

13. 堤防で使われる締固め機械の締固め性能について

酒井重工業株式会社 ○ 内山 恵一
 国立研究開発法人 土木研究所 橋本 毅

1. はじめに

2019年の記録的大雨により、全国142か所の河川堤防が決壊し甚大な被害が発生した¹⁾。堤防決壊の一原因は強度不足²⁾であるので、十分な締固めによって所要品質を確保し、強靱な堤防構築方法に関する見直しが急務である。堤防の締固め度とせん断強度や透水係数等の力学特性には一定の相関関係があることが報告されている³⁾。よって、締固め能力の高い締固め機械を選定し、所要の締固め度を確保することが不可欠である。一方、堤防の土は不透水性確保のため細粒分が多く、比較的高含水比で施工されることが多いため、作業用の締固め機械には走破性(トラフィカビリティ)が求められる。このように、堤防の締固め機械に求められる性能は、走破性と高い締固め性能である。

筆者らは、締固め機械の走破性を調べるため、供試土(細粒分まじり砂)の最適含水比(1Ec)より湿潤側において、ブルドーザ(14t)、土工用振動ローラ3機種(5t, 12t, 20t)、タイヤローラ(12t)、舗装用コンバインド振動ローラ(4t)に関する比較試験⁴⁾(以後、前回試験)を行い、走破性を示すコーン指数に加え、締固め密度と沈下量を計測した。その結果、5tと12tの土工用振動ローラが走破性と締固め性能の両面で優れていることを示した。

ただし、この試験は走破性を調べることが主目的であったため、湿潤側のみでの試験であり、締固め性能を把握するには不十分であった。締固め性能を把握するには、突固め試験で締固め曲線を求めることと同様に、複数の含水比で試験を行うことにより締固め曲線を求め、最大乾燥密度と最適含水比を捉えることである⁵⁾。最近では、転圧ローラの締固め曲線が突固め試験(1Ec)のそれより上回っていることに着目し、施工含水比を1Ecの最適含水比よりも乾燥側を許容することで、現場での密度と飽和度を高い状態に保ち、盛土の遮水性や強度を向上させるための締固め管理方法が提案されている⁶⁾。このように、最近の締固め管理方法を適用する場合にも、締固め機械の性能を有効に使うために、機械の締固め曲線を捉えておくことが重要と考える。

そこで、筆者らは、堤防で使われる締固め機械の締固め性能を把握するために、前回試験結果⁴⁾と今

回実施した追加試験結果を用いて締固め性能を確認し検討したのでここに報告する。

2. 締固め機械とその仕様

検討した締固め機械の機種は、土工用振動ローラの3機種、運転質量12t(SV-12tと称す)、5t級(SVT-5t, SVF-5tと称す)、舗装用コンバインド振動ローラ4t級(TW-4tと称す)、及びブルドーザ14t級(D51-14tと称す)である。各機械の仕様比較を表-1に示す。土工用のSV-12t, SVT-5t, SVF-5tの起振力は舗装用のTW-4tより数倍大きい。また、高いけん引力と軟弱地盤での走行性を確保するため、前後輪駆動式で、後輪にラグ付タイヤを装備する。SV-12tとSVF-5tの前方振動輪は平滑な鉄輪、SVT-5tはパッドフット輪である。SVF-5tとSVT-5tの車両本体は共通で、SVF-5tはSVT-5tのパッドフット輪に平滑シェルを被せている(写真-1)。舗装用コンバインド振動ローラは、舗装面の仕上げと平坦性を確保するため、高振動数で低振幅である。

表-1 締固め機械の仕様

機種名	運転質量 kg	締固め幅/ 履帯幅 mm	起振力 (試験時) kN	振動数 Hz	振幅 mm
土工用振動ローラ (両輪駆動)					
SV-12t	19,980	2,130	255	26	2.18
SVF-5t	12,000	1,370	72	30	1.00
SVT-5t	4,770	1,370	72	30	1.52
コンバインド振動ローラ (両輪駆動)					
TW-4t	3,500	1,300	34.3	52	0.4
ブルドーザ					
D51-14t	13,820	710×2	—	—	—

3. 締固め試験方法

3.1 概要

本稿で検討した締固め試験(前回試験・追加試験)は、すべて同一の試験ピットで実施したものである(写真-1)。ピットは全長20m、深さ0.95mのコンクリート製(図-1)で、底部に供試土を締め固めて路床を造成した。供試土も全試験同一であり、細粒分まじり砂{SF}で、突固め試験(1Ec)による最大乾燥密度は1.947g/cm³、最適含水比は12.6%

である。



写真-1 締固め試験状況 (左: SVT-5t, 右: SVF-5T)

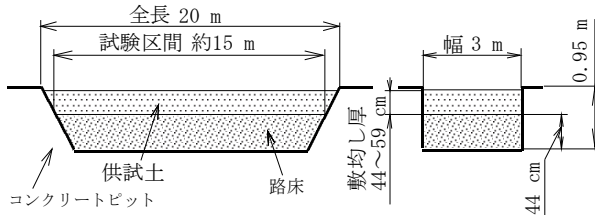


図-1 試験ピットの概要構造と各寸法

3.2 試験時の含水比

図-2に突固め試験(1Ec)の結果と、試験時の設定含水比を示す。設定含水比の文中での呼称は、7%前後ならw7と称する。

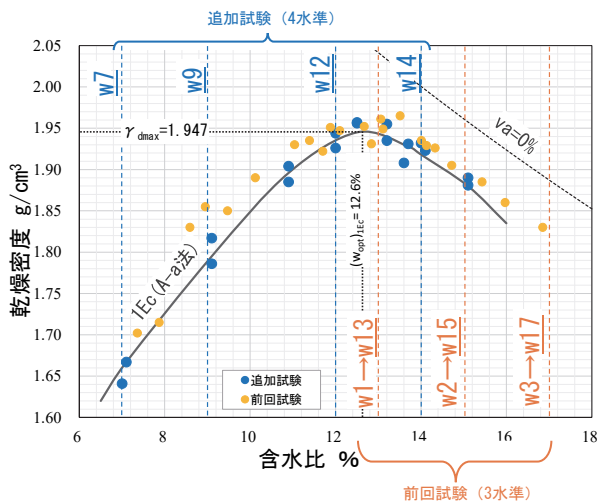


図-2 突固め試験(1Ec)と設定含水比

3.3 敷均し厚さ

試験は、異機種間の締固め性能比較を可能にするため、ピット内の供試土量をすべて同一に設定した。その結果、含水比増加に伴う初期敷均し厚さは、w7で44~45cm, w9で49~55cm, w12で53~57cm, w14で55~59cmになった。

3.4 転圧回数と測定項目

供試土の敷き均し後、静的ローラ(質量900kg, 輪径55cm, ロール幅280cm, けん引式)により予備転圧した。締固め密度, CBR及び沈下量は、予備転圧後「P0」と各転圧回数「P2, P4, P8, P16」後

に測定した(写真-2)。SVT-5tではパッドフット貫入底面で測定した。下層密度は、P16後の表面と路床の中間位置、またSVT-5tの場合、パッド底面と路床との中間位置で各々測定した。



写真-2 測定状況 (左: 砂置換法, 右: CBR)

4. 試験結果

4.1 締固め曲線

各締固め機械の締固め度(P16後の表層密度)と含水比の関係を図-3に示す。D51-14tは、w13, w15, w17が前回試験⁴⁾の結果である。SVT-5tとSVF-5tの締固め度は同等なので両方の平均値から曲線を図示した。

図-3から分かるように、各締固め機械の最大締固め度(以後、 Dc_{max})と最適含水比を含む締固め曲線が求められた。この締固め曲線を基に性能の差を見るため、締固め曲線1Ec(以後、曲線1Ec)を基準にして、各機種の曲線を比較する。SV-12TとSVT/SVF-5Tは、曲線1Ecを上回っており、 Dc_{max} は、SV-12tで109%, SVT/SVF-5Tで103.5%であった。TW-4tは、曲線1Ec最適含水比の湿潤側でのみ上回っており、 Dc_{max} は101.2%であった。D51-14tは、全ての含水比で曲線1Ecを下回っており、 Dc_{max} は95.5%であった。この結果は、締固め性能の差を示しており、各締固め曲線が、締固めエネルギーの増加に伴いゼロ空気間隙曲線($va=0\%$)に沿って斜め左上方へ移動している。

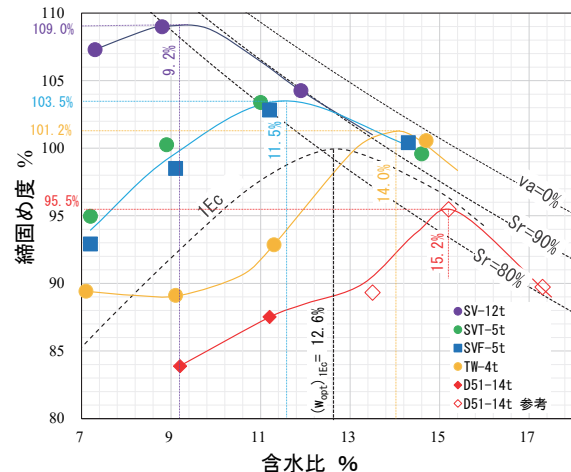


図-3 各締固め機械の締固め曲線

最近の遮水性盛土の締固めで、曲線1Ec最適含水比より乾燥側で施工している⁶⁾ことを考えると、曲線1Ecを上回るSV-12tとSVT/SVF-5tを使うことで、盛土の締固め度（密度）を上げることができ、結果として品質向上に繋がるものとする。

4.2 締固め度と転圧回数

図-4は転圧回数と締固め度の関係で、w9とw12の結果を各図(a)と(b)に示す。ここでは、図-3に示した締固め曲線での最適含水比の乾燥側と湿潤側が、「締固め度-転圧回数」関係にどの様に影響するかを見る。

SV-12tの結果を見ると、図-3の乾燥側であるw9の場合、転圧回数増加による締固め度は漸増傾向であるのに対し、湿潤側のw12では、P2で一気に最大値へ達しその後最大値を保持している。SV-12t以外の機種は、w9・w12ともに図-3に示す締固め曲線での乾燥側にあり、転圧回数増加による締固め度は漸増傾向である。

このように、最適含水比を境に、転圧回数増加に伴う締固め度の増加傾向に違いが出てくることが分かった。

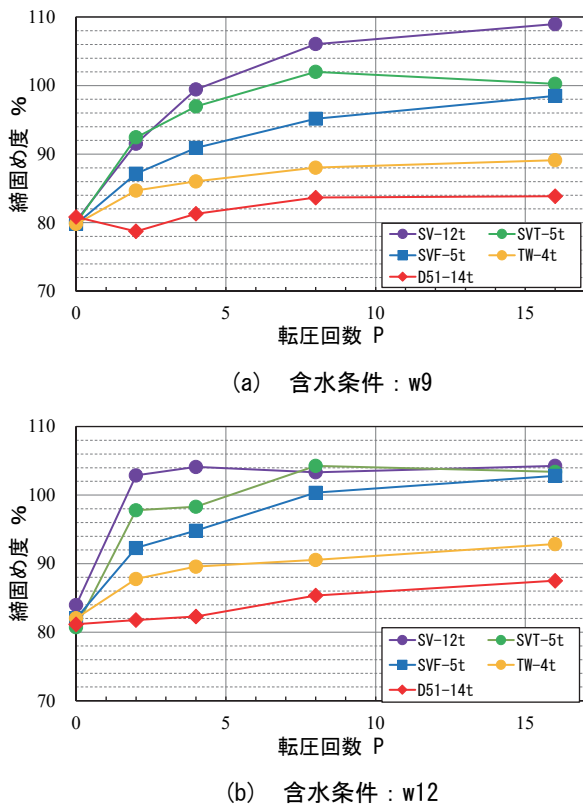


図-4 締固め度と転圧回数の関係

4.3 CBR と含水比の関係

各締固め機械のCBR (P16) と含水比の関係を図-5に示す。全機種において、含水比の増加に伴い、CBRは減少傾向である。機種間の比較では、w7・w9でCBRの差が見られるが、曲線1Ec最適含水比

(12.6%) 付近では、ほとんど差がない。

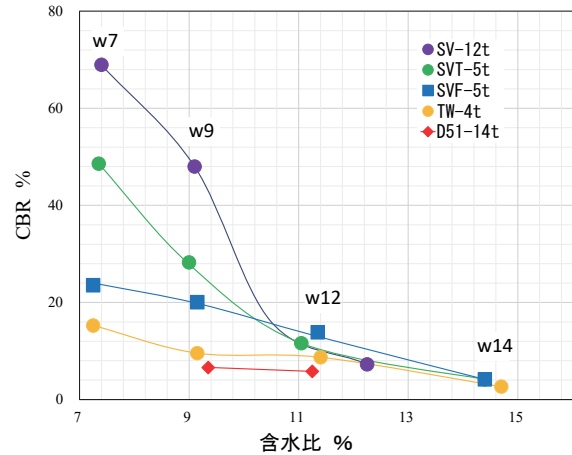


図-5 CBR と含水比の関係

4.4 供試土層の平均締固め度

w9とw12におけるP16後の表層と下層の平均締固め度を図-6に示す。供試土層の平均締固め度は、SV-12tは各々94%と103%、SVT-5tとSVF-5tは基準値(90%)に対し±1~2%の範囲に分布する。TW-4tとD51-14tは、基準値より約10%低い。本結果からも舗装用コンパインドローラ (TW-4t) とブルドーザ (D51-14t) の締固め能力は極めて低いと言える。なお、本結果には、締固め性能ばかりでなく、P0での敷き均し厚さも影響している(考察を参考)。

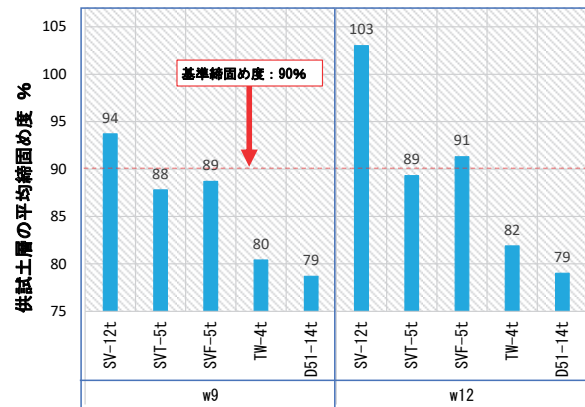


図-6 供試土層の平均締固め度

5. 考察

堤防施工で使用される締固め機械の締固め性能を把握するため、締固め曲線1Ecの最適含水比より乾燥側における締固め試験を行った。その結果、前回試験⁴⁾と同様に、5tと12tの土工用振動ローラ (SV-12t, SVT/SVF-5t) は、締固め曲線1Ecを上回ったが、舗装用コンパインド振動ローラ (TW-4t) と14tのブルドーザ (D51-14t) は、1Ecを下回り、かつ供試層内の平均締固め度は基準締固め度(90%)に達しなかった。各機種の締固め性能の差

は、機械から地盤に与える圧力の差に起因していると考えられる。転圧ローラが、自重と起振力の組合わせで締め固めるのに対し、ブルドーザは自重による履帯接地圧に依存するためである。また、転圧ローラの中でも、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、締め固め性能が高い。

次に、4.4で述べた平均締め固め度に影響するP0での敷き均し厚さについて考察する。P16後のw9とw12における供試土層の厚さを図-8に示す。SV-12tが約30cmに対し、他機種は32から43cmに分布し、15～55%も厚い。実際の土木現場では、締め固め機械の能力に応じて締め固めの仕上がり厚が30cmとなるように敷き均し厚を適宜調整するが、本試験では、異機種間の締め固め能力を比較するため、土量一定を本締め固め試験の基本条件としたため、このような違いが生じている。

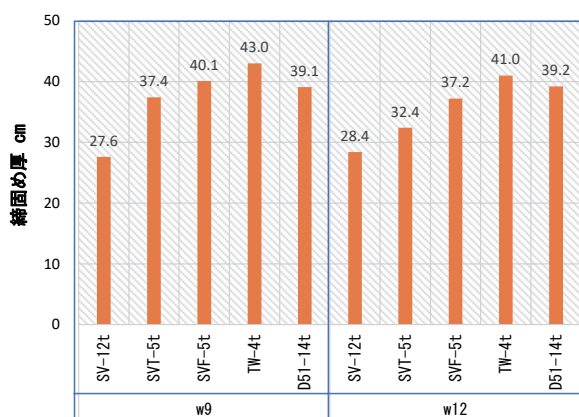


図-8 各供試機のP16後の層厚

最後に、各現場条件に応じた最適な転圧ローラを選定するために、各機械仕様と試験結果から得られた締め固め性能の関係を紹介する。振動輪の動線圧（振動輪側の軸重量と起振力の和を締め固め幅で除した値）に着目すると、図-9のように、動線圧と締め固め度（w9, P16）との間に良好な相関関係が見いだせる。

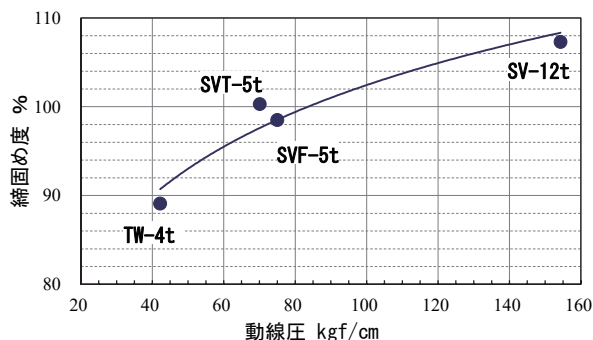


図-9 動線圧と締め固め度の関係

6. おわりに

各種転圧ローラ及びブルドーザの締め固め試験を実施した。12tと5tの土工用振動ローラの締め固め性能は最良であり、これらの機種は前報⁴⁾での走破性（コーン指数：243kN/m²）の試験結果も良好であった。

一方、ブルドーザは走破性に優れある程度の締め固め効果（いわゆるブル転）があるため、従来から、敷き均しと締め固め（ブル転）作業に兼用されてきた。しかし、追加試験の結果によると、土質、含水比、層厚等の条件によっては、締め固めの基準値（90%）を満足しない。同様の傾向は、（国研）土木研究所および民間企業9社による共同研究⁷⁾でも確認されている。

前回報文⁴⁾とともに、本稿で示した結果が、堤防の品質向上の一助になれば幸いである。

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) 福島県農業用ダム・ため池耐震性検証委員会：藤沼湖の決壊原因調査、2012
- 3) 石原雅規：河川堤防の施工事例における締め固め実態と展望、基礎工 Vol.48 No.11, pp.67-70, 2020
- 4) 内山、眞壁：転圧ローラのコーン指数と締め固め性能について、建設施工と建設機械シンポジウム, No. 19, 2021
- 5) 根本、日向、井上：締め固め機械の性能、創立20周年論文集、建設機械化研究所, pp.26-47, 1984
- 6) 坂本、龍岡ら：締め固めエネルギーと飽和度を重視した遮水性盛土の締め固め管理、土木学会論文集C, Vol. 77, No. 1, pp.43-58, 2021
- 7) （国研）土木研究所：盛土施工手法及び品質管理向上技術に関する共同研究報告書、（国研）土木研究所共同研究報告書第461号, 2014