２１．盛土工事における締固め機械の土の締固め特性の分析

（独）土木研究所　　○岩谷　隆文
（独）土木研究所　　藤野　健一
（独）土木研究所　　小橋　秀俊

１．はじめに

近年、未曾有の豪雨・地震による盛土の崩壊が発生している。盛土における被災調査結果や模型実験によれば、盛土内の排水不良とともに締固め不良が被災の主要因であることがわかってきた。

従来、道路盛土の締固めにおいて最も広く用いられている品質管理方法は、施工方法を想定し、設計上要求すべき強度、変形抵抗を満足するような締固め度を規定することにより、締め固めた土の性質の恒久性と設計から要求される力学特性の両者を確保しているとみなすものである。しかし、盛土に求められる品質の要求（豪雨・地震に対する安全性）を達成するためには、締固め度の設定だけでなく、それを確実に達成するための適切な締固め機械の選定法、施工手法及び品質管理手法を確立していく必要がある。

本研究では、盛土施工時の盛土品質を確保するために、最適な施工機械の選定及び最適な締固め施工手法・品質管理手法の提案を目的とし、以下の検証を進める。

① 施工・土質条件に応じた最適な締固め機械の選定に関する検証
② 機種や施工・土質条件による施工手法（施工厚さ）の検証
③ 締固め品質における品質管理手法の検証

上記①～③の検討を進めるために、土木研究所内の試験ピット内に盛土工事と同等の試験フィールドを作成し、砂質土の最適含水比において、各締固め機械の締固め特性等の検証のため各締固め機械による締固め回数試験を行うものである。

２．締固め回数試験概要

2.1　試験条件

試験で使用する土質条件として、現場の盛土にも利用されている砂質土（山砂）を使用した。使用土の物理特性を図-1、表-1 に示す。但し、ρ_{dmax}、w_{opt} は突き固め試験（JIS A 1210）の c-A 法で算出したものである。また、本研究で使用した試験フィールドは土木研究所構内の土工実験棟試験ピットを用いており、その詳細を図-2 に示す。試験ピットは幅 5m、長さ 44.8m、深さ 5m のコンクリートピットである。このピット底面より高さ 2.8m まで試験土を十分締固め盛り立てた地盤（今後単に基礎地盤と呼ぶ）上を用いて締固め回数試験を行った。

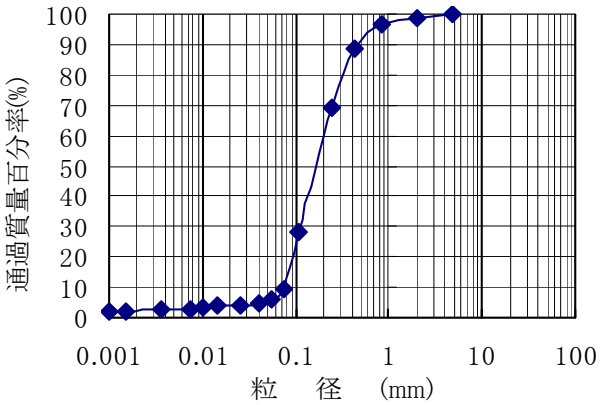

図-1. 粒径加積曲線

表-1. 土質材料の物理特性

試験項目	試験結果
土粒子密度 ρ_s (g/cm^3)	2.675
細流分含有率 F_c (%)	10
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm^3)	1.674
最適含水比 w_{opt} (%)	16.0

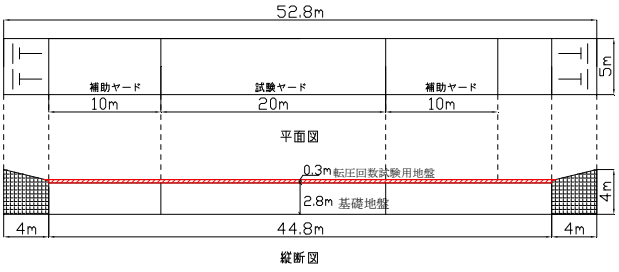

図-2. 試験ピット詳細図

2.2　締固め機械の選定

締固め回数試験に使用する締固め機械としては、道路土工施工指針に基づいて盛土工事に広く利用されているものを選定した。使用する機械の規格については各機種の機械重量が同程度であるものとした（表-2)。

表-2. 使用締固め機械仕様

使用締固め機械	機械重量（機種）
タイヤローラ	11t 級 (CP210)
ブルドーザ	11t 級 (D5k 湿地タイプ)
振動ローラ	11t 級 (SV512D)

写真-1 タイヤローラ

写真-2 ブルドーザ

写真-3 振動ローラ

2.3　締固め回数試験及び品質管理試験

締固め機械における土の締固め能力を検証するために締固め回数試験を行った（写真-4)。締固め回数試験は、図-2 のハッチングエリアで示すように基礎地盤上に仕上がり厚 300mm となるように試験土を敷均し、各締固め機械の前後進により締固めを行った。試験ケースとしては、タイヤローラ、ブルドーザ、振動ローラ（振動なし)、振動ローラ（振動あり）の計 4 パターンについて行った。また、締固め特性を検証するための各計測項目及び計測する締固め回数については表-3 に示す。密度・含水比計測のためのコアサンプラーは、内径 100mm、高さ 100mm の円筒形のもの使用をした（写真 5)。測定は、測定地盤地表面から h=0～100mm、100～200mm、200～300mm の深さごとの 3 サンプルを各 3 測点にて行った。また、図-3 に試験ピット内の計測平面図を示す。土の締固めにおいては初期締固め条件（締固め 0 回）は人力敷均し後、0.1m^3 級の油圧ショベルのクローラにて 2 回締固めた状態を初期締固め条件とした。使用土の含水比は、最適含水比領域内で調整を行った。また、締固め機械の運転速度も締固めに影響を及ぼすことから、本試験では各機械の走行速度については概ね 3～4km/h に固定し試験を行った。

写真-4. 締固め回数試験状況

表-3. 計測項目一覧

計測項目	測定点	計測回数
密度・含水比（コアサンプル）	3	0,2,4,6,8,12,16 回後
沈下量（レベル測量）	3	0,2,4,6,8,12,16 回後
地盤反力係数（小型 FWD 試験）	3	0,2,4,6,8,12,16 回後

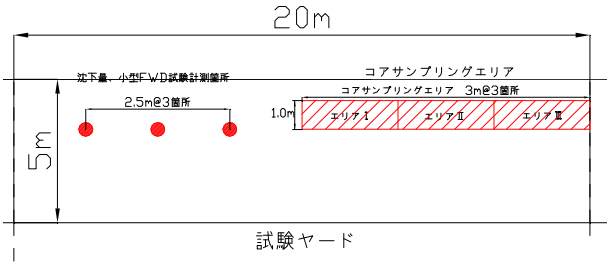

図-3. 締固め回数試験計測箇所平面図

写真-5. コアサンプリング状況

写真-6. 小型 FWD 試験状況

３．試験結果

3.1　コアサンプリング結果

本試験では、含水比を *w*=最適含水比領域の約 15%に調整し行った（以後 *w*=最適含水比領域を単に *w*=最適と呼ぶ）。*w*≒15%時のコアサンプリングによって得られた乾燥密度－締固め回数の結果を深さ h=0～100mm、100～200mm、200～300mm ごとに図-4、5、6 に示す。また、締固め回数試験により得られた最大乾燥密度と地盤深さの関係を図-7 に示す。各グラフに示されている締固め度 D_C=90%、95% とは、「道路土工－盛土工指針」に記載されている現場盛土工事の路体、路床工事における日常管理基準値である。以下、コアサンプリングによって得られた結果を示す。但し、計測結果はいずれも図-3 に示す計測点で計測された 3 測点の平均値である。

(1)　すべての締固め機械において締固め回数の増加ともに密度の増加し、締固め初期（2～4 回）で急速に密度増加が起こり、その後概ね 8 回で密度増加の収束を向かえている。

(2)　振動ローラ（振動あり）ではすべての深さにおいて締固め回数 4 回で D_C=95%を達成した。

(3)　タイヤローラ、振動ローラ（振動なし）は h=0～200mm で優に D_C=95%を達成したが h=200～300mm ではかろうじて達成しただけであった。

(4)　ブルドーザについては、締固め回数の増加による密度増加が若干みて取れる程度であり、乾燥密度からでは初期締固め状態以上の締固めを達成したとはいえなかった。

(5)　振動ローラ（振動有り）は、他の締固め機械、試験条件に比べると、深さ方向の密度減少が小さいことがわかった。

(6)　16 回の締固めまでに計測された最大乾燥密度は、振動ローラ（振動あり）＞タイヤローラ≒振動ローラ（振動なし）＞ブルドーザの順となった。

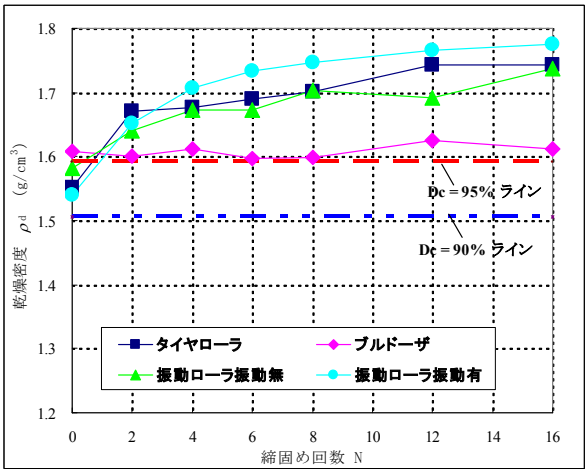

図-4. 乾燥密度－締固め回数（h=0-100mm）

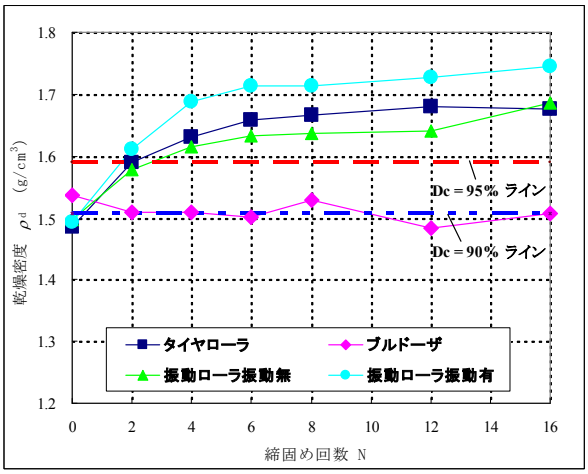

図-5. 乾燥密度－締固め回数（h=100-200mm）

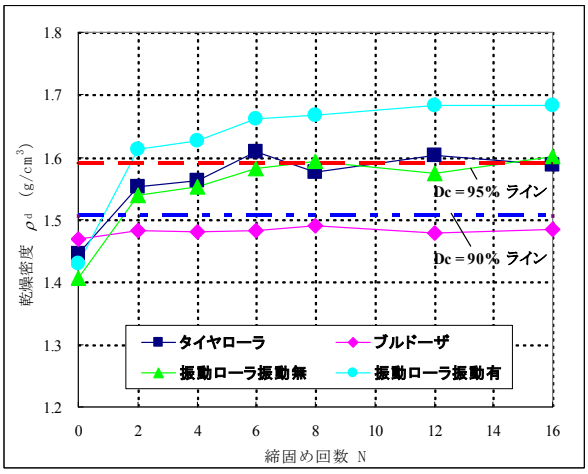

図-6. 乾燥密度－締固め回数（h=200-300mm）

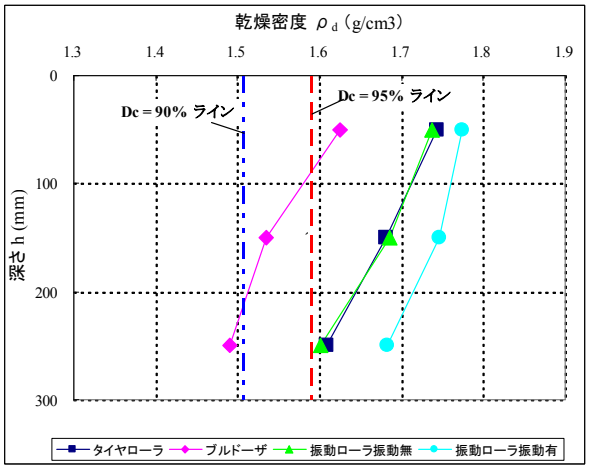

図-7. 測定深さ－乾燥密度

3.2　沈下量計測結果

次に、締固め機械の締固め回数の沈下量計測結果を図-8、9 に示す。グラフの沈下量は、いずれも図-3 に示す計測点で計測された 3 測点の平均値である。

全ての締固め機械について締固め回数の増加に伴い沈下量も増加していることがわかった。また、締固め回数の初期段階（締固め回数 2～4 回）で急激に沈下量が増大し、その後は収束に向かっており、乾燥密度－締固め回数の関係と同様な傾向が見られた。そこで、各締固め回数時の乾燥密度と沈下量の関係について図示すると、1 次関数にて近似することがわかった。さらに、乾燥密度と沈下量について相関係数を算出した結果を表-4 に示す。

結果より、ブルドーザについては相関係数 0.129 と非常に低い値となり結果的に比較の対象から除外することとした。しかし、その他締固め機械については相関係数 0.9 以上と強い 1 次の正の相関があるといえる。

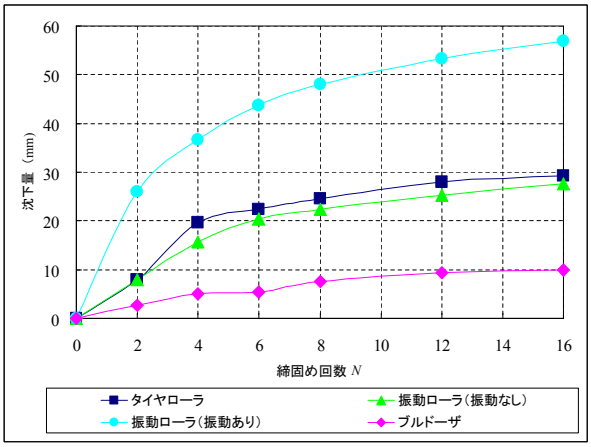

図-8. 沈下量－締固め回数

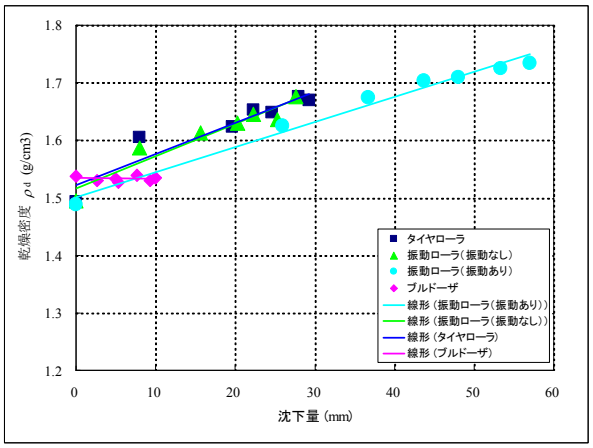

図-9. 沈下量－締固め回数

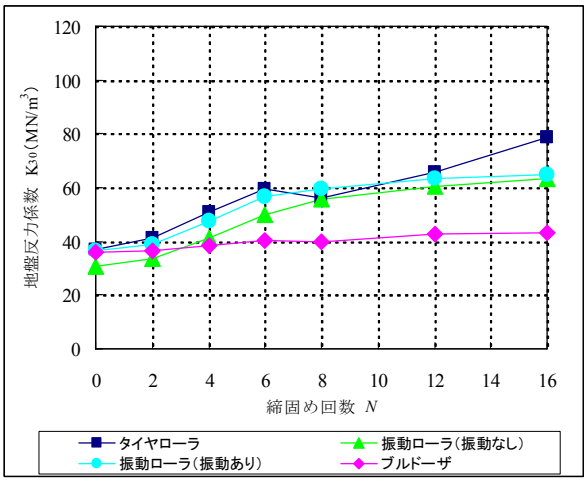

図-10. 地盤反力係数－締固め回数

表-4. 乾燥密度－沈下量　相関係数

使用締固め機械	相関係数
タイヤローラ	0.942
ブルドーザ	0.129
振動ローラ（振動なし）	0.957
振動ローラ（振動あり）	0.990

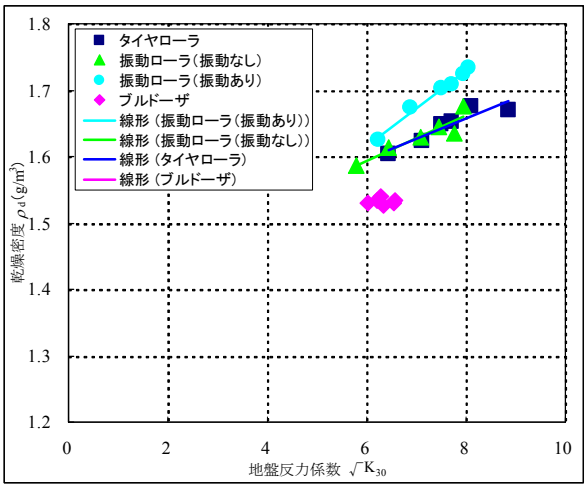

図-11. 乾燥密度－地盤反力係数

表-5. 乾燥密度－$\sqrt{K_{30}}$　相関係数

使用締固め機械	相関係数
タイヤローラ	0.919
ブルドーザ	0.040
振動ローラ（振動なし）	0.932
振動ローラ（振動あり）	0.993

3.3　小型 FWD 試験結果

小型 FDW 試験によって得られた地盤反力係数 K_{30} の計測結果と締固め回数の関係を図-10 に示す。図に示す地盤反力係数値は小型 FWD 値を平板載荷試験（JIS A 1215）によって得られる地盤反力係数 K_{30} に換算した値である。また計測された値はいずれも図-3 に示す 3 測点で計測した平均値である。

計測された地盤反力係数は締固め回数の増加に伴い増加していることがわかった。締固め回数 16 回の間に得られた最大地盤反力係数値 K_{30} は、タイヤローラ＞振動ローラ（振動なし）≒振動ローラ（振動あり）の順となった。

次に、乾燥密度と地盤反力係数 K_{30} の平方根をとった$\sqrt{K_{30}}$の関係を図-11 に示し、さらにその相関係数について算出したものを表-5 に示す。結果より、ブルドーザについては相関係数 0.040 と非常に低い値となり結果的に比較の対象から除外することとした。しかし、その他締固め機械については相関係数 0.9 以上と地盤反力係数の平方根との間には強い 1 次の正の相関があることがいえた。

4．結論

本実験によって得られた密度計測データより、各締固め機械が実験地盤に与える締固め特性の確認を行った。締固め機械については、振動ローラ（振動あり）が最大乾燥密度を達成しており、深さ方向の密度に関しても他の締固め条件より減少傾向が小さいことから、他の締固め機械、試験条件に比べ土の締固めに優れている可能性がある。

また、ブルドーザに関しては締固め用機械として用いることは現データからは難しいものと考えられる。実施工の品質管理手法としては本研究では、密度計測の他に沈下量計測及び小型 FWD 試験による地盤反力係数 K_{30} の計測し評価を行った。

(1) 沈下量計測については、密度結果と非常に相関の強い結果を示していることから現場施工における品質管理方法としては有効である可能性が考えられる。しかし、沈下量自体は初期締固め条件に強く依存するため沈下量を絶対値で管理するのではなく、その収束性に着目し品質管理手法に組み込むことが有効である可能性が考えられる。

(2) 地盤反力係数計測（地盤支持力）については、小型 FWD 試験によって得られた地盤反力係数の平方根$\sqrt{K_{30}}$ 値は乾燥密度と正の相関があるため、品質管理指標として使用できる可能性があるといえる。しかし、品質管理指標に使用する際は多点計測による、より均質なデータ採取を行うなどの未確定な点を考慮する必要があると考えられる。

４．今後の課題

本研究では、土質、締固め機械の走行速度を固定した実験データに基づき土の締固め特性について整理を行った。しかし、土の締固めには様々な要因がありその要因を抽出するうえで、できるだけ多くの土質条件、実施工機械条件について土の締固め特性の試験を今後行う必要がある。また、現在多くの盛土工事では、品質管理において突き固め試験の結果が反映されている。しかし、実施工機械による土の締固めと突き固め試験には一致しない箇所があることも指摘されている。そのため、一致しない箇所を関連付けるために締固め回数試験等によるデータ収集・分析を行い、高い品質が確保された盛土をつくることが今後の課題となった。

参考文献

1) 土の締固めと管理, 土質工学会編, 土質工学会

2) 道路土工施工指針, 社団法人日本道路協会

3) 久野悟郎: 転圧実験データのとりかた, 土と基礎 Vol. 3, No. 8, pp20-26, 1955

4) 益村公人:密度勾配を考慮した道路盛土の安定評価と品質管理基準に関する研究, 土木学会論文集 No.714, VI-56, pp141-154, 2009.09