

4 微気圧波

4-1 現象について

微気圧波とは、列車のトンネル突入により生じた圧縮波がトンネル内を音速で伝播し、反対側の坑口（出口）や非常口からパルス状の圧力波となって放射される現象である。微気圧波の発生メカニズムを図 4-1-1 に示す。

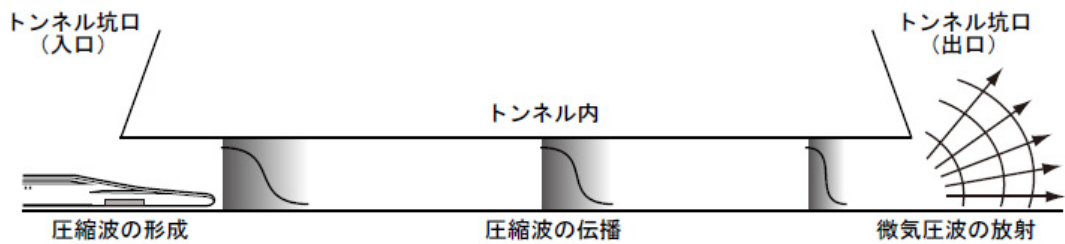


図 4-1-1 微気圧波発生メカニズム（通常のトンネル）

微気圧波が大きくなると、坑口や非常口周辺で衝撃音（ドン音）が聞こえたり、周辺家屋の窓枠や戸が振動したりすることが知られている。

一般的に、トンネル内を伝播する圧縮波は、非線形効果により波面が切り立つ一方、トンネル壁面摩擦の効果により圧縮波は減衰する。また、長距離を伝播すると、減衰の効果が相対的に増加してくるために最大圧力勾配の増加が抑制され、最終的には減衰が卓越して最大圧力勾配は減少することになり、出口から放射される微気圧波も小さくなる。

トンネルの途中に非常口が存在する場合、微気圧波は分岐して非常口から放射される（図 4-1-2）一方、引き続き本坑を伝播する圧縮波は減衰し、トンネル坑口にて放出される微気圧波は小さくなる。

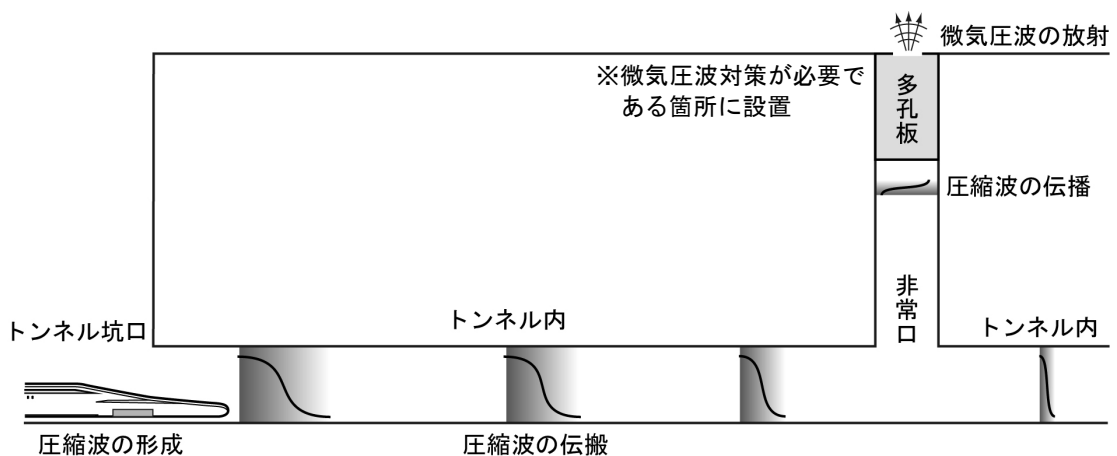


図 4-1-2 微気圧波発生メカニズム（非常口を含むトンネル）

4-2 予測手法について

微気圧波の予測については、列車のトンネル突入で生じる圧縮波を予測する「突入予測」、その圧縮波の伝播過程を予測する「伝播予測」、伝播した圧縮波が反対側の坑口や非常口から放射される圧縮波を予測する「放出予測」の各過程に区分して行った。

なお、放出予測については、「トンネル出口」から放射される圧力波は数値解析により、「非常口」から放射される圧力波は模型試験により行った。

4-2-1 突入予測

突入予測とは、列車のトンネル突入に坑口周辺で生じる圧縮波を求めるものである。本予測によりトンネル坑内で生じる突入波を求め、伝播解析の初期値として用いる。基礎方程式としては、3次元の質量保存則と運動量保存則エネルギー保存則によって記述される。

$$\partial_t Q + \partial_x E + \partial_y F + \partial_z G = 0,$$

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ e \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \\ (e+p)u \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \\ (e+p)v \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} \rho w \\ \rho vw \\ \rho w^2 + p \\ (e+p)w \end{bmatrix} \quad \text{式(1)}$$

ここで、 ρ は空気密度、 u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の速度成分、 e は単位体積当たりの全エネルギーを表す。また、圧力 p は、式(2)に示すとおり、理想気体の状態方程式から求めることができる。ここで、 γ は空気の比熱比である。

$$p = (\gamma - 1) \left\{ e - \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2 + w^2) \right\} \quad \text{式(2)}$$

4-2-2 伝播予測

列車のトンネル突入によって生じた圧縮波は出口に向かって音速で伝播する。伝播解析では、1次元圧縮性流体を対象とする1次元波動伝播解析を採用した。

1次元波動伝播解析の基礎方程式は、式(3)に示す通り断面内で一様と仮定した一次元の質量保存則、運動量保存則、エネルギー保存則で記述される。これらの式により圧力波の伝播性状について解析を行う。

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= -f(u) \\ \frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} + \gamma p \frac{\partial u}{\partial x} &= 0\end{aligned}\tag{3}$$

ここで、 ρ は空気密度、 u は流速、 p は圧力、 γ は空気の比熱比、 x は距離、 t は時間、 f はトンネル壁面摩擦の項である。

4-2-3 放出予測

放出予測とは、トンネル突入によって坑内に生じた突入波が伝播して出口まで達した際、パルス状に放射される圧力波を予測するものである。

なお、「トンネル出口」から放射される圧力波は数値解析により予測を行い、「非常口」から放射される圧力波は模型試験により予測を行った。

① トンネル出口（数値解析）

解析手順は突入解析と同様の手法を用い、式(1)により計算した。

② 非常口（模型試験）

約1/30の非常口形状を模擬した模型による打ち込み試験を実施し、非常口微気圧波を予測した。(図4-2-3-1)

なお、非常口から生じる微気圧波の高さ方向の予測については、非常口の出口高さでの予測値に対して、評価点までの高さに応じて減衰する。

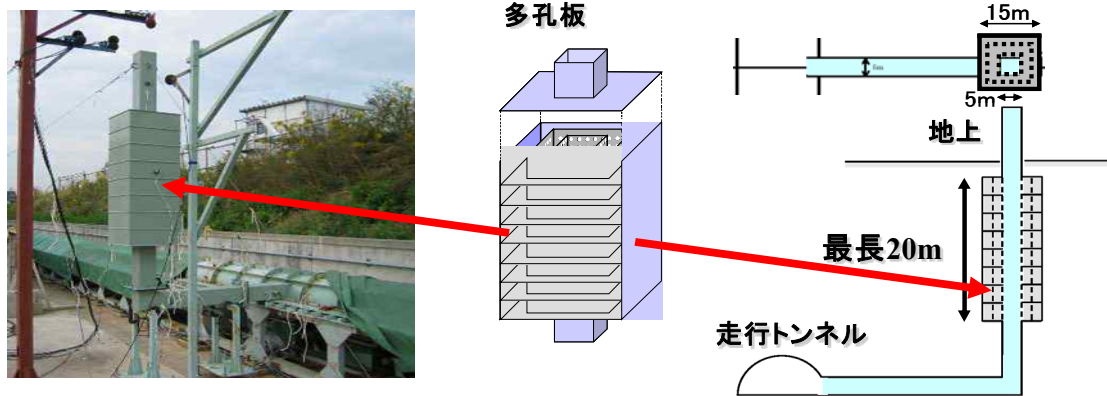


図 4-2-3-1 模擬模型試験イメージ

4-2-4 予測精度検証

山梨リニア実験線のトンネル出口及び模擬立坑（非常口を模擬した実験設備）における500km/h 走行時の実測値と、同一条件における予測値を比較すると以下の通りであり、予測精度は十分に確保されている。

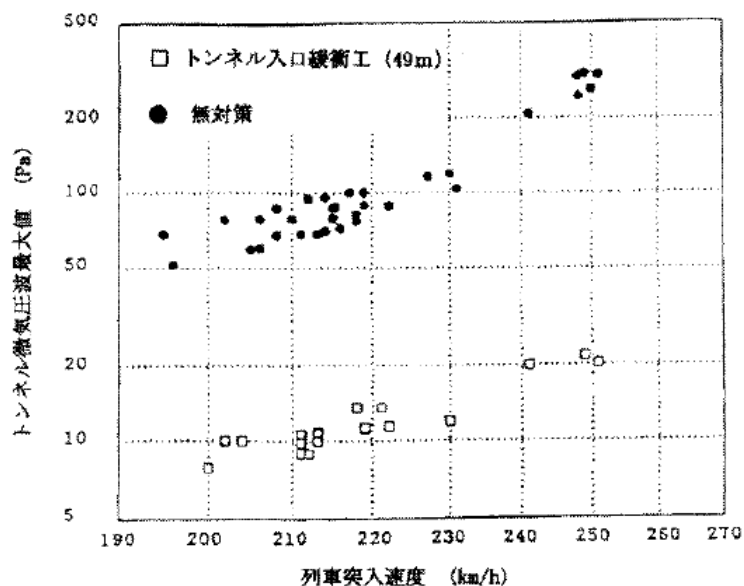
表 4-2-4-1 予測精度検証

	トンネル出口 (坑口から 20m)	模擬立坑 (模擬立坑出口から 25m)
実測値	31Pa	7Pa
予測値	32Pa	8Pa

4-3 緩衝工、多孔板の効果について

4-3-1 緩衝工

緩衝工はトンネルの坑口に設置する設備であり、列車のトンネル突入に伴う圧力変化を滑らかに行わせて入口側における圧縮波の形成を抑制する効果がある。過去に新幹線のトンネル出口において測定されたデータを図 4-3-1-1 に示す。無対策時のデータと緩衝工設置後のデータの比較を実施しており、緩衝工設置により微気圧波最大値が低減している。



資料：日本鉄道施設協会誌（2007.4）トンネル微気圧波対策 前田達夫

図 4-3-1-1 トンネル緩衝工（長さ 49m）のトンネル微気圧波低減効果

山梨リニア実験線では数値解析や走行試験等によって開発を推進し緩衝工の効果を検証しており、中央新幹線では図 4-3-1-2 に示す円形の形状の緩衝工を設置することを計画している。

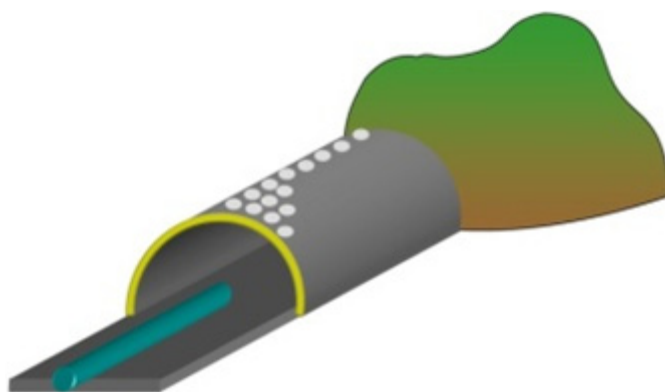


図 4-3-1-2 超電導リニアにおけるトンネル緩衝工

4-3-2 多孔板

非常口における微気圧波の低減を図るために設置する設備であり、図 4-3-2-1 に示すとおり、トンネルと地表面を結ぶ換気経路の途中に多孔板と断面を拡大した空気室を設置するものである。変動する圧力が多孔板の各孔を出入りする際の粘性減衰作用によって圧力変動が低減される。

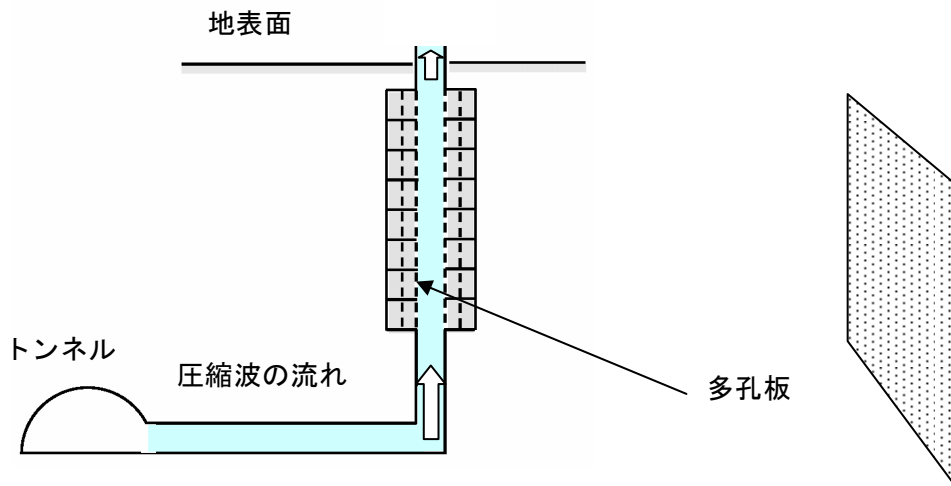


図 4-3-2-1 多孔板の構造

なお、多孔板(20m)の設置により非常口出口における微気圧波は約 1/2 に低減可能であり、基準値を満足することがわかっている。

4-4 微気圧波の基準について

微気圧波については、「トンネル坑口緩衝工の設置基準（案）」（山岳トンネル設計施工標準・同解説、鉄道建設・運輸施設整備支援機構、平成20年4月）においてトンネル坑口緩衝工の設置の目安値として、「民家近傍で微気圧波のピーク値が20Pa以上、坑口中心から20m地点で原則50Pa以上」であるとされている。これをもとに、評価委員会においては、超電導リニアの基準（案）を「民家近傍で微気圧波のピーク値が20Pa以下、坑口中心から20m地点で原則50Pa以下」と設定している。なお、前者は建具のガタツキを抑えられるレベル、後者は発破音が発生しないレベルをそれぞれ示している。

上記緩衝工設置目安値の、「坑口中心から20m地点で50Pa」については、「鉄道技術研究報告 トンネル出口微気圧波の研究（小沢）（1979.7）」において、「山陽新幹線トンネルにおいては、20m地点の P_{max} が 10kg/m^2 （100Pa）程度以上となるになると空気圧音の発生がみられる」と報告されており、これに予測精度や現象のばらつきを考慮して50Pa以下と設定されている。また、「民家近傍で20Pa」については、国鉄時代からの経験により、このレベルが目安値として設定され、新幹線建設が進められてきており、これまで実用上の問題は発生していない。

超電導リニアについても、列車速度に関係なく上記基準を満たすことにより「建具のガタツキ」、「発破音の発生防止」を行えると考えられるため、上記緩衝工設置の目安を用いることは妥当と判断した。

4-5 列車突入・退出時の空気振動について

超電導リニアにおいては列車がトンネルに突入する際には入口側緩衝工付近で、列車がトンネルを退出する際には出口側緩衝工付近で空気振動が発生し、その大きさによっては微気圧波の場合と同様に、建具のガタツキが生じる可能性がある。

山梨リニア実験線で圧力変動の測定を行った結果、図 4-5-1 の通りトンネル坑口から 50m の位置で概ね 16Pa となり、民家近傍で微気圧波のピーク値の基準とした 20Pa 以内に収まっていることを確認している。

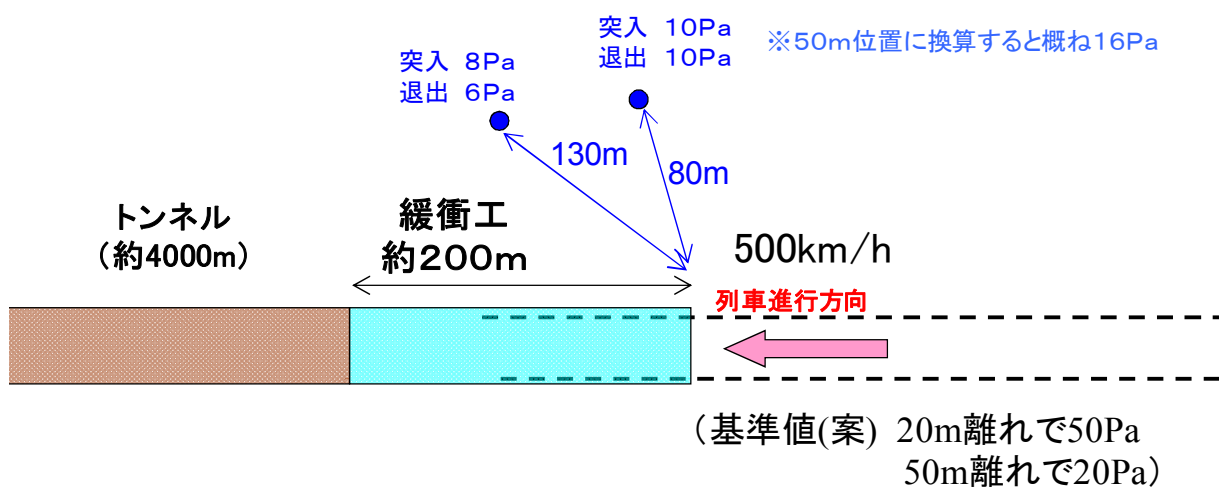


図 4-5-1 山梨リニア実験線での空気振動測定データ