

7. 災害廃棄物再生利用促進に関する調査・研究 ＝締固め土の物性と設計・施工管理＝

中村吉男

1. はじめに

地震や土砂災害および風水害等によって排出された廃棄物（災害廃棄物）は事業活動によって発生した廃棄物ではないことから「一般廃棄物」に該当し、その処理責任は地方公共団体（区市町村）に帰属する。今後発生することが確実視されている南海トラフ巨大地震では、太平洋沿岸の広範囲にわたり多量の災害廃棄物が発生されると予測されており、その発生量¹⁾は東日本大震災の経験を基に推計すると約3億トンにおよび、この内約1億トンが土砂混合廃棄物であると想定されている。災害からの早期復旧・復興のためには、これら土砂混合廃棄物を復興資材（盛土材）として処理し、公共性の高い土地用途に積極的に利用することが不可欠である。

土を材料として水利構造物（フィルダム、溜池、河川堤防）や道路・鉄道・宅地・空港を構築する際、人為的に締め固めて土の密度（乾燥密度）を大きくし強度や透水性の面から土構造物の安定性を向上させることは自明の理であるが、土の種類や粒度、含水比の多少、締め固めエネルギーの大小、締め固め方法（静的、動的）などに関連して締め固め後の乾燥密度は変動するから複雑であることから、土を締め固める方法や締め固められた土の性質を理解しておくことが極めて重要である。盛土に関する最近のトピックとして、熱海で起きた土砂災害は盛土の規制が不十分であったことが原因の一つとして挙げられ、全国的に盛土の見直しが必要とされ、盛土規制法²⁾が制定された。また、東日本大震災において、決壊した貯水池の復旧・修復に際し、新たな知見として飽和度を重視した盛土の品質管理手法が提案³⁾されている。

本研究は、災害廃棄物を盛土材料として使用する上で参考とすべき、土の締め固め特性と品質管理の概念を整理し、近年注目されている飽和度を重視した盛土評価の重要性について論じるものである。

2. 土の締め固め特性と品質管理の基本概念

2.1 土の締め固め特性

土の締め固めに関し科学的根拠を唱えたのはR.R.Proctorであり、1933年Eng.News Recordに「転圧式アースダムの設計及び施工」と題し4つの論文⁴⁾を発表した。この論文は転圧式アースダムの設計施工にあたって、堤体材料となる用土の適性を決定し、かつ適確な施工方法を求め、更に貯水によって堤体が飽和された時どの程度軟化するかまたこれを防止するための方法について議論している。この論文の中で、図-1に示すように横軸を含水比（ w ）、縦軸を乾燥密度（ ρ_d ）として整理した土の締め固め曲線は、最大乾燥密度と最適含水比が存在することが示され、このピークを持つ曲線には4つの過程があることが説かれている。すなわち、①低含水比状態では高い毛管張力により土粒子が強く引き付け合わされているため締め固め外力に抵抗して密な状態になりにくい。②含水比の上昇とともに土粒子表面の水膜の厚みが増し毛管張力が減少（潤滑作用）し、土は塑性を増し土粒子の密な状態へと再配列する。③更なる含水比の増加は、過剰な水分と土粒子が置き換わることになり乾燥密度は低下し、④飽和状態を迎える。というものである。この中でProctorは、高い毛管張力の状態化にある含水比状態で締め固められた土は、飽和することにより著しく強度低下することを問題視している。同様な観点から、大根⁵⁾は図-2に示すように締め固め時の飽和度（初期飽和度）に着目し、飽和に伴う非排水強度の低下傾向から飽和度85%を境に、85%以下は強度低下と水浸沈下が生じる（コラプス現象）ことが顕著であり、飽和度85%以上は疑似飽和土として間隙水圧と圧密変形に注視することの重要性を指摘している。一方、粒度組成と締め固め曲線の間には、図-3に示すような関係⁶⁾があることが報告されて

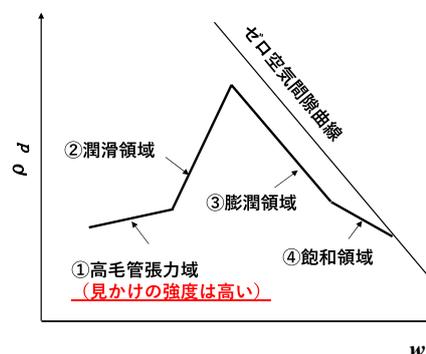


図-1 土の締め固め曲線

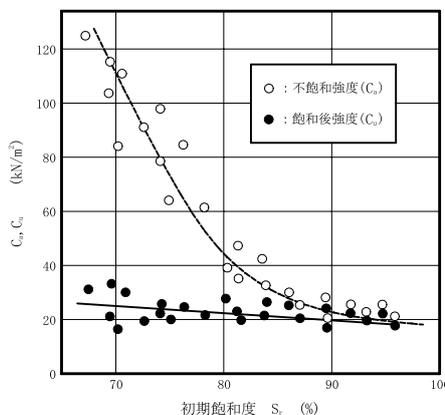


図-2 初期飽和度と強度の関係⁵⁾

いる。粒径の幅の広い粗粒土ほど締固め曲線は鋭く立った形状を示し、左上方に位置し、最大乾燥密度は大きく、最適含水比は低くなる。一方、細粒分の多い土ほど締固め曲線はなだらかな形状となり、右下方に位置し、最大乾燥密度は小さく、最適含水比は高くなる。この関係は、プロクターの理論に土の水分保持特性が反映しているといえる。また、最大乾燥密度と最適含水比の関係は、ゼロ空隙曲線に沿って推移することから、最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) と最適含水比 (w_{opt}) の相関関係に着目した実験式は形式的に (1) 式で提示され、模擬分別土においては木片10%程度までこの実験式の相関性はかなり高い⁷⁾ことがわかっており、様々な土質に対し提案されている⁸⁻¹¹⁾。提案されている実験定数 a 、 b を表-1に示す。また、乾燥密度 (ρ_d) は (2) 式で示す様に、含水比 (w)、飽和土 (S_r)、土粒子密度 (ρ_s) で表現され実験式との比較において、最大乾燥密度と最適含水比は、(3) 式で示す様に飽和度、土粒子密度の関数であることがわかる。

$$\rho_{dmax} = \frac{\rho_w}{a \cdot w_{opt} + b} \quad (1)$$

$$\rho_d = \frac{\rho_w}{w/S_r + 1/\rho_s} \quad (2)$$

$$S_r = \frac{1}{a} \quad \rho_s = \frac{1}{b} \quad (3)$$

表-1 最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) と最適含水比 (w_{opt}) の関係

| 出典 | 土質 | a | b | 1/a | 1/b |
|------|---------------------------|--------|--------|------|------|
| (7) | 模擬分別土 | 0.0113 | 0.3971 | 88.5 | 2.52 |
| (8) | アースダム材料 | 0.0103 | 0.3993 | 97.1 | 2.50 |
| (9) | ローム・河床堆積物 | 0.0107 | 0.4000 | 93.5 | 2.50 |
| (10) | 砂岩・頁岩風化土 | 0.0106 | 0.3935 | 94.3 | 2.54 |
| (11) | 黒色片岩風化土 ($w \geq 12\%$) | 0.0109 | 0.3818 | 91.7 | 2.62 |
| | 黒色片岩風化土 ($w < 12\%$) | 0.0109 | 0.3800 | 91.7 | 2.63 |

2.2 盛土の品質管理の基本概念

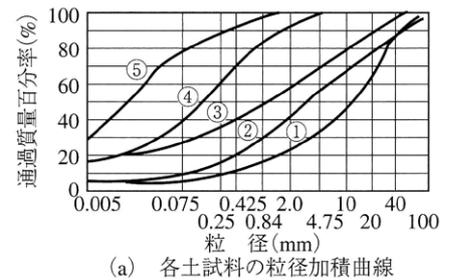
実施工で採用され、汎用性が高い盛土の品質管理規定は、大別して①品質規定、②工法規定、③工法推奨・品質規定の3つが挙げられる。①品質規定においては、物理特性の規定（礫率、細粒分、含水比等）、締固め状態の規定（ C 値、 D 値、 E 値、 D_r 、 e 、 S_r 、 v_a 等）、強度・剛性の規定（コーン貫入値、変形係数、地盤反力係数、CBR値等）があり、土の工学的性質から吟味するものである。また、②工法規定においては、施工機械、層厚（撤出し厚）、転圧回数、搬入土量等の管理が行われ、③工法推奨・品質規定では、①と②を併用した管理が行われる。更に、品質規定における締固め状態の規定を整理すると以下ようになり、災害廃棄物由来の分別土砂では、 D 値（締固め度）管理や C 値、 S_r 、 v_a 管理の適用が想定される。

● D 値（締固め度）管理

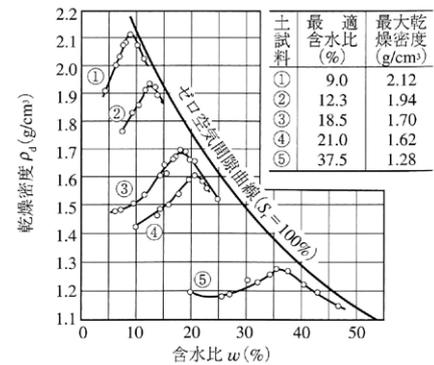
土の性質は土を締め固めることによって改善されるので、締め固めた土の密度の高まり具合によって締め固めた土の品質の良否を判定することが出来る。そこで、現場で締め固めた土の乾燥密度と基準となる突き固めエネルギーを与えた時の最大乾燥密度との比（ D 値）が規定値以上となっていること、および施工含水比が最適含水比を基準として所定の範囲に入っていることを規定する方法を D 値管理と称している。

● C 値、 S_r 、 v_a 管理

最適含水比より高い含水比状態の盛立材料の管理。現場で締め固めた土の湿潤密度とその含水比で基準となる突き固めエネルギーを与えた時の湿潤密度との比を C 値と称し、この値が規定値以上となっていることを管理する。空隙中の空気間隙率が小さく、飽和度の高い土あるいは空気間隙率 (v_a) の低い土は水の侵入する余地は少なく水浸に対する抵抗性が大きいという観点からの規定であり、湿度が高く降雨量の多い所では、自然含水比が高い材料の有効利用が図られる。施工含水比の上限は、トラフィカビリティ（コーン貫入試験）の観点から定める。



(a) 各土試料の粒径加積曲線



(b) 各土試料の締固め曲線

図-3 粒度組成と締固め曲線⁶⁾

● E 値、 v_a 管理

軟岩（転圧により破碎され粒度変化が著しく変化する材料）の管理。現場で締め固めた土の乾燥密度と軟岩塊の乾燥密度との比（ E 値）が規定値以上となっていること。

● D_r 、 e 管理

砂・砂礫・岩石材料等の粒状材料の管理。相対密度(D_r)や礫・岩石のかさ比重を用いて算出した空隙比(e)が規定値以上となっていること。

図-4は、 D 値、 C 値、 S_r 管理の管理基準について締め固め曲線との対応関係で整理したものである¹²⁾。締め固めた土の密度が ρ_{dmax} の90%以上（ D 値 $\geq 90\%$ ）あればその土の工学的性質が設計値を全て上回るものとするれば、盛土の密度が常に D 値 $\geq 90\%$ となるよう施工を行えば盛土の品質は確保されることになる。室内試験における標準突き固めエネルギーに対応した締め固めエネルギーで転圧施工した場合、その土の含水比が図-4に示す w_{L1} と w_{L2} の間であれば締め固めた土の密度は ρ_{dmax} の90%以上となり D 値 $\geq 90\%$ の管理基準を満足することになる。このことは、同一の土を同等のエネルギーで締め固めている限りにおいては、含水比さえコントロールしていれば密度は基準値以上になるはずであるから、密度をチェックするかわりに含水比に基準値（ $w_{L1} \leq w \leq w_{L2}$ ）を設けて管理する方法（含水比管理）が考えられる。一方、最大乾燥密度と最適含水比の関係は、前述したようにおおよそ飽和度が85~95%の範囲にあるから、締め固められた土の飽和度がこの範囲にあれば土は最適な領域内に締め固められていることになる。このことが飽和度を規定する管理方法の基本概念であり、締め固め密度によらず飽和度がある範囲にあれば良いとする考えである。図-4のDEFGで囲まれる範囲は、含水比の高く現場における締め固め密度が管理基準値に満たない場合に許容される飽和度の管理範囲を示したもので、多少の変形や沈下が許容されるような盛土についてはこの様な管理方法により施工されることになる。一方、図-5¹³⁾は、標準の突き固めエネルギー（ E_s ）に対し、 $E'' < E_s < E'$ となる突き固めエネルギーで得られる締め固め曲線と飽和度、空気空隙率の関係を示したものである。現場含水比が、 E_s で締め固め時の最適含水比（ w_b ）付近にある場合は、現場での転圧にはこの程度のエネルギーが効率よく与えられる転圧機種を選定すればよく、現場含水比がさらに低く w_a にある場合はさらに高いエネルギーを与えなければならないことになる。逆に、現場含水比が高く w_c である場合には、小さな締め固めエネルギーを有する転圧機械により締め固めればよいことになり、むやみに高いエネルギーを与えて転圧しても高い密度が得られる保証はなく、含水比に応じた締め固めエネルギーのもとで転圧しなければならないことを示唆している。

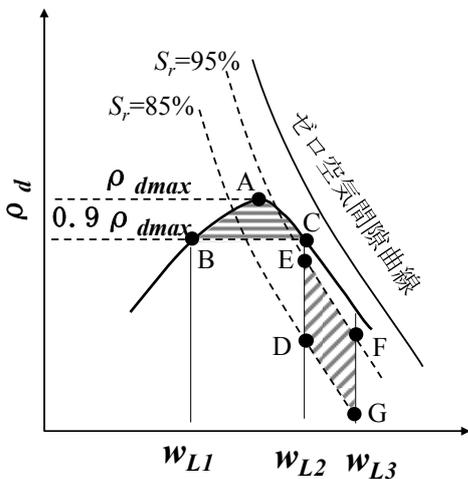


図-4 締め固め施工管理基準¹²⁾を修正加筆

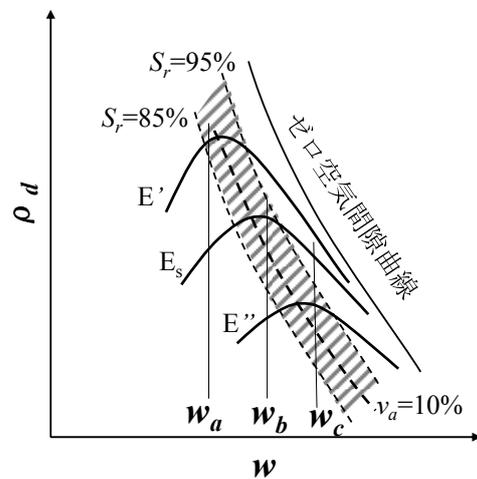


図-5 突き固めエネルギーの変化による締め固め曲線¹³⁾を修正加筆

3. 飽和度を重視した盛土の品質管理

龍岡は、前述した含水比と乾燥密度に着目した盛土の品質管理に対し、締め固め特性と締め固め土の物性を制御するサクシオンは飽和度の関数であることから、飽和度を重視した盛土の品質管理手法を提唱した。飽和度を重視した管理における基本因子は、最適飽和度であり、最適含水比は図-5に示されるように締め固めエネルギーを指定しない限り定義できないが、締め固めエネルギーレベル（CEL）に依存しない最適飽和度が存在することを明らかにした。図-6は米国オハイオ州道路局のデータ（10,000試料）の締め固め曲線を24のグループに分類し、最適含水比と最大乾燥密度の組み合わせを○点で示し、最適飽和度の曲線（ $(S_r)_{opt} = 82\%$ （average））と対比し整理したものである。ここで、最適飽和度は、前述した実験式（1）と同様に ρ_{dmax} と w_{opt} 近似した式（4）および式（3）を適用して $S_r = 1/0.122 = 82\%$ 、 $\rho_s = 1/0.3638 = 2.749$ として求められたものである。

$$\rho_w / \rho_{dmax} = 0.0122 w_{opt} + 0.3638 \quad (4)$$

図-7は、 $\rho_s=2.749$ を用いて算出した S_r と各グループの $(\rho_d)_{max}$ と $(S_r)_{opt}$ を用いて、 $\rho_d/(\rho_d)_{max} \sim (S_r - (S_r)_{opt})$ 関係として整理したものであり、広範囲の土質材料に対し類似した曲線群を示していることから両者の関係は土質材料に依存しないことが分かる。前章で述べたように従来の管理法は①締固め度と含水比、②空気間隙率（あるいは飽和度）の管理が行われ、①と②のいずれかだけを実施することが多い。これに対し、飽和度を重視した管理では、現場含水比に応じて締固め目標値 T を最適飽和度の観点から設定し、乾燥密度・含水比・飽和度の3者を総合的に管理することを特徴としている。すなわち、対象とする土質構造物に対する要求性能の実現を目指して、表-2、図-8に示すように乾燥密度と飽和度の締固め目標を設定し、締固め目標の実現のために盛土材の含水比および締固めた盛土の乾燥密度と飽和度を総合的に管理するというものである。

飽和度重視による盛土管理は、幅広い土質材料に適用できる管理方法であり、災害廃棄物由来の分別土砂にも適用できる管理方法であると思われる。

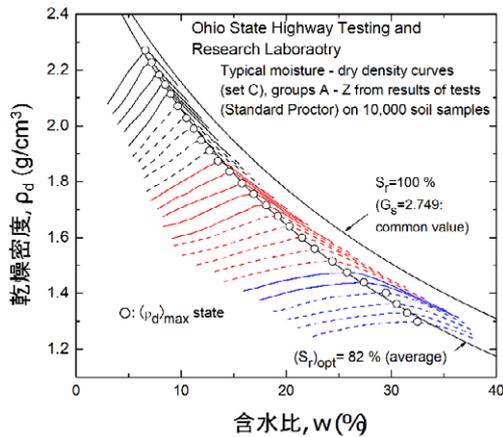


図-5 10,000試料4グループの締固め曲線

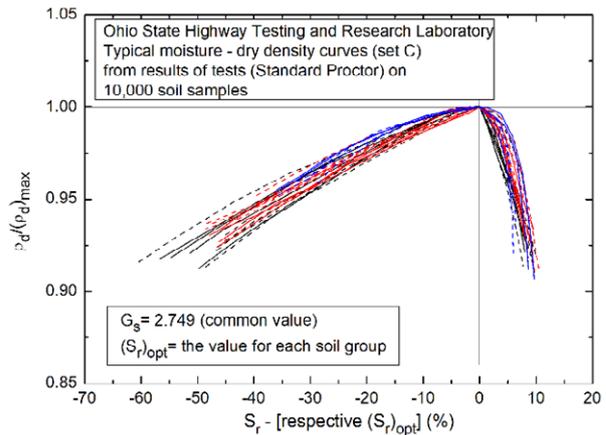


図-6 $\rho_d/(\rho_d)_{max} \sim (S_r - (S_r)_{opt})$ 関係

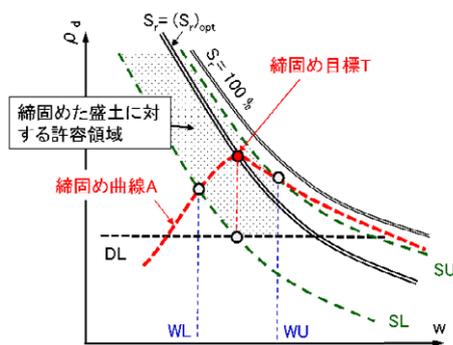


図-7 飽和度重視の締固め施工管理基準

表-2 飽和度を重視した盛土品質管理の枠組み

| 管理境界 | 要求項目 | ①高い強度・変形抵抗性の確保 | ②浸水による沈下・強度低下の抑制 | ③必要な遮水性の確保 | ④過転圧の防止 |
|-----------------|-----------------|--------------------|------------------|------------|---------|
| | | 締固めに用いる盛土材に対する管理境界 | 含水比下限線 : w_L | | ● |
| | 含水比上限線 : w_U | ● | | | ● |
| 締め固めた盛土に対する管理境界 | 乾燥密度下限線 : D_L | ● | ○ | ○ | ○ |
| | 飽和度下限線 : S_L | ○ | ● | ● | |
| | 飽和度上限線 : S_U | ○ | | | ● |

●：要求項目の確保に非常に重要な管理境界 ○：要求項目の確保に重要な管理境界

参考文献

- 1) 環境省：災害廃棄物の発生量の推計，平成25年度巨大地震発生時における災害廃棄物対策委員会第4回配布資料2，2014
- 2) 宅地防災：「宅地造成等規制法の一部を改正する法律」（盛土規制法）が公布されました～危険な盛土等を全国一律の基準で包括的に規制します！～ - 国土交通省 (mlit.go.jp) (参照 2023-02-03)
- 3) 龍岡文夫：地盤工学・技術ノート第1回 全体構成と盛土の締固め 基礎工，2013.7, p104
- 4) R.R.Proctor：Four Articles on the Design and Construction of Rolled-Earth Dams (Fundamental Principles of Soil Compaction, Description of Field and Laboratory Methods, Field and Laboratory Verification of Soil Suitability, New Principles Applied to Actual Dam-Building) , Engineering News Record ,Vol.111, 1993, pp. 245-248, 286-289, 348-351, 372-376
- 5) 大根義男：フィルダムの設計・施工の現況と課題（I），ダム技術No.77, 1993, p.26
- 6) 地盤工学会編：土質試験-基本と手引き - 2017, p.76
- 7) 中村吉男他：災害廃棄物由来の分別土砂の締固め特性・締固め管理,基礎工，2022.4
- 8) 野田健二：盛土の急速試験法，農業土木, Vol.28, No.3, pp.15-20, 1960
- 9) 森満男：土の最大乾燥密度と最適含水比について，土と基礎, Vol.10, No.9, pp.12-16, 1965
- 10) 矢ヶ崎取一他：下小鳥ロックフィルダムの設計と施工（そのII），発電水力, No.2
- 11) 水資源開発公団：設計施工資料
- 12) 河上房義他：土質力学（第8版）森北出版, p.190, 2014
- 13) 龍岡文夫：地盤工学・技術ノート第20回 盛土の締固め② 基礎工，2015.2, pp.83-88