

路盤施工における品質管理方法の高度化に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：令3～令3

担当チーム：先端技術チーム

寒地地盤チーム

研究担当者：森川博邦、橋本 毅、山田 充
林 宏親、佐藤厚子、樋口侯太郎

【要旨】

少子化、人口減少が急速に進行している中、社会資本整備を支える現場の担い手・技能人材不足が懸念されており、道路などの社会資本整備における施工時の生産性向上が急務となっている。解決方法の一つとして様々な ICT の活用により建設生産システム全体の生産性向上を図ることが求められている。本研究では、品質管理を効率化できる ICT 技術として加速度応答システムと衝撃加速度測定装置を取り上げ、道路路盤工における品質管理を効率的に行なう手法などの提案を行うものである。

R3 年度においては、実施工現場に加速度応答システムを適用した場合の課題点の把握や、衝撃加速度試験装置と CBR 試験との関係について明らかにすることができた。

しかし、近年の ICT 技術の目覚ましい発達により、施工現場における施工中の工程データを上記2種類以外の様々な手法により多点的に取得可能となっているため、それらも活用し、路盤工のみではなく他工種における生産性向上手法の開発を行うべく、本研究を中止し主要研究へと格上げを行うこととなった。

キーワード：品質管理、生産性向上、加速度応答システム、衝撃加速度測定装置、路盤工

1. はじめに

少子化、人口減少が急速に進行している中、社会資本整備を支える現場の担い手・技能人材不足が懸念されており、道路などの社会資本整備における施工時の生産性向上が急務となっている。解決方法の一つとして「インフラ分野の DX」や「i-Construction」などの施策を推進し、様々な ICT の活用による建設生産システム全体の生産性向上を図ることが求められている。

振動式締固め機械に搭載される「加速度応答システム」は、道路路盤工における締固め状況を施工と同時に面的に取得できるシステムのため、効率的な品質管理やデータを活用することによる供用後の点検や補修の効率化を実現するシステムとして期待されている。

また、路体、路床、改良路体の締固めについて、北海道開発局では衝撃加速度測定装置を用いた品質管理方法を品質管理基準の一つとして定めている。この方法を路盤工へ適用拡大し、路盤の締固めについても品質管理が可能となれば、迅速、簡易、安価で実用的な品質管理方法の提案が可能となる。

本研究では、品質管理を効率化できる ICT 技術として加速度応答システムと衝撃加速度測定装置を取り上げ、道路路盤工における品質管理を効率的に行なう

ために必要な管理手法などの提案を行う。

2. 加速度応答システムを活用した道路路盤工品質管理手法の提案

2.1 加速度応答システムの概要

加速度応答システムとは、振動式締固め機械の振動挙動が、接する地盤の固さ（地盤剛性）の影響を受けることを利用し、振動式締固め機の振動部に加速度計を取り付け、その信号から地盤剛性を推定するシステムのことである（図-1）。このシステムは 1980 年代頃から研究が開始されており^{1~4)}、これまで各メーカーなどにおいて開発、実用化がなされてきている^{5~7)}。加

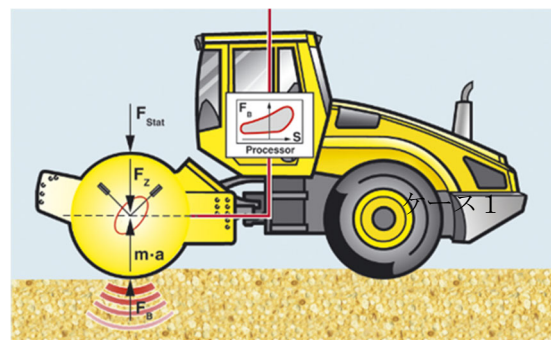


図-1 加速度応答システム

速度応答システムの計測原理には、現在世界で主に表-1に示すようなものがあり⁸⁾、それぞれのシステムから出力される値も各システム固有な値となっている。

前重点研究「路床及び路体の締固め状態を考慮した道路舗装の設計・施工に関する研究(平29~令2)」において、特に道路路盤工では、現行の締固め品質管理基準である路盤の密度と加速度応答システム出力値(以下加速度応答値)に高い相関があり、締固め品質管理に適用できる可能性があることが明らかになっている⁹⁾。本重点研究では、実際の品質管理の手法を提案するための検討を行うこととしている。R3年度は、実際の施工現場で加速度応答を使用し、データ収集した際に発生した課題点の整理を行った。

2.2 実施現場における課題点

R3年度は、国土交通省 ICT 導入協議会基準 WG が行った現場試行(図-2)において、実現場にて加速度応答システムを活用した際の課題点を整理した。整理の結果2点が課題点として挙げられた。以下、その概要と考えられる原因、対策等について述べる。

2.2.1 密度との相関が悪い

実施現場にて加速度応答システムを活用した結果、従来の品質管理基準である密度との相関が想定していたものより低いことが判明した。

前重点研究にて得られた相関係数：0.9程度

今回実施現場で得られた相関係数：0.6~0.8程度

(前重点研究のデータは土工実験施設土工ピットで行った実験データである。)

この原因としては、路盤の下層である路床の影響を計測していることが考えられる。すなわち、土工ピットでの実験では、路床まで精緻に構築しているため、その影響は計測されなかったが、実際の路床面には多少のばらつきがあり、その影響を計測してしまった可能性がある。

対策としては、まず実施現場における路床のばらつきを把握することと、土木学会振動締固めに関する研究WGが提唱している2層地盤への裁荷状態を表した式¹⁰⁾(図-3)による下層の影響除去を行うことが考えられる。今後は本計算式の検証実験を行い、式の整合性検証を行いたい。

2.2.2 相関確認試験に手間がかかる

現場試行で行った手順では、加速度応答値の基準値を決定するための相関試験を、本施工に使用する締固

め機械・材料を用いて現場毎に実施することになっており、これは今後品質管理要領化された時も実施される予定である。しかしながら本相関試験は非常に複雑で手間がかかるものであり、簡略できれば現場での生産性は大きく向上されると予想される。

表-1 加速度応答計測原理種類⁸⁾

ローラメーカー	締固め測定(基本式)	振動自動制御
Ammann	$k_s = 4\pi^2 f^2 \left(m_d + \frac{m \sigma r \cos(\phi)}{A} \right)$	振幅と振動数の調整
Bomag	$Z_d = \frac{(1-u^2) \cdot F_s}{E_{vib} \cdot L} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \left(1.8864 + \ln \frac{L}{B} \right)$ where, $B = \sqrt{\frac{16 \cdot R \cdot (1-u^2) \cdot F_s}{\pi \cdot E_{vib} \cdot L}}$	振動力の方向調整
Caterpillar	Geodynamik CMV = $C \cdot \frac{(A2\Omega)}{A\Omega}$ Geodynamik RMV = $\frac{A0.5\Omega}{A\Omega}$ MDP = $P_g - WV \left(\sin \alpha + \frac{a}{g} \right) - (mV + b)$	RMVに基づく振幅調整
Dynapac	Geodynamik CMV = $C \cdot \frac{(A2\Omega)}{A\Omega}$ Bouncing Value = $\frac{A0.5\Omega}{A\Omega}$	Bouncing Valueに基づく振幅調整
Sakai	CCV = $\left[\frac{A0.5\Omega + A\Omega + A1.5\Omega + A2\Omega + A2.5\Omega + A3\Omega}{A0.5\Omega + A\Omega} \right] \times 100$	なし



図-2 現場試行の状況

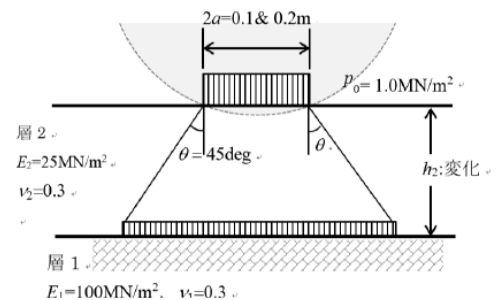


図-4.1.11 2層地盤への裁荷のシミュレーション。

$$E = \frac{4\alpha p_0 E_1 E_2 (1-\nu^2) A}{4\alpha' p_1 E_2 (1-\nu^2) A' + \pi E_1 (p_0 + p_1) h_2}$$

E_1 : E_{roller} (α システム)
 E_2 : 1層下の E_{roller}

E_2 を計算してDB保存。
 次層の E_1 として用いる

図-3 2層地盤への裁荷状態を表した式¹⁰⁾

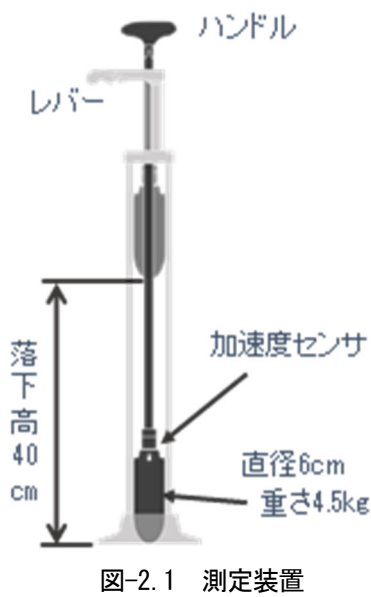
実際欧州における加速度応答システムを用いた品質管理要領では、このような関連確認試験を行わない手法も存在する¹¹⁾。今後は、そのような手法の調査とともに、日本国内への適用について検討を行いたい。

3. 衝撃加速度測定装置を活用した道路路盤工品質管理手法の提案

本項では、砂置換と同程度の測定精度を担保しつつより迅速に盛土の品質管理を行うことが可能な測定装置である、国土交通省北海道開発局が開発した、衝撃加速度測定装置を用い、路盤の締固めへの適用について検討を行った。

3.1 衝撃加速度を用いた品質管理

本項で表記する衝撃加速度とは、物体を地面に自由落下させたとき、地面に衝突してから静止するまでに物体に働く負の加速度である。支持力が小さく軟弱な地盤では、物体が衝突してから静止するまでの時間が長く衝撃加速度は小さくなり、支持力が大きく強固な地盤では、物体が衝突してから静止するまでの時間が



短く衝撃加速度は大きくなる。衝撃加速度による品質管理手法はこの特徴を利用したものであり、あらかじめ室内試験において現場の基準である締固め度に対応する衝撃加速度を求め現場で測定した衝撃加速度と比較することにより品質管

理するものである¹²⁾。寒地土木研究所では、軽量で簡易、迅速に衝撃加速度を測定できる測定装置(図-2.1)を開発した。この測定装置は高さ40cmから重さ4.5kgの重錘(以降ランマと称する)を自由落下させることにより、衝撃加速度を測定し、そのデータから密度や一軸圧縮強さを推定できる。この方法は、北海道開発局の盛土の品質管理手法の一つとして実際の現場に適用されている¹²⁾。

3.2 これまでの研究で明らかになった課題

既往の研究^{13)~15)}より、衝撃加速度を用いた路盤材料(礫質土)に対する室内及び現場試験の結果は、図-2.2に示すように乾燥密度と衝撃加速度に相関関係は認められるものの、同等の乾燥密度における衝撃加速度は現場の方が小さかった¹³⁾。当初、この問題は測定値のバラつきに起因すると考え、測定装置に衝突板を装着する改良をした結果、バラつきは軽減したが、本質的な問題の解消には至らなかった^{14), 15)}。そこで本研究では、路盤の密度管理がCBRによる強度管理の代替であることに着目し、CBRと衝撃加速度の関係について検証を行った。

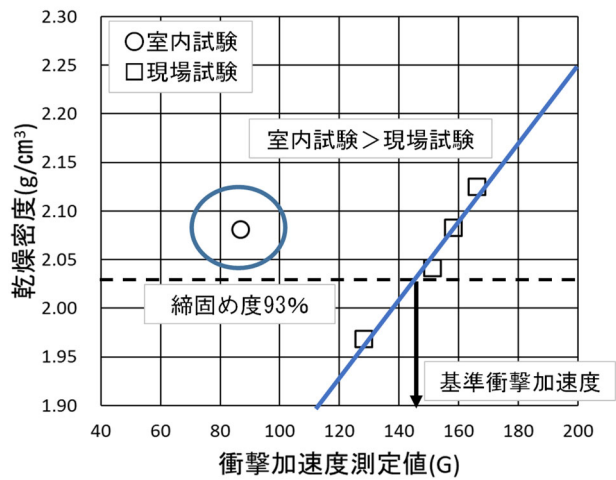


図-2.2 現場と室内の関係²⁾

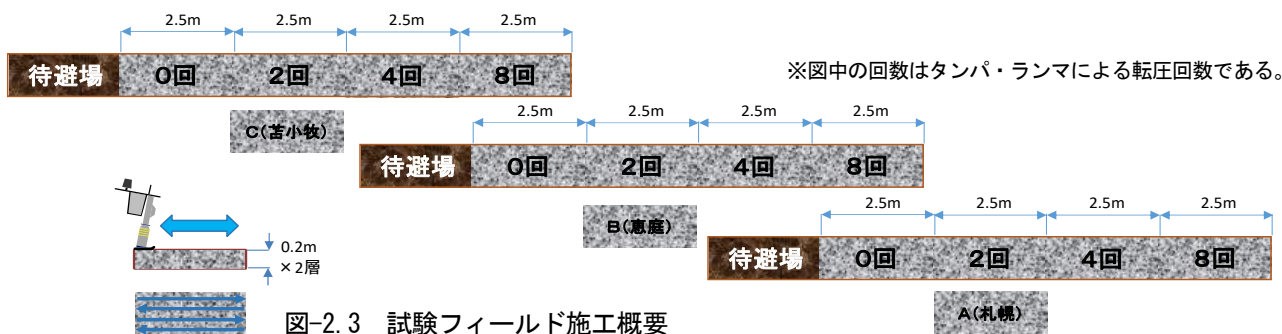


図-2.3 試験フィールド施工概要

理するものである¹²⁾。寒地土木研究所では、軽量で簡

3.3 CBR 試験と衝撃加速度の関係

3.3.1 試験方法

CBR と衝撃加速度の関係を確認する方法として、苫小牧施工試験フィールド内に図-2.3 のように試験施工を行い、CBR (JIS A 1211)、衝撃加速度¹²⁾、乾燥密度 (JIS A 1214) を測定し、それぞれの関係を確認した。試験施工は幅1.0m 延長10.0m 深さ0.4m を掘削し、仕上がり厚さを各0.2m で2層となるよう埋め戻し、敷均し、転圧を行った。転圧はタンパ・ランマを用い転圧回数を延長2.5m 毎に0回、2回、4回、8回と変えて施工した。本項で表記している転圧は、図-2.3 に示すとおりタンパ・ランマを用いて無理のない速度で、かつ転圧部分が重ならないように施工することであり、転圧回数1回は施工範囲を1回転圧したことを示す。使用した路盤材は、札幌市、恵庭市及び苫小牧市で購入した3種類とした。基本物性値を表-2.1、粒径加積

表-2.1 基本物性値

購入場所	札幌市	恵庭市	苫小牧市	
施工区分	路盤	路盤	路盤	
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.748	2.776	2.771	
自然含水比 w_n (%)	9.44	7.31	5.67	
粒度特性	2mm以上 (%)	78.1	85.5	60.4
	2mmから75 μ m (%)	14.5	7.1	37.4
	75 μ m未満 (%)	7.4	5.4	2.5
コンスタン限界	N. P.	N. P.	N. P.	
地盤材料の分類記号	G-FS	G-FS	GS	
最適含水 w_{opt} (%)	7.6	7.1	6.4	
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	2.011	2.100	2.202	
平均粒径 D_{50} (mm)	12.0	20.0	5.5	
均等係数 U_e	83	44	61	

※突固め試験はE-b法による。

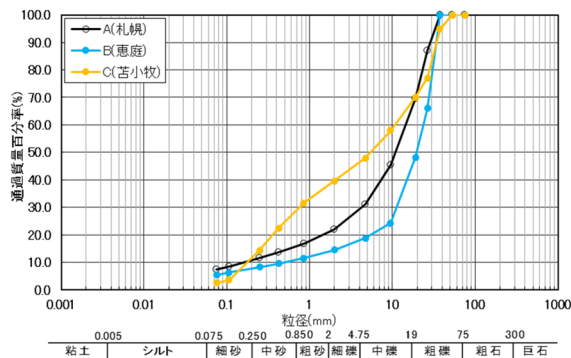


図-2.4 粒径加積曲線

曲線を図-2.4 に示す。

3.3.2 試験結果および考察

CBR、衝撃加速度及び乾燥密度は、転圧回数の増加に伴い測定値が増加することを確認した。図-2.5 より、CBR 及び乾燥密度と衝撃加速度の関係を確認したところ、それぞれ相関係数が0.79~1.0という強い相関を示した。また、CBR と衝撃加速度は材料の違いに関係無く同じ比例関係にあり、相関係数0.94と強い相関を示した。乾燥密度と衝撃加速度は材料ごとに強い相関を示した。路盤材において、現場で転圧回数を変えな

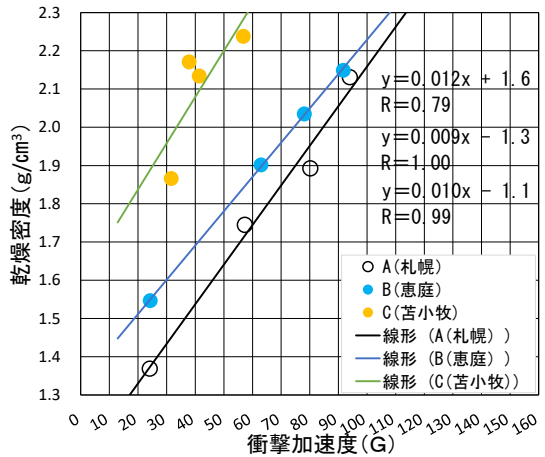
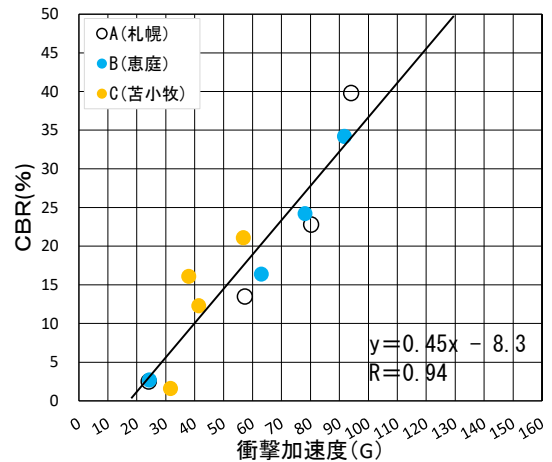


図-2.5 衝撃加速度と各測定値



写真-2.1 試験状況

がら試験施工を行い、衝撃加速度、CBR、乾燥密度を測定した結果、衝撃加速度により CBR または、乾燥密度の推定が可能と示唆された。このことから路盤の衝撃加速度を用いた品質管理は、現場の転圧試験にて転圧回数毎の衝撃加速度、CBR（乾燥密度）を測定し解析することで可能になるのではないかと推測される。今後、室内試験での衝撃加速度と CBR の関係を確認することで、現在の密度による品質管理同様、衝撃加速度による品質管理可能か検証を行う。また、路盤材の違いによる差が少ないことから、今後試料数を増やし解析を行い、下層路盤の目標値である CBR30%以上¹⁶⁾における衝撃加速度の測定値が回帰分析における予測区間の範囲内であれば、試験施工なしの路盤の品質管理手法の一つとなり得る可能性が示唆された。

3.4 衝撃加速度測定値のバラつき低減について

3.3 で述べた CBR と衝撃加速度に関する検討では、衝撃加速度測定値のバラつきは顕著ではなかった。しかし、既往研究^{14)、15)}において、路盤材を測定した一部の事例では、衝撃加速度測定値にバラつきが顕著に表

れ、その対策として衝突板（図-2.6）の使用が、検討されている。既往研究^{14)、15)}より、衝突板を使用することで測定値のバラつきを軽減することが可能となったが、試験を重ねた結果、衝突板が2~3 cm程度飛び出して戻らない不具合が生じた（写真-2.2）。

この不具合の原因は、衝突板の位置決めで使用しているネオプレンゴムが、劣化または弾性限界以上に伸び戻らなくなったと考える。そこでこの不具合を解消するために、ランマ本体に衝突板と同様の機能を持たせた改良型ランマ（図-2.6）を考案、製作し、衝突板の使用時と同じく測定値のバラつきが軽減可能か検証することとした。試験方法は、改良型ランマを装着した衝撃加速度測定装置を用い 3.3.1 と同じ試験フィールドにて、1箇所ごとに10点測定し、バラつきの指標である変動係数を10点の標準偏差と平均から算出した。

改良ありランマと改良なしランマによるバラつきについて1箇所ごとの測定値に対する変動係数を図-2.7に示す。図-2.7より、改良なしランマに比べ、改良ありランマを使用した場合、変動係数の振れ幅が、改良

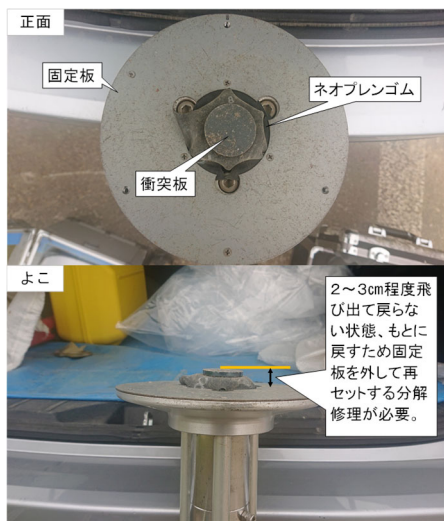


写真-2.2 衝突板の不具合

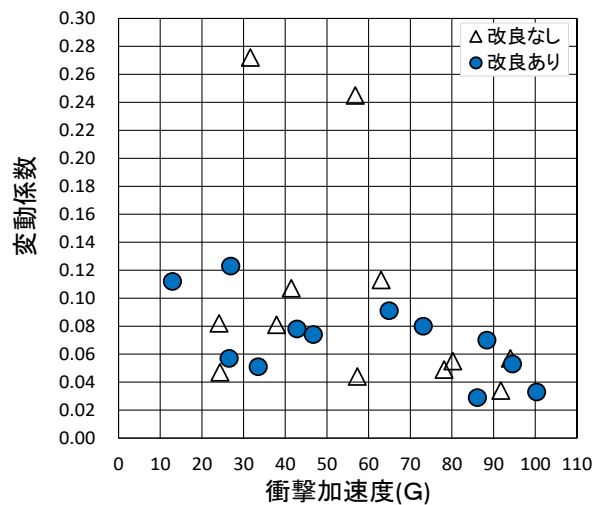


図-2.7 測定値のバラつき

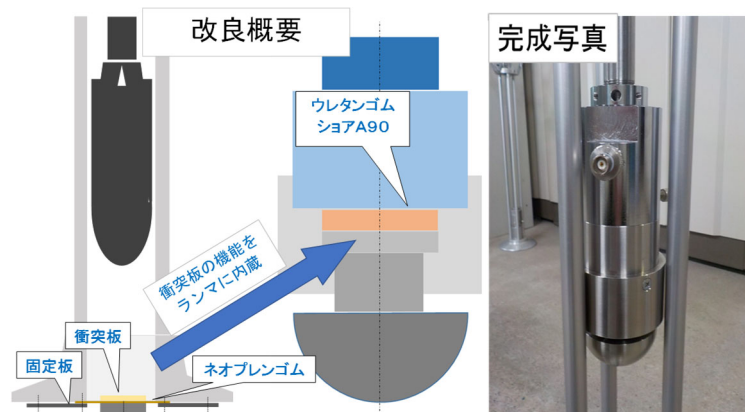


図-2.6 改良型ランマ概要

なしランマに比べ6割程度減少した。これは過年度の研究成果¹⁵⁾と同程度の軽減効果である。このことから、改良型ランマを用いることにより、衝突板を用いた測定と同様にバラつきを軽減することを可能とし、かつ原因であったネオプレンゴムを必要としない構造にしたので、不具合について解消することが可能となった。今後、路盤材の品質管理における衝撃加速度の適用について検討を進める予定であるが、その中で測定値のバラつきに起因する課題が生じた場合、この改良型ランマを使用することで解消可能と考える。

3.5 衝撃加速度測定装置を活用した道路路盤工品質管理手法の提案まとめ

本研究では、以下のことがわかった。

- ・路盤の締固めについて、衝撃加速度と CBR 及び乾燥密度には強い相関があることを確認した。
- ・現場における試験施工で、転圧回数を変えながら、衝撃加速度、CBR 及び乾燥密度を測定することで、本施工時に衝撃加速度により、CBR 及び乾燥密度の推定が可能である。
- ・CBR と衝撃加速度の相関関係では、路盤材の違いによる差が少ないので、下層路盤の目標値である CBR30%以上¹⁶⁾における衝撃加速度が推定可能となり、試験施工なしの路盤の品質管理手法の一つとなり得る可能性が示唆された。
- ・改良型ランマは、路盤の測定において、衝突板を用いた測定と同様にバラつきを軽減可能とした。

今後は、解析結果をもとに路盤の品質管理手法の提案に向けて検討を行う。

4. 今後の対応について

本重点研究は、加速度応答システムおよび衝撃加速度測定装置の活用による路盤工品質管理方法の高度化を研究するものであり、R3 年度から開始し R3 年度では上述の成果が得られた。しかし、近年の ICT 技術の目覚ましい発達により、施工現場において施工中の工程データを上記2種類以外の様々な手法により多点的に取得可能となっているため、それらも活用し、路盤工のみではなく他工種における生産性向上手法の開発を行うべく、本研究を中止し主要研究へと格上げを行うこととなった。今後は主要研究として継続して研究を行う計画である。

参考文献

1) Thumer, H., Sandstrom, A.: A New Device for Instant

Compaction Control, *Proceedings International Conference on Compaction*, vol.2, pp.611-614, 1980.

2) Floss, R., Gruber, N. and Obermayer, J.: A Dynamical Test Method for Continuous Compaction Control, *Proceedings of the 8th European Conference on Soil and Foundation Engineering*, vol.1, pp.25-30, 1983.

3) 建山和由, 中島聡, 藤山哲雄: 振動式締固め機械の振動特性を利用した地盤の締固め度の評価手法について, 土木学会論文集, No.487/III-26, pp.237-245, 1994.

4) Kröber, W., Floss, R. and Wallrath, W.: Dynamic soil stiffness as quality criterion for soil compaction, *Geotechnics for Roads, Rail Tracks and Earth Structures*, A. A. Balkema Publishers, pp.189-199, 2001.

5) 橋本毅: 最新の振動ローラについて=高効率・高品質な施工を実現する新技術について=, 建設機械, Vol.43, No.12, pp.47-52, 2007.

6) 小葉はるな, 眞壁淳, 上野健司: 情報化施工における転圧管理システム CIS の適用事例について, 建設施工と建設機械シンポジウム論文集, pp.139-142, 2009.

7) 古屋弘, 藤山哲雄: 振動ローラ加速度応答法による地盤剛性評価装置「 α システム」, 建設機械, Vol.47, No.7, pp.48-54, 2011.

8) 月本行則: 米国における盛土の締固め管理, 基礎工, Vol.37, No.7, pp.64-70, 2009.

9) 橋本毅, 山田充, 山内元貴: 振動ローラ加速度応答システムの路盤材料への適用性検討について, 第74回土木学会年次学術講演会, VI-380, 2019.

10) 土木学会振動締固めに関する研究 WG: WG 成果報告書, 2022.

11) ZTVE-StB94/97: German Regulation, 1994/1997.

12) 北海道開発局: 道路・河川工事仕様書, 2021.

13) 久慈直之, 林憲裕, 佐藤厚子: 衝撃加速度を用いた路盤の品質管理方法の検討について, 第52回地盤工学研究発表会, pp.1093-1094, 2017.

14) 樋口侯太郎, 林宏親, 佐藤厚子: 衝撃加速度を用いた路盤の品質管理における課題の検討, 第55回地盤工学研究発表会 pp.21-5-4-01, 2020.

15) 樋口侯太郎, 畠山乃, 佐藤厚子: 衝撃加速度を用いた路盤の品質管理に係る検討, 寒地土木研究所月報 No.809, p.18-24, 2020.

16) 北海道開発局: 道路設計要領, 2020.

RESEARCH ON THE SOPHISTICATION OF QUALITY CONTROL METHODS IN ROAD BASE CONSTRUCTION

Research Period: FY2021-2021

Research Team: Advanced technology Research
Team, Construction Technology
Research Department
Geotechnical Research Team,
Cold-Region Construction
Engineering Research Group

Author: MORIKAWA Hirokuni,
HASHIMOTO Takeshi,
YAMADA Mitsuru,
HAYASHI Hirochika,
SATOH Atsuko,
HIGUCHI Kotaro

Abstract: With the declining birthrate and declining population, there are concerns about a shortage of on-site leaders and skilled human resources to support social capital development, and there is an urgent need to improve productivity when constructing social capital development such as roads. As one of the solutions, it is required to improve the productivity of the entire construction production system by utilizing various ICTs. In this research, we take up an acceleration response system and an impact acceleration measuring device as ICT technologies that can improve the efficiency of quality control, and propose management methods necessary for efficient quality control in road base construction.

In FY2021, we were able to understand the problems when applying the acceleration response system to the construction site and clarify the relationship between the impact acceleration test equipment and the CBR test.

However, due to the remarkable development of ICT technology in recent years, it has become possible to acquire process data during construction at a construction site from multiple points by various methods other than the above two types. In order to develop a productivity improvement method for other types of work, this research was canceled and upgraded to the main research.

Keywords: Quality control, Productivity improvement, Acceleration response system, Impact acceleration measuring device, Road base construction