

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

Method for measurement in real time by compaction control device for the computerized construction
and study on evaluation method of the data

(株)砂子組 ○正員 廣上 伸二 (Sinji Hirogami)
(株)砂子組 正員 好川 敏 (Satosi Yosikawa)
(株)砂子組 正員 田尻 太郎 (Taro Tajiri)
(株)砂子組 非正員 成田 憲昭 (Kensyo Narita)
一二三北路(株) 非正員 石原 敬規 (Atunori Isihara)

1. はじめに

土工盛土の品質管理においては、a)試験施工に基づいた転圧回数をGPSを利用して確認する方法、b)砂置換法、c)球体落下法、d)衝撃加速度法、などを用いるのが一般的であるが、これらの方法には、1)管理方法、2)試験方法としてメリット/デメリットが混在する。

a)は面的視覚的なリアルタイム表示が可能で1)として優れているが、直接締め固め度を測定しないので、2)としては疑問が残る。b)は2)として問題ないが、点的な試験であり結果が出るのに数日を要し、1)に関して優れているとは言い難い。c)、d)は、2)は問題ないが、やはり点的試験である一方、ほぼリアルタイムに結果を得る事が可能である。

著者らは情報化施工とは、建設プロセスのうち施工から得られるICT電子情報を活用し、プロセス全体の効率化や品質確保を図るシステムと考える。また測定方法として衝撃加速度法¹⁾は非常に合理的と考え注目した。

その結果、GPS併用を前提に同方法により、情報化施工のコンセプトに沿う形で、面的リアルタイムに結果を出せる、締め固め測定機を試作した。

2. 締め固め測定機

締め固め測定機は、径30cmの車輪を配した架台をタイヤローラーによって曳かせるもので(図-1)、車輪には高さ2cmの突起を持たせている(図-2)。転圧走行中に発生する突起による架台の上下動を、加速度として測定し、衝撃加速度法を適用した。

3. 基礎式

(式 1.1)は、ヘルツの球面弾性接触理論による衝突衝撃力²⁾を落体便覧³⁾と同じ方針で簡略化したものである。

便覧との違いは、衝突体と被衝突体のヤング率、ポアソン比ともに等しいと仮定し、衝突体の密度を車輪も含めたSUS製の架台密度5 t/m³とした点にある。

$$P_{\max} = 1.530 \cdot \lambda^{2/5} (mg)^{2/3} h^{3/5} \quad (\text{式 1.1})$$

ここに、

$P_{\max}$: 車輪と地盤との最大衝突衝撃力 (kN) .

λ : 地盤のラーメ定数 (kN/m²) .

m : 架台の質量, 0.010 t.



図-1 締め固め測定機



図-2 締め固め測定機 車輪突起

g : 重力加速度 (m/s²) .

h : 車輪の落下高 (m) .

(式 1.1)を $mv^2/2=mgh$ を用いて速度で書きかえれば、

$$P_{\max} = 0.257 \cdot \lambda^{2/5} (mg)^{2/3} v^{6/5} \quad (\text{式 1.2})$$

を得る。ここに v (m/s) は、突起を乗り越えた車輪が地盤に落下する時の、車輪の持つ鉛直速度。

3. 転圧走行試験の概要

転圧走行試験は、締め固め済地盤と未転圧の道路盛土に対して行った。締め固め済地盤では未転圧盛土での(式 1.2)に基づく目標値を設定する目的で、2~6 km/h の範囲で試験走行を行った。未転圧盛土については、当現場の試験施工に基づく転圧回数は4回以上であったので、5回の転圧を行った。試験終了後に、両者に対して砂置換法を実施し、既往試験との整合性を確認した。

4. データ処理方法

図-3 は、2 km/h の試験走行 1 回目の架台の鉛直加速度の時刻歴である。図中赤線は GPS による速度で 1 秒間隔。加速度は 200Hz のサンプリングであるので、GPS 速度は 0.005 秒刻みで線形補間した。

図-4 は上記の FFT 結果で、図-5 は FFT 結果から 20Hz 以上はノイズとみなし、20Hz のハイカットで平滑化した時刻歴の拡大となる。同図から目視でサンプル波形の一つを選び、図-5 の時系列全体からサンプル波形と相互相関 0.9 以上の部分を抽出した。

図-6 は、それらを最大値で規格化し、ピーク位置を合わせて重ねたものである。既往の走行試験結果⁴⁾から、同図の赤枠部分がタイヤと地盤の衝突波形である。

衝突波形は全ての抽出波形で非常に良く一致し、特に波形継続時間は約 0.75 秒と一定になる。これらは地盤とタイヤの物性値の反映と考えられる。

5. 基礎式の適用

平均衝突時間 Δt を導入し、(式 1.2) を運動量の関係に書きかえれば、以下となる。

$$m_0 A = 0.257 \Delta t \lambda^{2/5} (m_0 g)^{2/3} (\beta V)^{6/5} \quad (\text{式 2.1})$$

ここに A は図-7 に示す面積で、衝突開始における加速度 $a_{\min} \rightarrow a_{\max} \rightarrow a_{\min}$ の間に、架台が地盤との衝突によって得た速度と考える。 m_0 は衝突時に有効な架台質量で、

$$m_0 = \frac{|a_{\min}|}{g} m \quad (\text{式 2.2})$$

によって定義する。(式 1.2) は自由落下する衝突体に基づくものであるが、車輪と地盤の衝突時には、車輪は突起によって支持されつつ衝突するので、完全な自由落下ではない。そこで式(2.2)を自由落下相当の有効な質量とした。ただし $0 < a_{\max}$ の場合は、無効データとした。

$$\Delta t = \frac{A}{a_{\max} - a_{\min}} \quad (\text{式 2.3})$$

は平均衝突時間を表す。 β は $\beta = 0.533$ の比例定数で、地盤に接地した突起が滑らないと仮定すれば、車輪径と突起高さから幾何学的に導かれ、 $v = \beta V$ 、 V : タイヤローラーの走行速度である。以上を(式 2.1)に代入すれば、

$$\frac{|a_{\min}|}{g} A = (\beta^{6/5} \lambda^{2/5}) \frac{0.257 \cdot |a_{\min}|^{2/3} V^{6/5}}{a_{\max} - a_{\min}} A \quad (\text{式 2.4})$$

を得る。

ここでは(式 2.4)の左辺を実測運動量、右辺の後半を有効運動量と呼び、得られたデータを $(\beta^{6/5} \lambda^{2/5})$ を比例定数とする比例関係で整理する。

6. 締め固め済盛土および未転圧盛土の結果

締め固め済盛土の全データを、図-8 に示す。ただし明らかな異常データは除いた。また図中の凡例はタイヤローラーのスピード計に基づくものなので、GPS 速度とは

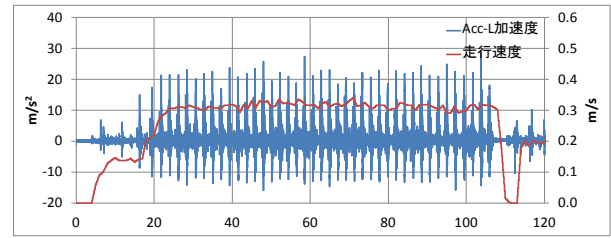


図-3 2 km/h 1 回目 時刻歴

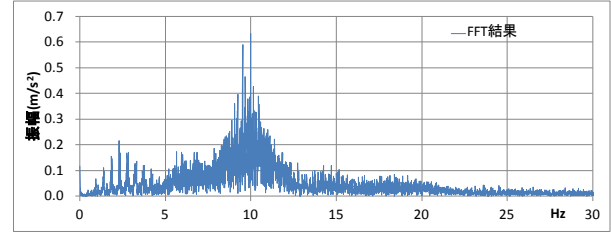


図-4 2 km/h 1 回目 FFT 結果

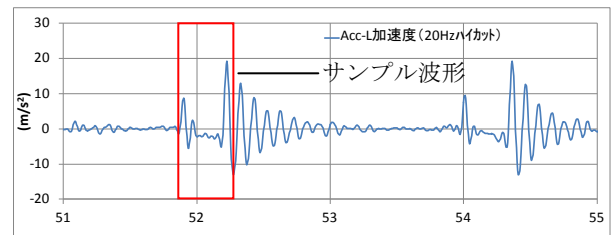


図-5 2 km/h 1 回目 時刻履歴 (20Hz ハイカット)

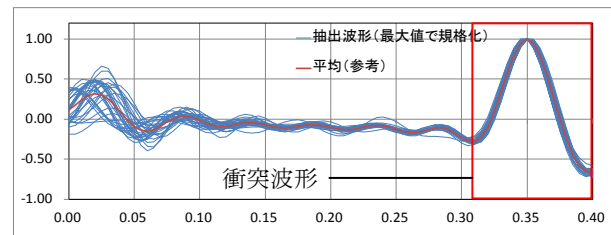


図-6 2 km/h 1 回目 抽出波形 (最大値規格化)

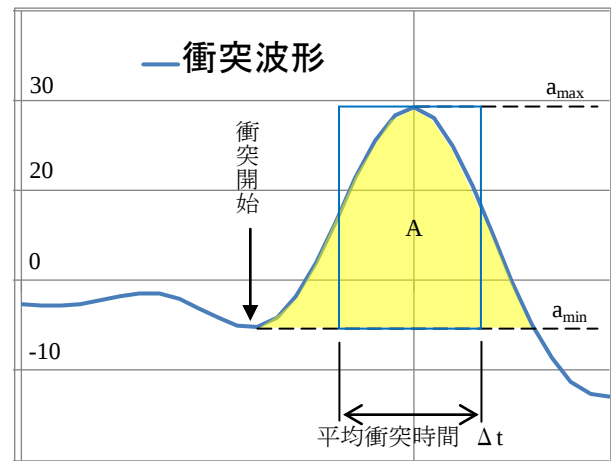


図-7 衝突波形

多少のずれがある。

y : 実測運動量, x : 有効運動量とすると全データの線形相関は $y = 20.536x$, R^2 値は 0.881 ($R = 0.94$) となり、非常に高い相関を示す。この回帰直線に未転圧盛土の結果を重ねたものが、図-9 である。未転圧盛土の結果は、明らかに締め固め済盛土よりばらつきが大きい。原因としては、通常転圧はブル等で敷き均した後に行われるが、

今回は未整地状態で試験を行った事、さらに実施日は雨上がり直後であったため、地表の不陸陸性と土中の含水比の増大によるラーメ定数の低下が大きく影響したと考えられる(図-10)。

しかしながら表-1 に示すように、各転圧走行時における線形相関は R^2 値で概ね 0.6 以上あり、かなり相関は高いと言える。そこで回帰直線の切片をバックグラウンドノイズとみなし、回帰直線が原点を通るように切片だけデータをシフトすると、図-11 となる。

図-11 の回帰直線は各転圧時のものであるが、締め固め不足と締め固まった状態とを明確に区別できた。締め固まったと考えられる転圧回数は3回以上で、当現場の

目標値4回以上と整合する。また4, 5回目の傾きが、3回目より僅かに小さい事に注目すれば、当方法は過転圧防止にも役立つと期待できる。

試験後に実施した砂置換法による結果は、締め固め済盛土 93.5%, 5 回転圧で 92.5% であり(規格値 90%) 既往試験との整合性も確認できた。

締め固め済盛土と転圧時の回帰直線の傾き比を、表-2 に示す。これはラーメ定数比の 0.4 乗に対応する。以上より今回の試験からは、当現場においては転圧回数 3 回以上、ラーメ定数に対応する傾き比で約 65% 以上あれば、十分であるという結果になった。

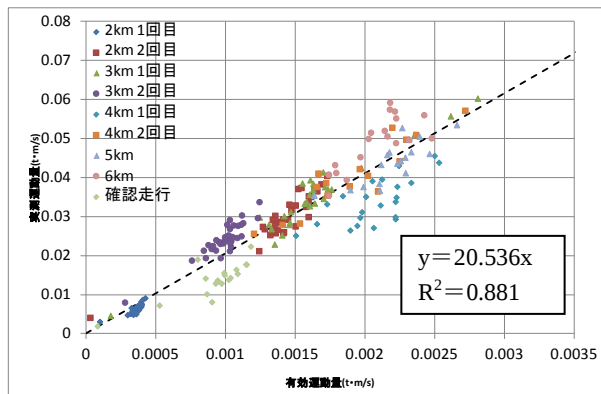


図-8 締め固め済盛土 全データ

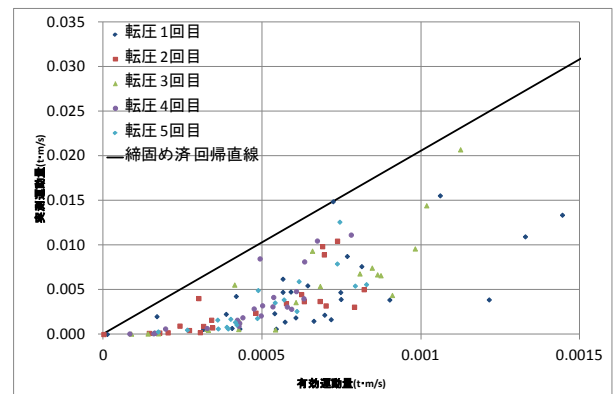


図-9 未転圧盛土



図-10 タイヤローラー走行跡

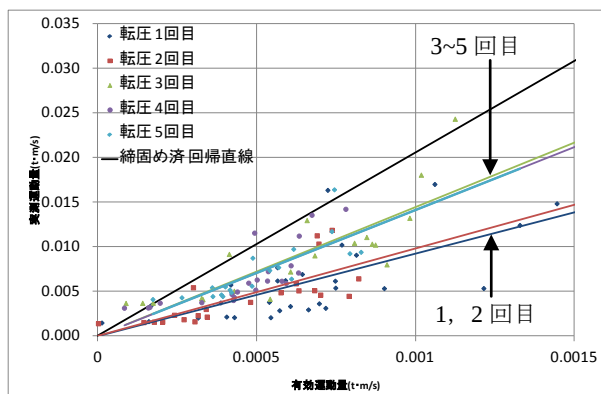


図-11 未転圧盛土 (データシフト)

表-1 転圧走行における線形相関

	傾き	切片	R^2 値
転圧1回目	9.253	-0.002	0.475
転圧2回目	9.796	-0.001	0.567
転圧3回目	14.455	-0.004	0.692
転圧4回目	14.116	-0.003	0.602
転圧5回目	14.131	-0.004	0.648

表-2 締め固め済盛土と転圧時の傾き比較

	傾き	転圧／締め固め済
締め固め済	20.536	1.000
転圧1回目	9.253	0.451
転圧2回目	9.796	0.477
転圧3回目	14.455	0.704
転圧4回目	14.116	0.687
転圧5回目	14.131	0.688

7. Application 化の試み

今回は、車輪と地盤との衝突波形を抽出するために相互相関係数の方法を用いたため、完全なデータ処理には数日を要したが、今後は車輪突起が接地した瞬間を機械的に検知する機構を導入する予定である。衝突波形の形状および継続時間はほぼ一定であるので、これにより波形抽出の作業は大幅に省力化され、情報化施工のコンセプトに沿う形でデータ処理作業を Application 化できると思われる。

例えば図-6 は、機械的検知機構の導入によりリアルタイムでタイヤローラーの運転台に表示する事は可能である。これにより運転者は、有効なデータを測定しているかを判断できる。また試験施工段階でキャリブレーションを事前に行なっておけば、図-9 もリアルタイム表示でき、図-11 は、少なくとも 1 回の転圧走行直後に運転者に提示できる。最後に GPS 併用を考慮すれば、図-12 のような視覚的判断を可能とする、面的でリアルタイムな画面表示も考えられる。

同図は別途行った試験走行を GPS データから図化したもので、図中の黒線はタイヤローラーの走行軌跡、色付の帯はタイヤローラー幅を模している。色の意味は、キャリブレーションにより決定した目標値 Std に対する、現在の測定結果の比を表す。帯の所々が歯抜けになっているのは、相互相関の結果無視された測定タイミングで、機械機構の導入により今後このようなタイミングはなくなると考えられる。

8. まとめ

- (1) 測定加速度自体の値は最大で 5G 程度と、衝突加速度としては小さなものであったが、落体便覧³⁾と本質的に同等なヘルツの球面弾性接触理論による衝突衝撃力式は、適用可能と考えられる。
- (2) 盛土の締め固め状態は、地盤のラーメ定数に対応する、実測運動量と有効運動量の線形相関の傾きの増大によって判断できる可能性がある。
- (3) 上記 2 つに基づいたデータ処理作業の結果を、情報化施工のコンセプトに沿う形で視覚的面的リアルタイムに表示する Application の開発は可能である。
- (4) ブル等で敷き均した未転圧盛土では、より高い精度の結果を得る可能性がある。
- (5) 種々の含水比、土質、粒度分布による結果への影響の調査は今後の課題であるが、試験施工時のキャリブレーションとの比較により結果を出せる点は、一貫できると思われる。
- (6) 当方法は、過転圧防止にもなると期待できる。

なお図-8 の傾きから推測される、締め固め済盛土のラーメ定数 λ は 12600 kN/m^2 となる。落体便覧³⁾に従いポアソン比を 0.25 とした場合、ヤング率は $0.4\lambda = 5000 \text{ kN/m}^2$ 程度で、道示下部工編⁵⁾の想定で N 値換算を行うと約 2 に相当する。当現場の道路盛土は粘性土質が主体で、N 値 2 は、不合理な値ではないと考えられる⁶⁾。

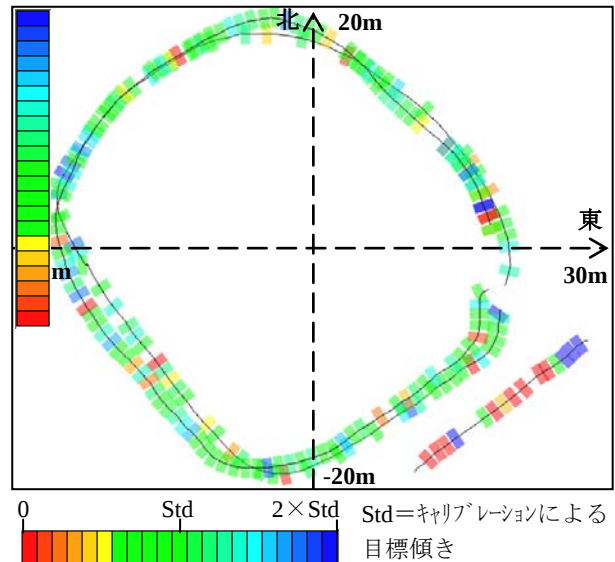


図-12 視覚的判断、面的リアルタイムな表示

[参考文献]

- 1) 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．
- 2) 落石の衝撃力評価式，池田憲二他，開発土木研究所月報 No. 558，1999 年 11 月．
- 3) 落石対策便覧，日本道路協会，2000 年 7 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，好川敏他，土木学会北海道支部論文報告集第 70 号，2014 年．
- 5) 道路橋示方書下部工編・同解説，日本道路協会，2013 年 6 月．
- 6) 元位置試験から推定される高速道路盛土の力学性能～ N 値と Vs ～，加藤喜則他，第 39 回地盤工学研究発表会，2004 年 7 月．