

大規模地下発電所の建設時における換気計画システム

正会員 東京電力(株)

伊藤 陣一

(株)構造計画研究所 ○ 半明 照三

1. 序

近年、揚水式大規模発電所は自然環境保全等の見地から地下に建設されることが多い。この場合、地下に発電所、変電所ならびに三次元的に複雑に交差する関連トンネル群を構築しなければならない。地下発電所の空洞やトンネル群の掘進中における作業環境は労働安全衛生の面からも重要であり、この適正化のためにはトンネル内の通気状況を事前に十分把握し、合理的な換気計画を立てる必要がある。しかし、地下発電所建設時におけるトンネルおよび空洞内換気は、その対象が施工の進展に伴って次第に大規模、複雑化し、また、坑内で稼働する重機車輛も多く、通気に影響を及ぼす要因も多岐にわたっているため、通気量等に関する定量的な数値を求めることは、かなりむずかしい。

今回、地下発電所建設時の各施工段階におけるトンネル網および発電所空洞の通気状況を模擬し、施工期間を通じての合理的な換気計画を立案、検討するための電算機システムを開発した。

2. 本システムの特徴

本システムの特徴として、次のような点があげられる。

① 通気網計算方式として、「節点エネルギー位法」を採用し、このとき導びかれる連立一次方程式を、「還元解法」により解いたこと。

② 通気に影響を及ぼす要因として、入排気口における風圧、および気流の分合流等による局部抵抗をも考慮したこと。

③ 通気網計算結果を用いて、通気網内でのガス、粉塵等の拡散状況を予測したこと。

④ 坑内の施工状況から、熱、ガス、粉塵等の発生量を算定し、上記の通気網計算およびガス拡散計算に反映させたこと。

⑤ 建設所現場の端末機利用というシステム運用上、データの保存ファイル化等により、演算ケース毎の入力データは極力簡素化したこと。

以下、これらの点についてその概要を説明する。

3. 通気網計算の基礎理論

a) 節点エネルギー位法による定式化

$$\begin{cases} H_i - H_j + R_{ij} + P_{rij} = (R_{ij} + \Delta R_{ij}) Q_{ij}^2 \\ \sum_{j=1}^n Q_{ij} = q_i \end{cases}$$

for all i, j ----- (1)

for all i ----- (2)

- i, j : 風道両端の節点番号
 H_i : 節点 i の圧力位 (エネルギー位) [Kg/m^2]
 q_i : 節点 i への風道網外からの流入風量 [m^3/s]
 R_{ij} : 節点 $i \rightarrow j$ への標高差による気圧差 [Kg/m^2]
 P_{rij} : 節点 $i \rightarrow j$ へと働く扇風機圧 [Kg/m^2]
 R_{ij} : 節点 i, j 間の壁面摩擦抵抗 [KgS^2/m^8]
 ΔR_{ij} : 節点 $i \rightarrow j$ への局部抵抗 [KgS^2/m^8]
 Q_{ij} : 節点 $i \rightarrow j$ への風量 [m^3/s]

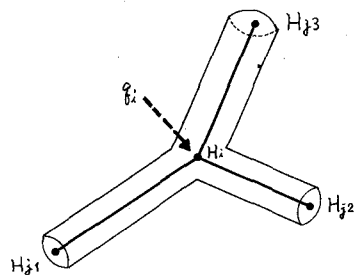


図-1 通気網計算の定式化

式(1)は、全ての風道で成立すべき圧力降下式であり、式の左辺は通気圧、右辺は圧力降下値となっている。
式(2)は、全ての節点(風道の接合点)で成立すべき風量の閉合条件式である。いま、式(1)を流れの方向を考慮してQについて解き、式(2)に代入すると、

$$\sum_{j \neq i} (R_{ij} + \Delta R_{ij})^{\frac{1}{2}} \cdot (H_i - H_j + R_{ij} + P_{ij}) \cdot |H_i - H_j + R_{ij} + P_{ij}|^{\frac{1}{2}} = q_i \quad \text{for all } i \quad (3)$$

ここで、 P_i , P_j , R , ΔR , q を与えたとしても、式(3)は節点の圧力位 H を未知数とした非線型の連立方程式となる。

b) 非線型の連立方程式の解法

ここでは、ニュートンの近似法による収束計算法を採った。つまり、 $H_i = h_i + \Delta H_i$ (h_i :仮定値, ΔH_i :補正值)とおき、式(3)から h_i を仮定した時補正值 ΔH_i を求める連立一次方程式

$$\sum_j a_{ij} \Delta H_j = b_i \quad \text{for all } i \quad (a, b \text{ 定数}) \quad (4)$$

を導き、これを解いて ΔH_i が求まれば、 $h_i + \Delta H_i$ を新たな仮定値として式(4)を立て直す。そして、 ΔH_i が十分小さくなるまでこれを繰返す、という解法である。なお、この連立一次方程式を解くにあたっては「還元解法」を用いたため、バンドマトリックス解法等で要求される節点番号付けに対する制約を無くすることができ、これによって、地下発電所の施工の進展に応じて通気網を修正して演算することが容易となっている。

4. 通気網計算の手順

式(3)の連立方程式を解くにあたって、定数とみなした P_i , P_j , R , ΔR は、実際には気流の温度、比重量、風量、風速および節点での分合流状況等により変るので、図-2のような幾重もの収束繰返し計算となっている。

5. 風圧

山の背の両側に入排気口がある場合、入排気口における風圧を無視できないことがある。このような入排気口については、標高差以外に、風速と風向から求められる風圧を考慮して、圧力位を既知の値として設定している。

6. 分合流等による局部抵抗

地下発電所の通気網のように、比較的短い風道が複雑に交差し、かつまた、トンネル、大空洞、風管といった断面積の非常に異なる風道が連結している場合は、気流の分合流とか断面積の急拡大、急縮小等による圧力損失を無視することができない。そこで、気流の分合流パターン毎に、断面積比とか風速比とかに関連させた局部抵抗係数を与えておくことにより、分合流等による局部抵抗 ΔR を計算している。

7. 坑内発生熱量

トンネルとか大空洞内で発生する熱は、気流の温度に影響を与え、通気量を左右することがある。坑内での施工状況として、作業員延作業時間[人/台]、延消費電力量[KWH/台]、延ダンプ通過台数[台/日]、延重機稼

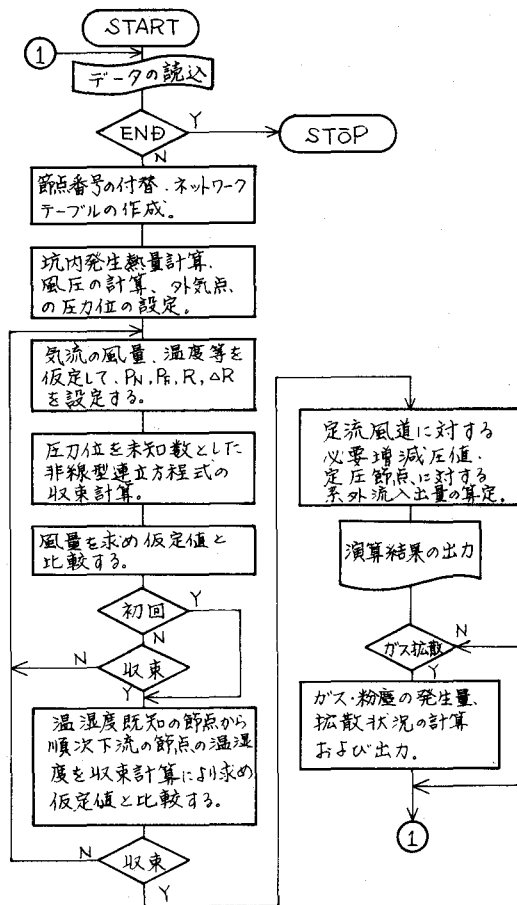


図-2 通気網計算の流れ図

動台数〔台H/台〕、コンクリート打設量〔 m^3 〕と打設後平均経過日数〔日〕等を入力データとして与え、それぞれの熱発生原単位と掛け合わせるにより、坑内発生熱量を求めている。

8. 風道網内のガス・粉塵等の拡散

地下発電所の建設時においては、坑内各所でガス・粉塵等が発生する。定常的な発生源としては、人体、ダンプ、重機があり、非定常的なものとして切羽での発破がある。これらの発生状況および拡散状況は、換気計画上最も留意しなければならない点である。

a) 定常的なガス発生と拡散

坑内での熱の発生と同様に、発生原単位による方法で、人体、ダンプ、重機から発生する CO_2 、 CO 、 NO_x および浮遊粉塵の定常的な発生量を求める。つぎに、通気網計算結果の風量と風向を用いて、上流の風道から順次下流の風道へと、各風道内気流のガス・粉塵の濃度を計算している。

b) 非定常的なガス発生と拡散

切羽における発破の後ガスとか浮遊粉塵は、高い濃度の汚染気流となって通気網内へ拡散してゆく。この拡散状況を、台形波と三角波によって近似されるパルスによって模擬した。図-3は、時刻 t_1 から t_2 において発生したガスの観測濃度の時間的推移を、ガス発生地点からの距離に従って示すものである。

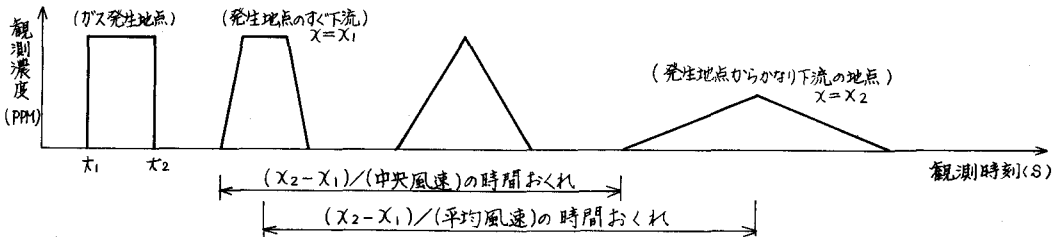


図-3 パルスに近似したガスの拡散状況

汚染気流の拡散の原因として、図-4に示すような風道断面内の風速の違いによるいわゆる縦拡散のみに注目した。一般に平均風速は中央風速の0.8倍位とされているが、この相違によって図-3のようにパルスの偏平化を行なう。

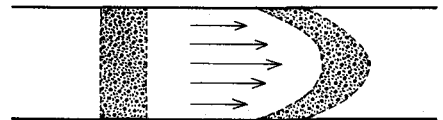


図-4 断面内風速の違いによるガス拡散

またパルスの偏平化は、気流の合流地点で汚染気流の希釈という形でも行なう。

このようなガス拡散の模擬手法により、ガス発生風道から順次下流の風道へと、パルス計算を進めて行くのであるが、通気網内のいくつかの場所で発生したパルスが、分流合流を繰返して行くことになるので、一地点で観測されるパルスは一つとは限らない。そこで、観測されるパルスは合成して、最大濃度とか、許容濃度以上となる時間帯などを算出している。

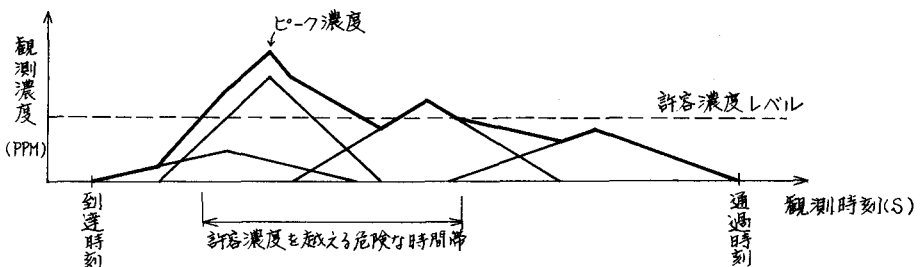


図-5 パルスの合成

9. 結び

このシステムは、①複雑な通気網についてもモデル化およびその修正が容易である、②収束計算における仮定値の入力を特に要しない、③風圧とか分合流による局部抵抗をも考慮している、④施工計画に近い形態のデータによって、坑内発熱量・発生ガス・粉塵量等が算出される、⑤通気網計算とガス拡散計算とを結び合せて、特定の施工状況と換気計画下での坑内作業環境が具体的に予測できる、等の優れた点を有している。一方、システムを構築するにあたっては、発電所大空洞を大断面の風道に分割して模擬したり、汚染気流のハルス近似など、かなり大胆なモデル化を行なっているうえ、計算時には多くの仮定データを使用しているので、今後は、計算結果と現実との検証を進めて行きたいと思っている。

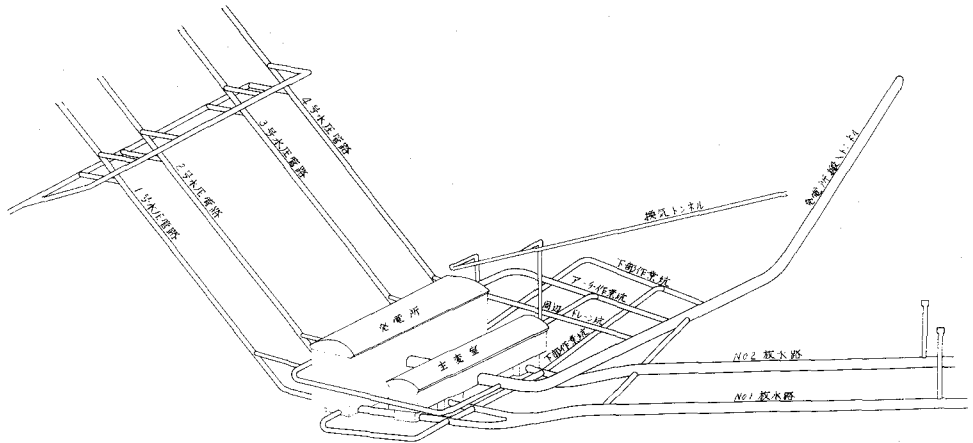


図-6 大規模地下発電所のトンネル網

- 参考文献 (1) 「配水管網流量計算法に関する研究(Ⅱ)」, 高桑哲男, 水道協会雑誌, NO. 422
(2) 「通気学」, 平松良雄, 内田老鶴圃新社, S49. 7