

◆ ダム分野における新技術特集 ◆

フィルダム・コア材料の転圧厚さの増大に関する実験的検討

豊田光雄* 有銘伸予**

1. はじめに

フィルダムは自然材料を用いて築造する大型土構造物である。堤体を安定させるロック部では、せん断強度の大きい粗粒材料が必要とされ、遮水機能を果たすコア部では難透水性の材料が用いられる。これらの材料を大型の土工機械を用いて締固めているが、材料の有効利用、施工および品質管理などにおいて、まだいくつか合理化の可能性が残されている。ここでは、施工におけるコア材料の転圧厚さに着目した。コア材料の転圧厚さは、これまで 20cm が一般的で約 30 年間ほとんど変化がない。この理由には、締固め機械が限定されてきたこと、締固め効果を精度よく、かつ迅速に測定する方法がなかったことなどがあげられる。一層当たりの転圧厚さを増大できれば盛立速度が向上し、ダムの建設工期の短縮やコスト縮減に寄与できると考えられる。

本報文は、コア材料の転圧厚さを 20cm から 50cm まで変えて振動ローラによる現場転圧試験を行い、転圧厚さの増加に伴う密度の差異などについて検討した結果を述べたものである。現場密度測定には従来から用いられている置換法の代わりに、これよりも測定容積が大きい高精度の新しい RI 密度計を用いた。

2. フィルダム・コア材料の実態

過去 30 年間に築造された建設省関係の土質コア型フィルダム (26 ダム) について、コア材料の特性および重機転圧による締固め施工法の概要を述べると次のとおりである。

①コア材料には、崖錐、まさ、ローム、シルトなどの細粒材料にいろいろな粒径の風化岩が適度に混じった粗粒材料が用いられており、図-1 に示すように、最大粒径 100~150mm、細粒分含有率 15~25%、19mm 以上の粗粒分 20~40%、53mm

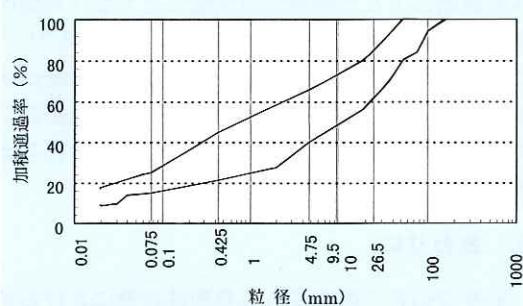


図-1 コア材料の粒度分布 (26 ダム)

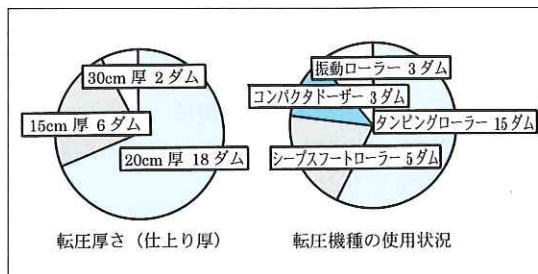


図-2 転圧厚さおよび転圧機種 (26 ダム)

以上の粗粒分 20%以下というのが代表的な粒度構成となっている。

②図-2 に示すように転圧厚さは 15~20cm がほとんどである。転圧機種は、タンピングローラなどと突起を有するローラが多く、振動ローラの利用は少ない。

3. 転圧厚さの検討方法

従来の転圧厚さの検討では、図-3a に示すように所定の転圧回数ごとに試験ゾーンを設けて、置換法による現場密度の測定とその置換孔を利用して透水試験が行われてきた。しかし、この方法では次のような問題がある。

①従来の試験ゾーン方式では、ゾーン間の粒度のばらつきがあるため締固め密度に及ぼす転圧の効果が抽出しにくい。

②自然材料を用いた機械化施工を行うと、粒度のばらつきによって締固め密度にもばらつきが生じる。従来の置換法では測定数が限られており、締

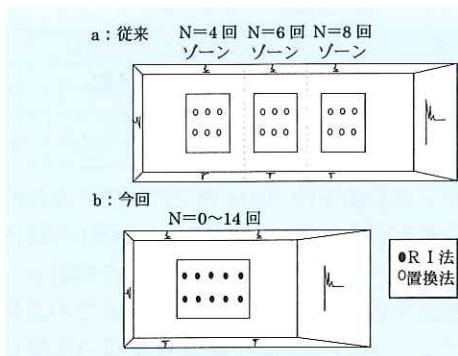


図-3 盛立試験ゾーンの考え方

固め度の評価が困難である。

③転圧厚さを増大するときには、深さ方向の密度分布についても考慮する必要がある。しかし、置換法はこのような測定には適していない。

そこで、図-3bに示すように同一試験ゾーンで所定の転圧回数ごとにRI法による密度測定を行った。RI法を用いると同じポイントで繰り返し測定ができるため、粒度のばらつきの影響を締固め密度から排除でき、また多点数測定によってばらつきを考慮した密度の評価ができる。しかし、従来のRI密度計ではコア材料のような大礫を含むものに対しては、測定容積が十分でないことや、迅速な多点数測定にはまだ課題があり、さらに転圧厚さの増大に伴って転圧層内部の密度の均一性が課題となるので、次項で述べる2種類の新しいRI密度計を用いた。

また、転圧厚さを増大させるには転圧エネルギーの大きい締固め機械が必要となる。ここでは、礫の混合が多いコア材料であることを考慮して、転圧厚さが大きいロック部などで用いられる起振力の大きい振動ローラを利用した。

4. 新しいRI法

転圧層内の平均的な密度の測定には測定容積が大きく、高精度で、しかも迅速な測定ができる走査式の表面型RI密度計(自動走査式RI密度計¹⁾:SRID)と、密度の深度分布を連続的に測定するRI密度計(自動走査式フレーム型RI密度計²⁾:FRID)の2種類を用いた。その特徴および測定法を述べる。

4.1 SRID

SRIDと従来型の機構上の相違点は2つある。ひとつは従来型RI密度計が測定地盤面に接地固

定して用いるのに対して、SRIDは、図-4に示すように検出部を地表面から約50mm浮上させた状態で、線源棒を軸にして一定速度で回転しながら一周360度の走査を行う。走査時間は1分である。ただし、自然放射能(バックグラウンド)の測定時間(1分)も含めると2分になる。走査円の半径は密度検出部で40cm、水分検出部で24cm(それぞれ検出器の中心と走査中心軸間の水平距離)である。測定深さを30cmとした場合は、密度測定におけるガンマ線の地中透過距離が約50cmとなり、これは低レベルの微弱線源を用いるという制約の

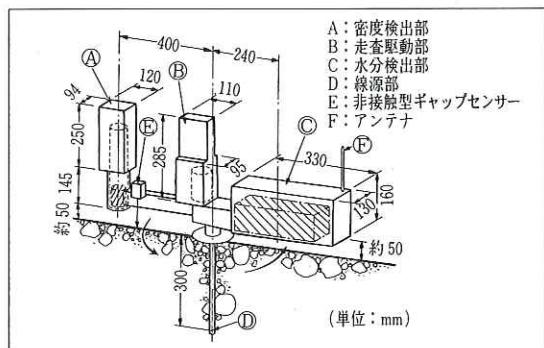


図-4 SRID の概要

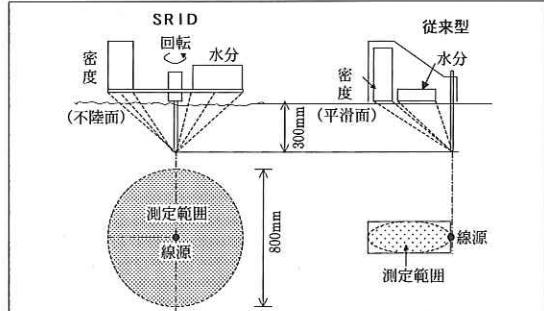


図-5 測定領域の比較

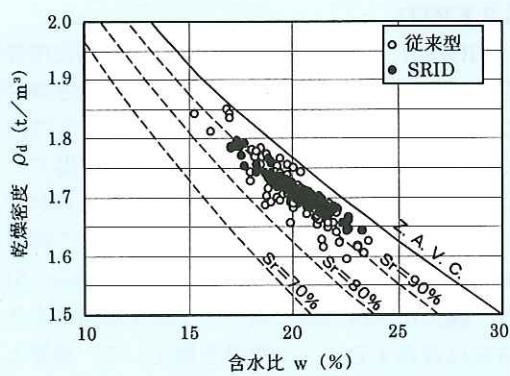


図-6 従来型と SRID の比較データ

表-1 SRID の主な仕様

検出方式	表面透过型
走査方式	自動円周浮上走査型(浮上高さ約50mm)
測定深さ	最大300mm
測定時間	1分/回転
線 源	密度:コバルト60(2.6メガベクレル) 水分量:カリコルニウム252(1.1メガベクレル)
検出器	密度:NaIシンチレーション検出器 水分量:3ヘリウム比例計数管

もとではほぼ限界に近い値である。したがって、図-5に示すようにSRIDは表面型RI密度計で達成できる最大の測定領域をもっている。なお、コア材料で行われる置換法(例えば、転圧厚さが20cmの場合には直径20cm、深さ20cmの置換孔)の測定容積に比べても数倍大きい。

2つめの相違点は、SRIDでは非接触型ギャップセンサーを用いて走査円上の浮上高さの変動をモニターし、浮上高さからのずれ(50mmとの差)に起因する較正曲線のずれを補正する方法をとっていることである。これより、従来のRI法のように測定面を平滑にする作業が省けるので多点数の測定がいっそう容易となる。

表-1にSRIDの主な仕様を示す。図-6には、あるコア盛立現場において従来型とSRIDの比較を行った一例を示す。SRIDの方が従来型の密度データに比べばらつきが少ない。これは、SRIDの測定容積が従来型に比べ12倍以上大きくなった結果、局所的な粒度のばらつきの影響が小さくなつたためと考えられる。

4.2 FRID

FRIDは、図-7に示すように2本の測定用導管を平行に保つために、導管の上端と下端を固定梁で連結したもの(これを導管フレームまたは簡単にフレームと呼ぶ)を、コア材料をまき出すときに盛立層内に埋め込んでおく。転圧後にそれぞれの導管内にガンマ線源と検出器を挿入して両者を同一深度に保ちながら一定速度(1mm/sec)引揚げ、線源から検出器に向かって転圧層内部を水平方向に透過するガンマ線量を測定して、導管と導管の間の密度を求めるものである。まき出し厚さに応じて導管の長さをかえることにより、転圧層

表-2 FRID の主な仕様

線 源	コバルト60(3.7メガベクレル)
検出器	NaIシンチレーション検出器
透過距離	500mm(導管軸距離)
走査速度	1mm/sec
測定方式	連続自動走査方式

の底面から地表面下約10cmまでの区間の連続的な密度分布が得られる。フレームは、転圧の妨げにならないようにするために、約45度の傾斜をもたせて埋設する。地表面から約10cmまでの表層部は、フレームの固定梁と地表境界面の影響によって見かけ上密度が実際より低めに評価されるので、表層部の密度はSRIDのデータで補っている。密度走査データは直接モニターに表示されるので、その場で締固め状況を判断することができる。なお、FRIDではRI水分計が対応できず、得られる結果は湿润密度だけである。表-2にFRID

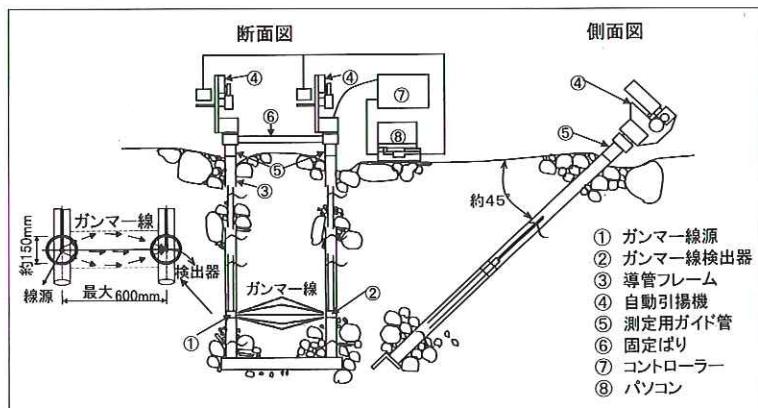


図-7 FRID の概要

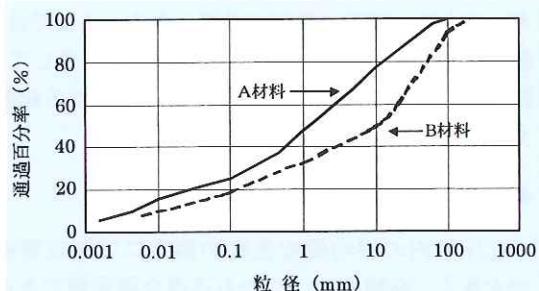


図-8 試験粒度

表-3 試験条件

転圧厚さ	まき出し厚さ	施工含水比:最適含水比
20cm	20cm	転圧速度:V:3km/時
30cm	30cm	転圧回数N:N=0,2,4,6,10,14
40cm	20cm×2回	試験層数2~4層
50cm	25cm×2回	透水試験:最終層で実施

・転圧厚さ=仕上り厚さ

・まき出し厚さ:実際には、所定の仕上り厚さになるようにやや厚めに設定している

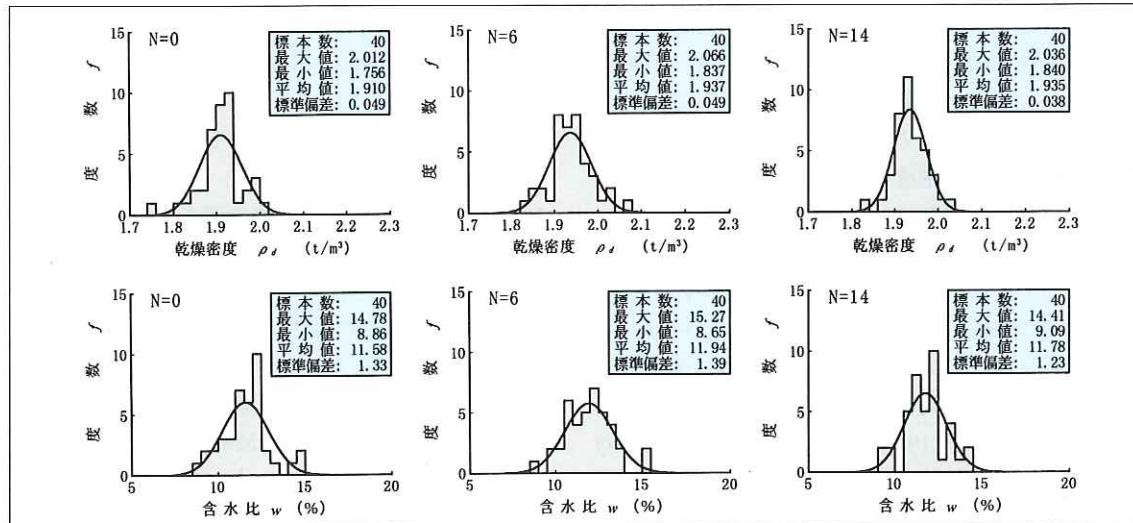


図-9 測定値のばらつき (B 材料)

の主な仕様を示す。

5. 現場転圧試験

5.1 試験概要

転圧試験に用いた材料は、緑色片岩(角礫、絶乾比重 $G_b=2.9$ 、吸水率 $Q=1\%$)と細粒材を重量比 1:9 で混合した A 材料および河床砂礫(円礫、 $G_b=2.5Q=2\%$)と細粒材を 2:1 の重量比で混合した B 材料の材質、粒子形状が異なる 2 種類のコア材料を用いた。図-8 にそれぞれの平均的な粒度分布を示す。A 材料は細粒側に位置し、B 材料は粗粒側にある。

試験は、鉛直動が卓越している自重 112kN 級の振動ローラを用い、前項の RI 測定器による現場密度の測定と定水位法による透水試験を行った。試験条件を表-3 に示す。施工含水比は室内試験から推定した最適含水比とした。転圧厚さ 20, 30cm のケースでは、まき出し厚さと転圧厚さを一致させ、転圧厚さ 40, 50cm のケースでは、転圧層内を均質な粒度分布とするため、まき出し厚さを転圧厚さの半分とし、2 回まき出し後に転圧を行った。

5.2 SRID による転圧厚さと密度

5.2.1 測定値のばらつき

転圧厚さの違いの影響を求めるまえに、SRID で測定した値のばらつきについて検討する。

図-9 は、B 材料を振動ローラで締固めたときの乾燥密度および含水比のヒストグラムである。測定領域は 6m × 12m の広さがあり、転圧厚さ 30cm における転圧回数 N=0, 6, 14 回のケースを示し

表-4 測定値のばらつき

転圧厚さ	統計量	A 材料		B 材料	
		含水比 w (%)	乾燥密度 ρ_d (t/m ³)	含水比 w (%)	乾燥密度 ρ_d (t/m ³)
20cm	平均値	16.6	1.792	11.3	1.956
	標準偏差	1.1	0.027	1.2	0.037
	標本数	30	30	10	10
	最大値	18.7	1.84	13.2	2.037
	最小値	14.6	1.736	9.4	1.896
30cm	平均値	16.2	1.829	11.9	1.937
	標準偏差	0.8	0.026	1.4	0.049
	標本数	30	30	40	40
	最大値	17.7	1.872	15.3	2.066
	最小値	14.9	1.789	8.7	1.837
40cm	平均値	16.5	1.815	10.2	1.97
	標準偏差	0.6	0.024	0.9	0.035
	標本数	30	30	20	20
	最大値	17.6	1.865	11.8	2.043
	最小値	15.3	1.77	8.1	1.908
50cm	平均値	17.6	1.761	—	—
	標準偏差	0.6	0.010	—	—
	標本数	10	10	—	—
	最大値	18.4	1.778	—	—
	最小値	16.6	1.748	—	—

ている。SRID の測定は所定の転圧回数ごとに 10 点づつ行っている。試験は繰返し 4 層行っているので、各ヒストグラムの標本数は 40 である。図に示された密度のばらつきは、いわゆる測定誤差ではなく、主として粒度や含水比の場所的なばらつきに起因する密度のばらつきを表している。したがって、試験ゾーンの平均的な締固め密度を評価するときには、このばらつきを考慮する必要がある。図-9 から転圧後の密度のばらつきは、転圧前よりも多少減少する傾向が認められる。この傾向は、A 材料においても同様である。表-4 に密度

がほぼ収束している $N=6$ 回における転圧厚さごとの測定値の統計量を示す。標本数に違いがあるものの、両材料とも転圧厚さを大きくしても密度のはらつきが増すことはない。

5.2.2 転圧回数と密度

図-10 に、A 材料の転圧厚さ 20, 30, 40, 50cm における転圧回数と乾燥密度の関係(転圧効果曲線という)を示す。図中のプロットは各転圧回数における全測定値の平均値を示したものである。なお、転圧厚さ 50cm の場合は、敷均し後と転圧回数 6 回のデータだけである。図からわかるように、転圧厚さ 20~40cm の 3 ケース間では転圧効果曲線の傾向に大きな違いが認められない。転圧厚さ 50cm のケースでは、6 回転圧時の密度がこれら 3 ケースよりも小さくなっているが、初期密度も同時に最も小さくなっている。転圧に伴う密度增加は他のケースとほとんど差がない。図示はしていないが、B 材料でも転圧厚さの違いによる密度の明瞭な差は出でていない。

5.2.3 含水比と密度

図-11 は、転圧厚さをパラメータとして含水比と乾燥密度の関係を示したものである。A, B 材料とも締固め密度は含水比に強く依存しており、測定データはほぼゼロ空気隙曲線 Z.A.V.C. に

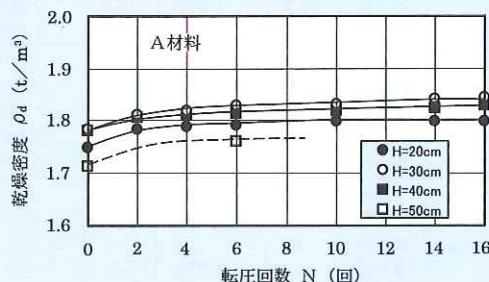


図-10 転圧回数と乾燥密度の関係

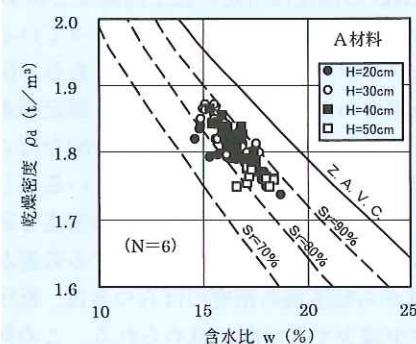


図-11 含水比と密度の関係

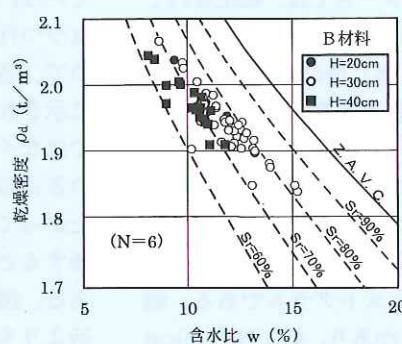
平行に帯状の分布となっている。すなわち、転圧厚さの影響は含水比の影響に比べると弱いことを示している。図-10 の転圧効果曲線にみられる密度差は、試験ゾーン間の粒度や含水比のばらつきを反映していると考えられる。

5.3 FRID による転圧層内の深さ方向の密度分布

図-12 に、A 材料では転圧厚さ 20~40cm の 3 ケース、B 材料では 30cm と 40cm について、まき出し時と転圧後の深さ方向の密度(湿潤密度)分布を示す。図では、2 つ以上の試験層にわたっての密度分布を示している。試験層の 1 層目に示している細い線は、1 層目の最終転圧回数 $N=14$ 回後の密度分布を表しており、太い線は最終層のまき出し後 $N=0$ と $N=6$ 回転圧後の密度分布を全層にわたって測定した結果である。20~40cm のいずれの転圧厚さにおいても、転圧層内および全転圧層にわたっての上部と下部で大きな密度差は認められない。A 材料の 1 層目の 14 回転圧後から 2 層目の敷均し後の間で 1 層目の密度が増加している。この要因としては下位層が飽和密度に達していないことや、まき出しに伴う締固め効果を考えられる。なお、上位層の転圧時における下位層の密度増加ではなく、積層転圧による下層の締固め効果がないことも示している。

5.4 転圧厚さと透水係数

図-13 は、最終層の $N=14$ 回で求めた乾燥密度と透水係数の関係である。ただし、50cm のデータは転圧回数 6 回である。透水係数は転圧厚さに応じた大きさの置換孔(例えば転圧厚さ 30cm では直径約 30cm、深さ 30cm)を用いて定水位法によって求めている。透水係数は、コア材料の設計値である 1×10^{-5} cm/s 以下に分布しているが、この密度の範囲内においては、密度と透水係数の相関は低い。また、両材料とも転圧厚さの違いによって、透水係数に明瞭な差を生じていない。



6. まとめと今後の課題

材質、粒子形状、粒度分布の異なる 2 種類のコア材料について行

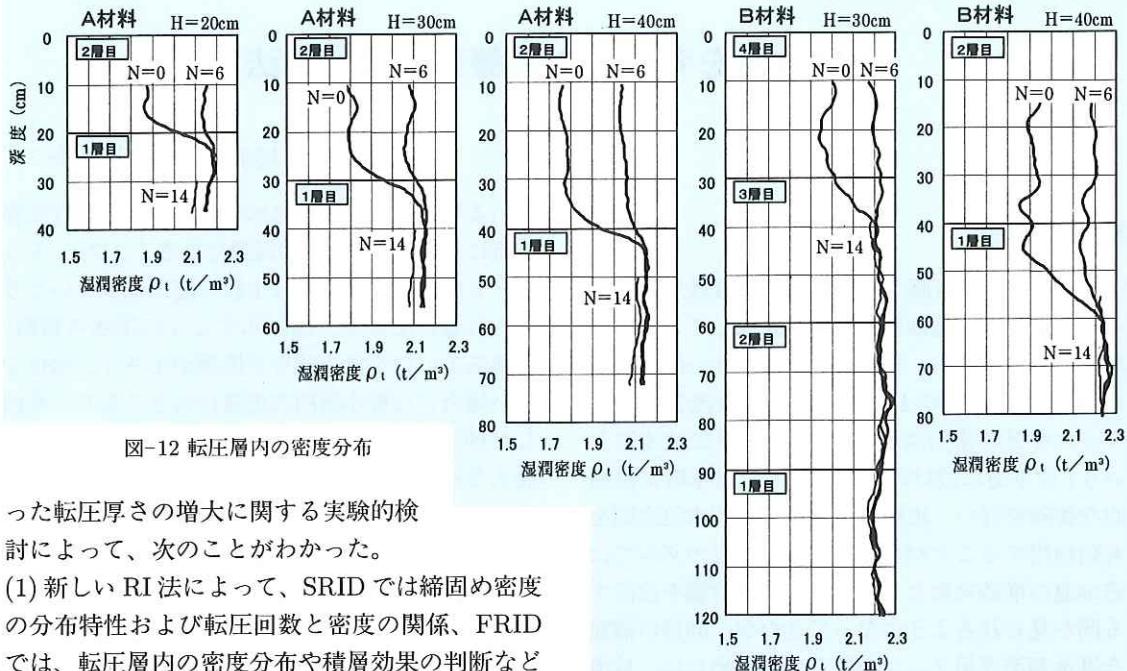


図-12 転圧層内の密度分布

った転圧厚さの増大に関する実験的検討によって、次のことがわかった。

- (1) 新しい RI 法によって、SRID では締固め密度の分布特性および転圧回数と密度の関係、FRID では、転圧層内の密度分布や積層効果の判断など定量的な評価ができた。

(2) 転圧厚さ 20~50cmまでの間で転圧厚さを増大することによって、転圧による密度増加が低下する傾向は認められず、転圧層内で深さ方向に密度差が生じるという状況もみられなかった。また、遮水性に関しても転圧厚さの違いによって透水係数に差が生じるという結果は得られなかった。

(3) コア材料においてはタンピングローラが多く用いられているが、以上の結果から、起振力の大きい振動ローラによって転圧厚さの増大が可能であることが示された。

ところで、コア材料は均質な施工が要求されることから、転圧厚さの増大によって、品質管理手法の重要性が増してくることは明らかである。従来の施工における品質管理手法を踏襲するのではなく、密度や含水比のばらつきを考慮した新しい形の品質管理手法の提案が望まれる状況にきていると言える。

参考文献

- 1) 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.

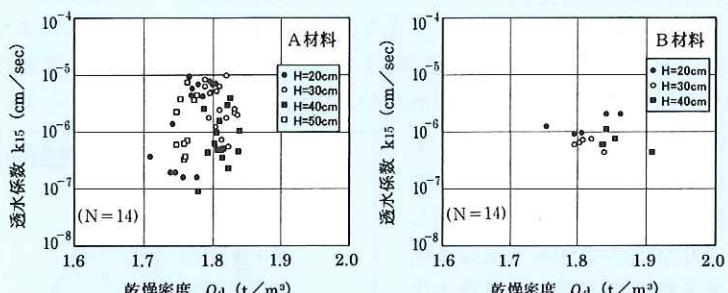


図-13 乾燥密度と透水係数の関係

- 2) 豊田光雄、中村昭、延山政之：自動走査式フレーム型 RI 密度計を利用したロック材料の現場締固め特性の評価、ダム工学, No.22, pp.36-49, 1996.

豊田光雄*



建設省土木研究所ダム部
フィルダム研究室
主任研究員
Mitsuo TOYODA

有銘伸予**



同 フィルダム研究室
Nobuyo ARUME