

盛土転圧の情報化施工に資する締め固め測定器の開発

Development of the compaction machine by information-oriented construction to level the embankment

(株)砂子組 ○正会員 好川 敏 (Satoshi Yoshikawa)
 (株)砂子組 非会員 男澤 真樹 (Masaki Ozawa)
 一三北路(株) 正会員 坂下 淳一 (Jyunichi Sakashita)
 (株)砂子組 非会員 千葉 大樹 (Hiroki Chiba)
 (株)砂子組 正会員 佐藤 昌志 (Masashi Satou)

1 はじめに

情報化施工は、建設事業の調査、設計、施工、監督・検査、維持管理という建設生産プロセスのうち「施工」に注目して、ICTの活用により各プロセスから得られる電子情報を活用して高効率・高精度な施工を実現し、さらに施工で得られる電子情報を他のプロセスに活用することによって、建設生産プロセス全体における生産性の向上や品質の確保を図ることを目的としたシステムである。基本的にはTS（トータルステーション）をベースにマシンコントロール、マシンガイダンスの機器を用いて指定した3次元座標に即して出来形を構築するものである。

この中で、特に土工での盛土に関する出来形の品質管理としては試験施工をもとにして転圧回数で行っている。一方、締め固め管理の方法は、球体落下、RI法、衝撃加速度法、および砂置換法が用いられており様々なメリットやデメリットがある。衝撃加速度法は錘を落下させた盛土にめり込むときの加速度を計測し締め固め管理を行う極めて簡便で合理的な方法である。著者らは、この原理を幅広くとらえ多様な土質にも適用出来るように改良したほかGPSとの連動も可能にした

2 開発中の締め固め測定器

一般的に言う「締め固め」とは、同じ土を同じ方法で締め固めても、その土の含水比によって締め固めの程度は異なり、締め固めた土の乾燥密度とその含水比の関係をグラフに描くと通常は凸な曲線となる。この乾燥密度-含水比曲線を締め固め曲線といい、そのピーク点の含水状態において土が最も締め固まることを示す。この試験はピーク点の含水比(最適含水比 w_{opt})とそのときの乾燥密度(最大乾燥密度 ρ_{dmax})を求めるものである。

現在締め固め試験として用いられているものを以下に示すが一般的に用いられているものが砂置換方法である。

1) 砂置換試験

締め固めた土の乾燥密度を計ること盛土の締め固め度合いを把握する試験である。盛土の出来形管理では、乾燥密度/最大乾燥密度の比が路体で90%以上、路床で95%以上と規定されていて最も一般的な方法である。

(適用土質：砂、火山灰以外)

2) 衝撃加速度試験(寒地土研開発)

物体が衝突したときに発生するエネルギーは、物体が固いほど衝突エネルギーは大きくなる。このエネルギーを加速度として土の締め固め具合を測定する試験が衝撃加速度試験である。重さ4.5kg、直径6cmの半球状のランマーを落下させたときの加速度の大きさを測定して盛土施工の品質管理に利用する(写真-1)。

適用土質：自然含水比が最適含水比より1.4倍以上は不適 合格基準：I値63G以上



写真-1 衝撃加速度試験

3) 球体落下試験

砂や火山灰は締め固めにくいので、この層の施工管理試験として球体落下法が使用されている。直径9cm、重さ4kgの球体(半球)を60cmの高さから落下させ、落球痕の深さ(D値)から締め固め度合いを計測する。凍上抑制層などの締め固め確認で利用されている。

適用土質：砂、火山灰 合格基準：D値6.3cm以上

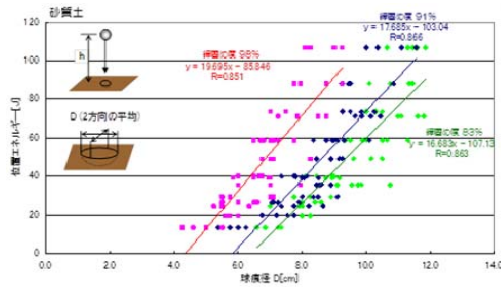
4) RI試験

放射性同位元素を利用して土の『湿潤密度』、『含水量』を測定する。得られた結果を逆算することで乾燥密度が得られるため、リアルタイムに現場管理ができる。ただし、試験に先立ちキャリブレーションが必要である。機械は撒き厚30cm~50cmを標準としているため、それ以上の撒き厚の場合は別途機械が必要となる。

5) 球体落下痕

砂質土、礫質土ともに、落球痕(直径)と締め固め度合いに高い相関関係が認められる。痕跡に関して砂質土・礫質土において落球痕の傾向にそれほど大きな違いは認められない(近似直線の傾きに大きな違いがないことより)が落球痕(直径)の違いは、締め固め度に依存している(室蘭開発建設部 実験より抜粋 図-1参照)。

【砂質土】



【礫質土】

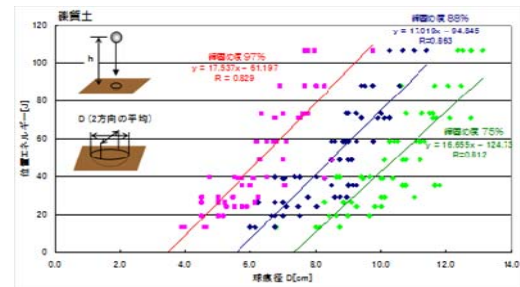


図-1 球体落下試験の相関図

3 今回開発した締め固め測定器の概要

今回開発した締め固め測定器は、寒地土木研究所が開発したものを連続に計れるように改良したものである。現地のキャリブレーションが必要十分条件であるが転圧前の締め固め密度を測るのは砂置換法では可能であるが、現場では敷き均しと同時に一度のみ転圧を行う事になるので密度がでた部分での閾値（しきいち）を統計で求める必要がある。

また、本機はリアルタイムで締め固め密度を求めることと情報化施工の品質管理を主目的としてGPS連動でタイヤローラー等に取り付けるのが特徴である。すなわち、砂置換法で測定した場合結果が出るまで盛土が出来ないという事態を解消する目的もある。

具体的メカニズムとアウトプットされる値（加速度）を模式的に書くと図-2 のとおりで落下高さは小さいものの（2種類の高さを設定）加速度が増幅されて出るように工夫している(写真-2)。

また、理論的背景は衝撃のヘルツの式で無限の大きさの球に有限の大きさの球が接触又は衝突することを利用している。ヘルツの式は理論的には高さ 13.6m からの落下

に適用される中で開発中の締め固め測定器は「無限」と「有限」、および「高さ」という項目では十分に適用出来るものと考えられる。

すなわち衝撃力は、

$$q = k \cdot \Delta t \cdot \frac{2.108}{2^{3/5}} m^{2/3} g^{1/15} \lambda^{2/5} v^{6/5}$$

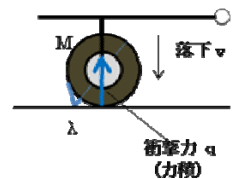


図-3 衝撃力

で表され力積で考えれば図-3 の q を実験的に求めることになる。これはキャリブレーションデータから算出することになるが、落石対策便覧と同様に地盤の固さ λ を常数として最終的に求めることになる。

4 実験結果と考察

4-1 試験走行データ

試験走行で得られたデータを具体的に示すと図-4 の様になる。赤い波形は落下高さが大きいもので、緑の波形は車輪が大きく落下高さが 2cm で小さいものである。図に示したとおり力積 q に影響するものが λ と速さ v である。1 秒間のデータサンプリングは 200Hz、すなわち 0.005 秒に 1 データ取っていることから 92 秒のデータである。14 秒までがタイヤローラーの加速時、それ以降は平均時速 3.5km/h で走り 70 秒後から減速しているデータである。地面の平坦性も計測しているがここでは割愛する。前述した式のとおりであるがタイヤローラー速度 = 落下速度に依存しているが、落下高さが大きい方が加速度は出ている（15～20gal）ほか後述するが均一性があると見て取れる。

ここでの課題は、締め固め密度がある地盤でも加速時、減速時は加速度が小さく出ることであるが速度と出力加速度のキャリブレーションを行っておけば補正は十分可能である。

図-5 は時速 2km/h 時の波形を拡大し車輪の突起部が地面に接触してから落下するまでの動きを説明したもので図中の 3 波形をみても落下 5cm 程度でも波形はほぼ等しい形状を表しているのが見て取れる。先に示した式から締め固めの衝撃加速度さらに大きく出すためには突起部の段差を大きくすることと、速度を速くすることであるが落下高さをこれ以上にするとタイヤのリバウンドが大きくなり 24 秒から 24.7 秒、すなわち 0.7 秒間の波形が重なってしまうことが考えられることから好ましくな

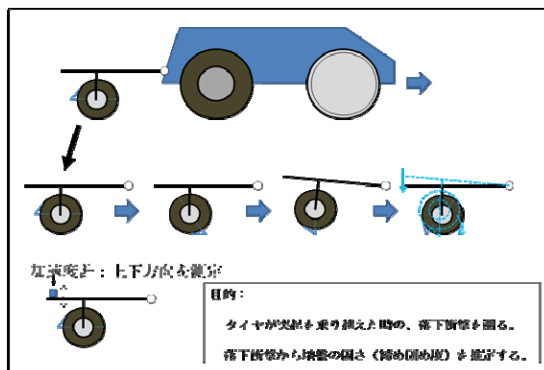


図-2 模式図



写真-2 開発中の測定器

くタイヤローラーに付けたパソコンで波形モニター
が見づらくなる可能性があることから落下高さは5cmで十
分と考えられる。

また、図-6 の赤線は各波形の単純平均値を求めたも
ので、締め固め密度を計測するにおいては十分な精度で
あると考えられる。

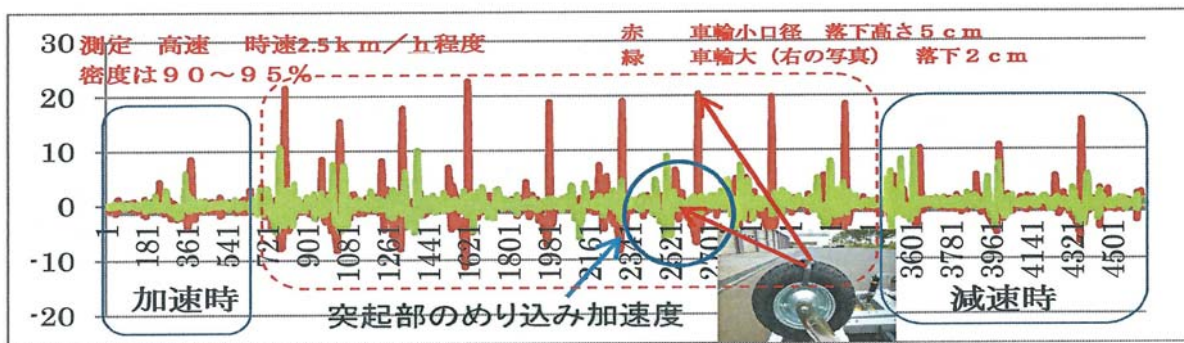


図-4 走行時の波形

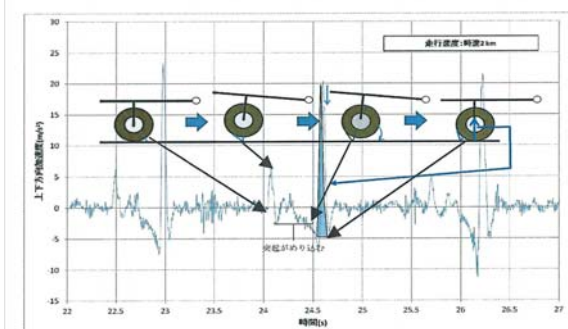


図-5 衝撃波形の特性

図-6 は時速 2km/h 時の上記の波形の赤枠の波形を拡大
して重ね合わせたものである。0~0.1 秒までは写真-3
に示した鋼製の突起の赤丸部が乗り上げるときの波形で、
0.1~0.45 秒までが突起が地盤にめり込むときの加速度
波形、さらに 0.45~0.65 秒までが写真-3 の青い突起部
が落下し若干であるがリバウンドする波形である。

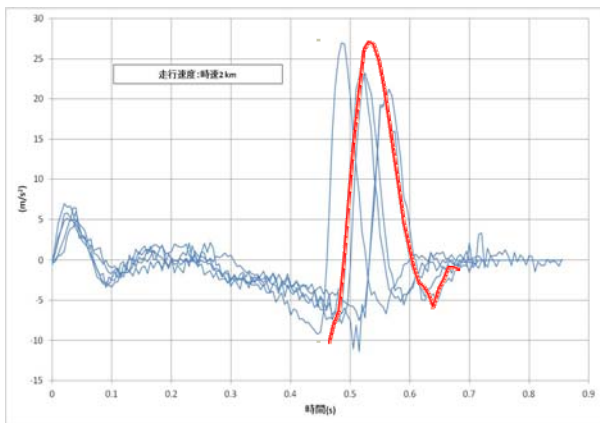


図-6 波形の重ね合わせ



図-7 は走行速度を変えた場合の先の式に示した右辺
の $k\Delta t$ を除いた値と左辺、すなわち衝撃力（厳密には
衝撃力とそれが作用している時の時間）で締め固め密
度が 90%以上ある箇所において 18 回の走行データ用い
て締め固めの程度、すなわちラーメ定数に実験から求め
た速度補正を加味した値を掛けた図表で、端的に述べ
ると衝撃加速度 = 衝撃力 = 締め固め密度はヘルツの式
のタイヤの質量 × 走行速度にほぼ比例し、その相関係
数は 0.96 で寒地土木研究所が開発したものと同程度
の精度を有しているということである。

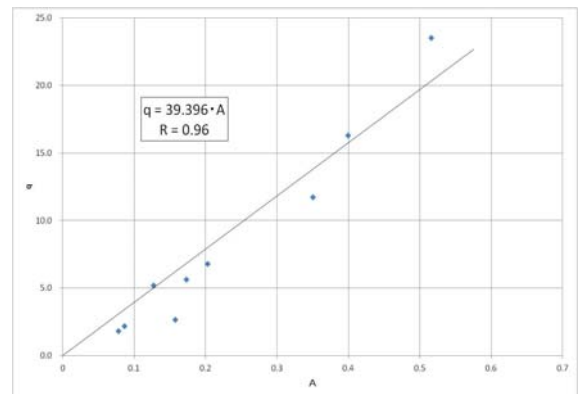


図-7 衝撃力と力積の相関図

4-2 極度に締め固まった道路上での波形特性

施工上において締め固めを行っている状況ではなく、
極度に締め固まった状態、すなわち感覚的ではあるがN
値が 50 以上と見られる状態の河川堤防の管理用道路
（敷き砂利あり）での走行実験を試みた。目的としては、

- 1) 突起部のめり込みの波形が現れるかどうか
- 2) 車輪の大小による波形の形状と特性

である。図-8 に収録した波形の一部を示した。

図の赤枠は車輪が大きい方の波形である。砂利道であ
ることから 352 から 487 までのデータは異常値であると
推察される。この中で大きい方の車輪が落下した後の減
衰波形が比較的良好に出ていることから必ずしも落下時
の加速度が大きければ良いと結論づけるのではなくキャ
リブレーション時にどのような特性波形がでるかの再現性

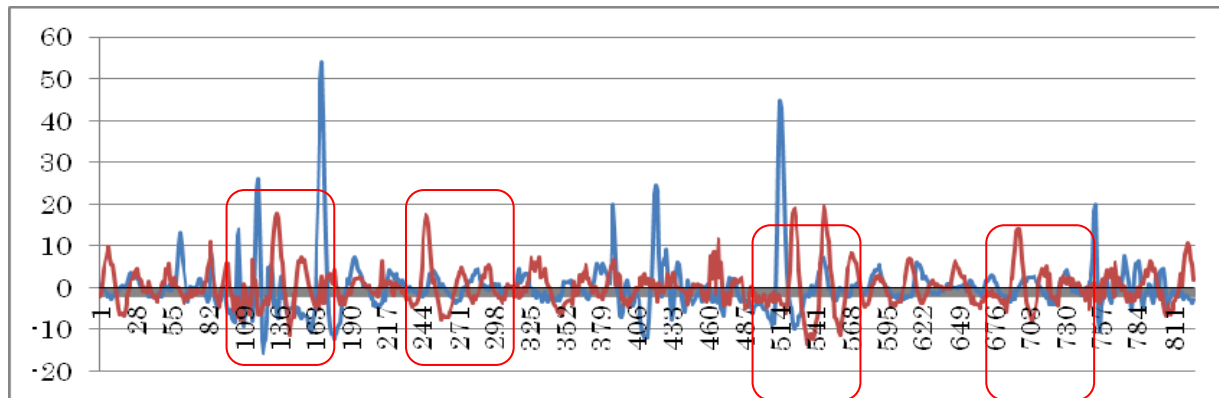


図-8 道路走行時の波形（特に減衰波形）

も重視する必要がある。図に示した場合においては車輪が小さかつ落下高さを重視するよりも、落下高さが小さくても波形が認識しやすい方を選択するのも一案である。

5 まとめ

情報化施工が採用されてから多くの年月を経ている状況とは言い難い中で、施工機械のみに着目して改良されても省力化とは言いにくい。特に盛土に関しては締め固め密度の測定に時間を要すると調査の結果を待たなければならないのは不合理である。すなわち、情報化施工は品質管理をリアルタイムで行わないと施工効率は上がりにくいと考えられる。

このことから、締め固め密度測定を 10 分程度で計れる寒地土木研究所で開発された衝撃落下加速度による測定法や重錘落下の痕跡を測る方が 1000 m³に一回砂置換法で正確に求めるより品質確保では良いという考え方も成り立つ。この様なことから締め固め時にリアルタイムで密度の傾向を測定できる方式を考えその実験を行った。その結果、

- 1) 車輪に突起をつけて車輪の落下時の加速度を測る方法は寒地土木研究所の研究成果を基本としたもとの不合理ではないと考えられる。
- 2) 今回の方式では落下時の加速度は、落下高さおよび車輪の回転速度に依存することがデータとしてとれた。

3) 加速度計で計測するのは衝撃加速度で寒地土木研究所で研究されている衝撃荷重算定のヘルツの算定式から求まるもので土質を介在させても適用出来るものと考えられる。

4) 実験の結果、速度依存に関わるものとして車輪の回転速度（試験器を引っ張る速度）を様々変えて実験を行ったところヘルツの式のラーメ定数を求めることに帰着した。

5) 速度と衝撃加速度の関係は相関係数 0.96 で非常に相関性が高いことから論文で紹介した方法は適用出来るものとする。

6) どのような場合でも重要なことは現地でのキャリブレーションで、ここで述べた方法を適用するには波形の何を重んじて品質管理ができるか十分検討する必要がある。

6 あとがき

現場を提供して頂いたとともに適切な指導を頂いた札幌開発建設部千歳川河川事務所の皆様に感謝いたします。

参考文献

- 建設マネジメント技術 2014.4
衝撃加速度による盛土の品質管理方法