

締固め密度測定に資する重錘落下高と土のラーメ定数

Lame's constant of Soil and Fallen Weight for Compaction Density Measurements

(株) 砂子組	○正 員	西村友宏 (Tomohiro Nishimura)
勇建設(株)	正 員	岡本淳敏 (Atutoshi Okamoto)
(株) 砂子組	正 員	幌村瑛奈 (Ena Horomura)
(株) 砂子組	正 員	小塚東八 (Toyatu Kozuka)
(株) 砂子組	正 員	田尻太郎 (Taro Tajiri)

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)に問題はないが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。

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)}。寒地土木研究所の推奨する標準的な衝撃加速度法は図-1 に示すように、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ものである。しかしながら適切な重錘径や重錘重量の選択、落下高の設定の根拠に関しては明確化されていないと思われる。

質量と加速度の積である衝突力や質量と衝突速度の積である衝突運動量の観点から見れば、加速度、速度は落下高で決まるので、質量の大小に対して落下高の大小を調整すれば、ほぼ同等な結果が得られるものと考えられる。そこで本論文では、径 6 cm、質量 4.5 kg の重錘を用いて落下高を変化させる試験を行い、衝撃加速度法に最適な落下高を実験的に特定する事を試みた。また同時に、地盤定数としてより明確な指標と考えられるラーメ定数の推定を、加速度データから行った。

2. 試験概要

落下高試験は、ほぐした土で 4 m 四方形程度の土場をつくり、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 回の測定を行い、その平均値を用いる。図-2 に示すように 1 回の測定ごとに測定個所を手動で移動させた。土場は振動ローラーで 4 回転圧し、未転圧も含めて転圧ごとに砂置換法による密度試験もあわせて実施した。全データ数は $4 \times 5 \times 5 = 100$ である。

図-3 に示す落下機構は、重錘巻き上げ装置とデータロガーを持ち、重錘落下のスタートは PC 制御によって

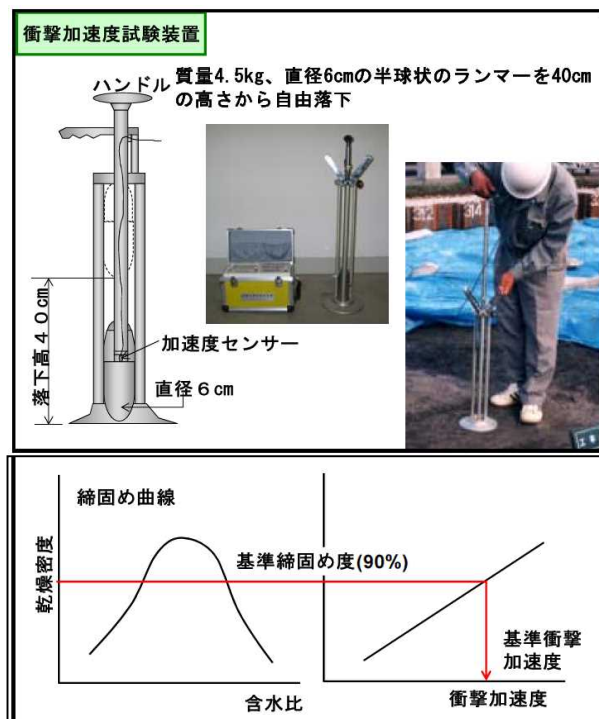


図-1 衝撃加速度法の概要

(Copy Right CERi COLD REGION)

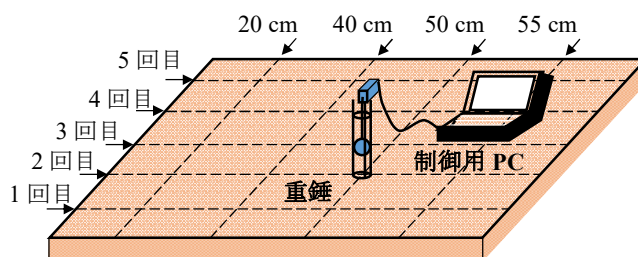


図-2 試験土場

行ったので、後述する加速度時系列の始まりは、正確に落下開始タイミングに対応する。重錘に装着した加速度計は容量 100G でサンプリング周波数は 1000 Hz である。

3. ラーメ定数推定式

落石対策便覧²⁾の落石衝撃力式(振動便覧式)は、ヘルツの静的球面弾性接触力公式を衝突過程に採用したもので、その前提を認めればいかなる現象にも適用可能と考えられる。衝突過程に同接触力を採用すれば、次式と

なる³⁾。

$$P = \left(\frac{4}{3}\right)^{2/5} \left(\frac{5}{4}\right)^{3/5} \left(\frac{E_1 E_2}{E_1(1-\nu_2^2) + E_2(1-\nu_1^2)}\right)^{2/5} \times \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}\right)^{1/5} \left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}\right)^{3/5} v^{6/5} \quad (1)$$

ここに E_1 , E_2 , ν_1 , ν_2 , R_1 , R_2 , m_1 , m_2 は衝突する 2 つの弾性球の弾性係数(N/m²)、ポアソン比、半径(m)、質量(kg)であり、 v は衝突速度(m/s)、 P は衝突過程における最大衝撃力(N)を表す。落体便覧と同様に球 1 を落下体(重錘)、球 2 を被衝突体(地盤)と考え、 R_2 , m_2 , $E_1 \rightarrow \infty$ の近似を行い $\nu_2 = 0.25$ として³⁾、 $m_1 = 4.5$ kg, $R_1 = 0.03$ m を用いれば、

$$P = 2.322 \lambda^{2/5} v^{6/5} \quad (2)$$

を得る。原理的には重錘の自由落下高から衝突速度 v を求め、測定された衝突最大加速度(m/s²)に重錘質量をかけて P を与えれば、地盤のラーメ定数 λ (N/m²)を推定できる事になる。

4. 測定加速度時系列の処理方法

図-4 に、転圧 0 回、落下高 $h = 0.5$ m の測定データの時系列の例を示す。横軸は時間で、縦軸は加速度と速度である。実際に測定されたのは青の加速度であり、黒の速度は初速を 0 として加速度時系列を数値積分した。速度の最小点から、 $t_0 = 0.402$ s で地盤に衝突したとわかり、衝突するまではほぼ等加速度落下であるものの、落下時間の理論値は 0.319 s であり実測値より短い。これは図-3 の落下機構の機械的抵抗の影響と考えられる。そこで等加速度の公式 $h = a_e t_0^2 / 2$ で有効な落下等加速度 a_e を逆算すると $a_e = -6.188$ m/s² となる。また等加速度ならば t_0 までの加速度平均 a_m は a_e に一致しなければならないが、 $a_m = -4.320$ m/s² となり、 a_e に一致しない。 a_m と a_e の差 $\Delta a = a_m - a_e = 1.868$ m/s² を加速度の基線補正值と考える。

加速度に基線補正を加え 2 回数値積分して $t = t_0$ 時点での変位 h_0 を計算すると、 $h_0 = -0.444$ m $< h = 0.5$ m となった。上述の加速度の基線補正は近似補正である事を考慮し、速度の平均補正として $\Delta v = (h_0 - h) / t_0 = 0.138$ m/s を落下初速度として加える。以上の加速度、速度の補正を行った結果が、図-5 となる。図-4, 5 を比べればわかるように加速度、速度の基線補正量は時系列全体に対して大きくはない。また補正後の結果として、加速度の主要動の終了時点(速度の最大点)を衝突過程の終了時と考えれば、最大速度 $v_{\max} = 0.333$ m/s は十分小さく、変位の結果からも貫入量は、重錘径 6 cm に対して約 2 cm と妥当な結果と思われる。補正後の地盤と重錘の衝突速度は $v_{\min} = -2.630$ m/s (補正前: -1.739 m/s) であり、自由落下の理論値: -3.131 m/s に近いものとなっている。

4. 最大衝撃力、衝突運動量

図-6 に衝突過程の模式図を示す。先に述べたように

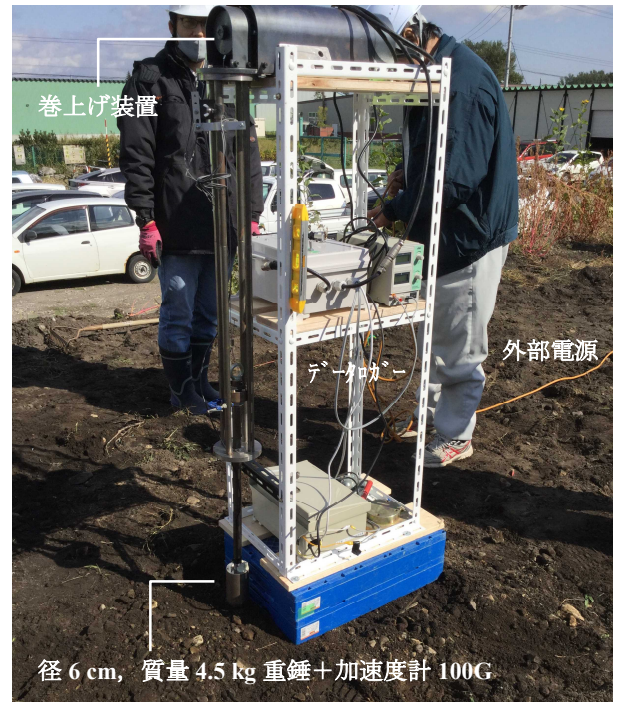


図-3 重錘落下機構

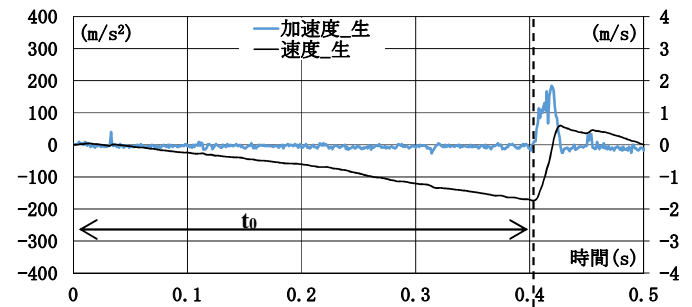


図-4 転圧 0 回、落下高 50 cm の例 (生データ)

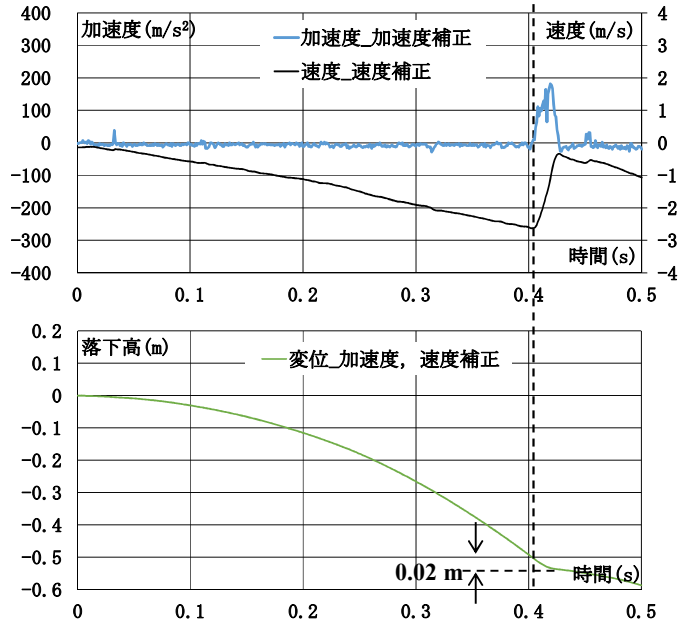


図-5 基線補正後

重錘速度の最小点 $v_{\min}$ の時刻 t_0 を地盤との衝突開始時刻、 t_0 以降の最大速度 $v_{\max}$ の時刻 t_1 を衝突過程の終了時点とみなす。最大衝撃力 P は $t = t_0 \sim t_1$ の範囲の最大加速度

$a_{\max}$ に重錘質量 m をかけ、 $P = ma_{\max}$ として計算した。
衝突運動量 q は区間 $t=t_0 \sim t_1$ 上の加速度グラフの面積
(図中ハッチ部) に対応し、 $q = m(v_{\max} - v_{\min})$ で計算できる。

5. 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回測定の前平均を用いて結果を述べる(全20ケース)。

図-7 に全ケースの最大衝撃力と衝突運動量の相関を示す。原点を通る回帰直線の傾きは 0.008 s で(ほぼ $t_1 - t_0$ の半分に対応)、相関係数である R^2 値は約 0.8 に達し高い相関を示す。これは、衝突時間は概ね非衝突体の材料特性で決まり、転圧回数や衝突速度などは大きくは影響しない事を示唆し、経験的に妥当な結果と考えられる。回帰直線を用い最大衝撃力を衝突運動量で近似すれば、

$$P' = \frac{q}{0.00813} \quad (3)$$

となる。

次に、式(2)を直接用いて地盤ラーメ定数を推定する際には最大衝撃力 P と衝突速度 $|v_{\min}|$ を用いる事になるが、式(3)が高い相関で成立する事を考えると、衝突運動量 q からの推定も可能である。

式(2)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(3)で推定される P' を式(2)の P として用いれば、 P' と $|v_{\min}|^{6/5}$ との相関をとれる。また測定された P には直接式(2)を適用し図示すれば、図-8, 9 となる。それらの R^2 値を転圧回数ごとにまとめたものが、図-10 である。

図-8, 9 の回帰直線の傾きは、転圧回数ごとのラーメ定数の推定と同じである(式(2))。衝突運動量から推定した図-9 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回程度である事を示唆している。最大衝撃力から推定した図-8 でも、よりばらつてはいるが、同様な傾向が見られる。

しかしながら図-10 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、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。

式(3)を介して衝撃力(衝撃加速度)と衝突運動量による計算は本質的に同等になるが、衝撃加速度のピーク付近は図-6 に示すように変動が激しくばらつくので、最大加速度を用いた場合は結果にもばらつきの影響が現れたと考えられる。

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($E = 2800 \text{ N}$)から、妥当な範囲にあると判断できる。

表-1 と、並行して行った砂置換による乾燥密度試験の結果との関係は図-11 となり、概ね良好な対応にある。

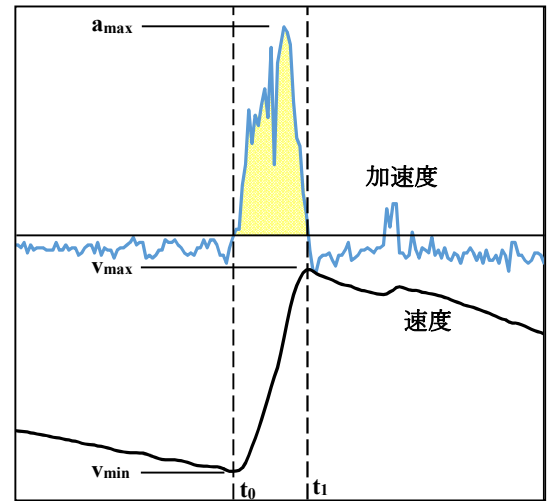


図-6 衝突過程

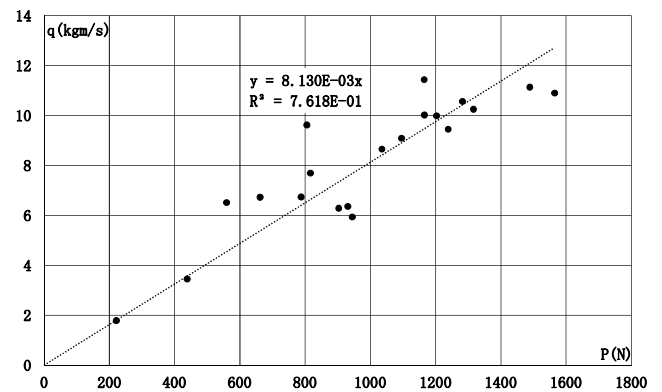


図-7 最大衝撃力と衝突運動量の相関

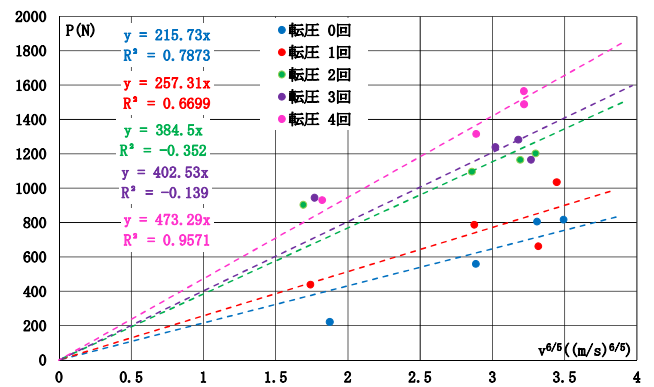


図-8 $v^{6/5}$ と P

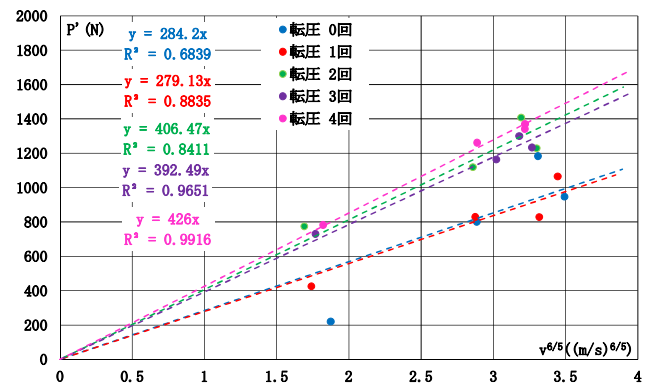


図-9 $v^{6/5}$ と P'

最後に当初の目的である重錘落下高の選定であるが、衝突運動量で算出した落下高ごとの推定値と、表-1の全体推定値を比較すると図-12になる。

全体推定値との離れが最も大きいのは落下高 20 cm と 50 cm のケースである。式(2)によれば完全な自由落下である場合、最大衝撃加速度（最大衝撃力）は落下高 h の 0.6 乗に比例するので、高 20 cm では標準高さ 40 cm に対して 65% 程度の値しか得られない事になり、測定値が小さく結果が安定しなかったと考えられる。50 cm の場合は、未転圧と転圧 2 回の推定値だけが全体推定値を大きく上回るので、地表直下の小礫などの影響が考えられ、大きな衝突速度が必ずしも良好な結果を導くとは限らない可能性も否定できない。

落下高変化による全体の推移は、落下高の増大とともに推定結果が安定する傾向にあるが、転圧回数による変化が最も平坦な落下高 55 cm では、他とは違い単調増加となっていることから、衝突点で測定対象である土を壊している可能性もあると思われる。

全体推定値と最も近い結果を与えたのは、標準高さである落下高 40 cm となった。

6. まとめ

- 1) 当試験では、径 6 cm、質量 4.5 kg の重錘を用いた衝撃加速度法における適切な落下高は、標準高さである 40 cm 程度となった。
- 2) 締固め度判定の指標として本質的な違いはないが、衝撃加速度を直接用いるよりも、その積分値である衝突運動量を用いた方が、より安定な結果が得られた。これはデータ処理上の実際上の問題であり、原理的には衝撃加速度を用いるのと同等であると考えられる。

[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 C-12，2015 年。
- 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，土木学会北海道支部論文集第 72 号 C-01，2016 年。
- 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，土木学会北海道支部論文集第 73 号 C-08 1-4，2017 年。
- 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，土木学会北海道支部論文集第 75 号 F-08，2019 年。

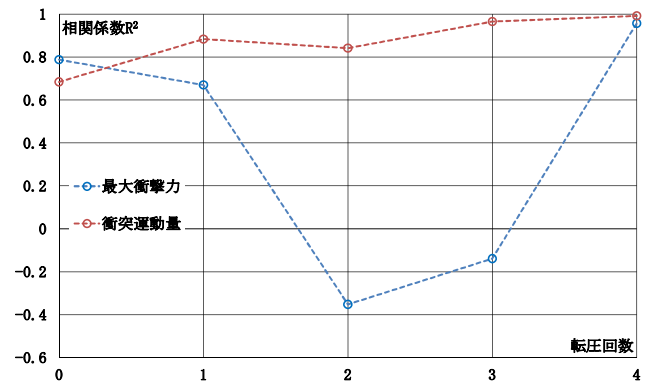


図-10 P, P' と $v^{6/5}$ の相関の転圧回数による推移

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

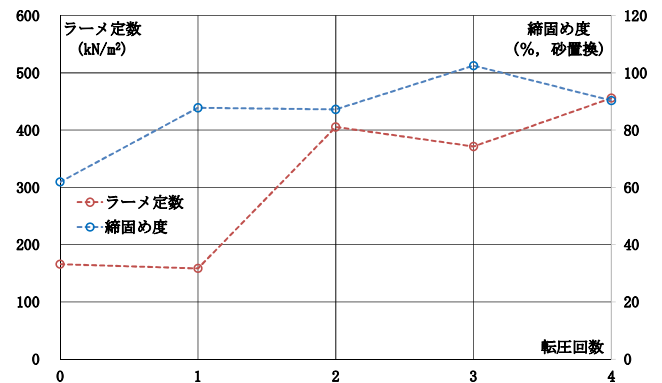


図-11 砂置換による乾燥密度と推定ラーメ定数

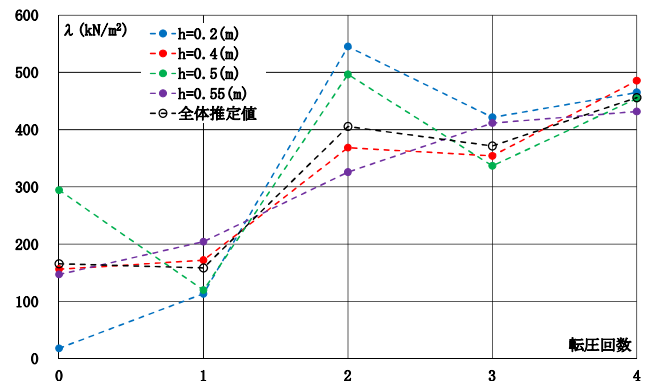


図-12 重錘落下高ごとの全体推定値の比較