

トンネル内を伝播する 圧縮波の急峻化と減衰

福田 傑
総務部
(総務 主査)

宮地 徳蔵
環境工学研究部
(空気力学 研究員)

飯田 雅宣
同
(同 研究室長)



ふくだ たかし



みやち とくぞう



いいだ まさのぶ

はじめに

新幹線などの高速鉄道における環境問題の中で、関心を集めているものの一つに、トンネル坑口から放射される低周波音があります。環境省の定義によると、低周波音とは、およそ 100 Hz 以下の低周波数の可聴音と超低周波音(周波数 20 Hz 以下の音波)を含む音波のことです。そして、トンネル坑口から放射される低周波音の中で最も代表的なものが、“トンネル微気圧波”です。

トンネル微気圧波については沿線環境問題として、RRRでも度々解説をしてきましたので、ここではその原因である圧縮波に的を絞って紹介したいと思います。

トンネル微気圧波と圧縮波

トンネル微気圧波の発生メカニズムを図1に示します。列車先頭部がトンネルに突入すると、トンネル内の空気は列車によって圧縮され、圧力が上昇します。この圧力上昇は圧縮波(通過するとその点の圧力が高くなる波)となってトンネル内を反対側の坑口へ向かって伝わっていきます。圧縮波が反対側坑口に到達すると、大部分のエネルギーは反射し膨張波(通過するとその点の圧力が低くなる波)となって列車突入側の坑口へ戻っていきますが、エネルギーの一部はパルス状の圧力波として坑口からトンネルの外へ放射

されます。このパルス状の圧力波を微気圧波と呼び、微気圧波が大きくなると、トンネル坑口で「ドーン」、「パーン」という衝撃音が聞こえたり、家屋の窓枠や戸が急に振動し、「ガタン」と音を立てたりすることがあります。微気圧波の原因となる圧縮波が伝わる速度はほぼ音速(約 340 m/s)であり、列車の走行速度(新幹線で約 80 m/s)よりも大幅に速いことから、微気圧波は列車が通過する以前に、前触れ無く急に発生します。これが、列車通過に伴う騒音や地盤振動などの他の環境問題とは異なる特徴です。

微気圧波の大きさは坑口に到達した圧縮波の波面の勾配(地上に固定した点で圧力を測定した場合、圧力の時間変化率)が急であるほど大きくなり、通常はこの勾配に比例します。したがって、微気圧波の現象解明や低減対策法の検討のためには、圧縮波の波形がトンネル内を伝わる間にどのように変形していくのかということを把握することが重要となります。

軌道種別による圧縮波の変形の違い

微気圧波の問題が顕在化したのは、1975年3月の山陽新幹線博多開業のための訓練運転が、岡山以西で開始された後のことです。列車の車両形式も速度も同じなのに、なぜだったのでしょうか。調査の結果、その原因は軌道種別

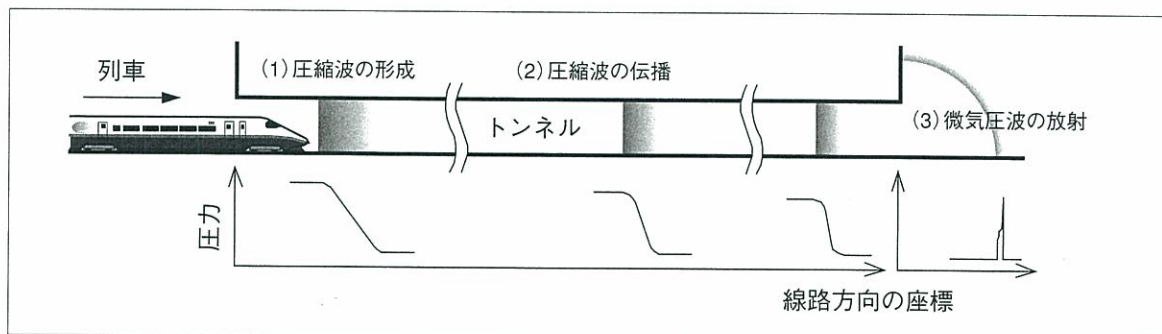


図1 トンネル微気圧波の発生メカニズム

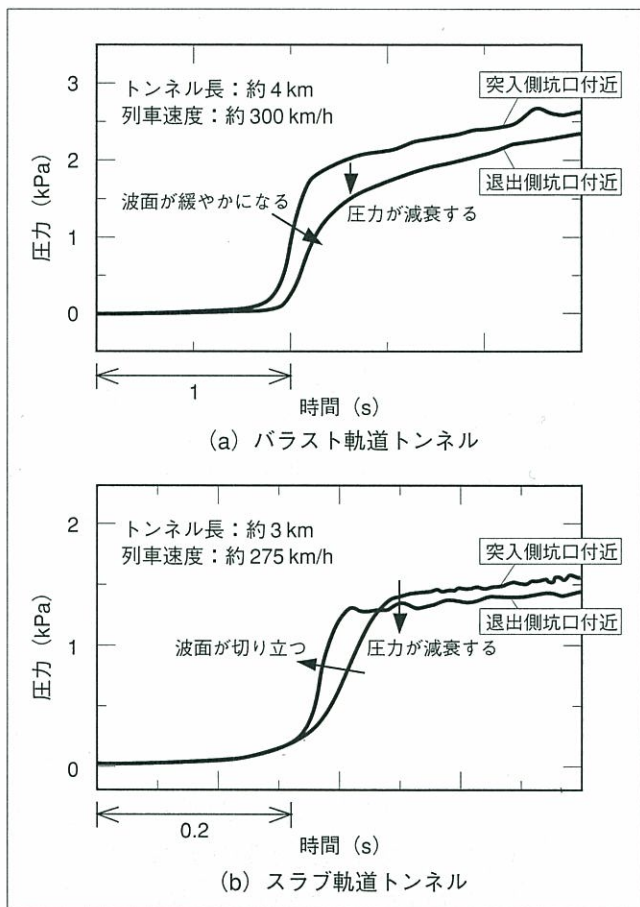


図2 トンネル内を伝わる圧縮波の波形の変化

の違いによるものであるということがわかりました。山陽新幹線岡山以西で東海道新幹線や山陽新幹線岡山以东と違うのは、コンクリートでできたスラブ軌道が本格的に採用されことでした。

図2は、トンネル内を伝わる圧縮波の、軌道種別による変形の違いを示したものです。図2(a)より、バラスト軌道が敷設されたトンネル内では、圧縮波は伝わるにしたがってその波形全体が減衰して圧力が低下するとともに、初期波形の波面の圧力が立ち上がった部分が丸くなり、波面が緩やかになっていくことがわかります。一方、図2(b)を見ると、スラブ軌道が敷設されたトンネルにおいては、圧縮波は、トンネル内を伝わるにしたがって減衰して圧力が低くなるものの、波面は切り立っていくことがわかります。

スラブ軌道トンネルにおける圧縮波の波面の切り立ちは、圧縮波の非線形効果によるものです。図3に圧縮波の非線形効果の概念を示します。圧力波の伝わる速さは圧力が高いほど速くなります。そのため圧縮波の場合、波面の圧

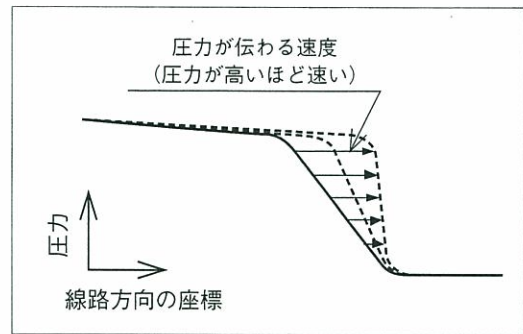


図3 圧縮波の非線形効果

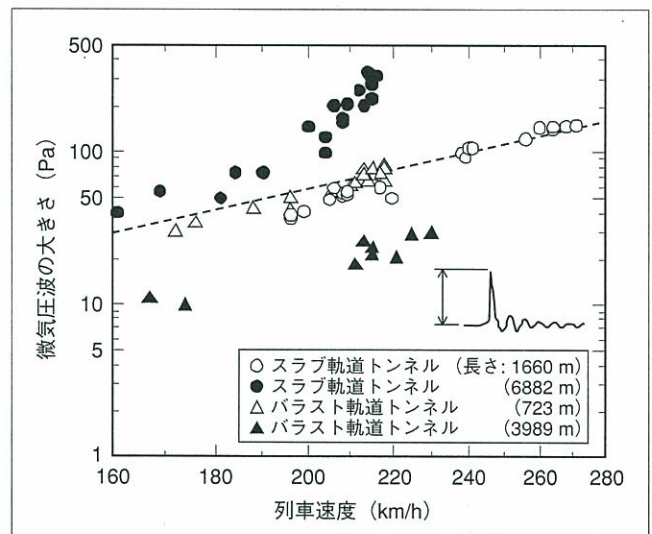


図4 微気圧波の大きさと列車速度の関係 (坑口から20 m離れた測定点)

力の高い部分が、伝わるにしたがって、圧力の低い部分に追いついていきます。その結果、圧縮波の波面は徐々に切り立っていきます。逆に膨張波では波面は緩やかになっていきます。

図4は、軌道種別およびトンネル長の違いによる微気圧波の大きさの実測値を示したものです。トンネルが短い場合は、坑口から放射される微気圧波の大きさはバラスト軌道トンネルとスラブ軌道トンネルでほとんど差がありませんが、トンネルが長い場合、軌道種別の影響を受けています。長いバラスト軌道トンネルの場合、圧縮波がトンネル内を伝わる間に波面が緩やかになるため、微気圧波は小さくなります。一方、長いスラブ軌道トンネルの場合には、圧縮波がトンネル内を伝わる間に切り立つため、微気圧波は大きくなります。

図5は、微気圧波が問題となり始めたころに測定された、スラブ軌道トンネルにおける微気圧波の大きさとトンネルの長さの関係を示したものです。坑口周囲の地形やトンネ

ル内の枝坑などの条件が異なるためばらつきがありますが、確かに長さが10 km よりも短いほとんどのトンネルにおいては、前述のようにトンネルが長いほど微気圧波が大きくなることがわかります。

ところがここで興味深いのは、長さが10 km を超えるような超長大スラブ軌道トンネルにおいては微気圧波が小さくなる傾向があるように見えることです。図5において最も長いトンネルの測定データは、長さ約19 km の海底トンネルのものです。このような超長大トンネルは数が少ないこと、超長大トンネルではトンネル内で列車がすれ違うことが多いために条件の良いデータが不足していることなどから、この傾向の原因は明確ではなく、これは長

い間疑問として残っていました。

超長大スラブ軌道トンネルにおける圧縮波の変形

近年建設されている整備新幹線では、従来にも増してトンネル区間が多くなり(東北新幹線盛岡・八戸間では約70%がトンネル区間)、10 km 以上の超長大トンネルも建設されています。新たにトンネルを建設する際、また今後速度向上を行おうとする場合、微気圧波の大きさをあらかじめ予測し、低減対策について事前に検討することが必要となります。そのためにはスラブ軌道トンネル内を伝わる圧縮波の変形について、その現象を解明し、予測手法を確立する必要があります。

そこで著者らは新幹線の超長大スラブ軌道トンネル内を伝わる圧縮波について、現地測定を行うとともに数値計算を行いました。図6は現地測定を行ったトンネルの概要です。現地測定を行なったトンネルは、全長が中央線の東京・三鷹間よりも長い約26 km もあり、この測定を行った時点で世界最長の山岳トンネルでした。新幹線のトンネルには一般に、約500 m おきに側壁の片側または両側に器材坑と呼ばれる奥行の短い枝坑が設置されています。またこのトンネルには、工区を分けてトンネルを建設するための、図6のA～Eで示した5つの斜坑が、埋め戻されずに残されています。現地測定では、両坑口付近だけではなく、これら斜坑の前後の計12箇所に圧力を測定するセンサーを設置し、トンネル内を伝わる圧縮波の波形を測定しました。また数値計算では、前述の圧縮波の非線形効果に加え、空気とトンネル壁面の間における摩擦などを考慮に入れるとともに、器材坑や斜坑など、トンネル内に設置されている枝坑についてもその効果を考慮しました。

図7に現地測定結果と数値計算結果を示します。図7

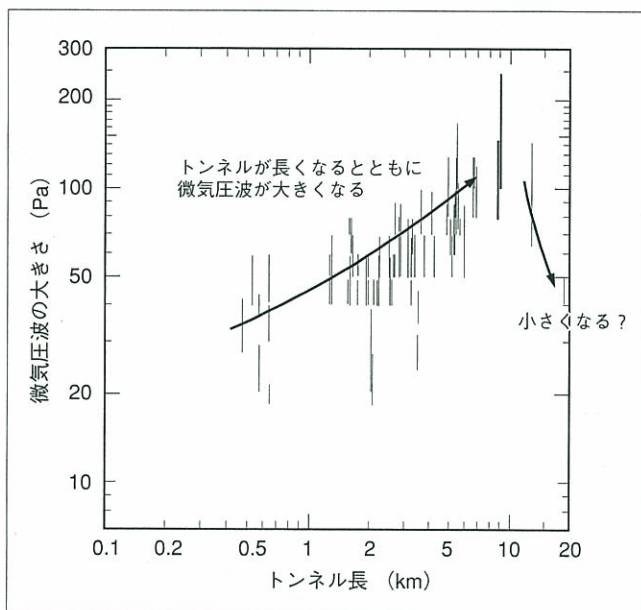


図5 微気圧波の大きさとトンネル長の関係
(坑口から20 m 離れた測定点, 列車速度:200 km/h)

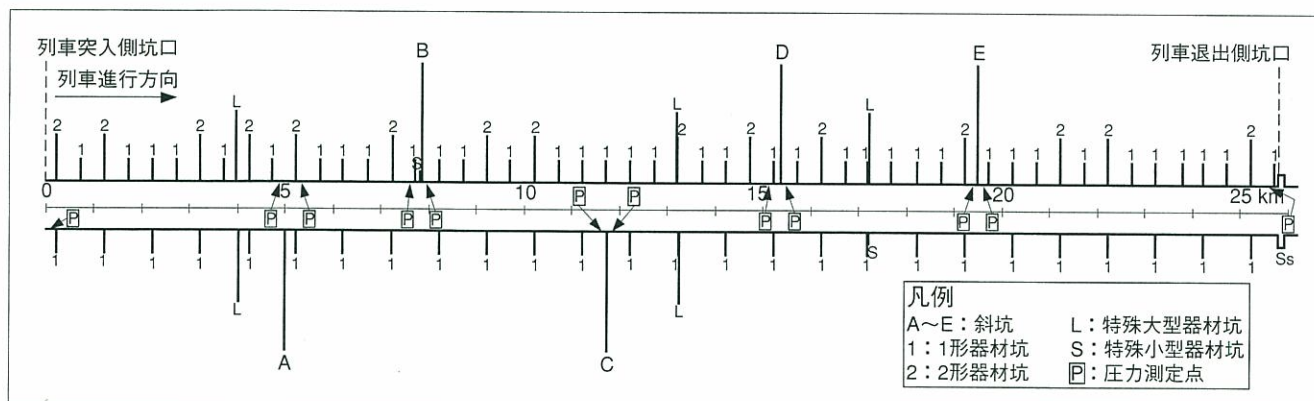


図6 現地測定の概要

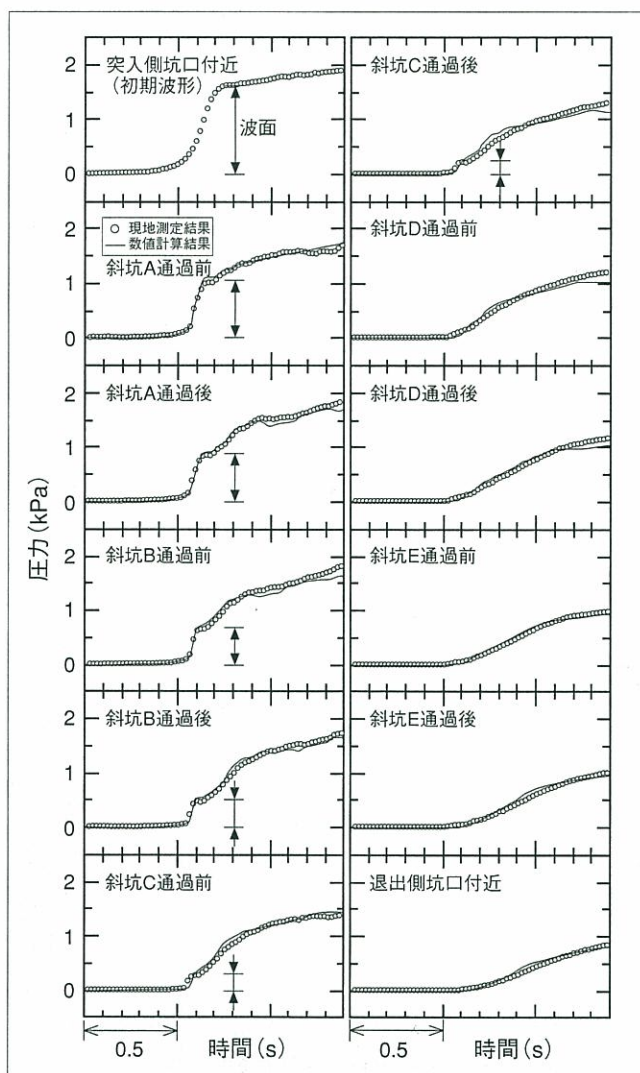


図7 超長大スラブ軌道トンネル内を伝わる圧縮波の波形(現地測定結果と数値計算結果)

より、列車のトンネル突入により突入側坑口で形成された圧縮波の波面は、斜坑Aまで到達する間に切り立っていきることがわかります。そして斜坑Aを通過した後、斜坑Cまでは、圧縮波の波面は切立ったままですがその圧力は徐々に低くなっていくことがわかります。そして斜坑D前後の測定点に達した圧縮波は急峻な波面は減衰しており、その後、圧縮波は再び切立つことなく徐々に減衰していくことがわかります。

ここで、図7において現地測定結果と数値計算結果の両者は良く一致しており、数値計算が妥当な結果を与えていることがわかります。そこでこの数値計算を用い、器材坑はあるが図6のA～Eに示したような斜坑は無い一般的な新幹線スラブ軌道トンネル内を伝わる圧縮波の波面圧力勾配の変化を系統的に調べました。図8に数値計算結

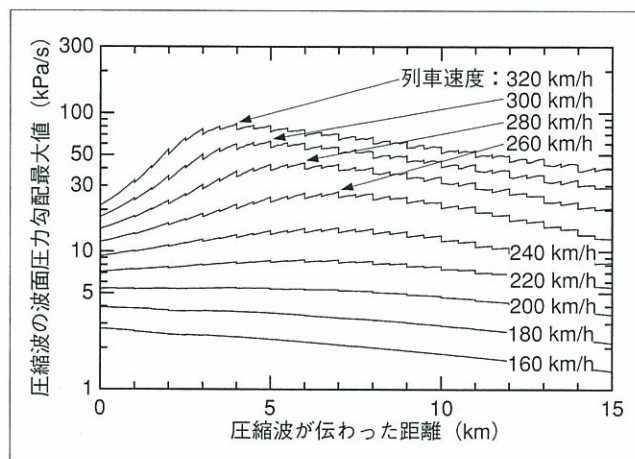


図8 新幹線スラブ軌道トンネルを伝わる圧縮波の波面圧力勾配の変化(数値計算結果)

果を示します。列車速度が低く(200 km/h以下)トンネル内に形成された直後の初期波面圧力勾配(図8において圧縮波が伝わった距離が0 kmのときの値)が小さいときは、波面圧力勾配は大きくならず徐々に小さくなっていくことがわかります。また初期波面圧力勾配がある値(この数値計算では5 kPa/s程度)を超えると、波面圧力勾配は伝播の前半段階で大きくなり、その後小さくなる傾向を示しています。すなわち、波面圧力勾配が最大となる距離、言い換えると微気圧波が最大となるトンネル長が存在することがわかります。以上のことから、車両形式や速度などの条件が異なるものの、本研究によって図5の疑問が30年の歳月を経て解決されたものと言えます。

おわりに

以上、本稿ではスラブ軌道トンネル内を伝わる圧縮波の変形について述べました。微気圧波を含む高速鉄道における低周波音については、ここに述べたようなすでに現象が解明されているものだけではなく、バラスト軌道トンネル内を伝播する圧縮波の現象解明など、課題がいろいろあります。それらについても、今後も継続して研究開発を進めていきます。[RRR]