

環境工学に関する研究開発の動向

飯田 雅宣*

Recent Trends in Research and Development on Environmental Engineering

Masanobu IIDA

Environmental engineering in railways mainly covers noise, ground vibration and tunnel micro-pressure wave. This review describes the results of recent studies on these issues performed by Railway Technical Research Institute.

キーワード：沿線環境，騒音，地盤振動，トンネル微気圧波

1. はじめに

鉄道沿線の主要な環境問題は、騒音、地盤振動、トンネル微気圧波であり、これらは、物理学的には振動・音響現象である。総研報告の本号では「環境工学」特集と題し、沿線環境に関する最新の研究開発成果を7件報告する。ところで、振動・音響の現象は普遍的な力学現象であり、鉄道のさまざまな技術分野で問題になっている。そのため「環境」特集号以外の総研報告、例えば「鉄道力学」や「材料技術」の特集号においても、沿線環境に係わる騒音・振動の研究成果が多数報告されている。そこで、鉄道総研における沿線環境に関する最近の研究開発動向の全体を俯瞰できるよう、本展望解説では、ここ約2年間に渡って発行された各特集号の総研報告の中から沿線環境に関する研究論文を選び、まとめて紹介することで、読者の便に供したいと思う。

2. 騒音

沿線騒音に関する研究課題は、転動音、空力音、構造物音などそれぞれ異なる音源から発生する個々の騒音が全体騒音に占める寄与度を求めること、各音源の特性や発生メカニズムを物理的に解明すること、各音源対策や伝搬対策などの騒音低減法を開発すること、新線建設時や速度向上時の沿線騒音を事前に予測評価する手法を開発することである。以下、これらの各課題毎に成果を紹介する。

2.1 音源別寄与度評価

「高速走行時における車両下部音の音源別寄与度」¹⁾

新幹線騒音の音源別寄与度に関する従来の見解では、新幹線が200km/h以上で走行する場合、地上25m点での騒音全体に対して集電系音と車両下部音が占める寄与が大きい傾向にある。このうち、車両下部音は、転動音

* 環境工学研究部 部長

と台車部などの空力音から成るが、両者の相対的な内訳が明らかではなかったため、対策のターゲットが明確になっていなかった。そこで、現車試験による全体音の測定と転動音に関する数値解析を行って、新幹線の車両下部音に対する転動音と空力音の寄与度を評価し、以下の結果が得られた。①315km/h以下の速度で列車が走行する場合、空力音は主に1600Hz以下の周波数域で発生するが、車両下部音全体の主音源は転動音である。②335km/h以上では、空力音が発生する上限周波数が3150Hzまで高くなるとともに、車両下部音全体に対する空力音の寄与率が50%以上を占めるようになる。

2.2 各音源の特性評価

(1)「在来線車両走行時の騒音発生に関わる車輪振動特性」²⁾

転動音の特性を明らかにするには、レールおよび車輪について調べる必要があるが、この研究では特に車輪の振動特性に注目して、実験および計算を行った。まず衝撃加振試験により定置での車輪の振動特性を調べ、次に実際に走行する鉄道車両の車輪に加速度計を仮設して、回転する車輪の振動特性を測定し、両者を比較した。その結果、走行試験による車輪の振動加速度のピーク周波数は、径方向、軸方向ともに加振試験における径方向加振時のピーク周波数とほぼ一致すること、車輪の振動速度レベルは、タイヤ部、ウェブ部ともに走行速度のおよそ3乗則に従うことがわかった。

(2)「RC ラーメン高架橋の部材振動特性に関する解析的検討」³⁾

300km/h以上の高速走行時におけるRC高架橋の構造物音の特性を明らかにするため、数値解析及び現地測定を実施した。まず、数値解析において、大規模かつ複雑な連成問題を「車両/軌道」と「軌道/構造物」の2つの系に分割して効率的に計算する手法を新たに提案した。この手法では、前者の系で軌道変位の高周波成分を

特集：環境工学

考慮した車両/軌道系の相互作用解析を行って移動加振力を算定するとともに、後者の系でモーダル法により自由度を縮減した構造物の振動解析を行う。次に、この手法を用いて、標準的なRCラーメン高架橋を対象に振動に関するパラメータ解析を行った。その結果、20Hz以下の周波数帯では軸配置が、20～100Hzではばね下質量及び長波長の軌道変位が、100～150Hzではレール締結間隔が、150Hz以上の領域ではレール凹凸が、それぞれ構造物音の支配的な発生要因となっていることを明らかにした。

(3)「風洞試験における台車部空力騒音測定手法の精度向上」⁴⁾

新幹線の主要な空力音源は、集電系と車両下部（特に台車部）である。これまでの新幹線車両の開発の歴史において、編成列車内での集電系の個数は劇的に減少したが、台車の数は変わっておらず、今後の高速化においてはこの車両下部空力音を低減することが沿線騒音低減の点からは最重要課題と考えられる。空力音を実験的に調べる手法としては、低騒音風洞での試験が最も一般的であるが、その際模型に流入する流れが現車での状態をできるだけ再現していることが望ましい。そこでこの研究では、台車部流入箇所における流速分布を把握するため、まず新幹線の現地試験で、まくらぎ方向中心におけるレール方向流速成分の鉛直方向分布を測定した。次にこの結果を流入条件として再現し、台車部から発生する空力騒音の評価を行うための風洞試験法を開発した。この手法を用いて台車部空力騒音の測定を行った結果、台車部模型形状の模擬精度が騒音のスペクトルに影響を与えることが明らかとなった。

2.3 低減対策

(1)「レール継目用防音材の性能向上」⁵⁾

主として在来線のロングレール区間の絶縁継目を対象に、簡易に施工できるレール継目用防音材の開発・改良を行った。従来の試作品では営業線で十分な騒音低減効果が得られなかったため、防音材の上面に厚さ100mmの防音パネルを適用するなどの改良を行って、現車試験により効果を測定した。さらに、碎石を袋に詰め込んだ軌道面吸音材および一般区間用に先行開発しているレール防音材との併用効果も調べた。その結果、これら3種類の材料を同時に設置すると、レール近傍点における電動車の騒音が約3dB、付随車の騒音が約3.5dB低減することが確認された。

(2)「スピーカー駆動型シンセティックジェットによるパンタグラフ舟体の空力音低減」⁶⁾

鉄道総研では、流れ場制御によってパンタグラフ舟体の空力音を低減する手法について、種々の基礎的な取り組みを行ってきた。その中で、この研究では、流れ場を効率よく制御できるスピーカー駆動型シンセティックジェット(SJA)に着目し、舟体への適用可能性を検討した。まず、CFD解析を行った結果、ジェット吹き出

し口が舟体の上流側側面の最下部位置にある場合に最もカルマン渦抑制の効果が高いことがわかった。そこで、実際に2次元舟体模型の上流側側面の最下部位置に噴出孔を設けてSJAを10個埋め込み、風洞試験を行ったところ、風速90km/hにおいてエオルス音を低減できることを確認した。また、隣り合うスピーカーを逆位相で駆動させることによって、同位相駆動の場合と比べてエオルス音低減効果を維持したまま、スピーカーの駆動音を下げられることがわかった。

(3)「プラズマアクチュエータによるパンタグラフ舟体の空力音低減手法の基礎検討」⁷⁾

流れ場制御によって空力音を低減する手法として、上述のSJAの他に、プラズマアクチュエータ(PA)についても風洞試験とCFDにより検討を行った。まず低速域で風洞試験を行った結果、PAにより流れの剥離が抑制され、後流に生じるカルマン渦の巻き込みが弱まることが確認された。次に、CFD解析を行い、十分な出力が得られれば、PAにより舟体まわりの流れ場を制御し、空力音を低減できることがわかった。

(4)「流れ場制御によるパンタグラフ舟体の空力音低減手法の検討」⁸⁾

上述のPAとSJAの結果を受けて、流れ場制御による舟体空力騒音低減のための第三の手法として、定常吸い込み手法の検討を行った。この手法は、高風速域でPAの流れ場制御メカニズムを実現するものである。舟体の剥離点近傍で定常的に吸い込みを行うと、流れの剥離が抑制されてカルマン渦が弱まり、エオルス音を低減できることを風洞試験により確認した。また、SJAについてもCFD解析と風洞試験による検討を深度化し、SJAの噴出口を矩形とし、そのアスペクト比を変更することでSJAから放出される渦輪の特性を調整し、流れ場の制御効率を向上できることがわかった。

(5)「トンネル緩衝工内の吸音化による坑口騒音の低減効果」⁹⁾

新幹線がトンネル坑口付近を通過する際の騒音には、通常の明かり区間の走行音の他に、トンネル内走行時に発生する音がトンネル内を反響して坑口から放射される音(坑口放射音)があり、後者への対策も課題となっている。そこで、この研究ではトンネル微気圧波対策として新幹線のトンネル坑口に設置されている緩衝工に着目し、その内壁を吸音化した場合の騒音低減効果を1/20縮尺模型を用いた音響試験により定量的に評価した。その結果、音の評価点がレールレベル(R.L.)より低い位置に対しては、緩衝工の上部(斜面または上面)を対象した場合に、坑口放射音がより低減することが明らかになった。実験条件に対応する吸音対策を現地の緩衝工に施工したところ、予測結果とほぼ同等の騒音低減効果が得られ、音響模型試験による坑口騒音の評価結果が有効であることが確認された。

2.4 騒音予測評価手法

「切土区間における新幹線の騒音予測手法」¹⁰⁾

鉄道の切土区間の沿線で観測される騒音分布は、切土壁面における反射音の影響を受けるなどの特徴がある。そこで、音響模型試験を用いて切土区間を対象とした騒音分布の評価、検討を行い、この結果を元に切土区間における新幹線の騒音予測手法を改良した。音響模型試験による結果から、切土区間の沿線における騒音分布は、切土壁面における音の反射の影響を強く受け、斜め上方に音が強く放射されることがわかった。さらに従来の騒音予測手法に対して切土壁面における反射音を考慮したモデルを新たに導入し、その予測結果と音響模型試験による結果を比較した。その結果、切土壁が5m以下では精度良く予測できることが示され、本手法の妥当性が確認された。

3. 地盤振動

地盤振動に関する研究課題は、列車走行に伴う地盤振動の特性や発生メカニズムを物理的に解明すること、振動低減法を開発すること、新線建設時や速度向上時の地盤振動を事前に予測評価する手法を開発することである。

(1)「鉄道沿線地盤振動の水平動および鉛直動の伝播特性」¹¹⁾

新幹線の地盤振動の予測・対策方法を検討するためには、水平動を含めた地盤振動の伝播特性を把握することが重要である。そこで、過去に実施した起振機試験や新幹線沿線における振動測定の結果にもとづき、鉄道沿線地盤振動の水平動および鉛直動の伝播特性について検討した。その結果、対象とした測定箇所では同一位置、同一成分の正規化スペクトルは、列車速度や車軸配置などの地盤振動起振力特性が異なる場合でもほぼ同じであり、地盤振動伝播特性に対する起振力特性の影響が小さいことを確認した。また、鉛直動と水平動のいずれについても地盤振動の減衰は構造物に比較的近い位置で生じること、地盤振動の大きさや距離減衰量等に対しては構造形式や地盤条件の影響が大きいことなどを確認した。

(2)「架道橋付近における軌道支持剛性変化が地盤振動に及ぼす影響」¹²⁾

盛土区間における架道橋の橋台付近は盛土と橋台、桁の構造物境界であり、バラストの支持剛性の変化点である。また、盛土に緩み等を生じやすいため、加振力が急激に変化する箇所にもなっている。そこで、この研究では車両・軌道・構造物系と構造物・地盤系の二つの動的解析を組み合わせ、橋台付近の加振力の変化が地盤振動に及ぼす影響を検討し、さらに架道橋を対象とした振動低減対策工の効果についても検討した。その結果、加振力は橋台背面盛土で大きくなり、背面盛土に緩みがあったり沈下量が増加するほど加振力が増大することを

確認した。また、架道橋の桁増厚や桁端部へのダンパ付加などの振動低減対策工により、沿線地盤において架道橋桁の固有振動数付近の周波数帯で振動が低減するという結果が得られた。

(3)「発泡ゴムを用いた低ばね定数軌道パッドの低温特性の向上」¹³⁾

レールを支持する軌道パッドは、地盤振動や構造物音の低減に有効な部材であるが、低温で弾性率が增加するため、緩衝性能が低下する傾向がある。そこで、低ばね軌道パッドの低温特性を向上することを目的として、エチレンプロピレンゴム (EPDM) を候補として、素材と構造の改良を行った。構造と形状では、ゴムを発泡化するとともに、従来の溝付から平板形状に変更することにより、応力分布が改善した。また、発泡ゴム内部の気泡が衝撃荷重を吸収するため、緩衝性能の向上も期待できる。このEPDMゴムとともに、現用素材であり低廉化が期待できるスチレンブタジエンゴム (SBR) 製の発泡ゴムも試作し、重錘落下による衝撃実験装置により緩衝性能を評価した。その結果、両者とも従来品に比べて低温特性が大幅に改善することを確認した。

4. トンネル微気圧波

トンネル微気圧波に関する研究課題は、微気圧波の特性や発生メカニズムを物理的に解明すること、微気圧波低減法を開発すること、新線建設時や速度向上時の微気圧波を事前に予測評価する手法を開発することである。

(1)「車両先頭部形状の三次元性を考慮した微気圧波模型実験方法の開発」¹⁴⁾

トンネル微気圧波の現象解明、予測および低減対策法の検討にあたっては、列車がトンネルに突入する際に形成される圧縮波の波形を精度よく評価する必要がある。この研究では、圧縮波の評価手法の一つである模型実験について、現行の回転輪方式の発射装置のまま実形状の車両模型を発射できる方法を開発した。その結果、最高速度約250km/hで、実形状車両模型を用いる実験が可能となった。この方法を用いた実験の結果、車両先頭部周りで大きな流れの剥離が生じていない場合には軸対称模型を用いた模型実験が十分な精度を有していること、スノープラウやスカートのように鋭い端部を持つ部分により車両先頭部周りで大きな流れの剥離が生じているような場合には、実形状模型を用いることにより模型実験による評価精度の向上を図れることを確認した。

(2)「トンネル微気圧波の放射に対する地形条件の影響」¹⁵⁾

トンネル微気圧波の波形やピーク値の空間分布は地形によって変化する。この研究では、トンネル微気圧波の放射に対する地形条件の影響を調べるため、列車模型発射装置を用いて模型実験を行った。そして、坑口周りの

特集：環境工学

地形が片側切土や両側掘割および高架橋である場合について、微気圧波ピーク値の空間分布を把握した。その結果、片側切土の場合、地面上では切土が高くなると微気圧波ピーク値が大きくなるが、地山上では平地よりも小さくなることなどがわかった。さらに、これらの実験結果から、地形の影響を表わすパラメータを求めた。

(3)「側面開口部付き緩衝工から放射される微気圧波」¹⁶⁾

トンネル微気圧波の主要な低減対策方法として、列車突入側のトンネル坑口における側面開口部付きトンネル緩衝工がある。しかし、新幹線は複線トンネルで、上下線で共用されるため、当該線の列車突入側坑口に設置された緩衝工は、反対線に対しては退出側坑口（微気圧波放射側坑口）に緩衝工が設置されていることになる。この研究では、この退出側緩衝工が放射微気圧波に及ぼす影響を調べた。まず、模型実験を行い、側面開口部の総面積が大きい緩衝工がある場合に、通常のトンネル坑口と比較して、開口部周辺で微気圧波最大値が増大することなどがわかった。さらに、これらの模型実験結果の傾向が、音響学的な解析モデルにより再現可能なことを明らかにした。

(4)「フード状構造物による列車退出側坑口でのトンネル微気圧波低減対策」¹⁷⁾

上述のように、新幹線の複線トンネルでは、当該線の列車突入側坑口の緩衝工が反対線側にとっては微気圧波放射側坑口に設置されていることになり、そこから放射される微気圧波に影響を及ぼす。そこで、この状況を積極的に利用して、緩衝工を「列車退出側坑口（＝微気圧波放射側坑口）に設置されるフード状構造物」とみなし、そこから放射される微気圧波を低減する機能をフードに持たせる方策を検討した。具体的には、フードの内部を線路方向に長い壁（以下、内壁）で2分割し、分割した一方の明かり側端部を閉鎖し、残りの端部を開放する構造のフードを考案した（以下、内壁付き出口フードと呼ぶ）。この内壁付き出口フードの微気圧波低減効果を調べるため、音響学的な計算による予測と模型実験を行った。その結果、最大で「明かり側端部の開口部分断面積とフード全断面積の比」に等しい値の微気圧波低減効果が得られること、また、計算による予測結果は模型実験結果と良く一致することなどがわかった。

5. おわりに

新幹線、在来線ともに、速度向上、輸送力増強への取り組みが進められており、沿線環境負荷の低減がますます重要になっている。鉄道総研では、今後も沿線環境に関する研究開発を鋭意推進していく所存であるので、関

係各位のご支援、ご協力をお願いしたい。

文献

- 1) 北川敏樹ほか：高速走行時における車両下部音の音源別寄与度，鉄道総研報告，Vol.27，No.1，pp.23-28，2013
- 2) 村田香ほか：在来線車両走行時の騒音発生に関わる車輪振動特性，鉄道総研報告，Vol.27，No.1，pp.35-40，2013
- 3) 渡辺勉ほか：RC ラーメン高架橋の部材振動特性に関する解析的検討，鉄道総研報告，Vol.27，No.10，pp.47-52，2013
- 4) 山崎展博ほか：風洞試験における台車部空力騒音測定手法の精度向上，鉄道総研報告，Vol.27，No.1，pp.29-34，2013
- 5) 半坂征則ほか：レール継目用防音材の性能向上，鉄道総研報告，Vol.28，No.2，pp.23-28，2014
- 6) 佐藤祐一ほか：スピーカー駆動型シンセティックジェットによるパンタグラフ舟体の空力音低減，鉄道総研報告，Vol.26，No.8，pp.5-10，2012
- 7) 光用剛ほか：プラズマアクチュエータによるパンタグラフ舟体の空力音低減手法の基礎検討，鉄道総研報告，Vol.27，No.10，pp.11-16，2013
- 8) 光用剛ほか：流れ場制御によるパンタグラフ舟体の空力音低減手法の検討，鉄道総研報告，Vol.28，No.12，pp.11-16，2014
- 9) 川口二俊ほか：トンネル緩衝工内の吸音化による坑口騒音の低減効果，鉄道総研報告，Vol.28，No.3，pp.11-16，2014
- 10) 小方幸恵ほか：切土区間における新幹線の騒音予測手法，鉄道総研報告，Vol.28，No.3，pp.5-10，2014
- 11) 横山秀史ほか：鉄道沿線地盤振動の水平動および鉛直動の伝播特性，鉄道総研報告，Vol.25，No.11，pp.35-40，2011
- 12) 加藤信二郎ほか：架道橋付近における軌道支持剛性変化が地盤振動に及ぼす影響，鉄道総研報告，Vol.28，No.3，pp.17-22，2014
- 13) 鈴木実ほか：発泡ゴムを用いた低ばね定数軌道パッドの低温特性の向上，鉄道総研報告，Vol.28，No.2，pp.17-22，2014
- 14) 福田傑ほか：車両先頭部形状の三次元性を考慮した微気圧波模型実験方法の開発，鉄道総研報告，Vol.27，No.1，pp.5-10，2013
- 15) 宮地徳蔵ほか：トンネル微気圧波の放射に対する地形条件の影響，鉄道総研報告，Vol.28，No.3，pp.23-28，2014
- 16) 渥美浩和ほか：側面開口部付き緩衝工から放射される微気圧波，鉄道総研報告，Vol.28，No.3，pp.29-34，2014
- 17) 斎藤実俊ほか：フード状構造物による列車退出側坑口でのトンネル微気圧波低減対策，鉄道総研報告，Vol.27，No.1，pp.17-22，2013