

III-17 大空洞掘削に伴う周辺岩盤の弾性波速度変化について

東京電力(株) 正 片野 正三
正 〇上條 実

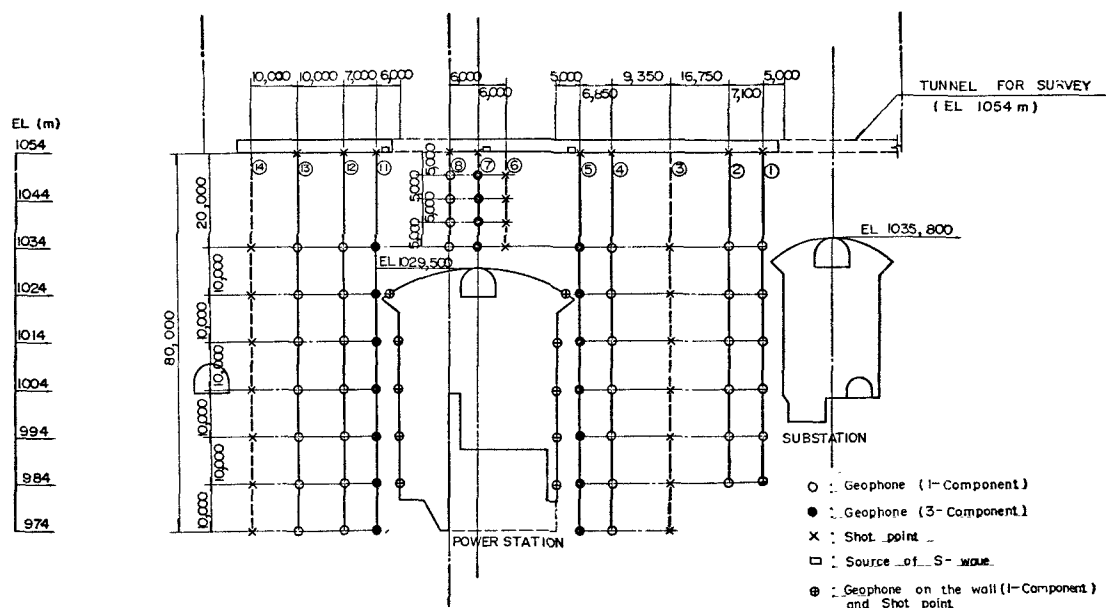
1. まえがき 近年、大規模な揚水地奥の開発が進められる中で、立地条件の制約ならびに自然環境に対する配慮から大地下構造物の建設が要請されることとなった。東京電力が高瀬川地奥で建設中の地下発電所は、高さ54.5m、巾27.0m、長さ165.0mの地下構造物で、これに主変室(高さ26.3m、巾20.0m、長さ109.0m)等の大型地下構造物が併設されることとなる。

このような大型地下空洞の掘削にあたっては、設計時の調査、試験はもとより、実施工時において掘削の進捗に伴う周辺岩盤の挙動を正確に把握することが設計の適正化を計るうえからも、施工安全を確保するうえからも重要である。計測の一部として掘削に伴う空洞周辺岩盤の弾性波速度分布およびその経時的変化の測定を試みた。本報告は発電所アーテ部掘削完了までの測定結果について中間発表するものである。

2. 測定方法

1). 発振実ならびに受振実の配置. 空洞周辺に設置した測定パターンは、図1, 2, に示すとおりであり、発電所空洞の上部25mに設置した調査坑より12孔($\phi = 760$ mm)のボーリング孔を設置し、孔内に発振実(3孔)29実、受振実(9孔)55実を空洞掘削に先行して設置した。受振計はGeospace社製(HS-JL 14%)で、ボーリング孔に挿入後、セメントミルクグラウチングにより固定し、発振実用ボーリング孔は起震爆破(雷管3本)による孔の破壊を防ぐと共に、岩盤への波の伝達効率を高めるため、鋼管を挿入し、管の外周をモルタルグラウチングにより入念に固定した。

図-1 発受振実配置図(断面図)



2). 記録方式. 記録方式は、記録増中部16チャンネル、再生増中部8チャンネルのテーブルコーダーを用いる方式を採用し(図-3)、録音時には波動信号14チャンネルとショットマーク信号2チャンネル、計16

チャンネルの録音を同時に行ない、モニター用記録（記録速度 $50 \sim 100 \text{ cm/sec}$ ）で確認して8チャンネルずつ2回に分けて再生する方法を採った。

この方式でテープレコーダーの録音速度を 100 cm/sec 、再生速度を 10 cm/sec とすることにより、入力波形は 1000 cm/sec でオシシログラフに記録されたこととなり、 0.01 m/sec までの記録分析を可能とした。実測定において、区間距離 10 m 、 $v_p = 5 \text{ km/sec}$ の場合、 $\Delta t = 2 \text{ m/sec}$ となるから、この 0.01 m/sec は 0.5% の誤差に相当するが、発振臭のショットマーク誤差、記録器の刻時線などの誤差を含めて測定時の誤差は 5% 程度と推定される。設置完了時におけるテスト結果はノイズレベルの最大が $1 \mu\text{V}$ 程度であり、すべての作業機械類の停止する休日においては $0.5 \mu\text{V}$ 程度に低下することが判明した。このことから原則として測定は休日を実施された。

図-2 発振振興配置図（平面図）

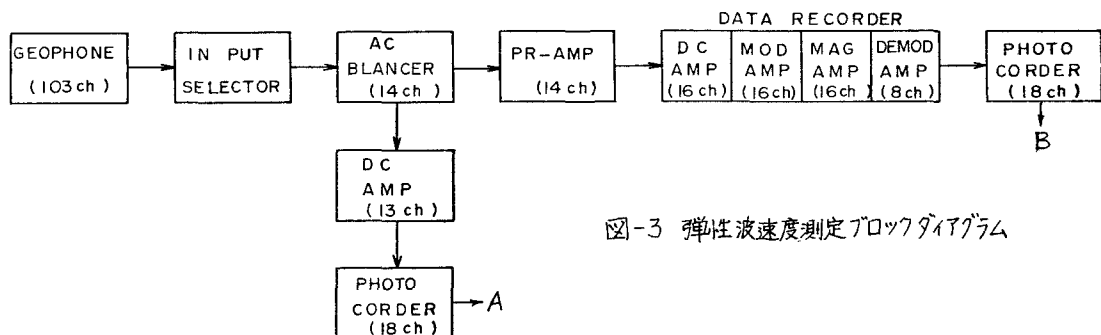
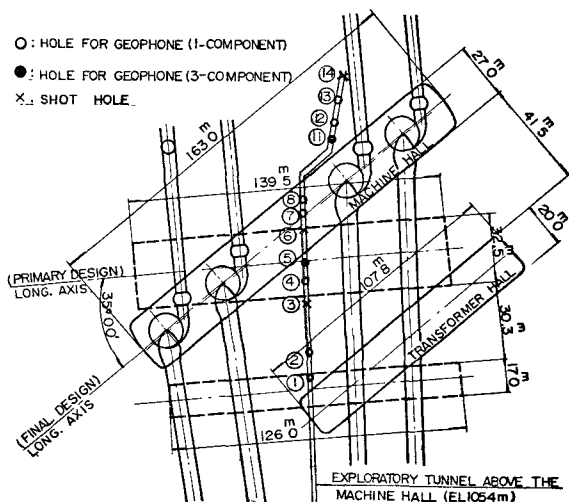


図-3 弾性波速度測定ブロックダイアグラム

3. 測定結果

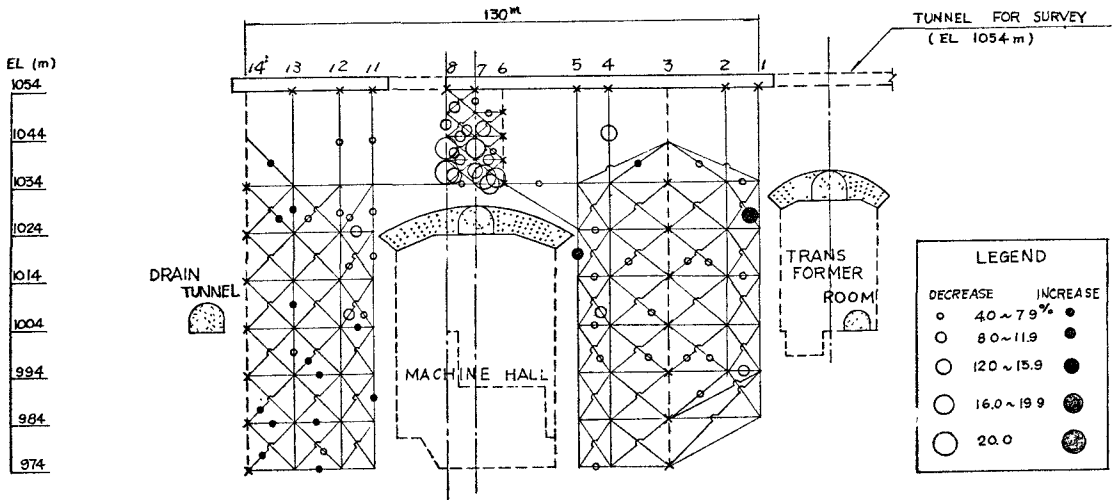
i). 測定断面の地質および初期速度分布, 測定断面の岩質は B~C4 級の花崗閃緑岩であり、R, Q, D. 値が $88\% \sim 68\%$ (平均 81%)、Joint Frequency が $2.2 \text{ JTS/FT} \sim 0.8 \text{ JTS/FT}$ (平均 1.6 JTS/FT) であり、透水試験結果は、 $0.03 \text{ ルジオン} \sim 6.38 \text{ ルジオン}$ (平均 0.45 ルジオン) を示す良好な岩盤である。

弾性波速度 (P波) の初期値測定は、地下発電所ならびに主変室の天井アーチ部中央にもおけた作業坑の掘削がほぼ完了した時点で行なわれ、その結果は、最大 5.4 km/sec 、最小 3.3 km/sec で大部分は $4.0 \sim 5.0 \text{ km/sec}$ の範囲を示した。

ii). アーチ部切詰め完了までの速度変化, 地下発電所天井アーチ部の切詰め掘削は、小区間ごとに中央作業坑より両アバット部へ、ロックボルト ($l = 5 \text{ m}$) ならびにコンクリート吹付 ($t = 8 \text{ cm}$) を実施しながら行なわれた。掘削およびコンクリートライニングは、昭和48年1月より開始され、同年11月完了した。この間の速度測定はほぼ1ヶ月の割合で実施された。

48年11月時々の初期値に対する v_p の変化率は図-4に示すとおりであり v_p の変化は天井アーチ上部とアーチアバット山側に現れ、天井アーチ上部で最大 30% 、アーチアバット山側で 10% 程度のいずれも明確な速度低下を示した。測定開始よりアーチ部掘削完了までの天井アーチ上部の鉛直方向 v_p の減少率 (No.7, No.8の平均) を図-5に示す。

図-4 弾性波速度 V_p の変化
 第9回測定(548.11.18)結果

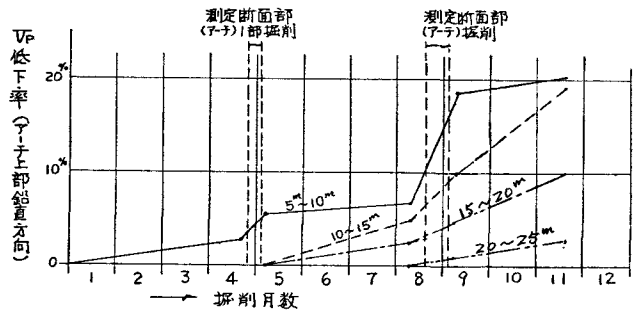


4 考察

i) 空洞掘削による応力変化との関係

測定結果より、天井アーチ上部における弾性波速度の減少は掘削空洞の法線方向である鉛直方向が最も顕著であり、空洞内壁から5~10m領域でほぼ20%, 15~20m領域で10%, 20m以上の領域では5%以下である。5~10m領域は速度の減が測定断面部の掘削の行なわれた4月および8月に集中

図-5 弾性波速度 V_p の変化 (NO.6~7~8)



して現れ、深部(10m以上)は減少の傾向が時間的にも緩和されているが、測定部分の掘削が完了した9月以後では10m以内の領域が比較的安定したのに対し、10~20m領域では減少が続いている。このことは、前記天井アーチ部の切詰め掘削過程におけるゆるみの発生ならびに応力再配分の経過を示すものである。一方天井アーチの接線方向に相当する水平方向は、 V_p の低下が鉛直方向の約1/2となっている。

ii) ジョイントシステムとの関係、発電所アーチ部のジョイントシステムは、 σ_1 卓越(K_1)が95/50で12%の集中を示し、平均ジョイント間隔は0.8mであり、 σ_2 卓越(K_2)が310/70で7%、平均ジョイント間隔が1.4mである。天井アーチ上部における弾性波測定ネットの斜方向測線は、 K_1 、 K_2 とほぼ直交するように設定されている。斜方向の測定結果は表-1に示すとおりであり、 V_p 速度減の比率は空洞内壁から5~10m領域では K_1 方向に若干卓越する程度で、 K_2 方向とはほぼ等しいが、深部領域では2以上となって10m以上の領域ではほとんど K_1 直交方向のみが速度減を示している。

この V_p 速度の減少は K_1 ジョイントの開口を意味しており、アーチライニング内に埋設した計器による覆工後の挙動と一致している。

iii) 岩盤の現地三軸圧縮試験結果 現地三軸圧縮

表-1 速度減(548.11時突 NO.6~7~8間平均)

空洞よりのかぶり	K_1 に直交方向	K_2 に直交方向	K_1/K_2
5~10m	18%	15%	1.3
10~15m	12%	4%	2~3
15~20m	8%		
20~25m	4%	0	—

試験は現地岩盤の変形特性を求めるため 天井アーチ上部 $EL 1054m$ の調査坑において $1.0m$ 立方体のブロック4個を切出し、実施された。荷重レベルは、水平方向(4面)がフラットジャッキを用い 150 kg/cm^2 、鉛直方向が 300 ton のピストンジャッキ4台を用い 120 kg/cm^2 とした。この試験では載荷レベルにおける荷重と弾性波速度との関連を求めるためブロックの対角線方向2箇所($約 70^\circ$)にボーリングを行ない、加速度型(上下動)および円筒型(水平動)の受振子を埋設し、発振ブロック表面よりの放電管による方法および受振子より超音波発振によるシステムを取り、弾性波の速度測定を実施した。

試験結果より、荷重レベル 150 kg/cm^2 への速度変化率は、比較的発達したジョイントを含む No.1 ブロックにおいて、13%、クローズしたジョイントを1~2本含む No.3、4ブロックにおいて7~9%、ジョイントを含まない No.2 ブロックで4%であった。弾性波速度と圧力の関係については、粒子相互間の接触面積の変化としてとらえた粒状媒質の実験式があり、次式で表現されている。 $V = \sqrt{V_0^2 + AP^\mu}$ (A : 常数, μ : 圧力依存指数)。三軸試験結果をかりに粒状媒質の式で整理すると、図6、7に示すとおり $V-P$ 、 $V-U$ の関係は各々の試験ブロックごとにはかなり良い相関を示している。いまアーチ部の初期地圧を 100 kg/cm^2 とし、これが完全に開放されたと仮定すると、三軸試験結果で求めた A 、 μ を使用し、既知の V_0 を代入して得られた V 値から速度低下率を求めると9~28%となった。これはオーダー的に実測値と一致するが、岩盤のジョイントを含む局所的特性によるバラツキが大きい。今回の試験結果を実岩盤の弾性波速度変化と応力、変位の関係として適用するには問題があり、周辺岩盤の変位測定等と併せ更に検討を進めることとしている。

図-6 $V-U$ の関係

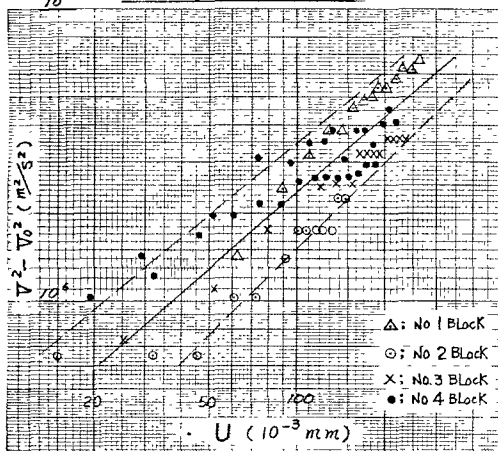
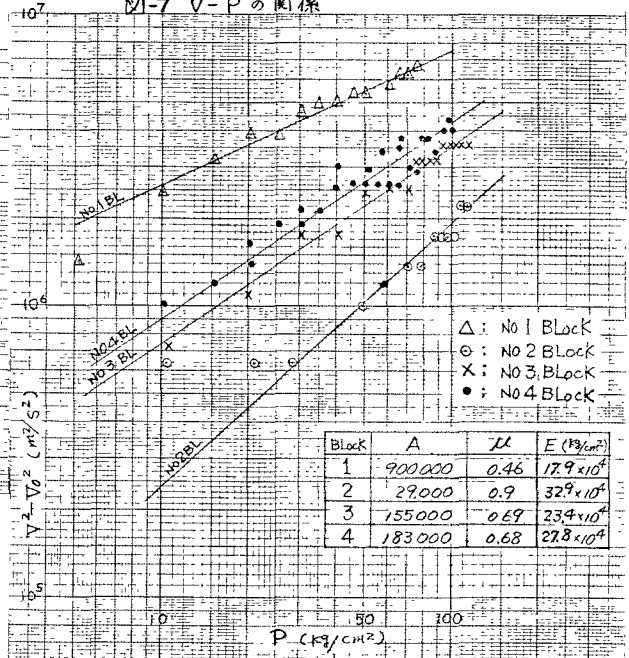


図-7 $V-P$ の関係



5. あとがき

掘削の進捗に伴う空洞周辺岩盤のゆるみ状態を弾性波速度の経時的測定によりとらえる事を試みた。測定結果はアーチ部掘削完了までの時点において、空洞天端で顕著な速度低下が検知され、空洞掘削に伴う応力再配分の状況ならびにジョイントの影響をかなり明らかに表わしており、空洞周辺岩盤の状態を検討するうえで有効な手がかりとなる事が判明した。

現社発電所本体の盤下げ掘削中であり、周辺岩盤の変位測定等と併せ、弾性波速度測定を継続することにより、弾性波速度そのものの特性を検討すると共に、空洞の開削による周辺岩盤の実態を解明していく予定である。

なお本計測は電力中央研究所地質研究室と協同で実施しているものであり、同研究室の鍋岡昭三室長、本荘静光、本島勲、中野辰裕の諸氏に深く感謝の意を表するものである。