

衝撃加速度法による締固め測定の自動化に関する測定機の機構

Measuring Instrument Mechanism for Automated Compaction Measurement by Impact Acceleration Method

- (株)砂子組 ○正 員 佐藤 欣治 (Kinji Sato)
- (株)砂子組 正 員 幌村 瑛奈 (Ena Horomura)
- (株)砂子組 正 員 長谷川雅樹 (Masaki Hasegawa)
- (株)砂子組 正 員 田尻 太郎 (Taro Tajiri)
- (株)砂子組 正 員 近藤 里史 (Satoshi Kondo)

(Copy Right CERI COLD REGION)

1. はじめに

著者らは平成 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、その自動化を進めてきた。

現在一般的となっている TS・GNSS による土工管理りは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。

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^{4)~9)}。

2. 衝撃加速度法試験

衝撃加速度法の開発局標準では径 6 cm、質量 4.5 kg 重錘を、高さ 40 cm から落下させるランマーで手動落下させなければならない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と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。

3. シーマル初号機

H26~28 年において基礎データを収集した。図-2 に示すような架台を転圧用ローラーに引かせ、架台の上下動を加速度計で測定し、車載 PC が測定値を処理するものである。架台の車輪には写真に示すような突起を設けた。

このときデータ解釈の方法として注目したのが、落石対策便覧の落石衝撃力推定式の基礎となった、ヘルツの接触力公式である。落石対策便覧と同様にヘルツの式を、現場条件に合わせて調整し次式を得た。

$$\frac{|a_{\min}|}{g} mA = 0.257 \beta^{6/5} \lambda^{2/5} \frac{|a_{\min}|^{2/3} m^{2/3} V^{6/5}}{a_{\max} - a_{\min}} A \quad (式.1)$$

ここに a_{\max} 、 a_{\min} は車輪が突起を乗り越え落下し地盤と衝突した時の加速度の最大値と最小値、A はその時の

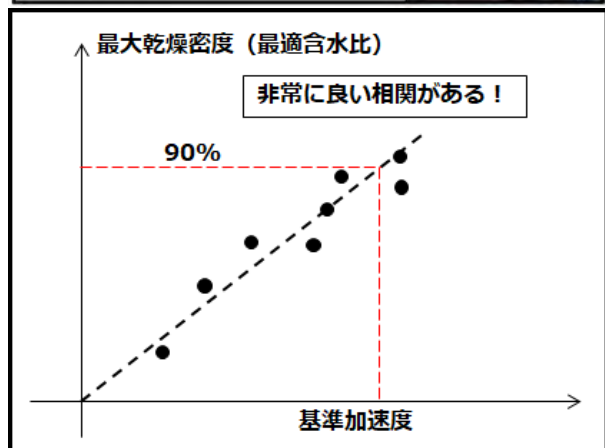


図-1 衝撃加速度法



図-2 シーマル初号機

運動量、g は重力加速度、m は架台の質量、 β は車輪径と突起高さで決まる定数、 λ は地盤のラーメ定数、V は

ローラーの走行速度となる(図-3)。

(式.1)を λ を比例定数とする直線式とみなし各種速度でローラーを走行させた結果、同一地盤上で図-4 に示すような、相関係数がほぼ $R^2=0.9$ 程度の高い相関を持つ回帰直線となり、衝撃加速度法におけるヘルツの接触力公式の有用性を確認できた。これは衝突時の衝撃加速度が、衝突速度の 6/5 乗に比例する事を意味するものである。ローラーの走行速度は車載の GPS で測ったもので、これを自動化された面的管理に用いる事もできる。

4. シーマルII号機

H29~R3 年においては、試験方法をより衝撃加速度法の標準に近づけるため、重錘落下型の機構を採用した(図-5)。基準加速度は、事前に試験盛土での運用で決定する。

重錘落下型の機構は、モーターで重錘およびロッドを引き上げ、所定の位置にある近接センサーが所定の高さに達した事を感知すると、連動した小型モーターがストッパーを押し出し、重錘の落下を抑制する。

これをローラーの後部に装着し走行する。重錘落下は RTK-GPS を受信する車載ソフトの信号でストッパーを解除して行く。落下から一定時間後(0.6 秒)で重錘引き上げをシーケンサー制御で開始する。GPS 測位により、ローラーが一定距離移動すれば重錘落下が起こるよう自動化した(図-6)。待機時間 0.6 秒は、盛土現場において繰り返し走行実験を行い、決定した。

GPS と連動するので、工事図面に現在位置や転圧履歴、衝撃加速度法による判定結果などを、車載の管理画面にリアルタイムで表示する事も可能である(図-7)。

その結果、転圧回数ごとの平均衝撃加速度を集計する事により図-8 に示すように、転圧コンディションによっては必要転圧回数以下でも十分であったり、必要転圧回数では過転圧になる等の事態が、具体的に発生しうる事も明らかとなった。転圧コンディションは前日の降雨等の影響を直接的に受け、日々の含水比試験の結果では把握しきれない面があると思われる。

具体的な成果を出せたものの機構の構造上、重錘が着地した瞬間に、敷き鉄板への衝突や、ローラー走行による重錘のひきずりが避けられず(図-9)、そのダメージがロッドおよびモーターに徐々に蓄積し、ロッドの歪みによる動作不良が数度にわたって起きたほか、最終的には図-5 のモーター軸の軸ずれが引き起こされた。

5. シーマルIII号機

R4 年~においては、剛な機構の構造上の問題を解消するため、重錘の懸下を金属ロッドから市販の荷役テープに変更した。図-10 に示すように図-2 の標準ランマーにより近い形状となっている。また重量軽減と動作の単純化をはかり、ホールド可能なステッピングモーターでストッパーを廃止した。重錘は単純な機械式スイッチの信号で所定の高さにホールドされる。ガイドスカート内で重錘は自由に動ける。これにより走行時の負荷を受けず、引き上げ時にはガイドスカートに誘導されてガイドパイプ内へ収納される。これを以前と同様に、ローラー

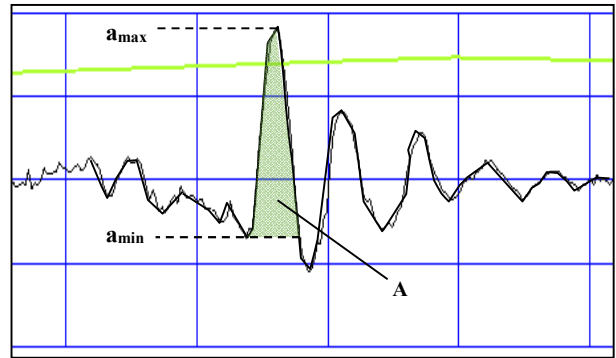


図-3 車輪と地盤の衝突加速度

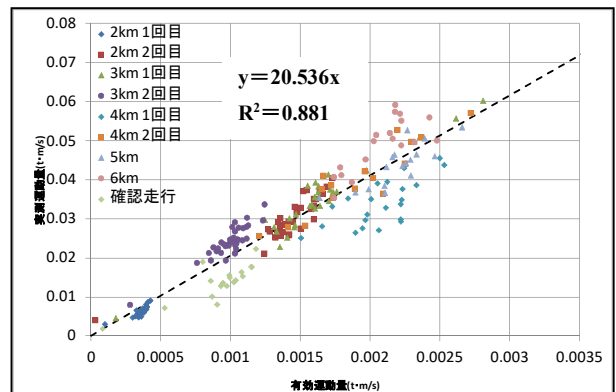


図-4 ヘルツの接触力公式の適合性

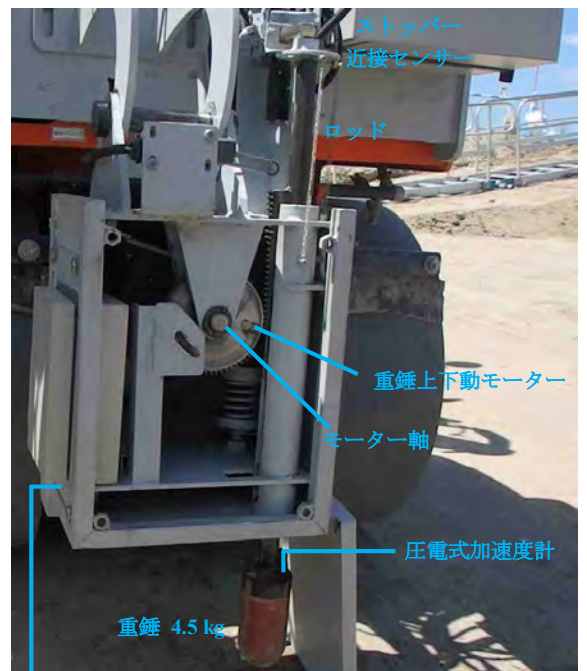


図-5 重錘落下型の機構



図-6 衝撃加速度法の自動化

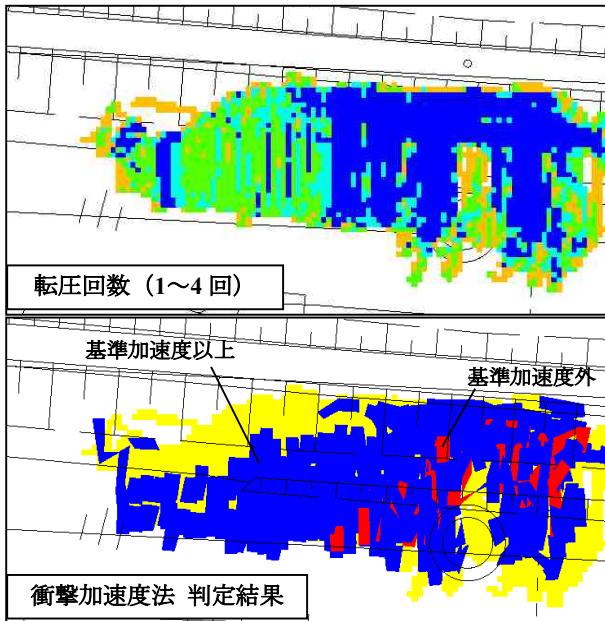


図-7 車載管理画面

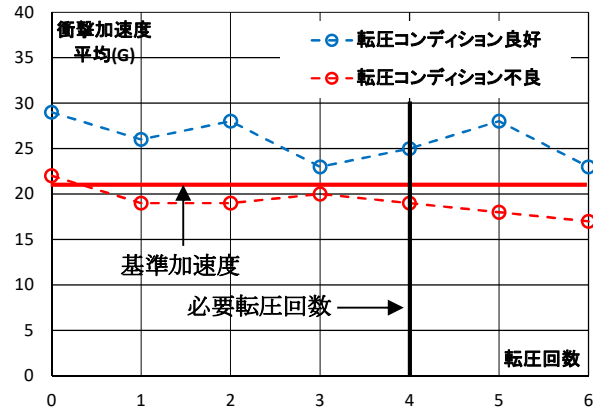


図-8 転圧回数による衝撃加速度の推移

の後部に装着し走行する (図-11)。

重錘落下のタイミングは GPS 測位で前と同じであるが、着地時に重錘が完全に転倒し、かつローラーがバック時である場合、重錘がローラー後輪に巻き込まれる恐れがあるため、衝突加速度 10 G を閾値として測定加速度がそれを越えた時点で引き上げを開始する。シーケンスは専用のマイコンボードで制御し応答性を高めた。

これにより閾値に達した少なくとも 30 ms 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、



図-9 走行中の重錘とロッドの状態

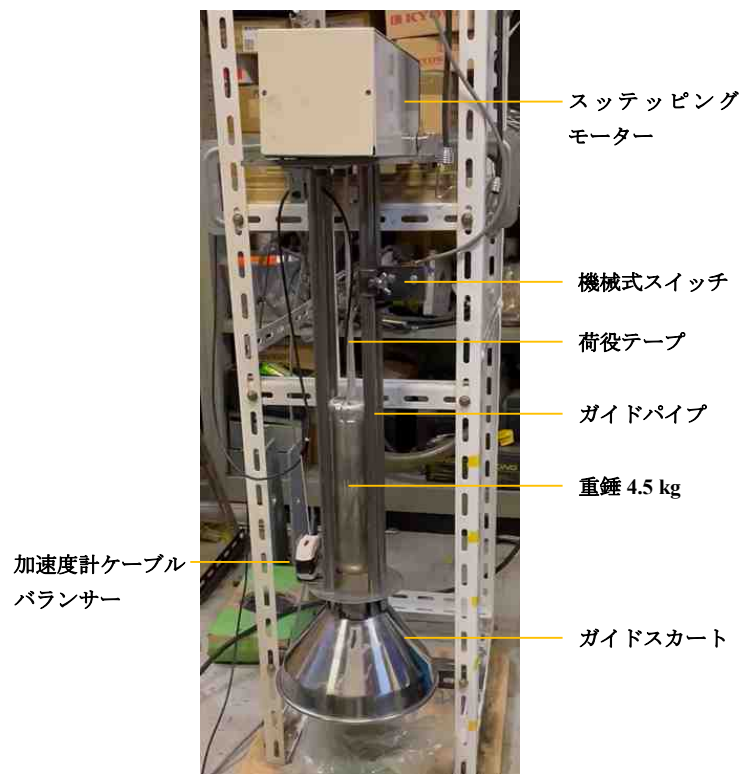


図-10 改良された機構単体

加速度波形は 15 ms 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。図-12 に、測定された衝撃加速度波形を示す。



図-11 改良型機構の装着

6. 今後の課題

改良型機構の重錘落下高は、不陸がないとすれば開発局標準と同じ 40 cm ある。40 cm を自由落下した時の落下時間は 286 ms であるが、図-12 の落下時間は 320 ms と若干長い。また落下加速度も平均で 0.6 G となる。これらは重錘落下機構の機械的抵抗であると考えられる。

実測された落下時間と平均加速度で試算すると、衝撃速度は $0.6 \times 0.32 = 1.88 \text{ m/s}$ で、40 cm 自由落下の理論値 2.80 m/s の 7 割ほどとなる。従って測定で得た最大値 27.9 G は、自由落下した場合の衝撃加速度より小さいことになる。

これに関しては図-4 の結果から、衝突時の衝撃加速度が、衝突速度の 6/5 乗に比例するのは確実なので、

$$a_{\max} = 27.9 \left(\frac{2.80}{1.88} \right)^{\frac{6}{5}} = 45.0 \text{ G} \quad (\text{式}2)$$

といった補正は可能であろうと考えている。この値は、衝撃加速度用ランマーの校正値とほぼ同じである。ただし衝突速度を算出するために、落下過程を不用意に数値積分すると無意味な結果となるので、安定した衝突速度を与える基線補正の方法を検討中である。

もう一つの課題として重要なのは、図-7 に例示したモニター用のリアルタイム管理画面の内容である。これは現場（ユーザー）がどのような情報を必要としているかに関わる問題であり、広くヒアリングを行い、できるだけ可読性の高いものとしたい。

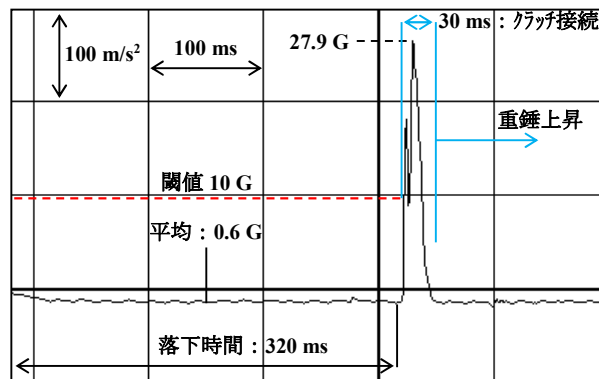


図-12 衝撃加速度波形

[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）測定データの評価（品質と生産性向上），佐藤他，2022 年北海道支部論文報告集第 78 号。