堤防用の転圧機械の締固め性能について

酒井重工業(株)
内山 恵一

国立研究開発法人土木研究所
橋本　毅

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、水害被害額も津波以外の過去最大2兆1500億円に達した[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、強靭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)]。したがって、締固め能力の高い締固め機械(以下、転圧ローラと称す)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、堤防土は不透水性確保のため細粒分が多く、最適含水比より湿潤側で施工されることが多いため、作業用の土工機には高い走破性(トラフィカビリティ)が求められる。しかし、タイヤローラや舗装用コンバインドローラの走破性はブルドーザと比べて著しく低く、盛土層の積上げに伴い、自重沈下によって機体底部が土表面に接して走行不能(いわゆる亀の子状態)になる。よって、ブルドーザが土材料の敷き均しと締固め(いわゆるブル転)作業に兼用されてきた。そこで、転圧ローラ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(約13%)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)](以降、前回試験と称す)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も計測した。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るのに対し、ブルドーザの締固め密度は、それらより最大約10%も低く、基準密度90%を満足しないことが判明した。そこで、最適含水比より乾燥側における締固め試験(以降、追加試験と称す)を行った。その結果、前回試験と同様に、5tと12tの土工用振動ローラは所要の締固め密度を満足するが、ブルドーザは基準密度に達しない事が明らかになった。以上より、強靭な堤防建設にブルドーザを締固め目的に使用することは適切でなく、締固めには最適な土工用振動ローラを選定し、使分けることを提案する。

供試機械とその仕様

供試機は、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。供試機の仕様比較を表−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のパットフット輪に平滑シェルを被せている(次頁写真−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。ブルドーザは前回試験と同一(D51−14tと称す)である。

表−1　供試機の仕様比較

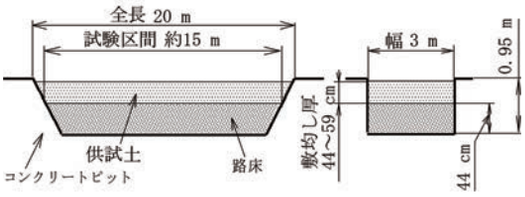
機種名	運転質量 kg	締固め幅 履帯幅 mm	起振力 kN	振動数 Hz	振幅 mm
土工用振動ローラ（両輪駆動、SAKAI 製）					
SV-12t	12,000	2,130	255	26	2.18
SVF-5t	5,400	1,370	72	30	1.00
SVT-5t	4,710	1,370	72	30	1.52
舗装用コンバインド振動ローラ（両輪駆動、SAKAI 製）					
TW-4t	3,500	1,300	34.3	52	0.4
ブルドーザ（KOMATSU 製）					
D51-14t	13,820	710×2	−	−	−

締固め試験方法

(1)概要

追加試験は前回試験と同一の試験ピットで実施した(次頁写真−1)。ピットは全長20m、深さ0.95mのコンクリート製(次頁図−1)で、底部に供試土を締め固めて路床を造成した。供試土も前回試験と同一の細粒分まじり砂{SF}で、突固め試験(JIS A 1210)A−a法による最大乾燥密度(以降、γ_{dmax}と称す)は1.947g/cm^3、最適含水比(以降、OMCと称す)は12.6%で、前回試験と同等(γ_{dmax}:1.955g/cm^3、OMC:13.0%)であることを確認した。

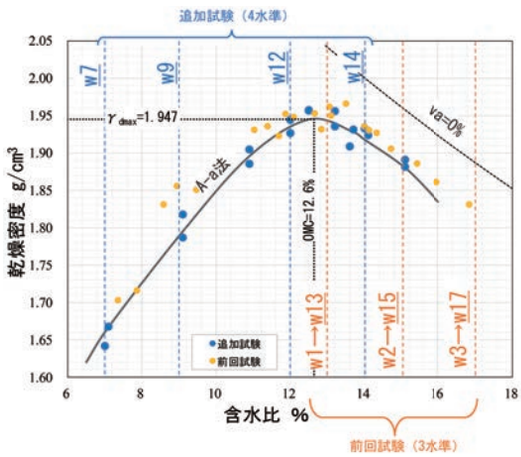
写真－1　締固め試験状況（左：SVT－5t、右：SVF－5T）



図－1　試験ピットの概要構造と各寸法

(2)試験時の含水比

図－2に突固め試験A－a法による両試験の結果と追加試験のOMC(12.6%)に基づいて設定した各含水比を示す。追加試験では、転圧ローラにOMCより乾燥側に3水準(7.0%、9.0%、12.0%)と湿潤側の1水準(14.0%)、D51－14tには乾燥側に2水準(9.0%と12.0%)を設定した。設定含水比は、7%ならw7と称し、前回試験のw1、w2、w3の呼称は各々w13、w15、w17と読み替える。



図－2　突固め試験（A－a法）に基づく設定含水比

(3)敷き均し厚さ

追加試験は、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、前回試験[4]と同一に設定した。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。

(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、パット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）

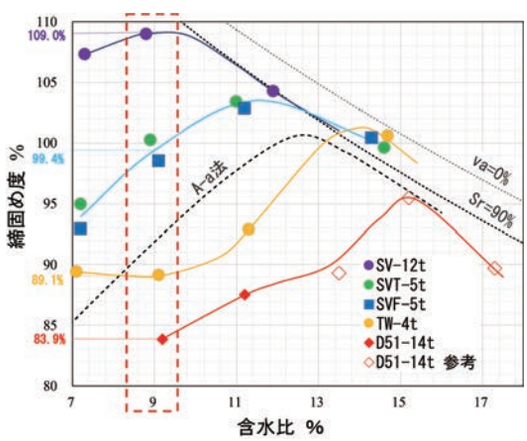
試験結果

(1)締固め曲線

供試機の含水比と締固め度(P16後の表層密度)の関係を図－3に示す。D51－14tはw9とw12が追加試験の結果、w13、w15、w17が前回試験の結果である。また、図－3のSV－12tのw7、w9、w12のプロットは、同一試験ピットで過去に実施した試験結果である。供試土のγ_{dmax}は1.972g/cm^3、OMCは11.8%で、追加試験の供試土と同等と見なせるので引用した。SVT－5tとSVF－5tの締固め度は同等なので両方の平均値を図示した。

各締固め曲線は、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する。すなわち、γ_{dmax}の増大とOMCの低下が観察される。

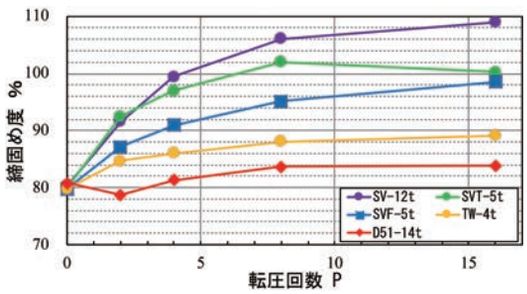
各供試機の締固め度の差が最大となる含水比9%(w9、図－3中の赤色破線部)に注目すると、SV－12tの109.0%が最大で、次いでSVT/SVF－5tの99.4%(平均値)、TW－4tの89.1%、D51－14tの83.9%の順で、SV－12tとD51－14tの差は25.1%である。転圧ローラは4機種共に供試土の最大飽和度90%を満足するが、D51－14tは飽和度90%にも達せず、締固め能力が顕著に低いことが分かる。



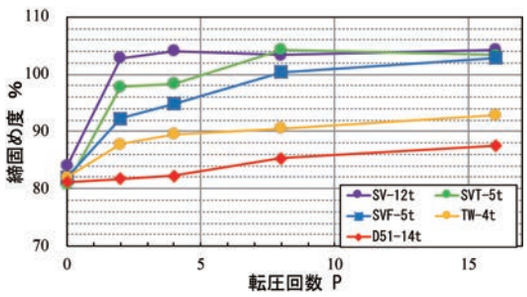
図－3　各供試機械の締固め曲線

(2)転圧回数と締固め度

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。転圧ローラの締固め度はP2〜P4回迄急増後、漸増し最大値に達する。特にSV−12tはw12の場合、P2で飽和度90%に達した。これは、それ以上の締固めエネルギーを与えても締まらないためである。一方、ブルドーザには顕著な増加が見られなかった。P0とP16との締固め度の増分は、土工用振動ローラ3機種では、w9で20〜29%、w12で24%、TW−4tがw9で9%、w12で13%に対し、D51−14tではw9で4%、w12で7%であった。



(a) 含水条件：w9

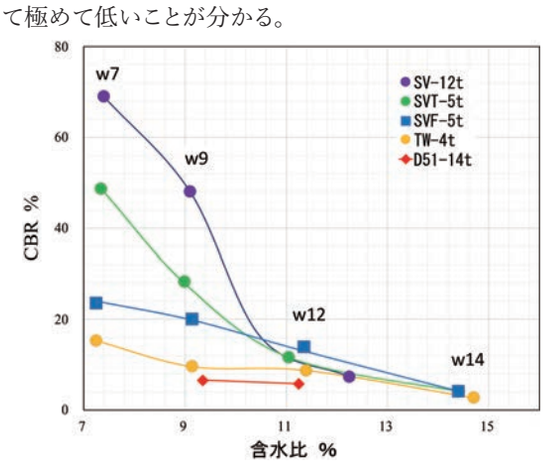


(b) 含水条件：w12

図−4　転圧回数と締固め度との関係

(3)CBR

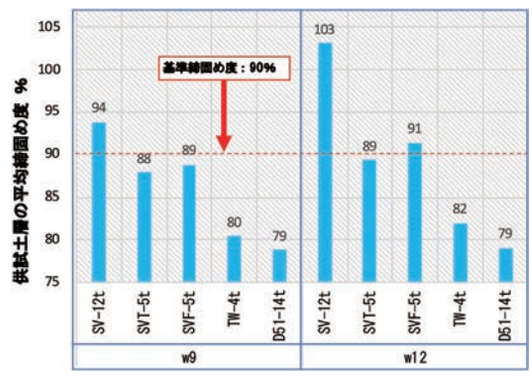
図−5に、P16後の表層と下層における含水比とCBRとの関係を示す。w7において、全転圧ローラ(ブルドーザを除く)は最大値を示すが、含水比の増加に伴い急減し、w12で約10%、w14で約5%まで低下する。転圧ローラとブルドーザを含むw9では、CBRはSV−12tで48%、SVT−5tで28%、SVF−5tで20%、TW−4tで9%、D51−14tで7%の順で、ブルドーザによるCBR(支持力)は転圧ローラに比べて極めて低いことが分かる。



図−5　CBRと含水比の関係

(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バインドローラ(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、各供試機の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

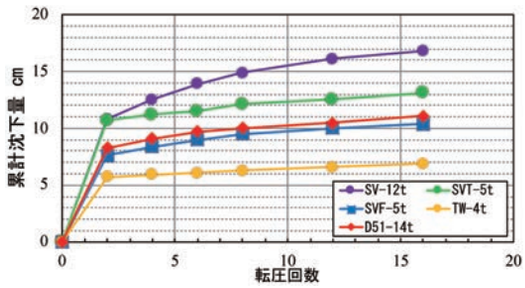
(5)転圧回数と沈下量

次頁図−7(a)と(b)にw9とw12における転圧回数と沈下量の関係を示す。転圧ローラの沈下量はP2回迄に急増後、漸増して最大値に達する。P16後の沈下量は、w9において、SV−12tが17cm、SVT−5tが13cm、SVF−5tが10cm、TW−4tが7cm、DX−14tが11cmであった。また、w12においては、SV−12tが17cm、SVT−5tが17cm、SVF−5tが14cm、TW−4tが10cm、DX−14tが13cmであった。

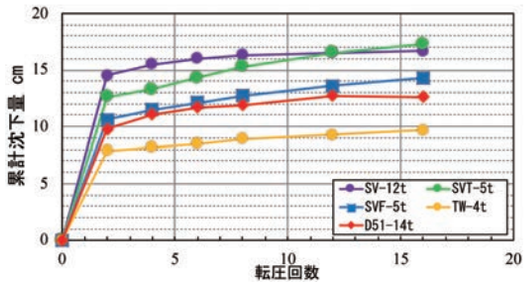
考察

各種転圧ローラとブルドーザの締固め能力を把握するため、最適含水比より乾燥側における締固め試験(以降、追加試験と称す)を行った。その結果、前回試験と同様に、5tと12tの土工用振動ローラ(SV−12tとSVT/SVF−5tと称す)は、所要の締固め密度を十分に満足するが、14tのブルドーザ(D51−14tと称す)は基準密度(90%)に達しないことを前回試験の結果に続き、再確認した。

各供試機の締固め度の差が最大となる含水比9%に着目すると、SV−12tの109.0%が最大で、次にSVT/SVF−5tの99.4%(平均値)、TW−4tの89.1%、D51−14tの83.9%の順で、ブルドーザが基準値90%に及ばない。またSV−12tとD51−14tの差は25.1%である。これは転圧ローラが、自重と振動力の組合わせにより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。



(a) 含水条件：w9

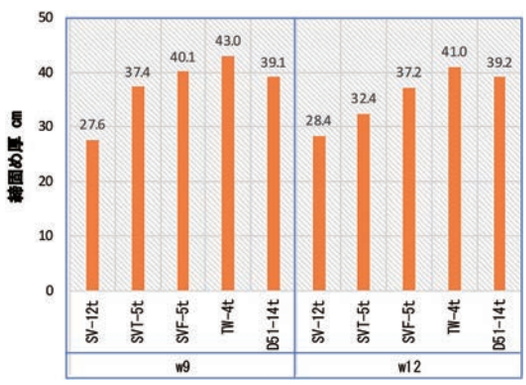


(b) 含水条件：w12

図－7　転圧回数と沈下量の関係

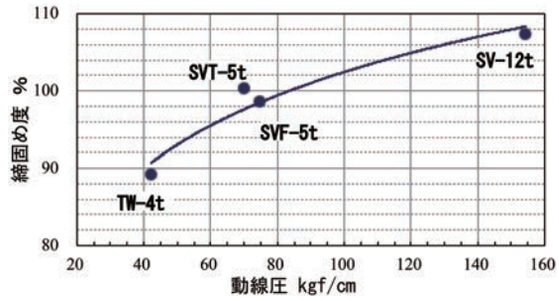
供試土層の（表層と下層の）平均締固め度（含水比9%と12%）の比較では、SV－12tは94%と103%、SVT/SVF－5tは、基準値（90%）に対し±1～2%の範囲に分布する。一方、TW－4tとD51－14tは、基準値より約10%低い。これらの結果からも舗装用コンバインドローラ（TW－4t）とブルドーザ（D51－14t）の締固め能力は極めて低いと言える。

上記の平均締固め度に影響する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、締固め機械の能力に応じて締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、異機種間の締固め能力を比較するため、土量一定を本締固め試験の基本条件とするため、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

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、各機械仕様と締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　動線圧と締固め度の関係

おわりに

各種転圧ローラ及びブルドーザの締固め試験を実施した。12tと5tの土工用振動ローラの締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/m^2）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、締固めの基準値（90%）を満足しないばかりでなく、土工用振動ローラとの締固め度の最大差が25%に達することが再確認された。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[5]でも確認されている。

以上より、強靭な堤防建設にブルドーザを締固め目的に使用することは適切でなく、締固めに最適な土工用振動ローラを選定し、使分けることを提案する。前回報文[4]とともに、本結果が、最適な機種選定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年3月
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年
3）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、2020.11
4）内山、眞壁：「堤体施工における転圧ローラのコーン指数と締固め性能の関係」、月刊 土木施工 Vol.62 No.9 pp.122－125、2021.9
5）（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