

締固め密度測定 of 衝撃落下速度とラーメ定数の相関

(株)砂子組	○正会員	西村友宏
勇建設(株)	正会員	岡本淳敏
(株)砂子組	正会員	幌村瑛奈
(株)砂子組	非会員	小塚東八
(株)砂子組	正会員	田尻太郎

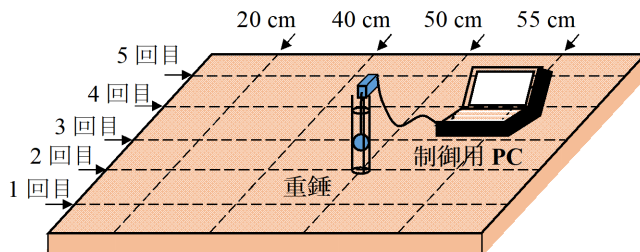


図-1 試験土場

1. 目的

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。筆者らは試験法として非常に合理的であり¹⁾、管理面での不足を測定の自動化によって容易に補えるものとして d)衝撃加速度法に注目し、試験方法の開発・測定を行ってきた^{4)~7)}。標準的な衝撃加速度法（寒地土木研究所）は径 6 cm、質量 4.5 kg の重錘を 40 cm の高さから落下させ、地盤との衝突加速度により締固め度を判定する。判定指標は衝突加速度の最大値である。しかしながら加速度最大値のばらつきは通常大きく判定結果への影響を否定できない。そこでより安定的な結果を得るために、衝突過程で発生する衝突運動量（衝撃落下速度）から地盤ラーメ定数を推定する方法を試みた。

2. 試験概要

試験はほぐした土で 4 m 四方の土場をつくり（図-1）、重錘落下高：20, 40, 50, 55 cm の 4 ケースで行った。同一落下高で 5 回測定しその平均値を用いる。土場は振動ローラーで 4 回転圧。全データ数は $4 \times 5 \times 5 = 100$ 、試験ケースは 20 となる。落下機構（図-2）は重錘落下を PC 制御で行い、重錘に装着した加速度計は容量 100G、測定周波数 1000 Hz である。地盤ラーメ定数の推定は、振動便覧式²⁾³⁾を当試験用にチューニングした、 $P = 2.322 \lambda^{2/5} v^{6/5}$ （式(1)とする）で行う。ここに $P(N)$ は衝突過程の最大衝撃力、 $v(m/s)$ は重錘の地盤への衝突速度、 $\lambda(N/m^2)$ が地盤ラーメ定数となる。 P は測定加速度の最大値 $a_{max}(m/s^2)$ と重錘質量 $m(kg)$ との積から得られるので、加速度時系列から v を取得すれば式

(1) から λ を推定できるが、 a_{max} のばらつきは通常無視できない。測定波形から得られる衝突運動量 $q(kg \cdot m/s)$ と a_{max} には強い線形相関があり、 q を a_{max} に相当するものとして式(1)に適用できる。測定波形（図-3）を数値積分すれば最小速度 v_{min} が衝突開始点、最大速度 v_{max} が衝突終了点と考えられる。その間の測定最大値が a_{max} ,



図-2 重錘落下機構

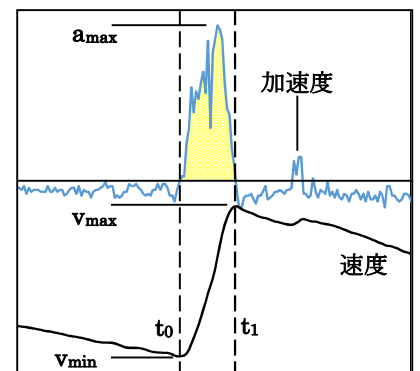


図-3 衝突過程

$P=m \cdot a_{max}$, $q=m(v_{max}-v_{min})$ である。 q と P の相関は図-4で、 P は $q/0.00813=P'$ (式(2)とする) で近似できる。相関係数は約 0.8 に達し非常に高い。この P' を用いれば、 q から式(1)を通じて地盤ラーメ定数を推定できる。

3. 試験結果

各転圧回数（未転圧含め 5 回）ごとの 4 ケースの落下高 5 回測定の平均を用いて結果を述べる（全 20 ケース）。式(1)から、 P はラーメ定数の 0.4 乗の 2.322 倍： $2.322 \lambda^{2/5}$ を比例定数として、衝突速度の 1.2 乗： $|v_{min}|^{6/5}$ に比例するので、式(2)で推定される P' を式(1)の P として用いれば、 P' と $|v_{min}|^{6/5}$ との相関をとれる。相関をグラフ化したものが図-5、それらの R^2 値を転圧回数ごとにまとめたものが図-6 である。図-5 の回帰直線の傾きは、転圧回数ごとのラーメ定数に対応している。衝突運動量から推定した図-5 では、未転圧と転圧 1 回のラーメ定数はほぼ等しく、2～4 回の転圧とは明確に区別でき、土場の必要転圧回数が 2 回程度で十分である事を示唆している。図-6 によれば、衝突運動量によるラーメ定数の推定は、転圧回数によらず 0.7 以上の安定した推移になる一方で、最大衝撃力による推定は変動が大きく負の相関係数が含まれる。これは原点を通る回帰直線を要求したためで、衝突速度の増加と逆向きに測定値が減少する傾向が混在する事を意味するが、原点を通る正の傾きを持つ回帰直線は理論的要請である。

以上より、ラーメ定数の推定値として衝突運動量によるものを採用すると表-1 となり、 N 値換算の値 ($E=2800N$) から、妥当な範囲にあると判断できる。

4. まとめ

締固め度試験である衝撃加速度法において、判定指標として衝突落下速度（衝突運動量）と地盤ラーメ定数を用いた結果、測定衝撃加速度を直接用いるよりも、より安定な結果が得られた。

[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) 落石対策便覧，日本道路協会，2017 年 12 月．
- 3) 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．
- 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，土木学会北海道支部論文集第 71 号．
- 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，同第 72 号．
- 6) 衝撃的挙動測定による土質密度測定法の評価と課題，廣上他，同第 73 号．
- 7) I C T 土工における過転圧防止に関する実証的考察，成田他，同第 75 号．

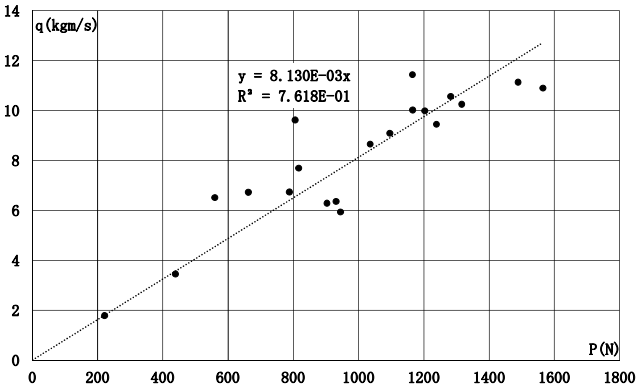


図-4 最大衝撃力と衝突運動量の相関

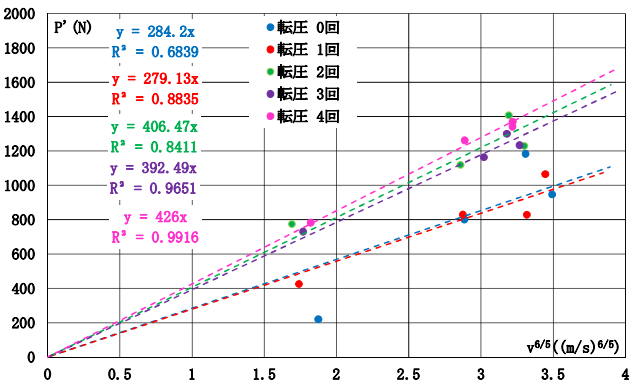


図-5 $v^{6/5}$ と P'

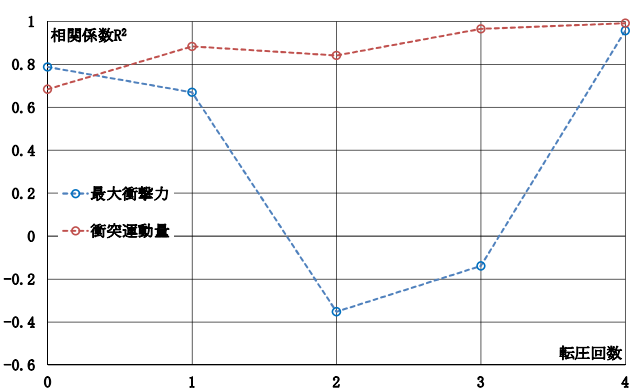


図-6 P , P' と $v^{6/5}$ の相関の転圧回数による推移

表-1 推定ラーメ定数(kN/m2)

転圧回数	0	1	2	3	4
ラーメ定数	166	158	405	371	456
N値換算	0.1	0.1	0.4	0.3	0.4