

超高速鉄道トンネル内に生じる圧力変動評価

山崎 幹男¹・若原 敏裕²・永長 隆昭³・上野 眞⁴・藤野 陽三⁵

¹正会員 東海旅客鉄道(株)総合技術本部 リニア開発本部(〒103-8288 東京都中央区八重洲1-6-6 八重洲センタービル 8F)

²正会員 博士(工学) (株)大崎総合研究所(〒100-0011 東京都千代田区内幸町2-2-2 富国生命ビル 27F)

³正会員 東海旅客鉄道(株)総合技術本部 リニア開発本部(〒103-8288 東京都中央区八重洲1-6-6 八重洲センタービル 8F)

⁴正会員 (財)鉄道総合技術研究所 浮上式鉄道開発本部(〒103-8288 東京都中央区八重洲1-6-6 八重洲センタービル 8F)

⁵フェロー Ph.D. 東京大学大学院 教授 工学系研究科 社会基盤工学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

本研究は、時速500kmを越える超高速鉄道トンネル内の圧力現象を解明し、トンネル覆工構造の合理的な耐風圧設計を実現する目的から、設計・照査に不可欠な最大圧力変動を評価しようとするものである。まず、実機トンネル内の圧力変動測定結果から、試験車両の走行形態(列車トンネル突入・列車通過・退出・すれ違い)毎に、列車速度と圧力変動量の関係を求めた。また、3次元圧縮性流体を対象に、列車トンネル突入・退出・列車通過の数値流体解析を実施し、測定結果との比較から解析結果の妥当性を検証した。さらには、将来の営業線を想定し、列車長約400m、設計速度条件として、単独列車550km/h、2列車相対速度1000km/hの場合のトンネル内の最大圧力変動(最大正圧および最大負圧)の算定を行い、トンネル覆工構造の設計荷重として評価した。

Key Words : maglev linear motor vehicle high-speed train tunnel, pressure wave, pressure measurements, tunnel lining, computational fluid dynamics

1. はじめに

超高速磁気浮上式鉄道の研究・開発は、東海道新幹線開業(1964年10月)の2年前からすでに開始され、現在、世界初のシステムとして山梨リニア実験線(走行試験区間18.4km)における走行試験により、リニア中央新幹線の実現に向け、着実に進化し完成度の向上が図られている。

山梨リニア実験線での本格的な走行試験は平成9年4月から開始され、平成12年3月までの3年間で、最高速度552km/hを達成し、相対速度1,003km/hまでの高速すれ違い試験および高速連続走行試験などが実施された。このように、時速500kmを越える超高速鉄道システムを考える場合、列車の速度向上に伴い、様々な空気力学的現象が顕著となる。

列車の高速走行に伴う空気力学的な現象を考える場合、長大橋や高層ビルなどの耐風設計とは異なり、空気の圧縮性を考慮する必要がある。また、圧縮性流体を想定する航空機の設計とも異なり、列車が、1)非常に細長く、2)地表直上を高速で走行し、3)対向列車とすれ違い、4)トンネル内を走行する、などの特徴から、高速鉄道ならではの空気力学的な現象が存在する。このため、これらの特徴に起因する高速鉄道システム固有の空気力学的な現象に対し、列車の走行安全性の確保、乗り心地の向上、沿線環境の保全、走行エネルギー節減、建設コストの低減など、多種多様な観点か

ら、その現象の解明や評価、あるいは、その緩和および低減策に関わる新たな技術開発が望まれている。

鉄道トンネルの覆工構造を考えた場合、トンネル内での列車の高速走行によって生じる風圧現象(以下、圧力変動現象)を解明し、その工学的評価を行うことは、超高速鉄道トンネルを安全かつ低コストで実現する上で極めて重要な検討課題であり、また、将来の営業線では、日本の地形条件を考えるとトンネル延長の割合が多くなることが想定され、空力特性を考慮したトンネルの合理的設計法の確立が重要となる¹⁾。

高速鉄道車両がトンネル内を走行する際には、列車突入に伴う圧力波(=突入波)、列車通過に伴う急激な圧力低下、あるいは、列車退出に伴う圧力波(=退出波)が生じる。また、トンネル内での列車すれ違いによっても、局所的に急激な圧力低下を引き起こす。これらの圧力変動の内、突入波や退出波は音速でトンネル内を伝播し、トンネル坑口において、その大部分は反射し、正負逆転した反射波はトンネル内をこれまでとは逆方向に伝播する。また、残りのごく僅かは、トンネル坑口からパルス状の圧力波(=微気圧波)となって外部に放出される。列車の通過に起因する圧力低下現象は、列車速度で列車と共にトンネル内を移動し、突入波や退出波、あるいは、それらの反射波と複雑に重なり合う。また、列車がトンネルを退出した後も、突入波や退出波はトンネル坑口で反射を繰り返し、トンネル壁面での摩擦による減衰と反射によるエネルギー

損失を伴いつつトンネル内を伝播する^{2)~10)}。

このようなトンネル内の列車走行に伴う圧力変動は、大気圧に対して圧力が上昇する場合には覆工コンクリートに引張応力を生じさせ、圧力が低下する場合には覆工コンクリートの圧縮応力を生じさせる^{11)~13)}。

鉄道トンネルでは、通常、標準工法としてNATMが採用され、その大半の覆工構造は、無筋コンクリートで構成されるため、コンクリート剥落などに対する構造上の安全性を確保する観点から、さらには、疲労によるひび割れや亀裂の進展などに対し耐久性を確保する観点から、覆工構造に作用する圧力変動を正確に評価することが不可欠となる。

トンネル内を列車が走行する際に生じる圧力現象に対しては、当初、列車にかかる空気抵抗の増大からその検討が始まり^{3), 4)}、トンネル坑口で生じる微気圧波(発破音)に対する検討などを中心に、多くの研究がなされている^{5)~8)}。また、これらの検討は、新幹線の開発当初から始まり、その速度向上に伴い、現在でも積極的に研究・開発が行われている^{9), 10)}。

しかし、トンネルの覆工構造に作用する内圧の評価と言った観点からの研究・開発の事例は、必ずしも多いものとは言えない。原²⁾は列車がトンネルに突入した際の圧力上昇を解析的に求めており、実測により時速100kmまで、また、実験により時速200km半ばまでの範囲で、解析式が成り立つことを示している。また、山本^{3), 4)}はトンネル内の流れをポテンシャル流と見なし定式化し、等角写像を利用して列車がトンネル内に突入・通過する際のトンネル内の圧力変動に関する理論式を導いている。ただし、新幹線トンネルを想定しているため、列車速度250km/h前後とマッハ数 $M=0.2$ のオーダーを対象としているため、浮上式鉄道のように時速500kmを越える速度域(マッハ数 $M>0.4$)では、適用外となっている⁴⁾。

また、最近では、計算機能力の著しい発達により、3次元圧縮性流体を対象に、数値流体(Computational Fluid Dynamics: 以下CFD)解析を用いてトンネル内の流れ場、圧力変動、微気圧波などの数値シミュレーションが可能となっており^{14)~16)}、複雑な列車先頭形状やトンネル断面形状、あるいは、トンネル緩衝工などを3次元的な解析格子により再現できるようになってきた^{17), 18)}。

本研究は、超高速鉄道トンネルの覆工構造の合理的な耐風圧設計を実現する目的から、高速車両がトンネル内を走行する際の風圧、すなわち、突入波や退出波による圧力上昇、あるいは、通過やすれ違いによる圧力低下に着目し、トンネル覆工構造の設計・照査に不可欠なトンネル内の最大圧力変動(最大正圧および最大負圧)を評価しようとするものである。

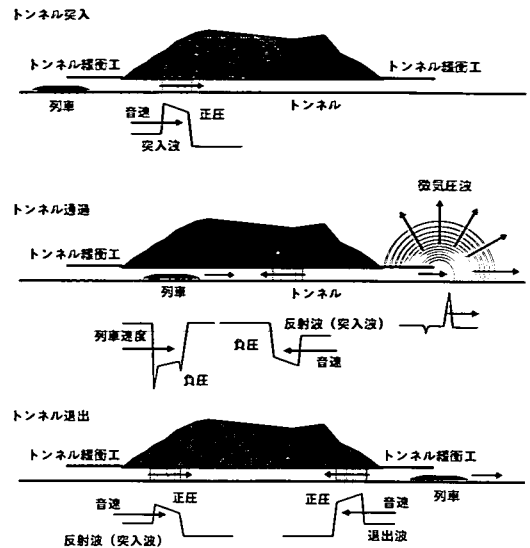


図-1 列車トンネル走行時のトンネル内の圧力現象

本研究では、まず、山梨リニア実験線のトンネルにおいて、試験車両MLX01(3両編成)が実機トンネルに突入・退出・通過・すれ違い走行を行う際の圧力変動を測定し、その特性について考察し、一連の測定結果から、列車の走行形態毎に列車速度と圧力変動量の関係を求めることにした。また、3次元圧縮性流体解析^{14)~16)}を行い、列車トンネル突入時・退出時・列車通過時の圧力変動を求め、数値解析結果と既往の研究で得られている理論解^{3), 4)}を組み合わせ、任意の列車速度と圧力変動の関係式を導く。その結果、導かれた関係式から求められる圧力変動と実機トンネルに対する測定結果との比較を行い解析結果の妥当性を検証する。さらには、将来の営業線を想定し、新幹線と同程度の列車長約400mに対し、設計速度条件として、単独列車550km/h、2列車相対速度1000km/hの場合のトンネル内の圧力変動の算定を行い、トンネル内に生じる最大・最小圧力変動をトンネル覆工構造に作用する設計荷重として評価する。

2. トンネル内の圧力変動現象

図-1は列車トンネル走行時のトンネル内の圧力現象を概念的に示したものである。

列車先頭がトンネルに突入すると、列車により排除されるトンネル内の空気は大半は列車とトンネル壁面の間を通り外部へ吹き出す。その一部は列車前方の空気を圧縮しトンネル内に急激な圧力上昇を生じさせる。また、列車中間部の突入により緩やかな圧力上昇を伴いつつ、列車後尾がトンネル内に入ることによつ

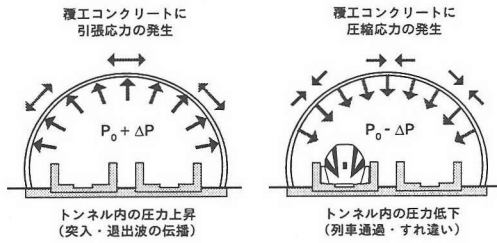


図-2 トンネル内の圧力変動と覆工応力の関係

て圧縮された空気は静穏時のトンネル内圧（≒大気圧）近くまで回復する。これ以降、この列車突入に伴う一連のトンネル内の圧力変動を突入波と呼ぶ。この突入波は音速でトンネル内を伝播し、トンネル出口に到達すると、大部分はトンネル出口で反射（正負反転）し、膨張・圧縮からなる反射波として、それまでとは逆方向にトンネル内を伝播する。また、一部は、パルス状の圧力波となりトンネル出口から微気圧波として外部に放射される⁷⁾。

列車がトンネル内を通過する場合には、上述の突入波とは別に、列車先頭通過による急激な圧力低下が生じ、列車中間部通過に伴う緩やかな圧力低下を生じ、さらに、列車後尾通過により圧力は回復する。この圧力変動は、列車の走行に伴いトンネル内を列車の走行速度で移動する。

列車先頭がトンネル出口から退出すると、列車側面の低圧部にトンネル外部から空気が吸い込まれ、大半は列車側面を通して進行する列車後尾に引き込まれるが、一部はトンネル内の空気を圧縮しトンネル内に急激な圧力上昇が生じさせる。また、列車中間部の退出による緩やかな圧力上昇を生じ、列車後尾がトンネルから完全に退出することにより圧力は回復する。これ以降、この列車退出に伴う一連のトンネル内の圧力変動を退出波と呼ぶ。この退出波も突入波と同じくトンネル内を音速で伝播し、トンネル入口で大半は反射し逆方向に伝播する。また、その一部はトンネル入口から微気圧波として外部に放射される。

このように、列車がトンネル内を高速走行することにより生じた突入波や退出波は、列車の通過による圧力低下現象と複雑に重なり合う。また、列車がトンネルを退出した後も、トンネル壁面の摩擦によるエネルギー損失を伴いつつ重複反射を繰り返して伝播する。

図-2はトンネル内の圧力変動と覆工コンクリートの応力状態を模式的に示したものである。図-2に示すように、圧力変動 ΔP は、大気圧 P_0 に対し正圧 $P_0 + \Delta P$ （圧縮）の場合はトンネルの覆工コンクリートに引張応力を生じさせ、負圧 $P_0 - \Delta P$ （膨張）の場合には覆工コンクリートの圧縮応力を生じさせることになる^{11), 12)}。

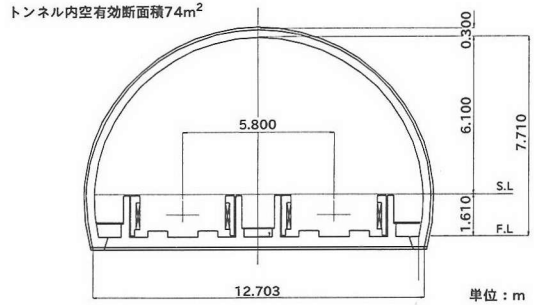


図-3 山梨リニア実験線のトンネル断面図（標準区間）

3. 山梨リニア実験線のトンネル断面設定

トンネル内空断面は、所定の建築限界外に施工上あるいは保守上必要な余裕を考慮し、地形、地質に応じた形状とするのが一般的である。

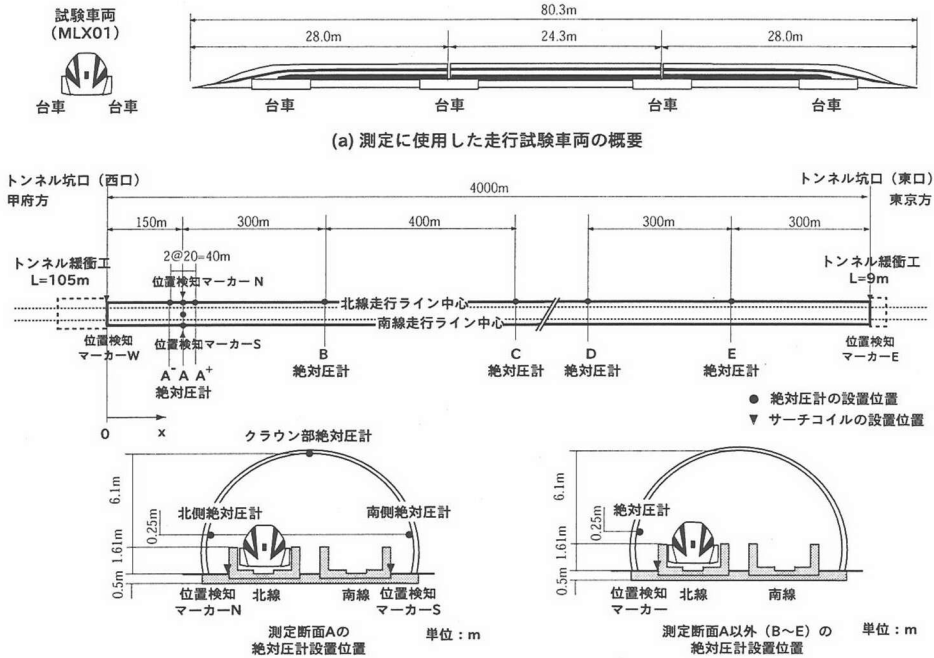
浮上式鉄道では設計最高速度は550km/hとなり、在来型新幹線に比べ空気抵抗による走行抵抗の増大やトンネル内の圧力変動が覆工構造に及ぼす影響を考慮することが必要となる。とりわけ空気抵抗は列車の推力を大きく左右するため、車両・トンネル断面積比 R （ $= a/A$ ：車両断面積 a とトンネル内空有効断面積 A の比）を、空気力学的観点から設定しておく必要がある。また、これらの要素のほかに、経済性（建設コストやランニングコスト）、施工性などを総合的に勘案して、車両・トンネル断面積比 $R = 0.12$ を適切と判断した。このため、車両断面積 $a = 8.9\text{m}^2$ に対し、所定のトンネル内空有効断面積は $A = 74\text{m}^2$ となる。また、トンネル幅 B は、ガイドウェイ中心間隔、ガイドウェイ内空幅および通路幅を考慮し、 $B = 12.7\text{m}$ 程度と計画した。高さ H については内空有効断面積を満足させる高さとして、路盤よりトンネル天端まで、 $H = 7.7\text{m}$ とした¹⁾。

この結果、山梨リニア実験線のトンネル断面（標準区間）は、図-3に示すような内空有効断面となり、その率は0.64程度と新幹線トンネルの偏平率0.83に比べるとかなり偏平な断面形状となっている。

4. トンネル内の圧力変動測定の概要

山梨リニア実験線のトンネルにおいて、列車がトンネル内で突入・退出・通過・すれ違い走行を行う場合の圧力変動を測定した。

図-4は、トンネル内の圧力変動測定の概要を示したものである。図-4(a)は測定時の試験車両MLX01（3両編成：編成長 $l = 28.0 + 24.3 + 28.0 = 80.3\text{m}$ 、前面投影断面積 $a = 8.9\text{m}^2$ ）を示したものである。列車には、ほぼ等間隔で4つの台車があり、台車部には局所的な断



(b) 測定を行ったトンネルの概要と測定機器配置

図-4 トンネル内の圧力変動測定の概要

面積変化を持つ。図-4(b)は、測定を実施したトンネルの概要（長さ $L=4000\text{m}$ 、内空断面積 $A=74\text{m}^2$ ）と測定機器の位置を示している。トンネルの東西の坑口には微気圧波対策用のトンネル緩衝工が設置されており、それぞれ、西口は断面積比（ $=A'/A$ ：緩衝工断面積 A' /本坑断面積 A ）1.4、長さ105mの緩衝工であり、東口は断面積比1.2、長さ9mの緩衝工である。

トンネル内の圧力測定点は、図-4に示すように、トンネル西口側に A^- 、 A 、 A^+ 、 B 、 C 、さらに、トンネル東口に、 D と E である。ただし、本研究では、主として、トンネル西口の測定点 A^- 、 A 、 A^+ およびトンネル東口の測定点 E での測定結果について考察を行う。トンネル西口の測定点 A は、列車がトンネル西口に突入・退出する際に生じる圧力上昇（突入波・退出波）と列車が測定断面を通過する際の圧力低下を測定するため設けた測定点である、図-4のトンネル東口に設けた測定点 E は、トンネル西口で生じた突入波がトンネル内を伝播し東口に到達した際の反射を捉えるために設置したものである。特に、測定点 A では、2列車走行時のすれ違い位置の誤差を緩和し、できる限り列車後端部が測定点ですれ違いうようにする目的から、 $\pm 20\text{m}$ 離れた2点（ A^- と A^+ ）の測定点を設けている。また、測定点 A では、トンネル断面内の圧力分布を測定する目的から、北線側、クラウン部、南線側のトンネル壁面

に3つの絶対圧計を設置している。なお、圧力変動測定には、絶対圧計（ $P=1013\text{hPa} \pm 2000\text{mmH}_2\text{O}$ ）を使用した。さらに、トンネルの東西の坑口には、列車がトンネルに突入・退出する時刻と速度を測定する目的から、列車の通過に反応する列車位置検知マーカーを設置している。また、測定点 A には、列車すれ違い位置の確認を行うための位置検知マーカーを設置している。

トンネル内の圧力変動測定時の列車の走行条件（速度条件）は、1列車単独走行に関しては、東行き走行、西行き走行、いずれの場合も北線走行とし、各々、200km/h、300km/h、400km/h、500km/hであり、また、2列車すれ違い走行時は、列車相対速度500km/h、700km/h、900km/hとした。なお、トンネル内の圧力現象の再現性を確認するため、各々の走行形態・速度条件において、それぞれ2回の測定試番を設定し、圧力変動測定を実施した。

5. トンネル内の圧力変動測定結果

(1) トンネル内の圧力波の伝播特性

図-5と図-6は、単独列車500km/h走行時の圧力変動測定（トンネル北側の絶対圧計）の結果を示したものである。列車の走行と圧力波の伝播を理解する目的から、 $x-t$ ダイアグラムも同時に示している。圧力変

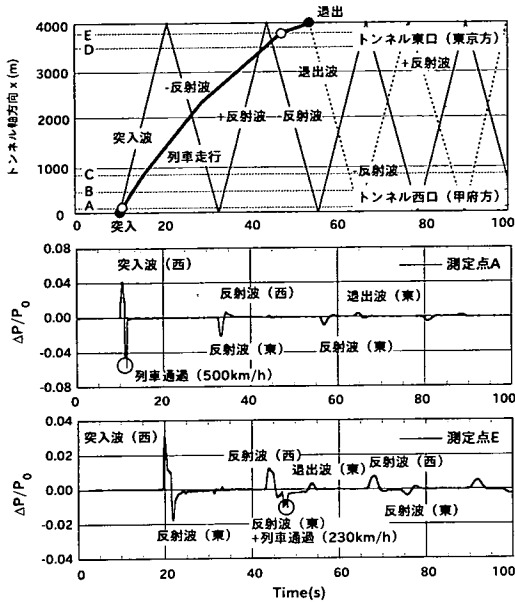


図-5 東行き 500km/h 走行時のトンネル内の圧力変動

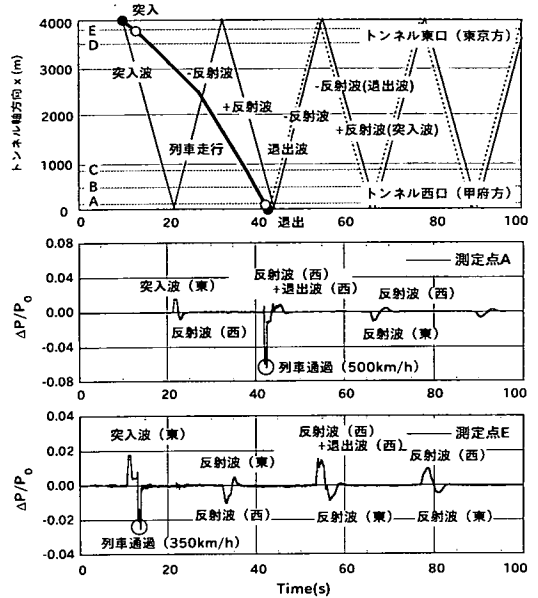


図-6 西行き 500km/h 走行時のトンネル内の圧力変動

動データは、列車トンネル突入 10 秒前から 100 秒間のデータをサンプリングレート $\Delta f=200\text{Hz}$ (アナログフィルターのカットオフ周波数 120Hz) で AD 変換を行いデータを収録した。また、絶対圧計の測定データ $P = P_0 + \Delta P$ は、圧力変動 ΔP を測定ポイントの大気圧 P_0 で基準化した無次元量 $\Delta P/P_0$ で整理している。

図-5は、東行き 500km/h 走行時 (西口 500km/h 突入-東口 210km/h 退出) のトンネル内圧力変動を示している。列車は測定点 A から E に向かって進行する。この場合、トンネル西口の測定点 A では、まず、突入波 ($t=10$ 秒) が観測され、その直後に列車通過による圧力低下を生じる (図中○で囲んだ位置: $t=11\sim 15$ 秒付近)。次に、突入波が東口で反射し負圧の波となってトンネル内を逆方向に進行してきた波が観測される ($t=30\sim 35$ 秒)。さらに、この直後、反射波が西口で再反射し正圧の波となって測定点に通過する ($t=35$ 秒)。また、列車が東口を退出した際に生じた退出波 ($t=65$ 秒) が観測される。これ以降は、この一連の重複反射が繰り返され、トンネル壁面との摩擦による距離減衰と反射による圧力損失を伴いつつ圧力波は減衰する。一方、トンネル東口近くの測定点 E では、まず、トンネル西口での突入波が到達し ($t=20$ 秒前後)、直ぐに東口で反射し負圧の波となって観測される ($t=25$ 秒)。次に、この反射波が西口で反射し正圧の波となり測定点を通り、それとほぼ同時に列車が減速しながら通過する (図中○で囲んだ位置: $t=45\sim 50$ 秒)。また、この直後、トンネル東口での退出波が観測される ($t=55$ 秒)。

ここでの退出波は退出速度が 210km/h まで低下しているため、500km/h 突入波と比べて圧力変動値は小さい。これ以降は、トンネル東口での重複反射が繰り返される。図中の測定点 A および B で観測される反射波の重複反射の間隔 (測定点で反射波が通過し戻ってくるまでの時間) は 24 秒程度であり、トンネル内を一往復する距離 8000m と圧力波の伝播速度 340m/s (=音速) から求まる時間 $T=8000/340\approx 24$ 秒と一致する。

図-6は、西行き 500km/h 走行時 (東口 330km/h 突入-西口 500km/h 退出) のトンネル内圧力変動を示している。図-5の場合とは逆に、列車は測定点 E から A に向かって進行する。この場合、トンネル東口の測定点 E で突入波が観測され ($t=12$ 秒)、列車通過による圧力低下を生じる (図中○で囲んだ位置: $t=15$ 秒前後)。ただし、突入速度が 330km/h と小さいため、圧力値は図-5の測定点 A に示す結果よりも小さい。次に観測されるのは、突入波が西口で反射した反射波が観測され、それに引き続き、反射波の再反射が観測される ($t=30\sim 35$ 秒)、その後、退出波と西口での反射波が重ね合わされた圧力波が観測される ($t=55$ 秒付近)。これは、500km/h 走行時の速度パターン (加速条件) と圧力波の伝播速度の関係で、トンネル西口での列車退出と反射波のタイミングが近接しているために生じた現象である。トンネル西口の測定点 A では、突入波とその反射波が観測された後 ($t=20\sim 25$ 秒)、列車の通過による負圧が観測される (図中○で囲んだ位置: $t=38\sim 42$ 秒付近)。また、この直後、前述したように、突入波の

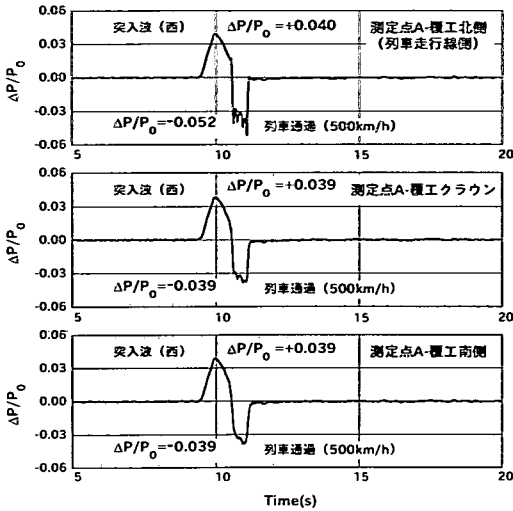


図-7 トンネル断面内の圧力変動 (東行き 500km/h)

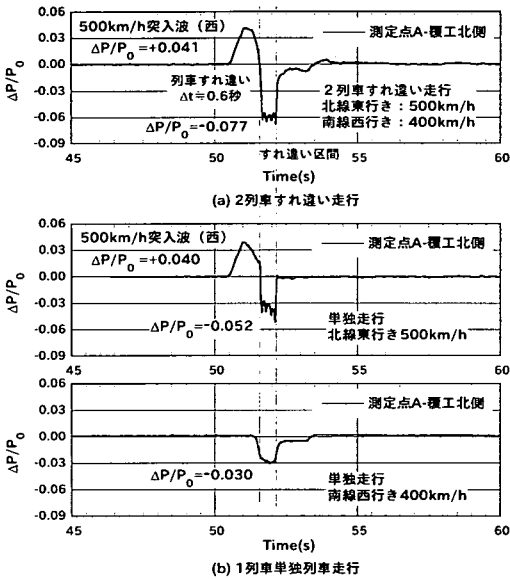


図-8 すれ違い走行時 (900 = 500+400km/h) の圧力変動

反射波と退出波が重畳した圧力波が通過する ($t=45\sim 50$ 秒)。このため、500km/h 走行時では、トンネル西口の測定点 A で独立した退出波の値を測定することはできない。

(2) 1 列車単独走行時の圧力変動

図-7は、測定点 A における北線 500km/h 東行き走行時の圧力変動測定を示したものである。図-5と同様、東行き 500km/h 走行時のトンネル断面内の圧力変動を示している。ただし、図-7では、突入波による圧力上昇と列車通過時の圧力低下の様子を詳細に調べるため、図-5の時刻 $t=5\sim 20$ 秒までを拡大している。図示する

ように、突入波 ($\Delta P/P_0 = \pm 0.04$) は、同一断面内ではほぼ一様であり、平面波と見なすことができる。また、列車通過時の圧力低下は、走行線側である覆工北側の圧力変動 ($\Delta P/P_0 = -0.052$) が、覆工クラウン部や覆工南側における圧力変動 ($\Delta P/P_0 = -0.039$) よりも小さい値を取る。これは、図からも分かるように、覆工北側の圧力低下部にはパルス状の波が重なっているためである。覆工北側は列車が近接して走行するため、列車の局所的な形状 (台車形状) の影響を受ける。その結果、3 両編成の列車を支える 4 台の台車通過によって生じたパルス状の圧力低下が付加される。台車通過による局所的な圧力低下は、クラウン部や覆工南側までは影響を及ぼしていない。

(3) 2 列車すれ違い走行時の圧力変動

図-8は、測定点 A の覆工北側での列車すれ違い走行時の圧力変動を示したものである。図-8(a) は、北線 500km/h 東行き走行列車と南線 400km/h 西行き走行列車が測定点 A の位置ですれ違ったことにより生じた圧力変動 (測定点 A-覆工北側) を示している。また、参考のため、図-8(b) には、図-8(a) と同じ条件で、各々の列車が単独走行した場合の圧力変動波形を示している。両者の関係から、図-8(a) の 2 列車すれ違い時の圧力変動の時刻歴波形は、図-8(b) に示した各々の列車が単独走行する場合の波形を時刻を合わせて重ね合わせた形状と一致し、まさに 2 つの列車が測定点 A においてすれ違った状態 (各々の列車の先頭が同じタイミングで測定点 A を通過した状態) を示している。

図-8(a) に示す 2 列車すれ違いによる圧力低下は $\Delta P/P_0 = -0.077$ であり、列車側面 (各々の対向列車側) の流れ場が単独走行の場合と異なるため、図-8(b) に示す北線 500km/h 東行き走行列車の通過による圧力低下 $\Delta P/P_0 = -0.052$ と南線 400km/h 西行き走行列車の通過による圧力低下 $\Delta P/P_0 = -0.030$ の単なる線形和とした値にはならない。

6. 列車速度と最大圧力変動の関係

トンネル内の圧力変動は列車の走行形態に応じ、その原因も特徴も異なるため、ただ単に静穏時のトンネル内の大気圧 P_0 からの圧力変動を測定結果から読みとるだけでは、現象の全てを把握することにはつながらない。ここでは、個々の要因毎に、トンネル内の圧力変動現象のモデル化を行い、列車速度との関係を論じる。

(1) 圧力変動の考察とそのモデル化

図-9～図-12は、圧力変動測定結果に対し、突入波・列車通過・退出波・反射・すれ違い走行のモデル化を行

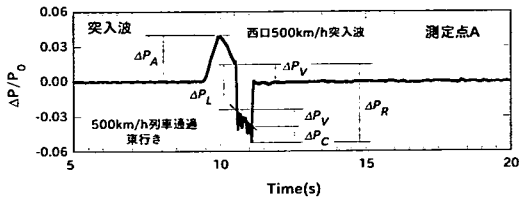


図-9 突入波のモデル化

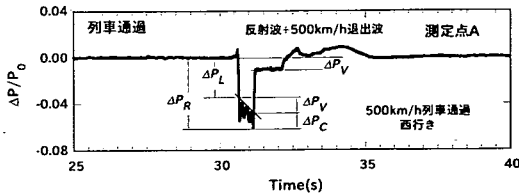


図-10 列車通過のモデル化

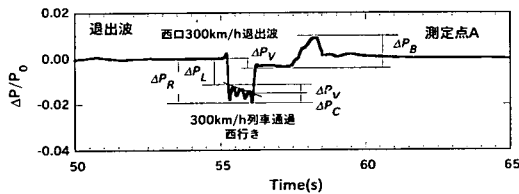


図-11 退出波のモデル化

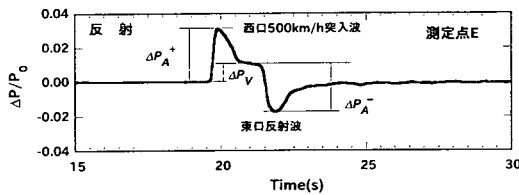


図-12 反射波のモデル化

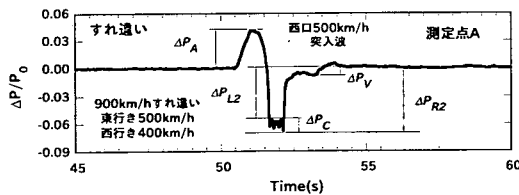


図-13 すれ違いのモデル化

うための模式図を示したものである。

図-9の突入波による圧力上昇を ΔP_A とする。図-9は列車トンネル突入直後の圧力変動を表したもので、この突入波は、列車先頭部がトンネルに突入した際の圧縮波による急激な圧力上昇と列車中間部の突入による緩やかな圧力上昇、さらに、列車後尾突入に伴う膨張波による圧力低下から構成される。列車先頭・後尾突入による圧縮・膨張はほぼ同レベルであり、空気の高粘性に起因するものである。また、列車中間部の突入による圧力上昇は空気の高粘性によるものである。なお、測定の対象とした実機トンネルの西口には、長さ105m

の緩衝工が設置されており、空気の高粘性による圧縮波と膨張波の勾配は緩和され、列車長も短いため、空気の高粘性による圧力上昇も僅かである。図示したように、突入波 ΔP_A が通過した後、トンネル内には空気の高粘性効果による圧力上昇 $+\Delta P_V$ が残る。ただし、突入波通過後、列車通過時に空気の高粘性効果で生じる圧力低下 $-\Delta P_V$ でキャンセルされ、静穏時の大気圧まで回復する。なお、この ΔP_V は、列車中間部の突入・通過による圧力変化(上昇・低下)を表したもので、空気の高粘性効果に起因するものであり、これ以降、 ΔP_V を空気の高粘性効果による圧力変化、あるいは、静穏時の大気圧からの圧力シフトと呼ぶことにする。

図-10の列車通過に伴う圧力低下を ΔP_R とする。列車トンネル突入直後の図-9からも列車通過時の圧力低下を見積もることができるが、この場合は、直前の突入波により生じた空気の高粘性効果による圧力上昇 $+\Delta P_V$ が残っているため、大気圧からの圧力低下が、列車通過に伴う圧力低下 ΔP_R とは一致せず、 ΔP_V だけ小さな値を示す。一方、列車トンネル退出直前の状態を示した図-10では、突入波による圧力上昇 $+\Delta P_V$ の影響は存在しないため、大気圧からの圧力低下が、そのまま列車通過に伴う圧力低下 ΔP_R と一致する。この ΔP_R は、列車の先頭通過による急激な圧力低下 ΔP_L 、列車中間部の通過に伴う緩やかな圧力低下 ΔP_V 、台車通過による局所的な圧力変動 ΔP_C で構成され、列車の後尾が完全に通過することにより圧力回復を生じる。これらの中で、列車の先頭・後尾通過による急激な圧力低下と回復は、断面積変化に伴う急激な速度変化が生じたことによるものであり、列車中間部通過による圧力低下 ΔP_V は、突入波の場合と同様、空気の高粘性効果によるものである。図-10では、列車通過後、空気の高粘性効果による圧力低下 $-\Delta P_V$ だけ静穏時の大気圧からシフトしているが、列車通過後に、トンネル出口での列車退出に伴う圧力波(=退出波)の通過により、退出波中の空気の高粘性効果によって生じた圧力上昇 $+\Delta P_V$ でキャンセルされ静穏時の大気圧まで回復する。

図-6で説明したように、500km/h退出波は、反射波との重畳のため独立した退出波として捉えることができない。400km/h走行の場合も、同じく反射と退出のタイミングが近接している関係上、退出波と反射波の明確な分離はできない。ここでは、300km/h走行を対象にして退出波の説明を行う。図-11に示すように、300km/h走行の場合は独立した退出波が観測され、この退出波を ΔP_B とする。退出波も突入波の場合と同様、図示する列車先頭部がトンネルから退出した際の圧縮波による急激な圧力上昇と列車中間部の退出による緩やかな圧力上昇、さらに、列車後尾退出に伴う膨張波による圧力低下で構成される。

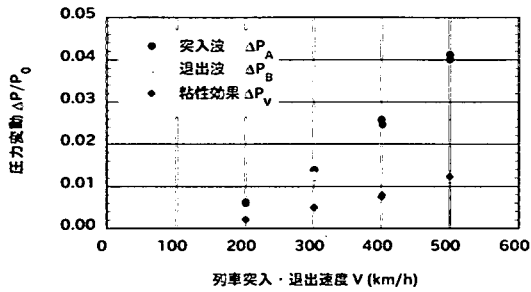


図-14 列車速度 V と突入波 ΔP_A および退出波 ΔP_B の関係

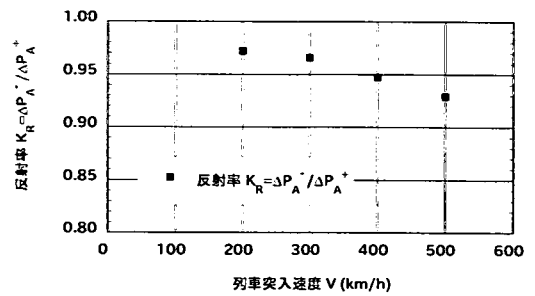


図-16 列車速度 V と反射率 K_R の関係

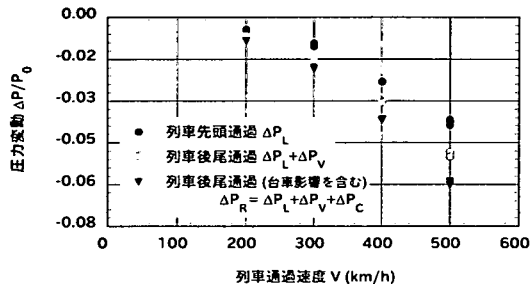


図-15 列車速度 V と列車通過時の圧力低下 ΔP_R の関係

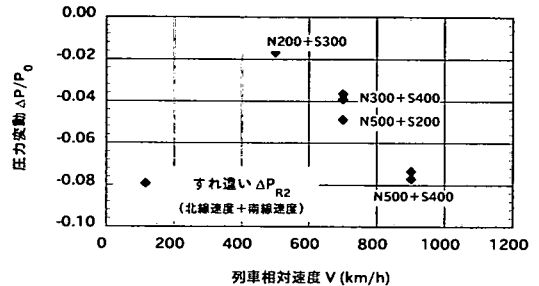


図-17 相対速度 V とすれ違い時の圧力低下 ΔP_{R2} の関係

図-12は、突入波の反射（負の反射）を詳細に見たものである。図示したように、正圧でトンネル内を伝播してきた突入波 ΔP_A^+ はトンネル坑口で反射し負圧の反射波 ΔP_A^- となる。なお、退出波についてもその基本的な反射の特性は同じであり、坑口で負の反射を行う。反射直前の突入波 ΔP_A^+ 、すなわち、トンネル坑口に対する入射波は、図-9で示した形成直後の突入波 ΔP_A と異なり、トンネル壁面での摩擦による影響（散逸効果）と圧力波の非線形性の影響（非線形効果）から、そのピーク値は減衰し、波面勾配 $\Delta P/\Delta t$ は切り立ってくる。このように、突入波が非線形性を有していることから、坑口での反射の際にはエネルギーロスを伴う。突入波が坑口で反射する際に、その一部は微気圧波となってトンネル外部に放射され、また、大半は反射波となってトンネル内を伝播する。反射波には微気圧波となって外部放出したエネルギーロスがあるため、当然のごとく入射波より小さな値となる¹⁹⁾。このエネルギーロスを反射率で評価することにし、ここでは、トンネル坑口での反射率 K_R を、図-12に示す入射波と反射波の比 $K_R = \Delta P_A^- / \Delta P_A^+$ で定義する。

図-13の列車すれ違いによる圧力低下を ΔP_{R2} とする。この場合は、基本的に図-9と図-10の列車通過による圧力低下が重畳した関係になっているが、すれ違いによる圧力低下 ΔP_{R2} は、対向列車側の側面での速度条件が異なることから、両者の線形和とはならず、その絶対値は、両者の線形和よりも幾分か小さな圧力低下となる。

また、 ΔP_{R2} 中の台車通過による圧力低下は、図-7で説明したように、走行車線と反対側にあるトンネル壁面の圧力には大きな影響を及ぼさないことから、走行車線側の列車の台車通過による圧力低下 ΔP_C のみが含まれていることになる。

(2) 列車の走行速度と圧力変動の関係

図-9～図-12の突入波 ΔP_A 、退出波 ΔP_B 、列車通過による圧力低下 ΔP_R 、突入波の反射率 K_R 、すれ違い走行による圧力低下 ΔP_{R2} を全ての測定結果に対し求め、列車の走行速度との関係について論じる。なお、図-9～図-12は、いずれも、各々の列車速度に対して、2回の測定結果を示したものであり、現象の再現性は高く、測定結果のばらつきは無視でき得るほど小さいものと考えられる。

図-14は、測定点 A で評価した突入波 ΔP_A および ΔP_B と列車のトンネル突入・退出速度 V の関係を示したものである。図-14には、列車側面（中間部）の突入・退出に伴い、空気の粘性効果により生じる圧力上昇 ΔP_V も同時に示している。突入波 ΔP_A 、退出波 ΔP_B 、いずれの場合も、列車速度 V のほぼ2乗に比例して増加する。また、空気の粘性効果により生じる ΔP_V に関しても、同様で、列車速度 V のほぼ2乗に比例して増加する。列車速度 $V=500\text{km/h}$ では、 $\Delta P_A/P_0 = +0.04$ 程度、 $\Delta P_V/P_0 = +0.012$ であり、突入波の内、約30%が空気の粘性効果による圧力上昇であることが分かる。退

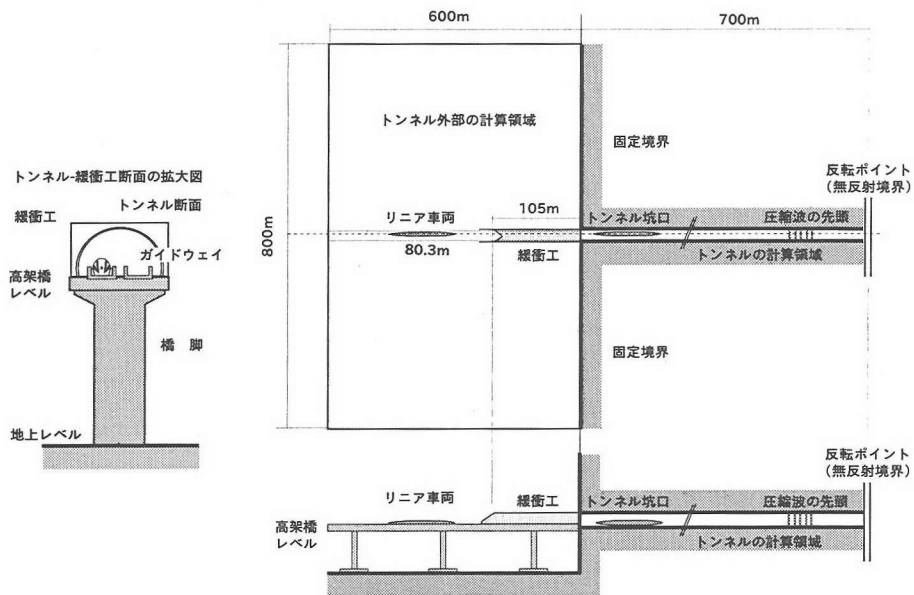


図-18 CFD 解析の対象とした計算領域

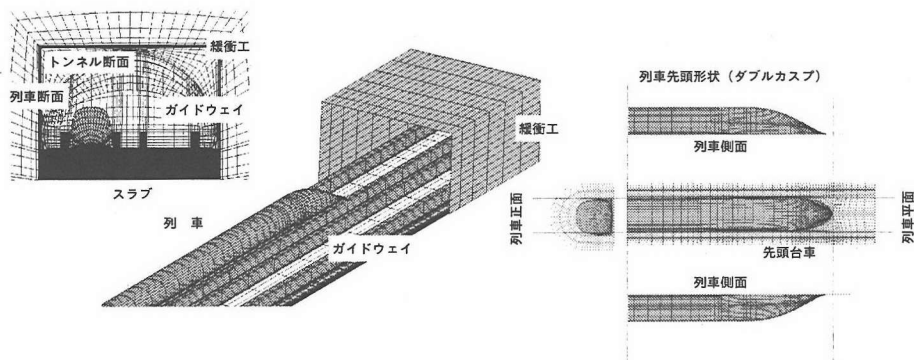


図-19 CFD 解析に用いた解析格子

出波 ΔP_B は、列車速度 $V = 300\text{km/h}$ までの値しか読みとれていないが、突入波 ΔP_A と比べて僅かに小さい値を取るものの、ほぼ、同レベルの圧力値であることが分かる。

図-15は、測定点 A で評価した列車通過による圧力低下 ΔP_R と列車速度 V の関係を示している。図示したように、圧力低下 ΔP_R は、列車先頭通過による圧力低下 ΔP_L と列車中間部通過による圧力低下 ΔP_V および台車通過による局所的な圧力低下 ΔP_C で構成され、それぞれ、列車速度のほぼ 2 乗に比例して減少する。列車速度 $V = 500\text{km/h}$ の場合で、 $\Delta P_R/P_0 = -0.06$ 程度、その内、速度効果分 $\Delta P_L/P_0 = -0.038$ 、粘性効果分 $\Delta P_V/P_0 = -0.012$ 、台車影響分 $\Delta P_C/P_0 = -0.01$ である。

図-16は、測定点 E で評価した突入波 (=入射波 ΔP_A^+) の反射率 $K_R (= \Delta P_A^- / \Delta P_A^+)$ とトンネル

坑口で突入波 ΔP_A が形成された際の列車の突入速度 V の関係を示している。図-14に示す結果から分かるように、列車の突入速度 V が速いほど大きな突入波 ΔP_A が形成される。このため、トンネル内での波動伝播に伴う非線形性の影響を強く受け、圧力勾配の大きい入射波 ΔP_A^+ が到達する。したがって、反射の際のエネルギーロスも大きくなるため、結果として、反射率 K_R は小さくなる。これは、列車の突入速度 V が速いほどトンネル坑口から放射される微気圧波が大きくなることと整合する。図-16から、列車の突入速度 $V = 500\text{km/h}$ の場合、反射率 $K_R = 0.93$ であり、入射波の 93% は反射しトンネル内をそれまでとは逆方向に伝播し、残りの 7% は微気圧波となってトンネル外部に放射される。

図-17は、測定点 A⁻, A, A⁺ の 3 点で評価した 2 列車すれ違い時の圧力低下 ΔP_{R2} とすれ違い時の列車

相対速度の関係を示している。いずれの測定値も走行速度の速い列車側の台車通過による影響を考慮した値である。相対速度 500km/h で、 $\Delta P_{R2}/P_0 = -0.02$ であり、単独 500km/h の 1/3 程度である。また、相対速度 700km/h の場合は、300km/h+400km/h では、 $\Delta P_{R2}/P_0 = -0.04$ 程度であるが、両者の速度差が大きい 500km/h+200km/h では、 $\Delta P_{R2}/P_0 = -0.05$ となる。これは、速い列車の通過による圧力低下が全体の圧力低下に大きく影響するためである。相対速度 900km/h では、 $\Delta P_{R2}/P_0 = -0.08$ 程度の圧力低下となる。

7. トンネル内の圧力変動解析

トンネル覆工構造の設計・照査に不可欠な設計用圧力変動の評価を行う目的から、トンネル内の圧力変動現象に対して数値流体解析 (CFD 解析) を実施し、実機トンネルでの測定結果との比較から解析の妥当性を検証する。さらに、トンネル内に生じる最大圧力変動 (最大正圧・最大負圧) をトンネル覆工構造の設計荷重として評価する。

(1) トンネル内の圧力現象に対する CFD 解析

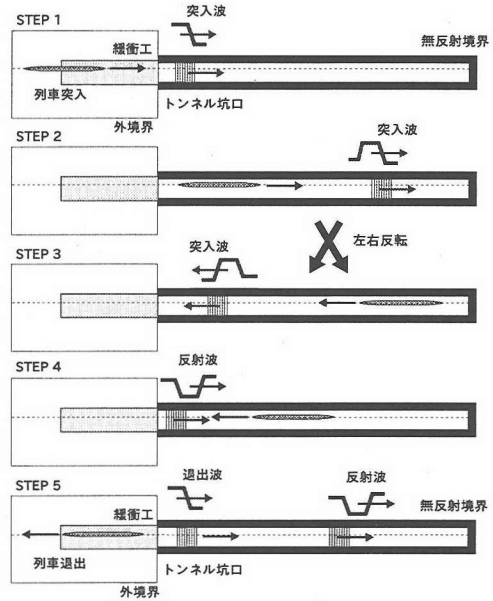
本研究における 3 次元 CFD 解析は、圧縮性の粘性流体を対象としたものである。離散化や移動境界の取り扱いには Ogawa, T. and Fujii, K. の方法を用いている。なお、その詳細は参考文献 (14)~(16) に詳しい。

図-18 は CFD 解析の計算領域を示したものである。図示した計算領域は圧力変動測定を実施した山梨実験線のトンネル西口を対象にしたものである。計算領域は、一般座標系を用いた差分格子により再現する。

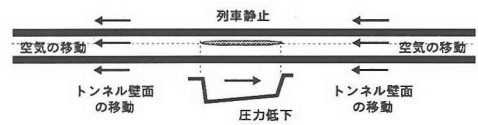
数値計算には、差分格子の作成を容易にし形状適合性を高める目的と列車の高速走行に伴う移動境界問題に適用する目的から、領域分割法と解強制置換法を用いている。領域分割法と解強制置換法は、複雑な流れ場に対する形状適合性を高めるために用いられてきた。また、最近では、並列計算のための領域分割と言う観点から用いられるようになってきている。本研究では、主に移動境界問題に適用する目的から、この領域分割法と解強制置換法を用いており、計算領域を、列車領域、列車-トンネル間の内挿領域、トンネル領域、さらに、トンネル坑口周辺の外部領域の 4 つに分割し、トンネル坑口周辺の外部領域あるいはトンネル領域に対して、列車領域と列車-トンネル間の内挿領域を列車の走行速度に応じて移動させることにより移動境界問題に適用させている^{14)~16)}。なお、境界条件としては、物体表面ではすべり無し条件とし、トンネル坑口周辺の遠方境界では計算領域から外部へ伝播する波動が透過する無反射境界条件を採用している。

表-1 対象とした解析領域の格子点数

領域名	格子点数
列車まわり領域	109 × 77 × 27 = 226,611 点
内挿領域	119 × 61 × 31 = 225,029 点
トンネル領域	345 × 47 × 35 = 567,525 点
トンネル入口領域	159 × 91 × 55 = 795,795 点
合計	= 1,814,960 点



(a) 突入波・反射率・退出波の解析



(b) 列車通過に伴う圧力低下の解析

図-20 トンネル内に生じる圧力変動の解析方法

数値計算の条件は、時間増分として無次元時間 $\Delta \bar{t}_{\min} = 0.005$ ($= c \Delta t_{\min} / L$: ただし、 Δt_{\min} は実時間増分、 c は音速、 L は代表長さ = トンネルの内空高さ 7.71m) であり、列車走行方向の最小格子サイズとして、 $\Delta \bar{x}_{\min} = 0.1$ ($= \Delta x_{\min} / L$: ただし、 Δx_{\min} は列車走行方向の最小格子サイズ、 L は代表長さ) である。また、表-1 に各々の計算領域の格子点数を示す。

図-19 は、CFD 解析に用いた解析格子のうち、トンネル断面、緩衝工断面、および、列車先頭部の詳細を示したものである。CFD 解析では、3 次元的に対象となる構造等の形状を出来るだけ忠実に再現して高精度な予測を行うことが可能である^{17), 18)}。ただし、計算効率を高める目的から、解析結果に影響を与えない範囲

で、必要のない構造物や形状など、適宜、省略した解析を行っている。特に、列車の解析格子は複雑となり、全体の計算効率を大きく左右する。ここでは、先頭と後尾の台車のみをモデル化し、中間車両の台車のモデル化は省略している。

図-20(a)は列車突入・退出時の解析方法を示している。まず、列車をトンネルに突入させ突入波の解析を行う(図中:STEP 1)。突入波が平面波として十分に発達するまでトンネル内を伝播させた後(図中:STEP 2)、トンネル内の解析格子を左右反転させ、それと共に突入波の伝播方向と列車の進行方向も逆転させる(図中:STEP 3)。次に、突入波をトンネル坑口に向かって伝播させ反射波の解析を行う(図中:STEP 4)。最後に、反射波を列車後方まで十分に伝播させた後、列車を坑口から退出させ退出波の解析を行う(図中:STEP 5)。

図-20(b)はトンネル内を列車が通過する際の解析方法を示したものである。無限長のトンネル内を仮定し、列車の速度と同じ速度で移動する座標系を用い、走行する列車周りの定常圧力場の解析を行う。この場合、列車は静止し、静穏時のトンネル内の空気とトンネル壁面、ならびに、ガイドウェイが列車の進行方向と反対方向の速度を持つことになる。

CFD解析における列車の速度条件は、設計最高速度550km/hを考慮し、圧力変動測定結果との比較を行う目的から、CFDによる解析結果と既往の研究で得られている理論解を組み合わせ、任意の列車速度と圧力変動の関係式を導く。その結果、導かれた関係式から求められる圧力変動と実機トンネルに対する測定結果との比較を行い解析結果の妥当性を検証する。2列車すれ違い走行時の圧力変動は、相対速度1000(=500+500)km/hを考え、1列車走行時の解析結果に基づき、準定常状態を仮定してトンネル内圧力変動の重ね合わせを行う。この場合も、測定結果との比較から解析の妥当性を検証する。

図-18に示した計算領域には、解析結果と測定結果との比較を行う目的から、トンネル緩衝工(長さ105m)がモデル化されている。緩衝工は突入波や退出波の圧力変動や圧力勾配を低減する効果を持つため、緩衝工を設置しないトンネル、あるいは、図示した緩衝工よりも性能の劣る緩衝工を設置するトンネルの覆工構造の設計を想定した場合、緩衝工を解析モデルに含めると圧力変動を小さく評価してしまうことになる。そのため、営業線で想定するトンネルの圧力変動の最大値を設計荷重として評価する観点から、トンネル緩衝工を取り除いた状態でのCFD解析も実施する。列車の編成長としては、山梨実験線での試験車両(3両編成:80.3m)と新幹線と同程度の編成車両(16両編成相当:396.2m)の2編成を考える。ただし、列車の編成長の

表-2 CFD解析ケース

解析ケース	走行形態	緩衝工	列車速度(km/h)	列車長(m)
1	突入・退出	設置無	550.0	80.3
2				
3	列車通過	-	550.0	80.3
4				396.2

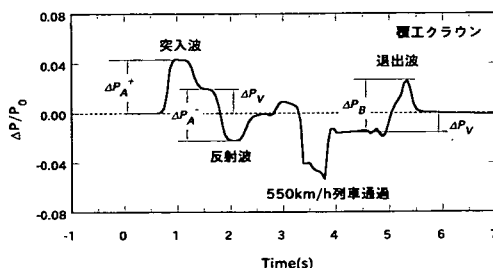


図-21 突入・反射・退出時の解析結果(試験車両 $l=80.3\text{m}$)

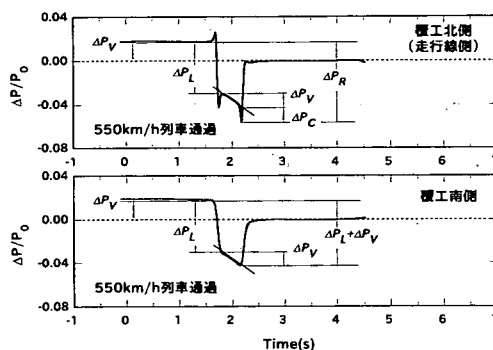


図-22 列車通過時の解析結果(試験車両 $l=80.3\text{m}$)

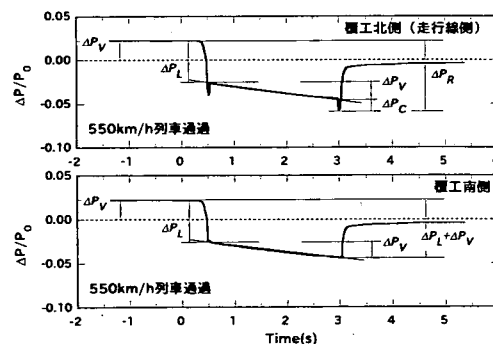


図-23 列車通過時の解析結果(16両編成 $l=396.2\text{m}$)

違いは、トンネル内の圧力変動の内、列車中間部の通過に伴い、空気の粘性効果によって生じる圧力変動 ΔP_V に対して、大きな影響を及ぼす。したがって、ここでは、長大編成車両に対する解析ケースは、図-20(b)に示した列車通過時の定常圧力場の解析にのみ設ける。以上より、実際の検討に必要なCFDの解析ケースは、表-2に示す4ケースである。

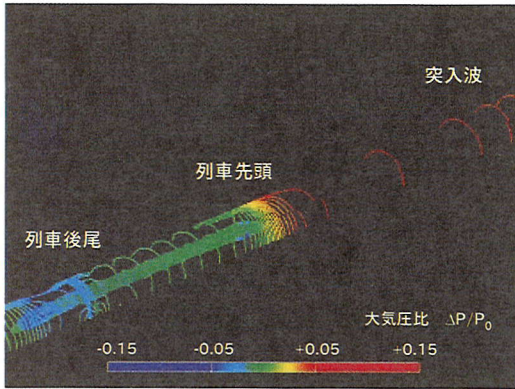


図-24 列車突入時のトンネル内の圧力コンター

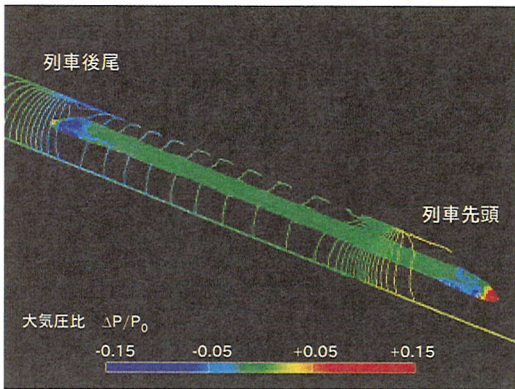


図-25 列車通過時のトンネル内の圧力コンター

(2) 列車 550km/h 走行時の CFD 解析結果

図-21～図-23に CFD 解析結果の一例を示す。解析条件は表-2に示す通りであり、列車の速度条件は $V=550\text{km/h}$ である。

図-21は、列車トンネル突入・反射・退出時の解析結果を示したものであり、トンネル坑口には緩衝工を設置していない状態での解析結果である。図示した圧力変動は、トンネル坑口から 150m の地点（測定点 A：覆工クラウン部に相当）での時系列波形を示している。ただし、列車がトンネル内に突入し、トンネル内の解析領域を左右反転させた後の状態である（図-20(a) 参照）。図示した結果から、まず、正圧の突入波 ΔP_A^+ が測定点を通過した後、負圧の反射波 ΔP_A^- が通過し、列車による圧力低下を生じた後に正圧の退出波 ΔP_B が通過しているのが分かる。

図-22は、列車トンネル通過時の解析結果（定常解析：3両編成相当 $l=80.3\text{m}$ ）を示したものである。列車通過時の圧力変動は、トンネル断面内で分布を持つ（図-7参照）。ここでは、走行車線側の測定点位置（測定点 A：覆工北側の測定点相当）とその反対側（測定

点 A：覆工南側の測定点相当）の圧力変動を示している。図示した結果から、図-7に示した測定結果と同様な傾向を示し、走行線側の圧力変動には台車通過による局所的な圧力低下 ΔP_C が見られる。測定結果と傾向が異なる点は、台車の先頭台車と後尾台車のみを解析格子に考慮しているため、台車通過によるパルス上の圧力低下は、先頭通過時と後尾通過時にのみ存在する。

図-23は、列車トンネル通過時の解析結果（定常解析：16両編成相当 $l=396.2\text{m}$ ）を示したものである。列車先頭突入時の圧力変動 ΔP_L は、図-22に示す 3両編成 ($l=80.3\text{m}$) の解析結果と同レベルであるが、3両編成の解析結果と比較して、列車長が長くなることにより、空気の粘性効果により生じる列車中間部通過時の圧力低下 ΔP_V の値は大きくなっているが、その低下の割合は、3両編成の場合に比べて少なくなっている。これは、列車側面に形成される境界層の発達具合が距離に比例していないためである。境界層が発達する速度は、粗面よりも滑面で速いが、その滑面においても境界層厚は距離の $4/5$ 乗でしか増加しない²⁰⁾。さらに、列車表面は凸凹があるため、境界層厚の増加の割合はさらに小さくなるはずである。ただし、CFD では列車表面には凸凹はないものとして計算しているため、境界層厚の増加の割合は大きくなり、空気の粘性効果による圧力低下 ΔP_V の低下の割合も、実際よりは大きく評価している可能性が残る。

図-24と図-25は、図-21に示した列車 550km/h 突入時と図-22に示す列車 550km/h 通過時のトンネル覆工壁面と列車表面の圧力コンターを表したものである。図-24から、列車突入時には列車の前方に突入波（正圧）が形成され、列車に先行して伝播している様子が理解できる。また、図-25から、列車後尾通過時に大きな圧力低下（負圧）が生じていることが分かる。

表-3～表-5は、表-2に示した解析ケースに対して、図-9～図-13でモデル化した突入波 ΔP_A 、退出波 ΔP_B 、突入波の反射率 $K_R = \Delta P_A^- / \Delta P_A^+$ 、また、列車通過による圧力低下 $\Delta P_R (= \Delta P_L + \Delta P_V + \Delta P_C)$ 、さらに、その内訳として、先頭通過による圧力低下 $\Delta P_L (=$ 断面変化)、中間部通過による圧力低下 $\Delta P_V (=$ 粘性効果)、台車通過による圧力低下 $\Delta P_C (=$ 断面変化)の数値解析結果をまとめたものである。また、表-3の()内の値には、突入波・退出波に含まれる先頭突入・先頭退出によって生じる圧力変動(=圧縮性の効果)を示している。ここでは、緩衝工を設置しない解析条件下の突入波・退出波の値から、列車中間部の突入・退出によって生じる圧力変動(=粘性効果)を差し引くことにより求めている。この理由として、緩衝工を設置した状態での突入波・退出波には、緩衝工の効果が含まれているためである。例えば、突入波の場合、緩衝工(緩衝工

表-3 突入波および退出波の解析結果 (V=550km/h)

列車長 (m)	緩衝工	突入波 $\frac{\Delta P_A}{P_0}$	退出波 $\frac{\Delta P_B}{P_0}$	粘性効果 $\frac{\Delta P_V}{P_0}$
80.3	設置	+0.048 (+0.043)	+0.047 (+0.042)	+0.016
80.3	無	+0.059 (+0.043)	+0.058 (+0.042)	+0.016

() 内は、先頭突入・先頭退出による圧力変動

表-4 トンネル坑口での反射率の解析結果 (V=550km/h)

列車長 (m)	緩衝工	入射波 $\frac{\Delta P_A^+}{P_0}$	反射波 $\frac{\Delta P_A^-}{P_0}$	反射率 K_R
80.3	設置	+0.043	+0.041	0.95
80.3	無	+0.044	+0.040	0.90

表-5 列車通過による圧力低下の解析結果 (V=550km/h)

列車長 (m)	列車通過 $\frac{\Delta P_R}{P_0}$	先頭通過 $\frac{\Delta P_L}{P_0}$	粘性効果 $\frac{\Delta P_V}{P_0}$	台車通過 $\frac{\Delta P_C}{P_0}$
80.3	-0.073	-0.044	-0.016	-0.013
396.2	-0.080	-0.044	-0.023	-0.013

長さ=105m > 列車長 80.3m) が存在する場合、列車が緩衝工に突入後、緩衝工内を通過、その後、トンネル本坑に突入する過程で、緩衝工に列車後尾が突入した際の膨張波が列車を追い越すため、列車中間部がトンネル本坑に突入し空気の粘性効果で徐々に圧力が上昇し最大圧力に達する以前に、膨張波による圧力低下が生じてしまう。この結果として、緩衝工がある場合の突入波 $\Delta P_A/P_0=+0.048$ は、緩衝工が無い場合の突入波 $\Delta P_A/P_0=+0.059$ に対して、大気圧比で 0.011 程小さい値となる。この差が緩衝工の効果を表す。したがって、緩衝工を設置した状態の突入波・退出波から空気の粘性効果による圧力変動を差し引くと、空気の圧縮性の効果による圧力変動を過小評価してしまうことになる。

(3) 列車速度の変化に対する圧力変動の増減

CFD 解析結果と山本による圧力波の理論解^{3), 4)}を組み合わせ、任意の列車速度に対する突入波 ΔP_A 、退

出波 ΔP_B 、ならびに、列車通過時の圧力低下 $\Delta P_R (= \Delta P_L + \Delta P_V + \Delta P_C)$ の大きさを算定する。

列車先頭がトンネルに突入した際の圧力変動 ΔP_A に対する理論解は、列車速度 V 、音速 $c (=340\text{m/s})$ 、空気密度 ρ 、列車とトンネルの断面積比 $R (= a/A: \text{車両断面積 } a \text{ とトンネル内空有効断面積 } A \text{ の比})$ 、マッハ数 $M (=V/c)$ とすると、以下のように表される^{3), 4)}。

$$\Delta P_A = \left(\frac{1}{2}\rho V^2\right) \frac{R(2-R)}{(1-R)^2} - \left(\frac{1}{2}\rho V^2\right) \left\{\frac{R(2-R)}{(1-R)^2}\right\}^2 M + O(M^2) \quad (1)$$

ただし、式(1)は、新幹線を対象に導かれた式であり、時速 250km/h、マッハ数 $M=0.2$ 程度までの領域にしか適用できない。本研究で取り扱うように時速 550km (マッハ数 $M \approx 0.45$) に達する列車速度を想定すると、何らかの補正を行う必要がある。このことから、前節の表-3で求めた突入波の CFD 解析結果を用いて式(1)を補正することにする。補正すべき圧力変動は式(1)のマッハ数 M の2乗に比例するものとし、それ以上の高次項は無視する。まず、式(1)をマッハ数 $M = V/c$ に関して整理し、

$$\frac{\Delta P_A}{P_0} = \left(\frac{1}{2}\frac{\rho c^2}{P_0}\right) \frac{R(2-R)}{(1-R)^2} \left(\frac{V}{c}\right)^2 - \left(\frac{1}{2}\frac{\rho c^2}{P_0}\right) \left\{\frac{R(2-R)}{(1-R)^2}\right\}^2 \left(\frac{V}{c}\right)^3 + C_A \left(\frac{V}{c}\right)^4 \quad (2)$$

と表す。表-3で求めた突入波 ΔP_A の値を式(2)に代入すると、突入波に対する補正係数 C_A を求めることができる。なお、圧力変動測定結果からもこの補正係数 C_A を定めることができるが、ここでは、解析結果と測定結果を比較する目的から、マッハ数に関する補正係数 C_A は、CFD 解析結果を用いて求めることとする。なお、式(2)は、本来、列車トンネル突入時に生じる圧縮波に対するものであるが、図-14に示した測定結果からも分かるように、列車速度 V の変化に対する突入波 ΔP_A と退出波 ΔP_B の変化傾向が極めて類似していることから、式(2)を用いることで、退出波 ΔP_B に対する検討も可能であり、突入波と同様、表-3で求めた退出波 ΔP_B の値を式(2)に代入すると、退出波に対する補正係数 C_B を求めることができる。

列車先頭通過時の圧力変動 ΔP_L に対しても、式(1)と同じく、理論解が得られており、

$$\Delta P_L = -\left(\frac{1}{2}\rho V^2\right) \frac{2R}{(1-R)} + \left(\frac{1}{2}\rho V^2\right) \left\{\frac{2R^3}{(1-R)^3}\right\} M + O(M^2) \quad (3)$$

で表される^{3), 4)}。式(2)と同じく、圧力変動の補正項は式(3)のマッハ数 M の2乗に比例するものとし、マッハ数 $M = V/c$ に関して整理すると、

$$\frac{\Delta P_L}{P_0} = - \left(\frac{1}{2} \frac{\rho c^2}{P_0} \right) \frac{2R}{(1-R)} \left(\frac{V}{c} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{\rho c^2}{P_0} \right) \left\{ \frac{2R^3}{(1-R)^3} \right\} \left(\frac{V}{c} \right)^3 + C_L \left(\frac{V}{c} \right)^4 \quad (4)$$

と表すことができる。いま、表-5で求めた列車先頭通過による圧力変動 ΔP_L の値を式(4)に代入すると、補正係数 C_L を求めることができる。

次に、列車中間部通過による圧力変動 ΔP_V について考える。圧力変動 ΔP_V は列車側面の摩擦抵抗と空気の粘性によって決まる。列車速度 V が変われば、列車側面に発達する境界層の厚さが変わるが、列車速度に対する境界層厚さの変化は速度の $-1/5$ 乗にのみ比例する程度である。また、境界層厚さがトンネル断面径に与える変化も小さいため、境界層厚さに与える列車速度 V の影響は少ないものと考えられる²⁰⁾。

ここでは、 ΔP_V は速度圧 $q = 1/2 \rho V^2$ にのみ比例するものとして評価する。したがって、任意の列車速度 V が与えられた場合の ΔP_V は、

$$\Delta P_V = \Delta P_V \Big|_{V=V_*} \times \left(\frac{V}{V_*} \right)^2 \quad (5)$$

となる。なお、 $V_* = 550 \text{ km/h}$ はリファレンスとなる列車速度であり、表-5に示した解析結果 ΔP_V を参照することにより、列車速度 V と ΔP_V の関係を求めることができる。また、台車による局所的な圧力低下に関して、速度圧 $q = 1/2 \rho V^2$ にのみ比例するものとし、

$$\Delta P_C = \Delta P_C \Big|_{V=V_*} \times \left(\frac{V}{V_*} \right)^2 \quad (6)$$

と表す。式(5)と同じく、 $V_* = 550 \text{ km/h}$ に対し、表-5の解析結果 ΔP_C を参照することにより、列車速度 V と ΔP_C の関係を求めることができる。したがって、式(4)~式(6)より、列車通過時の圧力低下は、

$$\frac{\Delta P_R}{P_0} = \frac{\Delta P_L}{P_0} + \frac{\Delta P_V}{P_0} + \frac{\Delta P_C}{P_0} \quad (7)$$

となる。

2列車すれ違い時の圧力変動に対しては、1列車によるトンネル内通過のCFD結果に基づき、2列車がトンネル内ですれ違った場合の最大負圧の算定を行う。ここでは、簡便のため、準定常的な仮定を用いる。すなわち、無限長のトンネル内を通過する列車の定常状態はCFD解析で求められており(図-20(b)参照)、この定常状態の流れ場の中を対向列車が通過した場合の圧力変動を求めることとする。無限長のトンネル内を通過する列車の定常状態では、圧力が大気圧から変動している上、列車と反対方向に空気の流れが生じている。その速さは

列車速度のおよそ6%であり、対向列車の空気に対する相対速度は減少するが、対向列車の通過を考える場合、定常状態の圧力変動や空気の流れに与える影響は小さいものと仮定する。また、定常状態の列車が占める断面積をトンネルの断面積から減ずることから、対向列車の列車トンネル断面積比 $R' = R/(1-R)$ は大きくなる。ここでは、式(4)を用いて、断面積 $R' = R/(1-R) = 1.36$ ($R=0.12$) のもとで対向列車の通過による圧力変動を求め、定常状態の圧力変動に加えることで、すれ違い時の最大負圧を算定する。ただし、台車による圧力変動 ΔP_C はそれぞれ片側にのみ影響を及ぼすので、定常状態の列車についてのみ考慮する。

まず、定常状態にある単独走行列車による圧力変動と風速変動を求める。ここで、列車の速度 V_1 、トンネル内の静穏時の圧力 P_0 、列車トンネル断面積比 R 、トンネル断面積 A とする。観測者が列車の速度で移動している場合について、ベルヌーイの定理と質量保存則から圧力変動 ΔP_1 と風速変動 Δu_1 を求めると、それぞれ、以下のような。

$$\Delta P_1 = P_0 - P_1 = \frac{1}{2} \rho V_1^2 \frac{R(2-R)}{(1-R)^2}$$

$$\Delta u_1 = \frac{-R}{1-R} V$$

次に、速度 V_1 で等速走行する無限長の列車1(=自列車)の側を、速度 V_2 で列車2(=対向列車)が通過する状態を考え、列車2の通過による圧力変動を ΔP_1 、風速変動 Δu_2 とする。なお、両列車の断面積比はともに R である。列車2が通過した場合について、ベルヌーイの定理と質量保存則を導く。ただし、列車2が通過する前の圧力 $P_1 = P_0 - \Delta P_1$ と風速変動 Δu_1 とし、上式の単独走行時の値を用いると、

$$\begin{aligned} P_1 + \frac{1}{2} \rho (\Delta u_1 - V_2)^2 \\ = P_2 + \frac{1}{2} \rho (\Delta u_1 + \Delta u_2 - V_2)^2 \\ A(1-R)(\Delta u_1 - V_2) \\ = A(1-2R)(\Delta u_1 + \Delta u_2 - V_2) \end{aligned}$$

となる。上述の2つの式の関係から、

$$\begin{aligned} \Delta P_2 = P_1 - P_2 \\ = \Delta P_1 \left(\frac{V_2}{V_1} + \frac{R}{1-R} \right)^2 \left(\frac{1-R}{1-2R} \right)^2 \frac{2-3R}{2-R} \end{aligned}$$

となる。以上の式を整理すると、全体の圧力変動量 ΔP_{L2} が求まる。

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P_{L2}}{P_0} &= \frac{\Delta P_1}{P_0} + \frac{\Delta P_2}{P_0} \\ &= \frac{\Delta P_1}{P_0} \left[1 + \left(\frac{V_2}{V_1} + \frac{R}{1-R} \right)^2 \left(\frac{1-R}{1-2R} \right)^2 \frac{2-3R}{2-R} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

ここでは列車先頭通過時の圧力変動のみを扱っているため、実際のすれ違い時の圧力低下を求めるには他の要素を加える必要がある。いま、列車1 (=自列車) がトンネル突入直後とし、列車2 (=対向列車) がトンネル退出直前とし、さらに、列車1 近くのトンネル壁面を考える。また、列車1 の突入波および列車2 の退出波の直接的な影響は受けない場合とする。この場合、列車1 と列車2 のすれ違いによる負圧は、列車1 による粘性効果 ΔP_V と台車通過 ΔP_C を考慮し、次式で求めることができる、

$$\frac{\Delta P_{R2}}{P_0} = \frac{\Delta P_{L2}}{P_0} + \frac{\Delta P_V}{P_0} + \frac{\Delta P_C}{P_0} \quad (9)$$

ただし、上式の ΔP_{L2} は、式(8)から求める値であり、この場合、式(8)中の列車1による負圧 ΔP_1 は、式(4)から求められる ΔP_L で置き換えるものとする。

(4) 圧力変動測定とCFD解析結果の比較

CFD解析結果と圧力変動測定値を比較し、解析結果の妥当性について検討する。図-26～図-29に解析値と測定値の比較結果を示す。

図-26は、突入波 ΔP_A と退出波 ΔP_B の解析値と測定値を比較したものである。図中の解析値は、表-3に示すCFD解析結果(ただし、先頭突入・退出による値)を用い、式(2)の補正係数 $C_A = 0.152$ (突入波)および $C_B = 0.128$ (退出波)を定めた算定式より求められた値である。図中の解析値と測定値は良く一致していることが分かる。

図-27は列車通過時の圧力低下 ΔP_R について、解析値と測定値を比較したものである。図中の解析値は、表-5に示すCFD解析結果を用いて式(4)の補正係数 $C_L = 0.117$ を定め、式(6)を用いて求めた値である。図-27の突入波 ΔP_A および退出波 ΔP_B と同様、列車通過時の圧力低下 ΔP_R についても、解析値と測定値の対応は極めて良い一致を示している。

図-28は、反射率 K_R について、CFD解析結果と測定値を比較している。図中○が解析値を示している。測定値は列車速度 $V = 500\text{km/h}$ までの反射率しかデータが存在しないため、測定データから回帰曲線で外挿している。解析値と測定値を比較すると、緩衝工を設置した状態では、解析値の方が外挿値よりも大きく、一方、緩衝工を設置しない状態では、解析値の方が外挿値よりも小さな反射率となる。解析値と測定値の差は、いずれも、数%と小さいものであるが、反射を何回も繰り返した場合にはその影響は大きくなると考えられる。しかし、1, 2回の反射であれば測定値と解析値の誤差は小さく、トンネル内最大圧力の算定に与える影響は小さい。突入波などの圧力波の反射は、その波面の性状に大きく依存することが知られている¹⁹⁾。つま

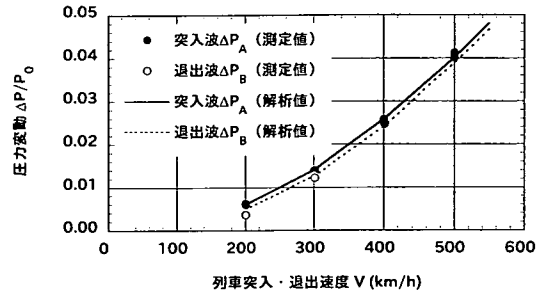


図-26 突入波 ΔP_A ・退出波 ΔP_B の解析値と測定値の比較

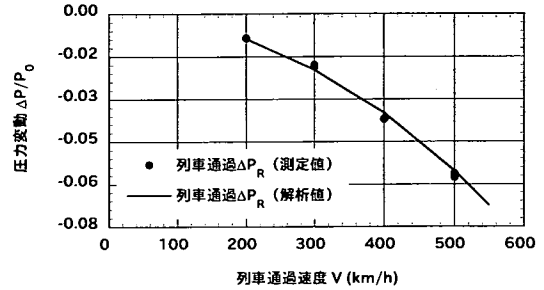


図-27 列車通過時の圧力低下 ΔP_R の解析値と測定値の比較

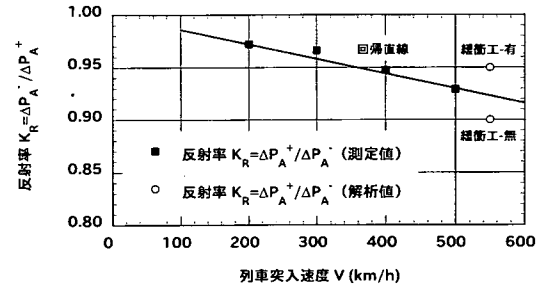


図-28 突入波・退出波の反射率 K_R の解析値と測定値の比較

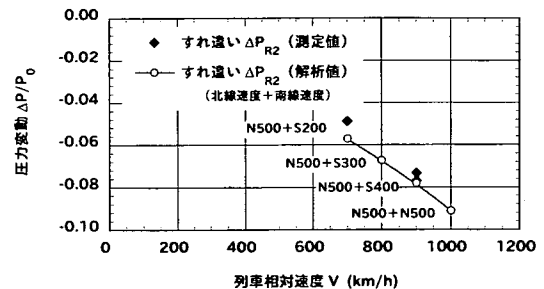


図-29 すれ違い時の圧力低下 ΔP_{R2} の解析値と測定値の比較

り、列車がトンネルに突入後すぐに形成される波面は、トンネルを伝播するに従ってその性状を変化させる⁵⁾、⁶⁾。本研究で行った反射波のCFD解析では、突入から反射まで1.4km以上、また、測定値では突入から4km程度伝播した波が反射している。このことから、波の伝播距離の違いによる波面性状(波面勾配とピーク値)の違いが影響しているものと考えられる¹³⁾。

表-6 最大圧力算定の組み合わせに用いる圧力変動

(a) 列車突入時に発生する突入波	ΔP_A
(b) 列車退出時に発生する退出波	ΔP_B
(c) トンネル坑口での反射波	ΔP_A^{\pm}
(d) 列車通過時の圧力低下	ΔP_R
(e) すれ違い時の圧力低下	ΔP_{R2}
(f) 空気の粘性効果による圧力変動	ΔP_V

表-7 トンネル内の最大圧力を求める際の圧力変動 (16両編成相当 $l=396.2\text{m}$)

圧力現象	1列車走行 550 km/h	2列車走行 1000km/h
(a) 突入波 $\frac{\Delta P_A}{P_0}$	+0.066	+0.055
(b) 退出波 $\frac{\Delta P_B}{P_0}$	+0.066	+0.055
(c) 反射波 $\frac{\Delta P_A^{\pm}}{P_0}$	± 0.066	± 0.055
(d) 列車通過 $\frac{\Delta P_R}{P_0}$	-0.080	-
(e) すれ違い $\frac{\Delta P_{R2}}{P_0}$	-	-0.098
(f) 粘性効果 $\frac{\Delta P_V}{P_0}$	+0.023	+0.019

図-29は、2列車すれ違い時の圧力低下 ΔP_{R2} について、式(9)で求められる解析値と測定値を比較したものである。解析値(図中○)は、それぞれ、自列車の速度を500km/hとし、対向列車の速度を200, 300, 400, 500km/hと変化させている。解析値と測定値の比較から、わずかに解析値の方が測定値に比べ大きい値を取るが、両者は良く対応している。

以上のことから、突入波 ΔP_A 、退出波 ΔP_B 、列車通過時の圧力低下 ΔP_R 、すれ違い時の圧力低下 ΔP_{R2} 、いずれの場合も、解析値と測定値は良く対応しており、本研究での解析結果は、実用上、十分な精度を確保していることが分かる。また、反射率 K_R に関しては、解析値と測定値の間で数%程度の差違が存在する。

8. トンネル内の最大正圧・最大負圧の評価

トンネル全体で最大圧力を評価することは、複数の圧力変動が重なっている状態を評価することになり、通常、トンネル内の特定の場所で、瞬間的に生ずる圧力の最大値を評価することになる。

ここでは、全長10km程度までのトンネルを対象に、圧力変動が最大となる組み合わせに対して、表-3~表-

5の結果を用いて最大圧力を推定する。列車は16両編成(列車長396.2m)とし、1列車単独走行時には列車速度 $V=550\text{km/h}$ 、2列車すれ違い走行時には2列車とも速度 $V=500\text{km/h}$ 、すなわち、相対速度 1000km/h とする。また、トンネル内の圧力変動の最大値を設計荷重として評価する観点から、トンネル坑口での反射率 $K_R=1$ とし、さらに突入波や退出波の値を低減する効果を持つトンネル緩衝工の影響は考慮しないものとして、トンネル内の最大圧力の算定を行う。

これまでの検討結果から、最大圧力に関与すると考えられる圧力変動の個々の現象には表-6の圧力変動が挙げられる。上記の圧力変動を組み合わせることによって、トンネル内の最大圧力(最大正圧・最大負圧)を算定することができる。ただし、トンネルに加わる圧力に関しては、静穏時の大気圧に対する圧力差を考える必要があるため、個々の圧力変動現象の前後の差圧を考慮するだけでなく、最大圧力が得られる時間の前後の算定位置における定常的な圧力シフト(空気の粘性効果 ΔP_V)に対しても注意をする必要がある。

本研究では、最大値を推定するに当たり、以下の仮定を用いる。

- 列車は16両編成で等速運転をしているものとする。
- 個々の圧力現象に対してはCFD解析値を用いる。
- 退出波の圧力変動量は突入波と同じとし、その進行方向が逆であるものとする。
- 圧力波(突入波・退出波・反射波)の距離減衰、トンネル坑口での反射による損失は考慮しない。
- 圧力波(突入波・退出波・反射波)と列車の衝突や追い越しによる反射や損失は考慮しない。

ただし、トンネル坑口での反射により圧力変動の正負が逆転し、進行方向も反対向きになるものとする。

これらの仮定に基づいて、圧力現象の重ね合わせに用いる圧力変動を整理すると、表-7のようにまとめることができる。なお、表-7において、16両編成時の突入波・退出波は、3両編成から16両編成になったことによる列車側面での圧力上昇分を考慮して求められる。すなわち、

$$\Delta P_A \Big|_{N=16} = \Delta P_A \Big|_{N=3} + \left(\Delta P_V \Big|_{N=16} - \Delta P_V \Big|_{N=3} \right)$$

で求めることができる。また、2列車走行時は、相対速度 $1000(=500+500)\text{km/h}$ を想定していることから、前述の速度換算式を用いて、自列車・対向列車ともに列車速度 550km/h から 500km/h の値に変換している。

図-30(a)~図-30(d)は、1列車走行時ならびに2列車走行時に、トンネル内で最大正圧と最大負圧を生ずる現象の組み合わせを示したものであり、それぞれ、列車と圧力波のダイヤグラムの形で表している。以下、図-30(a)~図-30(d)の組み合わせで、トンネル内の最

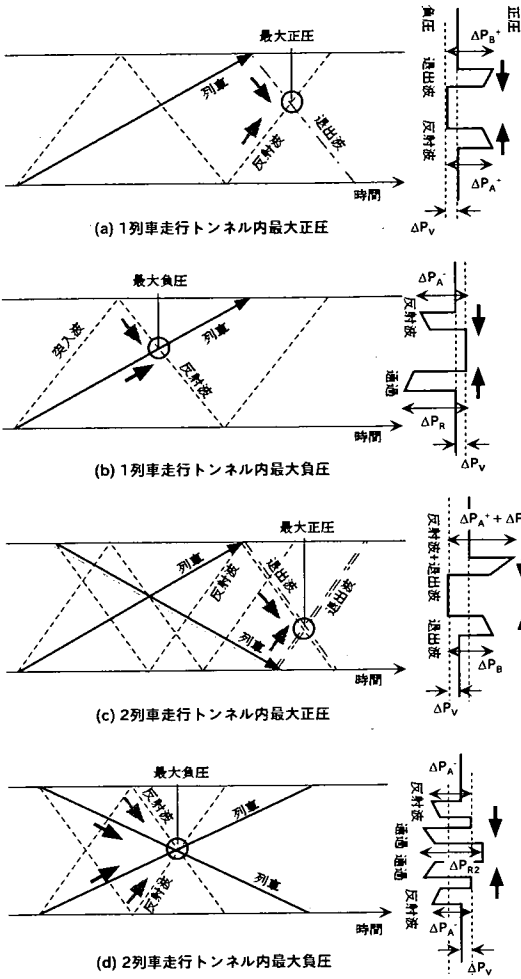


図-30 トンネル内の最大正圧・最大負圧の組み合わせ

大圧力変動(最大正圧・最大負圧)を算定する。

(1) 1列車単独走行のトンネル内の最大圧力

最大正圧 1列車走行時のトンネル内に最大正圧を生ずる現象の組み合わせは、図-30(a)に示すパターンである。すなわち、突入波の2回反射 ΔP_{A^+} (正圧)と退出波 ΔP_B (正圧)の重ね合わせである。ただし、いずれも列車突入によって生じた大気圧からのシフト $+\Delta P_V$ を含んでいるため、片方から重複分を差し引く。よって、表-7の値を用いて、以下の式から最大正圧は求められる。

$$\frac{\Delta P_{\max}}{P_0} = \frac{\Delta P_{A^+}}{P_0} + \frac{\Delta P_B}{P_0} - \frac{\Delta P_V}{P_0} = 0.066 + 0.066 - 0.023 = +0.109 \quad (10)$$

最大負圧 1列車走行時のトンネル内に最大負圧を生ずる現象の組み合わせは、図-30(b)に示すパターンである。図示したように、突入波の反射波 ΔP_{A^-} (負圧)

と列車通過時の圧力低下 ΔP_R (負圧)である。ただし、最大正圧の場合と同様、大気圧からのシフト $-\Delta P_V$ の重複分を差し引く必要がある。いま、表-7の値を用いて、次式から最大負圧を求めることができる。

$$\frac{\Delta P_{\min}}{P_0} = \frac{\Delta P_{A^-}}{P_0} + \frac{\Delta P_R}{P_0} + \frac{\Delta P_V}{P_0} = -0.066 - 0.080 + 0.023 = -0.123 \quad (11)$$

(2) 2列車すれ違い走行のトンネル内の最大圧力

最大正圧 2列車走行時のトンネル内に最大正圧を生ずる現象の組み合わせは、図-30(c)に示すパターンである。この場合は、自列車の突入波の2回反射 ΔP_{A^+} (正圧)と対向列車の退出波 ΔP_B (正圧)が重なり、さらに、自列車の退出波 ΔP_B (正圧)が加わる状態を示している。ただし、現実には、大気圧からのシフト $+\Delta P_V$ は2列車分しか存在しないため、重複分の $+\Delta P_V$ を差し引く。したがって、表-7の値を用いると、以下の式から最大正圧は求められる。

$$\frac{\Delta P_{\max}}{P_0} = \frac{\Delta P_{A^+}}{P_0} + \frac{\Delta P_B}{P_0} + \frac{\Delta P_B}{P_0} - \frac{\Delta P_V}{P_0} = 0.055 + 0.055 \times 2 - 0.019 = +0.146 \quad (12)$$

最大負圧 2列車走行時のトンネル内に最大負圧を生ずる現象の組み合わせは、図-30(d)に示すパターンである。この場合は、トンネル内で列車がすれ違うことによる圧力低下 ΔP_{R2} と自列車と対向列車の突入波の反射波 ΔP_{A^-} が同じタイミングで重ね合わさる瞬間を示している。この場合も、重複している大気圧からのシフト $-\Delta P_V$ を差し引く必要がある。よって、表-7の値を用いて、以下の式により最大負圧は求められる。

$$\frac{\Delta P_{\max}}{P_0} = \frac{\Delta P_{A^-}}{P_0} + \frac{\Delta P_{A^-}}{P_0} + \frac{\Delta P_{R2}}{P_0} + \frac{\Delta P_V}{P_0} = -0.055 \times 2 - 0.098 + 0.019 = -0.188 \quad (13)$$

9. 結 論

本研究では、時速500kmを越える超高速鉄道トンネル内の圧力現象を解明し、トンネル覆工構造の合理的な耐風圧設計を実現する目的から、山梨リニア実験線でのトンネル内の圧力変動測定とCFD解析を実施し、トンネル覆工構造の設計・照査に不可欠な設計用圧力変動の評価を行った。

本研究で得られた主要な結論をまとめると以下のようになる。

- (1) 山梨リニア実験線のトンネルにおいて、トンネル内の圧力変動測定を実施し、その特性について考察を行った。その結果、列車トンネル突入・退出時には、それぞれ、圧力波(突入波・退出波)を生じ、トンネル内で重複反射を繰り返しつつ音速で伝播する。突入波および退出

波のピーク値は同レベルであり、列車速度 500km/h の場合、大気圧比+0.04 程度である。また、速度 500km/h の列車通過時には、大気圧比-0.061 (走行線側) の急激な圧力低下を生じる。列車すれ違い時も急激な圧力低下を生じ、その値は、相対速度 900(=500+400) km/h で、大気圧比-0.08 程度である。

(2) 山梨リニア実験線のトンネルを対象に、トンネル内に生じる圧力変動現象に対し、CFD 解析を実施し、その解析結果と既往の理論式を基に、列車の走行形態 (トンネル突入・列車通過・退出・すれ違い) に応じて、列車速度と各々の圧力変動の関係を定める算定式を求めた。また、この算定式による解析値と実機トンネル中の圧力変動の測定値を比較した結果、列車速度 200km/h ~500km/h の範囲で、解析値は測定値とは良く一致しており、実用上、十分な精度を有していることを確認した。

(3) 列車走行に伴うトンネル内の圧力現象の重畳を考慮し、上記 (2) で求めた算定式から、トンネル覆工構造の設計荷重として用いる最大正圧・最大負圧を評価した。その結果、新幹線と同程度の長大編成車両 (列車長約 400m) で、1 列車設計最大速度 550km/h、2 列車最大相対速度 1000(=500+500)km/h の場合に、トンネル内の最大正圧・最大負圧は、以下の表-8 のように求めることができる。

以上、山梨リニア実験線でのトンネル内の圧力変動測定と CFD 解析から、トンネル覆工構造に対する設計用圧力変動の評価を行った。本研究では、設計荷重の評価を行う観点から、トンネル内の最大圧力変動の算定を行う上で、圧力波 (突入波、退出波、反射波) の距離減衰特性や反射率による圧力損失特性などは考慮していない。しかし、長さが 10km を越えるような長大トンネルでは、これらの値を考慮することにより、トンネル内の最大圧力変動をより正確に評価することが可能である。今後の研究課題として、山梨リニア実験線でのさらなる圧力変動測定、あるいは、より精緻な CFD 解析を通じ、トンネル内の圧力波の距離減衰特性や坑口での波の非線形性を考慮した反射現象の解明な

表-8 トンネル内の最大正圧・最大負圧

最大値	1 列車単独走行 550 km/h	2 列車すれ違い 1000km/h
正 圧 $\frac{\Delta P_{\max}}{P_0}$	+0.109	+0.146
負 圧 $\frac{\Delta P_{\min}}{P_0}$	-0.123	-0.188

どに取り組むつもりである。また、ここで評価したトンネル内の圧力変動を用い、合理的なトンネル覆工構造の設計法の確立に努めたいと考えている。

謝辞： 本研究を進めるにあたり、成蹊大学工学部 小川隆申 助教授、(財) 鉄道総合技術研究所 環境工学研究部 前田達夫 研究部長、ならびに、(株) 大崎総合研究所 野澤剛二郎 主任研究員には貴重なご意見を賜っている。ここに記して深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山崎幹男, 佐々木幹夫, 植田記久男, 佐藤 勉: 山梨リニア実験線におけるトンネルの計画・設計について, 土木学会第 47 回年次学術講演会概要集, 第 3 部, 土木学会, 1992 年 9 月。
- 2) 原 朝茂: 列車が高速で隧道に突入する場合の流体力学的諸問題, 鉄道技術研究報告, No.153, 鉄道技術研究所, 1960 年。
- 3) 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 (共通編第 89 号), 鉄道技術研究所, 1973 年 10 月。
- 4) 山本彬也: 列車とトンネルの空気力学, 鉄道技術研究報告, No.1230 (共通編第 159 号), 鉄道技術研究所, 1983 年 3 月。
- 5) 小沢 智, 森藤良夫, 前田達夫, 木下真夫: トンネル出口微気圧波の実態, No.1023, 鉄道技術研究所, 1976 年 11 月。
- 6) 小沢 智: トンネル出口微気圧波の研究, No.1121, 鉄道技術研究所, 1979 年 7 月。
- 7) 前田達夫: 列車の空気力学的特性およびトンネル微気圧波低減対策法に関する研究, 鉄道技総研報告, 特別第 20 号, (財) 鉄道総合技術研究所, 1998 年 4 月。
- 8) Howe, M.S., Iida, M., Fukuda, T. and Maeda, T.: Theoretical and Experimental Investigation of the Compression Wave Generated by a Train Entering a Tunnel with a Flared Portal, *J. of Fluid Mech.*, Vol.425, pp.111-132, 2000.
- 9) 前田達夫: 鉄道の騒音・空気力学に関する最近の動向, 鉄道技総研報告, 第 14 巻, 第 9 号, (財) 鉄道総合技術研究所, pp.1-4, 2000 年 9 月。
- 10) Howe, M.S.: Review of the theory of the Compression Wave Generated when a High-Speed Train Enters a Tunnel, *Proc. Inst. Mech. Engng F: J. Rail and Rapid Transit.* 213, pp.89-104, 1999.
- 11) 渡瀬 久, 山崎幹男, 梶川 徹, 前田達夫, 梶山博司, 上野 真: 高速鉄道トンネル内の圧力変動に対する覆工の挙動把握-トンネル内圧力変動解析-, 土木学会第 55 回年次学術講演会概要集, 第 3 部 (B), 土木学会, 2000 年 9 月。
- 12) 梶川 徹, 山崎幹男, 渡瀬 久, 宮本雅章: 高速鉄道トンネル内の圧力変動に対する覆工の挙動把握-覆工の安全性評価-, 土木学会第 55 回年次学術講演会概要集, 第 3 部 (B), 土木学会, 2000 年 9 月。
- 13) 加藤 覚, 山崎幹男, 梶川 徹, 山本敦仁, 若原敏裕, 新美勝之, 野澤剛二郎: 高速鉄道トンネル内に発生する退出波と反射波の三次元 CFD 解析, 土木学会第 55 回年次学術講演会概要集, 第 3 部 (B), 土木学会, 2001 年 10 月。
- 14) Ogawa, T. and Fujii, K.: Numerical Investigation of Three-dimensional Compressible Flows Induced by a Train Moving into a Tunnel, *Computers and Fluid.*, Vol.26. No.6, pp.565-585, 1997.

- 15) Ogawa, T. and Fujii, K. : Numerical Simulation of Compressible Flows Induced by a Train Moving in a Tunnel, *Comput. Fluid Dyn. J.*, AIAA-93-2951, pp.63-82, 1994.
- 16) 小川隆申, 藤井孝蔵: 高速で走行する列車のトンネル突入によって生じる圧縮波の数値シミュレーション, 日本機械学会流体工学部門講演会論文集 No.930-49, 日本機械学会, 1993年.
- 17) 小川隆申: 数値流体解析における格子作成法(その1), 計算工学, Vol.6, No.2, 日本計算工学会, pp.23-27, 2001年4月.
- 18) 小川隆申: 数値流体解析における格子作成法(その2), 計算工学, Vol.6, No.3, 日本計算工学会, pp.30-34, 2001年7月.
- 19) 松尾一泰, 圧縮性流体力学, 理工学社, 1994年.
- 20) 日野幹雄: 流体力学, 朝倉書店, 1992年.

(2002.8.7 受付)

EVALUATION OF PRESSURE FLUCTUATION IN HIGH-SPEED TRAIN TUNNEL

Mikio YAMAZAKI, Toshihiro WAKAHARA, Takaaki NAGAOSA,
Makoto UENO and Yozo FUJINO

Pressure fluctuations in a tunnel induced by a high-speed train at over 500km/h were investigated in this study, to realize the rational tunnel lining design. Full-scaled measurements of the tunnel pressure were carried out in the Yamanashi Maglev Test Line to understand the characteristics of the pressure fluctuations. Numerical simulations of the pressure fluctuations were also made, and the theoretical formulas to estimated the pressure fluctuations were modified to use in the higher Mach number region of the train speed, based on the numerical results. The evaluated values from the formulas were carefully compared with the data obtained from the full-scaled measurements. The validity of those formulas was confirmed by the results of those comparisons. The maximum pressure fluctuations induced by the train moving through a tunnel were evaluated to design the tunnel lining used in the high-speed train tunnel such as for a maglev linear motor vehicle.