

交流のひろば/agora—crosstalking—



# 土工構造物施工における 土工用振動ローラの最適利用に向けて

## 締固め性能と走破性を基軸とした土工機械の評価

福田 智行

本稿では、近年の河川堤防決壊を契機として再認識された土工構造物の品質確保の観点から、土工用振動ローラの締固め性能と走破性について試験・分析を行った結果を報告する。試験の結果、土工用振動ローラは基準となる締固め曲線を上回る性能と、軟弱地盤条件下での良好な走破性を示すことが確認された。

キーワード：振動ローラ，締固め性能，走破性，コーン指数

### 1. はじめに

土木工事において、土の締固めは構造物の品質を確保する上で極めて重要な工程である。特に2019年の記録的大雨による河川堤防の決壊事例では、堤防の強度不足が原因の一つとされており、改めて締固めの重要性が認識されている<sup>1)</sup>。土工構造物において、十分な締固めを行うことは、構造物の強度や安定性を確保する上で不可欠である。土工工事では、土の締固め度合いを「締固め度（現場で測定した土の乾燥密度を室内試験で求めた最大乾燥密度で除した百分率）」という指標で管理しており、この締固め度はせん断強度や透水係数等の力学特性と密接な関係があることが報告されている<sup>2)</sup>。施工規模や土質条件に応じて、適切な締固め機械を選定し、所要の締固め度を確保することが重要となる。

土工用振動ローラは、道路・堤防・空港・ダムなどの造成工事の締固めに多用されている機械である。このように現在では土木工事に不可欠な機械となっている振動ローラであるが、その発展は1960年代初頭に遡る。1960年代初頭は土工用牽引ローラ、シングルドラム式歩行ローラが主流であった。1970年代以降、油圧モーターの導入により機械設計が簡素化され、振動周波数、移動速度を必要に応じて調整できるようになり、締固め効率が向上した<sup>3)</sup>。

土工工事における振動ローラの使用において重要となるのが、走破性と締固め性能の両立である。一般的な土工工事では良好な土質材料を使用するため、走破性が問題となることは少ないが、堤防工事では不透水性確保のため細粒分の多い土質材料を比較的高含水比

で施工することがあり、この両立が特に重要となる。また、近年では、締固め管理方法の高度化が進められている。特に、振動ローラによる締固めが、基準となる締固め度より高い結果を示すことに着目し、施工含水比を最適含水比よりも乾燥側とすることで、現場での密度を高め、盛土の遮水性や強度を向上させる新たな管理方法が提案されている<sup>4)</sup>。このように、最近の締固め管理方法を適用する場合にも、機械の締固め性能を有効に使うために、機械の特性を十分に把握しておくことが重要である。

本稿では、土工工事現場でも使用される舗装用振動ローラとの違いを含め、土工用振動ローラの種類、そして当社社内の締固め試験結果として締固め性能と走破性について述べる。これらの特性を理解することは、適切な締固め機械の選定と、含水比管理、締固め度管理、施工効率の向上につながり、土工構造物の品質向上に寄与するものと考えられる。

### 2. 土工用振動ローラと舗装用振動ローラの設計思想と特性の違い

写真1に示す土工用振動ローラと舗装用振動ローラは同じ振動ローラであるが、使用目的に応じて設計思想が大きく異なる。主な違いは、起振力、振動数、振幅、および駆動方式にある。

土工用振動ローラは、厚い土層を効率的に締固めることを目的としているため、大きな起振力と振幅を特徴とする。例えば、運転質量12t級の土工用振動ローラでは起振力が250kNを超え、振幅が2mm前後であるのに対し、4t級の舗装用コンパインド振動ロー



写真一 土工用・舗装用振動ローラ

ラでは起振力が 35 kN 程度、振幅が 0.4 mm 程度と大きな差がある。一方、振動数については、舗装用が 50 Hz 以上であるのに対し、土工用は 30 Hz 前後と低く設定されている。

また、土工用振動ローラは、軟弱地盤や不陸な現場での作業を想定し、高いけん引力と走行性を確保するため、前後輪駆動方式を採用し、後輪には専用のラグ付タイヤを装備している。これに対し、舗装用振動ローラは、舗装面の仕上げと平坦性を重視するため、後輪には平滑なタイヤを採用している。

このような設計上の違いは、締固め性能にも影響する。土工用振動ローラは、現場で基準となる締固め度を上回る締固め性能を示すのに対し、舗装用振動ローラでは、同試験の締固め曲線を下回る結果となっている。これは、土工用振動ローラが深層部まで効果的な締固めを可能とする設計となっていることを示している。

以上のように、土工用振動ローラと舗装用振動ローラは、その使用目的に応じて異なる特性を持つよう設計されており、それぞれの用途に適した性能を発揮できるよう工夫されている。

### 3. 土工用振動ローラの種類とその使用場所

土工用振動ローラの代表的な機種として、運転質量違いで 5 t、12 t、20 t 級がある。

5 t 級は、国内で販売されている機種のほとんどが、前輪にパッドフット（タンピング）を装備したタイプで、その表面には多数の突起が付いている。突起の先端に荷重が集中することで高い転圧効果が得られ、特に粘性土の締固めに効果を発揮する。このため、ため池工事など、細粒分を多く含む材料の締固めに適している。

12 t 級の代表機種は、前輪に平滑な振動輪を装備した土工用振動ローラである。主にダムや堤防など、強力な締固めが必要な場面で使用される。振動機構と適

度な機械重量の組み合わせにより、効率的な締固めが可能である。

20 t 級は、高速道路、空港、大規模造成、ダム等の盛土工事向けに開発された大型機種である。12 t 級以上の締固め能力を有し、大規模土工事での高い施工効率を実現する。特に深層部の締固めに優れており、厚層の盛土材料を効率的に締固めることができる。

機種を選定は、施工規模、要求される締固め度、土質条件、含水比条件などを総合的に考慮して行われる。特に、施工層厚と要求される締固め度は、機種選定における重要な要素となる。

### 4. 締固め性能と走破性に関する室内試験結果と評価

#### (1) 試験条件

締固め性能と走破性を確認するための試験は、コンクリート製の専用試験ピット（長さ 20 m×幅 3 m×深さ 0.95 m）で実施した（写真一）。供試土は細粒分まじり砂 {SF} を使用し、その粒度組成は礫分 4.8%、砂分 52.6%、細粒分 42.6% である。また、供試土の物



写真二 専用ピットでの締固め試験状況

表一 1 供試機械の仕様

機種名	運転質量 kg	締固め幅/ 履帯幅 mm	起振力 (試験時) kN	締固め 性能試験	走破性 試験
土工用振動ローラ					
SV-20t	19,980	2,130	343		○
SV-12t	12,000	2,130	255	○	○
SVT-5t	4,770	1,370	72	○	○
舗装用振動ローラ					
TW-4t	3,500	1,300	34.3	○	○
タイヤローラ					
TZ-12t	12,330	2,275	-		○
ブルドーザ					
D51-14t	13,820	710 × 2	-	○	○

理的特性として、最大乾燥密度は  $1.947 \text{ g/cm}^3$ 、最適含水比は 12.6% であった。

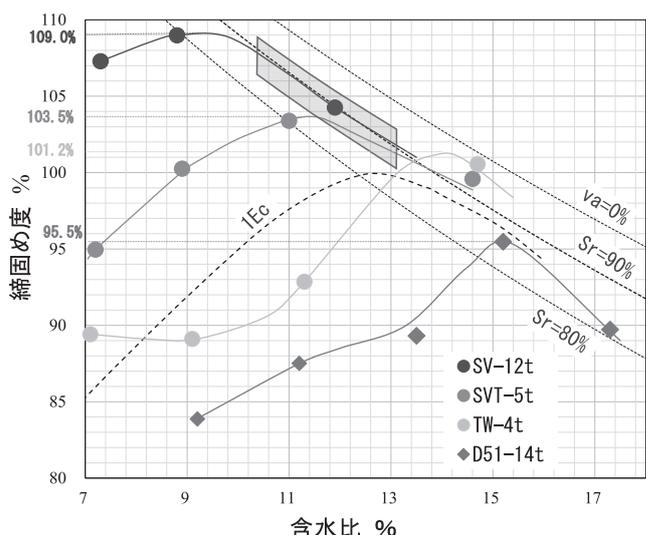
試験に使用した機械の仕様を表一 1 に示す。締固め性能試験では、土工用振動ローラ 2 機種 (SV-12t, SVT-5t)、舗装用振動ローラ 1 機種 (TW-4t) を選定した。また、比較機としてブルドーザ (D51-14t) を加えた。走破性試験は前述した機種に加え、土工用振動ローラ 1 機種 (SV-20t)、舗装用タイヤローラ 1 機種 (TZ-12t) を加えた。

(2) 締固め性能

締固め性能の評価は、含水比の異なる土で締固めを行い、その結果を含水比と締固め度の関係として表した締固め曲線によって行われる。この締固め曲線からは、最大締固め度 (以降,  $Dc_{max}$ ) と最適含水比 (以降,  $w_{opt}$ ) が得られるとともに、空気を含まない理想状態を示すゼロ空気間隙曲線 ( $v_a=0\%$ ) との関係も把握できる。現場では高い締固め度が要求されること、また含水比にバラツキが生じることを考慮すると、締固め機械による締固め曲線は高い位置にあることが望ましい。さらに、基準となる室内突固め試験から得られる締固め曲線 (以降,  $1Ec$ ) との比較も、重要な評価指標となる。

試験結果図一 1 によれば、土工用振動ローラ SV-12t は  $Dc_{max}$  が 109% に達し、SVT-5t も 103.5% を記録した。これに対し、舗装用振動ローラ TW-4t は、 $w_{opt}$  の湿潤側でのみ  $1Ec$  を上回り、 $Dc_{max}$  は 101.2% に留まった。比較対象としたブルドーザ D51-14t は、全ての含水比において  $1Ec$  を下回り、 $Dc_{max}$  は 95.5% であった。特に  $1Ec$  の乾燥側では、土工用振動ローラ SV-12t・SVT-5t との性能差が顕著に表れている。

各機種の締固め性能の差異は、機械から地盤に与える圧力の違いに起因している。振動ローラは自重と起



図一 1 各締固め機械の締固め曲線

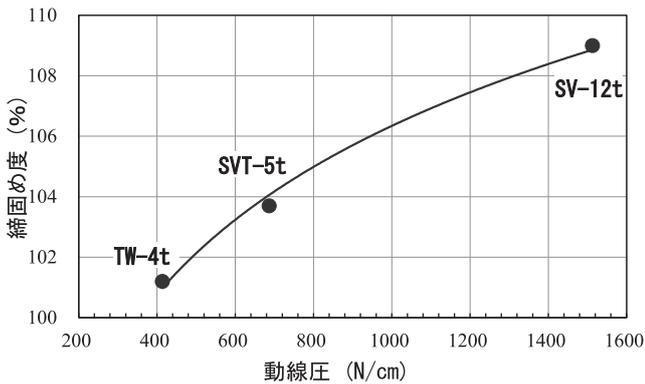
振力を組み合わせて締固めを行うのに対し、ブルドーザは自重による履帯接地圧のみに依存するためである。また、振動ローラの中でも、起振力と振幅を大きく設定している土工用振動ローラの方が、より高い締固め性能を発揮する。

近年、振動ローラの締固め曲線が  $1Ec$  を上回ることに着目した新しい締固め管理方法が提案されている。従来、現場での含水比は  $1Ec$  の  $w_{opt}$  より湿潤側に設定されてきた。これに対し、新たな管理方法では施工含水比を  $1Ec$  の  $w_{opt}$  よりも乾燥側に設定することで、現場での密度と飽和度を高め、盛土の遮水性や強度の向上を図るものである。具体例として、SV-12t を使用する場合、図一 1 に示す平行四辺形の範囲内で締固めを行うことにより、高い締固め度と遮水性を確保することが可能である。

これまで述べたとおり、締固め曲線は締固め性能を把握する上で最も有効な指標であるが、この締固め曲線を得るには多大な労力を要する。そこで、振動ローラのカatalogに記載されている動線圧が締固め性能を判断する簡便な指標となることを示したい。動線圧は、振動輪の軸重量 ( $G$ ) と起振力 ( $F$ ) の和を締固め幅 ( $B$ ) で除した値として定義される。本試験で得られた  $Dc_{max}$  と動線圧の関係を図一 2 に示す。図に示されるように、動線圧と  $Dc_{max}$  には相関関係が認められるため、現場条件に応じた振動ローラの選定において、動線圧を指標として活用することができる。

(3) 走破性

走破性の評価には、地盤の支持力を示すコーン指数 (CI:Cone Index) を用いた (写真一 3)。コーン指数は、円錐形のコーンを地盤に押し込んだ際の単位面積あた



図一 動線圧と締固め度の関係



写真一 3 コーン指数測定状況

りの貫入抵抗値で表される指標であり、この値が高いほど地盤が固く、機械の走破性が良好となる。本試験では、異なるコーン指数を持つ3種類の地盤を用意し、各締固め機械の走行可否を検証した。走行可否の判定は、各地盤において4往復の走行が可能であった場合を「走行可能」とした。

走破性判定結果を表一2に示す。ここでは、振動ローラ4機種の結果について考察する。最も軟弱な地盤条件であるw3 (CI:243 kN/m<sup>2</sup>)において、SV-12t, SVT-5t, および TW-4t は走破可能であった。一方、SV-20t はw3 では走破不能であったものの、より支持力の高いw2 (CI:319 kN/m<sup>2</sup>) および w1 (CI:359 kN/m<sup>2</sup>) の条件では走破可能であった。土工用振動ローラは一般的に高い走行性を確保する設計となっているが、SV-20t については前軸質量が大きいため、軟弱地盤での沈下量が過大となり走行不能に至ったと考えられる。

次に、同一質量帯における駆動方式の違いが走破性に与える影響について考察する。条件w2において、運転質量12tのSV-12tとTZ-12tを比較した。その結果、TZ-12tは走行自体は可能であったものの、走行速度が著しく低下し、実施工に適さない状態となっ

表一 2 走破性判定結果

機種	w1 コーン指数 359 kN/m <sup>2</sup>	w2 コーン指数 319 kN/m <sup>2</sup>	w3 コーン指数 243 kN/m <sup>2</sup>
TW-4t	○	○	○
SVT-5t	○	○	○
SV-12t	○	○	○
SV-20t	○	○	×
TZ-12t	○	△	×

た。この差異は、SV-12tが両輪駆動方式であるのに対し、TZ-12tが後輪駆動方式であることに起因すると考えられる。

以上の結果から、締固め機械の走破性には機械質量と駆動方式が大きく影響することが明らかとなった。特に軟弱地盤では、前軸質量が重要な要素となる。また、同一質量帯であっても駆動方式の違いにより施工効率が大きく異なることが確認された。これらの知見は、軟弱地盤における締固め機械の選定において、地盤条件に応じた適切な機種選択の指標として活用できると考えられる。

### 5. おわりに

本稿では、土工用振動ローラの特性について、舗装用振動ローラとの設計思想の違い、各機種の特徴、そして締固め性能と走破性に関する試験結果を報告した。試験結果から、土工用振動ローラは基準となる締固め曲線を上回る優れた締固め性能を有することが確認され、特に大型機種においてその傾向が顕著であった。また、両輪駆動方式の採用により、比較的軟弱な地盤条件下でも良好な走破性を示すことが明らかとなった。

これらの知見は、施工現場における適切な機種選定の指標として活用できる。特に、動線圧と最大締固め度の相関関係は、現場条件に応じた機種選定の簡便な判断基準となり得る。また、近年提案されている新たな締固め管理方法においても、土工用振動ローラの高い締固め性能を活かすことで、より品質の高い土工構造物の築造が可能となる。

今後は、さらなる施工効率の向上と品質確保の両立に向けて、ICT技術の活用や締固め管理手法の高度化など、新たな技術開発にも取り組んでいきたい。本稿で示した土工用振動ローラの特性に関する知見が、現場での適切な機種選定と施工管理の一助となれば幸いである。

《参考文献》

- 1) 国土交通省 Press Release：令和元年東日本台風の発生した令和元年の水害被害額が統計開始以来最大に，2021
- 2) 石原雅規：河川堤防の施工事例における締固め実態と展望，基礎工 Vol. 48, No. 11, pp.67-70, 2020
- 3) Francis Pierre：The History of Road Building Equipment, KHL International Ltd, pp.198-206, 1998
- 4) 坂本ら：締固めエネルギーと飽和度を重視した遮水性盛土の締固め管理，土木学会論文集 C, Vol. 77, No. 1, pp.43-58, 2021



【筆者紹介】

福田 智行（ふくだ ともゆき）  
酒井重工業(株)  
開発本部 新技術開発部  
スマートローラグループ

