

報告 ダムコンクリートの締固め評価手法の検討

天明 敏行^{*1}・庄野 昭^{*2}・寺田 幸男^{*3}

要旨: コンクリートダムにおける有スランブコンクリートの締固め作業では、作業面積が広いため搭載型内部振動機を使用する。コンクリートが十分に締固められたかどうかは、内部振動機搭載機のアペレータが目視で判断するが、管理方法は必ずしも十分とはいえない。ここでは、内部振動機への負荷がコンクリートの締固め性状と関係があるという性質を利用し、内部振動機作動油の圧力やコンクリートの導電性を測定することにより、コンクリートの締固めを評価する手法を検討した。その結果、内部振動機作動油の圧力の経時変化を利用してコンクリートの締固めを評価できる可能性があることがわかった。

キーワード: ダムコンクリート, 締固め, 搭載型内部振動機, 油圧, 導電性

1. はじめに

ダムコンクリートの締固め作業は、ダム本体の水密性や耐久性、強度を確保する上で大変重要であり、コンクリート標準示方書(ダム編)¹⁾では、「有スランブコンクリートが十分に締固められたかどうかは、ダムコンクリートの沈下がなくなる、大きな気泡が生じなくなる、水が表面に現れて光沢が生じることなどによって確認できる。」とされている。

ダムコンクリートの狭隘な部分を除く一般部における締固めには、バックホウに3~4台の内部振動機を搭載した搭載型内部振動機が用いられるが、締固め作業はコンクリート性状の変化や打込みリフト天端の仕上がりをアペレータが目視で確認しながら実施しているのが実情である。このためコンクリートの締固めは、かけ忘れあるいは不十分な稼動時間による締固めの不足、過度な稼動時間による材料分離などが懸念され、均質なコンクリートを得るための管理状況としては必ずしも十分ではない。なお搭載型内部振動機による締固め時間については、例えば「ダム工事積算基準の解説」²⁾では4本の内部振動機を搭載した締固め機を用いた場合の1サイクル当り1.08m³のコンクリートの締固め時間を40秒としている。しかしながら、実際に現場でダムコンクリートの締固めを時間で管理する例はあまりない。

コンクリートの締固めを評価する既往の研究にはコンクリート内部における内部振動³⁾⁴⁾、電気抵抗⁵⁾⁶⁾や間隙圧⁷⁾の変化を検討した事例の他、内部振動機の振動の変化や負荷トルクを検討⁸⁾したものがある。これらのうち、内部振動機の負荷トルクにより締固めの評価を研究している岡本らの研究⁹⁾によれば、負荷トルクと締固めエネルギーはコンシステンシーの変化に反映し、加速度とも連動性があることなどが確認されている。

本研究ではコンクリートの締固めを評価する方法として、まず内部振動機の負荷トルクに着目した。搭載型内部振動機を使用する場合、負荷トルクに相当するものを油圧作動油の圧力とみなし、内部振動機搭載機の油圧系統のうち、内部振動機の作動油の配管に油圧センサを設置して油圧の経時変化を測定した。

一方、コンクリートは締固められる過程で空隙が減少し、セメントペーストで充填されることによりコンクリートの電気特性が変化すると考えられている⁵⁾⁶⁾。この性質を利用して締固めの評価を行うことを目的とし、コンクリート中に電極を挿入して電位差を生じさせ、コンクリート中を流れる電流値の経時変化を測定した。

以上の測定結果を用いて締固め中のコンクリートの物性の変化を把握し、締固めの完了を評価する客観的な手法を検討した。

2. 試験方法

2.1 コンクリートの使用材料と配合

試験は宮城県で建設中の重力式コンクリートダムで行い、締固め試験で用いるコンクリートの材料も同じものを使用した。本ダムでは購入コンクリートを使用しており、運搬はトラックミキサを使用している。配合は外部コンクリートに準ずることとしたが、締固め試験を繰返して実施するため、セメントを使用しない試験用コンクリートとし、単位セメント量の不足分は同量の石灰砕石で置き換えた。試験用コンクリートの配合を表-1に、細骨材と石灰砕石の粒度分布を図-1に示す。細骨材と石灰砕石の粗粒率(F.M.)はそれぞれ2.47, 2.67であった。石灰砕石の粒度が予想より粗かったため、微粒分の少ないコンクリートであったが、締固めた際の目視による観察では通常のダムの外部コンクリートとほぼ同様の挙

*1 ハザマ 土木事業本部技術第三部 工博(正会員)

*2 ハザマ 土木事業本部土木設計部(正会員)

*3 ハザマ 土木事業本部機電部

動であり、締固めの進行とともに表面の沈下、気泡の発生、水が表面に現れて光沢が生ずる等の状況を呈した。なお、別のバッチで練混ぜを行った同じ配合のスラブは3.3cm、空気量は3.0%であった。

2.2 搭載型内部振動機の仕様

ダムコンクリートの締固めで使用する内部振動機搭載機の仕様を表-2に示す。本搭載機にはφ150mmの内部振動機を4本搭載している。

また、内部振動機搭載機は内部振動機の運転に関して、以下に示す4段階の運転モードがある。各モードI（アイドリング）、L（ロー）、E（エコノミー）、P（パワー）の順にエンジンの回転数が上がり、油圧が大きくなる。通常のスラブコンクリートの締固め作業では、P（パワー）モードで使用する。

内部振動機搭載機の油圧回路は複雑であるが、メインポンプから内部振動機用の油圧回路に接続されている油圧系統は独立しており、この独立した部分に油圧センサを設置することにより、ブームやアームの使用の有無に関わらず、内部振動機だけに作用する油圧を測定することが可能となる。ここでは、内部振動機全体の油圧の経時変化を測定するために4台の内部振動機の油圧配管

表-1 試験用コンクリートの配合
※(kg/m³)

水	セメント	細骨材		粗骨材		
		5mm ~0mm	石灰 碎石	60mm -40mm	40mm -20mm	20mm -5mm
W	C	S1	S2	G1	G2	G3
110	0	604	210	433	459	583

※セメントと石灰碎石の密度が異なるため、正確には1m³ではない。

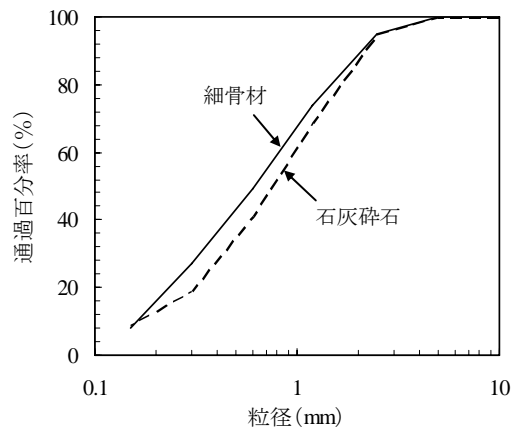


図-1 細骨材と石灰碎石の粒度分布

表-2 内部振動機搭載機の仕様

エンジン		最大出力	55PS
		回転数	2200rpm
		質量	7210kg
油圧ユニット	本体用 油圧ポンプ	油排出量	135ℓ/min
		常用圧力	19.6MPa
	パイプレータ用 油圧ポンプ	油排出量	80ℓ/min
		常用圧力	19.6MPa
内部振動機		油量	14~16ℓ/min
		常用圧力	15.7MPa
		振動数	7000~8000vpm



写真-1 油圧計設置状況

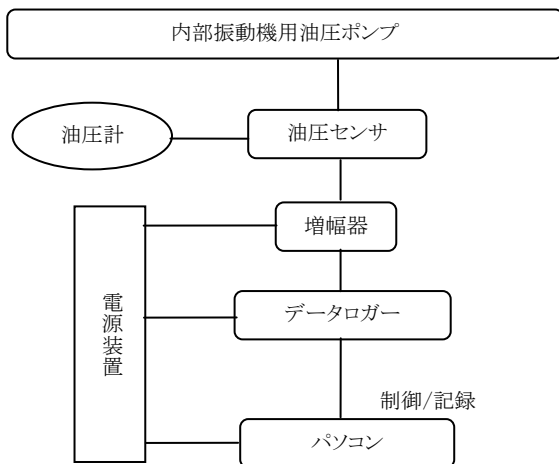


図-2 油圧計測システム



写真-2 油圧計設置状況（拡大）

が集合する箇所に油圧センサを設置した。

2.3 油圧測定

センサで検知された油圧を内部振動機（搭載機）のオペレータが常時確認できるように、油圧計を運転席から見やすい位置に設置した。また、試験では油圧の経時変化を記録するため、油圧センサで検出した油圧を電圧変換し、0.1 秒間隔でパソコンに記録した。油圧計測システムの概要を図-2 に示す。また、内部振動機搭載機に設置した油圧計の設置状況を写真-1 に、油圧計の部分拡大したものを写真-2 に示す。

2.4 導電性測定

コンクリートの導電性の測定では電源装置や電極の設置が必要となる。隣接する内部振動機本体を電極として用いることができれば、内部振動機間のコンクリートの導電性を測定することが比較的容易に実施できるが、既存の内部振動機間は内部油圧ホースの金属部分により導通状態であるため、内部振動機本体を電極として用いることができない。

そこで、内部振動機に本体と絶縁した環状の電極を設置する方法でコンクリートの導電性を測定した。環状電極の設置状況を写真-3 及び図-3 に、電流回路図を図-4 に示す。

2.5 ビデオ撮影

締固め試験は試験ヤードに幅 1.5m×長さ 3m×深さ 0.9m のくぼ地を掘削し、そこに生コン車で運搬した試験用コンクリートを投入して締固め試験を実施した。

試験用コンクリートの締固めは2分間行い、搭載型内部振動機の油圧とコンクリートの導電性の測定を行った。また、測定時には試験用コンクリートの締固め状況の観察を行う目的でビデオ撮影を行った。試験時の気温は 15℃、天候は曇りであった。

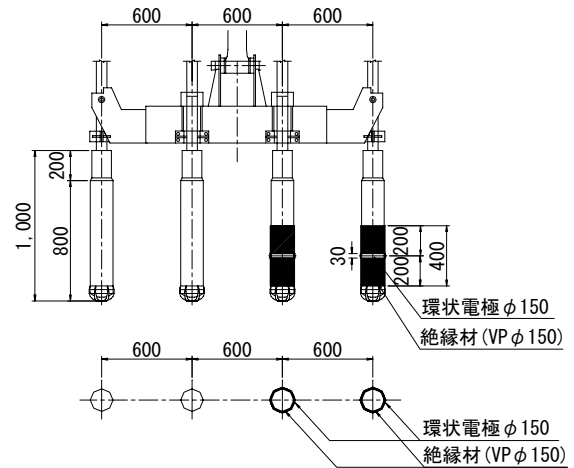


図-3 環状電極の設置図

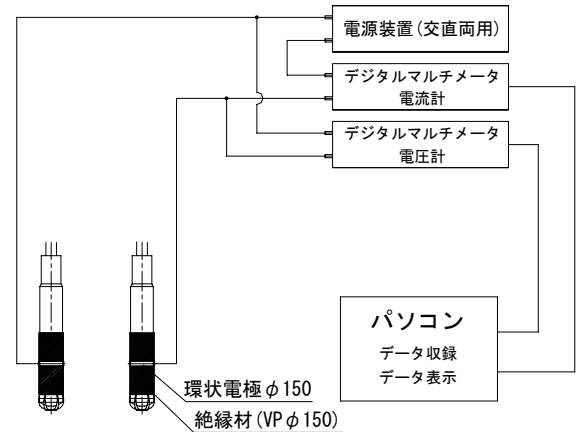


図-4 電流回路図



写真-3 環状電極の設置状況 (写真)

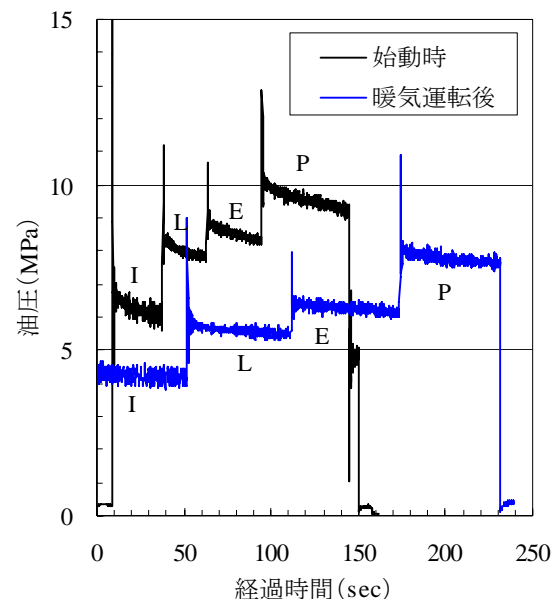


図-5 油圧変化の状況

3. 試験結果

3.1 暖気運転時の油圧変化

搭載型内部振動機の運転操作時の4段階の運転モード I, L, E, P による油圧変化の状況を測定した結果を図-5に示す。図-5には、エンジン始動時と5分間の暖気運転を実施した後の油圧を表示しているが、始動時は油圧が高く、暖機運転後には低下することがわかる。また、始動時には測定中に油圧が大きく低下するが、暖気運転後にほとんど低下していない。始動時はIモードで測定を開始しており、油圧は1分間当たり23%の割合で低下して

いるが、暖気運転後のPモードでは1分間当たり3%の低下割合である。

油圧低下の原因は、作動油の温度と関係があると考えられる。油圧測定でコンクリートの締固めを評価する場合には、作動油の温度変化による油圧変動が及ぼす影響をできるだけ小さくすることが望ましく、このためには十分な暖気運転を行うこと必要である。

3.2 試験結果

暖気運転を実施した後に実施した油圧測定、導電性測定の試験結果を図-6に示す。図にはビデオで撮影された

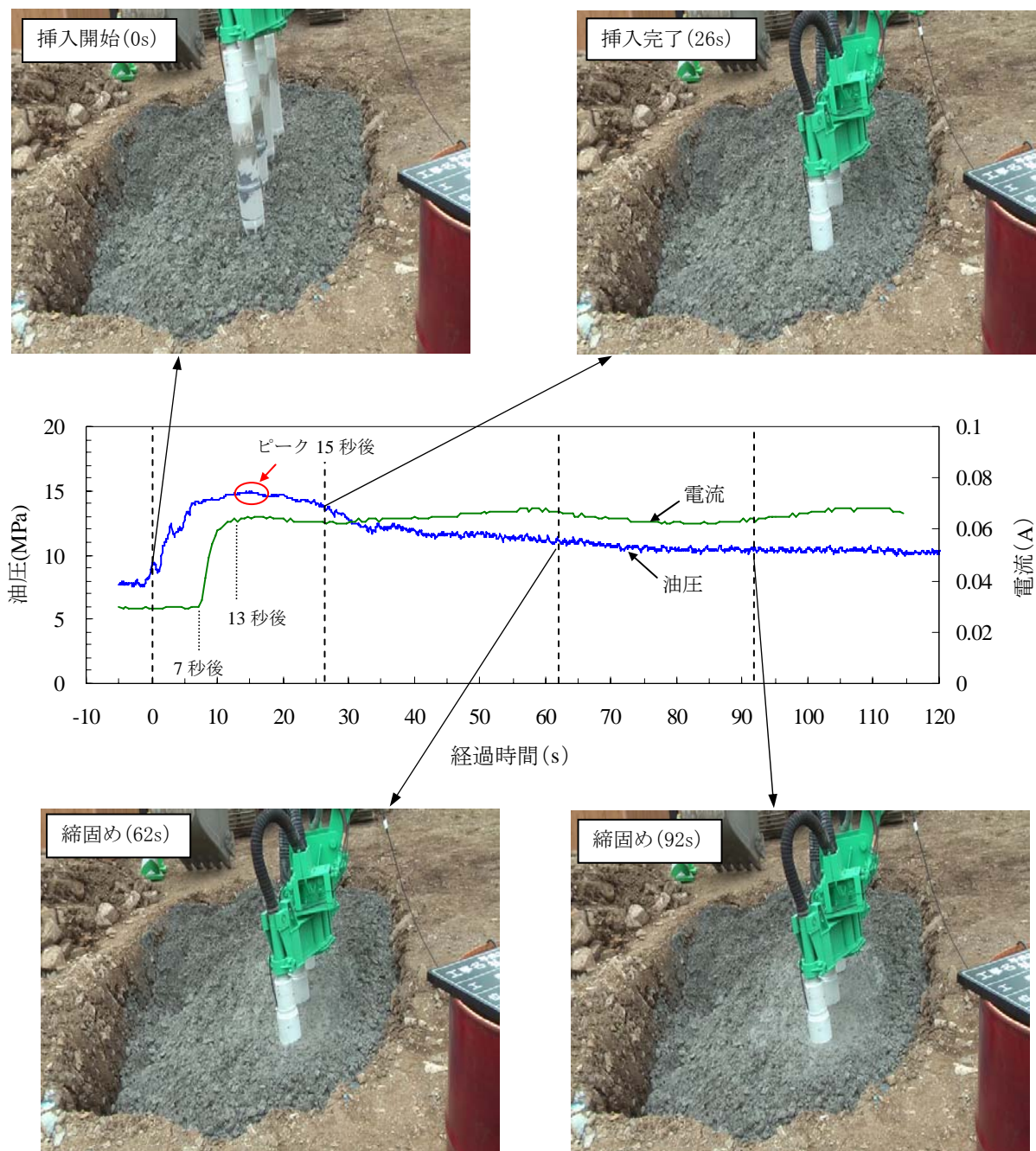


図-6 試験結果、油圧と導電性（電流）の変化

画像の一部を写真として時間とともに示している。経過時間は内部振動機を挿入した時点を中心とした。試験用コンクリートの投入後、油圧、導電性の計測を同時に開始し、約5秒後に内部振動機の挿入を開始した。内部振動機の挿入とともに、油圧は8.0MPaから15MPaに上昇し、挿入から15秒程度でピークとなった。内部振動機は挿入開始後26秒で挿入が完了し、油圧はピーク後に減少した。ピーク後は急激に減少したが、徐々に減少の割合が小さくなり、35秒を過ぎたあたりからはほとんど減少しなくなっている。その後、内部振動機挿入開始の62秒後で内部振動機の設置間隔である60cm程度の範囲のコンクリート表面に光沢が見られ、締固めが進行していることを確認した。そして、92秒後にはコンクリートの表面の光沢の見られる範囲が広くなり、締固め範囲はさらに広がっていた。

なお、油圧は挿入開始15秒後でピークの15MPaであり、その1分後には10.5MPaに低下している。これは1分間で30%の割合で低下していることになる。前述した作動油の温度による油圧変化は、暖気運転を5分間以上実施した後であれば1分当たり3%程度以下であり、油温による油圧変化の影響はほとんどなくなると考えられる。

一方、導電性の測定結果では、電流値は内部振動機を先端部からコンクリートに挿入し、環状電極がコンクリートに接触した7秒後に上昇を開始した。そして13秒後には電流値はピークとなり、その後は顕著な増加・減少を示していない。導電性は電極間において通電すれば電流値が上昇することから、今回のケースでは2つの電極間、すなわち2本の内部振動機間では、電極がコンクリートに接触した7秒後から13秒後までの6秒程度で締固めが完了し、試験用コンクリートの液状化が完了したと判断できる。

コンクリートの導電性の経時変化でコンクリートの締固めを評価する際には内部振動機の影響する範囲と電極位置との関係が重要であり、範囲を限定することにより締固めの評価が可能になると考えられる。

4. 油圧計測による締固め管理に関する考察

搭載型内部振動機の油圧計測の計測結果より、締固めの経過時間とともに油圧が上昇してピークを超え、減少の割合が少なくなる時点で目標とする締固め範囲内の締固めが完了することが目視（ビデオ）観察からわかった。

このようなコンクリートの締固めによる油圧の経時変化は岡本らによる一連の研究が示した内部振動機の負荷トルクの経時変化⁸⁾とよく一致する傾向である。そしてこの経時変化の理由は、セメントペーストが液状化

し、骨材の再配列が行われる際の負荷の増加と更なる液状化の進行による内部振動機とコンクリートの密着度が減少することによる負荷の低減と説明されている。

これらの目視観察や理論的な説明から、締固めは油圧がピークを超え、低減が収束する過程で完了すると考えられる。ダム建設現場で、油圧の経時変化を利用してコ

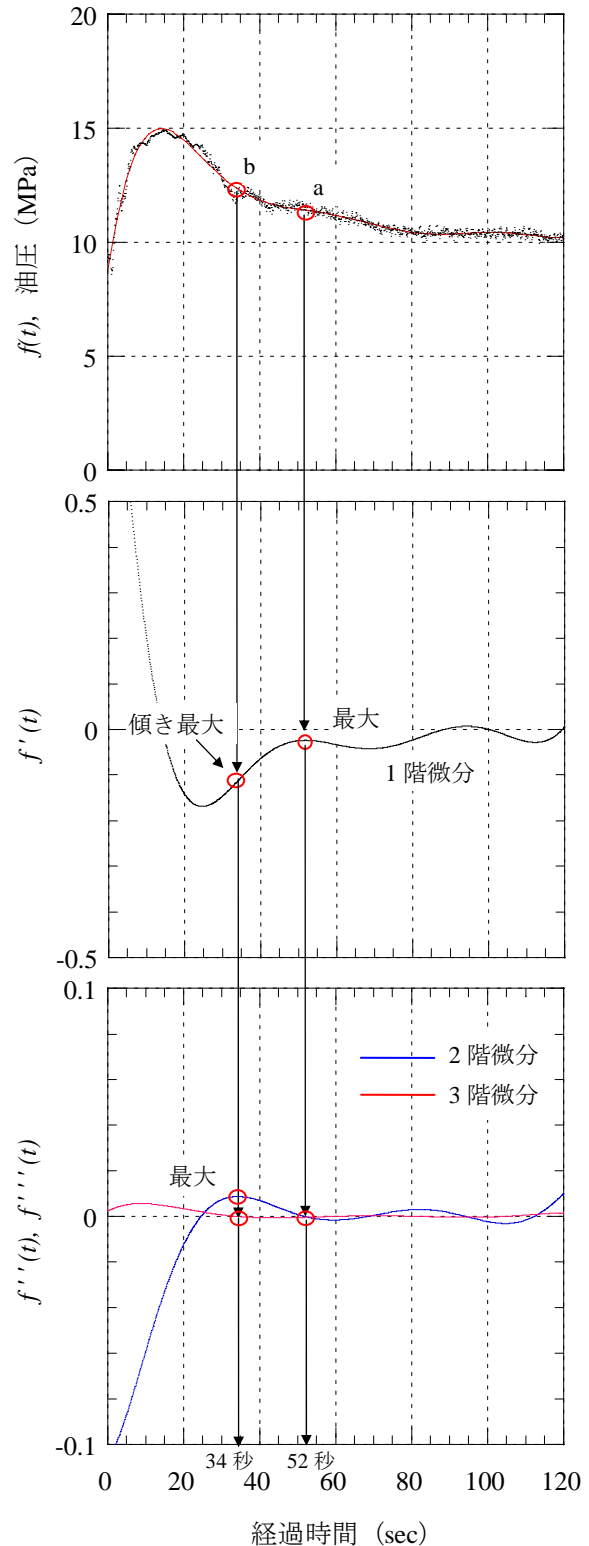


図-7 油圧の経時変化と1~3階微分関数

ンクリートの締固めを管理する場合には、自動的に締固めの完了を判定するシステムを構築すると便利であり、このためには油圧の低減傾向が収束した時点を決定する必要がある。

ここでは、油圧の経時変化曲線の特徴から締固めの完了を自動的に定める方法を検討した。まず油圧データの近似曲線を最小 2 乗法で求め、次にこれを時間 t の関数として $f(t)$ とし、 t について 1~3 階微分した。これらを図-7 に示す。図-7 を用いて、締固めの完了を自動的に定める以下の 2 つの方法を例として挙げる。

- a 油圧が減少する傾向となる範囲で油圧の経時変化の傾きが最初に最も緩くなった時点。これは、1 階微分された油圧の経時変化関数が負の傾きの中で最初に最大を迎えた点とする。2 階微分で正から負となる点となる。
- b 油圧が減少する傾向となる範囲で下に凹である油圧の曲率が最大となる時点。これは、2 階微分した曲率が最大となる点であり、3 階微分で正から負へと移行する時点となる。

本ケースでは a による締固めの完了は 52 秒であり、b による締固めの完了は 34 秒と判定することができる。このように、油圧の経時変化の特徴から求めた締固め完了時間は目視によって締固めが完了とされた時間と大きく相違することはなく、いくつかの判定基準を定めておくことにより信頼性は高まると考えられる。

油圧の絶対値は先に述べた作動油の温度やフレッシュコンクリートの物性、型枠による反射の影響など、いろいろな条件により変化することが予想される。このため、諸条件を考慮した検討が必要であるが、油圧の変化の特徴点を自動的に評価する手法を用いればダムコンクリートの施工時における締固めの完了を評価できる可能性が考えられる。

5. まとめ

ダムコンクリートの締固めを評価することを目的として、ダムコンクリートの配合からセメントを除いた試験用コンクリートを用い、搭載型内部振動機を用いて締固め試験を実施した。内部振動機の油圧を測定することによって、締固めを実施している間の内部振動機にかかる負荷をモニタリングすることが可能となり、一度上昇した油圧が低減して安定した状況になることで、締固めが完了したことを評価できることを確認した。さらにこの油圧の経時変化を用いて締固め完了を判定する手法

について検討し、経時変化曲線のいくつかの特徴点を利用することで可能性があることを示した。

油圧測定システムはセンサの設置が比較的容易であり、電源や電極が必要な導電性による評価と比較すると、煩雑さは少ない。また、コンクリートの締固めを導電性によって評価する手法は、電極の設置位置と締固めの影響範囲に影響されるため、電極の設置方法に課題があるが、油圧計測では特に影響範囲を定める必要はない。

今後の課題としては、基礎的な試験として配合や材料の異なるコンクリートでの試験、型枠際など施工条件が異なる場合の試験などを行いながら、実際の施工時のデータを採取するなどして適用性を確認していくことが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書（ダムコンクリート編），p.72，2007
- 2) 財団法人ダム技術センター：ダム工事積算の解説，p.180，2011
- 3) 村田二郎，川崎道夫，小倉拓也：振動締固めの評価方法に関する研究，セメント技術年報，No.41，pp.283-286，1987
- 4) 梁俊ほか：締固め完了エネルギーによるコンクリートの締固め性の評価方法，大成建設技術センター報，第 44 号，pp.23，2011
- 5) 丈達俊夫，吉田等，及川隆：竜門ダムにおける RCD 工法とその改良，ダム工学 No.9，pp.51-65，1993.3
- 6) Ahlsen, U and Montin, S :Methods for determining the degree of compaction in fresh concrete, Sweden Cement Concrete Institute, 1979
- 7) 大津政康，町頭佑樹，帖佐学：コンクリート振動締固め中の間隙水圧分布の考察，コンクリート工学論文集，17 巻 2 号，Vol.41，pp.45-55，2006.5
- 8) 例えば，岡本寛昭，鈴木立人：棒状パイプレータを用いたフレッシュコンクリートの振動締固めにおける挙動とその評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.421-426，2000
- 9) 例えば，岡本寛昭，吉川昌典，鈴木立人：内部パイプレータの負荷とコンクリート中の加速度の連動性，土木学会第 59 回年次学術講演集，V-448，pp.893-894，2004.9