

VI-152 トンネル発破による隣接地下発電所の振動特性について

(株)四電技術コンサルタント ○正会員 草薙悟志

同 上

山口 登

1. まえがき

稼働中の地下発電所に隣接した新設トンネルの施工に当たり、発破振動管理を行って、発電所建屋(RC造り5階建)や電気機器に障害を与えることなく掘削工事を完了することができた。ここでは、硬質岩盤(C_H ~ B級の黒色片岩 $V_p = 3 \sim 5 \text{ km/s}$)におけるトンネル発破振動特性の把握や発破振動と発電振動及び地震動との違いなどを中心に検討を行い、発電施設の発破振動に対する安全性を評価した。

2. 発破振動管理の方法

表-1 振動管理基準

測定値	措置および対策	測定間隔
振動速度 2 kine未満	施工継続	発破毎
振動速度 2 kine以上	施工中止→発破計画見直し→施工	

(1) 振動管理基準: コンクリートの引張強度($\sigma_c < 2.1 \text{ kgf/cm}^2$)から算定した許容振動速度(2.85kine)及び発電機試運転時の振動測定値(2.1kine)より、管理基準として表-1を設定した。また、電気機器に対する許容振動加速度を $0.3 \text{ G} = 294 \text{ gal}$ (メーカ保証値)とした。なお、管理に用いた発破振動式の係数は発破振動試験を行って決定した。

(2) 計測システムと受振点の特性: 発破点と受振点の位置を図-1に、計測システムを図-2に示す。受振点は、 M_1 ・ M_3 が基礎コンクリート($t=1.0\text{m}$)床面、 M_2 が側壁から張り出したH型鋼上面、 M_4 がフラットスラブ($t=0.8\text{m}$)床面、 M_5 がマスコンクリートに密着した鋼板側面に設置した。発破による振動は、岩盤→コンクリート→(鋼材)を経て受振点に到達するが、伝播経路の大部分は岩盤で、顕著な断層・破砕帯・湧水はない。

(3) 発破方法と振動軽減対策: トンネル掘削は、許容振動値に基づく施工計画から図-3の上部半断面(導坑先行)先進工法による制御発破を採用し、標準発破パターンを発破振動試験から次のように設定した。段数; DS雷管・最大20段、段当り薬量; 芯抜き4.5 kg・払い4.0 kg、ダイナマイト; 親ダイ2号梗・増しダイサンバックス梗、振動速度値; 芯抜き1.67 kine・払い1.54kine。また、岩盤の硬質化に伴う薬量及び振動値の増加に対処するため次の振動軽減対策を行い、その効果は波形と速度及び加速度の最大値から確認することができた。

① DS1段とDS2段雷管(0.25秒間隔で起爆)の間にMS雷管(0.05秒及び0.15秒で起爆)を追加し、DS1段の薬量をMS各段に分配してその延時差を利用する。

② 無装薬孔を配置して振動波形を分離する。

3. トンネル制御発破振動の特性と評価

(1) 計測結果: 発破振動や発電・揚水時の運転振動は、3成分速度計及び加速度計を用いて、各成分の最大値・波形・フーリエスペクトルを測定し、これら3成分を合成して最大速度及び最大加速度を算定した。全制御発破68回の薬量は $0.5 \sim 5 \text{ kg/段}$ 、発破点と受振点間の距離は $40 \sim 120 \text{ m}$ であり、振動速度 $0.02 \sim 1.35 \text{ kine}$ (合成値 $0.09 \sim 1.90 \text{ kine}$)、振動加速度 $7 \sim 245 \text{ gal}$ (合成値 $56 \sim 289 \text{ gal}$)が観測された。一方、運転振動(測定15回、出力 $180 \sim 300 \text{ MW}$)は振動速度 $0.02 \sim 0.38 \text{ kine}$ 、振動加速度 $22 \sim 215 \text{ gal}$ であった。

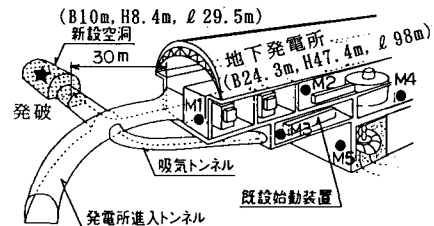


図-1 発破点及び受振点位置

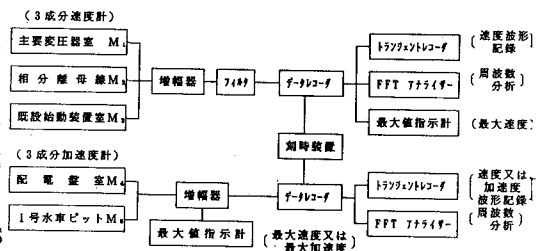


図-2 計測システム

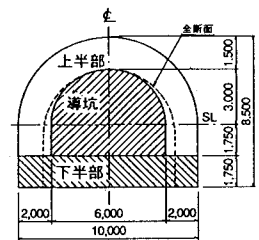


図-3 加背割図

(2) 発破振動の特性と運転振動, 地震動との比較: 発破振動, 運転振動, 地震動¹⁾の加速度波形とフーリエスペクトルを図-4に示す。当地点のトンネル発破の波形は, 各段発毎に減衰する瞬間的な振動であり, 継続・重畳した運転振動や連続した振動が数秒間持続する地震動とは大きく異なることがわかる。また, 発破振動の卓越周波数は平均315Hz(全発破の90%が150Hz以上)と高く, これは硬質岩盤・近距離発破の特徴と言える。一方, 運転振動は水圧脈動の2・3倍成分である80・120Hz(全測定の85%)が卓越し, 地震動の卓越周期は一般に数Hzである。これらのことから, 発破振動と運転振動や地震動との特性の違い(継続時間, 減衰性, 重畳性, 共振周波数等)が確認できた。

表-2 発破係数の比較

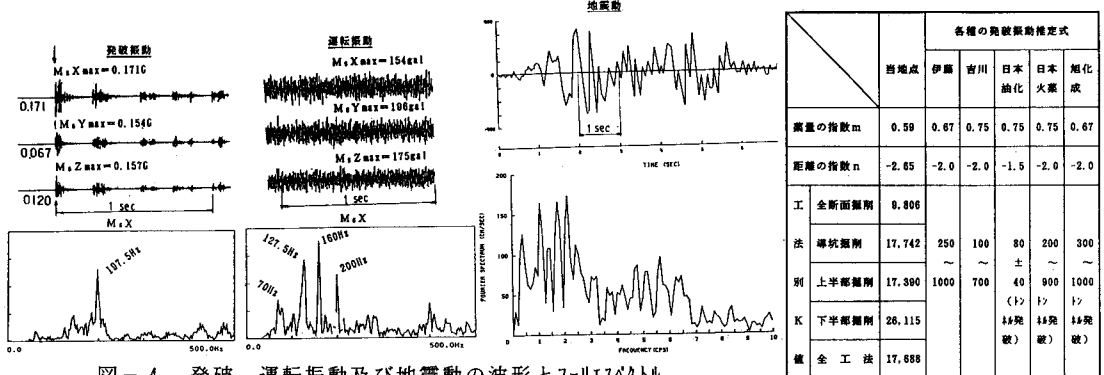


図-4 発破, 運転振動及び地震動の波形とフーリエスペクトル

(3) 発破振動式の検討と評価: 発破振動の一般式 $V = K \cdot W^m \cdot R^n$ において, 速度 V (kine), 薬量 W (kg), 距離 R (m) の実測値から, 発破常数 K , 薬量の指数 m , 距離の指数 n を多変量解析により求め, 当地点の発破振動式の係数として表-2を得た。速度と距離及び薬量の関係を図-5に示す。なお, 各種推定式の係数²⁾は表-2のとおりであり, 当地点では $|n|$ が大きいため K が各種推定式の係数よりも2桁程度大きくなっている。しかし設定した発破振動式の係数は, 薬量が3~5kg付近に集中して多少相関係数が低いものの, 次の理由により硬質岩盤・近距離発破の特徴が良く現れているものと考えられる。

① $|n| = 2$ は, 普通地盤(減衰が小さく $|n|$ は比較的小さい)や堅硬な岩盤(減衰が大きく $|n|$ は比較的大きい)など多種の地盤条件を包絡した値である。

② 当地点のような硬質で緻密な岩盤の近距離測定では, 表面波が主体で減衰が大きいため, $|n|$ は2よりも大きくなりその結果 K も当然大きくなる。

4. 発電施設の発破振動に対する安全性の評価

① 当地点のような継続時間が非常に短くかつ短周期成分の卓越した発破振動では, 地震動や運転振動のような基盤から上部への振動の増幅がほとんどなく, 今回の基盤における発破振動管理で十分建屋や電気機器の安全性が確認できた。

② 硬質岩盤・近距離発破の振動推定式では, 距離の指数 $|n|$ が大きく, このため発破常数 K が非常に大きくなるという特性が明らかになった。当工事では予め発破振動試験によってこの特色が把握できたため, 掘削工法の工夫や薬量の低減, MS雷管の採用等によって振動管理値をクリアすることができた。

[参考文献]

- 1) 地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会
- 2) 最新発破技術, 森北出版(株)

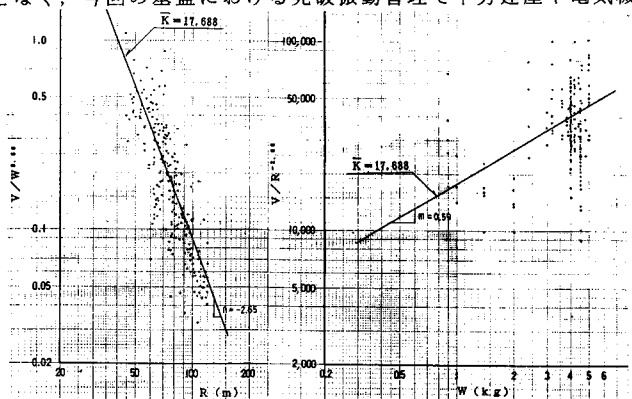


図-5 速度と距離及び薬量の関係