

# 報告 ダムコンクリートのバイバックによる締固め評価システム

天明 敏行<sup>\*1</sup>・齋藤 淳<sup>\*2</sup>・寺田 幸男<sup>\*3</sup>

**要旨：**コンクリートダムにおける有スランプコンクリートの締固め作業では、作業面積が広いためバイバックと呼ばれる大型バイブレータを搭載した油圧重機が使用されており、コンクリートが十分に締め固められたかどうかの評価基準はバイバックのオペレータが目視で判断している。ここではダムコンクリートの締固め評価を定量に行うことを目的に、バイブレータの油圧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に着目して、コンクリートの締固めを評価するシステムを試作した。そして、評価システムをダム現場に適用し、締固め完了を判断する評価基準のひとつの手段となり得ることを確認した。

**キーワード：**ダムコンクリート, 締固め, バイバック, バイブレータ, 油圧負荷

## 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る。品質が確保されたフレッシュコンクリートを打込み現場に運搬しても、締固め不足であれば上記の性能を損なうことになる。また、過度の締固めは骨材分布の偏りやグリーンカット量の増加につながる。

有スランプコンクリートの締固めは、狭隘な部分を除く一般部において、バイバックと呼ばれる大型バイブレータを3~4基搭載した油圧重機が用いられるが、締固めの評価はオペレータの経験と勘に頼っているのが現状である。締固めの判定基準として、土木学会コンクリート標準示方書（施工編）では、「粗骨材が表面に露出せず、上面にモルタルがあり、さらに上面に人が載れる状態で確認できる。」とされているが、表現は定性的であり、定量的な基準は示されていない。

また、バイバックによるコンクリートの締固め作業ではコンクリートのリフト天端を形成する作業に神経を使うなど、バイバックの運転操作には相当の熟練度が必要である。将来は熟練したオペレータが不足することが懸念されており、締固めに関する施工の機械化や自動判定システムは省力化や品質の向上のために今後も開発を進めていく必要があると考えられる。

以上述べたことを背景に、コンクリートの締固めを定量的に評価するための研究が過去に数多く実施されている。コンクリート内部における内部振動<sup>1)2)</sup>、電気抵抗<sup>3)4)</sup>や間隙圧<sup>5)</sup>の変化を検討した事例の他、構造物の壁、床版を対象として締固め時の加速度とコンクリートの密度、強度の関係が明らかにされている。これらの研究の中で、バイブレータ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一連の研究<sup>6)</sup>によれば、負荷

トルクと締固めエネルギーはフレッシュコンクリートの締固め度と連動性があることが確認されている。この方法では、コンクリート中に計測器を設置する必要のある他の方法と異なり、バイブレータにかかる負荷を評価するだけのことであることから、システムがコンパクトかつシンプルになり得ると考えられる。そこで、ダムコンクリートの締固めを評価する方法として、バイブレータの負荷トルクに着目し、バイバックの油圧系統のうち、バイブレータ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することにより締固めを評価するシステムを開発した。

開発にあたっては、まず締固め評価システムのアルゴリズムを検討するために、締固め時のバイブレータの油圧データを継続的に採取し、その油圧経時変化の傾向を把握するとともに判定方法を検討した。

次に検討された判定方法に基づいてプログラムを作成し、実際のダム現場に適用して、実際のバイバック操作と評価プログラムでの判定を比較することにより、オペレータの感覚との乖離を検証した。

## 2. 締固め評価方法の原理<sup>7)</sup>

バイブレータの油圧変化の例として、事前検討<sup>7)</sup>で実施した、バイバックによる締固め時の油圧計測の計測結果を図-1(1)に示す。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、その後は減少していくことがわかる。この減少の割合は経過時間とともに徐々に少なくなっている。

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<sup>8)</sup>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

\*1 (株)安藤・間 土木事業本部技術第三部 工博 (正会員)

\*2 (株)安藤・間 技術本部技術研究所土木研究部 (正会員)

\*3 (株)安藤・間 土木事業本部機電部

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。これらの理論的な説明や試験時の目視観察から、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について考えた。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-1(2), (3)に示す。これらを用いて、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。本研究では上記の2つのいずれかの方法を用いて締固めの完了を評価することとし、実際のダム現場において油圧のデータを採取して、油圧の低減が収束する時点を適切に判定できるかどうかを検討することとした。

### 3. ダム建設現場での締固め評価方法の検証

#### 3.1 バイバックの仕様

ダムコンクリートの締固めで使用するバイバックの仕様を表-1に示す。本バイバックにはφ150mmのバイブレータ内部振動機を4本搭載している。

バイバックの油圧回路は、メインポンプからバイブレータの油圧回路に接続されている油圧系統が独立しており、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、バイブレータのみに作用する油圧を測定することが可能となる。ここでは、バイブレータ全体の油圧の経時変化を測定するために4本のバイブレータの油圧配管が集合する箇所油圧センサを設置した。

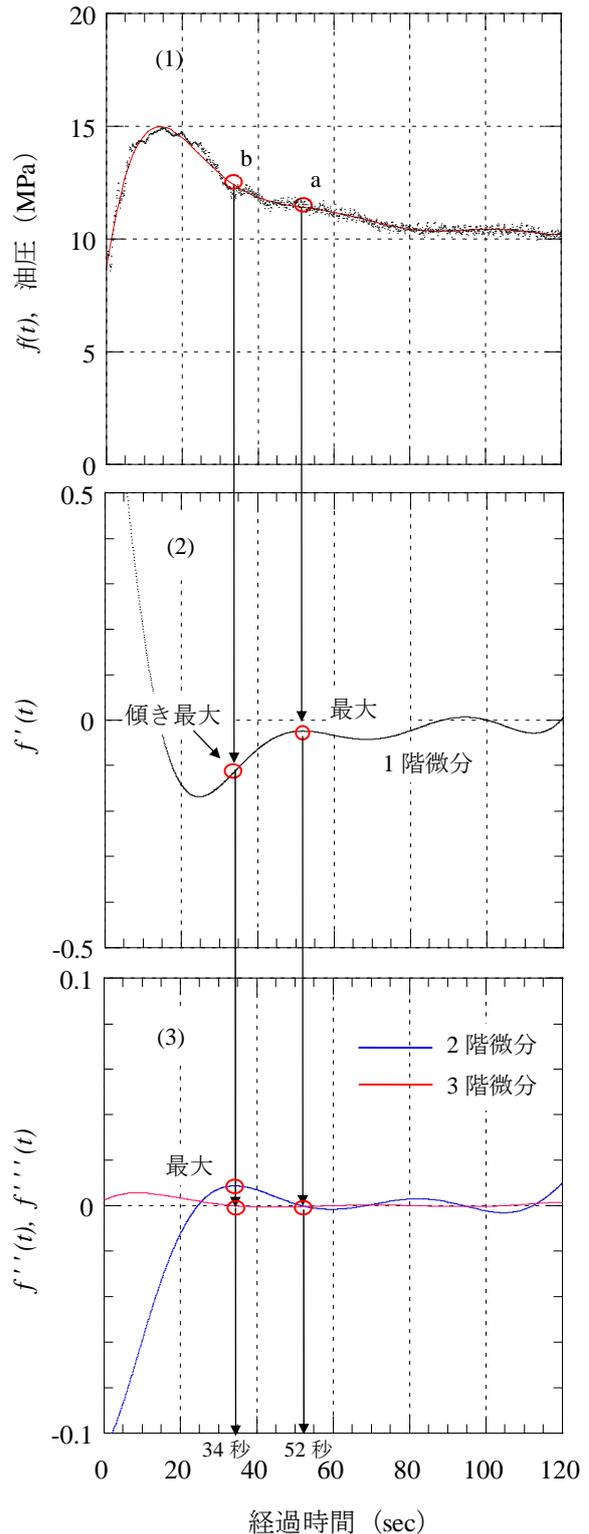


図-1 油圧の経時変化と1~3階微分関数<sup>7)</sup>

#### 3.2 ダムコンクリート

締固め評価の検討を実施するためのデータ採取は宮城県で建設中の重力式コンクリートダムで、天端付近のコンクリートを打設する時期に行った。データを採取した外部コンクリートの配合を表-2に示す。本ダムでは



図-2 締固め状況

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た。ダムコンクリートの締固め状況を図-2に示す。

### 3.3 システム構成

油圧計測のシステム構成の概要を図-3に示す。パイプレータの圧力データは最大測定圧力 20MPa の圧力センサを使用し、変換機の出力を圧力アンプセンサによって 4-20mA に変換した。その電流を電流測定器で記録し、一次保存されたデータは無線転送装置を用いてポータブルコレクタに送信した。パイバック操作室内に設置した油圧計と電流測定器の設置状況を図-4に示す。油圧データのサンプリングは、1秒間隔で測定を行い、その時の施工状況と共に記録を行った。油圧計測システムの使用機器の一覧を表-3に示す。

### 3.4 油圧計測結果

油圧経時変化の測定結果の一例を図-5に示す。横軸は経過時間、縦軸は油圧センサから出力された電流値を

表-1 バイバックの仕様

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
パイプレータ		油量	14~16ℓ/min
		常用圧力	15.7MPa
		振動数	7000~8000vpm



図-4 油圧計と電流測定器の設置状況

表-3 油圧計測システムの使用機器

項目	概略仕様
油圧センサ	定格圧力範囲0~20MPa 耐圧力40MPa
圧力センサアンプ	電源電圧DC12-24V アナログ出力4~20mA
電流測定器	測定範囲: 0~20mA (40mA まで動作可能)
データ転送	無線通信距離 約150m

表-2 ダムコンクリートの配合 (宮城県のダム, 外部コンクリート)

コンクリート 配合	粗骨材 最大寸法 (mm)	スラン プ (cm)	空気量 (%)	水セメ ント比 (%)	細骨材 率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						AE減水 剤	空気量調 整剤 (C×%)
						水 W	セメ ント C	細骨材		粗骨材			
								5mm -0mm S1	60mm -40mm G1	40mm -20mm G2	20mm -5mm G3		
外部配合	60	4±1	4±1	52.4	30	110	170	625	516	516	436	0.525	0.018

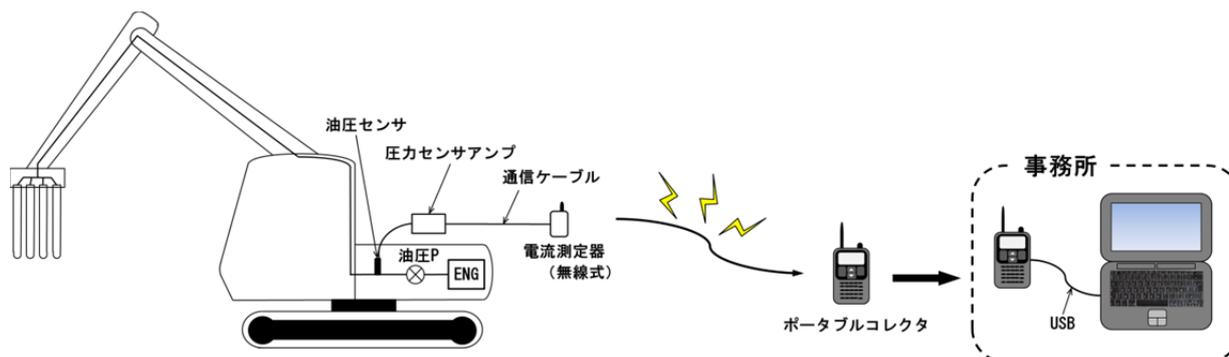


図-3 システム構成

計測開始から約 26 分後を経過時間 0sec とした。

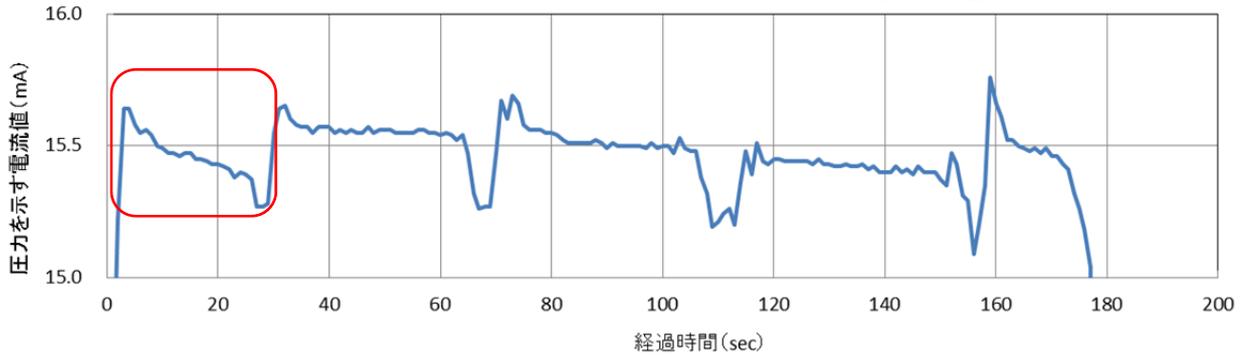


図-5 締固め時の油圧経時変化

示している。電流出力は 4-20mA で最大圧力 20MPa を測定することから、電流出力から油圧を求める場合の計算式は式(1)に示すようになる。

$$P \text{ (MPa)} = \frac{\{I \text{ (mA)} - 4 \text{ (mA)}\} \times 20 \text{ (MPa)}}{16 \text{ (mA)}} \quad (1)$$

ここに、P (MPa) はパイバックの油圧、I (mA) はアナログ出力変換された電流値を示す。

油圧の経時変化は、経過時間とともに油圧が上昇してピークを超え、低減する傾向が収束していく傾向を示していることがわかる。図-5 のうち、赤線で囲んだ最初の部分の経時変化を抽出し、前述した a 及び b それぞれの方法で締固め完了の時点をもとめてものを図-6 に示す。(1)が式(1)で求めた油圧の経時変化、(2)はその 1 階微分、(3)は 2 階微分、(4)は 3 階微分をした図を示している。a の方法で判定した締固め完了時間は(3)の 2 階微分が正から負に変化する点であるから、この場合は 13.6 秒となる。また、b の方法で判定した締固め時間は(4)の 3 階微分が正から負に変化する点であるから、この場合は 11.0 秒となる。

ダム建設現場において油圧の低減が収束する状況を評価する試験を実施する際には、外部コンクリートを対象にパイバックで締固めを 30 回実施し、それぞれの締固めについて経時変化のデータを採取した。そして、a、b それぞれの方法で締固めの完了を評価した。

a 及び b それぞれの方法で締固め完了と評価された締固め時間を図-7 に示す。これによると、a の方法で評価された締固め時間が b よりも長くなるケースが多いが、それぞれの方法によって求めた時間は相関が認められ、締固めの完了の評価基準として油圧の低減が収束する時点自動的に定める方法としてはどちらかの方法でもほぼ可能であると考えられる。

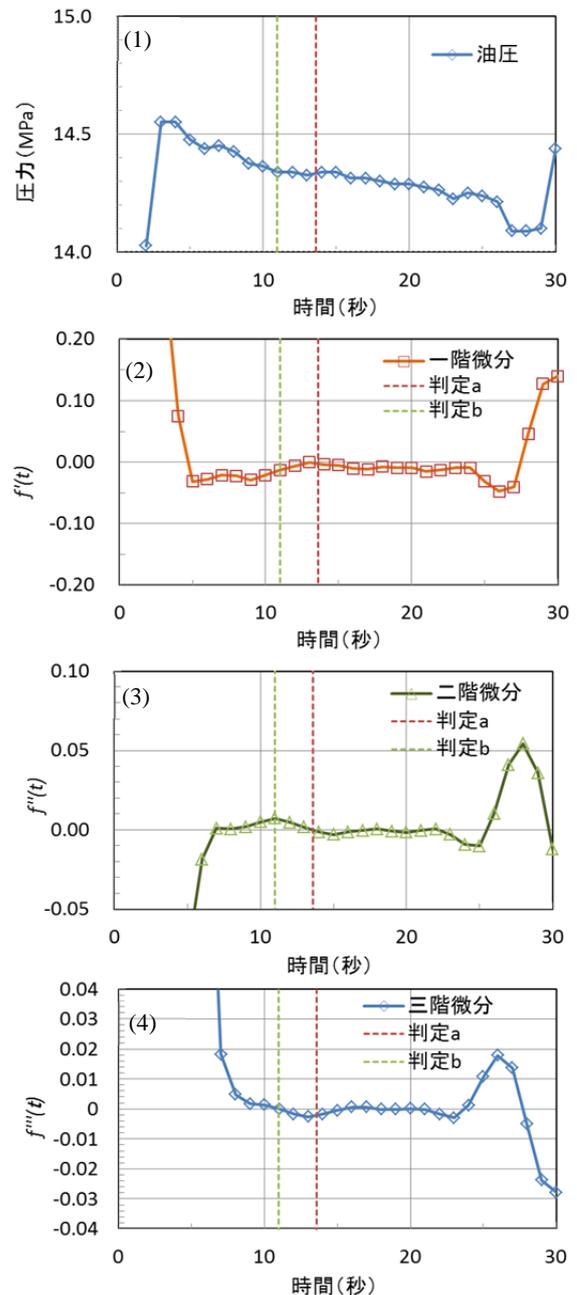


図-6 締固め完了の時点をもとめた経時変化

#### 4. システムの製作とダム現場での適用試験

##### 4.1 締固め評価システム

バイバックによる締固め時の油圧の経時変化による締固めの評価方法で、油圧の低減が収束する時点を実動的に定める方法を用いて実際の現場に適用するには、締固めが完了したことを客観的に評価する必要がある。これには実際にコンクリートを締め固めた後にコンクリートコアを採取して、そのコアを評価する方法が考えられるが、コンクリートの締固めはバイブレータからの距離によって変化することや型枠からの距離の影響も考えられ、様々な試験ケースを設定して試験をすることは困難である。ここでは、従来のオペレータの目視による方法と比較することによって、油圧の経時変化の低減する時点での評価方法を検討することとした。

締固め評価システムのフローを図-8に示す。油圧センサー1秒毎に得られたデータは電流値に変換され、前後の5ポイントを平滑して経時変化曲線を算出する。電流値は10mAをしきい値として設定し、これより小さい時点ではパトライトが消灯し、大きくなるとパトライトの赤色が点灯する設定とした。締固め完了の評価には前述のaの方法を採用することとした。図-7よりaの方法はbの方法に比べて若干長くなる傾向にあり、品質上の安全側を考慮した。電流値の経時変化曲線がaの方法で評価された点を過ぎるとパトライトが緑に変わる。

##### 4.2 締固め評価システムの検証

本システムを設置して、青森県で建設中のダム現場において締固め試験を実施した。締固めは表-4に示す配合の外部コンクリートを対象に実施した。

バイバックによる締固めを約10分間連続で実施した時の電流値の経時変化を図-9に示す。図中の赤い線は評価システムのフローにおいて電流値がしきい値を超えて赤いパトライトが点灯した瞬間であり、緑の線はシステムフローにおいて締固め完了と判定された瞬間である。締固めが開始されたことを示す赤い線の箇所は括弧内には回数を示しているが、10回目の赤い線は非常に近いので1回と数えると、締固めは測定期間内に13回実施されていることがわかる。

これらの締固め作業のうち、(2), (4), (12)の3ケースは評価システムが締固め完了と判定する前にオペレー

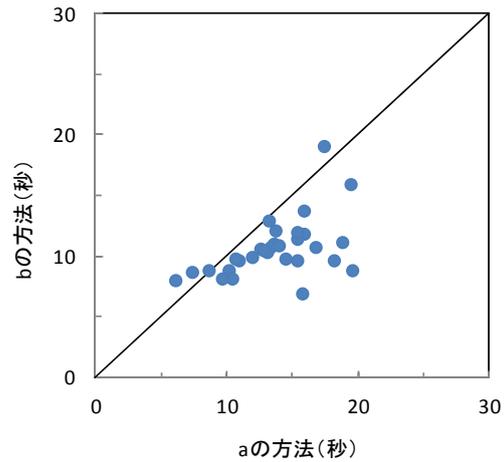


図-7 aの方法とbの方法の比較

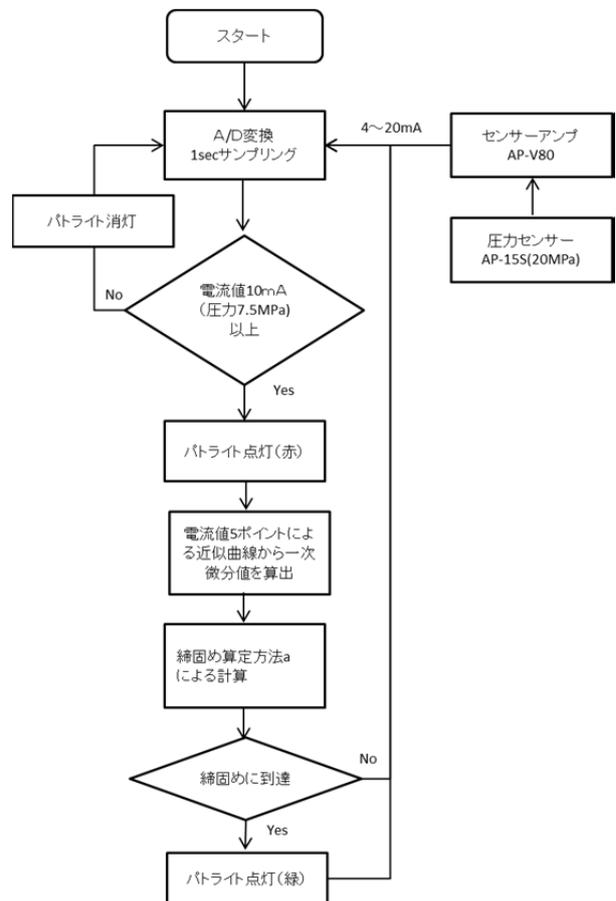


図-8 締固め評価システムのフロー

表-4 ダムコンクリートの配合 (青森県のダム, 外部コンクリート)

コンクリート配合	粗骨材最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )								
						水 W	セメント C	フライアッシュ F	細骨材		粗骨材			AE減水剤
									5mm-0mm S1	80mm-40mm G1	40mm-20mm G2	20mm-5mm G3		
外部配合	80	3.0±1	3.5±1	45.9	29	101	154	66	639	725	407	438	2.2	

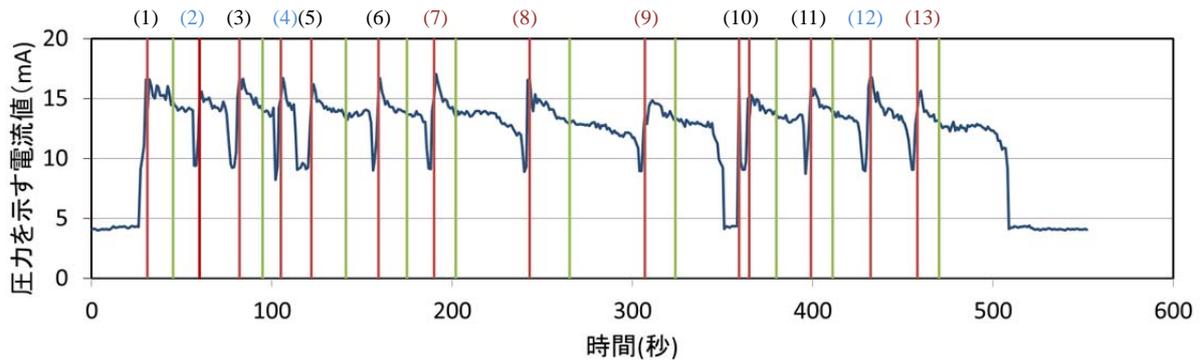


図-9 連続した締固め作業における油圧変化と締固め評価システムの判定状況

タの判断でバイブレータを引き上げたことを示す。また、(7), (8), (9), (13)は評価システムが締固め完了と判定した後もオペレータの判断で 20 秒以上バイブレータを挿入していたケースを示している。

以上の比較結果から、大部分の締固め作業において、評価システムで判定された締固め完了時間とオペレータが通常の運転で締固めを実施している時間には大きな乖離がないことがわかった。

コンクリートの締固め時間は、一般コンクリートでは標準示方書で 5~15 秒とされている。しかし、ダムコンクリートの場合は若干長い傾向にあり、ダム工事積算基準から推定される締固め時間は約 40 秒である。また、図-9 でも(7), (8), (9)のケースでは 40~60 秒の締固めを実施している。実際の現場でのバイバックによるコンクリートの締固め作業時には、天端の高さを調整して整形を行う必要もあることから長くなることも多いと考えられる。評価システムにおける締固め完了時間の設定に際しては、実際の締固め時間のほうが長い傾向にあることから、現場の状況に合わせて若干の調整時間を設定できるフローを組み込む必要もあると考えられる。

## 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、バイバックに搭載されたバイブレータの油圧回路に油圧計を設置し、バイブレータの油圧を測定することによって、締固めの評価を行うシステムを開発した。

評価システムは締固めを実施している間のバイブレータにかかる油圧負荷が一度上昇した後に低減して安定した状況になることを利用した。現場試験を行い油圧の経時変化曲線のデータを採取し、曲線の特徴点を利用することで油圧の低減が収束する時点を抽出できることを確認した。最後にこの手法を用いて締固め評価システムを製作し、現場の締固め作業に適用してオペレータ

のバイブレータの運転操作との比較検証を行い、締固め完了と判断するまでの時間の差異が少ないことを確認した。

一連の現場試験により、締固め評価システムの基本的な考え方やフローは確立でき、本システムはダムコンクリートの締固め完了を判断する評価基準のひとつとなり得ることを確認できた。今後の課題としては実施工においてデータを採取し、調整時間の補正を行うことや、コア採取等により品質を客観的に評価する必要があると考える。

## 参考文献

- 1) 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
- 2) 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.23.1-23.8, 2012.2
- 3) 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
- 4) Ahlsten, U and Montin, S :Methods for determining the degree of compaction in fresh concrete, Sweden Cement Concrete Institute, 1979
- 5) 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
- 6) 例えば, 岡本寛昭, 鈴木立人: 棒状バイブ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, 2000.6
- 7) 天明敏行, 庄野昭, 寺田幸男: ダムコンクリートの締固め評価手法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1390-1395, 2012.6