

長大スラブ軌道トンネルに適した緩衝工開口部の設計指針

環境工学研究部 空気力学
研究員 宮地徳蔵

1. はじめに

高速鉄道における沿線環境問題の一つであるトンネル微気圧波⁽¹⁾は、列車のトンネル突入によって生じた圧縮波がトンネル内を伝播し、トンネル出口に到達したとき、出口から外部に放射されるパルス状の圧力波である。微気圧波の大きさはトンネル出口に到達した圧縮波の圧力勾配最大値にほぼ比例する。スラブ軌道トンネル（以後、本報ではトンネルとはスラブ軌道トンネルを指す）の場合には、トンネル内圧縮波の波面は、伝播する過程で非線形効果により切り立つため、一般的には、微気圧波はトンネルが長くなるほど大きくなる。伝播過程における圧縮波面の切り立ち方は、トンネル入口における圧縮波の波形（以後、“入口波形”とよぶ）の圧力勾配最大値に強く依存し、入口波形の圧力勾配が小さい場合は切り立ち方が小さいが、大きくなるに従って切り立ち方が急激に大きくなる。

微気圧波対策は、(a)圧縮波の発生、(b)圧縮波の伝播、(c)微気圧波の放射、の三つの段階に分かれるが、(a)に対する対策、すなわち入口対策が有効である。これまで入口対策では、トンネル入口での圧力勾配最大値を与えられた条件下で最小にすることを第一目標としてきた。しかし、最近の知見から、より効率的な入口対策の検討においては、入口波形の圧力勾配に加えて、入口波形の形状も重要な指標となる場合があることがわかってきた。本報告は、長大スラブ軌道トンネルにおいて、圧縮波の伝播過程を考慮した場合と考慮しない場合の最適な緩衝工の効果を数値シミュレーションにより調べた結果に関するもので、「長大トンネルでは、与えられた緩衝工の条件下で入口波形の圧力勾配最大値を最も小さくする開口部が、必ずしも出口微気圧波に対する最適な入口対策ではないこと」を示し、開口部設計に新たな知見を与えるものである。

2. シミュレーションの条件

入口対策としてトンネル緩衝工（図 1）を考える。通常緩衝工側面には開口部が設けられており、この開口部の大きさや位置、数、突入する列車先頭部、速度などが緩衝工の効率⁽²⁾に影響する。

ここでは、列車・緩衝工の基本諸元を固定し、「微気圧波が最も小さくなる開口部パターン」を探索する最適化問題を考える。あるトンネル長さ x で発生する微気圧波について最適化された開口部パターンを $OWP(x)$ とすると、これはトンネル長さ x によって最適開口部パターンが変化することを示す。上述のように、従来多くの緩衝工において $OWP(0)$ （短いトンネルでの最適開口部）を設計指針としている。

ここで用いる列車・緩衝工の条件を表 1 に示す。図 2 に緩衝工開口部の窓の配置条件を示す。ここでは、トンネルに対して偏心して突入する列車からみて遠隔側の緩衝工側面にのみ開口部を設



図 1 トンネル緩衝工

表 1 列車突入に関するシミュレーションの条件

緩衝工	緩衝工・トンネル断面積比	1.4
	長さ(m)	20.0
車両	列車・トンネル断面積比	0.16
	先頭部長さと 車両等価半径の比	3.3
	速度 (km/h)	300

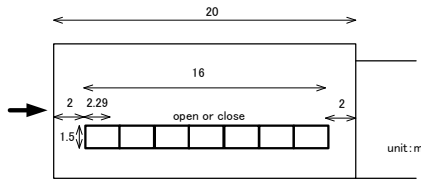


図 2 窓の配置 (遠隔側)

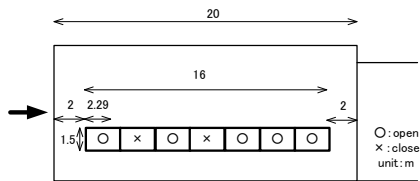


図 3 開口部パターン “1010111”

与えられた条件下での入口波形は Howe ら⁽³⁾の手法により計算した。得られた入口波形を初期波形として、文献⁽⁴⁾の手法を用いてトンネル出口の波形を計算した。トンネルは標準スラブ軌道トンネルとし、器材坑を 500 m 毎に配置した。

3. 計算結果

計算結果を図 4～図 8 に示す。得られた最適開口部を表 2 に示す。図 4 は入口勾配波形の計算例である。列車突入による入口波形の圧力上昇量 Δp は、列車とトンネル側面の摩擦の影響を無視すれば、開口部パターンに依存しない。このことから、 $OWP(0)$ による入口勾配波形は、図 4 中 $WP = 1111001$ のような圧力勾配一定区間を持つ台形型である。

図 5 は 20 m 緩衝工を設置した場合の 1 km 毎の出口圧力勾配最大値である。緩衝工なし、および $OWP(0)$ の計算結果は、同じ初期波形の圧力勾配最大

値の変化を示しているが、

$OWP(x)$ の計算結果は距離

ごとに初期波形が異なることに注意する必要がある。図 5 より微気圧波の大きさは、 $OWP(0)$ による対策（従来の考え方）では緩衝工がない場合に比べて、短いトンネルで約 50%、4 km 程度のトンネルでは約 25%になる。4 km 以上のトンネルでは $OWP(0)$ と $OWP(x)$ による微気圧波に差がみられる。例えば 20 m 緩衝工が 8 km のトンネルに設置されている場合、 $OWP(x)$ とすると、従来の考え方で設計した最適開口部 ($OWP(0)$) の場合に対して微気圧波の大きさは約 60%に低減することがわかる。

表 2 最適開口部

x (km)	20m hood
0	1111001
1	1111001
2	0111001
3	0010101
4	0100011
5	0100011
6	0100011
7	0000011
8	0000011
9	0000011
10	0000011

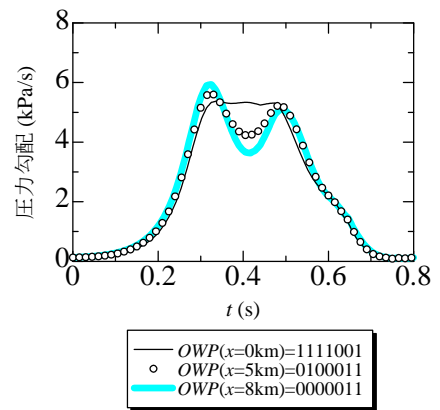


図 4 入口圧力勾配波形

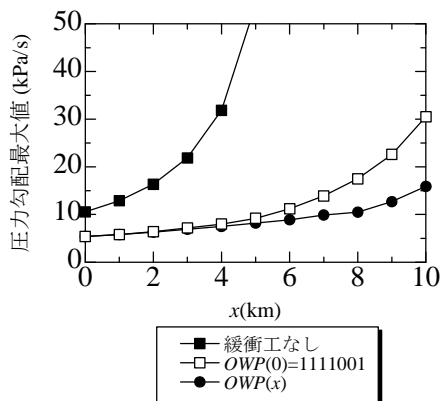


図 5 圧力勾配最大値の変化

図 6 は 20 m 緩衝工 (図 2) の全開口部パターン (128 通り) によるトンネル長さ 8 km での出口圧力勾配最大値 (微気圧波) を比較したものである。入口において同じ圧力勾配最大値であっても、発生する微気圧波は大きく異なり、場合によっては 50 % 程度のばらつきがある。開口部を変更することで入口圧力勾配最大値を低減しても、必ずしも出口微気圧波が低減されるとは言えない。

図 6 中に矢印で示す 4 つの点 (全閉 $WP = 0000000$ 以外) の入口波形を図 7 に示す。CASE A は $OWP(0)$ と同じ出口圧力勾配最大値となるケースの中でも入口圧力勾配最大値が大きいもの、CASE B は $OWP(x=8\text{km})$ と同じ入口圧力勾配最大値となるケースの中でも出口圧力勾配最大値が大きいものである。つまり CASE A は入口圧力勾配最大値が大きいわりには出口圧力勾配最大値が小さくなる比較的伝播特性の良い入口波形、逆に CASE B は伝播特性の悪い入口波形の例である。CASE A は三角波に近い波形であり、CASE B は右上がりの台形型である。

図 6 より CASE B では $OWP(x=8\text{km})$ とした場合の 2 倍以上の大きさの微気圧波が発生することになる。

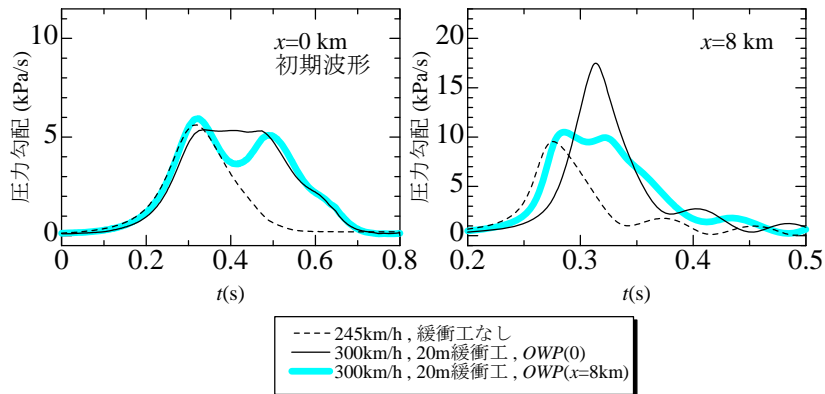


図 8 出口圧力勾配波形の比較

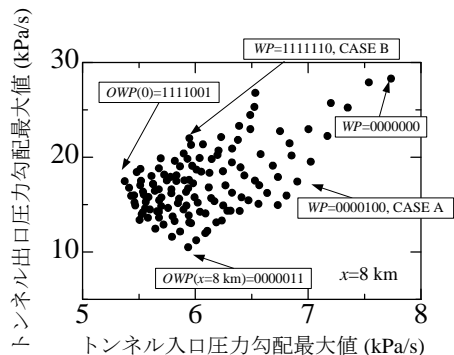


図 6 トンネル出口圧力勾配最大値の比較
($x = 8 \text{ km}$)

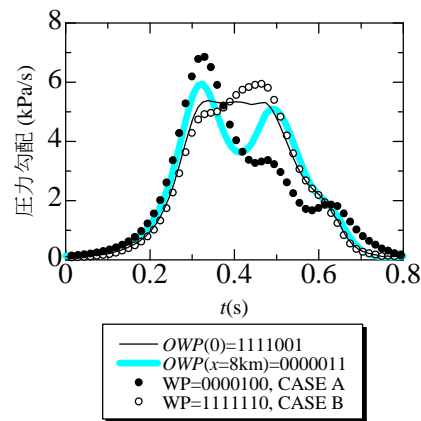


図 7 トンネル入口圧力勾配波形の比較

$OWP(0)$ と $OWP(x=8\text{km})$ のトンネル長さ 8 km での圧力勾配波形を図 8 に示す。比較のため列車突入速度 245 km/h、緩衝工なしの場合も示す。 $OWP(x=8\text{km})$ にした場合には、245 km/h、緩衝工なしと同等の微気圧波まで低減することが可能である。一方、 $OWP(0)$ による入口勾配波形の場合、圧力勾配最大値が小さいにも関わらず、圧縮波の切り立ち方が大きいことがわかる。

4. 考察

図 8 より、圧力勾配波形が一定となる部分を持つ波形は、切り立ちやすい性質を持つことが分かる。図 8 などから、逆に切り立ち方の小さい波形は、

- (1) 谷部を持つこと、
- (2) 左上がりの波形であること

わかる。この傾向は非定常摩擦の影響であることが理論解析⁽⁴⁾⁽⁵⁾や現地試験結果⁽⁶⁾からも示さ

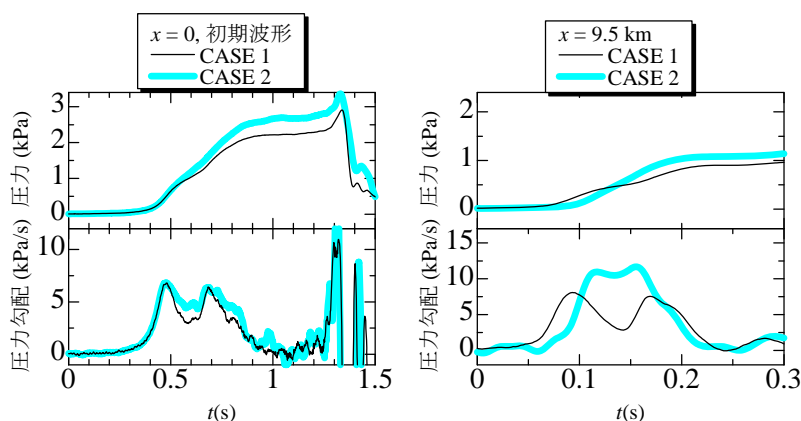


図 9 現地試験例

れている。図 9 は現地での測定例である⁽⁶⁾。車両条件の異なる CASE 1 と CASE 2 の入口波形は同じ圧力勾配最大値を持っているが、トンネル出口においては 40%程度異なる。谷部の浅い CASE 2 による入口波形のほうが切り立ちやすいことがわかる。

5. まとめ

微気圧波低減を目的とした入口対策の例として、緩衝工による微気圧波低減効果を数値計算により検討した。その結果、長大スラブ軌道トンネルにおいては、トンネル入口において圧力勾配最大値を最小とする開口部パターンと微気圧波を最小にする開口部パターンが異なる場合があることを示した。圧縮波の伝播中の変形を考慮して緩衝工の開口部を決定することで、従来の考え方で設計した開口部の場合に比べて微気圧波がさらに低減することが期待できる。トンネル入口での波形だけでなく、圧縮波の伝播特性をも考慮して開口部を予測することは、模型実験だけでは難しい。ここでは、圧縮波の形成・伝播の 2 つのステージを別々の数値シミュレーションにより計算し、最適開口部を予測した。今後、このような総合シミュレーションの予測精度についても研究を進める予定である。

文献

- (1) 小沢, 鉄道技術研究報告, **1121**, (1979).
- (2) 飯田ほか, 鉄道総研報告, **16-12**, (2002), 35-40
- (3) Howe, et al., *J. Sound. Vib.*, **297**, (2006), 267-297
- (4) 宮地ほか, 機講論(CD-ROM), (2007), 422
- (5) 宮地ほか, 機講論, **7-12**, (2007), 91-94
- (6) 斎藤ほか, 機講論, **7-1**, Vol.2, (2007), 267-268