

新幹線列車の突入によりトンネル入口に生じる圧縮波

眞下, 伸也
西日本旅客鉄道 (株)

仲津, 英治
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

青木, 俊之
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

船崎, 好助
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

他

<https://doi.org/10.15017/17322>

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 15 (4), pp.351-357, 1994-03-01. 九州大学大学院総合理工学研究科

バージョン :

権利関係 :

新幹線列車の突入によりトンネル入口に生じる圧縮波

眞下 伸也*・仲津 英治*・青木 俊之**

船崎 好助***・松尾 一泰**

(平成5年11月30日 受理)

Entry Compression Wave generated by Shinkansen Train entering Tunnel

Shinya MASHIMO*, Eiji NAKATSU*, Toshiyuki AOKI**
Kousuke FUNASAKI*** and Kazuyasu MATSUO**

When a high-speed railway train enters a tunnel, it generates a compression wave ahead of it. Then the wave is propagated through the tunnel, and causes a pressure pulse which is called a micro-pressure wave when it arrives at the tunnel exit. In the past, compression waves generated by Shinkansen trains entering various tunnels were measured by West Japan Railway Company. The present paper shows the results of prime parameters such as pressure rise and waveform of the compression waves near the tunnel entrance measured in Shinkansen train-tunnel system. Using these results, the formation process of compression wave by a train entering a tunnel is discussed.

1. ま え が き

高速鉄道列車がトンネルに突入する際には、Fig. 1に示すように、トンネル入口にて圧縮波が発生し、速度 U で前方へ伝播する。この入口圧縮波が通過した後は、圧力が大気圧 p_1 から p_2 に増加し、速度 u_2 の空気の流れが生じる。この入口圧縮波の性質は、トンネルの

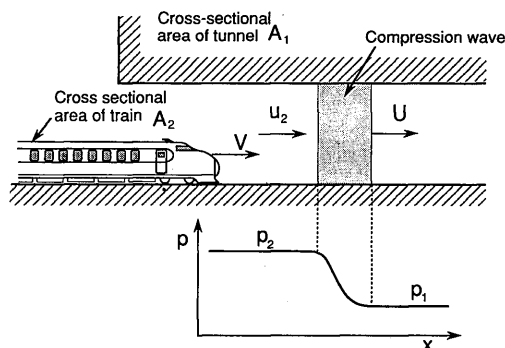


Fig. 1 Schematic sketch of entry compression wave generated by train entering tunnel

*西日本旅客鉄道株式会社

**エネルギー変換工学専攻

***エネルギー変換工学専攻修士課程

断面積 A_1 、列車の断面積 A_2 、列車の入坑速度 V 、列車の先頭部の形状などに大きく左右されることなどがわかっている^{1)~4)}。また、この入口圧縮波がトンネル内を伝播し、トンネル出口に達した時に、トンネル微気圧波と呼ばれるパルス状の圧力波を坑口より外部へ放射し、その大きさは出口に達した圧縮波における、圧力の時間勾配の最大値に比例することなども知られている⁵⁾⁶⁾。

過去に、実際に新幹線列車がトンネルに突入する時に発生する入口圧縮波の測定が、トンネル入口にて行われた。そこで本報では、それらの結果を入口圧縮波の主要なパラメータについてまとめるとともに、入口圧縮波の形成過程について解析を試みた。

2. トンネル寸法形状と測定方法

測定を行ったトンネルは、山陽新幹線のAトンネル(長さ 3409m)、およびBトンネル(長さ 346m)で、いずれも断面積 A_1 は 63.4m^2 である。両トンネル内部の東坑口近くで測定を行ったが、測定位置の東坑口からの距離 x_0 はともに 60m で、トンネル壁面のレール面高さに圧力計を設置し、東坑口から突入する下り列車が形成する入口圧縮波による圧力変動を測定した。使用した圧力計は、ST 研究所製の PD80HA 絶対圧計

である。付近の地形は、Aトンネルは、東坑口から約120m 東方に、隣のトンネルの坑口があり、そこまでの間はゆるやかな谷部で、高架橋にて渡る構造となっており、Bトンネルも、東坑口から約180m 東方に、隣のトンネルの坑口があり、そこまでの間はゆるやかな谷部で、そこを盛土にて渡る構造となっている。軌道構造は、Aトンネルは測定位置付近のトンネルの内部、および外部が共にスラブ軌道、Bトンネルはバラスト軌道となっている。

今回の測定の対象とした列車の車両形式は、新幹線電車の0系、および100系であり、それぞれの先頭部長さ L_{head} (車両の先端から断面積が一定になるまでの長さ) は順に4.7m、7.6m で異なっているが、断面積変化のパターンは類似しており、最終的な車両断面積 A_2 はそれぞれ順に12.2m²、12.9m² である。特に100系車両の断面積は先端より4.7m の位置、すなわち0系車両の先頭部長さの位置において、断面積が12.2m² に達しており、そこからの断面積変化はわずかである。

3. 測定結果と考察

3.1 トンネル入口圧縮波の波形

Fig. 2 に測定された圧力変動、すなわち入口圧縮波の波形の一例を示す。縦軸の圧力は、いずれもゲージ圧である。これらは同程度の速度にて突入した0系列車と100系列車による入口圧縮波であるが、いずれの波形も圧力が $\Delta p = 0$ 、すなわち大気圧の状態から急激に上昇した後にゆるやかな上昇となり、そして急激な下降へ転じたことを示す結果となっている。また100系の波形では、ゆるやかに上昇している間に突起状の圧力変動がみられ、これはパンタ部の影響と思わ

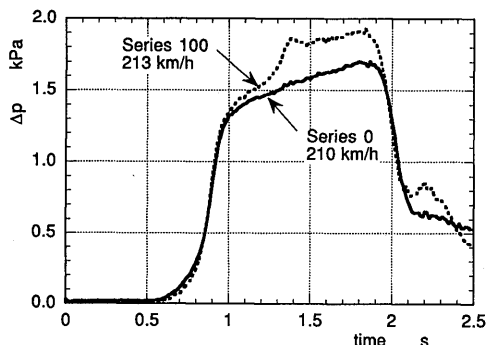


Fig. 2 Typical waveforms of compression wave measured at entrance of tunnel

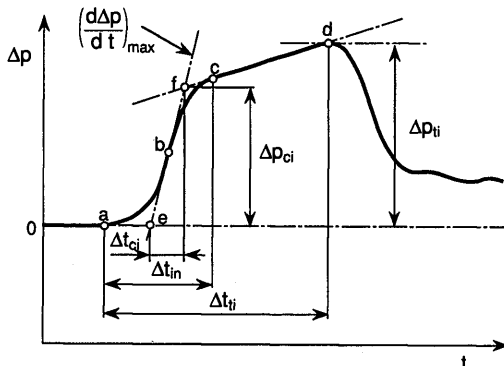


Fig. 3 Model waveform of entry compression wave

れる。0系と100系を比較すると、最初の急激な圧力上昇、すなわち入口圧縮波の波面については、勾配や上昇量にさほど差がない結果となっている。しかしながら、次のゆるやかな上昇については、100系の上昇量は0系のそれよりも著しく大である。

測定より得られた入口圧縮波波形のモデル図を Fig. 3 に示す。図中に示すように、入口圧縮波の圧力が、大気圧の状態、すなわち $\Delta p = 0$ から上昇を開始する点を a、急激な上昇を終了する点を c、その間の圧力の時間勾配が最大となる点を b、その後のゆるやかな上昇から降下に転じる点を d とし、点 b における波形の接線において、点 c における波形の接線との交点を f、大気圧を示す線との交点を e とする。以上の各点を定めた上で、点 f における圧力を Δp_{ci} 、点 d における圧力を Δp_{di} 、点 a から点 c までの時間を Δt_{in} 、点 d までの時間を Δt_{ci} 、点 e から点 f までの時間を Δt_{ci} とする。従って、点 b における圧力の最大時間勾配は

$$(d\Delta p/dt)_{max} = \Delta p_{ci} / \Delta t_{ci} \quad (1)$$

で表される。

さらに、列車突入によりトンネル入口に発生する入口圧縮波の形成モデル図を Fig. 4 に示す。

図 (a) はトンネル入口に列車の先端が突入した瞬間を原点とする x-t 線図である。すなわち横軸はトンネル内部の入口からの距離を示し、縦軸は列車の先端が突入してから時間を示す。列車突入速度 V が突入前後で一定とすると、列車の先端の軌跡は x-t 線図上で、原点 0 を通り、傾きが 1/V の Line-A にて示

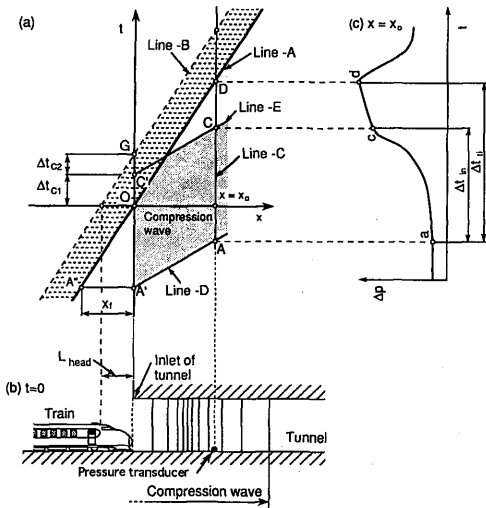


Fig. 4 Wave diagram of entry compression wave generated by train entering tunnel

される。また、これを x の負方向に L_{head} 、すなわち列車の先頭部長さだけ平行移動した Line-B と、Line-A の間の領域は列車先頭部の軌跡を示す。さらに $x = x_0$ を通り x 軸と直角に交わる Line-C は、圧力の測定位置を示し、これと Line-A との交点を D とする。図 (b) は $t = 0$ すなわち列車の先端がトンネル入口に突入した瞬間の状態を現す。図 (c) は $x = x_0$ の位置にて測定される入口圧縮波波形を示す。この図における a, c, d の各点は Fig. 3 の点 a, c, d にそれぞれ対応する。今回の解析では、図 (c) における点 d を、列車の先端が測定地点を通過した時点とみなす。そのため図 (a) の点 D に対して、図 (c) の点 d が時間的に一致するように、図 (c) の時間軸は調整されている。入口圧縮波が、そのすべての形成過程において、発生と同時に一定の音速 a_1 にて伝達されるとするならば、図 (a) において、図 (c) の点 a, c に対応する点 A, 点 C から $1/a_1$ の傾きを持つ直線 Line-D, E をそれぞれトンネル入口の方へ引くことにより、入口圧縮波の形成と列車位置の関連について考察を加えることができる。そこで Line-D, E と、 t 軸との交点をそれぞれ A', C' とし、点 A' を通り x 軸に平行な線と Line-A の交点を A" として A'A" を距離 x_f とする。また $\overline{OC'}$ を時間 Δt_{c1} とし、Line-B と t 軸の交点を G として、 $\overline{GC'}$ を時間 Δt_{c2} とする。以上の $x_f, \Delta t_{c1}, \Delta t_{c2}$ の各値は、Fig. 4 から分かるよ

うに、圧力の測定位置 x_0 、音速 a_1 、列車速度 V 、列車の先頭部長さ L_{head} および上で定めたパラメータ $\Delta t_{ti}, \Delta t_{in}$ から幾何学的に求められる。

測定された入口圧縮波波形から、以上のように定められたパラメータを対象として抽出し、その結果の考察を以下に行った。

3.2 入口圧縮波の強さ

列車速度 V に対する入口圧縮波の強さ Δp_{ci} 、および Δp_{ti} の実験値を Fig. 5 に示す。 Δp_{ci} と V の関係は下記の式により理論的に求められることが知られている¹⁾⁶⁾。

$$\Delta p_{ci \cdot theo} = \frac{1}{2} \gamma P_1 M^2 \left[\frac{1 - \phi^2}{\phi^2 + (1 - \phi^2)M - \gamma M^2 (1 - \frac{1}{2} \phi^2)} \right] \quad (2)$$

ここで、 γ は空気の比熱比、 M は列車のマッハ数 $M \equiv V/a_1$ 、 ϕ は断面積比 $\phi \equiv (A_1 - A_2)/A_1$ である。これによる結果も、0 系列車の場合を実線で、100 系列車の場合を破線で同図中に示す。図より、 Δp_{ci} の実験値は、理論線と比較してバラつきはあるものの、列車速度 V と共に増加する傾向は類似している。また 0 系と 100 系の理論線による値の違いは、式 (2) から分かるように車両断面積 A_2 の違いによるものであるが、車両形式による実験値の違いは見られず、0 系と 100 系の A_2 の差程度では、実際には Δp_{ci} の値に殆ど影響を及ぼさないとと思われる。またトンネル別では、スラブの A トンネルよりパラストの B トンネルの方が、実験値はやや大きい傾向にある。一方、 Δp_{ti} の実験値も列車速度 V とともに増加する傾向が、 Δp_{ci} と同

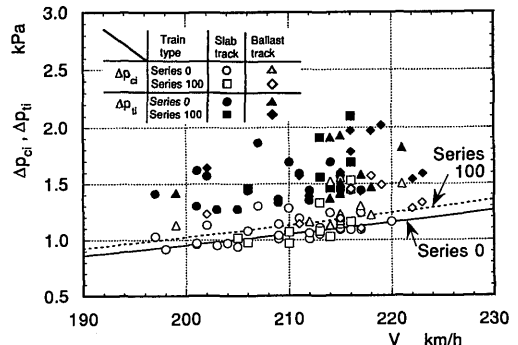


Fig. 5 Relation between $\Delta p_{ci}, \Delta p_{ti}$ and train velocity

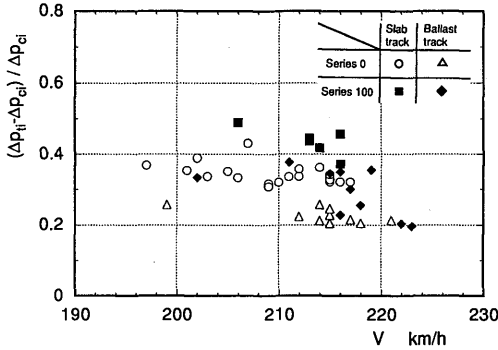


Fig. 6 Relation between $(\Delta p_{t_i} - \Delta p_{c_i}) / \Delta p_{c_i}$ and train velocity

様に認められる。

従来、Fig. 3 に示す入口圧縮波波形における、最初の急激な圧力上昇値 Δp_{c_i} や、圧力の最大時間勾配 $(d\Delta p/dt)_{max}$ に関してはよく研究されてきたが、その後のゆるやかな圧力上昇の値 $(\Delta p_{t_i} - \Delta p_{c_i})$ については、その発生メカニズムが不明にもかかわらず、まったく研究がなされていない。そこで、本報ではそのゆるやかな圧力上昇を検討するために、各測定列車ごとに $(\Delta p_{t_i} - \Delta p_{c_i}) / \Delta p_{c_i}$ の実験値を算出した。その結果を列車速度 V に対して Fig. 6 に示す。図より、その値は大きいところで0.5程度、小さいところでも0.2程度あり、これより急激な圧力上昇の値 Δp_{c_i} に対して、ゆるやかな圧力上昇の値 $(\Delta p_{t_i} - \Delta p_{c_i})$ が相当量あることがわかる。また、車両形式やトンネルによって $(\Delta p_{t_i} - \Delta p_{c_i}) / \Delta p_{c_i}$ の値が異なることもわかる。すなわち、0系より100系の方が大きく、バラストのBトンネルより、スラブのAトンネルの方が大きい傾向にある。さらに全体的に、列車速度 V の増加に対して、わずかであるがその値が減少する傾向が見られる。 Δp_{c_i} から Δp_{t_i} までの圧力上昇は、3.5にて述べるが、列車の先端がトンネル入口に突入してから形成されるものであり、列車の形状や軌道構造に深く関係していると考えられる。これは今後の課題である。

3.3 入口圧縮波波面の圧力の最大時間勾配

列車速度 V に対する Δt_{c_i} の実験値を Fig. 7 に示す。図中の曲線は、入口圧縮波の Δt_{c_i} が列車の先頭部長さと列車速度の比、

$$\Delta t_{c_i} \cdot \text{theo} = L_{\text{head}} / V \quad (3)$$

で表されるとしたときの理論線である。図よりわかる

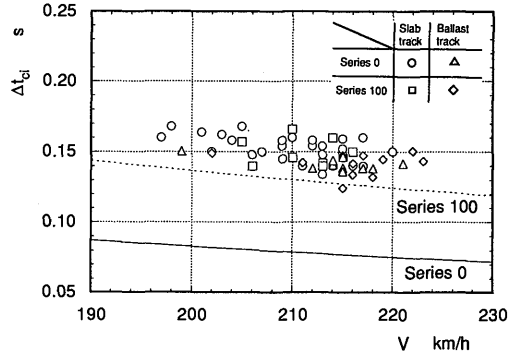


Fig. 7 Relation between Δt_{c_i} and train velocity

ように、実験値は理論線と比較して、全体的に大きい。列車速度 V の増加に対し減少する傾向は類似している。また、車両形式による実験値の違いは認められず、これより0系と100系では、実質的には L_{head} の差が殆どないことがわかる。トンネル別では、バラストのBトンネルよりスラブのAトンネルの方が、実験値はやや大きい傾向にある。

前述の Δp_{c_i} と Δt_{c_i} より、 $(d\Delta p/dt)_{max}$ の実験値を算出した結果を、列車速度 V に対し Fig. 8 に示す。同図中に、式(2)の $\Delta p_{c_i} \cdot \text{theo}$ と、式(3)の $\Delta t_{c_i} \cdot \text{theo}$ を前述の式(1)に代入して得られる理論線も示す。図に示すように、実験値は全体的に理論値より小さいが、列車速度 V と共に増加する傾向は類似している。車両形式による実験値の違いはみられないが、トンネル別では、スラブのAトンネルよりバラストのBトンネルの方が、実験値はわずかながら大きい傾向にあり、これは Fig. 5 の Δp_{c_i} と Fig. 7 の

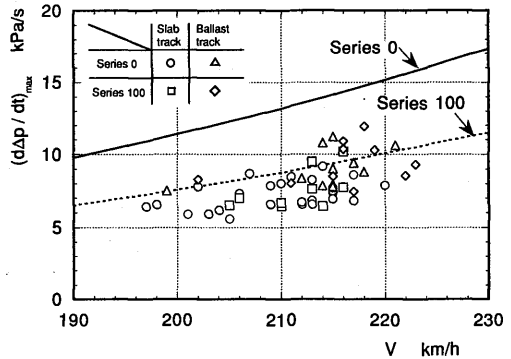


Fig. 8 Relation between $(d\Delta p/dt)_{max}$ and train velocity

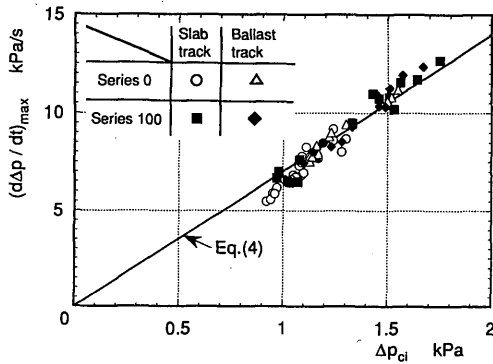


Fig. 9 Relation between $(d\Delta p/dt)_{\max}$ and Δp_{ci}

Δt_{ci} の実験値の傾向からも推測される。

次に、 Δp_{ci} の実験値に対する $(d\Delta p/dt)_{\max}$ の値の結果を Fig. 9 に示す。図中の実線は

$$(d\Delta p/dt)_{\max} = 7\Delta p_{ci} \quad (4)$$

で表される実験線である。図より、車両形式、トンネルによる実験値の違いは見られないが、 $(d\Delta p/dt)_{\max}$ と Δp_{ci} との間に、かなり明確な比例関係があることがわかる。かなり明確な比例関係があることがわかる。すなわち、入口圧縮波の波面形状は車両形式、トンネルに関わらず、 Δp_{ci} に対して相似形であることを意味している。

3.4 入口圧縮波のその他のパラメータ

列車速度 V に対する Δt_{ti} の実験値を Fig. 10 に示す。図中の破線は実験線である。図より、 Δt_{ti} の値は、列車速度 V の増加に対して減少傾向にあり、車両形式による違いは見られず、また、トンネル別では、バラストの B トンネルよりスラブの A トンネルの方が、

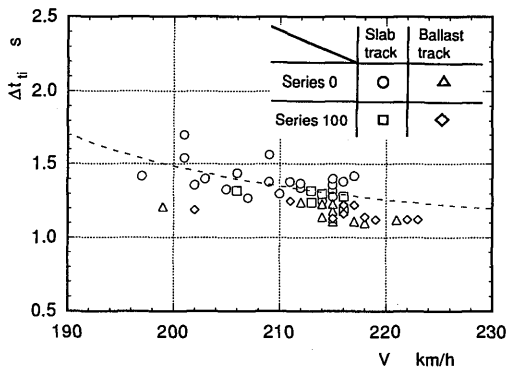


Fig. 10 Relation between Δt_{ti} and train velocity

大きい傾向にあることがわかる。

列車速度 V に対する Δt_{in} の実験値を Fig. 11 に示す。図よりわかるように、 Δt_{in} の値はバラつきが大きく、列車速度 V に対する傾向や、車両形式による違いはみられず、トンネル別では、スラブの A トンネルよりバラストの B トンネルの方が、大きい傾向にあることがわかる。

次に、入口圧縮波の波形形状の違いを示すために、 $\Delta t_{in}/\Delta t_{ci}$ の実験値を算出した。その結果を列車速度 V に対し Fig. 12 に示す。図中の破線は実験値を結んだ実験線である。図より $\Delta t_{in}/\Delta t_{ci}$ の値は、列車速度 V と共に増加する傾向がわずかながら見られ、車両形式による違いはみられないが、トンネル別では、スラブの A トンネルよりバラストの B トンネルの方が大きいことが明確にわかる。これは、スラブの A トンネルとバラストの B トンネルで、入口圧縮波の波形形状が大きく異なることを示す。すなわち、Fig. 3 に示す入口圧縮波の波形形状において、 Δt_{ci} の長さに対する

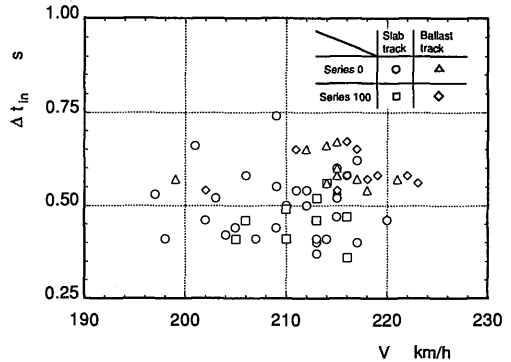


Fig. 11 Relation between Δt_{in} and train velocity

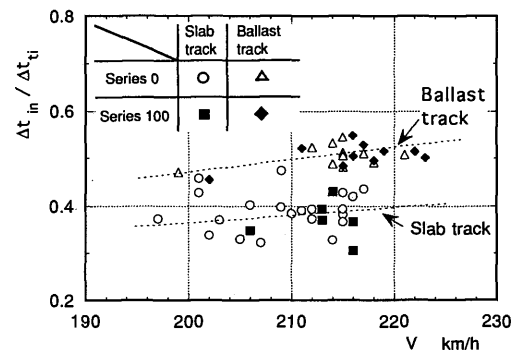


Fig. 12 Relation between $\Delta t_{in}/\Delta t_{ci}$ and train velocity

Δt_{in} の長さの割合が、バラストのBトンネルの方が、かなり大きいこととなる。

3.5 入口圧縮波の形成過程

列車速度 V に対する x_f の実験値を Fig. 13 に示す。 x_f の値は、列車の先端がトンネル入口にどれだけ接近した時に、入口圧縮波の形成が開始されるかを示す指標となる。図より、いずれの x_f の値も $x_f > 0m$ なので、入口圧縮波は Fig. 4 に示した様に、列車の先端がトンネルに突入する時点より、かなり以前からその形成を開始していることがわかる。また、 x_f の値は、車両形式による違いははっきりとは認められないが、トンネル別では、バラストのBトンネルよりスラブのAトンネルの方が、かなり長い距離になっている。さらに列車速度 V の増加に対して、スラブのAトンネルではわずかに減少傾向にあり、バラストのBトンネルではわずかに増加傾向にある。いずれの場合も x_f の値は 25m 前後で、この長さは新幹線列車の一車両分の長さ 25m に相当する。

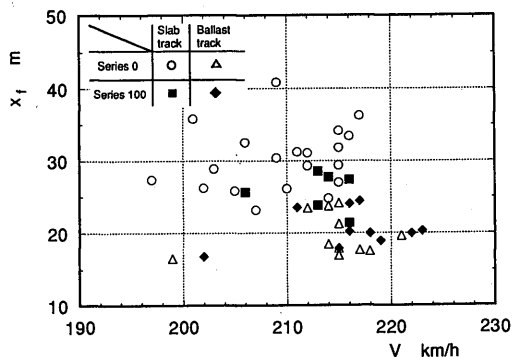


Fig. 13 Relation between x_f and train velocity

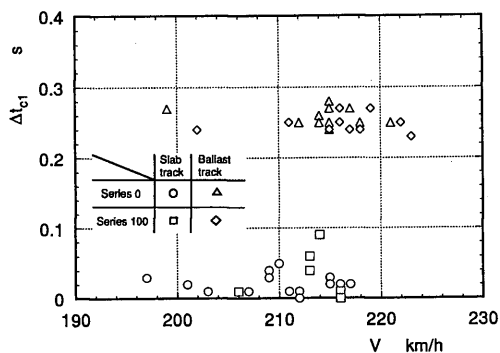


Fig. 14 Relation between Δt_{c1} and train velocity

次に列車速度 V に対する Δt_{c1} の実験値を Fig. 14 に示す。 Δt_{c1} の値は、列車の先端がトンネル入口に突入した時点で、入口圧縮波の形成における、圧力の最初の急激な上昇の過程を終了するかどうかを示す指標となり、 $\Delta t_{c1} = 0s$ に近いほどその傾向が強い。図において Δt_{c1} の値の、車両形式による違いは認められないが、トンネルによる違いは明らかである。すなわち、スラブのAトンネルでは、いずれの値も $\Delta t_{c1} = 0s$ にかかなり近く、圧力の急激な上昇の終了と列車の先端のトンネル突入の時期が近いことを示す。また、バラストのBトンネルでは、いずれの値も 0.25s 前後であるため、列車の先端がトンネルの内部にかなり入ってから、しばらくして圧力の急激な上昇を終了していると考えられる。いずれのトンネルにおいても $\Delta t_{c1} \geq 0s$ なので、圧力の急激な上昇の後のゆるやかな上昇が、トンネル内に入った後の列車によって発生していることとなる。また、 Δt_{c1} の値の列車速度 V への依存性はない様である。

最後に、列車速度 V に対する Δt_{c2} の実験値を Fig. 15 に示す。 Δt_{c2} の値は、列車の先頭部が全てトンネル内に突入した時点で、入口圧縮波の形成における、圧力の最初の急激な上昇の過程を終了するかどうかを示す指標となり、 $\Delta t_{c2} = 0s$ に近いほどその傾向が強い。図より、バラストのBトンネルにて、車両形式による Δt_{c2} の値の違いが見られるが、前述したように100系の L_{head} は0系のそれに実質的に等しいと考えられるので、その様に訂正すると両者は殆ど一致する。トンネルによる Δt_{c2} の値の違いは、Fig. 14 と同様に明らかである。即ち、スラブのAトンネルでは、およそ $\Delta t_{c2} = 0 \sim 0.1s$ で、先頭部が全て突入するまでに、圧力の急激な上昇を終了しており、バラスト

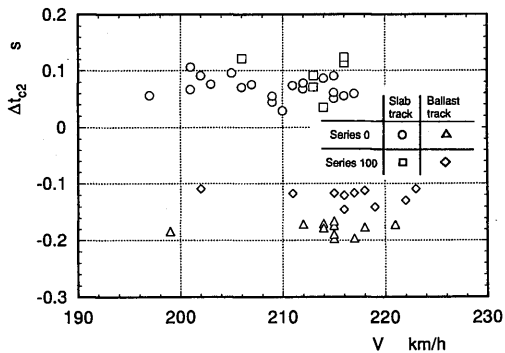


Fig. 15 Relation between Δt_{c2} and train velocity

のBトンネルでは、およそ $\Delta t_{c2} = -0.2 \sim -0.1s$ なので、逆に先頭部が全て突入しても、圧力の急激な上昇を終了していないと考えられる。ただし両トンネルにおいて、 Δt_{c2} の値の列車速度 V への依存性はない様である。

4. あとがき

新幹線列車がトンネルに突入するときに発生する入口圧縮波を測定した。その結果を要約すると以下の通りである。

(1) Fig. 3 に示す入口圧縮波における Δp_{ci} , Δt_{ci} , および Δt_{in} に関しては、0系車両と100系車両による測定値の違いは見られない。従って、入口圧縮波の波面の急激な上昇に対して、重要なパラメータである車両断面積と、先頭部長さについて、0系車両と100系車両では実質的な違いが殆どないと考えられる。

(2) 入口圧縮波において、波面の急激な上昇の後、緩やかな上昇が相当量存在することが確認され、その上昇量は0系車両と100系車両でかなり差があることがわかった。

(3) バラストとスラブの軌道構造のトンネルでの測定をすることにより、入口圧縮波形成メカニズムが

両トンネルではかなり異なることが示された。

(4) 入口圧縮波形成が始まる時点での、列車の先端とトンネル入口の距離 x_f についての測定結果から、列車の先端が、トンネル入口に突入するよりかなり以前から、すなわち $x_f = 25m$ 程度での地点で、入口圧縮波の形成が開始していることがわかった。

本研究では、トンネルでの現地測定によるデータから、新幹線列車が発生するトンネル内入口圧縮波について、その定性的な性質を主とする有益な結果が得られた。今後、この結果を元に理論的な解析を進め、トンネル内入口圧縮波の解明を行う予定である。

参 考 文 献

- 1) 原, 鉄道技術研究報告, 153, 1(1960).
- 2) Fox, J. A. and Henson, D. A., Proc. Inst. CivilEng., 49, 53 (1971).
- 3) Pope, C. W., British Railway Board, Tech. Aero., 12, 1 (1976).
- 4) 山本, 鉄道技術研究報告, 1230, 1(1983).
- 5) 小沢, 鉄道技術研究報告, 1121, 1(1979).
- 6) 松尾, 機械の研究, 45-6, 656(1993).