The Japanese Geotechnical Society

土の締固め

河上房義*

土を締固めることは，人間が土を構造材料として利用するようになって以来，経験的に会得してきた技術であろう。土構造物の強度を高め，変形を小さくし，しゃ水性を増すなどのために，土を締固めることは古くからアースダムの建設などでは採用されてきた。しかしこの技術が体系の整った工学上の問題として取扱われるようになったのは，プロクター（R. R. Proctor）が，ロスアンジェルス周辺において多くの水源用アースダムを建設した経験に基づいて，1933年に〝土の締固めに関する原則〟を公表して以来のことであろう。これは今日から40年も以前のことである。この論文が，その時まで経験的に行なわれてきた盛土構造物の設計・施工に合理的な根拠を与え，土構造物の安全性を高めることに貢献したのは，この頃を境にしてアメリカにおけるアースダムの堤高が急に増大したことからも知ることができる。

このような画期的ともいえる技術の革新が，わが国における土工の施工管理の基準として導入されたのははるかに遅く，プロクターが締固めの原則を公にしてから10数年も後のことである。もちろん，それまでにわが国においても〝土の締固め〟に関していくつかの研究は行なわれていたが，プロクターの原則が実際の土構造物の設計・施工に際して考慮されるようになったのは，戦後の復興期に，道路・飛行場・アースダムなどの大量の土工が始められた時からである。これは土質工学上の種々の他の問題についても同様にいえることであるが，当時のわが国では土質工学上の新しい技術を受入れる素地が十分に醸成されていなかったためであろう。

いまさら述べるまでもないが，プロクターが最初に公にした締固めの原則は，盛土の施工に当たり土の含水量を突固め曲線の頂点に対応する含水量，いわゆる最適含水比になるように調節して施工することによって，最も高い密度の盛土が得られるとする考えに基づいているが，この原則が普及するのにつれて，それまでの経験から最適含水状態にある土の締固め施工についての批判と反省が行なわれるようになった。1953年のチューリッヒにおける第3回国際会議においては，最適含水状態より乾燥した状態で締固めることと，湿潤状態で施工することの優劣についてテルツァーギを始めとする人々によって討議がかわされているが，明確な結論は得られていない。このような締固められた盛土の性質から発した討議もさることながら，世界の各地では，その環境，たとえば気象条件などのために，プロクターの原則がそのまま適用できない場合も少なくない。たとえば，北ヨーロッパやアメリカ合衆国の北西部などの多湿寒冷な地方においては，最適含水状態よりはるかに湿潤な状態において締固める工法が行なわれていることが報告されている。わが国もその例に漏れず，締固めの原則をそのまま適用し難い場合の多いことは，アースダムやロックフィルダムのコアの施工で往々経験されることである。わが国の多雨多湿の気象条件から，ごく粗粒の場合を除き，盛土材料の自然含水比は常時高く，これを最適含水比にまで調節することは困難なことが少なくない。これに対処する手段として，土取りから締固めにいたる一連の作業の中間において仮タイ積して脱水することや，加熱による強制乾燥，粗粒材料を使用材料として選択すること，あるいは細・粗材料を混合して使用すること，時には湿潤状態における締固めを考慮に入れた盛土の断面を設計することなど種々の方法が取り入れられている。

つぎに締固めに関する最近の主なる研究の動向を概括しよう。上述のように元来，締固めは実際の現場における経験に基づいて，それを体系化して始めて工学上の問題として取り上げられた関係もあってのことか，締固まりの現象そのものや，締固めが土の工学的性質に及ぼす影響に関して行なわれた研究が多く，締固まりの機構を基礎的に明らかにし，この面から施工技術に貢献しようとする種類の研究はきわめて少ない。砂レキのような粘着力の乏しい粗粒分のみからなる土は別としても，中粒ないし細粒土について含水比を変化させつつ一定の締固めエネルギーを加えて締固めを行なうと，含水比に応じて異なる締固め密度が得られる機構については，古くから土中の含有水分の量に応じて，土がそれぞれ半固体的，弾性体的，塑性的および半粘性流体的な性質を示し，含水量が漸増して半固体的領域から塑性的領域に至るまで力学的性質が変化するのに従って，粒子の移動の難易に応じて締固め密度が漸次高まり，最大密度に達するが，この限度を越えてさらに含水比が高まり土が半粘性流体的領域に達すると密度がかえって低下するというような概括的説明はなされているものの，この分野についての基礎的な研究は十分とはいえない。ただ盛

* 工博　東北大学教授　工学部土木工学科

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

土構造物の安定の検討に関連して，塑性ないし半粘性流体的な領域にある土に生じる〝締固め過ぎ〟現象や，締固めによって不飽和土に発生する間ゲキ圧についての研究などは種々進められている。

砂レキのような粗粒土の締固めには振動力が有効なことはかなり前から知られていたが，この種の目的に適する施工機械の開発が進むにつれて，実際の現場では粗粒土に振動力を加え，あるいはこれを転圧力と併用して締固める技術はかなり定着している。しかしこの方法についても，どちらかといえば応用的な研究が先行した傾きがあるが，近年，粒状体についての基礎的研究や砂の液状化とその防止対策に関する研究などの進歩に促されたこともあって，振動締固めの機構や振動締固めを行なった粗粒土の工学的性質などについての研究も進められている。

わが国の平野部には種々の特殊土が発達していることは周知のことである。そのうち，広く分布しているのは火山灰土である。われわれが長い間，周辺にあるごくふつうの土としてながめていた関東ロームもその一つであるし，その他黒ボクのような有機質粘性土やシラスなど火山灰質土壌が全国に広く分布している。また火山灰土ではないが，各地，とくに寒冷地方の低湿地に発達している高有機質土壌や泥炭のような特殊土壌も，タイ積状態の差こそあれ広く見ることができる。フィルタイプダムのように一つの地点で集中的に施工される場合にはその例は少ないが（最近ではシラスを主材料として堤体を築造する高アースダムが建設され，あるいは計画されている例もあるが），道路や鉄道の路床，河川の堤防のように構造物が長い距離にわたって築造されるときには，現地にあるこれらの特殊土を主材料としてそれらの土構造物を建設しなければならない場合も多い。かなり前のことになるが，戦後間もない時期に関東地方で，プロクターの締固め原則に基づいた米国式の仕様によって土工が行なわれたとき，当時はいまだ JIS の突固め試験の規格もなく，導入された AASHO の試験方法によって行なった土質（突固め）試験の結果，関東ロームは乾燥重量が軽く，含水量の変化に伴う密度の変化も少なく，試料の乾燥履歴によって突固め曲線が著しく変化するなど，きわめて特異な突固め特性を有する特殊土であることが，日・米の関係者の間で改めて認識されたことがある。このようなわが国における土質の特殊性のゆえに，また実際の現場における施工に関連した必要性から，国内各地の特殊土の締固め特性や締固めに伴う工学的性質の変化，締固め方法等に関する研究は最も広く行なわれており，実際の工事への貢献も少なくない。

以上，主として実験室内における研究に関連して述べたが，さらに現場における締固めに関連して当面している2，3の問題点について記述しよう。自然状態のままにあるか，一度，掘り，ゆるめられた土に締固めエネルギーを加えて締固めを行なうことの効果は，概念的には土粒子の間隔がせばまり，土粒子相互のかみ合わせが良くなり，ひいては粗粒土においては内部摩擦が増し，あるいは細粒土にあっては粘着力が増し，強度が増加することにあると考えられている。またその結果として，土の圧縮性は低下し，土の間ゲキの縮小から透水度も低下することも期待される。現場においてはこのような土の工学的性質の改善を一つ一つ測定して締固めの効果を判定することはできないので，一般にはこれらの工学的性質の改善と相関関係にあると考えられる土の密度の変化を測定し，これを統計的に処理して施工の管理を実施しており，時に路床等ではその目的である支持力や支持力比を直接測定して管理の基準とすることも行なわれている。しかし，後者の管理方法は別としても，実際の盛土においては密度の最高値と工学的性質の最適値とが対応するわけではない。たとえば強度の最高値は最適含水比よりやや乾燥側の含水量に対応する密度において，またしゃ水性は最適含水比よりも高い含水比において得られた締固め密度に対応し，最小の圧縮性も最大密度よりやや低い密度に対応して現われる。したがって盛土に期待する工学的性質の種類とその限界値に無関係に，締固め密度によって単純に締固め作業の管理を行なうことには問題があろう。

多くの仕様書では，締固めの限界について，その下限のみを規定し，上限については規定していない。しかも締固めの基準は，実験室内で行なった突固め試験（試験に際して適用される突固めエネルギーには差があるが）の結果を基準とし，それによって得られた締固め密度（乾燥密度）にある比率（たとえば95%という値）を乗じた値を採用している。しかし実際には，現場における締固め機械の締固め効果と実験室内における突固め試験の効果との間には直接的な関連はないので，単純に突固め試験の結果を現場における締固めの基準として用いることには問題がある。前述のプロクターの提案した締固めの原則は，現場における締固めエネルギーと室内試験に用いた締固めエネルギーが等しい効果をもたらすという前提の下に，許容しうる含水比の変化の幅の中での密度の最低限を規定しようとするものであるが，現実には使用する材料の粒度や構造・乾湿の履歴なども両者の間で等しくなく，現場における施工中と室内実験の際の材料の破砕の程度や材料の拘束条件も異なり，まして両者における締固め力の性質やその大きさは同一でない。また室内突固め実験においても適用するエネルギーの大小によって締固め曲線，ひいてはいわゆる最適含水比や最大密度が変わるので，規格試験で得られた最大乾燥密度にある比率を乗じたものを現場の施工における締固め密度の最低限とすることは，仮に現場における試料採取を推計学的根拠に基づいて合理的に行なったとしても，それには工学的意義を見いだせない。まして時に見られるように，規格試験の結果に乗じる比率を100%以上に規定することなどの場合には，JIS の突固め曲線を締固めの基準

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

とする意義はない。

その他，現場における締固め作業にもいくつかの問題はあるが，施工中に盛土材料の内部に生じる含水量の変動や，これにより施工後の土構造物内の各部に含水量の不均等を生じることも，従来あまり考慮されなかったが，一つの問題であろう。たとえば，最近あるロックフィルダムのコアに関連して行なわれた大規模野外試験において，締固め後の盛土中で含水量が部分的にかなり減少する現象（下層において著しい）が見いだされているが，これなども盛土の質を均斉に保つという観点から，締固めに関連して解明されなければならない問題であろう。また締固めの施工管理に当たって必要な，現場における密度や含水量の急速測定法についても，放射性同位元素の応用などが試みられているが，今後各種の方法について一層研究が進められるべきものと考える。

最後に，締固めの施工に使用する機械について一言触れておこう。盛土の締固めに使用する機械は，盛土の材質，工事の内容や規模などに応じて選択されるべきものである。原則的には，粘性材料についてはタンピングローラーや大型の空気タイローラーが，また粗粒材料に対しては振動荷重を加えるローラーやコンパクターが，さらに狭い場所の締固めにはランマーによる突固めなどが有効であると考えられているが，近年は使用しうる機械の機種・型式も多様化・大型化しており，またわが国の土質の特徴や環境条件に適合するような改良も加えられている。しかしそれらの機種の選択や，現場における使用方法，たとえば荷重の特性，走行速度，付加荷重の大きさなどと締固め効果との関連などについての研究は必ずしも十分であるとはいえない。これらの問題については，今後基礎と応用の両面を含めた研究が進展し，より安全で経済的な土の締固めに貢献できることが期待されている。

以上，土の締固めの歴史的経過や当面する問題点などについて若干の展望を行なったが，記述の内容がフィルタイプダムその他の大規模盛土に偏ったことは否めない。締固めは，これらの大規模盛土にとどまらず，道路や滑走路の路床・路盤の築造に関しても重要な事項であることには違いなく，さらに両者の間には共通の問題もあるが，一方それぞれの構造物に要求される要件には差があるので，当然別個の問題も存在する。しかし全般的に見て，施工など実際面からの要求の解明に急であったため，従来ともすると基礎的問題の研究の遅れがなしとしなかった。将来の進展のため，それらの欠を補う必要は今日においても依然あると考える。

（原稿受理　1974.1.11）

※　　　　※　　　　※

NII-Electronic Library Service