

駅における列車通過時の空力現象

武居 泰
 構造物技術研究部
 (建築 研究室長)

飯田 雅宣
 環境工学研究部
 (空気力学 研究室長)



たけい やすし いいだ まさのぶ

はじめに

高速列車が通過する駅では、時速300km近いスピードで車両が狭い空間を走り抜けていくことがあります。通過する際には様々な空力現象が発生しますが、飛行機や自動車などほかの分野では見られない鉄道固有の現象であるといえます。新幹線が高速化されつつある昨今、駅の設計や保守において、この空力現象は無視できなくなっています。ここでは、空力現象の中でも特に重要な圧力変動現象を対象とします。

圧力変動とは

空気や水のような流体の内部に一つの面を考えたとき、この面を流体が垂直に押す力の単位面積当たりの値を「圧力」と言います。圧力が時間的に変動すれば、それが「圧力変動」になります。圧力の単位は、国際単位系でPa(パスカル、 N/m^2 に同じ)と定められており、日本の計量法もこれを基本としています。

さて、我々の周りでは常に圧力が変動しています。例えば、天気の変り変わりにより、日々、気圧が数百から数千Paまで変化します。海拔0mから富士山の頂上へ登れば、約30000Pa気圧が低下し、反対に10mの海底に潜れば、100000(= 10^5)Paの圧力上昇(ただしこの場合は水圧)が鼓膜に作用します。圧力は、最初に述べたように面にかかる力なので、その面の両側の圧力が同じ大きさであれば、圧力の変化量が何万Paになろうとも面に正味の力は作用しません。したがって、鼓膜の両側の外耳と中耳の圧力が同じであれば問題はおきません。

圧力変動の影響

構造物に面を構成する部材があり、その両側の面の圧力に差が生じると、

その部材に対しては荷重が作用します。例えば、飛行機を見てみましょう。初期の飛行機は機体が気密化されておらず、気圧の低い(したがって密度や温度も低い)高空を飛ぶ際は、乗員は酸素マスクや耐寒服を着用する必要がありました。現代の旅客機は気密構造(正式には「与圧構造」)を採用することで機内を快適な環境に保てるようになっています。しかし、その代償として何万Paという圧力荷重が繰り返し作用し、機体の金属疲労を促進することはよく知られています。鉄道においても、新幹線車両では気密構造が採用されています。これは後で詳しく述べますが、列車がトンネル内を高速で走行すると、1秒に満たない時間内に数千Paの圧力が変動するという現象が何度もトンネル内で発生するので、その影響が車内に及ばないようにするためです。ただし、新幹線車両の気密度は完全ではなく、トンネル走行時に車内で若干の圧力変動が感じられます。気密を完全にすると車外の圧力変動がすべて圧力荷重となって構体に作用し、車体構造設計上、不経済になるから、むしろ車内環境を害しない範囲で若干の空気の漏れを許容しているのです。

駅部で発生する圧力変動

圧力変動の生ずる原因はさまざまですが、飛行機やエレベーターのように高度変化が原因となる場合を除けば、ほとんどが流れに伴って発生します。したがって、流れが高

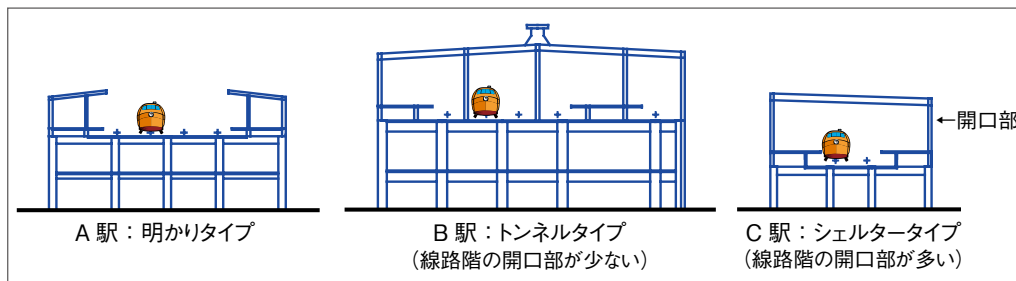


図1 3つのタイプの駅の例

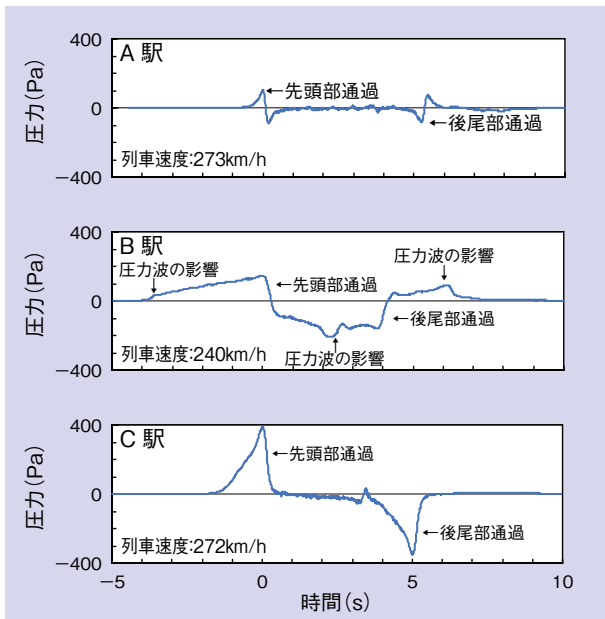


図2 列車通過時のホーム上の圧力波形

速であるほど、言い換えれば、物体が高速で移動するほど、圧力変動は大きくなります。鉄道でも、圧力変動の現象は、新幹線などの高速鉄道でより顕著に現れます。列車通過時の圧力変動に関して言えば、その大きさは列車速度の約2乗に比例して増大します。

列車の走行により引き起こされる圧力変動が、車両形式と速度に依存するのは当然のことですが、仮にこれらが同じであっても、地上側の条件が異なれば、圧力変動は変わってきます。特に、明かり区間（線路の周囲に覆いが無い区間）とトンネル区間では、圧力変動の大きさや変化の様相は大きく異なります。また、上越新幹線などに設置されている雪害対策用のスノーシェルターは、一見トンネル区間と同等のように見えますが、側面に連続したスリットがあるため、明かり区間とトンネル区間の中間のような状況になります。今回のテーマは、列車が高速で鉄道の駅を通過するときに発生する圧力変動ですが、圧力変動の発生状況から駅の形態を(1)明かりタイプ、(2)トンネルタイプ、(3)シェルタータイプの3つのタイプに分類することができます。

図1は、これら3つのタイプの駅の例を示します。A駅はホームだけが上家（屋根）で覆われた駅で、(1)の明かりタイプに相当します。B駅は、気密度が非常に高い上家で覆われた駅で、(2)のトンネルタイプになります。C駅はスリットやルーバーなどの開口部の多い上家で覆われた駅で、(3)のシェルタータイプに当たります。

図2は列車通過時の圧力変動を各駅のホーム上で測定した結果を示したものです。列車速度や線路階の断面積が異なっているため、圧力変動の大きさを一概に比較することはできませんが、一見して、圧力波形のパターンが3つのタイプで異なっていることがわかります。

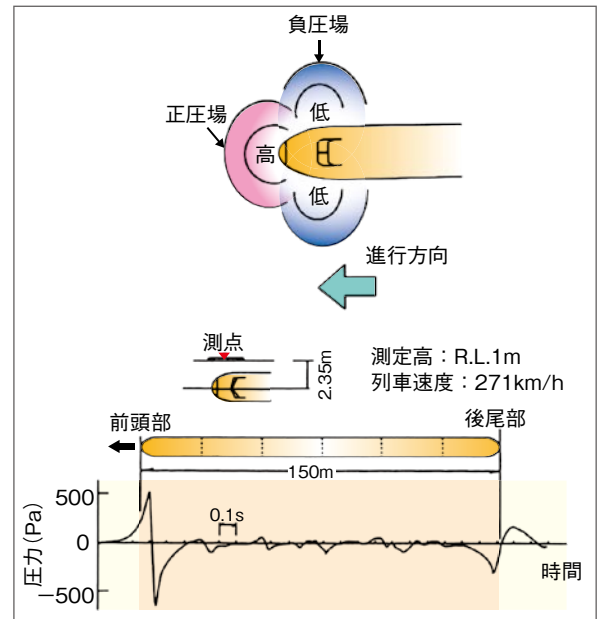


図3 明かり区間通過時の圧力変動

1) 明かりタイプ

まず、明かり区間走行時の圧力変動について説明します。図1で、これに対応する駅はA駅です。列車が明かり区間を走行するときには、図3上に示すように、列車先頭部まわりに圧力場が形成されています。先頭部の先端では空気の流れがせき止められ圧力が高くなります。そこから車両の中間部に向けて、流れが先頭部の凸面を回り込んで増速し、圧力が低くなります。この図に示すような先頭部まわりの圧力場は、走行する列車に乗って観測すれば、時間的に変化しない、定常な圧力場になりますが、地上側に静止した立場で観測すれば、列車の通過とともに時間的に変化する圧力変動となります。圧力変動のパターンは、図3下に示すように、先頭部通過時に正・負のパルスとなります。圧力変動の大きさは、先頭部からの距離の約2乗に反比例して減衰します。後尾部の周りにも同様の圧力場が形成され、後尾部通過時、地上側では図3下に示すような負・正のパルス状の圧力変動が観測されます。なお、列車後尾部では、通常、粘性の影響により流れが剥離するので、圧力変動の大きさは先頭部と比べて一般に小さくなります。図2に戻って、A駅の圧力変動波形を見ると、図3の明かり区間の圧力変動の波形と同様であることがわかります。

2) トンネルタイプ

次に、トンネル区間走行時の圧力変動について説明します。図1で、これに対応する駅はB駅です。トンネル区間の流れが明かり区間と大きく異なる点は、トンネル区間では列車先頭部と後尾部の近傍を除いて、流れの向きがほぼトンネルの長手方向に沿っていることです。このとき、圧力は流れと垂直な方向にほぼ一定となります。すなわち、トンネル断面内で圧力が一定になります。したがって、ト

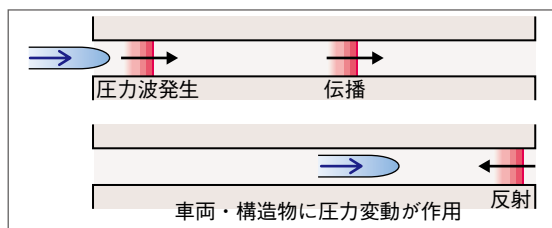


図4 トンネル区間通過時の圧力変動

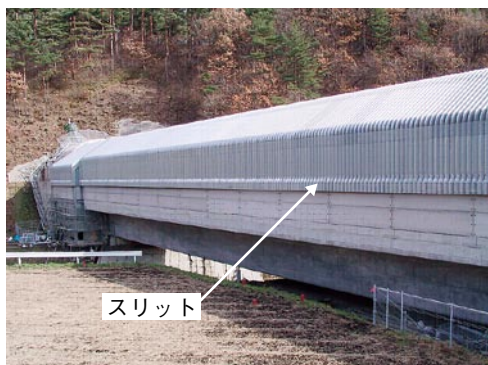


図5 シェルター(側面に連続したスリットあり)

トンネル内の圧力は、先頭部と後尾部の近傍を除き、長手方向だけを考えた1次元モデルにより、トンネル内での圧力変動の多くの現象を説明できます。例えば、図2のB駅の圧力波形を見ると、列車の先頭部が通過してから、後尾部が通過し終わるまでの間、圧力がマイナス側の状態になっていることがわかります。これは次のように説明できます。トンネルを管路と見れば、列車が走行している区間は、列車の断面積分だけ、管路の断面積が小さくなった縮小管になります。いま、走行している列車から観ると、この縮小管は静止しており、そこに上流から空気が流れ込むという1次元問題になります。すると、列車の存在する区間が縮小管部分となり、流速が増加するため圧力が低下するのです。

トンネルの場合には、もう一点、明かり区間と大きく異なる特徴として、空気の圧縮性の影響がより現れやすくなることがあります。列車がトンネルに突入すると、流れが変化し、そのためトンネルの内外で圧力波が発生します。トンネル内の圧力波は、図4に示すように、トンネル内を反対側の坑口まで伝播し、さらに、そこで反射して戻ってきます。トンネル内に静止した観測者から観ると、圧力波が(音速で)通過するたびに、圧力が変化することになります。このように、トンネル内あるいはそれに近い構造を持つ駅では、列車の先頭部・後尾部の通過のみならず、圧力波の通過によっても圧力変動が発生することになります。図2の圧力波形にも圧力波の影響が現れているのがわかります。

3) シェルタータイプ

最後に、シェルター区間走行時の圧力変動ですが、これはトンネル区間と明かり区間の中間的な状況となります。対応する駅は、図1のC駅です。スノーシェルター(図5)



図6 実験模型

や通常的全覆い上家では、側面にスリットなどの開口部を設けているため、気密性はあまり高くありません。したがって、上家部突入などで駅内部に発生した圧力波は、開口部から外部へ抜け、長手方向に長距離を伝播することはできません。その結果、図2に示すC駅のように、列車通過時の圧力変動の波形には、圧力波による影響はほとんど現れません。この点はB駅のようなトンネルタイプの駅とは異なります。一方、列車通過時に関しては、流れが平均的にはほぼ1次元的特徴がトンネルと共通しており、先頭部通過時の圧力低下の分布など類似したパターンの圧力変動が観測されます。ただし、シェルター側面に開口部が連続して空いているため、シェルター外部から空気が流れ込み、シェルター内外の圧力差を解消し、トンネルのように列車全長にわたって圧力が低下するという状態は保持できません。したがって、先頭部と後尾部の近傍のみで圧力変動が鋸歯状に発生するという結果となります。

圧力変動の予測

圧力変動は、駅施設を構成する壁や屋根などの部材へ繰返し荷重として作用します。したがって、発生する圧力変動が、どのくらいの大きさになるかを予測しておくことは、駅施設の設計やメンテナンスにおいて重要になります。しかし、特にシェルタータイプの駅では、先ほど述べましたように、トンネル区間と明かり区間の中間的な状況となるため、簡単には予測できませんでした。そこで、模型実験(図6)や実際の駅での現地測定結果を参考に、理論式を補正することにより簡便な圧力算定式を作成し、駅施設の設計実務や列車の高速化に伴う影響予測などが、簡易にできるようになりました(図7)。また、詳細な予測を行うためのツールとして、パソコンで動作する「圧力変動予測解析システム」*が開発されています(図8)。

*「圧力変動予測解析システム」は鉄道・運輸機構と鉄道総研が共同開発したものです。

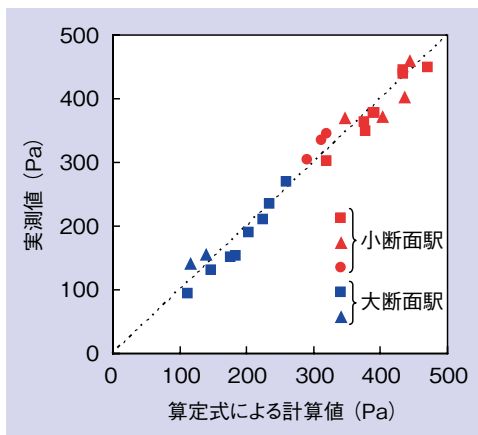


図7 簡易算定式による圧力変動ピーク値の計算値と実測値の比較(シェルタータイプ)

圧力変動の対策

圧力変動による部材への作用荷重の大きさは、台風時に作用する風圧力より小さいのですが、作用回数が桁違いに多いため部材の疲労劣化を促進する原因となります。そのため、駅施設の安全性を確保するための対策として、圧力変動を受ける箇所には疲労特性に優れた部材を使用する必要があります。柱や梁などの骨組み部材は橋梁と同じように疲労に対する安全性を構造計算により評価できますが、壁や屋根などのいわゆる建築仕上げ部材の疲労現象は、主にビスの緩みやボード類の割れなどであるため、その特性が明確ではありませんでした。そこで、実際に仕上げ部材の疲労試験を行い(図9)、作用荷重の大きさと損傷発生に至るまでの繰返し回数の関係(疲労曲線)に基づいた簡易な評価法を提案しています。

また、作用する圧力変動そのものを低減させる方法として、駅を覆う壁などに開口を増設することが行われています(図10)。トンネルタイプからシェルターまたは明かりタイプにすることにより、圧力変動を低減させることができます。

駅で発生する圧力変動は、ホームに立つ人体の表裏では瞬時に同じ値になるため、圧力変動が作用して転倒するようなことはありません。しかし、線路階で発生した圧力変動が階段などからコンコースへ伝播していくと、出入口や窓などの外気に接するところでは大気圧との圧力差が生じるため、局所的に強風が発生する場合があります。したがって、圧力変動の低減対策は、部材への影響のみならず、旅客への安全確保にも寄与します。

おわりに

以上、高速列車が通過する際に発生する圧力変動の発生原理と特性や駅部の圧力変動の予測・対策法について述べました。圧力変動を低減し、駅を構成する部材が受けるダメージを緩和するためには、もちろん開放的な明かりタイ

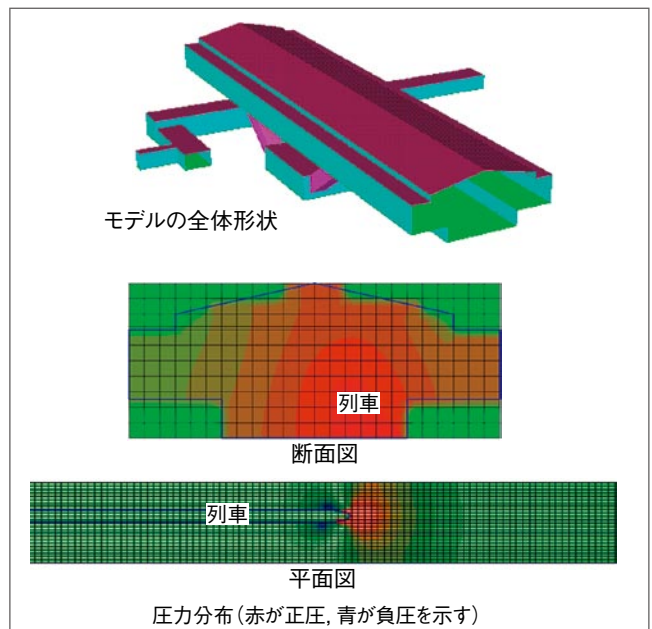


図8 圧力変動予測解析システムによる解析例

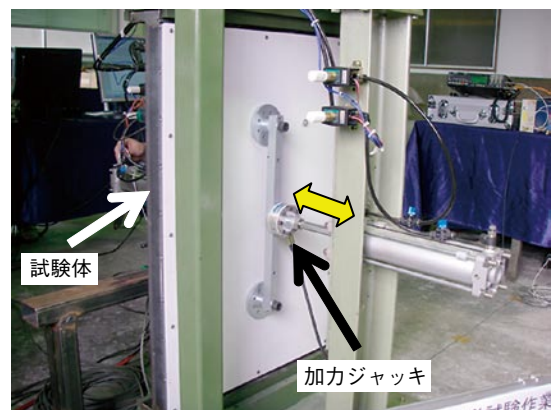


図9 仕上げ材の疲労試験状況



図10 開口部の増設例

プの駅が有利です。しかし、雪国などではホーム上に気密性の高い全覆い型の上家を設けるほうが快適性を保つためには有利です。これからの駅は、駅利用者の快適性の向上やデザイン性によりウェートを置いた設計が必要となりますが、その際には圧力変動を考慮した部材の耐久性や維持コスト低減にも配慮する必要があると考えます。[RRR]