

振動ローラ加速度応答を利用した道路路床の 現場締固め管理に関する研究

藤 山 哲 雄 石 黒 健
建 山 和 由¹⁾

要 旨

本研究は、道路路床の締固め施工管理の合理化を目的に、筆者らが提案する振動ローラ加速度応答を利用した地盤剛性評価手法の適用性を検討したものである。道路路床は、所要の支持力を有すること、および施工面内において一定剛性であることが要求されるが、提案手法を用いれば路床の要求品質である地盤剛性を施工面全域にわたり把握できるとともに、施工中にリアルタイムに地盤剛性を判定しつつ、転圧を制御することによって所要品質の路床を均一に造り込むことができるため、現行の密度を主体とした離散・事後的な締固め管理に比べて大幅な施工管理の合理化、また均質かつ高品位な路床構築が達成できると考えられる。本論文では、道路盛土材を用いた現場転圧試験を実施して提案手法の妥当性を確認するとともに、高速道路路床仕上がり面の連続的な加速度計測から実際路床の剛性の不均一性を明らかにし、リアルタイム転圧制御が可能な本手法の有用性を述べている。

キーワード 振動ローラ／加速度応答／締固め／道路路床／施工管理／地盤剛性

目 次

- | | |
|--------------------------------|------------------------------|
| 1. はじめに | 4. 路床面剛性の不均一性評価と
施工管理への応用 |
| 2. ローラ加速度応答法による地
盤剛性評価手法の概要 | 5. おわりに |
| 3. 現場転圧試験による地盤剛性
評価手法の適用性検証 | |

A STUDY OF COMPACTION QUALITY CONTROL OF SUBGRADE BY THE ACCELERATION OF A VIBRATORY ROLLER

Tetsuo FUJIYAMA Takeshi ISHIGURO
Kazuyoshi TATEYAMA

Synopsis:

The evaluation method of ground stiffness by the acceleration of vibratory roller suggested by Authors is studied for rationalization of compaction quality control of road subgrade. The current quality control by measuring dry density cannot insure deformation characteristics of the subgrade, but the suggested method can evaluate ground stiffness on real-time during compaction for a whole construction area and enables the subgrade to have uniform deformation resistance. The applicability of the method to the subgrade was examined at the field compaction tests using the road materials, and variety of the stiffness of Highway subgrade was revealed through the continuous measuring of the roller acceleration for the whole area and applying the suggested method.

* 1 京都大学大学院工学研究科 助教授

1. はじめに

道路路床は、上部の舗装と一体となって交通荷重を支える重要な部位であり、所要の支持力を有すること、および舗装の平坦性確保の点から施工面内において一定の剛性を有することが要求される。路床品質の優劣は道路機能に直結するため、所要の支持力係数（CBR）を確保できる材料の選別、土構造物では最も厳しい締固め度規定（ $D_c \geq 97\%$ ）に加え、仕上がり時には満載ダンプトラック荷重による路面のたわみ量検査（プルーフローリング）も実施されており、一般盛土部に比べより厳密な管理が行われる。しかしながら、

- ・密度管理では本質的に変形抵抗性の照査が行えない。また離散測定である
- ・プルーフローリングによるたわみ検査は監督員の目視観察によるため、施工面全域に対する客観的、合理的な評価が行えない。また、最終仕上がり段階における検査判定では、不良部の対処に多大な手戻りを生じるという問題がある。

そこで本研究では、道路路床における施工管理の合理化を目的に、振動ローラ加速度応答を利用した締固め管理手法¹⁾（以下、本論文ではローラ加速度応答法と称する）の適用を試みる。本手法は、地盤が締固まるにしたがって振動ローラの加速度応答が変化してくる現象を利用し、ローラの加速度計測から逆に地盤の締固め度合いを判定する手法であり、筆者らは既にロック材密度管理への適用可能性を示した他²⁾、ローラ加速度応答から地盤変形係数を定量的に算定する手法を考案している³⁾。本手法を用いれば、路床の要求品質である地盤剛性を施工面全域にわたり把握できるとともに、施工中にリアルタイムに地盤剛性を判定しつつ、転圧を制御することによって所要品質の路床を均一に造り込むことができるため、路床施工管理の大幅な合理化、および均質かつ高品位な路床構築が達成できると考えられる。以下では、道路盛土材料を用いた現場転圧試験を実施し、筆者らの提案する地盤剛性評価手法の路床に対する適用性を確認した後、路床仕上がり面の連続的な振動ローラ加速度計測から実路床の変形抵抗性の不均一性を明らかにし、リアルタイム転圧制御が可能な本手法の有用性について述べる。

2. ローラ加速度応答法による地盤剛性評価手法の概要

振動ローラの加速度応答を利用した地盤剛性評価手法の概要を以下に述べる。図-2.1は、後述する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、その周波数分析結果においては振動ローラの振動数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

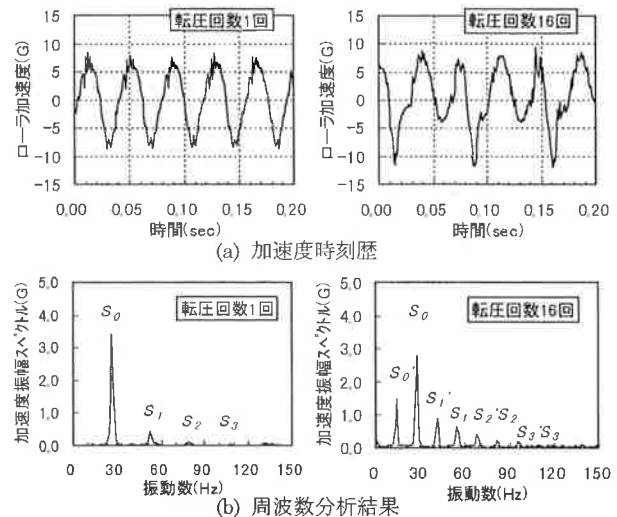


図-2.1 締固めにもなう振動ローラ加速度波形
(路床転圧試験における計測結果例)

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、振動ローラ加速度の定量指標として、以下の「乱れ率」を導入する³⁾。

$$\begin{aligned} \text{乱れ率} &= \frac{\text{高調波} \cdot 1/2 \text{分数調波スペクトルの総和}}{\text{基本振動数} + 1/2 \text{基本振動数のスペクトル}} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n S_i + \sum_{i=1}^n S_i'}{S_0 + S_0'} \cdot \frac{F/(m_1 + m_2)g}{F/(m_1 + m_2)g} \quad [1] \end{aligned}$$

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。さらに、藤山・建山³⁾は、数値計算による検討をもとに、乱れ率と振動ローラの機械諸元（フレーム質量 m_1 、ローラ質量 m_2 、振動数 f_0 、起振力 F 、ロール幅 B ）から地盤の変形係数を求める下式を導出している。

$$\begin{aligned} E &= \frac{2 \cdot (1 - \nu^2)}{B \cdot \pi} \cdot \frac{\left(\frac{4}{3} \text{乱れ率} + 1 \right)^2 \cdot (2\pi f_0)^3 \cdot m_2}{1 - 0.32\alpha + \sqrt{0.1024\alpha^2 - 1.64\alpha + 1}} \\ \alpha &= 1 - \left(\frac{F}{(m_1 + m_2)g} \right)^2 \quad [2] \end{aligned}$$

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、本手法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地盤変形係数を算定可能であることが特徴である。

3. 現場転圧試験による地盤剛性評価手法の適用性検証

3.1 現場転圧試験の概要

上述の地盤剛性評価手法は数値計算をもとに導出されたものであり、実験的な検証が十分でない。そこで本節では、路床材を含む実際の道路盛土材料を用いた現場転圧試験を実施し、既往測定手法との比較から提案手法の

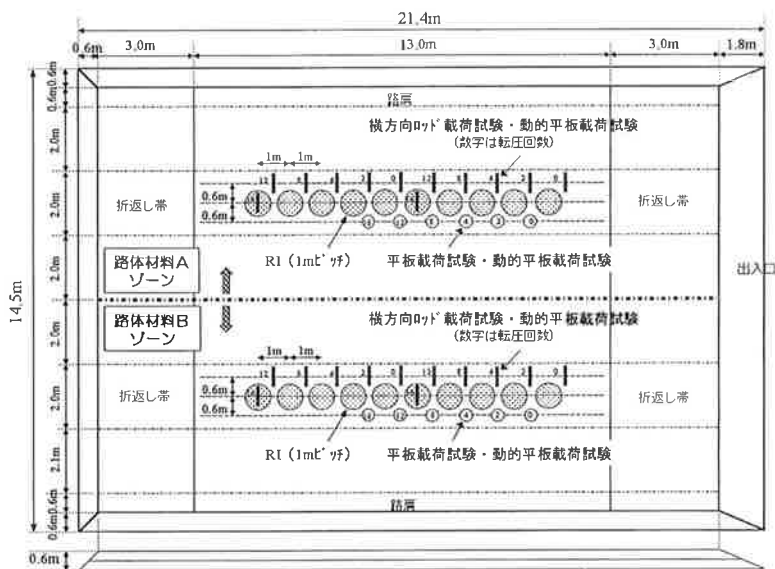


図-3.1 路体転圧試験計測配置図

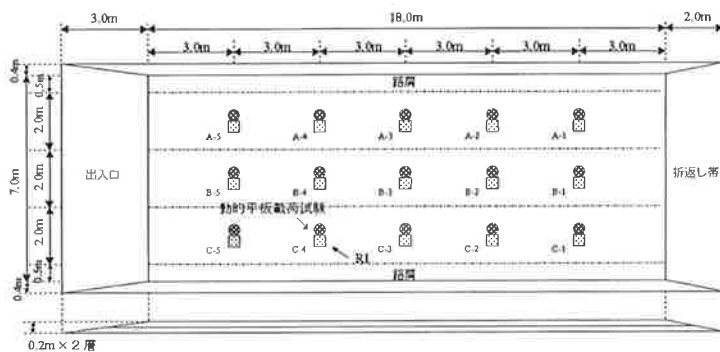


図-3.2 路床転圧試験計測配置図

妥当性を検証する。図-3.1 に路体材、図-3.2 に路床材に対する現場転圧試験の計測ヤード図を、また表-3.1 に各転圧試験の計測概要を示す。地盤剛性の測定手法としては、平板載荷試験 (JIS A 1215) の他、転圧層の水平方向の変形係数を測定する目的で横方向ロード載荷試験、平板載荷試験を補足する目的で測定が簡易な動的平板載荷試験を実施した (路床材料は動的平板載荷試験のみ実施)。横方向ロード載荷試験とは、地盤に平行に挿入した2本のロード (根入深さ 20cm) を横方向に載荷し、そのときの荷重とロード頂部の変位の関係から地盤変形係数を求める手法であり⁴⁾、また動的平板載荷試験とは、質量 10kg の重錘を高さ 1m から自由落下させ、直径 30cm 円形載荷板を介して地表面に衝撃的な荷重を加え、その時の衝撃加速度の積分により推定した載荷板の最大変位と載荷重の比より動的な変形係数 E_d を算出する試験器である。いずれも反力設備が不要であるため、通常の静的な平板載荷試験に比べ簡易に地盤剛性を測定可能である。また、現行の道路路体・路床の施工管理が RI による締固め度管理であることを考慮し、RI 密度と乱れ率の関係を調べ、密度評価手法としてのローラ加速度応答法の適用性についても併せて検討する。

振動ローラの機械諸元を表-3.2 に示す。また、各材料

表-3.1 転圧試験概要

	路体転圧試験	路床転圧試験
転圧機種	新キャタピラ三菱CS563C	酒井重工業SV160D
締固め厚	30cm	20cm
転圧回数	16回	16回
計測項目	RI (線源深さ30cm) 振動ローラ加速度 動的平板載荷試験 平板載荷試験 横方向ロード載荷試験	RI (線源深さ20cm) 振動ローラ加速度 動的平板載荷試験

表-3.2 振動ローラ機械諸元

	路体転圧試験	路床転圧試験
振動ローラ形式	CS563C	SV160D
総重量	11,590 (kg)	17,400 (kg)
フレーム質量	2,310 (kg)	4,100 (kg)
ロール質量	3,720 (kg)	5,800 (kg)
起振力	222 (kN)	294 (kN)
公称振動数	30 (Hz)	28.3 (Hz)
防振ゴムパネ係数	2.54×10^6 (N/m)	2.0×10^6 (N/m)
締固め幅	2.13 (m)	2.15 (m)

※SV160Dの防振ゴムパネ係数は推測値

表-3.3 盛土材の物理特性

	路体材料A	路体材料B	路床材料
分類名	細粒分混じり砂質礫	細粒分混じり砂質礫	砂混じり礫
土粒子密度 ρ_s (Mg/m ³)	2.751	2.706	2.669
自然含水比 (%)	14.6	4.5	7.4
最大粒径 D_{max} (mm)	53	75	75
均等係数 U_c	64	128	19
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (Mg/m ³)	1.820	2.100	2.001
最適含水比 w_{opt} (%)	17.4	8.0	10.4
岩のスレーキング率 (%)	6.3	15.7	11.4

の物理特性を表-3.3 に示す。路体材転圧試験は、第2東名岡部トンネル工区における路体材の代表的な2材料を選別し実施したものであり、材料Aは近隣工区から搬入される風化軟岩土砂、材料Bは岡部トンネルTBMの掘削ズリである。ただし、TBMからのズリ出しにおいて、バルトコンベアの洗浄および粉塵対策のため人為的な加水が行われていたため、撒き出し時の材料Bはかなり湿潤し、地山の含水状態と大きく異なる状態にあった。また路床材転圧試験は第2東名掛川トンネル工区におけるトンネルインバート埋戻し材料のモデル施工試験であり、転圧機種は起振力 30t 級の大型振動ローラ、材料は粒径 19mm 以上の粗礫分が全体の7割以上を占める比較的粒度の粗い材料 (均等係数 $U_c=19$) であった。

3.2 現場転圧試験結果

(1) 転圧回数と乱れ率、乾燥密度、地盤剛性の関係

各材料に対する転圧回数と RI 乾燥密度、乱れ率、既往測定手法による地盤変形係数の関係をそれぞれ図-3.3、図-3.4、図-3.5 に示す (ヤード平均と最大値・最小値の幅で示した)。このうち、路体材AおよびBに着目すると、材料Aは転圧にともなって乾燥密度、乱れ率、地盤変形係数とも順調に増加しているが (図-3.3~3.5(a))、

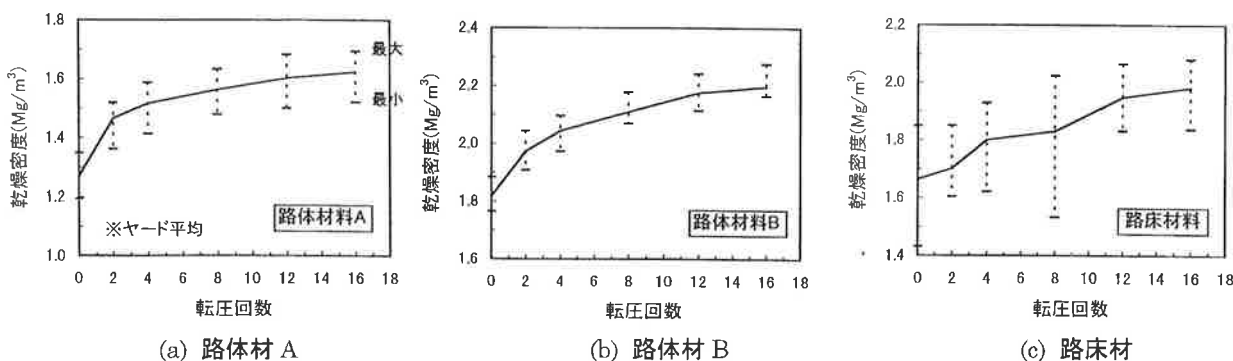


図-3.3 転圧回数～RI 乾燥密度の関係

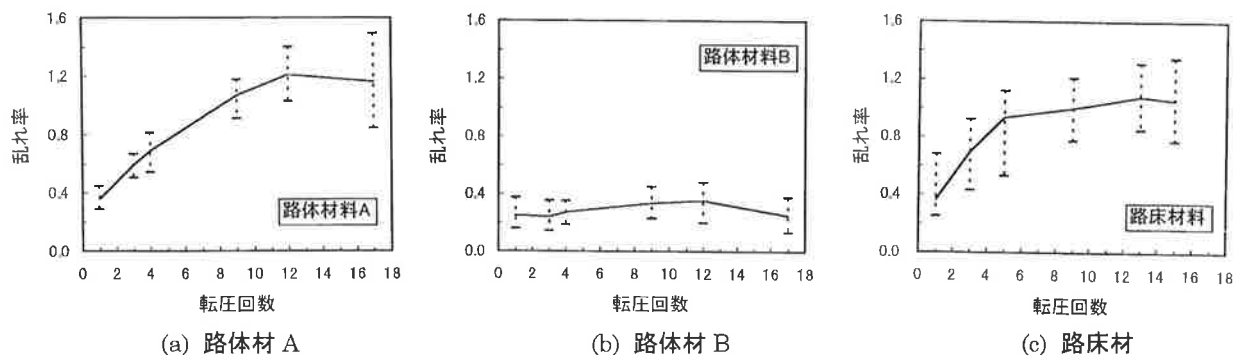


図-3.4 転圧回数～乱れ率の関係

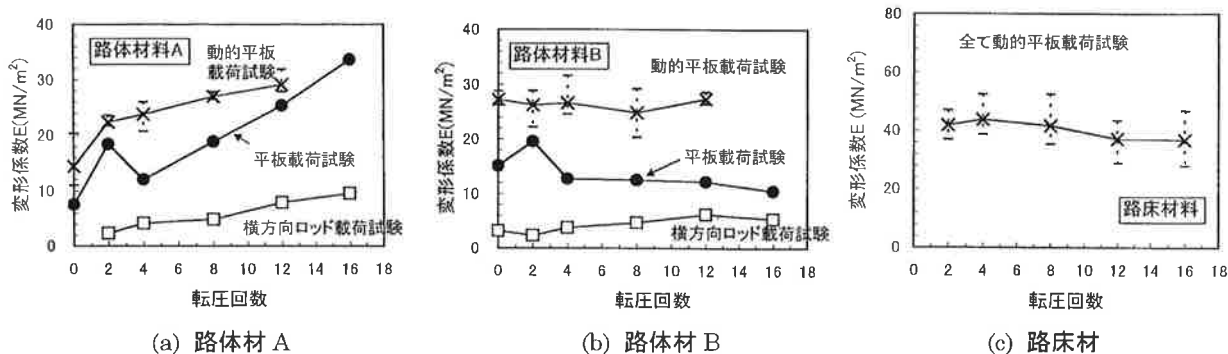


図-3.5 転圧回数～地盤変形係数の関係

路体材 B については転圧回数に応じて乾燥密度が増加するにもかかわらず、乱れ率および地盤変形係数はほとんど増加しない、もしくは若干の低下傾向を示していることがわかる (図-3.3～3.5(b))。これは、路体材 B は前述したようにズリ出し時に人為的な加水が行われたことにより非常に湿潤しており、最大粒径が 75mm ある粗粒系の材料にもかかわらず飽和度が比較的高い状態にあったため、密度増加にともなう飽和度の高まりによってサクションが消失すること、あるいは振動ローラ転圧による間隙水圧の上昇によって、転圧をするほどむしろ地盤剛性が低下するものと考えられる。そして、振動ローラ加速度応答は地盤剛性に対応するから、乱れ率も同様の傾向を示すものと考えられる。本材料は路体材であるが、実際の路床施工においてもこのような高飽和度材料が混入する可能性は否定できない。したがって、特に路床のような変形抵抗性が重要となる構造物では現行の密度管理では不十分であり、地盤剛性の直接確認が必須であること、また乱れ率による締固め管理が有効

となる可能性があることが伺える。

一方、図-3.3～3.5(c)の路床材転圧試験については、密度、乱れ率が転圧に対して順調に増加するのに対し、動的平板載荷試験による変形係数のみ若干の低下傾向を示す結果となった。この理由としては、今回使用した路床材が比較的乾燥し、かつ単粒系の粗粒材料であったため、30t 級大型振動ローラで薄層 (20cm) 転圧したことによって地表面付近はむしろ緩んでしまい、締固め層の平均的な剛性は増加しているにもかかわらず、測定深さが小さく表層付近の局所的な剛性に影響されやすい動的平板載荷試験は、見かけ上評価剛性が低下したことが考えられる (表層剛性低下のメカニズムは明確ではないが、拘束圧の働かない条件下で地盤が振動による過大なひずみ履歴を受けることにより、決して球形ではない土粒子がある一定方向の配列に揃ってしまうことによって構造劣化が生じたものと予想される⁵⁾)。一般に反力が不要な載荷力の小さい測定手法は、取扱いが簡易な反面、表層の局所的な剛性に左右される傾向にあるため、

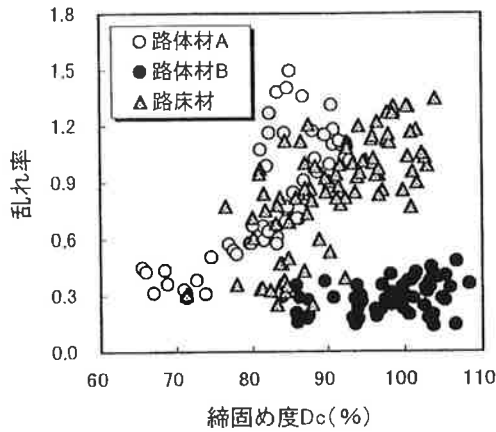


図-3.6 乱れ率と締固め度の関係

深部までを含む締固め層の平均的な剛性を評価できるローラ加速度応答法は、この意味でも施工管理手法として優位であると言える。ただし、仮に大型振動ローラによる薄層転圧が表層剛性の低下を招いているとすれば舗装にとっては好ましくない。この現象の真偽については今後検討が必要であろう。

(2) 乱れ率による乾燥密度評価の適用性について

道路路床・路体を含め、現行の盛土締固め管理は一般に密度によっている。本手法の密度評価手法としての適用性もみるため、乱れ率と締固め度 D_c の関係を整理した結果を図-3.6 に示す（道路盛土の締固め管理基準に対応させ、ここでは乾燥密度を締固め度 D_c で表現した）。これをみると、路体材 A や路床材では乱れ率と締固め度 D_c の関係は比較的良好な対応を示すものの、両者の関係は明らかに材料によって異なっており、乱れ率から密度を推定するには使用材料毎に乱れ率～締固め度 D_c 関係を用意しなければならないことがわかる。したがって、フィルダムロックのように材料が選別され、かつ含水比変動の影響が小さい盛土を除けば、同一現場内ですら多様な材料が用いられる我が国の通常の盛土工事では、密度管理の代替手法としての適用は困難であると言える。一方、筆者らは土質条件をパラメトリックに変化させた

室内ピット試験を別途実施しており、この結果乱れ率と密度の関係は材料により異なるが、強度変形特性を表す指標（コーン貫入値や現場 CBR）とは材料によらず一意的な関係にあることを確認している⁹⁾。よって、一般盛土に対しては、あらかじめ乱れ率と強度変形特性を表す指標の関係を把握しておき、密度を介さずこれらを判定する管理手法が考えられる。これに関する検討については別報⁹⁾を参照されたい。

(3) ローラ加速度応答法による地盤剛性評価手法の適用性検証

次に、筆者らの提案する地盤剛性評価手法の適用性を検証する。計測した乱れ率、および表-3.1 の各振動ローラの機械諸元を式 [2] に代入して地盤の変形係数を推定し、平板載荷試験、横方向ロード載荷試験、動的平板載荷試験により測定した地盤変形係数と比較した結果を、各測定手法毎にそれぞれ図-3.7 に示す。平板載荷試験については過去に行ったフィルダムロック材に対する結果も参考のため併記した（転圧機種；SV160D、撒き出し厚；150cm）。なお、平板載荷試験は沈下量 1.25mm までの荷重～沈下曲線の割線勾配により地盤反力係数 K_{30} を求め、弾性理論解を用いた次式で変形係数に換算して得ている⁷⁾（ポアソン比 $\nu=0.33$ と仮定した）。

$$E = \frac{K_{30} \times 0.3 \times \pi (1 - \nu^2)}{2} \quad [3]$$

図-3.7 をみると、加速度による推定変形係数 E_{acce} と実測変形係数の関係は測定手法毎に異なるが、フィルダムロック材を含めた 5 種類の材料および転圧機種（20t 級と 30t 級振動ローラ）にかかわらず、それぞれ一意的な関係にまとめられていることがわかる（路床材における動的平板載荷試験との対応が良くないが、これは前述したように動的平板載荷試験が表層剛性低下の影響を受けたためと思われる）。すなわち、密度と異なり、地盤剛性に関しては材料によらず評価可能であること、また提案手法を用いることによってこれが機種を変更しても定量的に算定可能であることがわかる。

加速度による推定変形係数 E_{acce} と実測変形係数（ E_{sta} 、 E_h 、 E_{vd} ）の関係は、各測定手法毎にそれぞれ図中に示

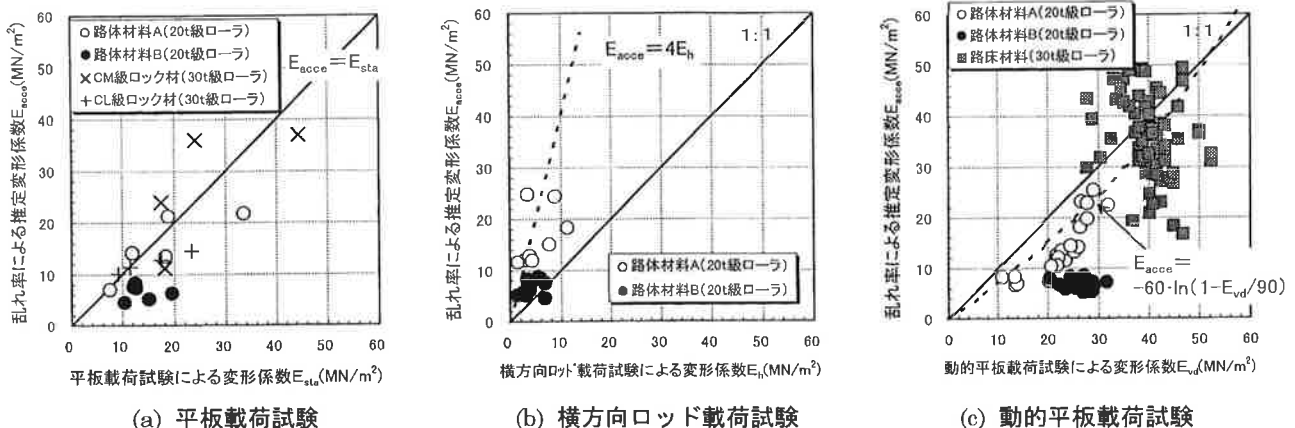


図-3.7 加速度による推定変形係数と既往測定手法による変形係数の比較

すように得られた。このうち、振動ローラ加速度応答より推定される変形係数が、標準的な測定法である平板載荷試験による測定値と結果的にほぼ 1 : 1 の関係で示されることは、実務上は便利と言えよう。また横方向ロード載荷試験については、既往報告 4) によって平板載荷試験の約 1/4 となる結果が得られているが、今回の結果もそれに符合しており、ローラ加速度応答による評価値の 1/4 倍として転圧層の横方向変形係数が得られることになる。本手法による地盤剛性評価値によって路床や基礎設計等を行う際は、これらの結果を利用することができる。

以上、実際の道路盛土材料を用いた現場転圧試験の結果、路床の原位置地盤剛性評価手法としての本手法の適用性を確認することができた。

4. 路床面剛性の不均一性評価と施工管理への応用

4.1 高速道路における路床剛性の不均一性評価

(1) 測定概要

本節では、実際の高速道路における上部路床仕上がり面において振動ローラ加速度を計測し、実路床面の乱れ率の取得と地盤剛性分布の評価を試みる。

計測した路床は、現在建設中の第 2 東名高速道路における盛土区間であり、既に上部路床が完成した区間である。なおここでの材料は、前節で示した転圧試験における路床材と同一ではない。振動ローラ加速度計測を行ったヤードの全体図を図-4.1 に示す。測定長を道路延長方向に 200m × 2 レーン確保し、振動ローラ (SV160D) をそれぞれ 1 往復走行させてローラ加速度を連続計測した。これから走行距離 5m 毎に乱れ率を取得し (合計 80 測点)、地盤変形係数を評価した。

(2) 路床面剛性の評価

推定された地盤変形係数の結果を、道路延長方向の分布として図-4.2 に示す (右レーンのみ示す)。図には前進・後進時の両結果について示している。図-4.2 をみると、路床面の推定変形係数は必ずしも一定ではなく、かなり不均一性があることがわかる。例えば前進時では、推定 $E=28\sim67(\text{MN}/\text{m}^2)$ (平均値 $40(\text{MN}/\text{m}^2)$) となっており、最大値と最小値では 2 倍以上の差が生じている。この変形係数のバラツキは、ローラ加速度応答法自体の測定精度に起因するバラツキも考えられるが、前進と後進における推定変形係数の「凸凹」が良く対応しており、再現性が高いことを考えると、この推定値のバラツキは路床面が有する地盤剛性の不均一性を反映したものと判断できる。従来、転圧面の剛性を連続的に評価できる手法が存在しなかったため、同一の施工仕様で構築された路床面がどの程度の不均一性を有するのかは不明であったが、本計測によって初めて、実路床面の剛性の不均一性が定量的に明らかにされた。



図-4.1 実路床（第2東名）の計測ヤード

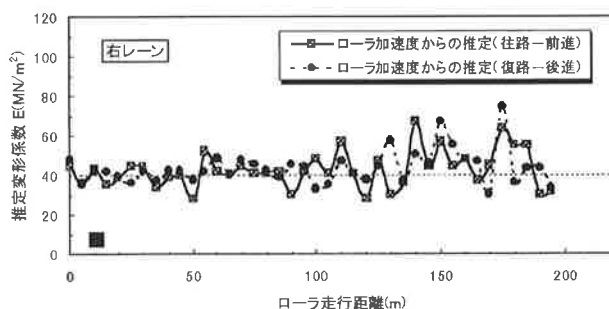


図-4.2 実路床の推定変形係数

4.2 高速道路路床の供用年数評価と施工管理への応用

現行の我が国における道路アスファルト舗装では、一般に T_d 法と呼ばれる設計法が用いられている。これは、路床強度 (CBR) と交通条件 (供用年数に想定される走行車両の輪荷重) から、アスファルト舗装の構造設計に必要な厚さ (舗装の相対的な強度を表す等値換算厚) を次式により求める設計法である 8)。

$$T_d = \frac{3.84 N^{0.16}}{CBR^{0.1}} \quad [4]$$

T_d ; 舗装各層を表層および基層用加熱アスファルト混合物で設計したときの必要厚さ (cm)

N ; 設計期間 (年) における累積 5 トン換算輪数 (輪 / 1 方向)

CBR ; 路床の設計 CBR (%)

本設計法に従うと、同一の交通条件を想定した場合、道路延長方向における路床土の CBR に応じて舗装厚を変化させる必要があるが、短区間内で目まぐるしく舗装構造が変わると不経済となるので、一般道路では最低 200m⁹⁾、高速道路ではインターチェンジ間 (およそ 10km) は舗装構造を同一とすることを原則としている 9)。そして、この区間内の設計 CBR は、安全側に当該区間で得られる室内 CBR の最小値が採用される。しかし、ローラ加速度応答法により実路床の変形係数分布を推定した結果、図-4.2 に示すように短区間内でかなりの変動が生じていることが明らかとなった。そこで、この結果をふまえ、設計上の供用年数に対し、路床土剛性の不均一性によって実際はどの程度の供用可能年数の変動が生じるかを推測してみる。

供用可能年数の算出は以下のように考えた。設計 CBR を CBR_0 、供用期間内に想定される累積 5 トン換算輪数 N_0 (回) によって設計された舗装厚 T_d に対し、実際の路床

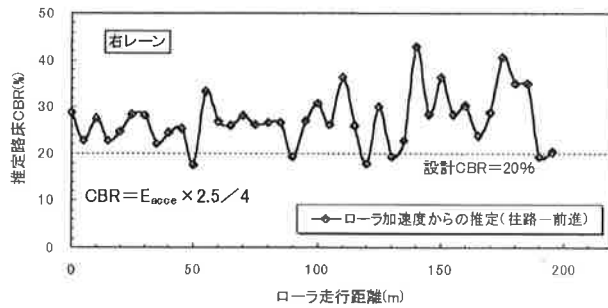


図-4.3 実路床の推定 CBR

CBR が CBR' であったとすると、許容できる換算輪数 N' は式 [4] より以下のようになる。

$$T_A = \frac{3.84 N_0^{0.16}}{CBR_0^{0.3}} = \frac{3.84 N'^{0.16}}{CBR'^{0.3}} \quad [5]$$

$$\therefore N' = N_0 \cdot \left(\frac{CBR'}{CBR_0} \right)^{15/8}$$

設計上の供用年数を 10 年とし、1 年当たりの交通量が変化しないものと仮定すれば、供用開始から n 年目までの累積 5 トン換算輪数 N' (回) は供用年数に比例するから、供用可能年数 n は結局次のように表される。

$$n = 10 \cdot \left(\frac{CBR'}{CBR_0} \right)^{15/8} \quad [6]$$

すなわち、設計 CBR と実際の路床 CBR の比率に応じて供用可能年数が決まる。

一方、図-4.2 に示す実路床の推定変形係数 E_{acc} の分布を、名神高速道路建設時に路床土に対する現場平板載荷試験と室内修正 CBR の調査結果から得られた関係¹⁰⁾

$$CBR(\%) = \frac{1}{40} \cdot E(kgf/cm^2) = \frac{1}{4} \cdot E(MN/m^2) \quad [7]$$

を参考に CBR に変換すると、図-4.3 のように得られた。路床 CBR は 18~43(%) と評価される。ただし、上式 [7] の変形係数は繰返し平板載荷試験における載荷 2 回目の変位～沈下量関係の割線勾配から求めており、一方前節でローラ加速度応答法による推定変形係数 E_{acc} と 1 : 1 の対応があるとした平板載荷試験の変形係数は繰返しを伴わない載荷 1 回目の荷重～沈下曲線の勾配から得ているため、既往の繰返し平板載荷試験結果を参照し、ローラ加速度応答法による推定変形係数 E_{acc} を 2.5 倍して載荷 2 回目相当の変形係数に補正した後、CBR に変換を行っている。

本区間の設計 CBR はまだ決定していないが、高速道路で規定される設計 CBR の最大値 $CBR_0 = 20$ とし、図-4.3 の CBR' 分布をもとに供用可能年数を式 [6] から求めると、図-4.4 を得た。この結果、設計 CBR=20(%) を仮定した場合、設計供用年数 10 年に対して、最小 8 年から最大 42 年程度までかなり大きな年数のバラツキが生じることがわかる。現行設計で採用される CBR の最大値を用いたにもかかわらず、ほとんどの区間で設計を大幅に上回る供用年数を確保しており、この意味では本

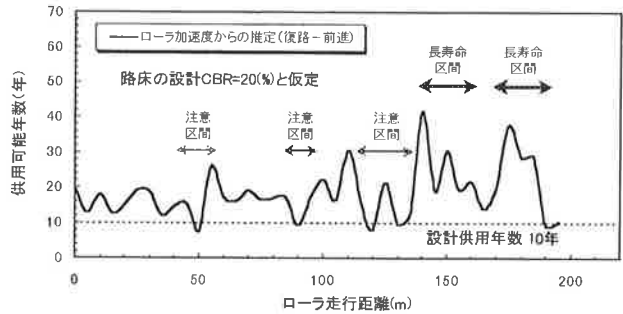


図-4.4 路床の供用可能年数の試算結果

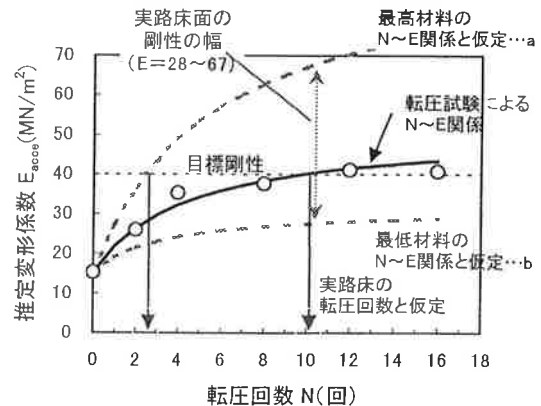


図-4.5 路床材の転圧回数～変形係数関係

区間は十分な品質の路床が構築されていると評価できるが、道路延長方向に対する供用可能年数の変動が激しく、供用後の維持管理の効率を考えると経済的とは言えない。

これに対し、ローラ加速度応答法はリアルタイムに路床品質を評価し、オペレータが所要値に合わせて転圧を制御することが可能である。先に図-4.2 に示したように、実際の路床は同一の転圧回数で施工を行ったにもかかわらず、 $E = 28 \sim 67 (MN/m^2)$ の変形係数のばらつきが生じた。これは、各場所で撒き出された材料の粒度や含水比が異なったために、同じ転圧エネルギーを加えても剛性の発現の仕方が異なるためと解釈される。仮に、均一な剛性に仕上げるためにはどのような転圧を行えば良かったかを試算してみよう。前節の路床転圧試験では、転圧回数と乱れ率による推定変形係数 E_{acc} の関係（ヤード平均）が図-4.5 のように得られた（○プロット）。そこで、転圧回数～変形係数 E_{acc} 関係（太実線）の双曲線形状を利用し、最高位の材料から最低位の材料に応じて、路床の転圧回数～ E_{acc} 関係が図中の曲線 a～b の幅で描かれると仮定し、転圧回数 10 回における変形係数 E_{acc} が図-4.2 に示す各測点での変形係数に合うよう、転圧回数～ E_{acc} 曲線をそれぞれフィッティングさせ、路床平均 $E_{acc} = 40 (MN/m^2)$ をクリアするための所要の転圧回数をそれぞれ推定すると、図-4.6 のように推測される。ただし、場所によっては計算上非現実的に多くの転圧回数が必要となるが、ここでは所要転圧回数の上限を一律に 30 回とした。これをみると、路床剛性を一定にするために必要な転圧回数は場所により大きく異なることがわかる（最

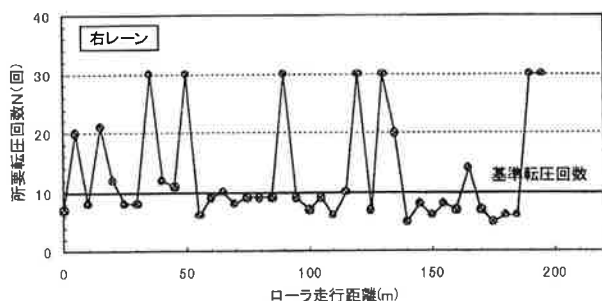


図-4.6 路床剛性一定とするための所要転圧回数の試算

小4回～最大30回以上)。あまりに短い区間で転圧回数を変化させると施工が煩雑になること、また非常に多くの転圧回数を要する箇所に対しては、置き換えやセメント改良などの別途処置（特に高含水比の材料が混入した場合、図-3.5(b)に見られた様に転圧回数を増やしても剛性増加は期待できない）を考慮しなければならないが、従来まで同一材料と見なして施工仕様を一律にしていた範囲でも、本来はかなり転圧回数を変化させる必要があることを示唆している。

以上のように、本手法を用いれば所要変形係数に合わせて路床を一定の品質に上げることができ、また仕上がり後の路床剛性のデータを面的かつ大量に取得できる。これによって、より合理的な舗装構造設計が行えるとともに、舗装の維持・補修管理の効率化にも貢献することができよう。特に近年、道路盛土では性能設計体系の導入が検討されており、将来的には施工者自らが供用期間内の道路機能を保証する責任施工体制の導入も予想される。この場合、施工完了後の不具合発生は事実上許されないため、施工段階において高品質な路床を造り込み、かつ信頼性の高い手法で品質を把握して供用期間中の機能を保証する必要がある。無論、舗装の供用性は路床剛性のみで決まるものではなく、舗装体の品質、交通荷重条件、環境条件など、様々な因子に影響されて非常に複雑であり、供用性の経年変化を精度良く予測するための解析手法の開発が別途待たれるが、少なくとも現行の密度を主体とした離散・事後確認による路床施工管理方法では、来るべき性能設計体系に対応できないことは明白であろう。このような状況に対し、ローラ加速度応答法による剛性評価手法は、単に現場品質管理試験の省力化にとどまらず、新しい時代の要請に応え得る施工管理手法となり得ることを強調しておきたい。

5. おわりに

本論文では、“面”としての変形抵抗性の評価が重要な道路路床の締固め施工管理の合理化を目的に、ローラ加速度応答法による地盤剛性評価手法の適用性について検討を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- ① 提案手法は路床材を含む任意の材料および転圧機種に対して地盤剛性を一意的に評価でき、路床の施工

管理手法として適用できる

- ② ローラ加速度による推定変形係数 E_{acc} と実測変形係数の関係は各測定手法により異なり、およそ $E_{acc} \approx E_{me} \approx 4E_h \approx -60 \cdot \log(1 - E_{vd}/90)$ の関係にある
- ③ 仕上がり後の高速道路路床（延長200m分）の変形係数を推定した結果、 $E=28 \sim 67(\text{MN/m}^2)$ ($\text{CBR}=18 \sim 43(\%)$) と推定され、同一施工仕様で構築された路床でも実際は相当の不均一性が生じている
- ④ 現行設計法（ $\text{CBR}-T_d$ 法）をもとに実路床の供用可能年数を試算すると最小8年から最大42年となり、路床剛性の不均一性が非効率な舗装の維持補修をもたらしている可能性がある
- ⑤ 剛性一定に路床を構築するためには、本来はかなりフレキシブルに転圧回数を制御する必要がある
- ⑥ 施工段階にて路床を一定剛性に造り込み、施工後品質データを精度良く取得可能な提案手法は、将来の責任施工体制に対応した有力な路床施工管理手法となり得る

本手法は、地盤支持力が要求品質となり、また現実的に責任施工体制になりつつある宅地造成盛土に対しても適用性が高いと考える。今後、検討を進めていきたい。

謝辞：本論文をまとめるにあたり、JII 静岡建設局横田課長からは貴重なご意見を頂戴し、また現場実験に際しては、中部支店岡部トンネル作業所、掛川トンネル作業所の関係各位に多大なるご協力を頂きました。末筆ながら謝意を表します。

参考文献

- 1) 嶋津晃臣, 見波 深, 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, 石黒 健: 振動ローラの加速度応答を利用した粗粒材料の現場締固め管理について, 土と基礎 No.507, pp.17～20, 2000.
- 3) 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.
- 4) 吉井幸雄, 小川 保, 竹内友幸, 延山政之, 金子義信: 簡易な載荷試験法の一つの試み, 第18回土質工学会年次学術講演会概要集, pp.61～64, 1983.
- 5) 石黒 健: 飽和砂地盤の振動締固め特性と液状化対策に関する研究, 京都大学学位論文, pp.39～74, 1994.
- 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(投稿中)。
- 7) 土質工学会: 土質工学ハンドブック, pp.854～857, 1982.
- 8) 日本道路協会: アスファルト舗装要綱, pp.224～259, 1992.
- 9) 日本道路公団: 設計要領第一集(舗装編), pp.4～14, 1999.
- 10) 日本道路公団試験研究所: 試験所報告昭和32～38年度 土工 名神高速道路編, pp.2-382～2-283, 1964.