

現場締固め特性に着目した統計的品質管理の方法

Statistical Quality Control Based on the Field Compaction Characteristics

豊田 光雄 (とよだ みつお)

建設省土木研究所フィルダム研究室 主任研究員

延山 政之 (のぶやま まさゆき)

ソイルアンドロックエンジニアリング(株) 取締役

1. はじめに

近年、新しいタイプの RI 密度計が開発されフィルダムの盛立て試験などに適用されている。これらを用いた最近の試験事例をみると、これまでにみられなかった詳細な締固めデータが比較的簡単に得られるようになり、現場転圧の締固め効果が正確に評価できるようになってきている¹⁾。なかでも自動走査式の表面型 RI 密度計 (SRID)²⁾は、RI 法のもつ簡便性と迅速性に加えて、コア材料の置換法よりも数倍大きい測定容積をもつようになり、粗粒材料に対する密度データの信頼性を大きく向上させている。一方で、例えばフィルダムのコア盛土や道路盛土などでみられるように、1層あたりの締固め厚さを大きくするなどの施工の合理化が進みつつあり、施工品質 (締固め密度) の管理がますます重要になってきている。筆者らは、このような施工の合理化に対応するために、現状の施工品質管理方法に関しても合理化を進める必要があり、上に述べた新しい密度測定法の出現によって、実際にそれが可能になってきたと考えている。

本文では従来の品質管理法に代わる新しい統計的な管理方法として、自動走査式 RI 密度計を用いた一つのモデルを提案し、その基本的な考え方と具体的な方法について述べる。現在、建設中のコア盛土において試行データを集めているので、その例を最後に示す。本文では、締固め管理の対象として、最大粒径100~150 mm 程度の粗粒材料 (具体的にはフィルダムの遮水材料) をとりあげ、振動ローラーを用いて締固める場合を想定している。

2. 現場締固め特性と密度の分布特性

2.1 現場締固め特性

従来の代表的な締固め管理方法は室内の締固め試験をベースにしており、その結果と置換法によって得られた稜率補正後の現場密度を対比して締固めの良否を判定する手法が一般にとられている。しかし、室内と現場とでは締固める材料の粒度をはじめ、締固め方法やエネルギーなどが大きく異なっており、両者の関係はほとんど明らかにされていないのが現状である³⁾。実施工の重機転圧における最適含水比や最大乾燥密度などの締固め特性を直接的に把握するためには、含水比を変えた盛立て試験を実施すればよい。筆者らは室内と現場の締固め特性の類似性や相違点を明らかにするために、このようなコ

ア材料の盛立て試験を行って、現場転圧における最適含水比、最大乾燥密度と転圧エネルギー (転圧回数) の関係や、透水性と含水比の関係などを調べた。これらの試験から次のような事柄が確認された (図-1, 2)。

- ① 現場転圧においても最適含水比 w_{opt} は存在する。
- ② 現場転圧においても室内試験の場合と同様に、転圧回数 (負荷した振動エネルギーの総量に対応する) の増加に伴って w_{opt} は減少し、最大乾燥密度 ρ_{dmax} は増加する。しかし、転圧回数が増加しても w_{opt} がほとんど変化しなかった事例⁴⁾もある。
- ③ 室内の突固め透水試験では、含水比が w_{opt} より湿潤側へ少し越えた点で透水係数の最小値 k_{min} が現れるが、現場転圧では湿潤側で単調に減少する場合もある。

いまのところ試験事例が極めて少ないので、一般的な評価はできないが、これらの結果は、現場転圧の締固め特性が必ずしも室内と同じでない可能性があることを示唆しているようであり、さらに検証データを集める必要がある。少なくとも品質管理を合理化するためには、現場転圧の締固め特性を正確に評価することが肝要である。

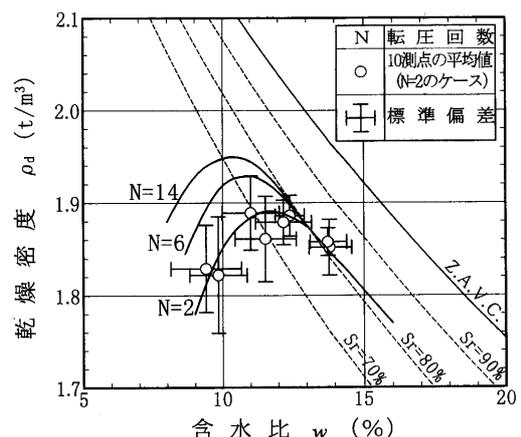


図-1 現場締固め曲線の一例

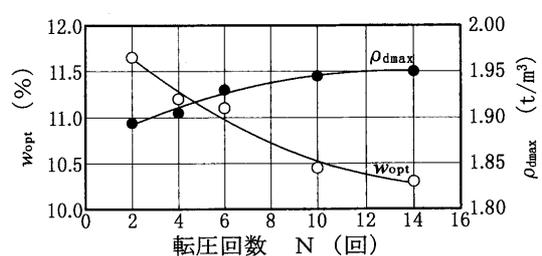


図-2 図-1の最適含水比と最大乾燥密度

2.2 物性値の分布特性

粗粒コア材料は最大粒径が比較的大きいことと、大型の施工機械を用いた大量土工によって盛立てられることから、施工ヤード内を平面的に例えば1m×1mのメッシュに分割してみれば、メッシュごとに粒度分布（特に礫分以上の含有率）にある程度のばらつきが生じることは避けられない。粒度のばらつきは施工含水比のばらつきをもたらす、これらは締固め効果に影響を及ぼす。これが転圧後の密度がばらつく第一の要因である。このばらつきはいわゆる試験（測定）誤差とは全く別物であり、粗粒材料ではそれよりもかなり大きいのが普通である。メッシュの大きさを変えれば、ばらつきの大きさも変化するから、測定データに現れるばらつきの大きさは密度計の測定容積の大きさによっても変わることにも注意する必要がある。品質管理の問題を考えるときには、対象データの分布特性を調べ、ばらつきの大きさ（分散）を定量的に把握することが基本になる。このばらつきは施工の良否とは無関係であるため、品質管理によってこれらをコントロールすることはほとんど不可能である。フィルダムの盛立て材料の場合、コア材料、フィルター材料、ロック材料のいずれにおいても締固め密度や含水比のばらつきは近似的に正規分布で表すことができ、分散の大きさは材料の粒径（最大粒径）と密接に関係していることが知られている。

3. 従来の品質管理の問題点

以下では従来の締固め品質管理の方法を、その特徴から便宜的に「細粒径管理」と呼び、後に筆者らが提案する管理方法を、これと対照して「全粒径管理」と呼ぶことにする。細粒径管理は、我が国では初期のフィルダムの時代から今日に至るまで、本質的な変更をみずに踏襲されてきているといつてよい。細粒径管理の要点と問題点をまとめると次のようである。

- ① 室内締固め試験をベースにした管理法である。
- ② ρ_{dmax} と直接対比して「締固め度」を評価するため、細粒径の乾燥密度を必要とする。これは測定できないので、礫率を介して間接的に求めなければならない。
- ③ 品質管理に必要な試験は手間と時間がかかるものが多いため、数少ないデータで品質を判断しなければならず、管理の信頼性が十分とはいえない。
- ④ 締固め密度の統計的性質が考慮されていない。

品質管理の合理化は、概念上の高度化だけで達成されるものではもちろんない。それらを実行できる試験方法や測定方法が実用化されてはじめて実際に適用できるようになる。この意味で、細粒径管理は置換法による現場密度試験を前提とした管理法であると考えられる。

4. 新しい締固め管理を目指して

これからの締固め品質管理においては、次の二つの視点を基本にもつことが重要と考えられる。

- (1) 締固め品質評価に統計的な考え方を導入すること。

密度や含水比などの現場の締固め状態を表す物性値は、よく管理された盛立て施工においては正規分布することが分かっており、分散のゆらぎも少なく分布は安定している。言い換えれば、品質管理の対象となる締固め密度や含水比などは統計的実体であるということである。ここでいう統計的実体とは、単にばらつきをもつ対象を指すのではなく、その実測値が統計的な規則性をもって分布していることを主張しており、この点に本質的な意味がある。したがって、締固め管理に統計的な考え方を導入するのは極めて自然な流れであり、そうすることによって管理基準の意味や、管理に必要な標本数などを客観的に定めることができるようになる。しかし、統計的な品質判断にはしかるべき数の多点データが必要になる（具体的な数量は管理対象の分散の大きさによる）から、これが可能な試験方法や測定方法が不可欠になる。

(2) 現場締固め特性との整合性。

コア材料は遮水性を確保するため、最適含水比よりも湿潤側で締め固められる。多くの盛立て試験の事例から、現場締固め密度は湿潤側の締固め曲線に沿って分布することが知られており、密度は含水比と密接な関係をもっている（図-3）。したがって、品質管理限界の設定においてはこのような特徴を考慮する必要がある。管理限界というのは、設計条件が満足されているというだけでは十分ではなく、締固め特性とマッチした合理的なものでなければならない。

以下の各項では、上に述べた考え方に立脚して、今後の品質管理の方向性を述べる。

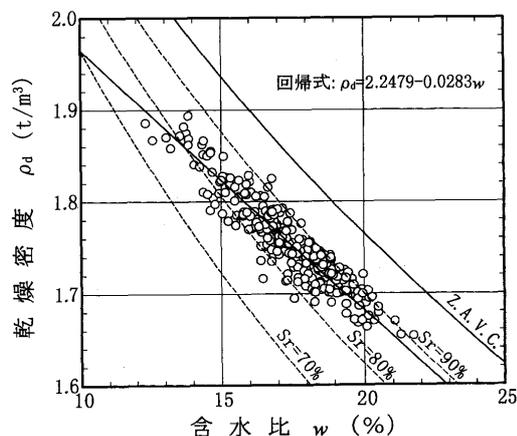


図-3 含水比と乾燥密度の相関例

4.1 細粒径管理から全粒径管理へ

近年、フィル材料の盛立て試験では、新しいタイプのRI密度測定法が開発された結果、盛立て試験のやり方そのものが合理化され、いろいろな施工条件下での現場締固め特性が精度よく分かるようになってきた。このため、これまでは設計条件の確認という色彩が強かった盛立て試験の役割が変化しつつある。設計段階では現場施工条件が未定であるから、室内試験の結果に頼らざるを得ない。このため、施工に先立って盛立て試験を行い設計値が満たされることを確認する必要があるが、現在の新しい方式の盛立て試験では確認作業にとどまらず、想

定される幾つかの施工条件の差を定量的に評価して、施工方法を客観的に選択できるようになっている。盛立て試験で明らかになった現場締固め特性を基本とする立場にたてば、もはや確率補正という考え方は不要であり、これに代わって直接測定値として得られる現場密度（全粒径密度）そのものに着目した締固め管理を導入すれば、従来の締固め管理法の難点をほとんど解消することができる。すなわち、現場粒度での施工含水比を規制し、測定できる全粒径の現場密度に着目した管理基準を定めて、品質の判定をすればよいわけである（全粒径管理）。このやり方は極めて簡明であり、多点多数データを短時間で求める測定法がすでに実現しているので、現実的に実行が可能である。全粒径管理の特徴を要約すると次のようになる。

- ① 盛立て試験の結果をベースにして構成される締固め管理法である。管理基準は盛立て試験の結果と密度および含水比の分布特性（初期の施工段階で十分な個数の標本データを収集して評価する）から定める。
- ② 全粒径の施工含水比と現場密度を管理指標とする。
- ③ 多点多数標本に基づいて統計的に品質を判定する。

4.2 全点管理か平均値管理か

従来の細粒径管理では、管理データ（標本数を3点とする事例が多い）のすべてが基準を満たす必要があるのか（全点管理）、その平均値が判定の対象になるのか（平均値管理）については、管理基準に明記された事例はほとんど見あらず、各ダムの管理技術者の判断に委ねられていたと解釈される。全粒径管理の立場からみれば、統計的な対象物を管理するのであるから、全点管理か平均値管理かという問題は本質的な意味をもたなくなる。管理限界が違うだけで、実質的な管理内容はどちらであってもかまわないからである。しかし、もともと個々のデータにとらわれずに全体をみて評価するという統計的管理の考え方からみれば、平均値管理の方が自然であり、管理を簡素化するうえからも現実的であると考えられる。例えば、締固め密度についていえば、定められたロット内で無作意に測点を選んで定められた点数のデータを集め、その平均値を管理限界と照合して判定するだけでよく、管理実務は極めて単純になる。

4.3 管理点数

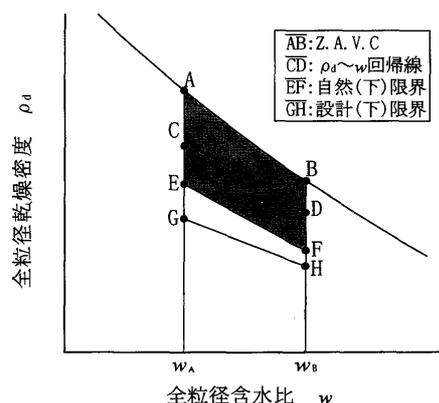
全粒径管理では、多点多数データに基づく品質判定を原則とする立場をとっているが、これはコアの締固め後の密度や含水比が確率統計的なばらつきをもっているためであって、密度測定法の精度によるものではない。RI法は固有の確率的なばらつきの要因（統計ノイズ）をもっているが、その大きさは理論的に分かっており、実際上は無視できるほど小さい⁵⁾。全粒径管理における1回あたりの必要測点数は、第一に密度分布の分散の大きさに依存する。コアとロックでは分散に差があるから、もし評価精度が同じなら測点数は当然異なる値に設定されることになる。しかし、分散の大きさだけでは測点数を具体的に決定できず、平均値の評価精度（信頼限界）

をいくりにするかをあらかじめ決めておかなければならない。逆に品質管理の迅速性や管理コストなどを考慮して無理なく実行できる点数の方を先に決めて、それに整合するように管理限界を設定するなどの便法をとってもよい。例えば、平均値の信頼限界（信頼度95%）を 0.015 t/m^3 とし（多くの場合、相対誤差で1.0%以下）、乾燥密度の標準偏差を 0.025 t/m^3 とすると、 $n=11$ 個の標本データが必要になる。SRIDの場合、これに要する測定時間は $2 \text{分} \times 11 \text{点} = 22 \text{分}$ であるが、線源孔の削孔などの準備やロスタイムを含めても1時間以内に合否判定が十分可能である。したがって、通常のコア材料の締固め品質管理では $n=10 \sim 15$ 程度の測点数を一つの目安にして管理限界を定めることもできる。

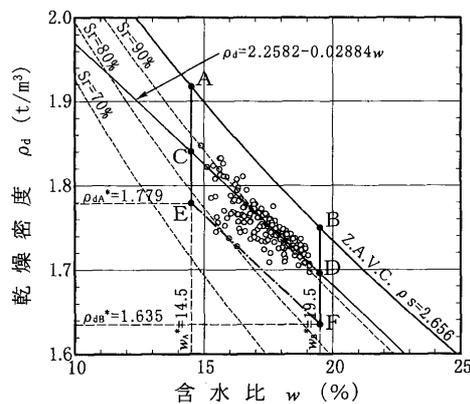
5. 全粒径管理の事例

5.1 管理限界の設定例

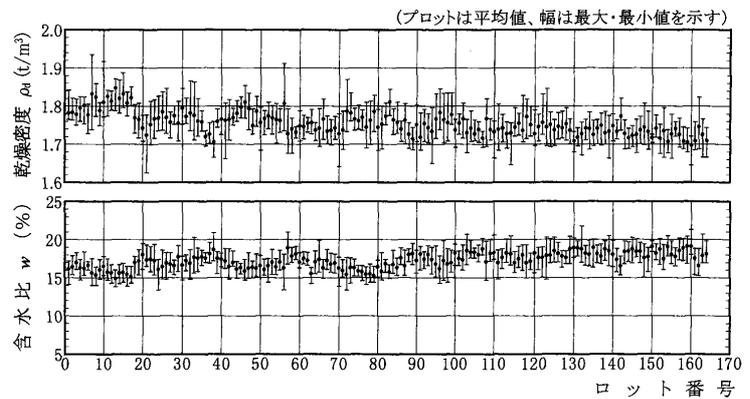
全粒径管理の具体的な例として、以下に、まず管理限界をどのように設定するかについて述べる。ここでは、縮小粒度に調整された材料を用いて室内試験を行い、その結果を確率補正して、全粒径の盛立て材料について、透水性や強度などの設計要件を満たすことのできる含水比と密度の許容限界が明らかにされていることを仮定する。この作業は、かなりのコストと労力がかかるので、正確な許容限界を見出すのは大変難しい。実際上は“この範囲であれば満たされる”という十分条件的な意味合いの限界になることが多い。コア材料の場合、下限側の含水比限界 w_1 と w_1 における密度の下限值 ρ_{d1} は一般に透水性によって決まり、 w と ρ_d の上限界 w_2 、 ρ_{d2} は強度から決まる。これらを設計条件を保証するという意味で仮に「設計限界」と呼ぶ。次に本盛立ての初期の段階で多点多数データ（20～30点/日くらいが目安）を収集して、 w と ρ_d の相関関係（回帰式）と各々の分散を求める。平均含水比の上下限（ロット間変動）を w_a 、 w_b とすると、 $(w_a, w_b) \subset (w_1, w_2)$ の包含関係が満たされるのが普通である。もし、この包含条件が満たされないときには、材料や設計の見直しを行う必要があり、例えば含水比調整などの措置が求められる。その結果、上の包含関係が成り立つことがコア材料としての必要条件となる。 w の管理限界としては二つの考え方がとれる。一



図—4 全粒径管理限界の概念図



図—5 全粒径管理の試行例



図—6 管理データの時系列変動

つは (w_1, w_2) を管理限界として採用することである。設計上はこれで問題はない。しかし、 (w_a, w_b) が余裕をもって (w_1, w_2) に包含される場合には、 (w_a, w_b) をベースにして管理限界を決める方がより自然である。例えば管理限界 w_A, w_B を次のように設定する。

$$w_A = w_a - \alpha \cdot \sigma_w / \sqrt{n}$$

$$w_B = w_b + \alpha \cdot \sigma_w / \sqrt{n}$$

ここで、 σ_w は w の標準偏差、 n は管理点数、 α は信頼度を保証するための係数である。信頼度は95%もしくは99%のどちらかにすればよい。 $n \geq 10$ の管理ではどちらを用いても数値の丸めや余裕しろなどによってほとんど差のない結果になる。 (w_A, w_B) を (w_1, w_2) と対比して仮に自然限界と呼ぶ。自然限界のメリットは次の二つの点にある。

- 設計限界を決めるのは一般に困難なことが多い。
- 設計限界との差が大きいときには品質の経時変動に注意が喚起されやすくなるという意味で、自然限界の方がより厳しい管理になり、ダム均質性を高める効果が期待できる。

しかし、自然限界をはずれたとしても、即、品質不良と断じて排除する必要はない。設計限界に入っていればその原因やその後の変動を追跡することによって許容できる場合もある。この意味で、自然限界はある程度の柔軟性をもった管理限界といえる。

次に w の場合と同様にして、 ρ_d の自然管理限界を定めることができる。すでに述べたように ρ_d は w に強く依存するという事実を考慮する必要がある。したがって、 ρ_d の母分散は単にロット内の ρ_d の分散から求めるのではなく、 $\rho_d \sim w$ 関係の回帰偏差の分散を用い、さらに ρ_d の日間変動も考慮して管理限界を決める。

図—4 に密度の管理限界を概念的に示す。EF と GH が交差するときには EF 線と GH 線を合成して折れ線状の管理限界に修正する必要がある。逆に両者の開きが大きすぎる場合は設計を見直す必要がある。多少の余裕をもって、EF と GH が接近しているのが最も望ましい条件といえる（最適設計）。なお、 w の場合と同様に（あるいはそれ以上に） ρ_d の設計限界を求める作業は経済的な面で制約が大きく、大変な困難を伴うことが予想される。逆に自然限界を少し拡大した点で所要の品質が確

保できることをチェックする方が現実的である。

5.2 試行事例

前節に示した手順にしたがって管理限界を設定し、コア材料の締固め管理に試行的に適用してみた結果を示す。対象としたコアゾーンは、盛立て試験の結果を基に、自重108 kN級の振動ローラーを用いて、締固め厚さ30 cm、6回転圧で盛立てられている。盛立て当初の約1箇月間で、SRIDを用いて280点（ロット数28、標本数10点/ロット）の締固め密度と施工含水比のデータを収集して管理限界を設定した（管理限界の信頼度は密度、含水比ともに片側2.5%とした）。以降の締固め管理では管理点数を $n=10$ とし、全粒径の施工含水比と乾燥密度の平均値を追跡した。ちなみに平均乾燥密度の信頼限界は 0.0155 t/m^3 となり、相対的な評価誤差の上限界は1%以下になる。同様に含水比の評価誤差の限界は絶対値で0.6%以下になる。図—5に管理限界と得られた管理データのプロットを示す。また、図—6は密度と含水比の時系列を示したものである。時系列変動をみると施工含水比はロット番号L100くらいまでは、揺動しながらわずかに上昇しており、L100以降はほぼ安定状態に至っていると判断される。乾燥密度も含水比の変動に連動した推移を示している。図—5では、管理限界の乾燥側で回帰線CDの下側に分布するデータがやや多く出現しているが、管理限界をはみ出すデータは164ロット中1点だけである。現在、盛立てが進行中であるが、いまのところ管理図を修正する必要はないと判断される。

参考文献

- 1) 豊田光雄・延山政之：フィル材料の現場締固め密度を評価する新しいRI法，土と基礎，Vol. 47, No. 3, pp. 9～12, 1999.
- 2) 豊田光雄・吉田 等・延山政之：自動走査式RI密度計（SRID）の開発とフィルダムへの適用，ダム工学，Vol. 7, No. 2, pp. 98～113, 1997.
- 3) 土質工学会編：土の締固めと管理，pp. 127～148, 1991.
- 4) 豊田光雄・山本重樹：含水比をかえた粗粒材料の盛立て試験による現場締固め特性，第34回地盤工学研究発表会講演集，pp. 1865～1866, 1999.
- 5) 豊田光雄・野村 孝：自動走査式RI密度計（SRID）の測定容積と精度，第34回地盤工学研究発表会講演集，pp. 1859～1860, 1999.

(原稿受理 1999.10.28)