

米国における舗装の締固め管理技術の動向と ICT 技術の活用

月 本 行 則

米国連邦道路庁は土工および舗装工における締固めの情報化施工の普及を狙いインテリジェントコンパクション (Intelligent Compaction: IC) と称する国家的な試験プロジェクトを推進中である。土の締固めを対象とする第一次 IC プロジェクトの完了後、主にアスファルト舗装を対象とする第二次 IC プロジェクトが始まり、各州運輸局への普及活動、発注仕様書案の策定、およびデータ形式等の整備が進められている。本章では、プロジェクトの実施方法、IC の普及活動、第一次 IC プロジェクトの成果、ローラ加速度応答法と IC システム、第二次 IC プロジェクトの注目結果、情報化施工の普及促進策を報告する。

キーワード：インテリジェントコンパクション、IC、締固め管理、ローラ加速度応答法、CCV

1. はじめに

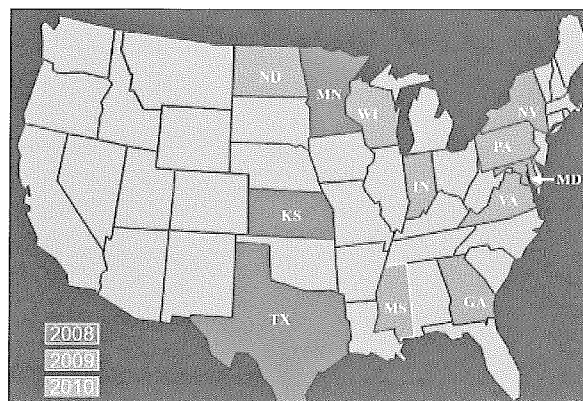
米国連邦道路庁（以降 FHWA と称す）は 2002 年に実施した IC ローラに関する欧州調査¹⁾以降、インテリジェントコンパクション（以降 IC と称す）の試験研究を開始した。路床等の土の締固めを対象とする第一次 IC プロジェクトは 2005 年～2008 年に 12 州で実施された。また 2006 年には戦略的 IC 計画²⁾が発表され、主にアスファルト舗装を対象とする第二次 IC プロジェクト³⁾（2007 年～2010 年、12 州で試験施工とデモンストレーション）が始まった。試験施工ではローラ加速度応答法による地盤剛性との相対値、転圧回数、および転圧路面温度等の情報と GPS 測量によるローラ位置とを整合し、表示・記録・分析するシステムを搭載したインテリジェントローラ（以降 IC ローラと称す）を使って舗装の締固め品質と作業効率の向上、および新たな品質管理と品質保証の検討に必要な情報が収集されている。また、IC 試験施工と併設される講習会を通じて、各州運輸局（以降 DOT と称す）技術者への IC 技術の教育、IC 工事発注仕様書作成用の基礎データの収集、管理用データ形式の標準化、および IC 技術の改良等が推進されている。

SHARP-2 計画⁴⁾によると、施工会社が舗装の性能と品質を保証する工事発注方式への移行が検討されている。長期的に IC 技術は、舗装施工会社には施工と品質の管理用の支援ツールとして、一方、発注側には、施工管理、出来形と品質の検査、および維持管理に関する新たな合理化手段として期待されている。

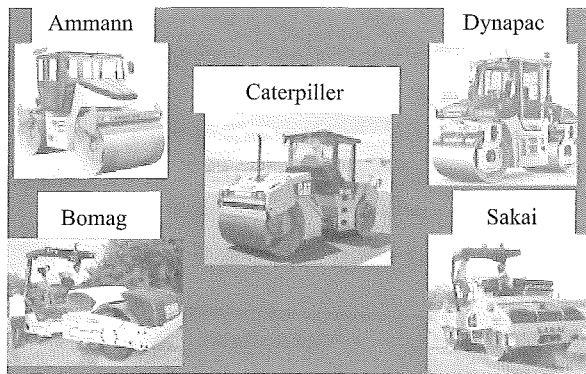
本章ではアスファルト舗装を主に対象とする第二次 IC プロジェクトの進捗、普及活動、および注目すべき試験結果等を報告する。

2. プロジェクトの実施方法

IC プロジェクトは FHWA と各州 DOT の持合い研究予算 (Transportation Pooled Fund: TPF) によって運営されている。組織は FHWA 直下に 2 人の舗装専門家、アイオワ州立大 White 教授、コンサル会社（試験と講習会の準備と実施、報告書の作成、Website³⁾の管理等）、各州の DOT（但し、ロッキー山脈から西側の州は不参加、図—1）、およびローラメーカー 5 社（図—2）から構成されている。ローラメーカーは、数社が各試験施工に適時参加している。



図—1 第二次 IC プロジェクト参加 12 州

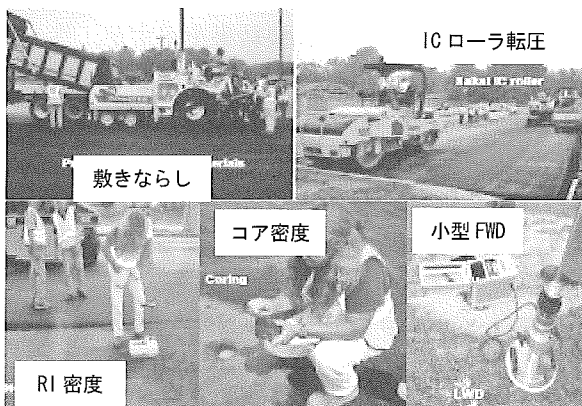


図ー2 IC プロジェクト参加ローラメーカー5社

3. 普及活動

(1) 各州試験施工とデモンストレーション

IC 試験前には現地 DOT の道路建設と管理関係者への試験内容の説明会が実施され、試験施工立会い(写真一1)、機材見学、および結果報告会が開催される。試験は各州 DOT の発注工事現場で行われる。各種品質管理機器(RI, FWD, 小型 FWD, 剛性測定器等)による測定は現地 DOT が担当し、IC ローラと GPS 等の測機は各メーカーが提供する。



写真一1 試験施工と管理機器による測定

表一1に過去2年間に実施された第二次ICプロジェクトの概要を示す。なお、土工中心の第一次ICプロジェクトとの差別化を図るため、適用対象はアスファルト舗装が原則であるが、各州 DOT は5種類の材料(路床用の非粘性土と粘性土、碎石路盤、加熱アスファルト舗装材料、安定処理路床材料)から選択してよい。例えば、テキサス、カンサス、ニューヨークの各州では、土工用 IC ローラが路床に適用された。

(2) IC ワークショップ

アイオワ州立大学の White 教授とアイオワ州 DOT が主催して毎年 IC ワークショップが開催される。こ

表一1 各州において過去2年間に実施された試験概要(第二次)

年度	実施州		供試ICローラ		土工				
	名称	略号	メーカー	機種	路床	路盤	基層	中間	表層
'08	ミネソタ	MN	Sakai	SW880	—	○	○	—	○
	テキサス	TX	Ammann	SV212	○	—	—	—	—
			Dynapac	CA362	○	—	—	—	—
	カンサス	KS	CAT	CP56	○	—	—	—	—
'09			Sakai	SV610T/TF	○	—	—	—	—
			CAT	CS-683E	○	○	—	—	—
	ニューヨーク	NY	Bomag	BW213D-4BVD	○	○	—	—	—
			Sakai	SW880	—	—	○	—	—
			Ammann	SV212	—	○	—	—	—
	ミシシッピ	MS	CAT	CS-683E	—	○	—	—	—
			Sakai	SW880	—	○	○	—	—
	メリーランド	MD	Bomag	BW278AD-4	—	—	—	—	○
			Sakai	SW880	—	—	—	—	○
	ジョージア	GA	Sakai	SW880	—	—	○	○	○
インディアナ	IN		Bomag	BW278AD-4	—	—	—	○	○
			Sakai	SW880	—	—	—	○	○

こでは一連の IC 技術講演とグループ毎の討議(例えば、IC の普及方法、教育、IC の技術課題等)を通じて同州 DOT エンジニアへの IC の教育・啓蒙が図られている。

(3) TRB 会議における IC セッション

FHWA が主催する道路、港湾、空港等の運輸施設・構造物に関する TRB (Transportation Research Board) 会議では、FHWA と各州 DOT 関係者、および大学教授らの発表が行われる。2010 年も IC の特別セッション¹⁾が行われた。

4. 第一次 IC プロジェクトの成果

第一次 IC プロジェクト (NCHRP 21-09)⁵⁾ は 2005 年にミネソタ州で開始された。目的は IC ローラの土の締固め管理への適用性およびローラ加速度応答法と従来の品質管理値との比較検討^{6, 7)}であった。研究成果の概要は FHWA が 2006 年に発表した戦略的 IC 計画書²⁾において次のように明記されている。

- ①従来の密度法は有用であるが、測定時間が長く、舗装設計に必要な地盤剛性を測定できないので変更すべきである。
- ②地盤剛性を測定可能な IC ローラと現場測定機器が利用可能になった。
- ③GPS と GIS により全数サンプリング、データの記録、および帳票化が可能になった。

また、IC の利点については、次のように報告された。

- ①転圧作業の改善(無駄な転圧回数の低減)
- ②締固め品質の改善(より高く、均一な密度)
- ③新しい舗装設計法とリンクする地盤剛性の測定

- ④施工者と発注者へ施工情報をリアルタイムで提供
⑤締固め不足箇所の特定

なお、IC ローラの定義として次の機能が明記された。

- ①地盤剛性等の測定機能
②締固め度合に応じた振動自動制御機能
③GPS を使った転圧データ収集分析機能

5. ローラ加速度応答法と IC システム

上記に定義された IC ローラの地盤剛性等の測定機能と振動自動制御装置の概要について以下に示す。

地盤剛性等の測定法にはローラ加速度応答法が多用されている。これは振動輪の振動加速度が地盤の剛性や密度等の力学特性に応じて変化する性質を利用して、締固めを判定する方法である。1980 年頃、コンパクションメータ⁸⁾(表—2⁹⁾の CMV に該当)が開発されて以来、同法の研究開発が進み、CMV 式の改良式を初め、剛性 (kN/m) または変形係数 (MN/m²) 等の単位を与える基本式が開発されてきた (表—2)。ここではこれらの相対値を「ローラ剛性値」と称する。

表—2 各社のローラ剛性値の基本式と振動自動制御方式の概要⁹⁾

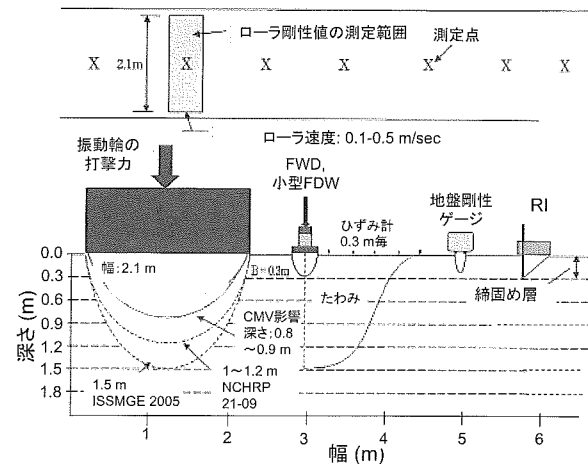
ローラメーカー	締固め測定 (基本式)	振動自動制御
Ammann	$k_s = 4\pi^2 f^2 \left(m_d + \frac{m_{ref} \cos(\phi)}{A} \right)$	振幅と振動数の調整
Bomag	$Z_d = \frac{(1-u^2)}{E_{vib}} \cdot \frac{F_s}{L} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \left(1.8864 + \ln \frac{L}{B} \right)$ where, $B = \sqrt{\frac{16}{\pi} \cdot \frac{R(1-u^2)}{E_{vib}} \cdot \frac{F_s}{L}}$	振動力の垂直・水平成分調整
Caterpillar	Geodynamik CMV = $C \left(\frac{A_2 \Omega}{A \Omega} \right)$ Geodynamik RMV = $\frac{A_0.5 \Omega}{A \Omega}$ 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 = $C \left(\frac{A_2 \Omega}{A \Omega} \right)$ Bouncing Value = $\frac{A_0.5 \Omega}{A \Omega}$	Bouncing Value に基づく振幅調整
Sakai	$CCV = \left[\frac{A_0.5 \Omega + A_1 \Omega + A_2 \Omega + A_3 \Omega}{A_0.5 \Omega + A \Omega} \right] \times 100$	なし

ローラ剛性値を利用した振動自動制御装置も開発されている。例えば、Ammann 社は Ks (剛性) で振幅と振動数の自動制御式¹⁰⁾、Bomag 社は E_{vib} (変形係数) で振動力の垂直・水平成分制御式¹¹⁾、Caterpillar 社は CMV で振幅制御式¹²⁾、Dynapac 社は CMV による振幅制御式¹³⁾、Sakai 社 (酒井重工業株) は CCV (CMV 改良式)^{14, 15)} で自動制御なしである。

ローラ加速度応答法によって、リアルタイムかつ面的な締固め管理¹⁶⁾が可能になったので、品質管理の

精度は飛躍的に向上し、締固め不足箇所の特定制も容易になった。現在では欧州各国で締固め品質管理法の一つとして採用されている (本誌第 4 章参照)。

ローラ加速度応答法の最大影響 (測定) 深さは、図—3 に示すように約 0.8 ~ 0.9 m¹⁷⁾ なので、表層のアスファルト混合物層から路床までの舗装全体の力学特性と舗装構造の健全性を評価する上でも有効である。



図—3 振動ローラおよび従来測定器の測定深さ¹⁷⁾

6. 第二次 IC プロジェクトの注目結果

以下にプロジェクトの概要結果を示すが、併せて、Website³⁾の“Demo Projects”でダウンロードできるので参照されたい。なお、ここで紹介する供試 IC ローラは全て Sakai 社の SW880 (12t タンデム振動ローラ, CIS¹⁸⁾を搭載)である。アスファルト舗装に適用された IC ローラ (表—1 参照) は 2 社であるが、他機のデータ取得等に不都合があったためである。

(1) ミネソタ州プロジェクト (2008 年)

2008 年にミネソタ州で路盤 (下層) とアスファルト舗装 (上層) でローラ剛性値 (CCV) が測定された (写真—2)。上下層の同位置で測定された両 CCV の相関関係を図—4 (横軸: 路盤の CCV, 縦軸: アスファルト層の CCV) に示す。図 (a) は高振幅時、図 (b) は低振幅時の相関関係で、高振幅時の方が相関性 (R²: 0.66 > 0.33) は高い。本結果より CCV はアスファルト層にも適用可能であり、また下層 (路盤) と上層 (アスファルト層) の相互間にも相関関係があることが判明した。

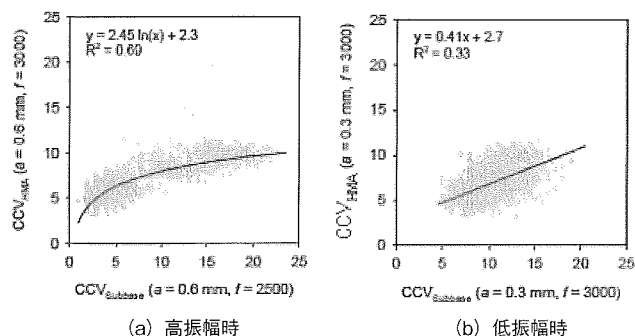
なお、CCV が低く軟弱と判定された路盤上に施工されたアスファルト層では、ダンプが施工直後の路面上を通過した時に破壊が生じ (写真—3)、CCV による路盤検査 (一種のプルーフローリング) の重要性和有効性が再認識された。



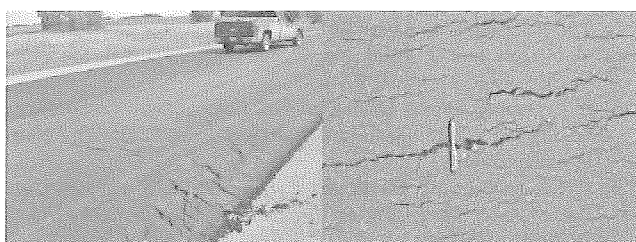
(a) 路盤

(b) アスファルト舗装

写真—2 IC 試験状況



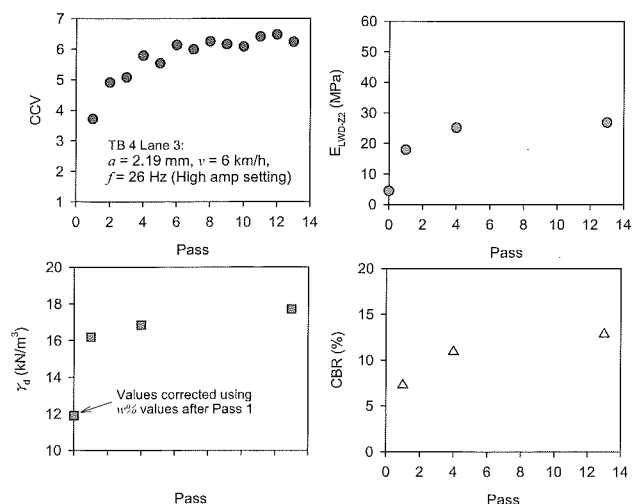
図—4 路盤とアスファルト舗装におけるCCVの相関



写真—3 CCVの低い路盤上に施工されたアスファルト層の破壊

(2) カンサス州プロジェクト (2008 年)

試験では突起（タンピング）付き振動ローラが路床土（粘性土）に適用された。ローラ加速度応答法は粘性土等の軟弱土上では、振動輪の加速度波形が変化しないため適用できないというのが通説であった。しかし、図—5によると、CCVは非常に低い、転圧回



図—5 CCV, 地盤剛性, 密度, およびCBRと転圧回数の相関（粘性土）

数の増加に伴い増加し最大値に達する。本傾向は他の品質管理指標である乾燥密度（ γ_d ）、地盤剛性（ E_{LWD} ）、および地盤支持力（CBR）と転圧回数との関係と同様であり、相関性が認められることが分かる。

(3) ジョージア州プロジェクト (2009 年)

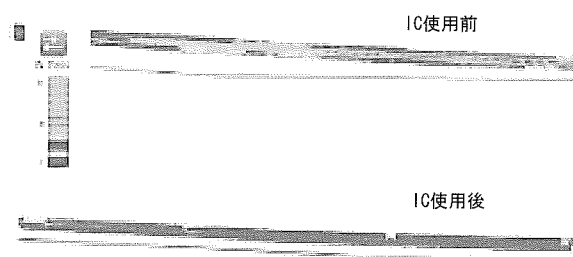
IC試験は州境高速道路に隣接するバス駐車場建設現場で実施された。降雨により含水比の高くなった粘性土の路床上に敷設された粒調碎石路盤（20 cm厚）とアスファルト混合物層（基層10 cm厚、表層5 cm厚）の各層でICローラが適用された（写真—4）。CCVの低い軟弱な路盤ではアスファルト層でもCCVは低い。路盤の剛性低下の原因は、明らかに雨による含水比の増加であるので、含水比管理の重要性が再認識された。



写真—4 ジョージア州試験施工状況

(4) インディアナ州プロジェクト (2009 年)

運転者がディスプレイの転圧回数を確認しながら、転圧回数の均一性が大幅に改善されたことが報告され（図—6）、大画面表示の有効性が実証された。



図—6 IC 使用前・後の転圧回数の均一性の改善例

(5) メリーランド州プロジェクト (2009 年)

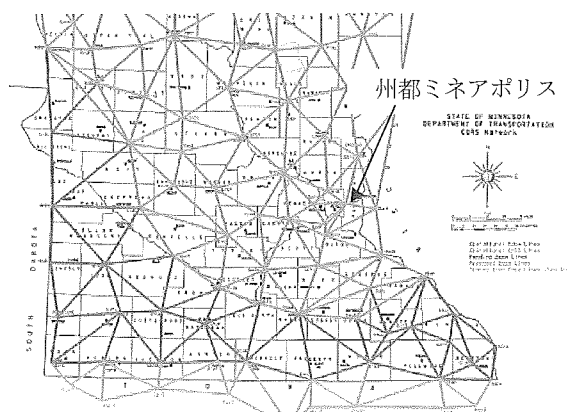
上節で転圧回数の均一性の改善例を示したが、同様の効果は夜間工事のような視認性の悪い現場条件でも、昼間と同様に確保されることが報告された（写真—5）。



写真一五 夜間工事におけるICの適用例

7. 情報化施工の普及促進策

施工業者にとって経済負担の非常に大きいGPS固定基地局の設営コストを州政府が負担する積極的な普及促進策が進められている。これは、ICローラのみならずブルドーザやモータグレーダ用の情報化施工の普及にも有効である。例えばミネソタ州DOTは約100基のRTK-GPS(各基地局間の距離約50 km)をネットワーク化(図一七)することによって、施工業者は公共・民間工事を問わずICT(情報通信技術)を無料で使用可能な環境が整備されている¹⁹⁾。

図一七 ミネソタ州の無料RTK-GPSネットワーク¹⁹⁾

8. おわりに

上述した各州におけるIC試験報告書ならびに関連情報はURL <http://www.intelligentcompaction.com> に全て掲載されているので参照されたい。

2010年のIC試験施工は当初予定の4州(ウイソコンシン;WI, ペンシルバニア;PA, 北ダコタ;ND, バージニア;VA, 図一1参照)、および追加5州で計画され、現在、その準備が進められている。また、中間報告としてIC工事発注仕様書やデータ形式の原案が近く発表される予定である。

新たなSHRP-2計画では、既に舗装の保証付き発注工事の導入が検討されている。舗装会社が施工品質と

維持修繕を管理運営する時代がやがて到来し、ICはその支援ツールとして発注者からも期待されている。

米国の舗装会社の多くは、作業効率と舗装品質の向上が最大のビジネスチャンスであると認識している。なぜなら、舗装品質(締固め密度とその均一性、平坦性等)や工期短縮等に対してボーナス(懸賞金, 増額)またはペナルティ(罰金, 減額)等のインセンティブシステムが導入されているからである。今後、ICは舗装会社らの利益目標の達成に寄与すると同時に、発注者にも舗装の長寿命化と施工の効率化によって“納税者への利益還元”を最大化しうる技術として期待されている。

JICMA

《参考文献》

- 1) C. Dumas et al., Innovative Technology for Accelerated Construction of Bridge and Embankment Foundations in Europe, FHWA-PL-03-014, 2003.
- 2) B. Horan and T. Ferragut, Intelligent Compaction Strategic Plan, FHWA, 2005.
- 3) www.intelligentcompaction.com
- 4) SHRP-2, Highway Renewal: Plans, progress, and Findings, Part 1, TRB 87th Annual Meeting, 2009.
- 5) M. Mooney and D. White, Intelligent Soil Compaction Systems, NCHRP Soil IC Project 21-09, 2009.
- 6) D. Peterson, et al., Intelligent Soil Compaction- Technology, Results and a Roadmap toward Widespread Use, TRB 83rd Annual Meeting, 2006.
- 7) F. Camargo, et al., Intelligent Compaction: A Minnesota Case History, 54th Annual Uni. of Minnesota Geotechnical Conf., Uni. of Minnesota, 2006.
- 8) H. Thurner and A. Sandstrom, A new device for instant compaction control, Proc. of the Int. Conf. on Compaction, pp. 611-614, 1980.
- 9) 月本, 米国における盛土の締固め管理, 基礎工, pp. 64-70, 2009.7
- 10) Anderegg et al., Intelligent Compaction with Vibratory Rollers, TRB 82nd Annual Meeting, 2004.
- 11) Kloubert, Intelligent Soil and Asphalt Compaction Technologies, TRB 84th Annual Meeting, 2006.
- 12) D. Rawls and D. Potts, Caterpillar IC System, Presentation at TPF ICS initial-TWG meeting, 2008.
- 13) F. Akesson, Dynapac IC System, Presentation at TPF ICS initial-TWG meeting, 2008.
- 14) 北村, 藤岡, 内山他, ローラ加速度応答法を用いた道路路床の品質管理に関する研究(その2), 第39回土質工学研究発表会, pp. 1345-1346, 2004.
- 15) J. Scherocman, S. Rakowski, and K. Uchiyama, Intelligent Compaction, Does It Exist?, Proc. of the Annual Conf. Canadian Technical Asphalt Association, Issue 52, pp. 373-398, 2007.
- 16) H. Thurner, Continuous compaction control-specification and experience, Proc., XII IRF World Congress, pp. 951-956, 1993.
- 17) D. White, P. Vennapusa, R. Goldsmith, and L. Johanson, IC Case Histories for Soil, Aggregate, and HMA, 2nd Annual Intelligent Construction for Earthworks Workshop, Presentation, April, 2009.
- 18) 小栗, 上野, 眞壁, 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, 平成21年建設機械シンポジウム, 2009.
- 19) <http://www.olmweb.dot.state.mn.us/CORS.GPS/cors.html>

【筆者紹介】

月本 行則(つきもと ゆきのり)
酒井重工業(株)
取締役事業推進部長

