

## 参—2 換気量について

ずり出し方式により換気量が影響をどの程度受けるかを検討するために影響要素による換気量を試算する。

これにより、換気量が何に支配されているかを調べる。

### 1) 換気量算出の検討項目

山岳トンネル工事における換気量については、一般に以下の項目について検討する。

- 1) 自然発生ガス、酸素欠乏空気に対する換気量
- 2) 発破の後ガス及び発生粉じんに対する換気量
- 3) ディーゼル機関に対する換気量
- 4) 吹付けコンクリート施工時の換気量
- 5) 作業員の呼気に対する換気量
- 6) 坑内風速
- 7) 温熱対策としての換気量
- 8) 有害物質が重複している場合

ここでは特殊条件下の場合は除いて、2)～6)について検討する。

### 2) 発破の後ガス及び発生粉じんに対する換気量

発破に関する後ガス及び発生粉じんの対策としての所要換気量は次式で示される。

$$Q_2 = \max(Q_{2a}, Q_{2b})$$

$Q_2$  : 所要換気量  $\text{m}^3/\text{min}$

$Q_{2a}$  : 後ガスに対する所要換気量  $\text{m}^3/\text{min}$

$Q_{2b}$  : 発破粉じんに対する所要換気量  $\text{m}^3/\text{min}$

$$Q_{2a} = K \cdot \frac{V}{\alpha \cdot t}$$

$Q_{2a}$  : 所要換気量  $\text{m}^3/\text{min}$

$K$  : 換気係数 0.4 (排気方式)

$V$  : 1発破による有害物質の発生量  $\text{m}^3$

有害物質の発生量

$$V = A_T \cdot \Delta l \cdot \beta \cdot X$$

$A_T$  : トンネル掘削断面積  $\text{m}^2$

$\Delta l$  : 1発破の掘進長  $\text{m}$

$\beta$  : 地山  $1\text{m}^3$  に対する火薬使用量  $\text{kg}/\text{m}^3$

$X$  : 火薬  $1\text{kg}$  により発生する有害物質量  $\text{m}^3/\text{kg}$

表1 発破後ガスの標準発生量(m<sup>3</sup>/火薬 1kg)

爆薬の種類	有害ガス発生量	
	一酸化炭素 (CO) (m <sup>3</sup> /kg)	窒素酸化物 (NO <sub>x</sub> ) (m <sup>3</sup> /kg)
2号榎ダイナマイト	8×10 <sup>-3</sup>	1.5×10 <sup>-3</sup>
含水爆薬	5×10 <sup>-3</sup>	1.5×10 <sup>-3</sup>
その他ダイナマイト	11×10 <sup>-3</sup>	2.5×10 <sup>-3</sup>
AN-FO	30×10 <sup>-3</sup>	20.0×10 <sup>-3</sup>

\* 爆薬が1種類で、許容濃度をCO：50ppm、NO<sub>x</sub>：25ppmとすると、網掛け部が換気対象の有害ガスとなる。

$\alpha$ ：換気対象有害ガスの管理目標濃度 (CO：50ppm、NO<sub>x</sub>：25ppm)

$t$ ：所要換気時間 15min

$$Q_{2b} = K \cdot \frac{S}{E \cdot t}$$

$Q_{2b}$ ：所要換気量 m<sup>3</sup>/min

$K$ ：換気係数 0.4

$S$ ：1発破による粉じんの発生量 mg  
粉じんの発生量

$$S = A_T \cdot \Delta l \cdot \beta \cdot X'$$

$A_T$ ：トンネル掘削断面積 m<sup>2</sup>

$\Delta l$ ：1発破の掘進長 m

$\beta$ ：地山1m<sup>3</sup>に対する火薬使用量 kg/m<sup>3</sup>

$X'$ ：火薬1kgにより発生する粉じん量 2000 mg/kg

$E$ ：粉じんの管理目標濃度 (3 mg/m<sup>3</sup>)

$t$ ：所要換気時間 15min

なお、通常の火薬の使用量割合は、2号榎 7%  
含水爆薬 88%  
ANFO 5%

であるが、ここでは含水爆薬と増しダイにAN-FOを使用した場合を対象とする。

以下に、標準的なトンネルにおける換気量の計算を示す。

表 2 発破の後ガス及び発生粉じんに対する換気量

区分	火薬の種類			含水爆薬				含水爆薬(親ダイ) + AN-FO爆薬(増ダイ)			
	地山区分	記号	単位	B	C I	C II	D	B	C I	C II	D
条件	工法			全断面	補助ベンチ	補助ベンチ	上半	全断面	補助ベンチ	補助ベンチ	上半
	1 発破の掘進長	$\Delta L$	m	2.0	1.5	1.2	1.0	2.0	1.5	1.2	1.0
	掘削断面積	A	m <sup>2</sup>	90	90	90	50	90	90	90	50
	換気係数	K		0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	換気時間	t	min	15	15	15	15	15	15	15	15
	地山1m <sup>3</sup> 当り火薬量(含水)	$\beta e$	kg/m <sup>3</sup>	1.0	0.8	0.8	0.6	0.2	0.2	0.2	0.2
	地山1m <sup>3</sup> 当り火薬量(AN-FO)	$\beta a$	kg/m <sup>3</sup>	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.8	0.8	0.6
	使用火薬量(含水)		kg	180.0	108.0	86.4	30.0	36.0	27.0	21.6	10.0
使用火薬量(AN-FO)		kg	0.0	0.0	0.0	0.0	180.0	108.0	86.4	30.0	
後ガス	有害物質(CO)発生量	V <sub>c</sub>	10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>	900	540	432	150	5,580	3,375	2,700	950
	有害物質(NO <sub>x</sub> )発生量	V <sub>n</sub>	10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>	270	162	130	45	3,654	2,201	1,760	615
	有害物質(CO)に対する所要換気量	Q <sub>2ac</sub>	m <sup>3</sup> /min	480	288	230	80	2,976	1,800	1,440	507
	有害物質(NO <sub>x</sub> )に対する所要換気量	Q <sub>2an</sub>	m <sup>3</sup> /min	288	173	138	48	3,898	2,347	1,878	656
粉じん	火薬1kgによる発生粉じん量	X'	mg/kg	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
	粉じんの管理目標濃度	E	mg/m <sup>3</sup>	3	3	3	3	3	3	3	3
	粉じん発生量	S	mg	360,000	216,000	172,800	60,000	432,000	270,000	216,000	80,000
	発生粉じんに対する所要換気量	Q <sub>2b</sub>	m <sup>3</sup> /min	3,200	1,920	1,536	533	3,840	2,400	1,920	711
総合	所要換気量	Q <sub>2</sub>	m <sup>3</sup> /min	3,200	1,920	1,536	533	3,898	2,400	1,920	711

### 3) ディーゼル機関に対する換気量

ディーゼル機関に対する換気量は次式で示される。

$$Q_3 = (H_S \cdot q_S \cdot \alpha_S) + (H_D \cdot q_D \cdot \alpha_D) + (H_E \cdot q_E \cdot \alpha_E)$$

$Q_3$ : 所要換気量  $\text{m}^3/\text{min}$

$H_S$ : ショベル系の総出力 kW

$H_D$ : ダンプ系の総出力 kW

$H_E$ : その他機械の総出力 kW

$q_S$ : ショベル系の出力当りの換気量  $\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{kW})$

$q_D$ : ダンプ系の出力当りの換気量  $\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{kW})$

$q_E$ : その他の機械の出力当りの換気量  $\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{kW})$

$\alpha_S$ : ショベル系の負荷率

$\alpha_D$ : ダンプ系の負荷率

$\alpha_E$ : その他の機械の負荷率

表 3 所要換気量と負荷率

ディーゼル機関搭載機械の種別	実出力当たり換気量 $q$ ( $\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{kW})$ )				負荷率 $\alpha$
	排出ガス対策型建設機械		道路運送車両法 排出ガス規制適合車		
	第1次基準値 適合車	第2次基準値 適合車	H9年	H15年	
ショベル系	4.9	3.2	—	3.2	0.5
ダンプ系 (坑内用)	4.9	3.2	—	3.2	0.25
ダンプ系 (普通)	4.9	3.2	2.4	1.8	0.2
その他機械	4.9	3.2	2.4	1.8	0.2

#### ずり出し使用機械組み合わせ

ずり積み機 ホイールローダ 山積み 3.0m<sup>3</sup> 1台 (193kW (262PS) )

ずり運搬 ダンプトラック 20t 4台 (170kW (231PS) )

#### 換気計算仮定

機械組合せは上記の組合せとする。その他機械は計算には考慮しない。

出力当たりの換気量の算出は排出ガス対策型の値を採用

#### 計算結果

1次基準値採用の場合  $Q_3 = (193 \times 4.9 \times 0.5) + (170 \times 4 \times 4.9 \times 0.25) = 1306 \text{ m}^3/\text{min}$

2次基準値採用の場合  $Q_3 = (193 \times 3.2 \times 0.5) + (170 \times 4 \times 3.2 \times 0.25) = 853 \text{ m}^3/\text{min}$

#### 4) 吹付けコンクリート施工時の換気量

吹付けコンクリートの粉じんを対象とした換気量については発生粉じん量が不明確なため理論値はない。現在あるのは平成 14 年ずい道等建設工事における換気技術指針である。

これは工事現場で得られた粉じん濃度の測定値と切羽換気量より推定した粉じん発生量から算出したものである。掘削断面積から求めるようになっている。

$$Fo = \alpha(90 \cdot A_T)$$

$$Q_{4a} = \frac{Fo}{Ga}$$

$Q_{4a}$ : 所要換気量  $\text{m}^3/\text{min}$

$Fo$ : 吹付け作業時の粉じん発生量  $\text{mg}/\text{min}$

90: 定数  $\text{mg}/\text{min}/\text{m}^2$

$A_T$ : トンネル掘削断面積  $\text{m}^2$

$Ga$ : 管理目標濃度  $3.0 \text{ mg}/\text{m}^3$

$\alpha$ : 粉じん発生量低減対策により低減効果係数 ( $\alpha = 0.5 \sim 1.0$ : 粉じんが発生する状態が吹付けコンクリートの施工条件、コンクリートの配合、粉じん抑制剤による効果などによって大きく異なることから諸条件をみて設定する)

例:  $\alpha = 1.0$  … 粉じん抑制剤の使用等の特別な発生源対策を行わない。

$\alpha = 0.75$  … 粉じん抑制剤の使用等の特別な発生源対策を行った場合。

$\alpha = 0.5$  … 粉じん抑制剤の使用等の特別な発生源対策を十分に行った場合。

粉じん抑制剤を使用するとして、低減効果係数を 1.0 で計算すると

$$Fo = 1.0 \times (90 \times 90) = 8100 \text{ mg}/\text{m}^3$$

$$Q_{4a} = \frac{8100}{3} = 2700 \text{ m}^3/\text{min}$$

となる。

#### 5) 作業員に対する換気量

人間の必要酸素量から計算すると 1 人当り約 30L/min 程度の空気量が必要になる。

一方排気中の  $\text{CO}_2$  濃度から必要な空気量は約 300L/min 程度である。この値は他の換気量計算からすると非常に小さく無視できるぐらいの値である。これをもとに換気すると値がちいさすぎて坑内風速がほとんどない状態になる。そこで換気計算の上では 1 人あたりの所要換気量を  $3\text{m}^3/\text{min}$  としている。

$$Q_p = G \times N$$

$Q_p$ : 所要換気量  $\text{m}^3/\text{min}$

$G$ : 作業員 1 人当り所要量  $3.0\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{人})$

$N$ : 坑内作業員数 20 人

$$Q_p = 3 \times 20 = 60 \text{ m}^3/\text{min}$$

坑内作業員数を 20 人としても、小さい換気量である。

## 6) 坑内風速

坑内を風が動いているために必要な風速として一般には 0.3m/sec 必要と言われている。  
これを適用すると、

$$0.3 \times 60 \times 90 = 1620 \text{ m}^3/\text{min}$$

程度の換気量になる。

## 7) まとめ

算出した換気量をまとめると、以下の通りである。

表 4 所要換気量のまとめ

対象	条件	必要換気量 $\text{m}^3/\text{min}$	備考
発破後ガス	90 $\text{m}^2$ 、B地山、含水爆薬	480	換気15分
	AN-FO使用時	3,898	換気15分
発破粉じん	粉じん管理目標濃度 $3\text{mg}/\text{m}^3$	3,200	換気15分
ディーゼル機関	ずり出し時	1,306	第1次基準値
	ずり出し時	853	第2次基準値
吹付けコンクリート粉じん	粉じん管理目標濃度 $3\text{mg}/\text{m}^3$	2,700	
呼気	坑内作業員数20人	60	
坑内風速より	0.3m/sec確保	1,620	

- 注1) 発破の後ガスは AN-FO を使用すると大幅に増える。全断面で B 地山、1 発破進行長 2m の場合 約 8 倍の 3,898 $\text{m}^3$  に増える。但し、C 地山では例え AN-FO を使用しても 1,920  $\text{m}^3$  である。発破粉じんに対しては、大きな値であり、発破後の換気時間を長くとる必要がある。
- 注2) ディーゼル機関に関しては、現状では大きな値ではない。なお上表の値はずり出し機械のみを対象とし、他の機械（例えば覆工、その他資材運搬等）については計算から外している。しかしながら、いずれ 2 次基準値対応になるにしたがって更に小さい値になる。
- 注3) 吹付けコンクリートの値がやや大きい。粉じん抑制剤の効果を最大限見込めばこの半分にはなる。ただし最近坑内環境の基準値がさらに厳しくなることが予想される。したがって最終的には上表の値より大きな換気量になる。

過去の山岳トンネルではずり出しはレール工法が主体であり、積み込み機もエア式だったため、換気の対象は発破の後ガスであった。その後タイヤ工法が普及するにつれディーゼルエンジンの排気ガスが問題になるようになった。さらに NATM の普及で吹付けコンクリートにより発生する粉じんが問題になってきた。最近ではじん肺問題の解決のためにも作業環境が厳しくなり、換気量の決定要因としてはほとんどが粉じん対象になってきている。

上記の計算結果はそれを裏付けている。

また、最近の現場における換気量は従来に比較すると数倍になっている。風管についても従来は最大径 1000mm 程度であったものが、最近では 1600mm 程度のものが多くなっている。

工法に大きな変化が無く、環境改善を考えれば換気量はさらに大きくなるだろう。今後も工法と坑内環境の改善は解決すべき大きなテーマである。