本研究において計測した加速度応答値は, 藤山・建山による理論式<sup>7)</sup>で地盤変形係数(以下 $E_{roller}$ と記す)に変換して用いた。Fig. 4には加速度計側および周波数分析結果の一例を示す。転圧の進行による地盤の剛性の増加に伴い, 振動ローラの加速度応答の波形は乱れ, その周波数解析において振動ローラの振動数以外の成分(高周波スペクトル $S_1, S_2, S_3$ ならびに $1/2$ 分数調波スペクトル $S_1', S_2', S_3'$ )が卓越する。この性質を利用して「乱れ率: Ft」を定義する。式(1)に乱れ率の算出式を示すが(変数の意味はFig. 4およびFig. 5参照), 乱れ率が大きいほど地盤が締固まっていることを表すこととなる。

$$Ft = \frac{\sum_{i=1}^3 S_i + \sum_{i=1}^3 S_i'}{\frac{S_0 + S_0'}{F/(m_1 + m_2)g}} \quad (1)$$

$m_1$ : フレーム質量,  $m_2$ : 振動輪質量,  $g$ : 重力加速度

振動ローラの挙動をFig. 5 に示す数値計算モデルを用いて解析し、式(2)を用いて地盤弾性係数E を算出することができる。このE値をE<sub>roller</sub>とした。

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

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

f<sub>0</sub> : 振動数, F : 起振力, B : 振動幅, ν : ポアソン比

#### 4.2 加速度応答を利用した舗装の品質管理手法

4.2.1 施工面の弾性係数 E<sub>roller</sub>は施工面における地盤の剛性を表す。したがって、品質管理手法に使用するためには表面で計測される弾性係数に対応させる必要がある。層構造における理論的な平均弾性係数(以下E<sub>h</sub>と記す)は式(3)によって算出できる。

$$E_h = \left( \frac{H_1 E_1^{1/3} + H_2 E_2^{1/3} + \dots + H_n E_n^{1/3}}{H_1 + H_2 + \dots + H_n} \right)^3 \quad (3)$$

ここに、E<sub>h</sub> : 平均弾性係数 (MN/m<sup>2</sup>)  
 E<sub>n</sub> : n層目の弾性係数 (MN/m<sup>2</sup>)  
 H<sub>n</sub> : n層目の厚さ (m)

4.2.2 各層の弾性係数 理論的設計方法においては舗装材料毎の弾性係数をパラメータとして用いるが、繰返し三軸圧縮試験により得られるレジリエントモデュラス(舗装材料における多層弾性理論による設計指標で、弾

性係数と同等なもの。以下Mr と記す)の実測値を用いることが望ましいとされている。そこで、本研究においても舗装材料毎の弾性係数E<sub>n</sub>にMr を用いることとした。Mr は拘束応力によって値が変わるので、舗装内の応力はBoussinesq 理論によって算出した。

Boussinesq 理論は、Fig. 6(a) に示すように半無限弾性体の表面に集中荷重が作用したときの任意の点における応力を求めることができる<sup>8)</sup>。しかし、多層系の場合、2層弾性係数比によって応力分布が変わることが明らかで

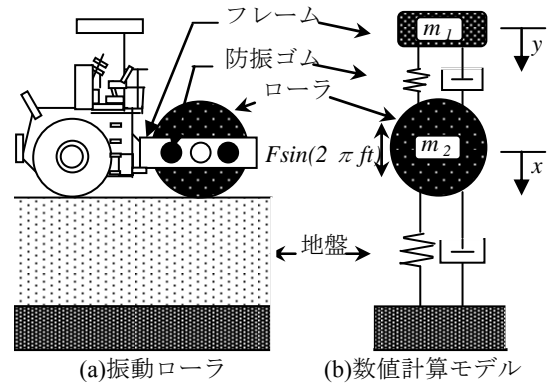


Fig. 5 振動ローラの数値計算モデル  
 Numerical calculation model of vibratory roller

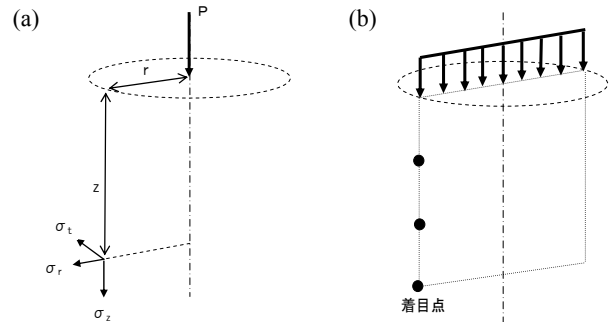


Fig. 6 (a) 円筒座標による地盤内応力表示(左)  
 (b) ローラ荷重による舗装内応力の着目点(右)  
 (a) Underground stress display by cylinder coordinates  
 (b) Attention point of pavement stress by roller load

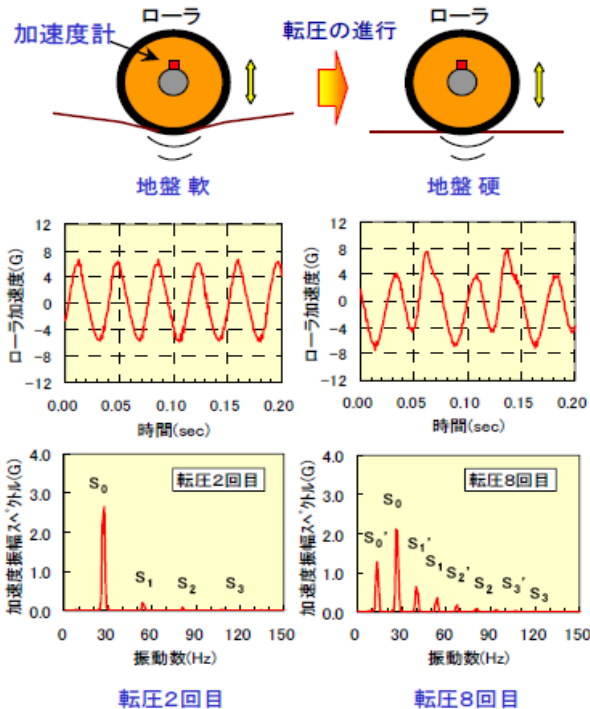


Fig. 4 加速度計測および周波数分析例  
 Example of analyzing acceleration measurement and frequency

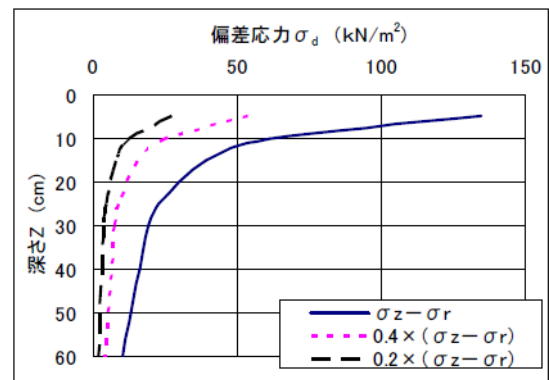


Fig. 7 ローラによる地盤内応力  
 Underground stress by vibrating roller

あり、また、振動ローラの接地応力分布に関しては、ほとんど解明されていないことや<sup>9)</sup>、走行状態では最大応力は接地面直下に発生しないことから<sup>9)、10)</sup>、本研究では、Boussinesq 理論による計算値を補正することで、舗装内応力を推定することにした<sup>11)</sup>。

今回の研究では、ローラによる荷重をFig. 6(b) に示す線荷重として、舗装内応力を算出した。着目点は、加速度計を取付けるローラ端部の直下として、4tコンバインドローラの鉄輪のローラ幅(130cm)と起振力(34.3kN)から舗装内応力を算出した。

Boussinesq 理論でローラ荷重によって発生する舗装内応力を算出すると、Fig. 6(a) に示す $\sigma_x$ は、 $\sigma_z$ と $\sigma_r$ に比べて小さい。一方、後述する舗装材料のMr 試験の結果では、偏差応力(以下 $\sigma_d$ と記す)とMr が線形関係にある。これらのことから、本研究開発では $\sigma_r$ を用いずにローラ荷重によって発生する $\sigma_d$ を( $\sigma_z - \sigma_r$ )としてMrを決定した。Boussinesq 理論で $\sigma_d$ を算出した結果をFig. 7 に示す。本研究では、振動ローラによって舗装体内に発生する応力の補正值について、これらの条件を検証した。(3)式による各層の弾性係数( $E_n$ )は、ローラ荷重によって、深さz(cm)に発生する $\sigma_d$ と各材料のMr 試験から得られる式(4)を用いて算出した。

$$Mr = k_1 \sigma_d^{k_2} \quad (4)$$

ここに、 Mr : レジリエントモジュラス (MN/m<sup>2</sup>)  
 $\sigma_d$  : 偏差応力 (kN/m<sup>2</sup>)  
 $k_1, k_2$  : 材料係数

#### 4.2.3 品質管理手法の流れ $E_{roller}$ を品質管理に利用するための流れを以下に示す。

- 1) Mr 試験によって、式(4)における各層の材料係数  $k_1, k_2$ を求める
- 2) Boussinesq理論を用いて、ローラ荷重によって発生する各層の $\sigma_d$ を求める
- 3) 2)で求めた各層の $\sigma_d$ を式(4)に代入して、各層のレジリエントモジュラスMrを求める。
- 4) 各層のMrを各層の弾性係数 $E_n$ として、式(3)により平均弾性係数 $E_h$ を求める
- 5) 4)で求めた平均弾性係数 $E_h$ を $E_{roller}$ の管理基準値として施工管理を行う

$E_{roller}$ を品質管理に用いるためには、上記3)の $\sigma_d$ が重要なパラメータとなる。

### 5. 試験施工による品質管理方法の検証

今回の研究開発では2回の現場実験を実施した。2008年度は埼玉県久喜市(大林道路試験所構内)の試験舗装、2009年度は宮崎県新富町(航空自衛隊新田原基地)の滑走路舗装工事で、実際の施工におけるデータ取得を行い理論と施工時の取得データを比較検証した。



Fig. 8 舗装構成 Pavement composition of field test layer



Photo 1 使用したローラ (4tコンバインドローラ) Heavy machinery used to field test (4t combined vibrating roller)

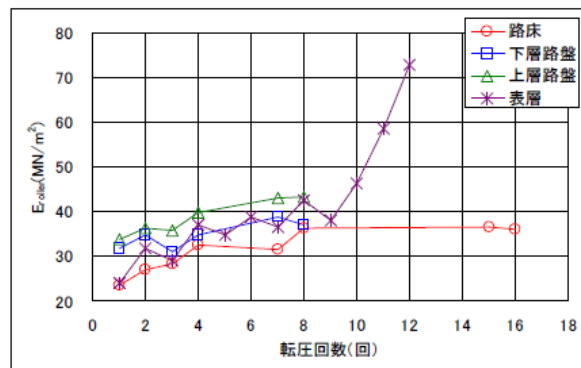


Fig. 9 転圧回数と $E_{roller}$ の関係 Relation between roller passes and elastic modulus ( $E_{roller}$ )

#### 5.1 検証試験の概要

舗装各層上面で計測される $E_{roller}$ とMr から求める $E_h$ との関係を検証するため、2008年度の久喜の実験において、Fig. 8 に示す断面構成の舗装を構築し各種試験を行った。材料は、路床として砕砂、下層路盤としてRC-40、上層路盤としてM-30、表層として密粒度アスファルト混合物を使用した。Photo 1 に使用した振動ローラの写真を示す。現場実験ではGPS、加速度計、解析装置、ノートPCを既存のコンバインドローラに取り付け、リアルタイムに転圧位置における $E_{roller}$ をモニタリングしながら転圧作業を行うことができるシステムを搭載した。

舗装工事における $E_{roller}$ の適用性については、既往の実



Table 2 各施工面のE<sub>roller</sub> 'E<sub>roller</sub>' on each construction layer of pavement

路	( )
下層路盤	( )
上層路盤	( )
表層( )	( )
表層( )	( )

Table 3 密度試験結果  
Compaction degree of each pavement layer

路	度 )	)
下層路盤		
上層路盤		
表層		

験検証結果を参照した<sup>12)</sup>、<sup>13)</sup>。その結果として、①土工事では実績のない4t振動ローラが適用可能であること、②路盤工、基層工でも転圧回数によってE<sub>roller</sub>が増加すること、③FWD (Falling Weight Deflectometer : 重錘落下式たわみ測定装置)のたわみからBurmister理論で算出した地盤弾性係数とE<sub>roller</sub>に明確な相関があることなどを確認した。なお、以下の現場試験の結果は測定データの平均値を用いている。

## 5.2 各種試験結果

5.2.1 加速度応答値<sup>14)</sup> 転圧回数とE<sub>roller</sub>の関係をFig. 9に示す。路床は16回、上層・下層路盤は8回、表層は12回まで転圧した結果である。どの層も転圧回数とともにE<sub>roller</sub>の増加傾向が見られる。また、アスファルト混合物層を除き、路床・下層路盤・上層路盤という施工にしたがってE<sub>roller</sub>が大きくなる傾向がある。アスファルト混合物層は10回転圧時(表面温度60℃)以降の増加が著しく、温度の影響を顕著に受けているものと思われる。

路床、上・下層路盤の仕上がり面と表層8回転圧時(表面温度65℃)および12回転圧時(表面温度38℃)におけるE<sub>roller</sub>はTable 2に示すとおりである。

5.2.2 現場密度試験 路床、上・下層路盤の仕上がり面における現場密度試験結果による締固め度および含水比と表層の切り取りコアの締固め度をTable 3に示す。路床・路盤は、最適含水比より乾燥側で仕上がっている。

5.2.3 Mr試験 路床および路盤については、Table 3に示した現場の締固め度および含水比で供試体を作製し、Mr試験を行った。表層については、締固め度95%のアスファルト混合物が115℃の状態にある場合をエンジンオイル混合物によるシミュレーション実験で求めた<sup>15)</sup>。エンジンオイル混合物とは、アスファルト混合物のアスファルトをエンジンオイルに置き換えたもので、施工時のアスファルトの粘度と同じ粘度を常温で得られるエンジンオイルを用いることで、施工中のアスファルト混合物を再現したものである。Table 2に示した8回転圧時の表

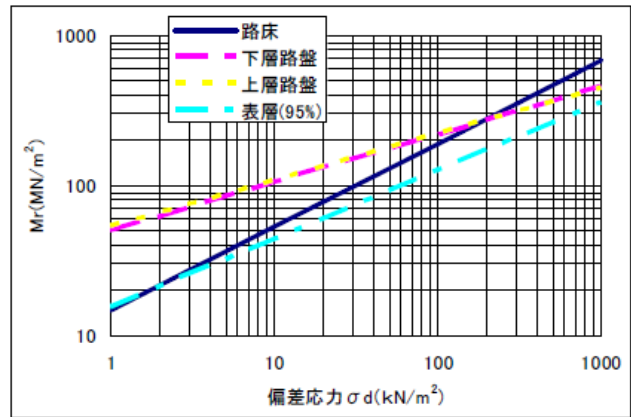


Fig. 10 Mr試験結果  
Resilient modulus (Mr) of each pavement layer

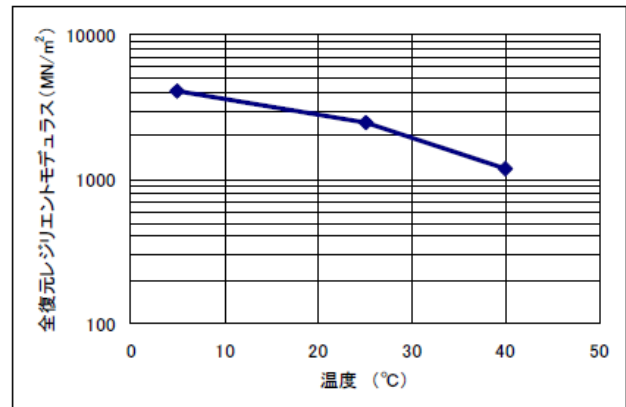


Fig. 11 切り取りコアのMr試験結果  
Resilient modulus (Mr) of asphalt core sample

Table 4 各材料のMr  
Resilient modulus (Mr) of each layer

路	( )
下層路盤	( )
上層路盤	( )
表層( )	( )
表層( )	( )

面の温度は65℃であったが、動的な载荷におけるアスファルト混合物のMrは、60℃以上の時、大きな差が見られないこと<sup>15)</sup>、8回転圧時の締固め度は95%程度であると仮定し、現場の条件を室内で再現した。Fig. 10にMr試験結果をまとめたものを示す。

また、表層については、切り取りコアによる繰返し間接引張試験を行い、仕上がったアスファルト混合物のMrを求めた。その試験結果はFig. 11に示すとおりであり、図から12回転圧時の温度(38℃)におけるMrを推定した。

以上のMr試験をまとめるとTable 4に示すようになる。

## 5.3 平均弾性係数E<sub>h</sub>の算出

路床のE<sub>h</sub>は、4tコンバインドローラの影響深さが60cm

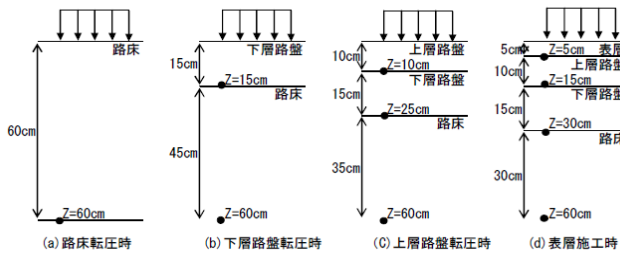


Fig. 12 舗装内応力の計算位置  
Stress calculation point in pavement

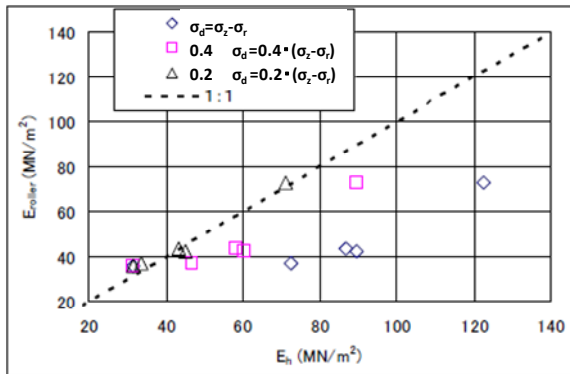


Fig. 13  $E_h$ と $E_{roller}$   
Relation between ' $E_h$ ' and ' $E_{roller}$ '

程度である<sup>16)</sup>ことから、深さ60cmにおける $\sigma_d$ を用いて、Table 4 の式から算出した $Mr$ を路床の $E_h$ とした。ただし、路床については、多層ではないが、理論値を0.4倍した偏差応力を用いることで、 $E_h$ と $E_{roller}$ がほぼ一致したので、全ての条件において、0.4倍の補正值を用いた。

路盤および表層(締固め度95%)については、Fig. 12に示すように施工する材料の底部における $\sigma_d$ から、Table 4に示す式で $Mr$ を算出し、式(3)で $E_h$ を求めた。締固め度98%の表層の $E_h$ は、 $Mr$ にTable 4の値を用いて求めた。このようにして算出した $E_h$ とTable 2に示した $E_{roller}$ を比較するとFig. 13のようになる。路盤および表層については、Boussinesq理論で算出される偏差応力を0.2倍したものを $\sigma_d$ として各層の $Mr$ を求め、それを $E_h=Mr$ として合成した $E_h$ が $E_{roller}$ とほぼ一致することがわかる。したがって、路床からアスファルト混合物まで、同じ手法で施工時の $E_h$ を求めることができることが確認できた。

この $E_h$ を用いて現場管理を行う手法は以下のような手順が考えられる。

- 1) 路床の目標 $Mr$ から現場管理を行うための基準となる $E_h$ (以下目標 $E_h$ とする)を求め、 $E_{roller}$ の管理値とする
- 2) 加速度計測結果による路床の $E_{roller}$ の代表値から現場 $Mr$ を求める
- 3) 2)で求めた路床の現場 $Mr$ と下層路盤の目標 $Mr$ から、下層路盤の目標 $E_h$ を求め、下層路盤施工時の $E_{roller}$

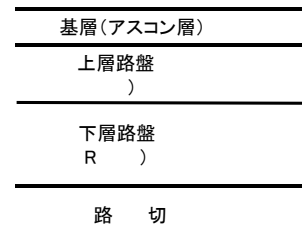


Fig. 14 舗装断面  
Field test pavement section

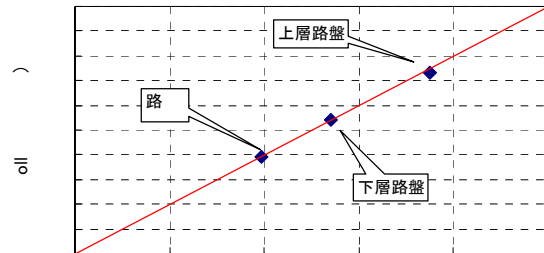


Fig. 15 目標 $E_h$ と $E_{roller}$ (上層路盤まで)  
Management standard value of ' $E_h$ ' and ' $E_{roller}$ '

の管理値とする

- 4) 加速度計測結果による下層路盤の $E_{roller}$ の代表値から、下層路盤の現場 $Mr$ を求める
- 5) 2), 4)で求めた路床および下層路盤の現場 $Mr$ と上層路盤の目標 $Mr$ から、上層路盤の目標 $E_h$ を求め、上層路盤施工時の $E_{roller}$ の管理値とする

上記の方法を2007年に実際に施工した現場(舗装断面はFig. 14)の取得データ(加速度応答法によるデータを取得済み)に対してそれぞれの平均値をプロットしたものをFig. 15に示す。横軸の目標 $E_h$ は前述5.2.3節で示した $Mr$ 試験による理論値から設定したものであり、 $E_{roller}$ の値は平均値であるが、両者の相関は高いことを示している。

## 5.4 アスコン層への適用

5.4.1 管理値の算出 前5.2.3節で示した $Mr$ 試験によるソフトアスコンの偏差応力を一定とした場合の温度と $Mr$ の関係をFig. 16に示す。Fig. 16より、締固め度の目標を95%とした場合、アスコンの目標 $Mr$ 値は、140℃の時に80MN/m<sup>2</sup>、80℃の時に110MN/m<sup>2</sup>となる。これらから、目標 $E_h$ を算出すると、それぞれ39.1MN/m<sup>2</sup>(140℃)、40.7MN/m<sup>2</sup>(80℃)となる。これらをFig. 15の1:1の線上にプロットしたものをFig. 17に示す。上層路盤の値とほとんど変わらないことがわかる。

5.4.2  $E_{roller}$ の設定 Fig. 18にアスコン層施工時と完成時(舗装温度25℃程度)の $E_{roller}$ 値を示す。ただし、測定データはばらつきがあるので平均値を示している。この時のアスコン層の $Mr$ 値を逆算すると、施工時が103MN/m<sup>2</sup>、完成時が123MN/m<sup>2</sup>である。施工時のアス

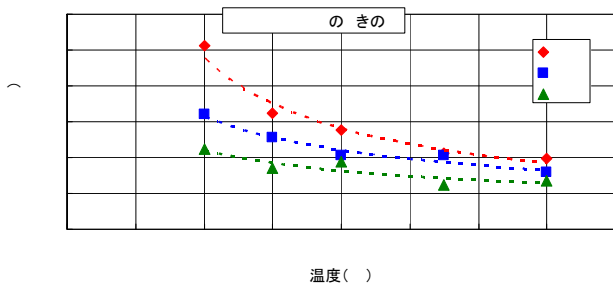


Fig. 16 温度とMrの関係(偏差応力一定)  
Relation between temperature and Mr  
(stress deviator constancy)

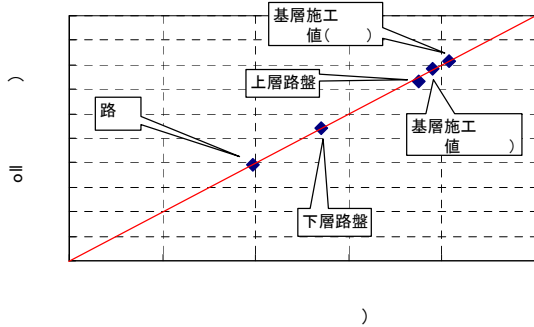


Fig. 17 基層の目標 $E_h$ (予測値)  
Target ' $E_h$ ' of base-course (predictive value)

コン層のMr値が $103\text{MN}/\text{m}^2$ というのは、目標Mr値とほぼ同様であり、アスコン層の施工時にも $E_{\text{roller}}$ で管理することができる可能性を示している。

ただし、ここに示した結果はあくまでも1つの事例であり、アスファルトの温度との関係は今後もさらに研究を行い適用性に関して検討する必要がある。

### 5.5 高機能重機の活用検討

今回の研究開発では、品質管理を行う上で加速度応答法を用いることから振動ローラを利用した施工となるので、舗装工事、特に表層のアスファルト工事に対して振動系のローラを用いた舗装施工実験も行っている。

国内では従来から舗装工事にはタイヤローラが用いられ、比較的低速(3~4km/h)での施工が主流である。これに対して、海外では振動ローラを用いての舗装転圧も実

施され、比較的高速度での舗装転圧も実施されている。

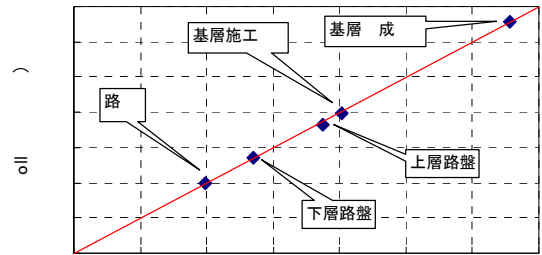


Fig. 18 基層の目標 $E_h$ と $E_{\text{roller}}$ (実測値)  
Target ' $E_h$ ' and ' $E_{\text{roller}}$ ' of base-course  
(actual measurement value)

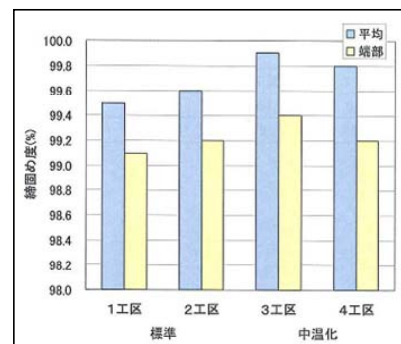


Fig. 19 締固め度の比較  
(左：振動マカダム，右：(無振動)マカダム)  
Comparison of compaction degrees (Macadam roller)  
(left: using vibration and the right: non-vibrating)

現時点で舗装工事に適用可能、且つ国内で入手可能な機種としてはPhoto 2 に示すような機種がある。舗装品質と作業効率の向上を図るため、振動マカダムローラ(酒井重工業製MW700型)、および振動タイヤローラ(酒井重工業製GW750型)を用いた施工の効率化に関して、無振動で施工した場合の現場でのアスファルトの密度を比較した結果をFig. 19 に示す(2008年度の実験結果)。Fig. 19 によれば同一の転圧回数(6回)でより高い締固め度を得ることができる。この結果を外挿すると所定の締固め度を得る転圧回数は、振動マカダムを用いた場合は4回となり



Photo 2 試験に用いたローラ (左から、振動マカダムローラ，振動タイヤローラ，振動タンデムローラ)  
Test construction machineries (Vibrating macadam roller, Vibrating tire roller, and Vibrating tandem roller)



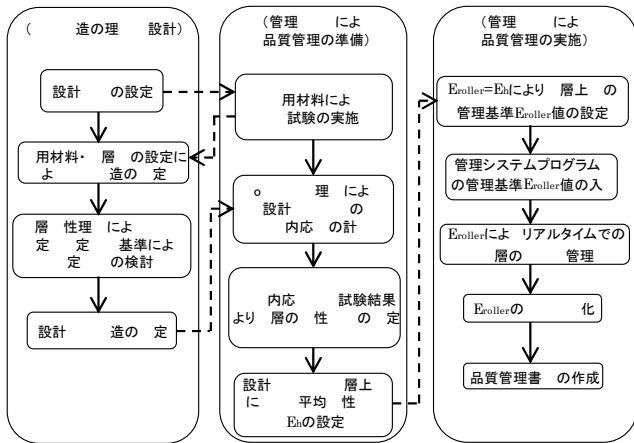


Fig. 20 舗装品質管理のフロー  
Flowchart of quality control method for road construction

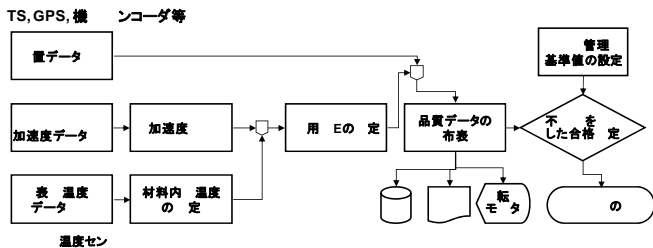


Fig. 21 品質管理システム  
Logical model of Quality control system for road construction

転圧回数は2/3となる。すなわち施工時間の短縮が可能となることが推定された<sup>17)</sup>。

舗装工事の効率化，すなわち工期短縮を行うにあたっては，4章，5章で実験的に行った「新しい品質管理手法」を取り入れることによることの他に，施工機械自体の効率化も重要である。

## 6. 舗装品質管理システムの提案

本研究開発では，振動ローラの加速度応答値を用いた舗装工事の品質管理手法について検討した。振動ローラによって発生する舗装内応力を，Boussinesq理論の補正値とすることで，試験施工時の加速度応答値から得られた $E_{roller}$ と室内試験によるMr値から理論的に求めた $E_h$ はほぼ一致する結果が得られた。

以上の結果より，振動ローラの加速度応答値を用いた舗装の品質管理をシステムとしてまとめると，Fig. 20に示すようなフローとなる。フローは以下の3つの要素から構成される。

- 1) 舗装構造の理論的設計
- 2) 管理手法による品質管理の準備 (Fig. 20)
- 3) 管理システムによる品質管理の実施 (Fig. 21, 22)

1)の舗装構造の理論的設計には，使用材料のMrが必要であるが，2)の管理手法(システム)による品質管理の準備

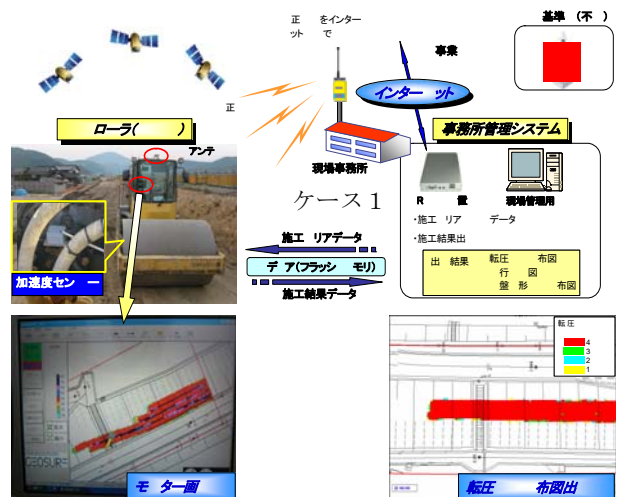


Fig. 22 道路工事施工管理システム(イメージ)  
Road works construction management system (To be image)

備で実施するMr試験結果を用いることができる。Mr試験の条件は，設計舗装構造からBoussinesq理論によって求めた舗装内応力を用いる。このように，理論的設計にリンクした $E_h$ を $E_{roller}$ として，施工管理の基準値として扱うことができれば，上記3)のシステムによりリアルタイムに各層の締固め管理が可能になる。また，GPSやトータルステーションなどのポジショニング技術と組み合わせることで，従来の測点によるサンプル検査ではなく，面的な管理が可能となる。それをデータベース化し，品質管理書類とすることができれば，現場試験や検査書類作成の省力化につながるだけでなく，舗装工事の工期短縮，品質向上に寄与することになる。これらをシステム化した場合，Fig. 21に示すフローのようになり，この実装イメージは例えばFig. 22に示すようになる。

近年では情報化施工が導入され，路床盛土の日常管理は，各層ごとに工法規定による転圧回数分布図による管理及びRI計法による締固め度管理が実施されており，ICT施工の一つである本システムを用いることにより，これらの従来型の計測を低減することができる可能性がある。また，仕上り面については，品質管理基準のプルーフローリングに加え，今回提案した加速度応答法による全面的な地盤変形係数分布図にて高度な管理(品質保証)も可能となる。

このシステムにより，転圧機械のオペレータは，施工中は車載PC画面を転圧回数表示にて，漏れなく規定回数まで転圧できたことを確認することができ，終了後，車載PC画面を変形係数表示に切替え，規格値以上の色表示になっていることを確認することも可能となる。

万が一，規格値に満たない弱部があった場合には，その場で再転圧を行い，再度加速度応答法にて取得されたデータを確認し，地盤変形係数が規格値を満足するかを確認することもできる。

このように、施工を行いながら品質管理が行えることで、工程の短縮も実現可能となる。また、盛土の締固め管理を重機のオペレータが運転席上で自ら行えるため、従来型のRI計法と比較して測定時の安全性も格段に向上した。施工ヤードが狭く、重機同士が混在・近接する現場においては特に高い効果が期待できる。また測定にかかる時間と労力を大幅に削減できる可能性も高い。

一般的に、施工管理のうち品質管理に係わる時間は、全行程の7～12%程度と言われている。この部分を本システムを用いることにより半減できたとすれば、おおよそ8%程度の工程短縮を実現できることとなり、施工機械の速度向上とあわせて、おおよそ20%程度の施工速度の向上は実現可能である。近年のICT機器の低価格化を考えれば「情報化施工の効果は大現場でないと得られない」という状況から、今後増加する中小規模のリニューアル工事にも十分適用可能な状況になると考える。

## 7. まとめ

今回の研究開発で、道路工事における施工システムを開発・提案したが、加速度応答法を用いた品質管理を中心に以下の知見を得ることができた。

- 1) 舗装工事の品質管理に「加速度応答法」を用いることができる。その値は従来の品質管理の代替として適用可能で、路床・路盤の仕上り面の品質を面的に管理できる<sup>18)</sup>。
- 2) 施工時に弱部が明らかとなるので、日常管理段階でその対処(再転圧)が速やかに行う事も可能となる。
- 3) 本手法はアスファルトに対しても適用の可能性がある。ただし、施工温度を考慮に入れることが必要で、この部分に関してはさらなる研究が必要である。

今後の課題として、①荷重荷条件等によって異なることが予想されるEhの設定方法の検討、②加熱アスファルト混合物のMrの妥当性の確認、③E<sub>roller</sub>やMrのばらつきに対する信頼性の確認、④施工管理への統計管理手法の合理的な適用法の検討などが挙げられる。今後も情報化施工を基盤とした新しい道路(舗装)工事の品質管理手法として、本手法を実用化するための検討を継続する考えである。

## 謝辞

今回の研究開発に対しては、国土交通省の建設技術開発助成制度より民間企業としてはじめて研究開発費の助成を頂いた。2年間の現場実験および研究開発が行えたことに対し深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) ビジネス プロセス モデリング表記法(BPMN) : <http://www.jsys-products.com/iwaken/bpmn/pub/BPMN.pdf>, (2011.8)

- 2) <http://www.mlit.go.jp/common/000020669.pdf>, (2011.8)
- 3) [www.intelligentcompaction.com](http://www.intelligentcompaction.com), (2011.8)
- 4) Michael Mooney, A.M. ASCE and Dietmar Adam : Vibratory Roller Integrated Measurement of Earthwork Compaction: An Overview, Seventh International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, ASCE, (2007)
- 5) 社団法人日本道路協会：舗装設計便覧, (2006.2)
- 6) 藤山哲雄・古屋 弘：振動ローラ加速度応答を利用した地盤剛性評価装置の開発, 平成16年度近畿地方整備局管内技術発表会, (2004.7)
- 7) 藤山哲雄, 建山和由：振動ローラの加速度応答法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)
- 8) 例えば, 松野三郎, 養王田栄一, 三浦裕二, 飯島尚：道路舗装の設計, 道路建設講座5, 山海堂, (1974.12)
- 9) ローラ設計指針作成委員会：転圧ローラ工学—締固め性能に着目して—, テラメカニックスライブラリー3, テラメカニックス研究会, (1999.10)
- 10) 秋元洋胤, 早野公敏：移動ローラ載荷装置の試作と移動載荷試験による模型地盤の応力分散, 土木学会舗装工学論文集, 第9巻, pp.241～249, (2004.12)
- 11) 南雲貞夫, 阿部忠行, 安崎裕, 飯田章夫：道路舗装の設計, 道路実務講座6, 山海堂, pp.103, (1984.3)
- 12) 根本司, 高倉拓, 古屋弘：振動ローラの加速度応答による舗装工事の品質管理手法の合理化の検討, 平成20年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集, 社団法人日本建設機械化協会, pp.111～116, (2008.10)
- 13) 根本司, 高倉拓, 古屋弘：舗装工事の品質管理の合理化＝GPS と振動ローラの加速度応答を利用した検討＝, 建設機械, 7月号, (2009.7)
- 14) 小関裕二, 高倉拓, 古屋弘：振動ローラの加速度応答を利用した舗装工事の剛性評価, 土木学会, 第63回年次学術講演会講演概要集, 第V部門, (2009.9)
- 15) 小関裕二, 高倉拓, 古屋弘：アスファルト混合物の施工時におけるレジリエントモデュラス, 第28回日本道路会議論文集, (2009.10)
- 16) 藤山哲雄, 高橋浩, 古屋弘, 疋田喜彦：振動ローラ加速度を利用した締固め管理手法による地盤評価深さの検討, 土木学会, 第63回年次学術講演会講演概要集, 第III部門, (2009.9)
- 17) 古屋 弘：道路舗装工事の施工の効率化と品質向上に関する技術開発, 平成22年度国土技術研究会 発表論文, (2010.10.28)
- 18) H. Furuya, Y. Tsukimoto, H. Koseki, T. Mansell, V. "Lee" Gallivan, K. Uchiyama : Innovative QC/QA Compaction Method for HMA Pavement using Intelligent Compaction (IC) Technology, The 11th International Conference on Asphalt Pavements, (2010.8)