

大断面空洞天井端における吹付けコンクリートの 打音測定および周波数分析を用いた 保守管理手法について

甲斐 郁寛¹・唐澤 卓巳²・杉崎 直人³

¹正会員 東京電力株式会社 建設部 水力・風力グループ

(〒 100-8560 東京都千代田区内幸町一丁目1-3)

²東京電力株式会社 群馬支店渋川支社富岡制御所 土木保守グループ

(〒 370-2316 群馬県富岡市富岡1285-1)

³株式会社東設土木コンサルタント 基盤情報部 (〒 113-0033 東京都文京区本郷1-28-10)

地下発電所空洞天井アーチ部の吹付けコンクリートには，掘削時および経年変化によるひび割れの発生および小規模の表面剥離が確認されており，定期的に打音検査による点検を実施している．また，天井アーチ部の点検は点検用足場を兼ねた天井クレーンを利用して検査員による検査が可能であるが，天井クレーン走行範囲外の場所については，足場等の構築無しでは人の接近が困難であり，ハンマーで直接打撃することができない．

本報告は，吹付けコンクリートのクラック（吹付けコンクリート内部に潜在しているクラックまたは浮きを言う，以下同じ）存在の有無を定量的に評価でき，大断面空洞天井部のように人の接近が困難な高所においても適用可能な吹付けコンクリートの健全性評価手法について報告するものである．

Key Words : Large section space, Shotcrete, hammering test, Frequency analysis, dominant frequency

1. はじめに

発電所空洞天井アーチ部の吹付けコンクリートには，掘削時および経年変化によるひび割れの発生および小規模の表面剥離が確認されている．このため当該発電所では定期的に打音検査による点検を実施している．打音検査については，検査員が吹付けコンクリート表面をテストハンマーで叩き，その際に発生する打音により良否の判定を行っているが，定性的な評価のため，検査員によって評価にバラツキが生じることがある．

また，天井アーチ部の大部分は，検査用足場を兼ねた天井クレーンを利用して検査員による検査は可能であるが，天井クレーン走行範囲外の場所については，足場等の構築無しでは人の接近が困難であり，ハンマーで直接打撃することができない．打音検査のために仮設足場の設置および撤去を繰り返すことになり，コストが増大するとともに既設設備に損傷を与える危険性を伴う．

そこで，吹付けコンクリートのクラックの有無について定量的に評価する手法について第3章にて報告する．

また，大断面空洞天井部のように人の接近が困難な高所において適用可能な吹付けコンクリートの健全性評価手法について第4章にて報告する．

2. 神流川発電所の概要

本報告で検討の対象とした神流川発電所は，長野県南佐久郡南相木村に位置する上部調整池（南相木ダム）と群馬県多野郡上野村に位置する下部調整池（上野ダム）との間で揚水発電を行う純揚水式発電所であり，2005年12月に1号機，2012年6月に2号機が運転開始した．地下発電所空洞は最大断面部で高さ51.4m，幅33m，断面積1,500m²の卵形空洞であり，主要な岩盤補強工はロックアンカーおよび吹付けコンクリート（厚さ：32cm）である．図-1に地下発電所天井アーチ部の写真を示す．



図-1 地下発電所天井部（神流川発電所）



図-3 打音検査および集音状況

3. 打音検査判定の定量化

(1) 検査対象とするクラック

本稿では、吹付けコンクリート内部で剥離した隙間をクラックと呼び、打撃点からクラックまでの距離をクラック深さと呼ぶこととする。図-2に模式図を示す。

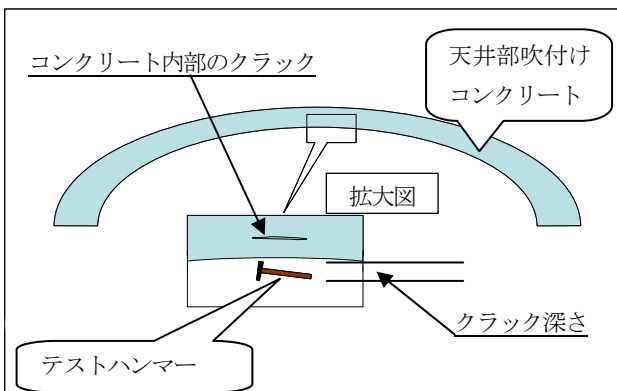


図-2 クラックとクラック深さ（模式図）

(2) 打音検査と集音状況

テストハンマーで打撃した際に発生する音をマイクで集音し、得られた波形データをフーリエ変換による周波数分析を行うことで、定量的な評価を行うことを目指した。図-3に打音検査および集音状況を示す。

(3) 打音検査の定量化

事前の適用性試験として、神流川発電所の吹付けコンクリートのうち、容易にクラックの深さを計測できる箇所において打音検査を行い周波数分析を行った。打音検査後、当該箇所を壊して深さを計測した。クラック深さができるだけ均一な箇所を対象に、深さ10mm～50mmの箇所ですべて11箇所を検査した。検査箇所の模式図を図-4に示す。

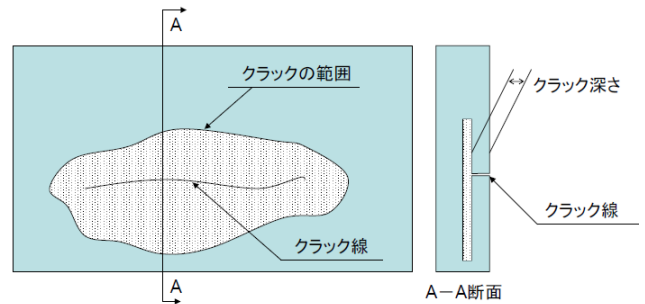


図-4 適用性試験でのクラックとクラック深さ（模式図）

周波数分析の結果、以下のような特徴を確認し、クラックの有無を判定する基準として適用可能であることが推定された。なお、健全部については、熟練工が健全と判断した箇所においては卓越周波数が少なくとも2000Hz以上であるとわかっていたため、それをしきい値とした。集音した音の時刻歴波形および音圧と卓越周波数の関係を示したグラフの一例を図-5に示す。

○健全部

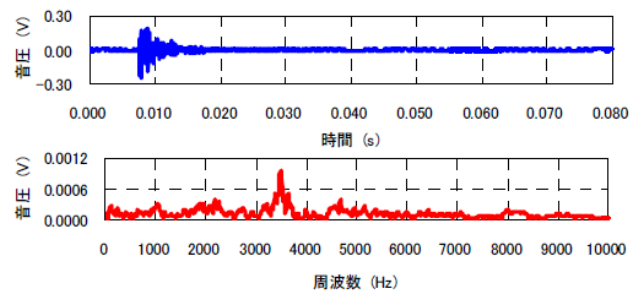
- ・卓越周波数が2000Hz以上の波形

○クラック発生箇所

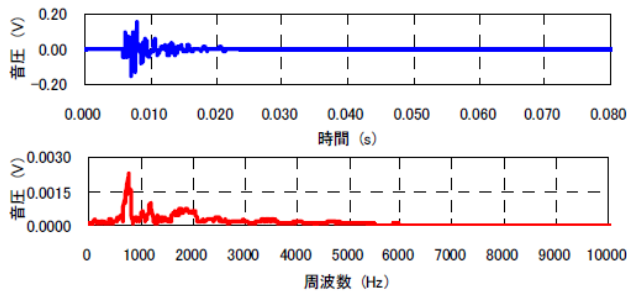
- ・卓越周波数が1000Hz未満の波形

○ロックアンカーやボーリング孔、その他付帯設備近傍

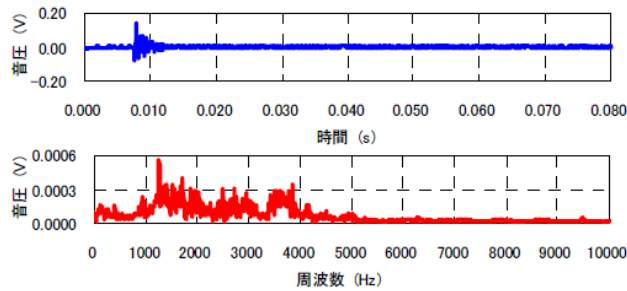
- ・卓越周波数が1000～2000Hzで発生している波形



健全部



クラック発生箇所



ロックアンカーなど付帯設備近傍

図-5 周波数分析結果（音圧波形と卓越周波数）

計測した波形は打撃の強弱により音圧が変化するため、スケールを変えて表示している。なお、スペクトル波形での卓越周波数は、打撃力の大きさによらず発生するため、ここでのスケールの違いは問題にならない。

これらのデータについて、クラック深さとの関係性についてまとめたグラフを図-6に示す。グラフ中の直線はプロットした点の近似直線である。

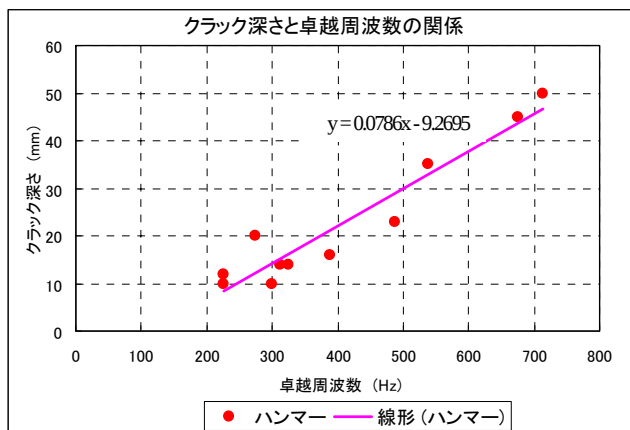


図-6 クラック深さと卓越周波数（適用性試験）

一般的に、コンクリート内部にクラックがある場合、低い周波数が卓越し、健全部およびクラックが表面から深いところにある場合は高い周波数が卓越するとされている²⁾。ハンマーの打撃により観測される波動には、打撃面とその対面を行き来する縦波やコンクリート表面を

伝搬する表面波、打撃面とその対面を同位相で伝搬する曲げ波などがある。300mm以下程度の、厚さが薄い場合に卓越する波は曲げ波である³⁾とされる。今回対象にしているクラックのように、部材厚が薄く曲げ振動が大きくなると、低周波側のエネルギーが大きくなる。適用性試験結果（図-6）より、クラック深さと卓越周波数は比例関係にあると想定される。

(4) しきい値の適用性確認

しきい値の適用性を確認するために、天井部において打音検査および集音データの周波数分析を行った。クラックが発生していると判定された箇所の吹付けコンクリートのコアボーリングを行い、クラックの有無を確認した。表-1に結果を記す。

表-1 クラック深さと卓越周波数

地点名	卓越周波数 (Hz)	クラック深さ (mm)
A	637.5	60
B	900.0	25
C	462.5	30
D	550.0	120
E	362.5	20

クラック有りと判定した箇所については全て卓越周波数が1000Hz以下となった。

これらをグラフ化したものを図-7に示す。グラフ中の直線は適用性試験においてプロットした点の近似直線である。

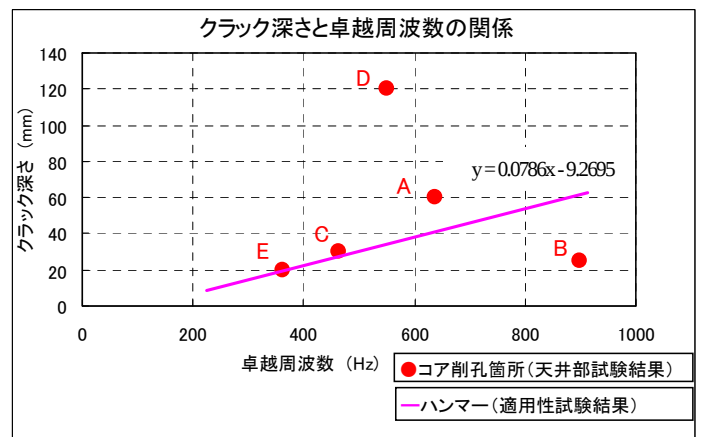


図-7 クラック深さと卓越周波数の関係（天井部）

図-7によれば、クラック深さと卓越周波数はほぼ比例関係にあることが想定される。ただし、現状ではデータ数が少ないため、定量的な評価を行うにはさらなるデータの蓄積が必要であると考えている。

4. 高所における打音検査方法の開発

(1) 装置の概要

天井クレーン走行範囲外の箇所は、足場等の構築無しでは人の接近が困難である。当該範囲を図-8に示す。

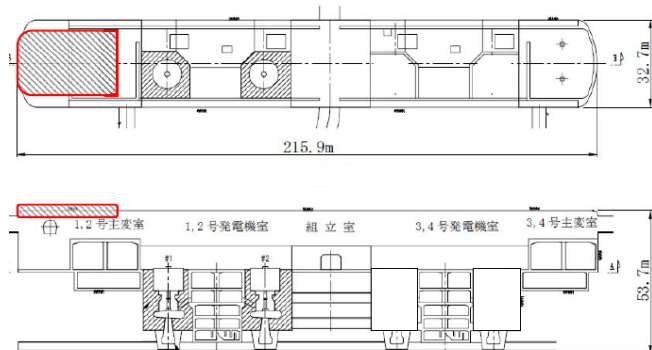


図-8 天井クレーン走行外の範囲

延長ジグの先端にバネ式のテストハンマーを取り付けることにより、高さ11m程度まで適用可能な測定装置を製作した。検査状況と延長ジグの先端に取り付けられたバネ式ハンマーを図-9、図-10に、バネ式ハンマーによる調査状況を図-11に示す。

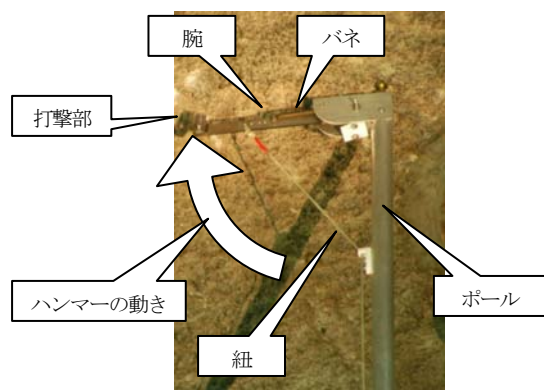


図-9 バネ式ハンマー

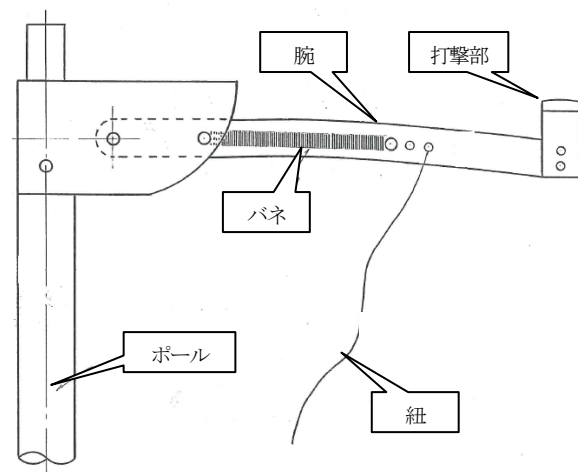


図-10 バネ式ハンマー



図-11 延長ジグを用いた高所箇所の検査状況（天井部）

ハンマーに取り付けた紐を引っ張り下げることでバネが伸び、バネの復元力を利用してハンマーによる打撃が可能とした。集音についても直接打撃するときと同じ条件にするため、打撃部付近に集音マイクが届くよう延長ジグを取り付け、天井部に押しつけることで固定できるよう工夫した。

通常のテストハンマーで手動により打撃した場合と延長ジグを用いた場合を比較するため、前述の適用性試験において手動による打音検査を行った箇所を、ジグを取り付けたバネ式ハンマーでも打音検査を行った。

図-5で示した通常のテストハンマーによる検査結果にジグ取り付けバネ式ハンマーのデータを重ね合わせたグラフを図-12に示す。

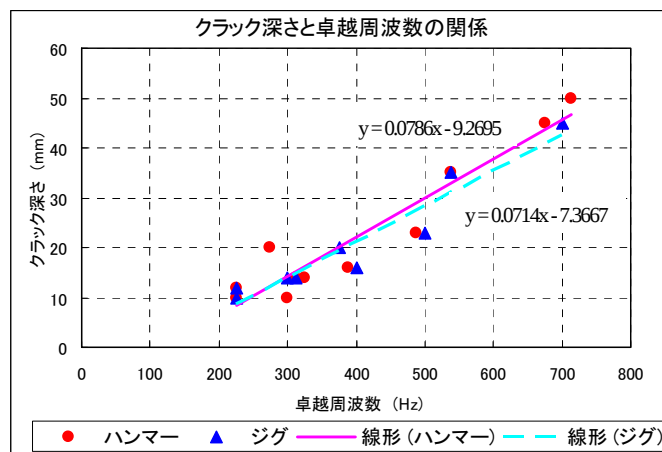


図-12 通常のテストハンマーとジグを取り付けたバネ式ハンマーによる検査結果（適用性試験）

ハンマーによる検査と延長ジグを用いた検査のそれぞれのデータごとに、近似させた直線を実線と破線で示した。

また、クラック深さ14mmと35mmの箇所に対し、ハンマーによる検査と延長ジグを用いた検査それぞれの波形を図-13に示す。

卓越周波数とクラック深さの関係性および個別の調査

箇所での波形も概ね似たものとなっていることがわかる。ジグを用いた検査においても通常のテストハンマーによる検査と同様な傾向となることをつかむことができたと考えられる。

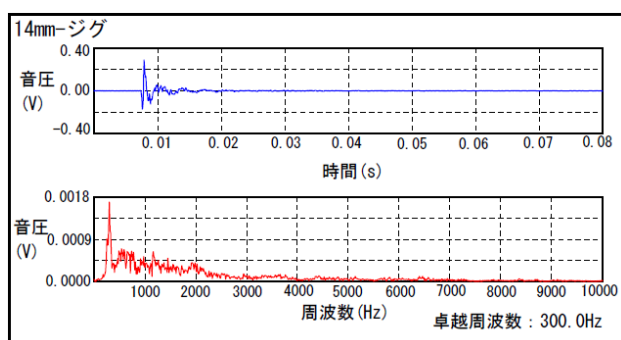
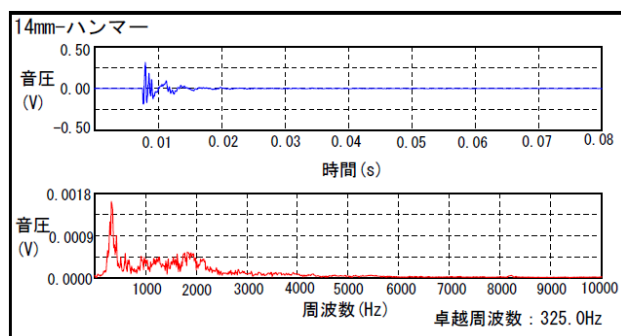


図-13-1 通常のハンマーとジグ設置したものとの比較
(深さ14mm)

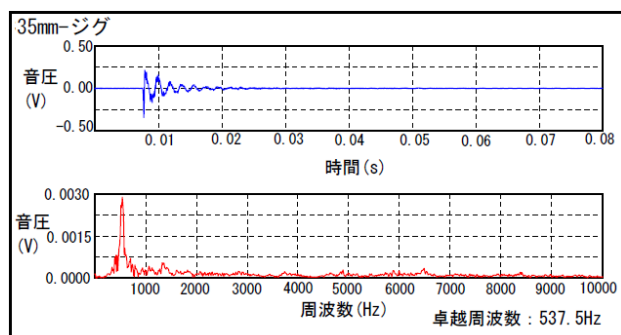
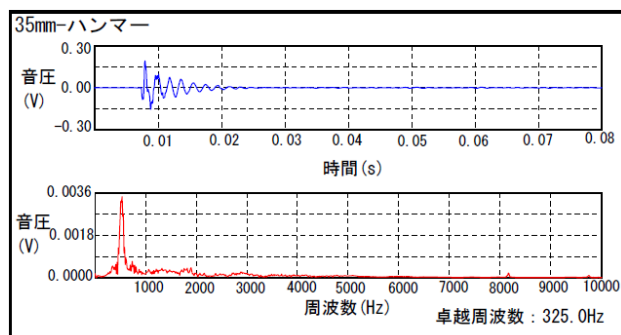


図-13-2 通常のハンマーとジグ設置したものとの比較
(深さ35mm)

5. まとめ

(1) 打音検査判定の定量化

テストハンマーで打撃した際に発生する音をマイクで集音し、得られたデータをフーリエ変換による周波数分析を行うことで、クラックが発生している箇所について定量的な評価が行えることを確認した。

打音の周波数分析で卓越周波数が1000Hz未満の箇所はクラックが存在することがわかった。また、2000Hz以上が健全部であること、50cm程度近傍にロックアンカーやボーリング跡等の設備がある場合には1000～2000Hzとなる傾向がつかめたが、今後の精度向上が望まれる箇所である。

(2) クラック深さと卓越周波数の関係性

クラック深さと卓越周波数の関係性について、比例関係にあることが想定され、適用性試験ではそれらに相関が見られた。また、実際の天井部で検査し、クラック有りと判定された箇所をボーリングにより確認したところ、概ね良好な関係性があることがつかめた。ただし、データ数が少ないため、定量的な評価についてはさらなるデータの蓄積が必要であり、今後の検討課題である。

(3) 高所における打音検査方法の開発

延長ジグの先端にバネ式のテストハンマーを取り付け、高さ11m程度まで適用可能な測定装置を製作した。ポールを延長することにより、さらに高い場所でも適用可能である。

通常のテストハンマーによるデータと比較検証し、通常のテストハンマーによる検査と同様な傾向となることをつかむことができた。

参考文献

- 1) 金森正樹, 飯坂武男, 菊川浩治, 梅原秀哲: コンクリートの打音による健全性の評価について, コンクリート工学年次論文集, pp.601-606, Vol.23, No.1, 2001.
- 2) 村田真一, 佐々木尚徳, 吉武勇, 進士正人, 中川浩二: トンネル覆工変状調査への回転打音検査器の適用性の検討, 第33回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, 2004年1月
- 3) 北川真也: コンクリート表層部の健全性診断, 建設の施工企画 2009年12月, 日本建設機械化協会

(2014.9.15 受付)

MENTENANCE METHOD OF SHOTCRETE USING HAMMERING TEST AND FREQUENCY ANALYSIS FOR LARGE SEGMENT SPACE

Ikuhiro KAI, Takumi KARASAWA and Naoto SUGISAKI

There are some cracks and small surface peelings on shotcrete of vaulted ceiling of underground power plant at excavated and aging, so a hammering test is implemented periodically.

Normally at the power plant, the vaulted ceiling can be tested by a tester on an overhead traveling crane which served as a scaffold. On the other hand, it is difficult to access the part which the crane cannot travel to, and it is impossible to hammer directly.

This report is how to evaluate quantitatively soundness of shotcrete and applicable when it is difficult to hammer directly ceiling of large section.