3403 短いトンネルの坑口周辺で観測される複数の圧力波

Pressure Waves Observed near Portals of a Short Tunnel

正[土] 〇鷹崎 徹 (鉄道総研) 正[機] 飯田 雅宣 (鉄道総研) 正[土・機] 田中 靖幸 (JR西日本)

Toru TAKASAKI, Railway Technical Research Institute, 2-8-38,hikari-cho,Kokubunnji City Masanobu IIDA, Railway Technical Research Institute Yasuyuki TANAKA, West Japan Railway Company

A high-speed train entering or leaving a tunnel generates pressure waves inside the tunnel, which travel through it back and forth, reflecting repeatedly at both end portals. At each reflection, a part of pressure wave energy is radiated as an impulsive wave from the portal toward the surrounding area. The impulsive wave is called a "micro-pressure wave" and has become one of the most serious environmental problems occurring in high-speed railways. When the tunnel length is less than a few hundred meters, the micropressure waves at each reflection are emitted successively during a rather short time period of several seconds, with the result that an oscillatory pressure waveform is observed outside the tunnel. In addition, at the entry or exit of the train, pressure waves are directly radiated from the portal toward the outside, which are called a "tunnel entry/exit wave," to make the outside waveform more complex, overlapping with the micro-pressure waves. This paper reports the results of field measurement at a Shinkansen tunnel of about 100 m in length performed to clarify the pressure waves generated at portals of a short tunnel.

Keyword : micro-pressure wave, tunnel entry/exit wave, entrance hood, Shinkansen

1 はじめに

列車のトンネル突入・退出に伴ってトンネル内に圧力波が発生する。 この圧力波は両端の坑口で反射を繰り返しながらトンネル内を往復し ^{1,1}、坑口で反射する際に一部のエネルギーをパルス状の圧力波とし て外部へ放射する。このパルス波はトンネル微気圧波と呼ばれ、坑口 付近で衝撃音を発生させたり、民家の建具を振動させるなどして、沿 線の環境問題(低周波音)を引き起こす場合がある¹。

通常、トンネル微気圧波は、列車先頭部突入時に発生した圧縮波が 反対側の坑口に到達したときに放射される正のパルス波のことを言う。 しかし、列車後尾部の突入時に発生した膨脹波の到達によっても同様 にパルス波(ただし符号は負)が放射される。この負のパルス波も微 気圧波である。長いスラブ軌道トンネルでは(例えば1 km以上)、先 頭部突入による微気圧波は大きく、後尾部突入による微気圧波は小さ くなって、最終的に前者だけが目立つようになる。トンネルが短い場 合には、先頭部突入による微気圧波と後尾部突入による微気圧波は、 前者がやや大きい傾向はあるものの、ほぼ同じオーダーの大きさであ る(短いトンネルではスラブ、バラストなどの軌道種別の影響は現わ れない)。



Fig.1 Generation of pressure waves at portals of a short tunnel

また、トンネルが短い場合には、短時間に圧力波がトンネルを往復 し、繰り返し坑口から微気圧波が放射される¹¹(坑口での多重反射に よる微気圧波)。さらに、短いトンネル(例えば100m以下)では、両 端の坑口が接近しているため、トンネルの周辺、特に両坑口の間に位 置する地域では両坑口から放射される微気圧波がともに影響を及ぼす 場合がある(図1)。

これらのトンネル微気圧波以外に、別のメカニズムで発生する圧力 波もある。列車のトンネル突入・退出時には、トンネル内部のみなら ずトンネル外部にも圧力波が発生し、直接坑口の外部へ放射される。 この圧力波はトンネル突入・退出波と呼ばれ、微気圧波と同様、低周 波のパルス波であるため、沿線の環境問題を引き起こす場合がある ^{0.9}。

以上をまとめると次のようになる。

(1)長いスラブ軌道トンネルでは、列車先頭部突入により反対側坑口 で発生する微気圧波が大きく、その波形は単一の正のパルスで、衝撃 音を発生させたり、民家の建具を突然揺らす場合がある。また、トン ネル突入・退出波も発生するが、民家の建具振動を起こす可能性はあ るものの衝撃音は伴わない。突入・退出波の大きさは微気圧波より小 さく、微気圧波とは十分な時間間隔をおいて発生する。

(2)短いトンネル(スラブ・バラストの軌道種別に関らない)では、 両側の坑口から放射される列車先頭・後尾部の突入・退出による微気 圧波、トンネル内圧力波の両坑口での多重反射による微気圧波、さら にトンネル突入・退出波が、すべて短時間に継続して発生する。圧力 波の大きさは、(1)の長いスラブ軌道トンネルの微気圧波と比較して 小さいが、波形は振動的となる。衝撃音は伴わず、民家の建具を揺ら すなどの影響を及ぼす場合がある。

新幹線ではまず上記の(1)で述べた事象が問題となった。しかし、 トンネル入口緩衝工や列車先頭部の改良などの微気圧波低減対策^{11, 1)} が実施され、この現象が突出するケースは少なくなってきた。代わっ て、上記の(2)で述べた「短いトンネルの坑口周辺で、個々の圧力波

[No.03-51] 日本機械学会第10回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集〔2003-12.9~11. 川崎〕

の振幅は小さいにも関わらず、全体としては一定時間持続する振動的 な圧力波」が、列車の速度向上とともに沿線に影響を及ぼすケースが 見られるようになってきている。そこで、延長100 m程度のトンネル における現地測定結果を用いて、短いトンネルにおける圧力波の発生 状況を検討した結果について述べる。

2 現地測定方法の概要

現地測定は、新幹線における延長93 mのバラスト軌道トンネルにおいて、両坑口の緩衝工設置前及び設置後の二回実施した。トンネル両坑口から発生する圧力波を測定するため下り列車近傍側に超低周波音 圧レベル計(リオン社製XN-12A)を3点設置した(図2)。測点Aは下り列車突入側坑口(東口)に近く、測点Bは下り列車退出側坑口(西口)に近い。測点Mはやや東口に近いが、両坑口の中間に位置している。

検討したType 1車両の編成長は16両400 mであり、トンネル長より 長く、いわゆる「串刺し」の状態でトンネルを通過する条件となって いる。したがって、列車先頭部突入、列車先頭部退出、列車後尾部突 入、列車後尾部退出の順で現象が発生する。

複線トンネルのように列車がトンネル断面中心に対して片寄って走 行する場合、突入・退出波は列車に近接する側の外部により強く放射 される¹。例えば、下り列車により放射される突入・退出波は、上り 線側よりも下り線側の沿線でより強く観測される。よって、本報告で は、下り列車についての結果を示す。



Fig.2 Outline of field measurement

3 現地測定結果 3.1 圧力波形

緩衝工設置前、Type 1車両16両編成が測定点近傍側(下り線)を 285 km/hで走行したとき、外部の3測点において測定された圧力波形 を図3に示す。列車先頭部がトンネル東口に突入する時間を0としてい る。いずれの測点においても0.6秒程度の周期を持つ振動波形が観測 されている。この周期は「トンネル全長+両端開口端補正(フランジ 有)」を圧力波が1往復するのに必要な時間である0.61秒(=104× 2/340)に近く、図3の振動波形がトンネル内圧力波の坑口での多重反 射に起因していることが推測される。

図4に本測定条件における x-tダイヤグラムを示す。この図は、Type 1列車が16両編成、285km/hでトンネルに突入し、トンネル内を走行し た後、退出してしばらくの間にトンネルの両坑口から発生する圧力波 を示している。ここで、東口から発生する圧力波として、NEn*i*:先頭 部突入による突入波(*i*1)または多重反射による微気圧波(*i*22)、 NMx*i*:先頭部退出による微気圧波、TEn*i*:後尾部突入による突入波 (i=1)または多重反射による微気圧波($i\geq2$)、TMx i:後尾部退出によ る微気圧波である。また、西口から発生する圧力波として、NEx i:先 頭部退出による退出波(i=1)または多重反射による微気圧波($i\geq2$)、 Nm i:先頭部突入による微気圧波、TEx i:後尾部退出による退出波 (i=1)または多重反射による微気圧波($i\geq2$)、TMn i:後尾部突入によ る微気圧波である。図4から数秒間のうちに、両坑口から多数の圧力 波が発生していることが確認できる。トンネル外部の測点(図2)で 圧力波を観測する時間は、さらに坑口から測点までの距離を音速で伝 播する時間だけ遅れる。各測点における種々の圧力波の観測時間を東 口と西口に分けて図3の各圧力波形の下側に示す。なお、図中の+、 ×記号は負のパルス波、〇、◇記号は正のパルス波である。

図3における突入側の東口に近いA点では以下のようになっている。 まず先頭部突入により直接外部に放射される負のパルス波(トンネル 突入波)が観測される(NEn1)。その次の負のパルス波は、先頭部突入 による圧縮波が反対坑口で反射して膨張波になって戻ってきた時に放 射される(負の)微気圧波である(NEn2)。さらにトンネル内を2回以 上往復した圧力波による微気圧波が続いて観測されている(NEn3. NEn4,...)。また、3番目の負のパルス波(NEn3)が発生した直後に正の パルス波が発生しているが、これは列車先頭部が西口を退出したとき にトンネル内に発生した圧縮波が東口に到達したことによる (退出時 の) 微気圧波である(NMx1)。この微気圧波に関しても、多重反射によ る第2波以降の微気圧波が観測されている(NMx2, NMx3, ...)。図3の 後半(5秒以降)では、列車後尾部の突入、退出により発生した圧力 波(TEn, TMx)が観測されている。後尾部による圧力波は、対応する先 頭部による圧力波と発生のタイミングが5.1秒(=編成長/列車速度) ずつずれていることと、各バルスの符号が逆転していることを除けば、 全体的な波形のパターンは前半の先頭部の突入・退出による圧力波と よく似ている。

次に、退出側の西口に近いB点の波形を見る。はじめの正のパルス 波は、先頭部東口突入により西口から放射される微気圧波である (NMn1)。続いて多重反射による微気圧波(NMn2,NMn3,...)が発生 している。NMn2の後の比較的小さな負のパルス波は、先頭部退出によ り放射されるトンネル退出波である(NEx1)。この波から約0.6秒後に 見られる負のパルス波は、先頭部退出による圧縮波が東口で反射して 膨張波になって戻ってきた時に放射される(負の)微気圧波である (NEx2)。さらにトンネル内を2回以上往復した圧力波による微気圧波 が同じ時間間隔をおいて観測されている(NEx3,NEx4,...)。図3の後 半(5秒以降)では、列車後尾部の突入、退出により発生した圧力波 (TEx,TMn)が観測されている。

測点Mはやや東口によっているが両抗口の中間に位置しているため、 両抗口からの圧力波の影響をともに受けている。圧力波形に見られる 各バルス波の発生原因は上述の測点A,Bの場合と同様に説明できる。 図3の圧力波形を測点Mと測点A,Bで比較すると、坑口からの距離が遠 いにもかかわらず、2つの坑口からの圧力波が重なるため、測点Mの 圧力波形の振幅と測点A,Bでの振幅は同じ程度になっている。

3.2 緩衝工の効果

トンネル入口緩衝工を設置する目的は、列車先頭部のトンネル突入 時にトンネル内に発生する圧縮波波面の圧力勾配を緩やかにし、反対 側坑口で発生する先頭部突入による微気圧波(NMn1)を低減することで ある。しかし、緩衝工を設置すると、後尾部突入による膨張波および 先頭部・後尾部退出による圧縮波・膨張波のいずれの圧力波の圧力勾





配も同様に緩やかになる(図5)。さらに、トンネル坑口での多重反 射により発生する i=2以降の微気圧波もすべて低減している。した がって、緩衝工は短いトンネルの圧力波に対しても有効な対策と いえる。本報告の測定対象のトンネルに対しては、東口:9.6 m、西 口:10.8 mの緩衝工が設置された。



Fig.4 x-t diagram

緩衝工設置後、Type 1車両16両編成が下り線を280 km/hで走行した とき、外部の3測点において測定された圧力波形を図5に示す。

緩衝工の設置前後で図3と図5を比較すると、圧力波形の全体パター ンはあまり変らないが、緩衝工設置後、微気圧波が低減している。特 に、*i*-2以降の多重反射による微気圧波の低減が著しい。3箇所の測点 の中では測点Mでもっとも顕著な低減効果が現われている。一方、突 入波(NEn1, TEn1)、退出波(NEx1, TEx1)に関しては、微気圧波のよう な低減効果は見られない。これは、緩衝工の主目的を微気圧波低減に おいているためであり、突入・退出波低減を目的とする場合は、緩衝 工の形状をさらに改良するなどの対策¹¹が必要である。

3.3 圧力波形の減衰

緩衝工を設置すると、列車の突入・退出時の最初の段階で圧力勾配 を低減できるので、i=2以降の坑口での多重反射による圧力波もすべ て低減できる。一方、緩衝工がトンネル坑口に設置されると、トンネ ル内から伝播してきた圧力波がその坑口で反射する時にも影響が現わ れる。以下では、列車後尾部がトンネルを退出した後の列車がトンネ ル内に無い状態での(坑口での多重反射による)微気圧波の減衰の様 子を調べる。図6は、図3、図5の下りType 1列車におけるA点の圧力波 形である。後尾部退出後、減衰振動を示す状態になってからの波形を 対象に、7周期分のpeak-to-peak 振幅量 h_aを読み取り(例えば、h_i = ①-①')、比率 h_{ail}/ h_aを求める。図に示す7波分についてこの比 率の平均値を計算し、減衰比と定義する。すると、緩衝工設置前の減 衰比は0.89、緩衝工設置後は0.81という結果が得られる。このことか ら、緩衝工設置によりトンネル内圧力波の坑口での反射の際の減衰が 大きくなっている、すなわち反射率が低下していることがわかる。









4 おわりに

延長100m程度の短いトンネルの坑口で発生する圧力波に関する現地 測定の結果を対象に、解析・検討を行い、以下のことが明らかになった。

- (1) 短いトンネルの外部では、列車先頭・後尾部の突入・退出 による微気圧波、トンネル内圧力波の坑口での多重反射に よる微気圧波、さらにトンネル突入・退出波が、短時間に 継続して発生し、振動的な圧力波形が観測される。この振 動数は、両端開口の管の共鳴周波数と一致する。
- (2) 短いトンネルの両抗口の中間に位置する外部地域では、両 抗口で発生する圧力波の影響をともに受ける。

(3) 緩衝工を設置すると、微気圧波および多重反射による微気 圧波が低減するとともに、振動の減衰が大きくなり、波形 の振動が緩和される。これは、緩衝工による突入・退出時 圧力波の圧力勾配低減と緩衝工によるトンネル内圧力波の 反射率低下によるものと考えられる。

文 献

- 原朝茂:高速でトンネルに突入する場合に列車に作用する空気 カ、日本機械学会論文集(第2部)、Vol.26、No.171、 pp.1581-1586、1960
- 山本彬也:新幹線トンネルの圧力変動・空気抵抗・トンネル換 気、鉄道技術研究報告、No.871
- 小沢智:トンネル出口微気圧波の研究、鉄道技術研究報告、 No.1121、1979
- 飯田雅宣、福田傑、菊地勝浩:列車のトンネル突入時に突入側 坑口から放射される圧力波の数値解析、日本機械学会論文集(B 編)、Vol.66、No.651、pp.2861-2868、2000
- 5) 田中靖幸、菊地勝浩、飯田雅宣、高橋亮一:列車のトンネル突
 入・退出時に坑口から放射される圧力波の現地測定、日本機械
 学会論文集(B編)、Vol.67、No.662、pp.2470-2477、2001
- 6) Maeda, T., Matsumura, T., Iida, M., Nakatani, K., Uchida, K.: Effect of shape of train nose on compression wave generated by train entering tunnel, Proc. Int. Conf. Speedup Tech. Rail. and Maglev Vehicles, Vol.2, pp.315-319, 1993
- 7) 田中靖幸、飯田雅宣、福田傑、菊地勝浩:列車のトンネル突入時に突入側坑口から放射される圧力波の低減対策に関する模型実験、日本機械学会第79期流体工学部門講演会講演論文集、 No.01-3、2001