

東京電力(株) 正員 山崎 剛  
東京電力(株) 新津 強  
清水建設(株) 正員 河田 孝志

1. はじめに——都市域における電力通信、上下水道、地下鉄工事などでは、従来シールド工法が主流となつて施工されてきたが、近年NATMの急速な普及に伴い、都市域においてもシールド工法に代つてNATMの適用が試みられている。都市NATMは山岳NATMとは異なり、地表沈下、大気汚染、振動、騒音など周辺環境へ与える影響を十分配慮した施工が要求される。そのため、都市NATMでは環境保全のための諸対策を行なうと共に、安全性を確保する目的で圧気工法などの補助工法を併用する場合も少なくない。

東京電力では、東京都世田谷区の住宅密集地の道路下(土被り12~20m)において、第三紀固結シルト層を通過する延長約770m、掘削断面積8.3m<sup>2</sup>の超高圧地中送電線管路工事をNATMで施工したが、その一部区間は、圧気下におけるNATMの施工性ならびに地盤の挙動を調査する目的で圧気併用NATM(圧気圧0.3kgf/cm<sup>2</sup>、延長150m)を実施した。特に、吹付けコンクリート(乾式工法)については粉塵、はね返り、及び強度を把握するため実験計画法を用いて実験を実施した。本稿は、そのうち圧気下における吹付けコンクリートの粉塵特性についてまとめたものである。

2. 実験要因と水準——圧気下における吹付けコンクリートの特性を把握する目的で、4要因を選び、各要因を2水準に設定し、圧気の有無をブロック因子とする4元配置の実験を実施した。表-1に要因と水準を示す。

3. 実験結果——粉塵の評価方法として、一般に粉塵濃度(光散乱濃度、質量濃度)が採用されるが、本実験では坑内の換気量、吹付けコンクリート吐出量による影響を除外するために、以下に示す発塵強度を特性値として実験結果の解析を行なった。

$$W = \frac{C \cdot Q}{1000V} \quad \text{ここに、} W: \text{発塵強度 (g/m} \cdot \text{con)} \quad C: \text{粉塵濃度 (mg/m}^3\text{)} \\ Q: \text{換気量 (m}^3\text{/min)} \quad V: \text{吹付け能力 (m}^3 \cdot \text{con/min)}$$

ローボリウムサンブラで測定した質量濃度を上式によって発塵強度に換算した結果を表-2に示す。

表-1 実験要因と水準

| 要因                            | 水準                                                                                                            |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 圧気条件                          | 1 圧気<br>2 無圧気                                                                                                 |
| 水セメント比%                       | 1 24.0~45%<br>2 50~55%                                                                                        |
| 細骨材率%                         | 1 50%<br>2 60%                                                                                                |
| 粉塵低減剤セメント比%                   | 1 0.05%<br>2 0.1%                                                                                             |
| 単位セメント量 360 kg/m <sup>3</sup> |                                                                                                               |
| 使用材料                          | (ブロック因子)<br>セメント: 普通ポルトランドセメント (フサノセメント)<br>細骨材: 利根川産(粗粒率 2.70%<br>吸水率 2.18%)<br>粗骨材: 五日市産7号砕石<br>急結剤: シグニットL |

表-2 粉塵の質量濃度と発塵強度

| 実験地 | 要 因*     |      |                         |                         | 吸引<br>空気量<br>m <sup>3</sup> / | 総粉塵                     |                         | 吸入性粉塵 |       | 吸入性粉塵<br>g/m <sup>3</sup> ・concrete | 発塵強度<br>g/m <sup>3</sup> ・concrete |       | 切羽の<br>換気量<br>m <sup>3</sup> /min | コンクリート<br>吹付け<br>量<br>m <sup>3</sup> ・con/min |
|-----|----------|------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------|-------|-------------------------------------|------------------------------------|-------|-----------------------------------|-----------------------------------------------|
|     | 圧気W/CS/a | D/C  | 換気量<br>m <sup>3</sup> / | 濃度<br>mg/m <sup>3</sup> |                               | 換気量<br>m <sup>3</sup> / | 濃度<br>mg/m <sup>3</sup> | 総粉塵   | 吸入性粉塵 |                                     | 総粉塵                                | 吸入性粉塵 |                                   |                                               |
| P-1 | あり       | 46.0 | 50                      | 0.05                    | 0.104                         | 13.697                  | 131.70                  | 2.040 | 19.62 | 0.149                               | 269                                | 40    | 120**                             | 0.0587                                        |
| P-2 | あり       | 47.6 | 60                      | 0.05                    | 0.145                         | 13.331                  | 91.94                   | 1.750 | 12.07 | 0.131                               | 138                                | 18    | 91**                              | 0.0607                                        |
| P-3 | あり       | 53.2 | 50                      | 0.05                    | 0.178                         | 20.881                  | 117.31                  | 2.756 | 15.48 | 0.132                               | 217                                | 29    | 91                                | 0.0493                                        |
| P-4 | あり       | 50.0 | 60                      | 0.05                    | 0.142                         | 7.700                   | 54.23                   | 0.739 | 5.20  | 0.096                               | 120                                | 12    | 143**                             | 0.0645                                        |
| P-5 | あり       | 43.1 | 50                      | 0.1                     | 0.198                         | 10.506                  | 53.06                   | 0.712 | 3.60  | 0.068                               | 121                                | 8     | 143                               | 0.0628                                        |
| P-6 | あり       | 45.0 | 60                      | 0.1                     | 0.159                         | 9.567                   | 60.17                   | 1.241 | 7.81  | 0.130                               | 96                                 | 12    | 91                                | 0.0573                                        |
| P-7 | あり       | 51.4 | 50                      | 0.1                     | 0.151                         | 8.621                   | 57.09                   | 0.770 | 5.10  | 0.089                               | 88                                 | 8     | 91                                | 0.0593                                        |
| P-8 | あり       | 50.0 | 60                      | 0.1                     | 0.146                         | 10.537                  | 72.17                   | 1.158 | 7.90  | 0.109                               | 171                                | 19    | 143**                             | 0.0603                                        |
| N-1 | なし       | 37.0 | 50                      | 0.05                    | 0.206                         | 24.932                  | 121.03                  | 5.481 | 26.61 | 0.220                               | 326                                | 72    | 149                               | 0.0553                                        |
| N-2 | なし       | 42.2 | 60                      | 0.05                    | 0.300                         | 19.125                  | 63.75                   | 3.969 | 13.23 | 0.208                               | 70                                 | 14    | 64                                | 0.0585                                        |
| N-3 | なし       | 49.2 | 50                      | 0.05                    | 0.195                         | 21.825                  | 111.92                  | 4.493 | 23.04 | 0.206                               | 259                                | 53    | 130                               | 0.0562                                        |
| N-4 | なし       | 49.9 | 60                      | 0.05                    | 0.209                         | 25.579                  | 22.39                   | 6.975 | 33.37 | 0.273                               | 178                                | 48    | 85                                | 0.0585                                        |
| N-5 | なし       | 38.9 | 50                      | 0.1                     | 0.193                         | 12.484                  | 64.68                   | 2.627 | 13.61 | 0.210                               | 151                                | 32    | 126                               | 0.0540                                        |
| N-6 | なし       | 40.3 | 60                      | 0.1                     | 0.172                         | 9.108                   | 52.95                   | 1.372 | 7.98  | 0.151                               | 117                                | 18    | 128                               | 0.0580                                        |
| N-7 | なし       | 51.0 | 50                      | 0.1                     | 0.217                         | 8.556                   | 39.43                   | 1.310 | 6.04  | 0.153                               | 65                                 | 10    | 98                                | 0.0597                                        |
| N-8 | なし       | 50.6 | 60                      | 0.1                     | 0.166                         | 7.698                   | 46.37                   | 0.991 | 5.97  | 0.129                               | 82                                 | 11    | 100                               | 0.0563                                        |

4. 実験結果の解析——総粉塵と吸入性粉塵の発塵強度を、特性値として分散分析を行なった。その解析結果は以下のようにまとめられる。

① 総粉塵の発塵強度は表-3より圧気・無圧気による有意差は認められなかった。

② 吸入性粉塵の発塵強度は、表-4より危険率5%で有意であった。図-1に吸入性粉塵の発塵強度の95%信頼区間を示す。ただし、圧気・無圧気の場合はブロック因子であるため、積極的に効果があったと認められない。したがって、各々「実験の場」で発塵強度に影響する要因が存在していなければ、圧気条件によって有意差が認められたと考えてよい。以下に圧気・無圧気下の条件について考察する。

5. 考察——圧気により粉塵に与える要因と、一定と仮定した施工条件の有意差検定を実施し、圧気と粉塵の関係を考察する。

(1) 圧気条件で異なる要因

相対湿度：圧気による補正を行なった後の相対湿度は、圧気ありの場合で、91%、圧気無しの場合で、92%と差が認められない。

粉塵の沈降速度：粉塵の沈降速度は、粒子と空気との密度差に比例する。空気の密度は、20℃、1atmで $1.293 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ 、0.3kgf/cm<sup>2</sup>の圧気下では、 $1.669 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ となり差はほとんどない。

(2) 一定と仮定した施工条件の有意差検定について

実験では要因として採用しなかったが、粉塵に関係すると考えられる要因とそのデータの平均値及び有意差検定結果を表-5に示す。

吹付け機の吐出圧力：吐出圧力が大きくなると粉塵量は増大することが知られており、今回の実験も吐出圧力の影響が大きいと考えられる。

急結剤セメント比：急結剤セメント比が大きくなると硬化が早くなる。硬化はセメント粒子が水と反応して骨材と一体となることであるから、吸入性粉塵の原因となる微小粒子は減少する。今回の実験も急結剤セメント比の影響が大きいと考えられる。

6. おわりに——圧気圧0.3kgf/cm<sup>2</sup>において、吹付けコンクリートの粉塵特性は、

① 圧気下における吹付けコンクリートの施工には何ら支障をきたすものでない。

② 圧気下における吸入性粉塵の発生が少ないとの結果が得られたが、検討したところ、圧気条件ではなく、他の施工条件によるものと推察された。

今後、施工実験、基本的実験を実施することによって、圧気下における吹付けコンクリートの粉塵特性を明らかにしていきたいと考えている。

表-3 総粉塵の発塵強度を特性値とした分散分析

| 要因                  | f  | S       | V            | F <sub>0</sub> | S'    | P(%)  |
|---------------------|----|---------|--------------|----------------|-------|-------|
| P: 圧気条件<br>(ブロック因子) | 1  | 49°     | —            | —              | —     | —     |
| A: 水セメント比           | 1  | 729°    | —            | —              | —     | —     |
| B: 細骨材率             | 1  | 17161   | 17161        | 15.2*          | 16030 | 17.7  |
| C: 粉塵低減剤<br>セメント比   | 1  | 29412   | 29412        | 26.0*          | 28281 | 31.3  |
| A X B               | 1  | 8464    | 8464         | 7.5*           | 7333  | 8.0   |
| A X C               | 1  | 157°    | —            | —              | —     | —     |
| B X C               | 1  | 22953   | 22953        | 20.3*          | 21822 | 24.1  |
| A X B X C           | 1  | 155°    | —            | —              | —     | —     |
| e                   | 7  | 11347°  | —            | —              | —     | —     |
| (e)                 | 11 | (12437) | (1131)       | —              | 16961 | 18.8  |
|                     | 15 | 90427   | —            | —              | 90427 | 100.0 |
| F(0.01)=9.65        |    |         | F(0.05)=4.84 |                |       | ○印ゲール |

表-4 吸入性粉塵の発塵強度を特性値とした分散分析

| 要因                  | f  | S      | V            | F <sub>0</sub> | S'   | P(%)  |
|---------------------|----|--------|--------------|----------------|------|-------|
| P: 圧気条件<br>(ブロック因子) | 1  | 784    | 784          | 6.8*           | 669  | 12.4  |
| A: 水セメント比           | 1  | 36°    | —            | —              | —    | —     |
| B: 細骨材率             | 1  | 625    | 625          | 5.4*           | 510  | 9.4   |
| C: 粉塵低減剤<br>セメント比   | 1  | 1764   | 1764         | 15.3*          | 1649 | 30.5  |
| A X B               | 1  | 400    | 400          | 3.5            | 285  | 5.3   |
| A X C               | 1  | 25°    | —            | —              | —    | —     |
| B X C               | 1  | 676    | 676          | 5.9*           | 561  | 10.4  |
| A X B X C           | 1  | 81°    | —            | —              | —    | —     |
| e                   | 7  | 1012   | —            | —              | —    | —     |
| (e)                 | 10 | (1154) | (115)        | —              | 1729 | 32.0  |
|                     | 15 | 5403   | —            | —              | 5403 | 100.0 |
| F(0.01)=10.04       |    |        | F(0.05)=4.96 |                |      | ○印ゲール |

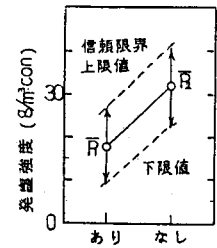


図-1 吸入性粉塵の発塵強度に対する要因効果の推定

表-5 施工条件の検定

| 圧気条件      | 細骨材<br>表面水率 | 吹付け機<br>吐出圧力            | 混練から<br>吹付けまでの<br>時間 | 急結剤<br>セメント<br>比        |
|-----------|-------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|
| あり        | 4.7%        | 1.8kg/cm <sup>2</sup>   | 33分                  | 6.2%                    |
| なし        | 4.6%        | 2.1kg/cm <sup>2</sup>   | 39分                  | 4.8%                    |
| 有意差<br>判定 | なし          | 危険率<br>1%で<br>有意差<br>あり | なし                   | 危険率<br>5%で<br>有意差<br>あり |