

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

古屋 弘¹

¹(株)大林組 生産技術本部 基盤技術部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2 品川インターシティB棟)

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とした研究開発を実施した。研究開発にあたり、施工をプロセス分析し施工機械（手法）と施工管理手法の高度化を対象をとすることとし、前者では振動ローラの利用、後者はICTを用いた施工支援システムおよび加速度センサーによる品質管理を統合し施工システムを構築することとした。試験施工等によって、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し、加速度応答を用いた施工管理のシステム化は品質管理へ適用可能であることを検証した。

キーワード 道路、舗装工事、施工管理、効率化、ICT、加速度応答法、振動ローラ

1. まえがき

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、維持管理やリニューアルは重要であり、それゆえ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重要な課題である。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。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るが、道路工事における舗装施工（路床・路盤・舗装）で、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る品質の向上を同時に行うために、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することとした。

本研究開発は、2008年度、2009年度の2カ年にわたり実施し、本論文ではこ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

り、図-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)高機能重機の活用検討、(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）¹⁾により分析することとした。図-2 にはこの手法による道路工事の作業フロー、図-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

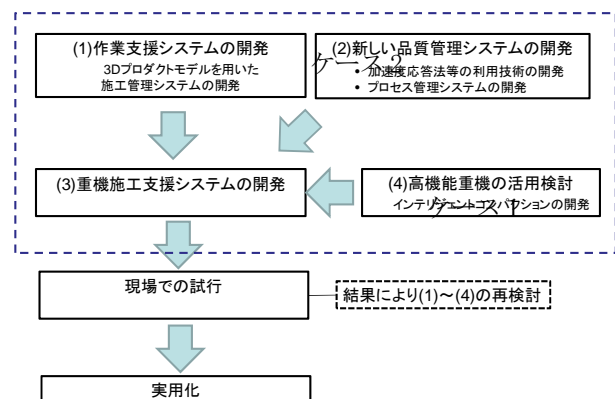


図-1 研究開発項目とフロー図

議」の提言²⁾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、上記のような要因分析を行った。この結果、重機の施工支援システムのほか、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（表-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。

3. 新しい道路の剛性の評価手法 — 理論的背景 —

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。ただし、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、米国FHWAではIntelligent Compaction戦略プランとして、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³⁾。

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。

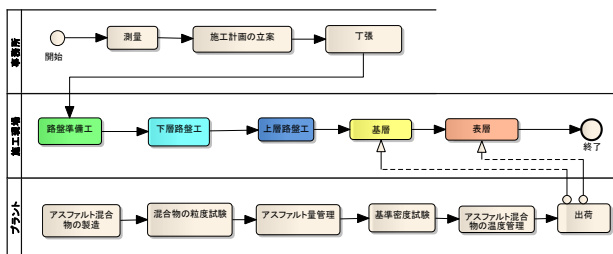


図-2 路工事全体のフロー (BPMN)

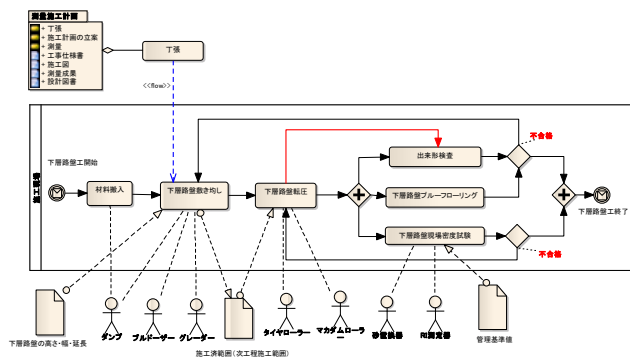


図-3 下層路盤工 (BPMN)

表-1 本研究のターゲット

| 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 | アクティビティ | 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 | | 表層 | 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 | 下層路盤ブルーフローリング | | | 散布量管理 |
| | 下層路盤現場検査試験 | | | 出来形検査 |
| | 下層路盤工 | | | 撤去 |
| | 下層路盤敷き均し | | | 廃棄 |
| 上層路盤工 | 材料投入 | 敷き均し後温度管理 | | |
| | 下層路盤転圧 | アスファルト混合物転圧 | | |
| | 上層路盤現場検査試験 | アスファルト混合物敷き均し | | |
| | 上層路盤工 | アスファルト混合物密度試験 | | |
| | 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 | | |
| アスファルトプラント | 上層路盤敷き均し | 出来形検査 | | |
| | 上層路盤現場検査試験 | 撤去(切削) | | |
| | アスファルト混合物の温度管理 | 廃棄 | | |
| | アスファルト混合物の製造 | 表層 | | |
| | アスファルト量管理 | 敷き均し後温度管理 | | |
| | 基準密度試験 | 平坦性試験 | | |
| | 混合物の粒度試験 | | | |
| | 出荷 | | | |

(1) 加速度応答を利用した地盤剛性の評価

a) 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⁴⁾。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⁴⁾、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し、不具合の修正を容易にする手法を検討した。

b) 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⁵⁾で地盤変形係数（以下Erollerと記す）に変換して用いた。図-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」を定義する。式(1)に乱れ率の算出式を示すが（変数の意味は図-4 および図-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。

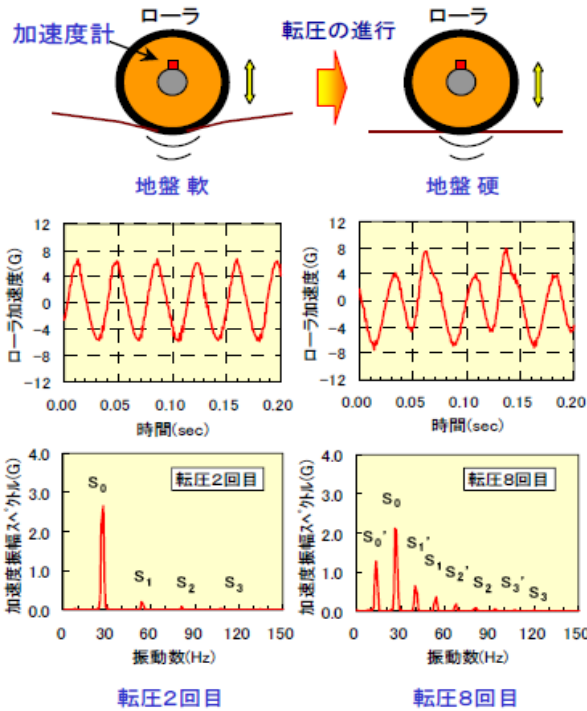


図4 加速度計測および周波数分析例

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

振動ローラの挙動を図-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_{roller}とした。

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

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

(2) 加速度応答を利用した舗装の品質管理手法

a) 舗装の品質管理手法の概要

『舗装設計便覧（社）日本道路協会』⁶⁾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

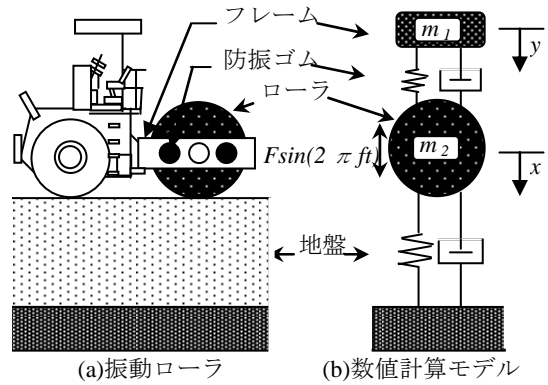


図5 振動ローラの数値計算モデル

とE_{roller}の関係を利用した品質管理手法を検討した。

b) 施工面の弾性係数

E_{roller}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。多層構造における理論的な平均弾性係数（以下E_h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_h: 平均弾性係数 (MN/m²)

E_n: n層目の弾性係数 (MN/m²)

H_n: n層目の厚さ(m)

c) 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（以下Mrと記す）を実測す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Mrを用いることとしたが、Mrは拘束応力によって値が変わる。そこで、舗装内応力はBoussinesq理論によって算出した。

Boussinesq理論は、図-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⁷⁾。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⁸⁾、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⁸⁾⁹⁾、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¹⁰⁾。

今回の研究では、ローラによる荷重を図-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、4トン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、図-6(a)に示すσ_zは、σ_zとσ_rに比べ

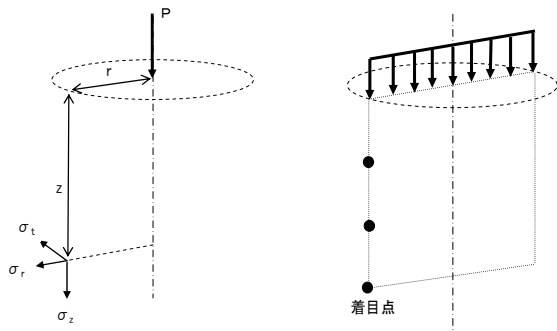


図-6 (a)円筒座標による地盤内応力表示(左)
(b)ローラ荷重による舗装内応力の着目点(右)

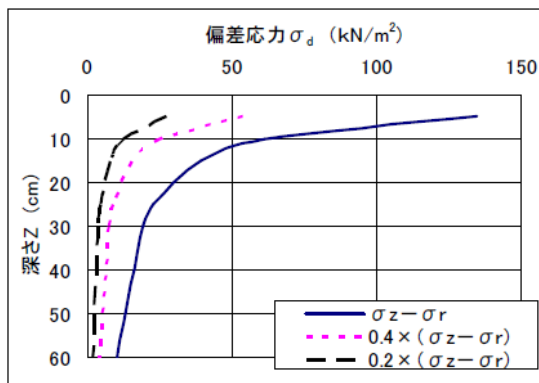


図-7 ローラによる地盤内応力

て小さい。一方、後述する舗装材料の M_r 試験の結果では、偏差応力(以下 σ_d と記す)と M_r が線形関係にある。すなわち、ローラ荷重による σ_d の状態での M_r を決定した。本研究開発では、 σ_t を用いずにローラ荷重によって発生する σ_d を $(\sigma_z - \sigma_r)$ とした。

Boussinesq理論で σ_d を算出した結果を図-7に示す。図-7には、 σ_d を0.4倍したものと0.2倍したものについてもプロットしている。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。各層の弾性係数は、ローラ荷重によって、深さ z (cm)に発生する σ_d から各材料の M_r 試験から得られる式(4)を用いて算出した。

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

ここに、 M_r : レジリエントモデュラス (MN/m^2)
 σ_d : 偏差応力(kN/m^2)
 k_1, k_2 : 材料係数

d) 品質管理手法の流れ

Erollerを品質管理に利用するための流れを以下に示す。

- ① M_r 試験によって式(4)を求める。
- ② 舗装断面からローラで発生する σ_d を算出する。
- ③ σ_d を式(4)に代入し各層の弾性係数を求める。
- ④ 各層の弾性係数から式(3)で E_h を求める。
- ⑤ $E_h = E_{roller}$ として、Erollerを管理基準値として管理す

| | |
|-------|----------------|
| t=50 | 表層 |
| t=100 | 上層路盤 |
| t=150 | 下層路盤 |
| t=600 | 路床 |
| | 原地盤 (関東ローム) |

図-8 舗装構成



写真-1 使用したローラ (4tコンパインドローラ)

る。

Erollerを品質管理に用いるために、上記②の σ_d が重要なパラメータである。

4. 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(2008年度:埼玉県久喜市(大林道路試験所構内), 2009年度:宮崎県新富町(航空自衛隊新田原基地)), 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。

(1) 検証試験の概要

舗装各層上面で計測されるErollerと M_r 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、図-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。写真-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を既存のコンパ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Eroller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Erollerの適用性については、既往の

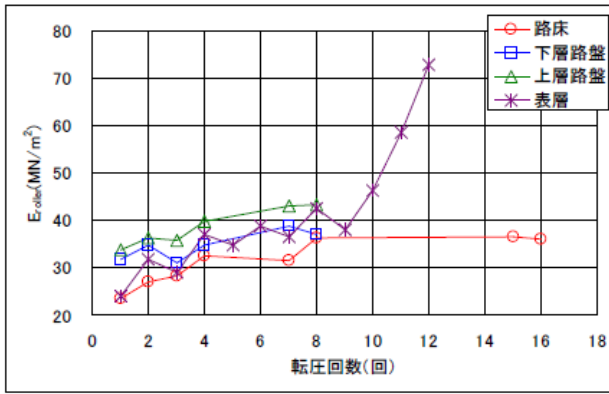


図-9 転圧回数とErollerの関係

表-2 各施工面のEroller

| | $E_{roller} (MN/m^2)$ |
|---------|-----------------------|
| 路床 | 36.0 |
| 下層路盤 | 37.1 |
| 上層路盤 | 43.3 |
| 表層(8回) | 42.6 |
| 表層(12回) | 72.8 |

表-3 密度試験結果

| | 締固め度(%) | 含水比(%) |
|------|---------|--------|
| 路床 | 97.7 | 5.2 |
| 下層路盤 | 103.5 | 4.3 |
| 上層路盤 | 97.2 | 5.3 |
| 表層 | 98.2 | — |

実験検証結果を参照した¹¹⁾¹²⁾。その結果として、①土工事では実績のない4トン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Erollerが増加すること、③FWDのたわみからBurmister理論で算出した地盤弾性係数とEroller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。

(2) 各種試験結果

a) 加速度応答値¹³⁾

転圧回数とErollerの関係を図-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Eroller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Eroller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Erollerは表-2に示すとおりである。

b) 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取りコアの締固め度を表-4に示す。路床・路盤は、最適含水比よ

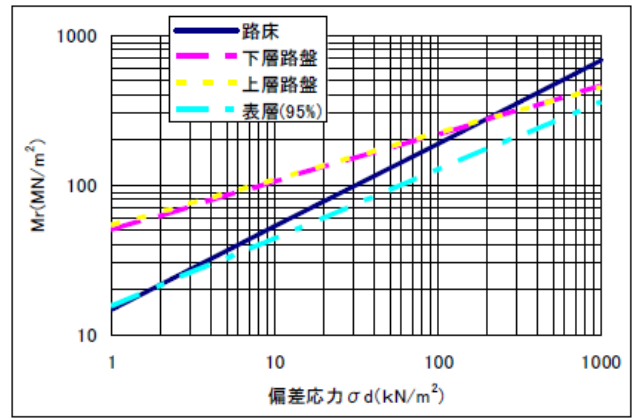


図-10 Mr試験結果

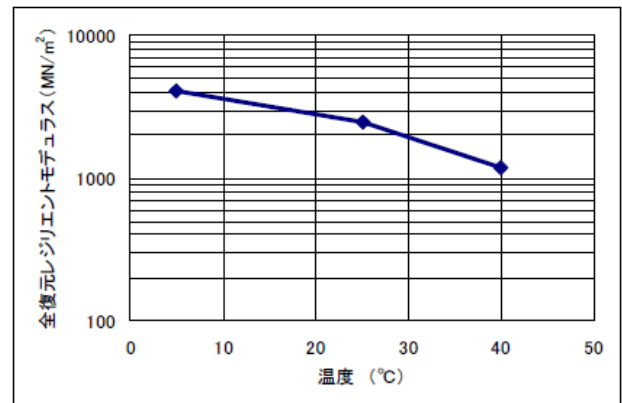


図-11 切取りコアのMr試験結果

り乾燥側で仕上がっている。

c) Mr試験

路床および路盤については、表-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¹⁴⁾。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。表-2に示した8回転圧時の表面の温度は65℃だが、動的な荷重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¹⁴⁾、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。図-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。その試験結果は図-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試験をまとめると表-4に示すようになる。

(3) E_r の算出

表-4 各材料のMr

| | Mr(MN/m ²) |
|---------------|---|
| 路床 | Mr=14.646σ _d ^{0.5549} |
| 下層路盤 | Mr=49.638σ _d ^{0.3199} |
| 上層路盤 | Mr=53.086σ _d ^{0.3077} |
| 表層 (95%,115℃) | Mr=15.339σ _d ^{0.455} |
| 表層 (98%,38℃) | 1.358 |

| |
|--------------------|
| 基層 t=60 |
| 上層路盤 t=100 (M-30) |
| 下層路盤 t=150 (RC-40) |
| 路床 切土 |

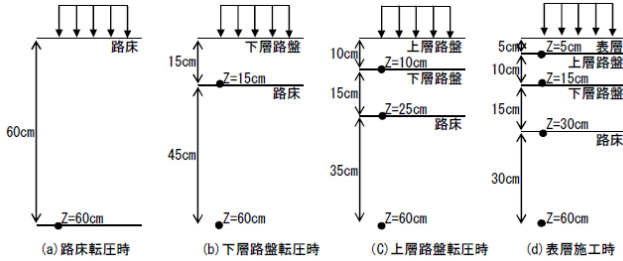


図-12 舗装内応力の計算位置

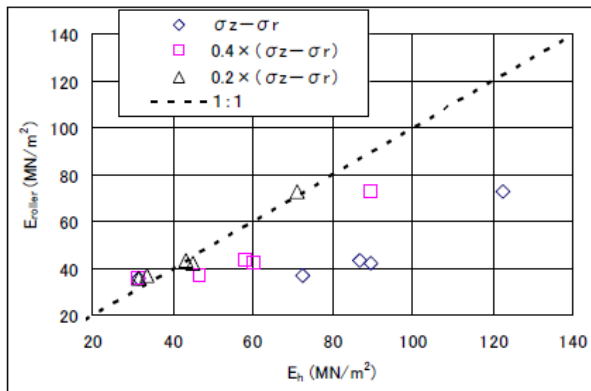


図-13 E_hとE_{roller}

路床のE_hは、4 トンコンバインドローラの影響深さが60cm 程度である¹⁵⁾ことから、深さ60cmにおけるσ_dを用いて、表-4 の式から算出したMr を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、図-12に示すように施工する材料の底部におけるσ_dから、表-4 に示す式でMr を算出し、式(1)でE_hを求めた。締固め度98%の表層のMr は表-4 の値を用いてE_hを求めた。

算出したE_hと表-2に示したE_{roller}を比較すると図-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倍したもので各層のMr を求め、それを合成した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

図-14(a) 舗装断面

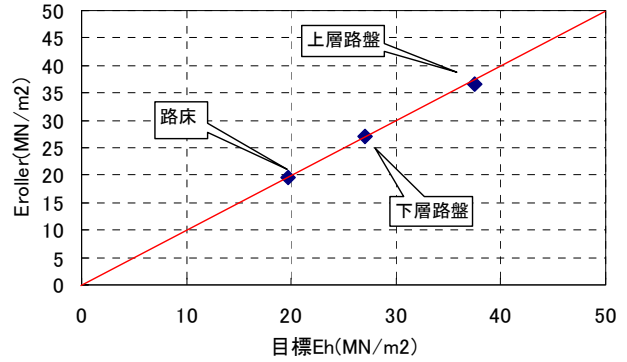


図-14(b) 目標E_hとE_{roller} (上層路盤まで)

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路床のE_{roller}の代表値から路床の現場Mrを求める。

③路床の現場Mrと下層路盤の目標Mrから目標E_hを求め、E_{roller}の管理値とする。

④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路床と下層路盤の現場Mrと上層路盤の目標Mrから目標E_hを求め、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（舗装断面は図-14(a) 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図-14(b) に示す。横軸の目標Mrは前述(2)節c)項で示したMr試験による理論値から設定したものであるが、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。

(4) アスコン層への適用

a) 管理値の算出

前(2)節c)項で示した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の関係は図-15 に示すようになった。図-15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/m²、80℃の時に110MN/m²となる。これらから、目標E_hを算出すると、それぞれ39.1MN/m² (140℃)、40.7MN/m² (80℃)となる。これらを図-14(b) の1:1の線の上にプロットしたものを図-16 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。



図-14(a) 舗装断面

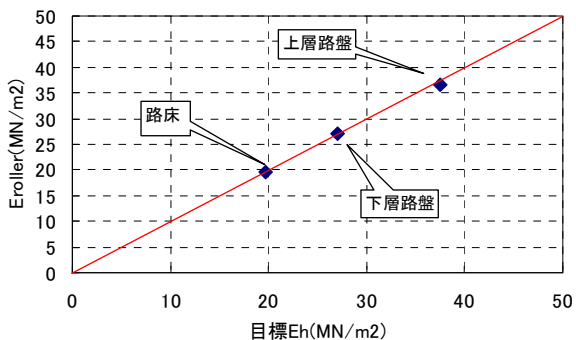


図-14(b) 目標 E_h とEroller (上層路盤まで)

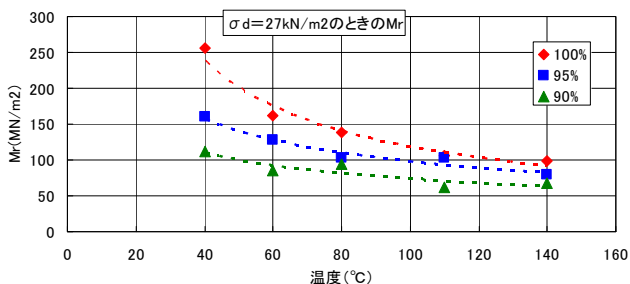


図-15 温度とMrの関係 (偏差応力一定)

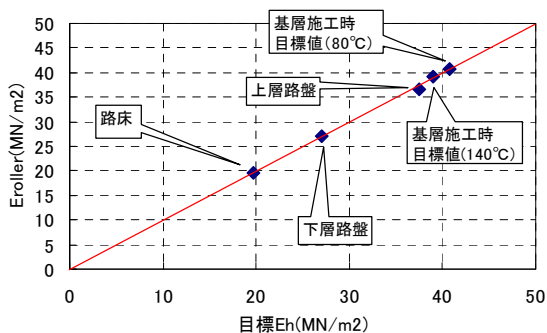


図-16 基層の目標 E_h (予測値)

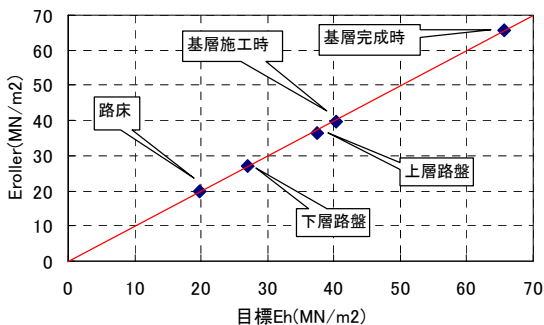


図-17 基層の目標 E_h とEroller (実測値)

b) Erollerの設定

図-17 にアスコン層施工時と完成時 (舗装温度25°C程度) のEroller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. この時のアスコンのMr値を逆算すると, 施工時が103MN/m², 完成時が123MN/m²である. 施工時のアスコンのMr値が103MN/m²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Eroller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. 高性能重機の活用検討

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, 3章, 4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に加え, 施工機械自体の効率化も重要である. 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.

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を行ったわけであるが, 舗装材料の違いはあるが国内でも新しい転圧機械を用いての施工の効率化を検討する観点から, 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を行った.

(1) 施工性能の比較

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写真-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

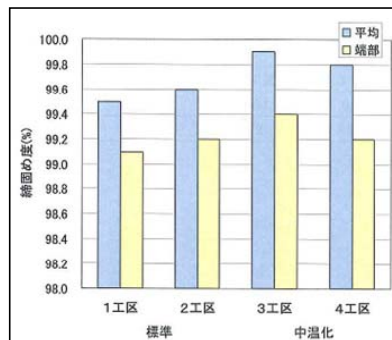


図-18 締固め度の比較

(左: 振動マカダム, 右: (無振動) マカダム)



写真-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)

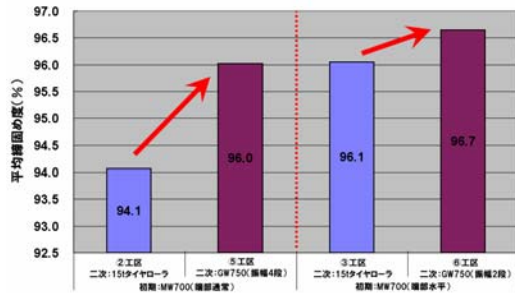


図-19 平均締固め度の比較

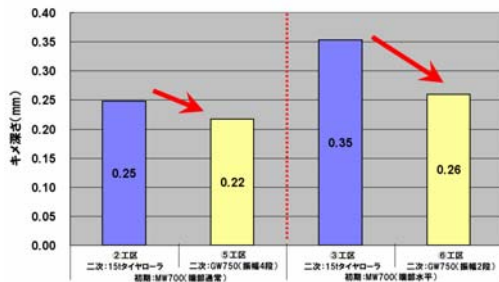


図-20 キメ深さの比較

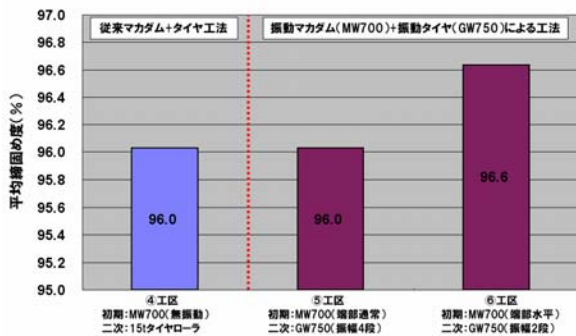


図-21 MW700+GW750の組合せ施工の締固め度

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図-18に示す(2008年度の実験結果)。図-18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が、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回となり転圧回数は2/3となる。すなわち施工時間の短縮

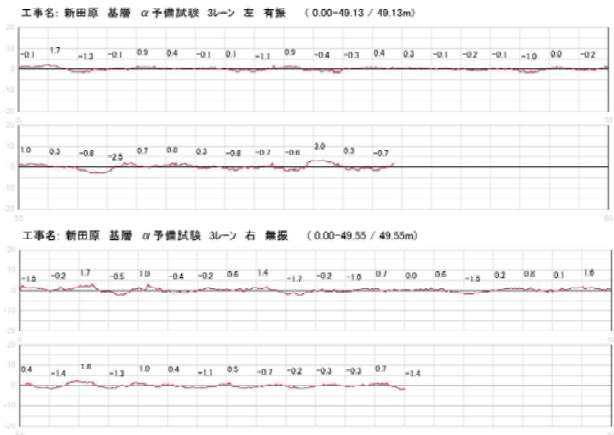


図-22 平坦性の比較

が可能となることが推定される。

2009年度はさらに、振動ローラ(振動マカダム、振動タイヤ)を施工に用いた場合の舗装の品質に関して検討を行った。まず、振動タイヤの締固め効果に関する結果を図-19, 20に示す。振動タイヤローラは従来のローラによる施工に比較して締固め度は大きくキメ深さも小さく、すなわち高品質な施工を実現することが解った。また、振動マカダムを用いた施工においても、施工機械を適切に組み合わせることにより図-21に示すように高品質な施工を実現できることが解った。

なお、作業中の各重機の10m地点における振動は、振動および騒音規準である75dB以下であった。

(2) 振動ローラの舗装への適用時の平坦性

アスコンに対して振動ローラを使用することは国内であまり試みられていないことから、高温時の低剛性アスコンに振動ローラを使用した場合の平坦性を、無振動のマカダムローラの施工時と比較した実験も行った。平坦性は30プロファイルメータを用いて行い、結果を図-22に示す。無振動時の平坦性は0.99mmに対し、振動ローラ(7級)を使用した場合は0.96mmとなり、平坦性はむしろ振動ローラを用いて施工した場合の方が高いことが解った。

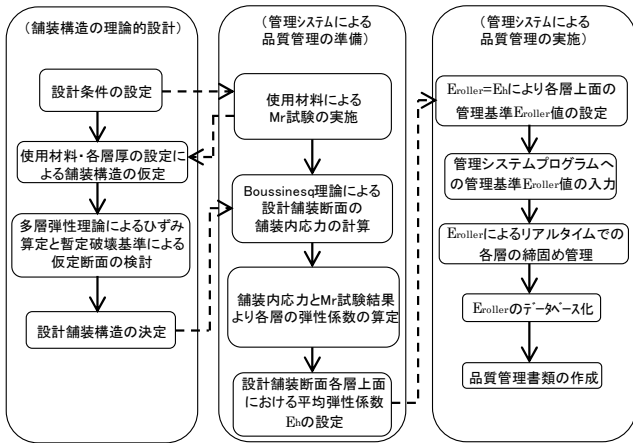


図-23 舗装品質管理のフロー

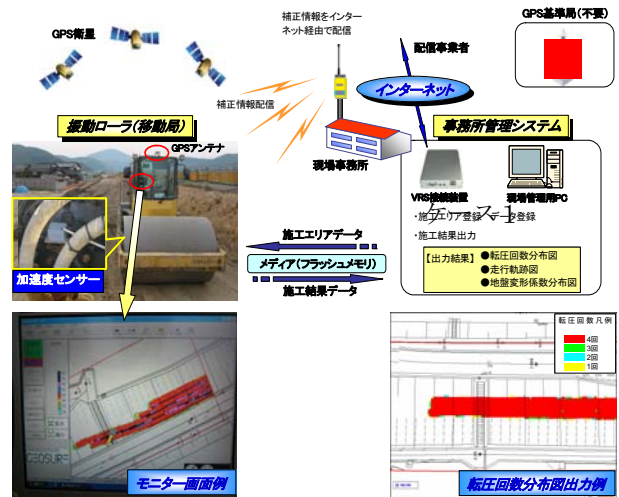


図-25 道路工事施工管理システム (イメージ)

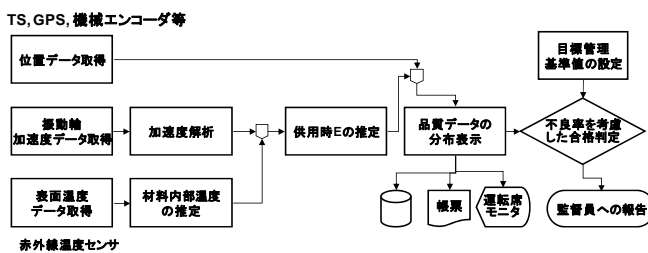


図-24 品質管理システム

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として、Boussinesq理論から得られた値を補正することで、試験施工から得られたE_{roller}と室内試験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、図-23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 管理システムによる品質管理の準備
- ③ 管理システムによる品質管理の実施

①の舗装構造の理論的設計には、使用材料のMrが必要であり、②の管理システムによる品質管理の準備で実施するMr試験結果を用いることができる。Mr試験の条件は、設計条件を用い設計舗装構造が決定したら、その構造でBoussinesq理論によって舗装内応力を求める。このように、理論的設計にリンクしたE_hをE_{roller}として、施工時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、測点によるサン

ル検査ではなく、面的な管理ができる。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と考える。

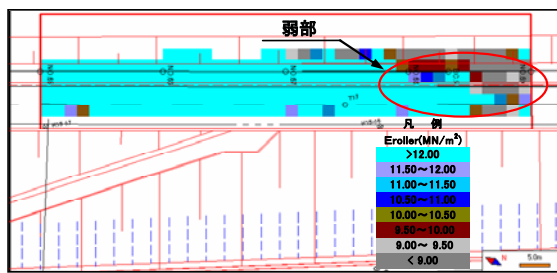
これらをシステム化した場合、図-24に示すフローのようになり、この実装イメージは例えば図-25に示すようになる。

たとえば、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は、このシステムを用いることにより低減することが出来、また、仕上り面については、品質管理基準のブ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の地盤変形係数分布図にて管理も可能となる。

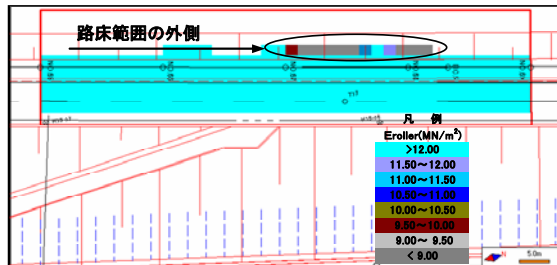
このシステムにより、転圧機械のオペレータは、施工中は車載PC画面を転圧回数表示にて、漏れなく規定回数まで転圧できたことを確認することができ、終了後、車載PC画面を変形係数表示に切替え、規格値以上の色表示になっていることを確認することも可能となる。

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。図-26に規定回数施工後では規格値を満足できなかった箇所での再転圧実施前後での地盤変形係数分布図の一例を示す。このように確実に弱部を見逃さない高品質の施工を行うことができる。

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。特に、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が格段に向上した。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その効果は特に高いといえる。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。



(1)規定回数施工後の地盤変形係数分布図



(2)再転圧後の地盤変形係数分布図

図-26 弱部での再転圧前後の地盤変形係数分布図例

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。この部分が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る。前章の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、一般的に言われている「情報化施工の効果は大現場でない」と得られない」ということは、前述の現場での感想から覆される結果を得ることができたと考える。

7. まとめ

今回の研究開発で、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。
- 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)が速やかに行える。
- ③ 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。
- ④ 舗装の施工において「振動マカダムローラおよび振動タイヤローラの異なる振動モードの組合せ」は非常に有効で、品質の向上とともに施工速度の向上も望める。
- ⑤ 上記の施工管理手法と施工機械を組み合わせることにより、施工の効率化と高品質化を達成することが

出来、おおよそ20%の工期短縮も可能である。

今後の課題として、荷重荷条件等によって異なることが予想される E_0 の設定方法、②加熱アスファルト混合物の M_r の妥当性の確認、③ E_{roller} や M_r のばらつきに対する信頼性の確認などが挙げられる。更に検証を進め舗装の品質管理手法として実用化のための検討を継続する考えである。

謝辞：情報化施工が急速に現場に導入されるなかで、施工の合理化のみならず、品質管理への新しい技術の適用に関する今回の研究開発に対して、国土交通省より助成を頂き現場実験および研究開発が行えたことに深く感謝致します。

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>
- 2) <http://www.mlit.go.jp/common/000020669.pdf>
- 3) <http://www.intelligentcompaction.com/>
- 4) 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 年度管内技術研究発表会(近畿地方整備局), 2004.
- 5) 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.
- 6) 社団法人日本道路協会: 舗装設計便覧, 2006.2
- 7) 例えば, 松野三郎, 養田田栄一, 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.
- 8) 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—, テラメカニクスライブラリー3, テラメカニクス研究会, 1999.10.
- 9) 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.
- 10) 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, 昭和59年3月.
- 11) 根本司, 高倉弘, 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.
- 12) 根本司, 高倉弘, 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.
- 13) 小関裕二, 高倉弘, 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.
- 14) 小関裕二, 高倉弘, 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.
- 15) 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.