

地下空間保守管理のためのライニング剥離探査技術

The investigation of separation in lining for the maintenance of underground space

日比野悦久*・黒川 聡*・呉 佳暉**・江川顕一郎**

Yoshihisa HIBINO, Satoshi KUROKAWA, Jiayei WU and Kenichiro EGAWA

In this paper we consider the “separation” in the deterioration, which occurred on the lining of the underground caverns during a long time application. And the separation is investigated by Non-Destructive test method that developed by us.

In this method, the vibration signal due to hit of hammer is received with sensor that pushed on the lining. And the separation is evaluated by analyzing this wave. It is suggested that combining three factors (contact duration, predominant period and continue duration) and using the concept of probability may meet with good result. Furthermore, the appropriateness of this method is shown by the comparison between the core and result of this method.

Key words : maintenance, underground cavern, impact elastic-wave, separation

1. はじめに

地下空洞（地下式発電所）の保全においては、地圧、気象条件等の外的要因および設計、施工に起因する構造的な要因によって生じるライニングの変状に対してデータの収集並びに変状原因の的確な評価が必要である。従って、筆者らは、上記のライニングにおける主な変状現象（ひび割れ深さ、強度低下、剥離および表層劣化）評価方法として、非破壊探査技術¹⁾を開発した。

本論文は、運用後、数十年を経過した地下式発電所のライニング（躯体コンクリートおよび吹付けコンクリート）変状調査により認められた主な変状現象の中で、「剥離」に着目し、上記の探査技術の適用性について報告する。具体的には、ハンマー打撃により発生する衝撃弾性波を、ライニング表面に押し付けた加速度センサーで直接受振し、受振波を解析することで剥離を評価する。ここでは、受振信号の解析において、剥離の各特性を反映する「接触時間」、「卓越周期」および「継続時間」の三つのファクターを考慮した。そして、これらの三つのファクターについて、統計的手法を適用して評点を算出し、剥離の有無について評価した。さらに、探査結果と探査箇所に対応するコア抜き結果との比較により、本方法の妥当性を検証した。

キーワード：保守管理、地下空洞、衝撃弾性波、剥離

* 正会員 東京電力株式会社 建設部 土木・建築技術センター

** 正会員 株式会社 セントラル技研

2. 地下空洞（地下式発電所）ライニングに認められる変状現象

ここでは、運用後、経年変化した（13～38年）4箇所の地下式発電所について、ライニング（躯体コンクリートおよび吹付コンクリート）の変状調査を実施し、それらにより把握した変状現象の特徴を整理すると以下の通りである。なお、現状では、各地下式発電所において、認められた変状現象はその空洞の安定性に影響を及ぼすような規模の大きなものではなかった。

- ・ ひび割れ

アーチ部吹付コンクリートおよび妻壁コンクリート部の一部に卓越したひび割れが認められた（写真-1）。

- ・ 漏水

今回認められた漏水は、山岳トンネルにおいてよく認め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認められた。

- ・ 強度低下

主に漏水が生じている箇所に認められた。

- ・ 剥離

アーチ部吹付コンクリートの一部に認められた。ひび割れ深さの探査結果と合わせ、剥離の深度は吹付一層分の厚さに相当し、数 cm 程度と考えられる。

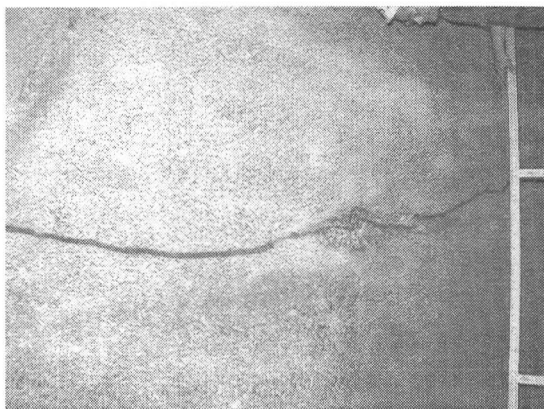


写真-1 ひび割れの状況

これらの変状現象の中で、「ひび割れ」については、ライニング表面から得られるひび割れの情報（形態、規模、パターン等）とともに、「ひび割れ深さ」を正確に経時的にモニタリングすることで、変状の進行、空洞安定性への影響についての評価が可能²⁾である。

「漏水」については、これらに起因する変状はライニング表面から徐々に進行することが予想される。従って、ライニングの耐久性能および発電所に設置される電力設備に対する第三者影響度に関する性能³⁾に影響を与えると判断される「強度低下および剥離」をモニタリングすることにより、地下空洞のライニングに関する経年による変状評価が可能と考えられる。

なお、上記の「ひび割れの深さ」については、研究報告⁴⁾で紹介しており、本論文では、「強度低下および剥離」中で特に「剥離」の有無を非破壊探査技術により精度よく調査する方法について述べる。

3. 現状の剥離探査技術

現状では、コンクリート構造物の様々な要求性能に影響を与える「剥離」を対象とした調査技術の開発および実用化が、関係機関（国土交通省等）において実施されている。現状の主な剥離探査技術を表-1にまとめる⁵⁾。尚、ここでは、調査技術の中で、実務において多く適用されている非破壊による探査技術に着目している。

これらは、現在、主にコンクリート構造物を対象に適用され、特に、剥離の有無に対する定量的評価が可能である「打音法」および「赤外線法」の適用例は、増加傾向にある。また、地下構造物（山岳トンネル）においては、それら探査技術による点検作業の迅速性を目的に、自動打音検査システム²⁾、赤外線カメラとCCDカメラを用いたシステム⁶⁾等の実用化に向けた開発が行われている。

ただし、同表が示すように各手法ともに、深い剥離面に対する精度の確保など探査度の更なる向上が望まれる。

表－１ 現状の主な剥離探査技術

分類	手法	概要	長所	短所
音波法	たたき点検	テストハンマーを用いて探査対象の表面を打撃し、発生する音の特性（高低や大きさ）から剥離の有無を判定する。	目視調査と併せて、手軽に実施可能である。	判定結果が作業員の資質や経験によるところが多い（特に、剥離面が5cm以上深い場合）。
	打音法	インパルスハンマーと特殊フード付きマイクロフォンを用いて、探査対象の表面を打撃した際の打撃音応答を測定する。そして、その振幅、周波数成分または減衰に着目し、それらに統計的手法を適用して、剥離の有無を判定する。	剥離の有無に対する定量的評価が可能である。	剥離面が深い場合は、判定結果に個人差が出る。また、剥離の規模によりそれらに適合する測定装置を選ぶ必要がある。
電磁波法	赤外線法	赤外線撮影装置を用いて計測された探査対象表面の赤外線エネルギーの強度分布を熱画像として表す。そして、それを温度分布に変換して、剥離の有無を判定する。	非接触で広い面積を一度に探査可能である。	剥離とコンクリート表面温度分布との関係をあらかじめ把握する必要がある。温度変化の少ない地下空間においては、適用しにくい。検出精度は10cm程度が限界である。

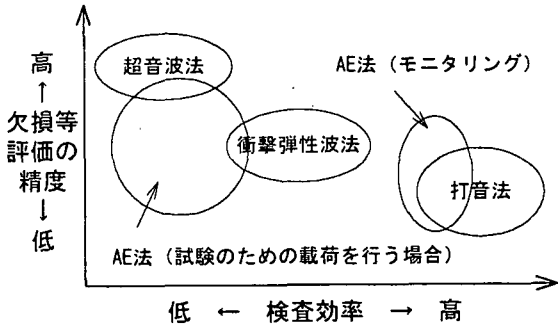
4. 衝撃弾性波を用いた剥離探査技術

4.1 基本原理

前述の現状を踏まえ、本論文では、図－１に示す⁵⁾ように実務でよく適用されている「打音法」に比較して、コンクリート欠損等の評価精度が高い「衝撃弾性波」を用いた剥離探査技術を提案する。

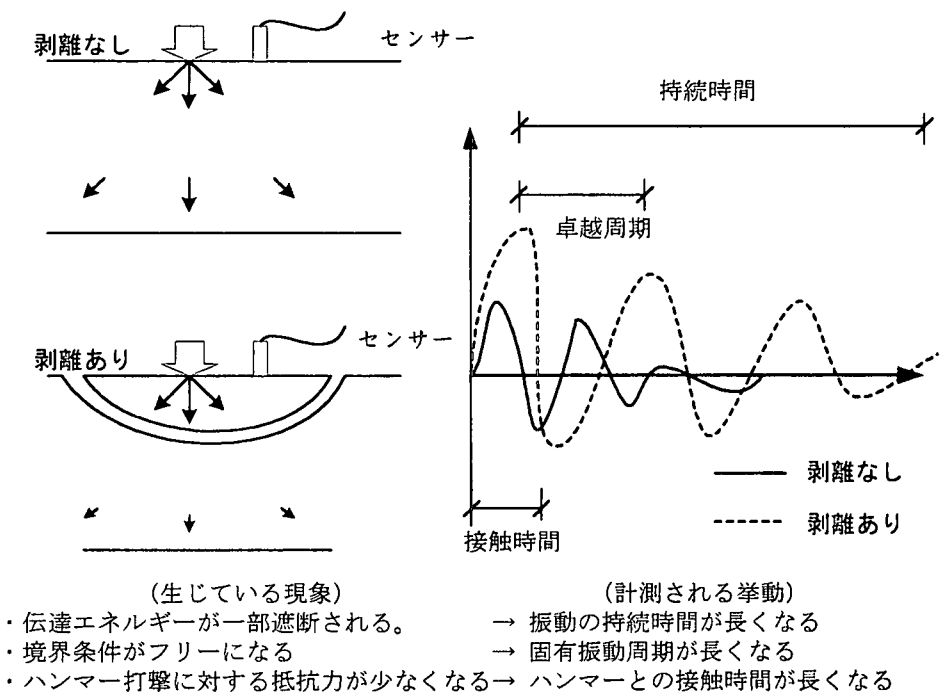
図－２に本方法の探査概念を示す。同図より、本方法では剥離を評価する際、剥離を含むライニングの抵抗力を反映する「接触時間」、剥離の形状および境界条件を反映する「卓越周期」および剥離による打撃エネルギーの分散を反映する「継続時間」の三つのファクターを考慮する。また、同図より、剥離の発生により三つのファクター共、長くなることが分かる。

4.2 本方法と打音法との比較



図－１ 各弾性波法の相対評価⁵⁾

打音法は、コンクリートの剥離探査手法の一つとして現在最も広く使われている手法である。打音法と本手法との大きな違いは、打音法がライニングを打撃する際に生じる音波を測定することに対し、本手法は、ハンマー打撃により発生する衝撃弾性波を、ライニング表面に押し付けた加速度センサーで直接受振する点である。



図－２ 本方法の探査概念

打音法は、音波を採取する際に離れた場所にマイクを設置するため、作業性に優れている。ただし、音波の大きさ（すなわち振幅）も剥離有無の判断基準となるが、周辺ノイズの影響を受けやすいという欠点がある。このため、「特殊フード」をライニングに接触させ、その中にマイクロフォンを置くことによって周辺ノイズを遮断している。

一方、本方法は、空気を介在しないため周辺ノイズの影響を受けにくく、より分解能の高い信号を得られ、ハンマーの「接触時間」を判別することが可能である。また、コンクリートにおける剥離以外の他の変状現象（ひび割れ、強度低下および表層劣化）に対しても、同時に適用可能であることが大きな特徴である。

4.3 探査方法

作業手順としては、調査対象箇所に加速度センサーを押し付け、センサーから10cm程度離れたところをハンマー（150g）で打撃する。そして、打撃によって生じた衝撃弾性波をセンサーで受振し、受振波を解析することで、剥離の有無を評価する。本方法による探査状況を写真－2に示す。本方法のシステムは、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。システムの構成を図－3に示す。ここでは、その特徴を以下にまとめる。尚、本システムの主な仕様を表－2に示す。

- ・ 探査の迅速性を目指し、小型ノートパソコン型をベースに開発しており、軽量（5kg程度）である。
- ・ 本システムは、コンクリートの変状を総合的に評価することを意識して開発したものであり、受振波の処理方法を変えることで、現状のところ「剥離」の他にも「ひび割れ深さ」、「強度低下」および「表層劣化」の評価が可能である¹⁾。
- ・ 上記の計測ドライバー、解析および処理ソフトは、全ての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実施可能である。



写真-2 本方法による探査状況

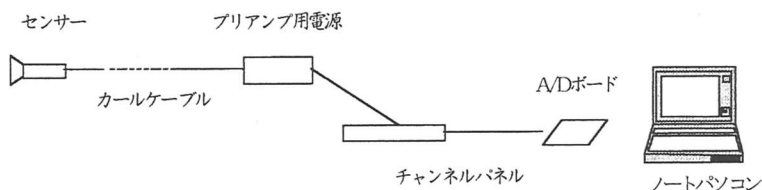


図-3 システムの構成

表-2 本システムの主な仕様

項目	型式	細目	仕様
加速度センサー	SAWR51G-16	共振周波数	25KHz以上
		周波数範囲	5Hz～7KHz±3.0db以上
		検出器取付	M6深さ6メネジ（人力圧着）
チャージアンプ	Vv-11	—	センサーへ電源供給
A/D変換	AD12-8 (PM)	入力チャンネル	目的に応じて、1 もしくは2
		分解能	12bit
		変換速度	10 μ s/ch
標準振動発振機 (キャリブレーション用)	VX-1100	加振周波数	159.2Hz±1%
		加振加速度	10 m/s^2 (rms) ±3%

4.4 探査結果の評価方法

本方法は、前述の図-2に示すように、「接触時間」、「卓越周期」および「継続時間」の三つのファクターを考慮して、剥離を評価する。以下に、各ファクターによる評価方法の概要、各ファクターに影響を与える要因が探査結果に与える影響並びに各ファクターを用いた剥離の有無の評価方法について述べる。

a) 接触時間による評価

コンクリート表面に剥離を生じると剥離を含むコンクリートの見かけの剛性が低下する。従って、剥離を

含むコンクリートをハンマー打撃する際、健全部を打撃するのに比べて、ハンマーとコンクリートとの接触時間が長くなる。そこで、本方法では、この「接触時間」を用いて剥離の評価を試みる。尚、探査における接触時間の計測方法を、図-4に示す。

また、接触時間に影響を与える要因を考察するため Impact parameter $\bar{\lambda}$ ⁷⁾ について検討する。板（コンクリート）に鋼球（ハンマー）を落下させた際の接触状況を図-5に示す。同図より α は式(1)に示される⁷⁾。

$$\alpha = w_2 - w_1 = v_0 t - \frac{1}{m} \int_0^t dt \int_0^t F dt - w_1(x_0, y_0) \quad (1)$$

ここで、 w_1 は、載荷 $\bar{W}(x, y, t)$ に依存し、式(2)に示される。

$$D \nabla^4 w_1 + 2 \rho b \frac{\partial^2 w_1}{\partial t^2} = \bar{W} \quad (2)$$

尚、 $D \equiv \frac{2b^3 E}{3(1-\mu^2)}$ 、 E ：コンクリートの剛性、 μ ：コンクリートのポアソン比

この方程式の近似解は、 $\bar{\lambda}$ を導入すれば式(3)に示される。

$$\frac{d^2 \bar{\alpha}}{d\bar{t}^2} + \left(1 + \bar{\lambda} \frac{d}{d\bar{t}}\right) \bar{\alpha}^{3/2} = 0 \quad (3)$$

ここで、 $\bar{t} = t/\bar{T}$ 、 $\bar{\alpha} = \alpha/(\bar{T}v)$ 、 $\bar{T} = 0.311\tau_H$ 、 τ_H ：プレート厚が無尽大であるときの接触時間

また、 $\bar{\lambda}$ は Hertz 衝撃理論⁷⁾ を用いると、式(4)に示される。尚、式中の下付 1 および 2 は、それぞれハンマーおよびコンクリートに関するパラメータを示す。

$$\bar{\lambda} = 0.5448 \frac{1}{h^2} \left(\frac{\delta_2}{\rho_2} \right)^{1/2} \frac{m_1^{3/5} (R_1 v_0)^{1/5}}{(\delta_1 + \delta_2)^{2/5}} \quad (4)$$

ここで、 $\delta = \frac{1-\mu^2}{E\pi}$ 、 h ：剥離深さ、 ρ ：

密度、 m ：重さ、 R ：ハンマー曲率半径

今、式(3)を用いていくつかの $\bar{\lambda}$ について基準化時間 $\bar{t}$ と基準化衝撃力 F との関係を求める。その結果を図-6に示す。同図より、衝撃力がゼロになる時間を接触時間と考えると、 $\bar{\lambda}$ が大きいほど、接触時間が長くなることが分かる。このことは、 $\bar{\lambda}$ が大きいほど、その剥離探査に与える影響が大きくなることを示している。従って、

$\bar{\lambda}$ に着目すると式(4)より、探査に影響を与える主な要因としては、ハンマー重さ、ハンマー先端の曲率半径および剥離の深さが挙げられ、それぞれの影響度の定量的評価が可能である。

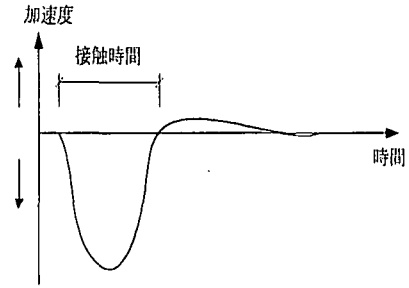


図-4 接触時間の計測方法

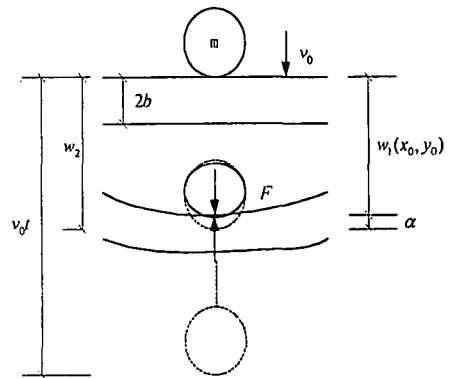


図-5 板と鋼球との接触状況

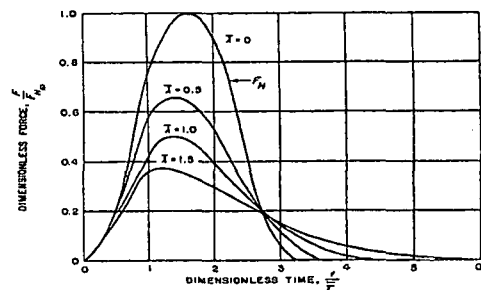


図-6 基準化時間 $\bar{t}$ と基準化衝撃力 F との関係⁷⁾

また、剥離周辺の縁が切れている境界条件の場合、ハンマー打撃に対するコンクリートの抵抗がさらに低下するので、上記の接触時間が長くなると考えられる。

b) 卓越周期による評価

剥離を含むコンクリートをハンマー打撃した際の振動特性は、健全部と比較して一般的に卓越周期が長くなる。そこで、本方法では、これらの「卓越周期」に着目し、剥離の評価を試みる。具体的には、受振波に対してFFTを実施している。

さらに、卓越周期に影響を与える要因を考察するため、ハンマー打撃されたコンクリート（ E 、 μ 、 ρ ）の固有振動数を式(5)に示す⁸⁾。尚、ここでは、剥離を円盤と仮定している。

$$f_{ij} = \frac{\lambda_{ij} h}{2\pi D^2} \sqrt{\frac{Eg}{12(1-\mu)\rho}} \quad (5)$$

ここで、 λ ：固有値、 D ：剥離の直径、 h ：剥離の深さ、 g ：重力加速度

これより、固有振動数の逆数である固有周期は剥離の面積および深さに影響されることが分かる。ただし、式(5)より、それらの組み合わせで上記の固有周期が変化することが分かる。

c) 持続時間による評価

健全なコンクリートをハンマー打撃することにより生じたエネルギーは、前方および側方へ伝播する。従って、打撃箇所における振動（その振幅の二乗はエネルギーに比例する）が徐々に小さくなる。しかし、コンクリートに剥離が生じるとエネルギーの消散通路が遮断されるため、打撃箇所における振動の減衰速度は遅くなる。そのために、計測した振動の持続時間が長くなる。そこで、本方法では、これらの持続時間に着目し、剥離の評価を試みる。また、波の通過特性を考えると、一般的に高周波成分が反射されやすいので剥離による持続時間の延長効果が大きいと考えられる。

尚、探査における持続時間の算出方法は、受振波の振幅の各ピーク値とそれに対応する時間をプロットし、それらを最小二乗法で直線近似する。そして、その近似直線と x 軸とが交わった時間を持続時間とする。

d) 各ファクターに影響を与える要因

以上の検討結果をもとに、各ファクターに影響を与える要因を探査対象（剥離）および発振機構（ハンマー）に着目し、以下にまとめる。

- ・ 探査対象（剥離）：剥離が浅くかつ面積が小さい場合は、探査結果に「接触時間」および「持続時間」が大きな影響として現れる。一方、式(5)により、剥離が浅くかつ面積が大きい場合は、「卓越周期」が大きな影響として現れる。尚、「接触時間」は変状現象の1種であるコンクリート表層劣化に、「卓越周期」および「持続時間」は探査対象の幾何形状や境界条件にもそれぞれ影響として現れる。
- ・ 発振機構（ハンマー）：一般的に、深い剥離に対しては、大きなハンマーが望ましい。例えば、式(4)よりハンマー先端の曲率半径が大きいかつ重いハンマーが深い剥離に対して最適であることが分かる。また、ここで特に着目すべき点は、「卓越周期」に対するハンマーの影響である。ハンマー打撃による振動は、強制振動と自由振動とで構成されている。式(5)は、その自由振動の周期を反映している。ただし、FFT などにより実際にスペクトル解析する場合は、一般的にこれらを併せた全部の計測データを用いて解析する。さらに、構造物の固有周期は無数であり、ハンマー打撃により誘発された振動の中で、卓越となる部分は高次モードとなる可能性が有る（この場合に、剥離を見逃す可能性が出てく

る)。従って、解析により求められた卓越周期にハンマーの特性が影響することが考えられる。

以上を考慮すると、単一のファクターにより剥離を探索すれば、上記に示した様々な要因に影響され、これらを的確に評価することは困難である。従って、本論文で示すように、上記の三つのファクターを組み合わせることで剥離の有無を評価することとした。

e) 各ファクターを考慮した剥離の評価方法

探索結果から、剥離の有無を評価する際の問題点として、評価のための数値がないことが挙げられる。

従って、上記の各ファクターを剥離の評価に反映させるため、本方法では、統計的手法を適用している。具体的には、まず、探索結果における各ファクターの算出結果について、図-7

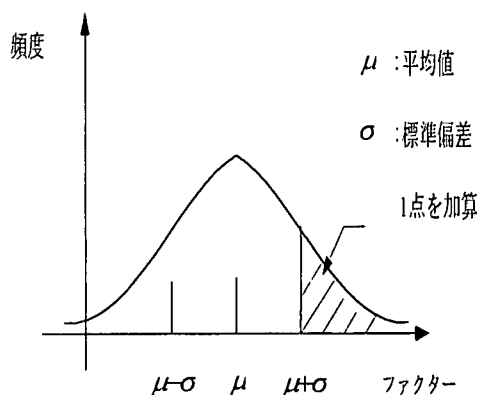


図-7 各ファクターにおける点数の算出方法

のように平均 μ および標準偏差 σ を算出する。そして、 $\mu + \sigma$ 以上のものを1点、それ以外のものを0点として、各ファクターの点数を算出する。さらに、各ファクターの点数を合計し、探索結果の評点を算出する。これにより、各ファクターを考慮した探索結果の評価が可能である。

ただし、全体の探索結果の中に剥離の割合が多くなると各ファクターの平均値が大きくなり、剥離を見逃す可能性が高くなる。従って、各ファクターの μ および σ を明確化するために、数多くのデータ（特に健全部）の蓄積が必要である。

4.5 本方法の妥当性の検証

ここでは、本方法の妥当性を現場試験により検証する。具体的には、本方法による剥離探索結果と探索地点に対応したボーリング結果との比較により、本方法の妥当性を検証した。

探索位置とボーリング位置との対応を図-8に示す。尚、探索は、近い探索位置において2測線を実施した（探索No.1および探索No.2）。また、探索No.1～2における各探索箇所（1～8）で、繰返し3回実施した。尚、評点の算出方法は以下の通りである。

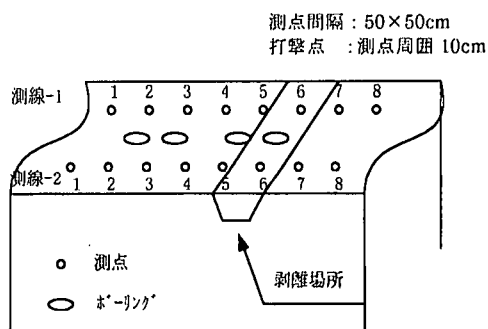
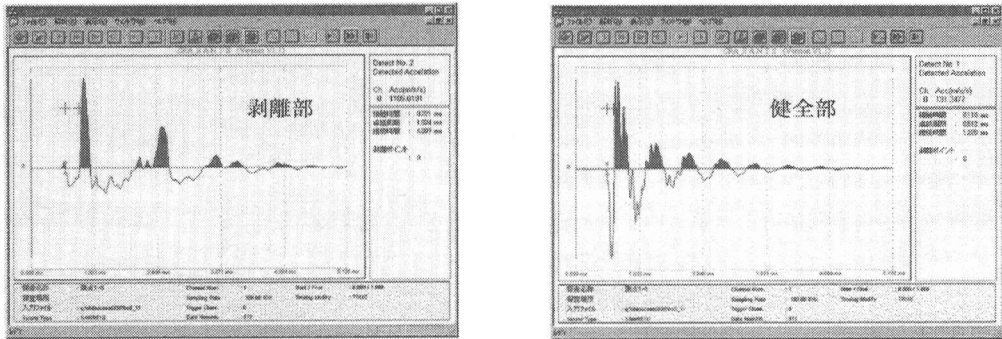


図-8 探索位置とボーリング位置との対応

- ① 各探索位置（探索No.1および探索No.2）において得られた探索結果から、各探索箇所（1～8）の三ファクター（「接触時間」「卓越周期」および「持続時間」）を算出する。尚、代表的な探索結果として、測線-1の測点1（剥離無し）および測点6（剥離有り）における値を図-9～10に整理する。
- ② 探索No.1および探索No.2毎に、各ファクターについて、平均 μ および標準偏差 σ を求める。
- ③ 各探索箇所（1～8）の各ファクターについて、前述図-7に示すように $\mu + \sigma$ 以上のものを1点、それ以外を0点と点数を算出する。

- ④ 各探查箇所（1～8）毎に三ファクターの点数を合計し、それらを各探查箇所における繰返し回数（3回）で除して評点を算出する。



図－9 代表的な計測波形と解析結果

併せて実施したボーリング結果においては、ボーリング位置④で剥離が認められた。これは、探查箇所6に対応している。尚、写真－3に示すように、ボーリング④における剥離は表面から約5 cmの位置であった。また、④以外のボーリング位置に、剥離は認められなかった。

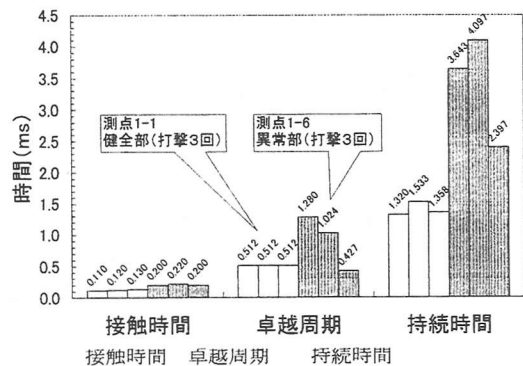
探查結果とボーリング結果との対応図を図－11に示す。同図中では、探查結果を「評点」で整理している。また、同図中にはボーリング調査により剥離が認められた位置（探查箇所－6に対応）を示している。

同図より、明らかに剥離箇所において、評点が高いことが分かる。このことは、本方法により算出した評点により、剥離の有無を評価できることを示している。また、全体の傾向としては、評点が探查箇所6をピークになだらかに変化していることが分かる。これは、剥離が認められた探查箇所－6付近の変状を示しているものと考えられる。

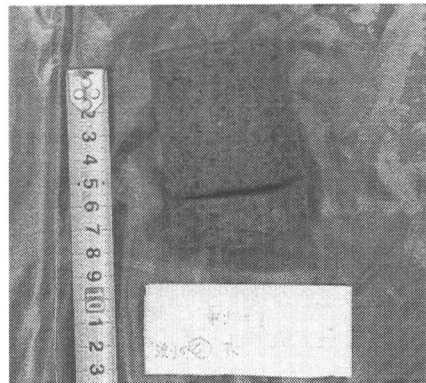
尚、今回の検証は、探查測点数（すなわち母集団）が足りないことが課題として挙げられるが、上記のような現象を本評価手法により表現できることは意味深いと考えられる。

5. おわりに

本論文は、運用後、数十年を経過した地下式発電所のライニング（躯体コンクリート、吹付けコンクリート）の変状調査により認められた主な劣化現象の中で「剥離」に着目し、筆者らがこれまでコンクリート構造物の主な変状現象（ひび割れ深さ、強度低下、剥離および表層劣化）評価方法として開発した非破壊探查



図－10 代表的な探查結果



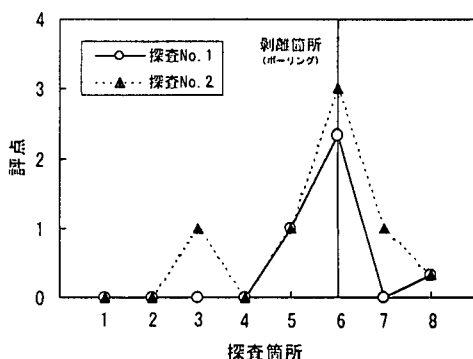
写真－3 剥離状況

技術の剥離探査への適用性について報告した。

具体的には、探査結果に影響を与えるファクターとして「接触時間」、「卓越周期」および「持続時間」に着目し、理論的な検討により各ファクターが探査結果に与える影響について考察した。

探査結果について、統計的手法を適用し、接触時間、卓越周期及び持続時間各ファクターを組み合わせることで剥離の有無を評価した。その結果、現場試験において、探査結果による間接的な評価とボーリング結果による直接的な評価が一致し、本方法の妥当性が検証された。

今後の課題としては、以下のことが挙げられる。



図—11 探査結果とボーリング結果との対応

- ① 剥離の有無の判定は、いろいろな要因に影響されるために、統計的な手法を取らざるを得ない面がある。本論文では、剥離判定の一方法として、正規分布を仮定した方法を提案した。判定に関する精度向上を図る上で、より多くの構造物を対象に測定データを蓄積することで、実用面において的確な判定方法についての検討を進めることが必要である。
- ② 深度の深い剥離に対しては、本技術を含め既存技術を用いての探査が困難であると考えられる。従って、今後、剥離探査の測定範囲を拡大する必要がある。
- ③ 地下式発電所における変状は、剥離のみならず、ひび割れや強度の低下なども多く見られる。従って、これらを対象とした全面的な調査結果から、地下空洞の安定性に与える変状現象を総合的に判断する手法の構築が重要である。さらに、今後、本方法を適用した経時的なモニタリングにより、時間軸を意識した地下空洞の保守管理手法を構築することが、有意義なことと考えられる。

最後に、本論文を作成するにあたりご協力いただきました、(株)セントラル技研の池尻 健氏に感謝の意を示します。

6. 参考文献

- 1) 舎川 徹・安保秀範・田中雅弘・江川顕一郎・呉 佳暉：新しいひび割れ深さ探査技術の開発，トンネル工学研究発表会・報告集（論文），Vol. 10，pp. 55-62，2000. 11.
- 2) (財)鉄道総合技術研究所：トンネル保守マニュアル（案），2000. 5.
- 3) コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，土木学会，2001.
- 4) 小林賢一・荒木宏則・海野忠行・池尻 健：地下空間保守管理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. 1.
- 5) 例えば、コンクリート構造物の診断のための非破壊試験方法研究委員会報告書，日本コンクリート工学会，2001. 3.
- 6) 宮田信祐：トンネル検査車の開発，JREA（社）日本鉄道施設協会，Vol. 42，No. 7.
- 7) Goldsmith, w: Impact, The Theory and Physical Behavior of Colliding Solid, Richard Clay and Company, Ltd., 1960.
- 8) 小坪清真：土木振動学，森北出版.