

地下発電所の維持管理におけるモニタリング手法の一提案 THE METHOD OF MONITORING FOR MAINTENANCE IN UNDERGROUND POWER SATATION

小林順二*・鶴田 滋*・江川顕一郎**・池尻 健***

Junji KOBAYASHI, Shigeru TSURUTA, Kenichiro EGAWA and Takeshi IKEJIRI

In this paper, we discuss the maintenance of the underground power station. First, we examined the technical subject in monitoring of deformation by external force, and we found that convergence measurement was difficult in the underground power station. Because there is few places whose convergence measurement is possible in underground power station. Next, we found that monitoring of the cracking depth was important, and we proposed the non-destructive test that used the damping property of Rayleigh wave. It can measure the cracking depth correctly. Finally, we proposed the method that used the non-destructive test for monitoring the cracking depth and progress, and we applied it to the underground power station.

「Key words」 underground power station, maintenance, monitoring, nondestructive test

1. はじめに

NATMによる山岳トンネル（以下、山岳トンネルと記す）、地下発電所等の地下構造物の施工においては、掘削の進行に合わせ、周辺地山を対象とした様々な地質調査や計測結果を用いて地山挙動をモニタリングし、それらを施工管理に反映している。また、それらの維持管理においては、周辺地山の地質条件を精度良く把握することの困難さに起因する設計および施工の不確定性を考慮すると、各種調査で得られる計測結果を経年的にモニタリングし、それらの分析結果をもとに構造物の健全度を的確に評価することが有効である。

本論文は、大規模地下構造物の代表的なものとして地下発電所を取り上げ、上記の地下構造物の現状を考慮し、それらの維持管理において見られる変状の中で「地圧等外力によるライニングの変状」（以下、外力による変状と記す）に対するモニタリング手法について提案する。具体的には、まず、地下発電所における維持管理の現状および各種計測結果を検討し、外力による変状に対するモニタリング手法として、埋設計器による計測、内空変位計測およびひび割れを対象とした計測に着目して、それらの現状の技術的課題を明確にする。そして、それらを解決するものとして、ライニングに見られる代表的な変状現象である「ひび割れ」に着目し、それらの「深さ」を精度良く計測可能なレイリー波の減衰特性を利用した非破壊探査システムを用いたモニタリング手法を提案する。さらに、同手法の有効性を、供用中の水路トンネルライニングおよびアーチダム堤体を対象とした探査結果をもとに検証する。最後に、今回提案した手法を地下発電所の維持管理に適用した事例を示す。

キーワード：地下発電所、維持管理、モニタリング、非破壊探査

- * 正会員 東京電力 株式会社 工務部
- ** 正会員 株式会社 セントラル技研 技術顧問
- *** 正会員 株式会社 セントラル技研 地盤技術管理部

2. 地下発電所における維持管理の現状

2.1 供用中の地下発電所の主な諸元および変状現象

現在、供用中の地下発電所（東京電力）の主な諸元を表－1に示す。同表より、運開後、古いものでは、一般水力において約50年（須田貝）、揚水発電においては約25年（新高瀬川）経過している。従って、維持管理における各種調査および計測結果が蓄積されつつある。

また、維持管理において見られる変状現象については、同表中の地下発電所（4発電所）を対象に実施したライニング（躯体および吹付けコンクリート）の変状

調査により把握した。それによると、主な変状現象は、「ひび割れ」、「漏水」、「強度低下」および「剥離」であった。ひび割れは、アーチ部吹付けコンクリートおよび妻壁部の一部に卓越したものが見られた（写真－1）。漏水は、山岳トンネルにおいて良く見られる背面地山の地下水に起因したものではなく、主に側壁コンクリート部の配管周りに見られた。強度低下は、主に漏水が生じている箇所付近のコンクリートに見られた。剥離は、アーチ部吹付けコンクリートの一部に見られた。なお、上記の変状現象は、いずれもその構造物の安定性に影響を及ぼすような大きな規模ではなかった。

2.2 維持管理における点検・計測項目

地下発電所の維持管理は、主に巡視・点検と計測管理とに分けられる。ここでは、それらを詳細に説明するため、以下に、新高瀬川発電所における巡視・点検および計測管理例を示す¹⁾。同発電所における、主な巡視・点検および計測項目を表－2に示す。巡視・点検は主に目視観察により変状の有無を把握し、設備の機能等を確認して

いる。そして、その結果はチェックリストに記録し、過去の記録と照合することにより、変状の経年変化を把握している。計測管理は施工時と同様、主にアーチコンクリートに埋設された計器、内空変位、荷重計、湧水量等の計測により周辺地山およびアーチ部の挙動をモニタリングし、構造物の安定性を確認している。

表－1 地下発電所の主な諸元

【一般水力】

発電所名	総出力	発電機	空洞形状	空洞寸法(m)			運開
	MW	台数		高さ	幅	長さ	
須田貝	46	2	きのこ型	28.3	15.0	54.3	1955年
塩谷	9.2	1	円筒ドーム型	28.6	17.2	—	1963年
川俣	27	1	きのこ型	34.1	17.1	33.2	1963年
鬼怒川	127	2	きのこ型	35.0	19.5	46.2	1963年
中の沢	42	1	きのこ型	32.7	15.6	25.6	1980年

【揚水発電】

発電所名	総出力	発電機	空洞形状	空洞寸法(m)			運開
	MW	台数		高さ	幅	長さ	
新高瀬川	1280	4	きのこ型	54.5	27.0	165.0	1979年
玉原	1200	4	きのこ型	49.5	26.6	116.3	1982年
今市	1050	3	たまご型	51.0	33.5	160.0	1988年
塩原	900	3	きのこ型	51.4	29.0	165.0	1994年
葛野川	1600	4	たまご型	54.0	34.0	210.0	1999年



写真－1 ひび割れの一例

表－2 維持管理における主な巡視・点検および計測項目¹⁾

巡視・点検	計測管理
側溝・排水ピットの状況 PS工ヘッド部の状況 手すり・階段の塗装状況 吹付け工の亀裂の有無	アーチコンクリートの 応力、ひずみ、温度：埋設計器 間隙水圧：埋設計器 PS工荷重：荷重計 内空変位 湧水量

3. 外力による変状に対するモニタリング手法

他の地下構造物同様、地下発電所においても、周辺地山の地質条件を精度良く把握することが困難であるため、周辺地山の挙動を維持管理における構造物の健全度評価、変状予測等に的確に反映することが困難である。従って、維持管理において見られる変状の中で、地圧等の外力による変状については、その進行性を経年的にモニタリングすることが有効である。そのことを踏まえ、現状の地下発電所においても、表-2に示す各種計測を実施している¹⁾。ただし、同表に示す埋設計器については、現状では長期計測が困難である²⁾。ここでは、外力による変状をモニタリングする際に、モニタリング対象としてよく計測されている「内空変位」および「ひび割れ」に着目し³⁾、それらを地下発電所に適用する際の技術的課題について検討する。

3.1 内空変位

山岳トンネルの施工および維持管理において構造物の変形進行性を把握する目的で、内空変位を計測する。計測方法としては、スチールテープを用いる方法が採用されている。また、距離と角度とを計測する機能を持たせた光波測距儀を用いたトータルステーションも多く採用されている⁴⁾。さらに、最近では、デジタル画像計測⁵⁾、レーザー断面計測⁴⁾等の計測技術も試みられている。

一方、地下発電所においても、山岳トンネルと同様、施工中の日常管理の計測項目および供用後の構造物の変形進行性を把握する計測項目(表-2)として、内空変位を計測している。ただし、前述の表-1に示すように、地下発電所空洞の断面積は山岳トンネルのそれよりもかなり大きい。また、図-1⁶⁾に示すように、

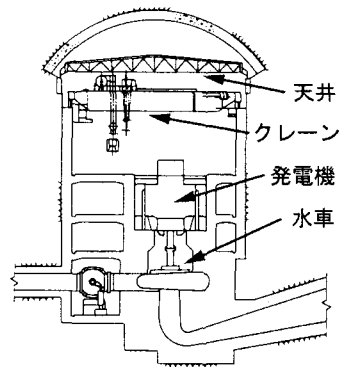


図-1 地下発電所断面(供用後)⁶⁾

供用後の発電機等据え付けにより、維持管理において計測可能な断面が制限される。従って、地下発電所の維持管理において内空変位を計測する際、山岳トンネルで採用されている手法をそのまま適用するのは困難である。また、現状の内空変位の計測精度について検討するため、図-2に供用中の地下発電所(A発電所・B発電所)において実施された計測例を示す。図中のA発電所(計測箇所:2箇所/1断面)は当初スチールテープにより計測していたが、1994年以降、光波測距儀により計測している。従って、その年を境に計測頻度が変化している。B発電所(断面数:2、計測箇所:1箇所/1断面)は全ての計測期間においてスチールテープにより計測している。計測箇所については、AおよびB発電所ともに上記の理由により、内空変位が計測可能な箇所を選定している。なお、同図では、A発電所:1979年7月、B発電所:1994年10月の内空変位を0としている。同図より、最近ではAおよびB発電所ともに内空変位の変動量は少なく、増加および減少傾向も認められないことから、現状では構造物の変形進行性は認められない。ちなみに、過去5年間(1997年~2001年)の内空変位の変動量(各計測箇所の最大および最小内空変位の差)は最大でA発電所:約2.2mm、B発電所:約2mmである。これらは、光波測距儀の計測精度を0.8mm程度、スチールテープの実用計測精度(*トンネル断面)を0.5mm程度と考えると、変動量を5年間のトータル量としても、計測値と精度との比率はA発電所で36%($\approx 0.8\text{mm}/2.2\text{mm}$)、B発電所で25%($\approx 0.5\text{mm}/2\text{mm}$)であり、計測値に対し計測器の誤差の割合が大きい。ただし、最近では、上記のレーザー断面計測等の高精度計測技術が開発されており、今後計測精度は向上するものと考えられる。

以上のことから、現状では、地下構造物において内空変位を対象にモニタリングすることは、施工および維持管理において周辺地山の巨視的な挙動を評価する際、非常に有効な方法と考えられている。ただし、地下発電所の維持管理において、内空変位計測結果を用いて外力による変状の進行性を評価する際、計測環境(空洞規模、計測断面の制限等)を考慮すると、山岳トンネルで採用されている手法をそのまま適用するのは困難である。

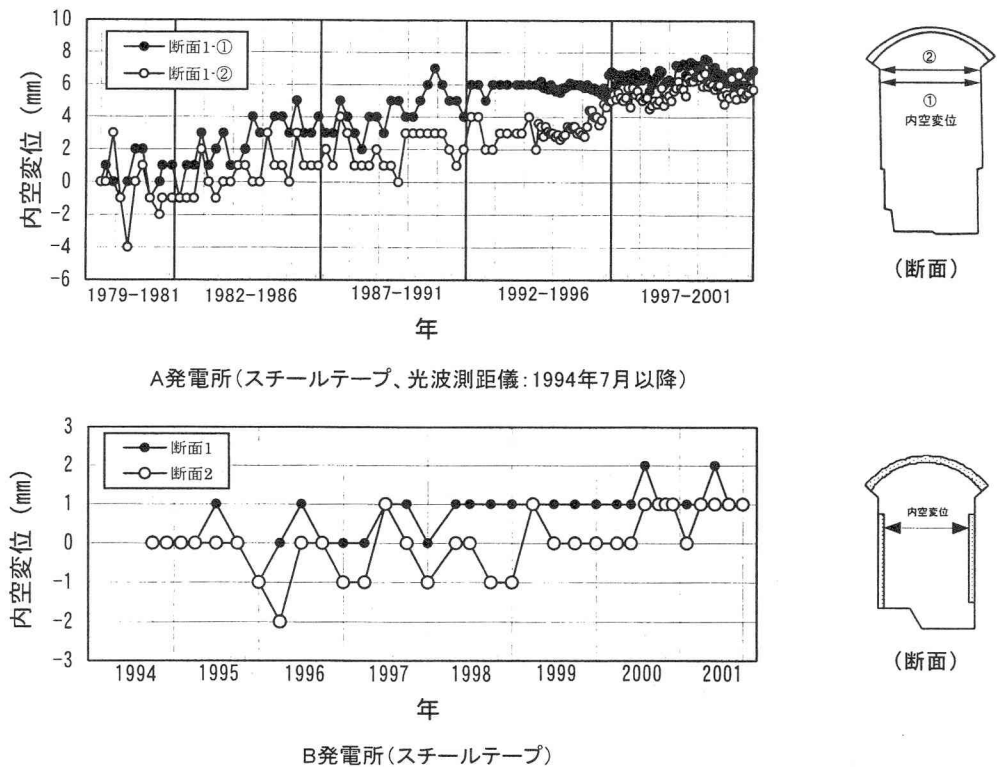


図-2 地下発電所における内空変位計測例

3.2 ひび割れ

ひび割れは、地下構造物の維持管理において見られる代表的な変状現象である。例えば、前述で内空変位計測により地圧等の外力による構造物の変形進行性は認められないと判断されたA発電所妻壁部およびB発電所の側壁部において、明確なひび割れ（以下卓越ひび割れと記す）が見られた（写真-2：A発電所：妻壁部）。

ひび割れを生じさせる要因は、外因（外力、環境）および内因（材料、施工、設計）に大別される⁴⁾。その中で外力によるひび割れについては、例えば、鉄道トンネルの維持管理において、ひび割れ形態、規模、パターン等の目視観察により、地圧の規模、形態等を推定している⁴⁾。従って、

それらのひび割れの進行性をモニタリングすることは、外力による変状をモニタリングする有効な手法と考えられる。なお、ひび割れの進行性を評価する方法としては、現状では、主にひび割れ幅を対象にし、ひび割れ上にモルタルパットを塗り経年的に観察する方法、ひび割れの幅を計測器（ひび割れ計、ノギス、ひび割れ変位計等）により経年的に計測する方法が採用されている⁴⁾。ただし、ひび割れ幅を対象とした評価方法は、経年的なひび割れ幅の変動量が微小であることから、それらのモニタリング計測結果を用いて的確にひび割れの進行性を評価することは、現状の計測方法の精度では困難である。

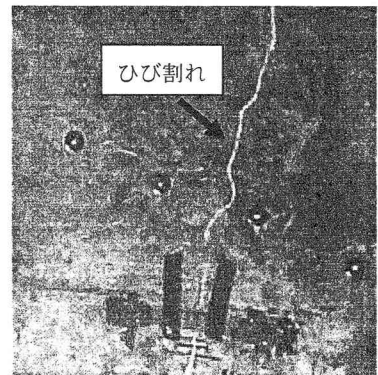


写真-2 卓越ひび割れ（妻壁部：A発電所）

4. 非破壊探査システムによるモニタリング手法

ここでは、前述の検討結果を踏まえ、外力による変状に対するモニタリングの対象として「ひび割れ」に着目し、それらの「深さ」を精度良く計測可能な非破壊探査システムによるモニタリング手法の適用性を検討する。なお、変状の進行性の評価におけるひび割れ深さの計測意義については、筆者らの過去の研究成果⁷⁾で検討している。

4.1 探査原理

本探査システムでは、探査対象であるコンクリートの表面を力学的外力（ハンマー）により打撃した際に発生する衝撃弾性波の中のレイリー波に着目している。レイリー波は弾性波の一種で、媒体表面より一定深度の範囲にしか存在しないことから、表面波に属する。

レイリー波の特徴としては、媒体表面を打撃した際に発生する弾性波の中ではエネルギーが最大であること、媒体のせん断剛性の影響を受けること、その振幅が深度増加とともに急激に減少すること等が挙げられる⁸⁾。なお、レイリー波の主な特性を図-3に示す。

本探査の概念を図-4に示す。レイリー波の伝播過程では、波頭が広がるにつれて単位面積でのエネルギー密度は減少する（幾何減衰）。また、コンクリートには粘性による減衰も存在する（材料減衰）。従って、これらの減衰を補正することにより波のエネルギー（振幅）を常に一定な値に保つ

ことが可能である。しかし、媒体中にひび割れが存在するとレイリー波がある程度遮断され、ひび割れ以降では振幅が減少する。つまり、ひび割れの存在によりその前後における波の振幅は変化する。このとき、ひび割れが深くなるほど、その変化は大きくなる。以上のことから、幾何減衰および材料減衰を補正し、レイリー波の振幅の変化を測定することで、ひび割れの有無および深さが推定可能である。なお、本探査システムによりひび割れ深さを測定するためには、ひび割れ深さとひび割れの存在により変化する振幅（振幅比）との相関性を評価する必要がある。それらの相関性について、著者が人工ひび割れを有する室内試験結果により定量的に評価している⁷⁾。

4.2 システム構成

本探査システムは、ハード部分（計測ドライバー）とソフト部分（解析および処理ソフト）から構成されている。ハード部分のシステム構成を図-5に示す。ソフト部分は、独自に開発した解析および処理ソフトにより、採取したデータのノイズ除去および分析をして、ひび割れ深さを計算する。また、上記の計測ドライ

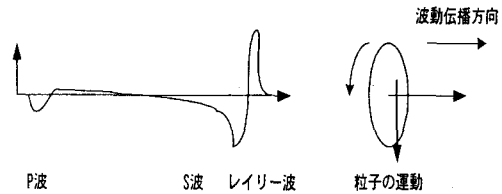


図-3 レイリー波の主な特性

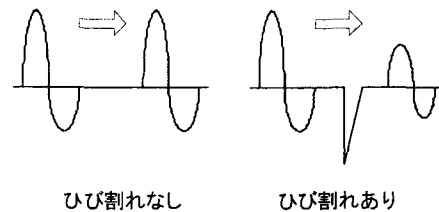


図-4 探査の概念

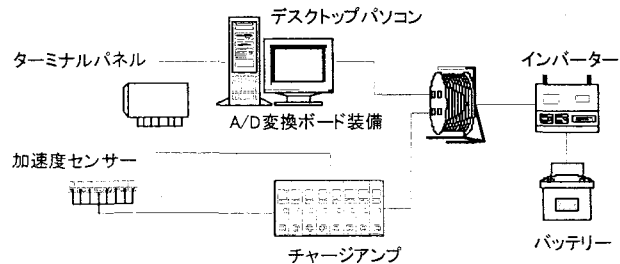


図-5 ハード部分のシステム構成

パー、解析および処理ソフトは、すべて C++ または VisualC++ を用いて独自に開発したものであり、容易にソフトの改良およびメンテナンスが可能である。例えば、本探査システムを構造物の点検等に適用する目的で小型化したもの、今回着目した「ひび割れ深さ」以外のコンクリートの変状現象（剥離およびコンクリート強度低下）を探査対象にしたもの等が挙げられる⁹⁾。なお、本探査システムによる探査方法は、探査対象のひび割れを挟むように加速度センサー（通常 8 個）を対象構造物に固定し、その近傍をハンマーで打撃することにより生じたレイリー波を測定する。探査状況を写真-3 に示す。

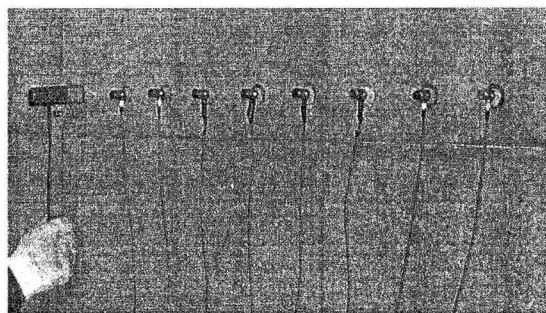


写真-3 探査状況

4.3 探査結果の有効性の検証

ここでは、まず、地下構造物（水路トンネルライニング）を対象に、本探査システムを適用した事例を以下に示す。

具体的には、水路トンネルライニング（3 箇所）に生じたひび割れに対して、本探査システムによるひび割れ深さの探査結果と探査と同一箇所から採取したボーリングコアの目視観察（以下コア抜きと記す）により求めたひび割れ深さの計測結果を比較する。図-6 に本探査システムによる探査結果（推定値）とコア抜きによる計測結果（実測値）との比較を示す。同図より、本探査システムによる推定値は、コア抜きによる実測値と良好に一致している。なお、同事例は地下構造物（水路トンネルライニング）を対象としたものであるが、本探査システムを適用したひび割れ深さの最大値は 100cm（探査対象：コンクリートダム）であり、それらの探査結果と目視観察結果は良好に一致した¹⁰⁾。

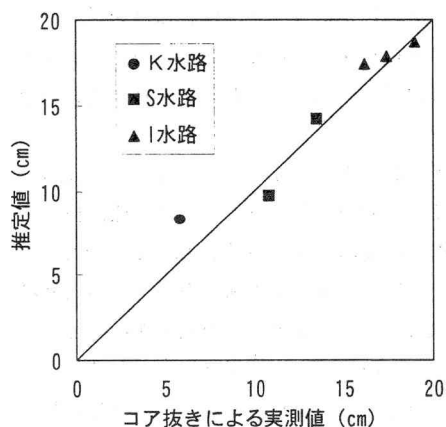


図-6 水路トンネルを対象とした探査結果

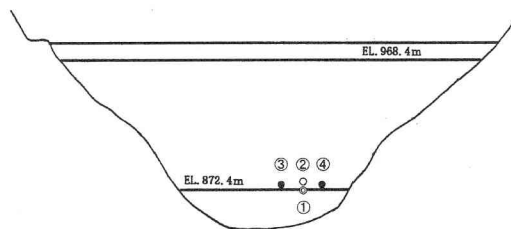


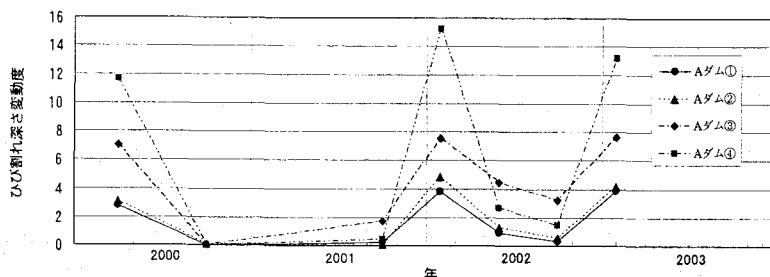
図-7 探査位置 (A ダム堤体)

また、本探査システムを既設アーチダムにおける変状のモニタリングに適用した事例を示す。

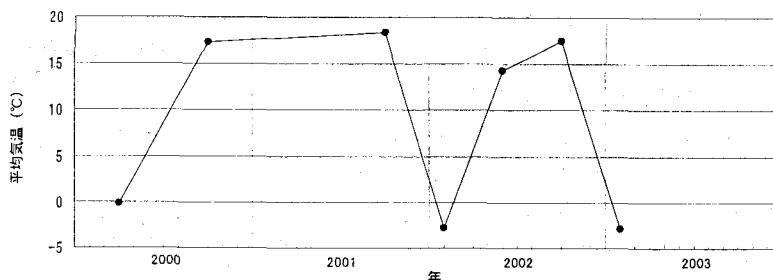
具体的には、供用後 30 年程度経過したダム（A ダム）堤体背面に生じた卓越ひび割れの深さを対象に、本探査システムを用いて経年的に計測し（2000～2003 年）、それらの進行性をモニタリン

グした。モニタリングするひび割れの探査箇所として、事前の全体的な点検における目視観察でひび割れが深いと判断された箇所を設定した。探査箇所①～④を図-7に示す。探査箇所①～④は、全てダム堤体下部に位置している。また、経年的にひび割れ深さを計測するために、加速度センサーを固定ピンで探査箇所に設置した。探査結果を図-8に示す。同図に示すひび割れ深さ変動度とは、ひび割れ深さの変動を評価

するための指標で、
 探査結果と各探査箇所において探査期間
 中（2000 年～2003
 年）に示した最小値
 との差をその最小値
 で除して無次元化し
 たものである。同図
 より、各探査箇所と
 もに経年毎のひび割
 れ変動度の最大値は
 増加しておらず、ひ
 び割れ深さの進行性
 は認められない。た
 だし、探査実施日によ
 って、値が大きく異
 なっている。そこ
 で、A ダム周辺の平
 均気温の経年変化を
 図－9 に示す。同図
 より、上記のひび割

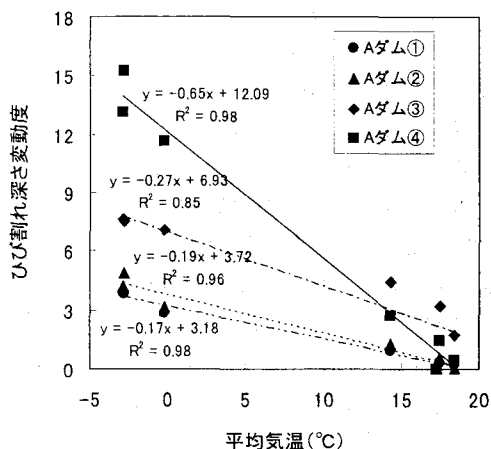


図－8 探査結果（A ダム堤体）



図－9 平均気温（A ダム周辺）

れ深さ変動度と平均気温との相関性は高い
 と推定される。さらに、それらを定量的に
 評価するために、各探査箇所におけるひび
 割れ深さ変動度と平均気温との単回帰分析
 を実施する。その結果を図－10 に示す。
 同図より、各探査箇所ともに両者には R^2
 $=0.85$ 以上の高い相関性が認められ、探査
 結果の変動についてはダム周辺の平均気温
 の影響が大きいことが分かる。また、各探
 査箇所ともにデータが右下がりの傾向にな
 っている。すなわち、平均気温が低ければ
 コンクリートが収縮しひび割れが深くなり、
 平均気温が高ければコンクリートが膨張し
 ひび割れが浅くなっていると考えられる。



図－10 探査結果の評価

これらの傾向は、コンクリート構造物によ

く見られる変状現象と整合している。同図には、各探査箇所における両者の単回帰式を併せて示す。なお、
 探査と併せて、ひび割れの進行性を評価する際よく適用される「ひび割れ幅」をクラックゲージにより計測
 した。しかし、探査と同様の機会にそれらを経年的に計測したが、ひび割れ幅には変化が認められなかった。

以上のことから、本探査システムは、ひび割れ深さを精度良く計測可能でかつ気温変動等の外力に起因する
 ひび割れ深さの変動を敏感に計測可能であり、ひび割れ深さのモニタリング手法として有効である。

5. 地下発電所の維持管理における非破壊探査システムの適用

ここでは、地下発電所の維持管理において、本探査システムを適用した事例を示す。

前述の A 発電所では、外力による変状に対するモニタリングの一手法として、内空変位計測を実施している。そして、経年的な計測の結果、現状では前述の図-2 に示すように変形進行性は認められない。ただし、発電所妻壁部に前述の写真-2 に示す卓越ひび割れが見られた。そこで、それらのひび割れを対象に、本探査システムを適用してモニタリングを実施する。図-11 に A 発電所周辺の地質状況および今回の調査位置を示す。

探査対象のひび割れは、発電所妻壁部に生じた 3 箇所のひび割れ (①～③) である。探査は、現在まで平成 11 年 11 月、平成 12 年 5 月および平成 14 年 1 月の 3 回実施した。なお、前述の A ダムの事例と異なり、上記の探査をほぼ同様の季節で実施した理由は、発電機の稼働期との関係である。ちなみに、探査実施時の温度は 1 回目 13.8℃、2 回目 11.9℃、3 回目 12.9℃とそれらの差は小さい。また、ここでは、A ダムと同様、経年的にひび割れ深さを計測するため、加速度センサーを固定ピンで探査箇所を設置している。図-12 にひび割れ状況および計測位置、図-13 に探査結果を示す。同図における横軸は平成 11 年 11 月 (初回) を 0 とした探査実施日の累計月 (2 回目: 6、3 回目: 26) を示し、縦軸のひび割れ深さ増加度とは、ひび割れ深さの増加を評価する指標で、各探査結果と各探査箇所の初回の探査結果との差を初回の探査結果で除し無次元化したものである。従って、初回の探査実施日が原点になっている。同図より、探査箇所が地下発電所内であり A ダムのように温度の変動が著しくないことを考慮すると、探査箇所①および②はひび割れの深さの増加が収束傾向にあることから、ひび割れの進行性は認められない。ただし、探査箇所③に関しては、増加の勾配は小さくなっているものの、ひび割れ深さは増加傾向にあり、ひび割れの進行性が認められる。なお、A ダムと同様、各探査箇所ともにひび割れ幅の著しい増加は認められない。

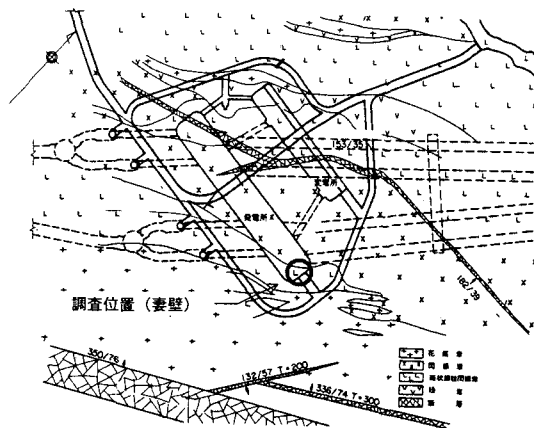


図-11 地質状況および調査位置

計測位置	ひび割れ幅
①	0.55mm
②	0.35mm
③	0.40mm

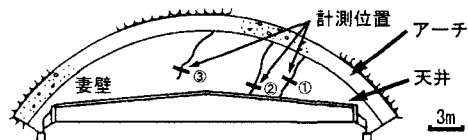


図-12 ひび割れ状況および計測位置

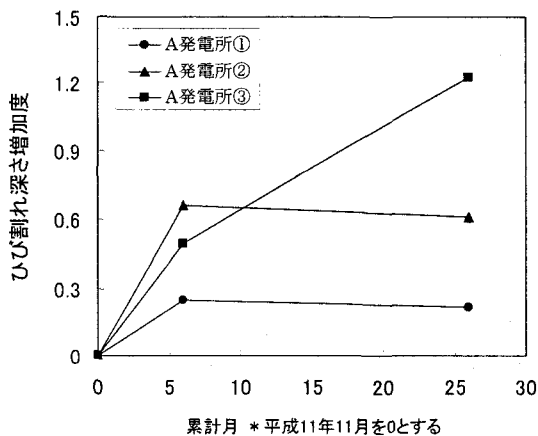


図-13 探査結果 (A 発電所)

以上のことから、A 発電所においては、内空変位計測により構造物の変形進行性は認められなかったものの、局所的な変状現象であるひび割れを対象に実施した経年的なモニタリングでは、妻壁部において一部に進行性が認められた。ひび割れの進行性が認められた原因については、その調査位置が妻壁部と言うこともあり、外力に起因する可能性も考えられる。ただし、前述のようにひび割れの発生要因は様々あり、実施に生じているひび割れは必ずしも一つの要因によるものではなく、それらの要因のうちの複数の要因が絡み合っていることが多いこと、ひび割れの進行性が認められるものの、その増加勾配は小さくなっていることを考慮すると、ひび割れの発生要因の推定を含め、今後それらを注意深くモニタリングする必要がある。

6. 地下発電所の維持管理におけるモニタリング手法の提案

以上の検討結果を踏まえ、ここでは、地下発電所の維持管理における外力による変状をモニタリングする手法として、現状の計測技術(埋設計器、内空変位等)と併せ、変状現象として局所的に見られる「ひび割れ」に着目し、それらの「深さ」を精度良く計測可能な非破壊探査システムによるモニタリング手法を提案する。

モニタリングの流れを図-14に示す。まず、現状の維持管理と同様、巡回・点検において卓越ひび割れを把握する。そして、卓越ひび割れの形態、規模、パターン等を目視観察し、「ひび割れ深さ」を本探査システムにより経年的に計測してその進行性をモニタリングする。さらに、ひび割れ深さに進行性が認められた際は、それらの局所的な挙動に関する情報、内空変位等の巨視的な挙動に関する情報および地下発電所周辺の地質構造(岩種、岩質、風化状況、ゆるみ、断層・破碎帯、不連続面の幾何学的特性等)等を考慮し、変状の要因を推定して、対策工を検討する。

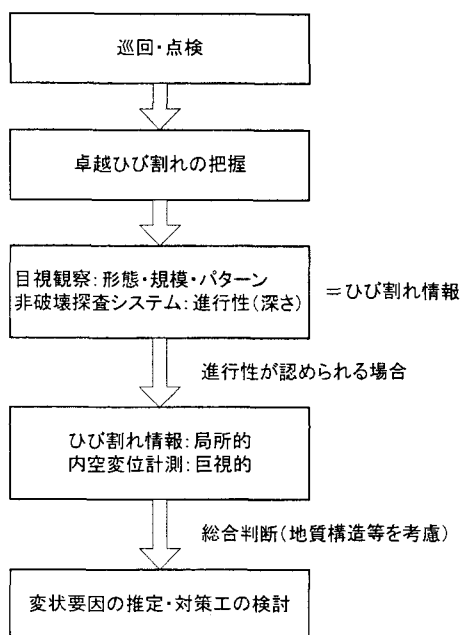


図-14 モニタリングの流れ

7. おわりに

本論文では、まず、大規模地下構造物の代表的なものとして地下発電所を取り上げ、地下発電所における維持管理の現状および各種計測結果を検討し、外力による変状に対するモニタリング手法の現状の技術的課題を明確にした。そこでは、現状でよく採用されている内空変位については、地下発電所において外力による変状の進行性をその計測結果を用いて評価する際、計測環境(空洞規模、計測断面の制限等)を考慮すると、山岳トンネルで採用されている手法をそのまま適用するのは困難であることが分かった。

そこで、モニタリングの対象として「ひび割れ」に着目し、それらの「深さ」を精度良く計測可能なレイリー波の減衰特性を利用した非破壊探査システムによるモニタリング手法を提案した。

さらに、その有効性を水路トンネルライニングおよびアーチダム堤体を対象に検証した。そこでは、本探査システムがひび割れの深さを精度良く計測可能なこと、外力に起因するひび割れ深さの進行性を敏感に計測可能なことが分かった。

最後に、今回提案したモニタリング手法を地下発電所の維持管理に適用した事例を示し、地下発電所に見られた変状（ひび割れ）の進行性を評価した。

今後の課題としては、さらに地下発電所を対象に今回提案したモニタリング手法の適用事例を増やし、モニタリングデータを蓄積することで、モニタリング対象とする卓越ひび割れの定義、ひび割れ深さの進行性の判断基準等の管理規準値の設定することが挙げられる。また、新設構造物の設計を「順問題」とすれば、維持管理は「逆問題」とする考え方^{1 1)}に見られるように、最近、山岳トンネルの維持管理において、逆解析を適用することが試みられている。例えば、トンネルライニングに発生している応力、ひずみ、変位およびライニング外面に作用している外荷重をライニングの変位から逆解析を適用することにより推定する手法が試みられている^{1 2)}。さらに、それらをライニングの変位ではなく、ライニングの力学特性およびひび割れ情報等から同様に逆解析を適用することにより推定する手法も試みられている⁹⁾。従って、将来的には、より合理的な地下発電所の維持管理を実現するため、現状の手法と併せ、今回提案したモニタリング手法から得られるひび割れ情報を用いた地下発電所の健全度の解析的な診断手法の確立を目指している。

最後に、本論文を作成するに当たりご協力頂きました、株式会社 セントラル技研の呉 佳嘩氏および海野忠行氏に感謝の意を示します。

8. 参考文献

- 1) 建設産業調査会：地下構造物ハンドブック，1984.
- 2) (社) 地盤工学会：大深度地下利用における地盤および構造物の調査・計測技術，2002.
- 3) 例えば、(社) 土木学会：トンネルの変状メカニズム，2003.
- 4) (財) 鉄道総合技術研究所：トンネル保守マニュアル（案），2000.
- 5) 三浦 悟・山本祐治・今井道男・岩野圭太・大西有三：デジタル画像計測技術を用いた変位・形状計測，The 11th Japan National Symposium for Rock Mechanics 2002，2002.
- 6) (社) 土木学会：大規模地下空洞の情報化施工，1996.
- 7) 小林賢一・荒木宏則・海野忠行・池尻 健：地下空間保守のための新しいひび割れ探査技術，地下空間シンポジウム論文・報告集（審査付論文），Vol.6，pp.69-78，2001.
- 8) Richart, Jr, F.E.・Hall, Jr, J.R. and R.D. Woods：Vibrations of Soils and Foundations，1970.
- 9) 池尻 健・江川顕一郎・峯村一夫・大久保晴司：延長 10km 発電用水路トンネルの安全診断の試案，The 11th Japan National Symposium for Rock Mechanics 2002，2002.
- 10) Nakamura, T., Kawamura, N., Hattori, Y., Egawa, K., and J. Wu：A New Non-Destructive Testing Method for Crack and Its Application to Tunnel Structure, Modern Tunneling Science and Technology, pp.337-342, 2001.
- 11) (社) 土木学会：メンテナンス工学連合小委員会 報告書，2003.
- 12) 久武勝保・村上譲二・村上敏夫：変位計測によるトンネル覆工保守管理の一手法，トンネルと地下，Vol.33, No.10, pp.47-56, 2002.