

過転圧防止装置(シーマル)のリアルタイム締固め測定機構

Mechanism for Real-time Compaction Measurement of Over Compaction Preventive Device (SEAMAL)

(株)砂子組 ○正員 田巻 瑠 (Ryu Tamaki)
 (株)砂子組 正員 加來 孝志 (Takashi Kaku)
 (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

筆者らは平成 26 年より、盛土工の締固め度測定試験である衝撃加速度法に注目し、その自動化について研究・開発を進めてきた^{1)~9)}。現在では盛土締固めの管理方法は TS・GNSS による土工管理¹⁾が一般的となっており、高度に自動化されているものの、直接試験の結果に基づくものではない。そこで衝撃加速度法に代表される直接試験を、TS・GNSS を利用して自動化できれば、より確実な土工管理が可能になるものと考えた。

衝撃加速度法の開発局標準では径 6 cm、質量 4.5 kg の重錘を高さ 40 cm から自由落下させるランマーを用い、手動測定しなければならない²⁾。重錘に埋め込まれた圧電式加速度計で重錘と対象地盤との衝突加速度を測定する。

図-1 に示すように、最適含水比における最大乾燥密度と先の衝撃加速度には非常に良い相関があるとの報告があり³⁾、試験盛土などで衝撃加速度法試験を行えば、基準密度(標準で 90%)に対応する衝突時の基準加速度が得られる。基準加速度を判定指標として、実際の施工面で締固め管理試験を行う事になる。

以下ここでは、TS・GNSS を利用して衝撃加速度法を自動化した測定機構を、シーマルと呼ぶ。

2. シーマルの概要

開発局の標準資料に準拠し、衝撃加速度法を図-2 に示すような形で以下のように自動化した。

ランマー形状は開発局標準に準拠し、径 6 cm、質量 4.5 kg で上部に加速度計を内蔵し、不陸等にフレキシブルに対応するため、市販の荷役テープで懸下する。

ランマーの保持と落下後の巻上げには、通電状態の静止トルクでホールド可能なステッピングモーターを用い、ホールドの位置決めは、巻上げの停止を機械式スイッチの信号で行う。

地盤衝突後の巻上げ過程では、ランマーがガイドスカート内で自由に挙動し、走行に起因する負荷を受けずに誘導されてガイドパイプ内へ収納される。

これを図-3 に示すように振動ローラー後部に装着し走行・計測するものとした。

3. 基準加速度の設定

衝撃加速度法を土工管理に適用するためには、盛土材に対する基準加速度を決めなければならないが、これは

(Copy Right CERi COLD REGION)

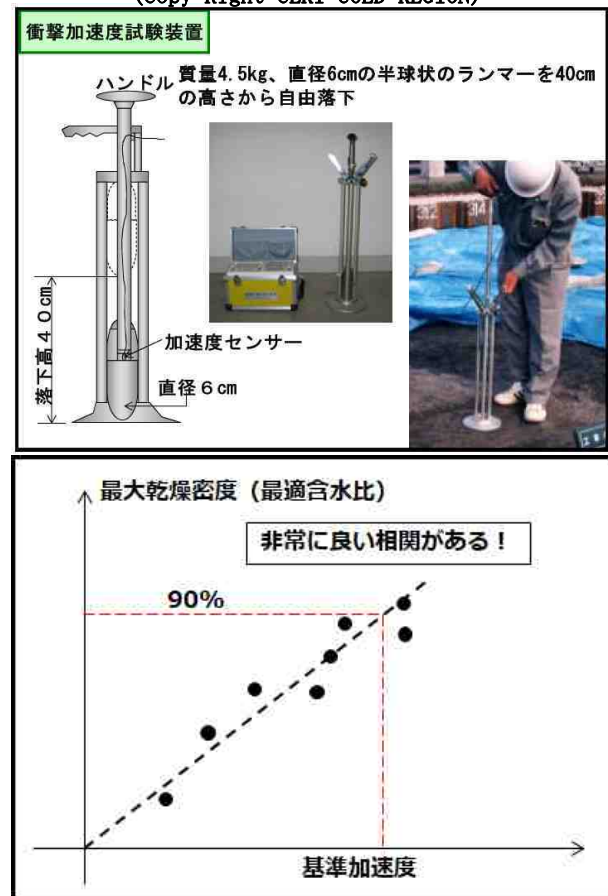


図-1 衝撃加速度法

砂置換法などで必要転圧回数を決定する、通常の試験施工時に行える。試験盛土を図-3 のローラーで転圧すれば、砂置換による密度試験と並行して転圧回数毎の平均衝撃加速度を測定できるので、図-4 に例示する試験施工結果が得られ、それをもとに図-1 から基準加速度も得られる。また必要転圧回数も同時に決定可能である。

4. ランマー落下動作の制御

ローラー走行時におけるランマーの自動落下は、GPS 測位による移動距離で行うのを基本とした。直近のランマー落下・測定点から設定距離(Default で 2 m)以上移動し、前回測定時刻から 2.5 秒以上経過した時、次の落下・測定が行われる。時間インターバルは、機構上の



図-2 シーマルの機構概略

制約で、重錘の巻き上げ・再セットに2秒程度要するためである。GPSにはRTK-GPSを用いているが、別途行った24時間静止試験で、採用した測位チップとアンテナに対して最大変動3cm以内、標準偏差9mm、平均変動0mmの精度を確認している(水平方向)。

ランマーの落下は、ホールド状態のステッピングモーターから図-2の電磁クラッチを解放する事で開始する。同時にモーターは巻き上げ回転状態に移行する。

図-5に測定された加速度時系列の典型的な例を示す。測定加速度は落下過程と地盤衝突時とを明確に区別できるが、ランマーは衝突後に不陸等の影響で横倒れしガイドスカート内に収納できない可能性もある。かつバック時である場合、ローラー後輪に巻き込まれる恐れもある。

そこで衝突加速度が10Gを超えた時点でクラッチを再接続し、巻き上げを開始する閾値を設けた。シーケンスは、図-3の制御装置内にある専用のマイコンボードで制御し応答性を高めている。これにより閾値に達した少なくとも30ms後には引き上げが開始され巻き込み対策となった。実証試験の結果、加速度波形は15ms以内にはピークを迎えるので、加速度の最大値は十分に測定できる。

巻き上げ開始後のランマーは、先端が機械スイッチのレバーに触れるまで上昇し接点信号でモーターがホールド状態に移行し停止する。この間のGPS落下信号は無視される。なおランマーの自動落下においては、GPS受信不良やその他の事象も考慮し、手動および時間による落下も可能とする測定モードも用意した。図-6に、制御シーケンスを示す。



図-3 ローラーの装着状況

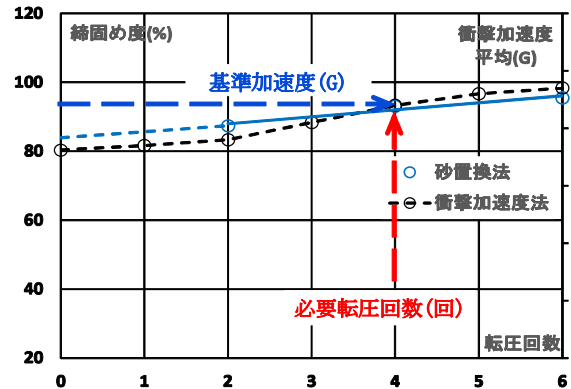


図-4 試験施工結果

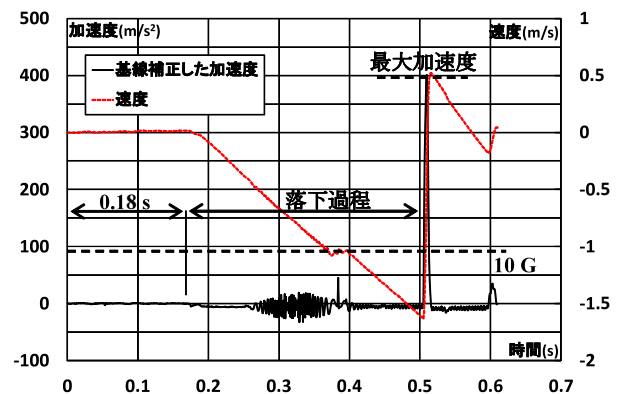


図-5 測定加速度例

5. 衝撃加速度の補正

衝撃加速度法の標準では径6cm、質量4.5kgのランマーを高さ40cmから自由落下させなければならない。しかしながら図-2の機構では、荷役テープを巻き取るプーリーの機械抵抗やランマーとガイドパイプとの擦れ等により、自由落下が減速されるので、測定された最大衝撃加速度を補正する必要がある。じっさい図-5の加速度測定例でも、擦れによると思われる落下加速度の乱れが現れている。

道路橋示方書等に記載されるヘルツの点接触力公式は弾性理論に基づくもので、それを衝突過程に適用したものが落石対策便覧の最大落石衝撃力推定式(振動便覧式)となる。同式は弾性理論と運動方程式に厳密に基づくものなので、その適用範囲は広いと考えられる。同式の原型は、次の形をしている。

$$\frac{F}{m} = k m^{-1/3} v^{6/5} \quad (式.1)$$

ここに、

F：点で衝突する 2 物体間に働く，最大衝撃力。

k：被衝突物体の質量，衝突する 2 物体の形状・弾性係数・ポアソン比で決まる定数。

m：落下物体の質量。

v：2 物体の衝突速度。

(式.1)によれば最大衝撃加速度は，衝突速度の 6/5 乗に比例し，ここでは被衝突物体が地盤，落下物体がランマーとなる．従ってランマーの最終落下速度がわかれば最大衝撃加速度を補正できる．(式.1)が衝撃加速度法の場合も有効なのは，既往研究により確認されている⁵⁾。

速度時系列は，基線補正した加速度時系列を数値積分する事で求める．当機構の機械的特性として，ランマーリリース信号の 0.18 s 後に落下が始まる (図-5)．この間を近似的な静止とみなし，その平均加速度を基線誤差とした．速度時系列は台形公式により、

$$v(t) = \int_0^t (a(\tau) - a_0) d\tau \quad (式.2)$$

ここに、

v(t)：速度時系列。

a(τ)：測定された加速度時系列。

a₀：基線誤差。

で計算する．加速度サンプリングは 1 kHz で行っているので，速度時系列は約 600 個の数値リストとなる (図-5 の赤点線)．数値リストの最小値を最終落下速度とする．補正値は、

$$a'_{\max} = \left| v_f / v_{\min} \right|^{6/5} (a_{\max} - a_0) \quad (式.3)$$

ここに、

a'_{max}：最大衝撃加速度の補正値。

v_f：40 cm 自由落下の最終速度，v_f=2.8 m/s。

v_{min}：速度時系列の最小値。

a_{max}：測定された最大加速度。

で与えられる．以上の補正を，ランマー落下の測定時に毎回行う。

6. 計測モニター

自動計測されたデータは，システムプログラムを搭載した車載 PC により処理され表示される．図-7 に，PC 上に転圧走行中に表示されるモニター画面を示す．処理結果は，以下に述べる 4 つの形でオペレータに提示される (図-7 参照) ．

① 転圧コンディションナビ

グラフ横軸の転圧回数毎の平均衝撃加速度を，その時点での測定履歴から計算し表示する．理想化して図-8

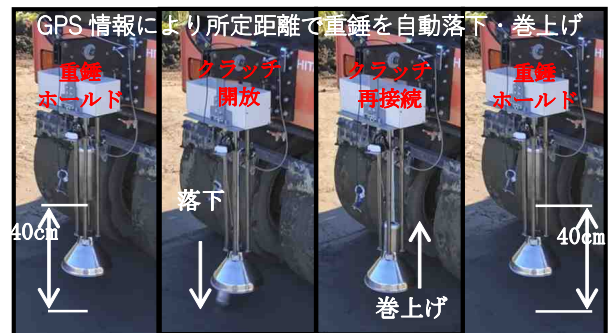
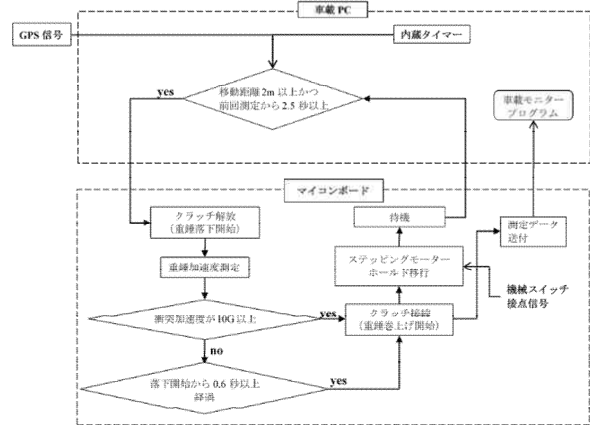


図-6 制御シーケンス

に示すように、これによりリアルタイムに，過転圧等の判断が可能になると考えられる。

判定 1)

必要転圧回数以前に平均加速度が減少傾向
⇒ 盛土状態不良．作業中止を推奨。

判定 2)

必要転圧回数でも平均加速度が基準加速度以下
⇒ 盛土状態不良．作業中止を推奨。

判定 3)

必要転圧回数で平均加速度が基準加速度以上
⇒ 盛土状態良好。

判定 4)

転圧回数とともに平均加速度が減少傾向
⇒ 盛土状態に関わらず過転圧。

なお基準転圧曲線は試験施工の結果とする。

② 転圧範囲ナビ

RTK-GPS 測位により転圧軌跡と回数を色コンターで表示．従来の TS・GNSS 管理画面と同種のもの。

③ 衝撃加速度分布ナビ

直近 3 回の衝撃加速度の移動平均値を，転圧軌跡上に色コンターで表示する．転圧過不足箇所をリアルタイムで確認可能。

④ 現在の測定結果

最新の衝撃加速度の測定波形を表示．ランマーの落下

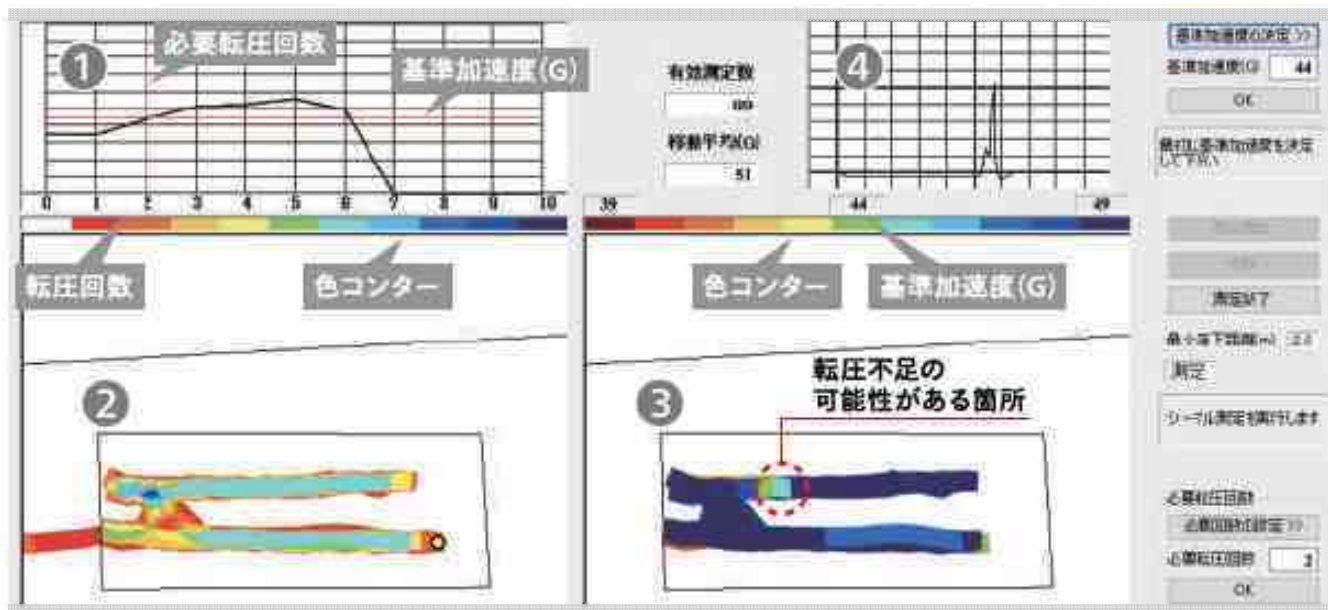


図-7 制御シーケンス

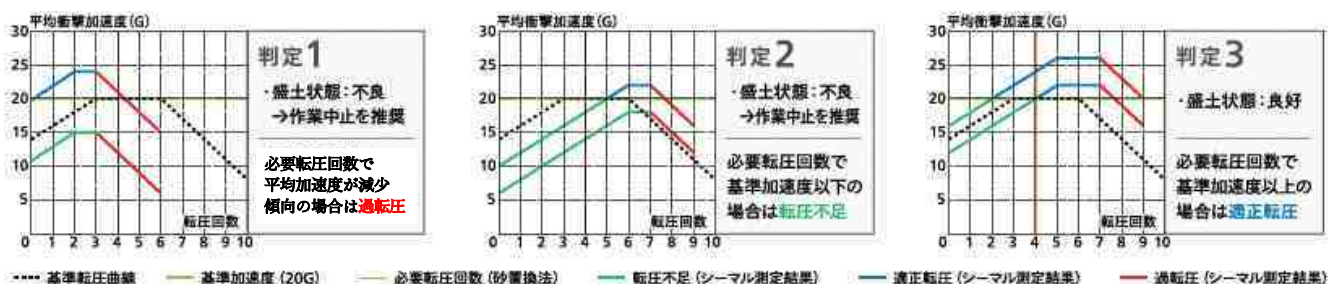


図-8 転圧コンディションの判定パターン

不良等をモニター。

以上①～④の情報を総合的に判断する事により、現場状態に即応したオペレーションが可能になるものと期待される。

7. まとめ

施工時における盛土材の含水比は日々異なり、降雨などの影響によりその状態が変動する事は避けられない。試験施工で決められた必要転圧回数では転圧の過不足、特に過転圧傾向になる可能性もある。

従来その定量的判定は困難であったと思われるが、衝撃加速度法に準拠した直接試験の自動化と TS・GNSS 管理を組み合わせることにより、面的かつリアルタイムな締め固め度の定量的管理が可能になると考えられる。

[参考文献]

- 1) TS・GNSS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メ定数，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。