

# リアルタイム締固め測定機構を使用した 転圧回数に基づく密度管理の検証

Verification that Compaction Management by Density Based on Number of Compaction Using Mechanism  
for Real-time Compaction Measurement

(株)砂子組 ○正 員 加來 孝志(Takashi Kaku)  
 (株)砂子組 正 員 田巻 瑠 (Ryu Tamaki)  
 (株)砂子組 正 員 佐藤 昌志(Masashi Sato)  
 (株)砂子組 正 員 古川 大輔(Daisuke Furukawa)  
 (株)砂子組 正 員 佐藤 欣治(Kinji Sato)  
 (株)砂子組 正 員 田尻 太郎(Taro Tajiri)

## 1. はじめに

TN・GNSS を用いた盛土の締固めでは、試験施工で決められた締固めに必要な回数を転圧した事を根拠として、締固め管理が行われる。同管理法は高度に自動化され効率的であるため、現在では最もよく使用される方法となっているが、直接試験ではないため、日々変動する盛土材のバラツキや、転圧コンディションの善し悪しに厳密に対応するものではない。

一方そのように管理された盛土を、転圧後の品質検証という観点で見た場合、検証方法として現実的なのは、やはり砂置換法である。ただし砂置換法は、1000 m<sup>3</sup> に1回程度になるので、各層の撒き厚を30 cmと仮定した場合、60×60 mに1ヶ所程度の測定となり、データ数が少ない事は否めず、また結果を得るのに数日を要する時もある。

筆者らは平成26年より盛土の締固め度試験である衝撃加速度法に注目し、その自動化を進めてきた<sup>4)~9)</sup>。現在の形は、ローラー後部に衝撃加速度測定用のランマーを車載し、衝撃加速度試験位置をRTK-GPSにて測位しながら走行し衝撃加速度を自動測定するリアルタイム締固め測定機となっている。同機構を用いれば、従来とは比較にならない、多数のデータと短い測定時間で締固め度の確認を行える考え、TN・GNSS管理された盛土の事後検証を行った。

## 2. 試験フィールドの概要

試験フィールドとした盛土は図-1に示すように250×83.5 mの大きさを持ち、盛土材はセメント改良土で最終盛土厚は3.5 mである。層数は10層(ところによって12層)、撒き厚は1層目が60 cm(真空圧密のため)、2層目以降は標準30 cmとなる。検証範囲は図中に①~⑤で示したように、各層ごとに概ね50×20=1000 m<sup>2</sup>程度とし、各層の転圧終了後に、図-2に示すリアルタイム締固め測定機構を搭載したローラーを走行させて行った。表-1に、層の検証範囲の転圧後の経過日数と基準加速度、得られた平均衝撃加速度とデータ数を示す。

なお後述するように試験転圧は6回まで行ったが、6

回転圧まで過転圧傾向はみられなかったため、必要転圧

表-1 検証範囲

範囲	層	経過日数	基準加速度 (G)	平均加速度 (G)	データ数
①	3	1	43	77	166
②	5	1	39	62	64
③-1	6	直後	39	43	114
③-2	6	2	39	75	86
④	8	1	39	58	111
⑤	10	2	39	49	73

回数で転圧した後に、ローラーを検証のために数回走行させても、過転圧にはいたっていないと考えられる。一例として図-3に、範囲④のローラー走行軌跡上の衝撃加速度分布を示すが、基準加速度39 Gを下回る地点はみられない。

## 3. 試験転圧結果

当該現場では盛土材の変更は1度行われ、2回の試験転圧を行った。試験転圧でもローラーは図-2のものを使い、転圧回数は6回。並行して砂置換法による密度試験を偶数回転圧(未転圧含む)で実施した。リアルタイム測定機構は図-3に示したように走行軌跡を管理できるので、軌跡上の転圧回数と測定加速度を集計すれば、転圧回数ごとの平均衝撃加速度を算出できる。図-4は、当初盛土材の結果である。砂置換法による必要転圧回数は2回となった。

砂置換において奇数回転圧の締固め度を偶数回の値から補完した、締固め度(%)と平均衝撃加速度(G)との相関を図-5に示す。図中の点線は回帰直線でR<sup>2</sup>値は0.826と良好である。この結果から当初盛土材の基準加速度は43 Gとした。

図-6、7は変更後の盛土材の試験転圧結果と、締固め度-平均加速度の相関になる。この時の必要転圧回数は4回、基準加速度は図示するように39 Gとした。R<sup>2</sup>値は0.856である。

4. 検証測定データの処理方法

1回の検証範囲の面積は約1000 m<sup>2</sup>であるが、各層の盛土面積は最大で250×83.5 mで概ね20000 m<sup>2</sup>ある。

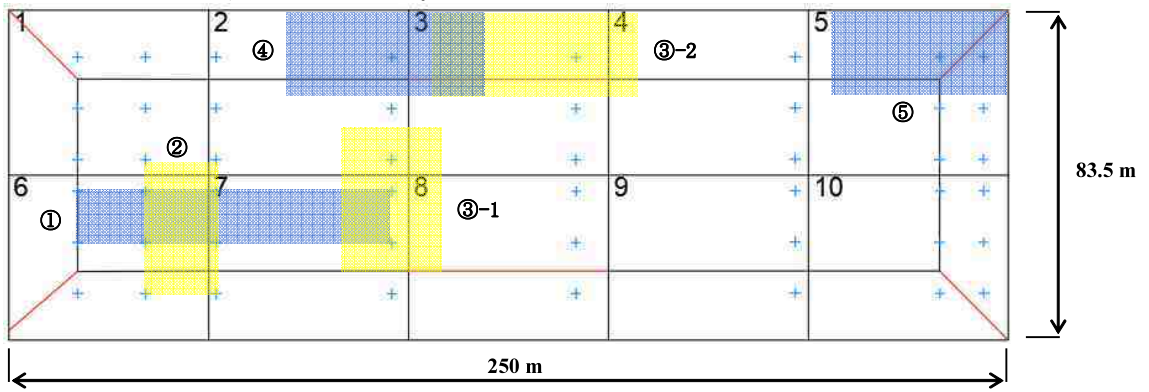


図-1 試験フィールド



図-2 リアルタイム締固め測定機搭載ローラー

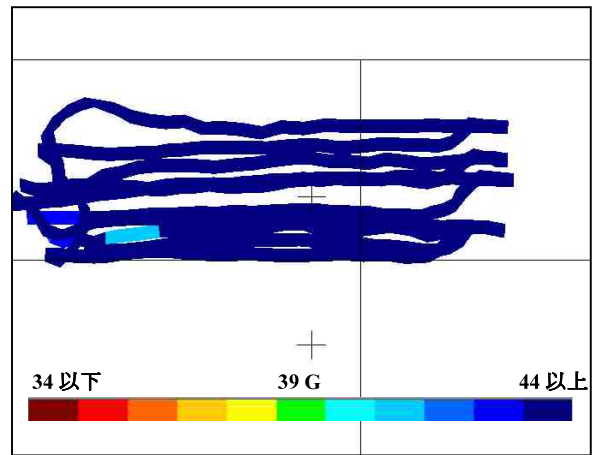


図-3 走行軌跡上の衝撃加速度分布（範囲④）

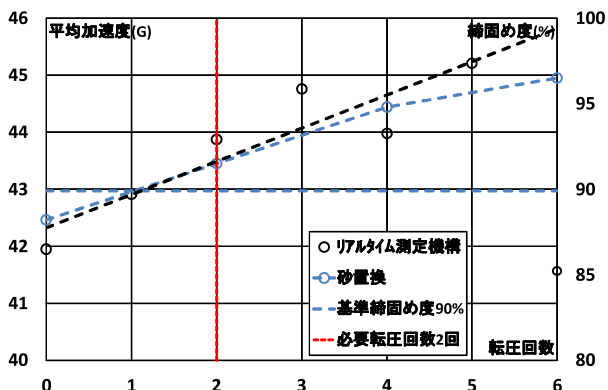


図-4 試験転圧結果（1回目）

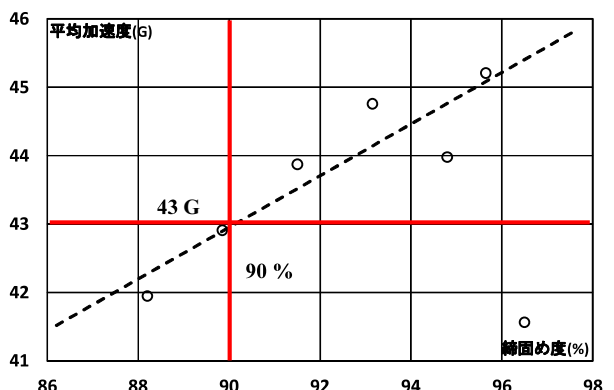


図-5 締固め度—平均加速度相関（1回目）

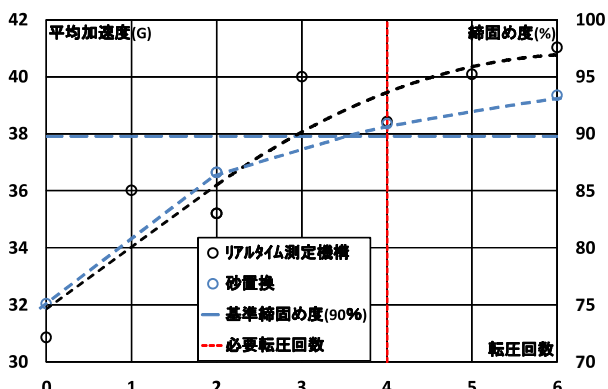


図-6 試験転圧結果（2回目）

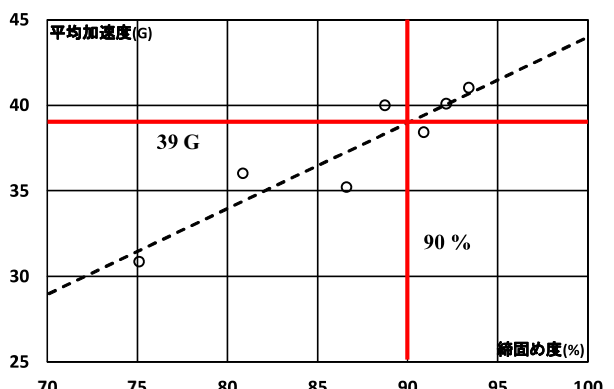


図-7 締固め度—平均加速度相関（2回目）

検証面積は層全体の  $1000/20000=5\%$  程度となるので今回の検証試験は、明らかにサンプリング調査である。

母集団の推定のために正規分布を利用した。測定値の出現頻度の確率密度分布  $p$  は、表-1 の各範囲で得られた衝撃加速度を、区間幅  $L=10\text{ G}$  の度数  $n$  として集計し、データ数  $N$  で割って出現頻度とした後、出現頻度を区間幅で割った値とした。結果を図-8～13 に示す。

図中の青点線は、平均と標準偏差から計算できる正規分布の理論曲線、黒点線は測定値の平均値、赤点線は基準加速度を表す。

$$p(x) = \frac{n}{NL} \quad (\text{式.1})$$

ここに、

- $p$  : 測定値の出現頻度の確率密度.
- $x$  : 度数を集計する区間の中央値.
- $L$  : 度数集計の区間幅(0～10 G, 10～20 G, …)
- $n$  : 区間幅  $L$  で集計した測定値の度数.
- $N$  : データ数.

標本として得られた測定値から母数を推定する場合、厳密には  $t$  分布を用いるべきであるが、図-8～13 に示すように、実測から求めた測定値の出現確率密度は、正規分布の理論値にかなり近い。じっさい各層の測定値の平均と標準偏差から理論値を計算し、実測による確率密度分布との相関をとると表-2 となり  $R^2$  値は非常に高いので、ここでは母数の推定に関して正規分布で代用する。表-2 の標準偏差は、不変分散から与えたものである。

## 5. 母数の推定

不変分散から与えた標本の標準偏差を、母集団の標準偏差とみなして区間推定を行う。母集団の平均の下限を、各回(各層)の基準加速度  $\mu$  に等しいとおけば、標準正規分布における  $\mu$  の標準化偏差  $z$  は、

$$z = \frac{\mu - x_m}{s} \quad (\text{式.2})$$

ここに、

- $z$  : 標準正規分布での基準加速度の標準化偏差.
- $\mu$  : 基準加速度.
- $x_m$  : 各層の測定値の平均.
- $s$  : 不変分散による各層の測定値の標準偏差.

で計算できるので、標準正規分布の累積確率から母集団の平均値が基準加速度  $\mu$  以上である信頼確率  $P(\mu)$  は、

$$P(\mu) = 1 - N_s(z) \quad (\text{式.3})$$

ここに、

- $P(\mu)$  : 母集団の平均が  $\mu$  以上である信頼確率.
- $\mu$  : 基準加速度.
- $z$  : (式.2)で与えた  $\mu$  の標準化偏差.
- $N_s(z)$  :  $z$  における標準正規分布の下確率.

表-2 測定値の平均, 標準偏差, 正規分布との相関

範囲	経過日数	平均 (G)	標準偏差 (G)	$R^2$ 値
①	1	76.7	12.7	0.963
②	1	62.1	9.7	0.867
③-1	直後	43.5	7.9	0.996
③-2	2	74.4	12.9	0.927
④	1	58.1	11.4	0.980
⑤	2	49.3	9.8	0.972

表-3 基準加速度以上の信頼確率

範囲	経過日数	標準化偏差 $z$	信頼確率 (%)	平均/基準
①	1	-2.66	99.6	1.8
②	1	-2.39	99.2	1.6
③-1	直後	-0.57	71.5	1.1
③-2	2	-2.77	99.7	1.9
④	1	-1.67	95.3	1.5
⑤	2	-1.05	85.3	1.3

で推定できる。結果を表-3 に示す。

表-3 より、必要回数転圧後 1 日以上経過したケースでは、信頼確率は 85%以上ある。これは各層ごとに、盛土面積全体 20000  $\text{m}^3$  に対して同様な検証試験を行った場合、その面積の 8～9 割以上で測定値の平均が基準加速度を上回るであろうという事と、ほぼ同等である。

当該現場ではどの層も、基準締固め度 90%を十分にクリアしていると結論できる。

次にケース③-1 と③-2 を比較する。表-1 よりこれらは同じ 6 層目に対する、転圧直後と転圧から 2 日経過した時の結果である。転圧直後の測定値の平均と基準加速度の比は 1.1 倍と全ケース中で最も近い。また基準加速度を上回る測定値の個数は、データ数の 70%で、ほぼ [平均-標準偏差] 以上の測定値がそれに当たる事を示している (図-8)。転圧直後は最も試験転圧時に近いはずなので、これは試験施工と盛土材の妥当性を示すものと考えられる。

一方で、それから 2 日経過した状態では平均は 1.9 倍、基準加速度以上の測定値は 100%となり、セメント改良効果の進展がみられる (図-9)。検証測定の実績性を示すものと考えられる。

## 6. まとめ

リアルタイム締固め測定機構を用いれば、TN・GNSS で管理された盛土の転圧後の品質検証を、従来とは比較にならない多数のデータと短い測定時間で行う事ができる。

今回は事後解析であったが、測定機構のシステムに組み込めば、より土工管理に資するものと考えられる。

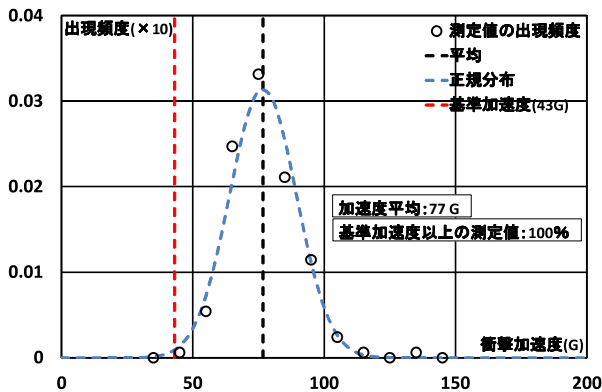


図-8 測定値の確率密度分布 (範囲①)

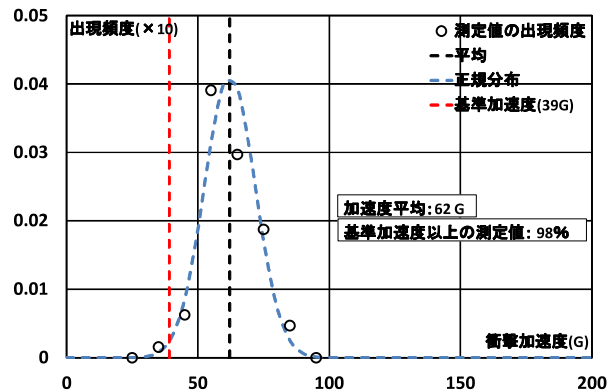


図-9 測定値の確率密度分布 (範囲②)

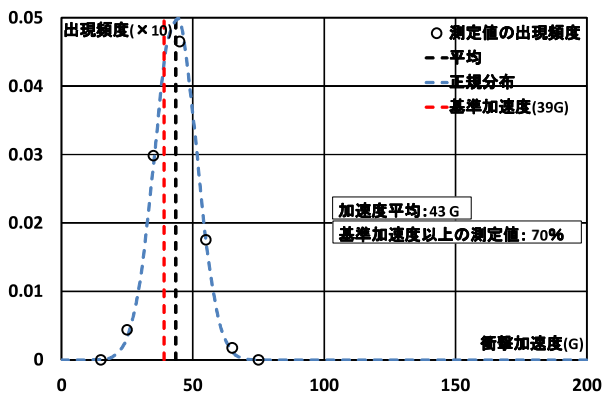


図-8 測定値の確率密度分布 (範囲③-1)

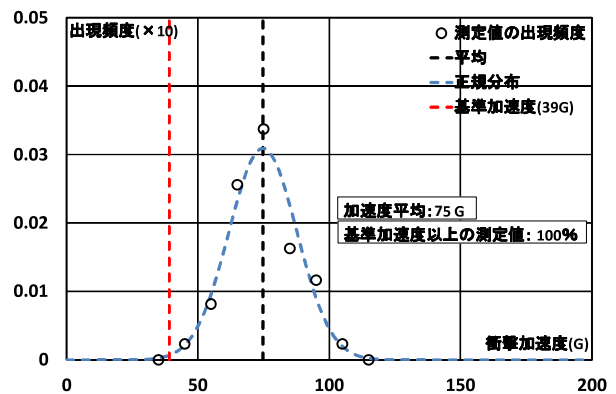


図-9 測定値の確率密度分布 (範囲③-2)

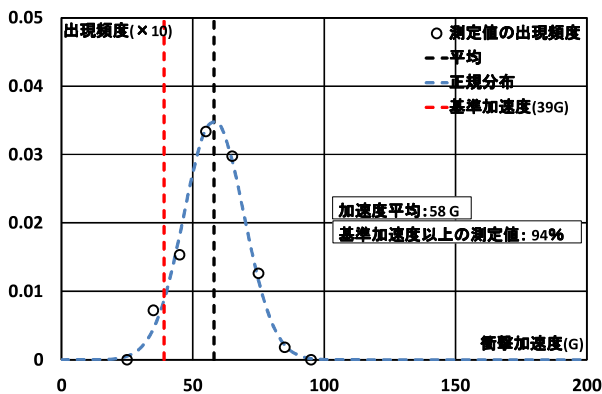


図-10 測定値の確率密度分布 (範囲④)

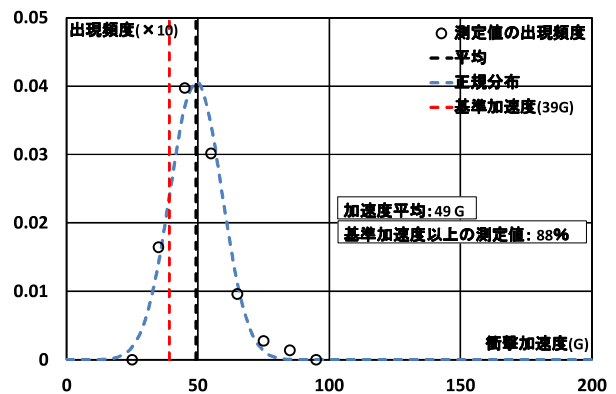


図-11 測定値の確率密度分布 (範囲⑤)

[参考文献]

- 1) T S・G N S Sを用いた盛土の締め固め管理要領, 国土交通省, 平成 29 年 3 月.
- 2) 道路・河川工事仕様書付表, P40-40, 北海道開発局.
- 3) 衝撃加速度による盛土の品質管理方法, 建設マネジメント技術, 2014 年 4 月.
- 4) 盛土転圧の情報化施工に資する締め固め測定器の開発, 好川他, 2015 年北海道支部論文報告集第 71 号 C-12.
- 5) 情報化施工に資するリアルタイム締め固め測定法とデータの評価に関する研究, 廣上他, 2016 年北海道支部論文報告集第 72 号 C-01.
- 6) 衝撃的挙動測定による土質密度管理測定法の評価と課題, 廣上他, 2017 年北海道支部論文報告集第 73 号 C-08 1-4.
- 7) ICT 土工における過転圧防止に関する実証的考察, 成田他, 2019 年北海道支部論文報告集第 75 号 F-08 .
- 8) 締め固め密度測定に資する重錘落下高と土のラーム定数, 西村他, 2021 年北海道支部論文報告集第 77 号 F-02 .
- 9) 過転圧防止工法の開発 (ICT) と測定データの評価, 佐藤他, 2022 年北海道支部論文報告集第 78 号 F-01.