

博士論文

超高速鉄道の騒音に係る
沿線環境保全対策設備及び予測手法の提案

Proposal of noise mitigation facilities and noise level
estimation along the ultra high speed railway

永長 隆昭

Takaaki NAGAOSA

2018年3月

要 旨

鉄道の新線建設にあたっては、沿線における騒音や振動の低減に向けて適切な配慮を行うことが求められる。中でも、新幹線鉄道の騒音については1975年に環境庁が「新幹線鉄道騒音に係る環境基準」を定めており、防音壁の設置や土地利用対策等を行って基準との整合が図られてきたが、空力音が速度の6乗に比例して増大するなど、超高速走行に伴って発生する騒音は大きくなると考えられる。そのため、超電導磁石により推進・浮上・案内を行い、500 km/hの速度で走行する超高速鉄道においては、住居等が多く存在する地区を通過しI類型として指定される場合に70 dB以下に抑制するための地上側の対策として、既存の防音壁を上回る、より高い性能の騒音対策設備が必要となる。一方で、国土交通省令により環境影響評価を実施する際には沿線騒音レベルの予測を定量的に行うことが求められており、既存新幹線と特性が異なる超高速鉄道の騒音の特徴も考慮した騒音予測手法を確立することが必要となることから、筆者は10年近くにわたって研究を進めてきた。

本研究の目的は、500km/hの超高速走行時に環境保全の目標値(環境基準I類型:70 dB)を達成可能な騒音対策設備について、山梨実験線における測定結果等に基づいて構造の提案を行い、効果を検証するとともに、それら設備の設置を前提に沿線騒音の定量的な予測を行うモデルを構築することである。

本研究の内容と得られた結論は以下の通りである。

第2章では、山梨実験線の建設時に設置していた中間緩衝工(鋼材の骨組みにPC遮音パネルを取付けた構造)に着目し、超高速走行の際の測定を行って騒音の現状を把握した。また、桁目地等からの漏れ音による影響を確認した後、それらの対策を実施した場合の中間緩衝工の遮音性能について、走行試験による計測や、列車がいない状態での遮音特性を確認するためのスピーカ試験によって確認した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 中間緩衝工においては、桁目地部やスリット部の隙間から漏れ出す走行音の影響が大きいが、それらを改善しても沿線の騒音レベルは環境保全の目標値を上回る状況である。
- 2) 200 Hz付近ならびに1 kHz以上の周波数帯域ではスピーカ試験より列車走行時の遮音性能が低下しており、前者は構造物音、後者は列車が超高速走行する際に個々のPC遮音パネルの隙間等から発生する気流音の影響と推測される。後者の対策が完全になされれば、環境基準の目標値を達成可能と推測される。

第3章では、超高速走行時の気流音を抑制するとともに、列車通過時の圧力変動荷重や建設や保守の容易性も考慮した騒音対策設備の構造を検討した。その結果、できるだけ大きな単位のコンクリート部材により構成するとともに、部材の結合方法を見直すことで密閉度を高めた、セグメント構造によるフードを提案し、定置試験で気密性や遮音性を確認して、営業線における騒音レベルの予測を行った。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 標準的な桁長 37.8 m の PC 箱桁の場合、桁に構造上分離されたフードを設置する形式が、コスト面等で最も有利となる。
- 2) フードを模擬した試験体に圧力変動荷重を試験的に作用させた結果、結合部において気流音は発生しない。また、音響透過損失を計測した結果、同じ 150 mm の厚さを持つ一般的な RC 壁に対して遮音性能の著しい低下は見られない。
- 3) 列車走行時の中間緩衝工内の音圧レベルとフード音響透過損失の計測結果等から、営業線を想定した場合の沿線騒音レベルをフード部材厚毎に予測した結果、150 mm、100 mm、70 mm のいずれの場合も環境保全の目標値を下回る。

第 4 章では、第 3 章で提案したフード構造物を山梨実験線の橋梁に設置し、走行試験により騒音の測定を行った。また、スピーカ試験を実施してフード内外の音圧レベル差を計測し、走行試験時と比較を行って遮音性能に対する列車走行の影響について考察を加えた。その結果、以下の知見を得た。

- 1) フード区間の 500 km/h 走行時における沿線騒音（軌道中心から 25 m、地上 1.2 m）は、中間緩衝工と比較して、気流音の主要な周波数帯域であった 500 Hz～4 kHz で大幅に低減する。
- 2) 500 Hz 以上の周波数では走行試験とスピーカ試験で遮音性能にほとんど差がなく気流音の抑制効果が確認できた一方、100 Hz 及び 200～315 Hz では列車走行時の遮音性能が低く、構造物音の影響と推測された。
- 3) 提案したフードを設置する条件で、測定結果に基づき編成車両長の影響を換算して 16 両編成車両による 500 km/h 走行時の沿線騒音レベルを算定した結果、環境保全の目標値を達成可能であると予測される。

第 5 章では、フードや桁の振動に着目して走行試験やスピーカ試験、加振機試験による測定を行い、列車走行に伴う振動の発生や伝達の状況を明らかにした。またボクセル有限要素法による数値解析モデルを構築し、列車走行時の振動解析を行った。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 桁やフードにおいては、車両の超電導磁石の極間隔 1.35 m に依存する周波数の振動や、その 2 倍の周波数の振動が卓越する。
- 2) 軌道から桁、フードへと伝達する過程で、厚さが相対的に薄いフードの一般部において振動が増幅している。
- 3) フードの振動について、フードを透過する音に起因する成分と桁から伝達する成分の分離を図った結果、63～125 Hz、200～315 Hz で後者の影響が大きくなっている。
- 4) フード区間の沿線騒音レベルについてフード透過音、桁構造物音、フード構造物音の 3 つの音源に分離して算定した結果、それぞれがほぼ同程度の寄与度と推測される。
- 5) ボクセル有限要素法による数値解析モデルを構築し、列車走行時の振動解析を行った結果、走行試験による実測で見られた振動の発生や伝達の状況が再現され、フード表面の

振動加速度レベルの予測値も実測と概ね 2 dB 以内の差に収まっている。

第 6 章では、第 5 章の検討を踏まえてフード構造の改善を検討し、前章までに試験を行ったフードの一般部における厚さが 100 mm、リブ部は 300 mm となっていたところ、総重量は変えずに全体として 190 mm に均一化することを提案した。そのうえで提案したフードについて数値解析及び定置試験による確認の後、山梨実験線の橋梁に実際に設置して、走行試験やスピーカ試験による測定を実施し、性能を検証した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 定置試験（遮音性能試験）及び数値解析の結果、新たに提案するフードについて、従来のフードより遮音性が高く、かつ振動の低減が見られる。
- 2) 山梨実験線の橋梁に設置して走行試験による計測を実施した結果、フードの透過音及び振動が従来型のフードよりも大幅に低減し、沿線の騒音レベルも低減することが確認される。
- 3) 沿線騒音について音源の分離を図った結果、フード透過音及びフード構造物音の寄与度が低減し、桁構造物の寄与度が大きくなっている。
- 4) 16 両編成車両が 500km/h で走行する際の沿線騒音レベルを予測した結果、提案する改良型のフードを適用することにより、営業線の環境保全の目標値を十分に下回る。

第 7 章では、軌道中心からの距離や構造物高さ等の条件を与えた場合に、騒音レベルの予測を行う手法について検討した。超高速鉄道は磁気浮上により地上と非接触で走行し、車両下部騒音（転動騒音等）や集電系騒音は発生しないことから、騒音の音源は車両上部空力騒音及び構造物音（桁構造物音の他、フード区間ではフード構造物音も発生する）と考へて、個々の音源のパワーレベルや配置について整理し、距離減衰式等を用いて各音源による評価点の音圧レベルを推定したうえで、トンネル内の測定結果等に基づいて編成車両長の影響を補正し、合計して評価点の騒音レベルを予測するモデルを構築し、実測値との比較を行った。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 車両が実験線の 4 両編成車両から営業線で 16 両編成となることの影響については、フード透過音で+2.5 dB、桁構造物音、フード構造物音で+3.0 dB と推定される。
- 2) 予測値と実測値との比較を行った結果、フードや桁の構造、軌道中心からの距離に関わらず、騒音レベルの差は 1 dB 程度に収まっており、本研究の予測モデルは営業線における予測評価に活用可能である。

軌道中心からの距離や構造物高さ等の条件を様々に与えて騒音レベルの予測を行った結果、本研究により提案するフードを沿線の路線条件に合わせて適用すれば、十分に環境保全の目標値を達成可能であることを確認しており、本研究は超高速鉄道の早期実現に欠かせない沿線環境の保全に資するものと考えている。また、今回提案したスピーカ試験と加振機試験を組合せて構造物音の実態を把握する手法や、騒音予測のモデルについては、既

存新幹線で特別な対応を求められた場合等に応用することが可能であると考える。

一方で、今回開発したフードについて最適な構造を目指していくため、以下の課題に対して継続的に研究を進めていくことが望ましい。

- 1) セグメント構造について、運搬も考慮して分割単位を変更するなど、構造を工夫することによる建設性の向上やコスト低減を図ることが望ましい。
- 2) 本研究では標準的なスパンの箱桁を前提にフード構造を提案したが、スパンが長い橋梁、桁下空頭に制限を受け下路桁形式となる橋梁等、検討した前提と条件が異なる場合の桁を含めた騒音対策設備の最適化について検討を進めていくことが求められる。
- 3) 今後のフードのさらなる開発にあたっては騒音の低減効果を適切に予測しながら進めることが不可欠であり、今回構築した数値解析モデルについて、例えば試験的に厚さの異なるフードを設置するなど、さらに多くの条件で走行試験データとの比較検証を進め、精度の向上を図ることが重要である。
- 4) 環境基準のⅡ類型（75 dB）が適用される地域において、目標とする騒音低減性能を確保する一方で、列車走行に伴う圧力の緩和等、別の目的を付加可能な騒音対策設備の開発を進めることも有効である。

Abstract

In the planning stage for construction of a new railway route, mitigation of the effect of noise and vibration on the line must be carefully considered. Especially, in the case of planning facilities for ultra-high-speed railway whose top cruising speed is around 500km/h, mitigation of noise accompanied by such ultra-high-speed trains was expected to require a measure with higher mitigation performance than the conventional upright noise walls. Also for the implementation of environment impact assessment prior to the construction, a reasonable method to estimate the noise level needed to be established while taking into account the characteristics of noise brought by the passages of such ultra-high-speed trains.

The author continued researches on the structural design of environmental mitigation facilities by which the noise accompanied by the ultra-high-speed train passages could be maintained lower than the targeted noise standard values regulated for the conventional high-speed rails. In the research process, a hood structure was studied referring to the on-site noise measurement results on the Yamanashi test line, and a new hood structure was finally reached and proposed after its effectiveness for the noise mitigation was demonstrated. Simultaneously a model to estimate the noise level on the individual point along the planned route was established where the proposed facilities were assumed to be installed for a noise mitigation purpose. The series of the research and the conclusions derived are described and summarized as below.

In Chapter 2, as the first approach for the research, the actual noise level induced by the passages of such ultra-high-speed trains was investigated near a pioneering metal frame type hood that existed on Yamanashi test line. Through the on-site measurements, the overall mitigation performance of the hood was studied through running tests (with an effect of trains) and speaker tests (without trains), where the effect of air blown out from the openings such as gaps, slits, or structural joints on the noise level was carefully paid attention to. The obtained findings are as follows:

- (1) It was found that the effect of the running noise leaching through the above-mentioned openings towards outside during the train passages was high; however, the noise level would not satisfy the current standard target criteria even if we could overcome this issue.
- (2) Comparisons of the inner and outer sound pressure discrepancy during the running and speaker tests showed that it was greater during the running tests at around 200Hz and higher than 1kHz. This might imply that the difference in the former frequency range would be attributable to the structure-borne noise and the latter would be the blowing noise from the gaps.

Chapter 3 discusses the noise mitigation structure that not only suppresses the flowing noise accompanied by ultra-high-speed train passages but also takes into account the aerodynamic pressure fluctuation working onto the structures while the train passes. The structure also had to meet with simpler construction and easier maintenance workmanship. Thus a hood of a large concrete segment frame structure with a high airtightness realized

by improved joints was then proposed. After several laboratory tests to confirm the noise mitigating and airtight performance of the proposed hood were conducted with respect to the hood thickness, the noise level at the positions along the future route was estimated based on the obtained results. The findings described in this chapter are as follows:

- (1) Installation of a structurally discrete hood onto a standard PC box girder was concluded to be most advantageous in terms of construction cost, and a hood of a segment combining frame structure, which would ensure easier quality control of the parts, was proposed.
- (2) Noise level simulation for the positions along the future planned route estimated by the measured data with the proposed hood showed that all of the thickness patterns (150mm, 100mm, and 70mm) satisfied the current noise standard criteria.

Chapter 4 describes on-site trials of the proposed hood on a girder existing on Yamanashi test line and its effectiveness under ultra-high-speed running tests. The inner and outer sound pressure difference was measured through speaker tests, and the noise mitigation performance results were compared with those under running tests at 500km/h. The findings obtained in this chapter are as follows:

- (1) The noise level at positions along the future route (25m distant from the track and 1.2m high from the ground) with the proposed hood was, compared to a pioneering metal frame hood, extremely reduced in the main frequency range where the blowing noise was dominant (500Hz-4kHz).
- (2) The inner and outer sound pressure difference was measured by speaker tests and running tests, and those results were compared. The comparison showed small discrepancy at 500Hz and higher, where suppressing effect of the air blowing noise was confirmed. On the other hand, at frequency levels of around 100Hz and 200-315Hz, the effect of the sound pressure difference under the train passages was greater, which indicated the presence of the structure-borne noise of the hood structure itself.
- (3) It was also found possible to satisfy the noise standard with the proposed hood even in the case of a train with 16 cars running at 500km/h.

In Chapter 5, generation and propagation of vibration accompanied by the train passages were clarified through the measurements under running, speaker, and external excitation tests, while paying special attention to actual vibration of the hood and the girder. Furthermore, vibration analysis of the structures was conducted under the running tests after a voxel FEM model was established to simulate this. The findings are as follows:

- (1) It was confirmed that, for such structures as the hood and the girder, vibration at the unique frequency that depends on the polar distance of the on-board magnet (1.35m), and its multiples (double) was dominant.
- (2) The results of the running and excitation tests indicated that the vibration of relatively thinner sections of a hood was amplified while it was propagated from the track to the girder, and then to the hood.

- (3) Based on the results of the speaker and excitation tests, when the hood transmission and the girder propagation effects were segregated, the noise was found to be greatly affected by the vibration propagated from the girder at 63-125Hz and 200-315Hz.
- (4) The vibration analysis by the established voxel FEM model under the conditions of the train passages well reflected the actual generation and propagation.

Chapter 6 details a process to improve the structure of the hood and to reach the final dimensions of the newly proposed hood, taking into consideration the findings presented in the previous chapter. A segment of the concrete hood proposed primarily had a thickness of 100mm at general parts, whereas the local parts with a structural rib penetrating in it had a thickness of 300mm. Here a new hood with a uniform thickness of 190mm at all parts was finally proposed without changing the total weight of the segment. After a series of mathematical simulations and laboratory tests to confirm the noise mitigation performance, a real-scale hood with the newly proposed structure was produced accordingly whose effectiveness was then demonstrated through on-site measurements at Yamanashi under the passages of the ultra-high-speed trains and speaker tests. The findings obtained through the above investigation are as follows:

- (1) The on-site measurements with the proposed hood produced and installed on Yamanashi test line showed a remarkable reduction in sound transmission and vibration compared to the concrete hood proposed primarily. It was therefore confirmed that the overall noise level was reduced.
- (2) Noise level was estimated for the positions along the future route when a 16-car train was assumed to pass the proposed hood at 500km/h. The result showed that application of the proposed hood as a standard measure for dense population sections would be reasonable and would adequately satisfy the target noise criteria for the future route.

In Chapter 7, a method is presented to estimate noise level at a certain position where such conditions as the distance from the track center and the height of the track structure are given. The ultra-high-speed trains are levitated by magnet forces while running at a top speed without direct contact with the ground facilities or overhead catenaries. This means that the level of noise generated under cars or during power collection is quite negligible, unlike the conventional high-speed rail cases. The main noise sources accompanied by the passages of the ultra-high-speed trains are aerodynamic noise generated over the cars and structure-borne noise. For noise level estimation, the power level and distribution of the individual noise sources were first assumed. Then the noise level at a certain position along the future route was estimated by using such mathematical expressions as noise attenuation formula. The effect of a train length, based on the past on-site noise measurements in a tunnel for trains with differed length, was finally considered for the estimation. The accuracy of the estimation by means of this model was justified by comparing with on-site data obtained on Yamanashi test line. The obtained findings in this chapter are as follows:

- (1) As for the effect of the train length, the hood structure-borne noise generated by a 16-car train, which will be used for the future Tokyo-Nagoya commercial line, is

- 2.5dB higher than a 4-car train, which was in use on Yamanashi test line, for hood sections, and 3.0dB higher for girder and hood structure-borne noise combined.
- (2) The estimation with the proposed model showed a fair agreement with the field measurement data (within 1.0dB in accuracy), and therefore, this method is expected to serve as a useful tool to provide reasonable level estimation for a hood section in the future.

The noise level at a certain position with various distances from the track center and various heights of the track structure estimated by the proposed model confirmed that application of the hood proposed in this present research adequately satisfies the target noise level. Therefore it can be said that this research significantly contributes to the environmental conservation along the future line, which is one of the decisive factors for early realization of the ultra-high-speed rail project. In addition, the proposed method to investigate the structure-borne noise through speaker tests and external excitation tests and the proposed noise estimation model are expected to be useful for careful management of the existing conventional Shinkansen's noise related issues. On the other hand, further work would be necessary to optimize the details of the proposed hood structure taking into account the specific local site issues for installation. The investigations on the following points need to be continued.

- (1) Optimization of the segmentation of the hood parts for easier transport and easier construction would be desired. This could lead to cost reduction.
- (2) The hood structure proposed in this research was assumed to be installed on a box girder of standard span length (37.8m). Structural optimization would be necessary in such restricted cases as a girder with a longer span.
- (3) It is important to continue improving the accuracy of the mathematical model established in this research by further verifications with the on-site data under still more various conditions.

目 次

第 1 章 序論

1. 1	研究の背景と目的	1
1. 2	超高速鉄道による中央新幹線計画について	3
1.2.1	中央新幹線の計画に関する手続き	3
1.2.2	超高速鉄道の技術開発の経緯	5
1. 3	超高速鉄道の技術的特色	7
1.3.1	推進・浮上・案内の基本原理	7
1.3.2	設備面での特色	9
1. 4	超高速鉄道の沿線環境保全と本研究の必要性	1 2
1.4.1	列車走行時の沿線環境保全の検討項目	1 2
1.4.2	騒音に関するこれまでの計測結果と本研究の必要性	1 3
1. 5	鉄道騒音に関する既往の研究	1 5
1.5.1	地上側の騒音対策（伝搬路対策）設備に関する研究	1 6
1.5.2	地上構造物の発生する音の特性に関する研究	1 9
1.5.3	列車走行時の騒音レベルの予測に関する研究	2 0
1. 6	本研究の構成	2 2

第 2 章 実験線の既存設備（中間緩衝工）における現地計測

2. 1	はじめに	2 9
2. 2	全体的な騒音についての状況把握	3 1
2.2.1	既存設備（中間緩衝工）の概要	3 1
2.2.2	現地計測の概要	3 3
2.2.3	現地計測の結果	3 4
2. 3	桁目地部等の対策による効果	3 6
2.3.1	桁目地部等の対策の概要	3 6
2.3.2	現地計測による効果の検証	3 7
2. 4	中間緩衝工の遮音性能に関する考察	3 9
2.4.1	現地計測による遮音性能の把握	3 9
2.4.2	営業線における低減の見通し	4 4
2. 5	まとめ	4 5

第 3 章 騒音対策設備の新たな構造の検討

3. 1	はじめに	4 7
------	------	-----

3. 2	営業線において確保すべき性能	4 8
3. 3	騒音対策設備の新たな構造の検討	5 1
3. 4	騒音対策設備の新たな構造に係る遮音性能の検討	5 3
3.4.1	定置試験による遮音性能の確認	5 3
3.4.2	営業線における騒音レベルの予測	5 6
3. 5	まとめ	5 9
第 4 章 試験用フード構造物による検討		
4. 1	はじめに	6 1
4. 2	試験用フード構造物の概要	6 2
4. 3	山梨実験線への設置	6 4
4. 4	走行試験による検証	6 5
4.4.1	現地計測概要	6 5
4.4.2	現地計測結果	6 6
4.4.3	環境保全の目標値との比較	7 0
4. 5	まとめ	7 1
第 5 章 フードの振動に関する現象解明		
5. 1	はじめに	7 3
5. 2	走行試験結果等に基づくフード振動の影響把握	7 4
5.2.1	現地計測概要	7 4
5.2.2	現地計測結果	7 8
5. 3	数値解析によるフード振動の現象再現	8 7
5.3.1	解析のモデル	8 7
5.3.2	減衰定数の設定	8 7
5.3.3	列車走行時の解析の実施	9 0
5. 4	まとめ	9 4
第 6 章 フード構造の改善提案と実証		
6. 1	はじめに	9 7
6. 2	フード構造の改善提案	9 8
6.2.1	試験用フードの検証結果を踏まえた改善点	9 8
6.2.2	新たなフード構造の計画	9 8
6. 3	新たなフード構造に係る定置試験及び数値解析の実施	1 0 0
6.3.1	定置試験結果	1 0 0
6.3.2	数値解析結果	1 0 3

6. 4	山梨実験線への設置	1 0 5
6. 5	走行試験による検証	1 0 7
6.5.1	現地計測概要	1 0 7
6.5.2	現地計測結果	1 0 9
6.5.3	環境保全の目標値との比較	1 1 6
6. 6	まとめ	1 1 7
第7章 フードの振動を考慮した騒音予測手法の提案		
7. 1	はじめに	1 1 9
7. 2	騒音予測モデルの構築	1 2 0
7.2.1	前提条件	1 2 0
7.2.2	音源の分類	1 2 0
7.2.3	騒音予測手順	1 2 1
7. 3	音源パワーレベルの推定	1 2 5
7.3.1	フード透過音	1 2 5
7.3.2	桁構造物音	1 2 6
7.3.3	フード構造物音	1 2 8
7. 4	編成両数の補正	1 2 9
7.4.1	フード透過音	1 2 9
7.4.2	桁構造物音	1 3 3
7.4.3	フード構造物音	1 3 3
7. 5	沿線騒音レベルの予測	1 3 4
7. 5	騒音予測の妥当性の検証	1 3 5
7. 7	各条件における騒音レベルの予測	1 3 7
7. 8	まとめ	1 3 8
第8章 結論		
8. 1	本研究の結論	1 4 1
8. 2	今後の課題	1 4 4
謝辞		1 4 5

第1章 序論

1. 1 研究の背景と目的

超電導磁石により推進・浮上・案内を行い、500 km/h の超高速で走行する超電導磁気浮上式鉄道（以下、本論文においては「超高速鉄道」と略称する）については、我が国独自の技術として、東海道新幹線の完成に先立つ 1962 年に開発が開始された。その後、国立の鉄道技術研究所、宮崎実験線において基礎的な技術開発が長年続けられた後、1997 年 4 月には営業線を意識した本格的な実験線である山梨実験線において走行試験が開始され、鉄道の世界最高速度を次々に更新し、2014 年 6 月には 603 km/h を記録するなど、着実に開発が進められてきている。超高速鉄道の施設及び車両について、写真-1.1.1 に示す。

一方、日本の中心的な地域である首都圏～中京圏～近畿圏を結ぶ大動脈として、経済社会の発展に重要な役割を担ってきた東海道新幹線は開業後 53 年を経過しており、将来的な経年劣化や大規模災害に対する抜本的な備えを考えなければならない時期にきている。また、東日本大震災を踏まえ、輸送を二重系化することによって災害リスクに備える重要性が非常に高まっている。こうした役割を担う新たなバイパスとして、超高速鉄道により中央新幹線を整備することが計画され、全国新幹線鉄道整備法（以下、「全幹法」と略称する）に基づく中央新幹線の建設手続きが進められてきている。2011 年 5 月には整備計画が決定されて J R 東海が建設・運営主体に指名され、環境影響評価の手続きを踏まえて 2014 年 10 月には品川駅・名古屋駅間の工事实施計画が認可されて、各都県で本格的な建設工事を進めているところである¹⁾。中央新幹線の路線概要を図-1.1.1 に示す。

鉄道の新線建設にあたっては、地域と連携しながら安全に工事を進めるのは勿論のこと、工事中及び供用時において環境に与える影響をできる限り低減することが重要である。とりわけ、列車が走行する際の沿線における騒音や振動の低減について、適切な配慮を行うことが求められる。中でも、新幹線鉄道の騒音については、1975 年に環境庁によって「新幹線鉄道騒音に係る環境基準」²⁾が定められており、防音壁の設置や土地利用対策等を行って、この基準との整合が図られてきた。しかしながら、空力音が速度の 6 乗に比例して増大する³⁾⁴⁾など、超高速走行に伴って発生する騒音は大きくなると考えられるため、地上側の対策として、既存の防音壁を上回る、より高い性能の騒音対策設備が必要となる。

一方、環境影響評価を適切に進めるためには、線路からの離れや構造物高さなど、条件を設定したうえで騒音レベルの定量的な予測を行うことが必要となる。例えば、既存の新幹線においては、過去から蓄積してきた走行試験結果に基づく騒音予測モデルが構築され、整備新幹線の環境影響評価等に活用されてきている⁵⁾。しかしながら、超高速鉄道においては速度が高いこと、地上と非接触で走行すること等、既存の新幹線と大きく特性が異なることから、新たに予測評価手法を構築する必要がある。

こうした背景のもと、本研究は、500 km/h の超高速走行時に環境保全の目標値（環境基準Ⅰ類型：70 dB）を達成可能な騒音対策設備について、山梨実験線における測定結果等に基づいて構造の提案を行い、効果を検証するとともに、それら設備の設置を前提に沿線騒音の定量的な予測を行うモデルを構築することを目的とする。



写真-1.1.1 超高速鉄道の施設及び車両

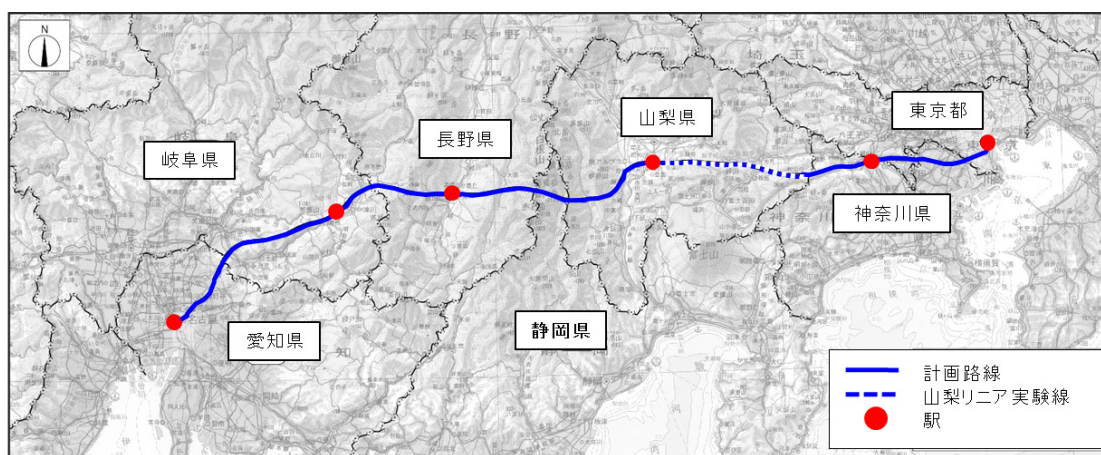


図-1.1.1 中央新幹線の路線概要

1. 2 超高速鉄道による中央新幹線計画について

本節では、本研究の契機となった中央新幹線の計画に関する手続きや中央新幹線に適用する超高速鉄道の技術開発の経緯について概観する。

1.2.1 中央新幹線の計画に関する手続き

中央新幹線は、全幹法に基づいて1973年に建設を開始すべき基本計画路線の一つとして決定され、国鉄時代から地形・地質等の調査が進められてきたが、既に整備計画が決定されている5路線の整備を優先的に進める国の予算事情もあり、プロジェクトの具体化に向けた動きは見られなかった。そうした中でJR東海は、首都圏～中京圏～近畿圏を結ぶ大動脈である東海道新幹線について将来の経年劣化や大規模災害に対する抜本的な備えを考へるべき時期にきていることから、その役割を代替するバイパスとしての中央新幹線を、自己負担による路線建設を前提に、これまで開発を進めてきた超高速鉄道により速やかに実現し、東海道新幹線と一元的に経営していくこととした。2007年12月、JR東海は、まずは首都圏～中京圏間の営業運転開始を目標として、全幹法に定める必要な手続き等を進めることを公表した。その後、地形・地質等調査の結果、及び残り4項目調査（輸送需要量に対応する供給輸送力等に関する事項、施設および車両の技術の開発に関する事項、建設に要する費用に関する事項、その他必要な事項）の結果を国土交通大臣に報告し、交通政策審議会で1年2ヵ月にわたる審議が行われた。その中で騒音に係る環境基準の達成が可能であるという本研究の成果も示され⁶⁾、技術的検討の推進に貢献している。その後、2011年5月に国土交通大臣により表-1.2.1.1のとおり整備計画が決定されるとともに、JR東海を営業主体および建設主体として指名し、建設の指示が行われた。これを機に、中央新幹線建設が本格的に動き出すこととなり、まず環境影響評価の手続きに着手した¹⁾。

表-1.2.1.1 整備計画の内容

建設線	中央新幹線	
区間	東京都・大阪市	
走行方式	超電導磁気浮上方式	
最高設計速度	505キロメートル/時	
建設に要する費用の概算額 (車両費を含む)	90,300億円	
その他必要事項	主要な経過地	甲府市附近、赤石山脈(南アルプス)中南部、名古屋市附近、奈良市附近

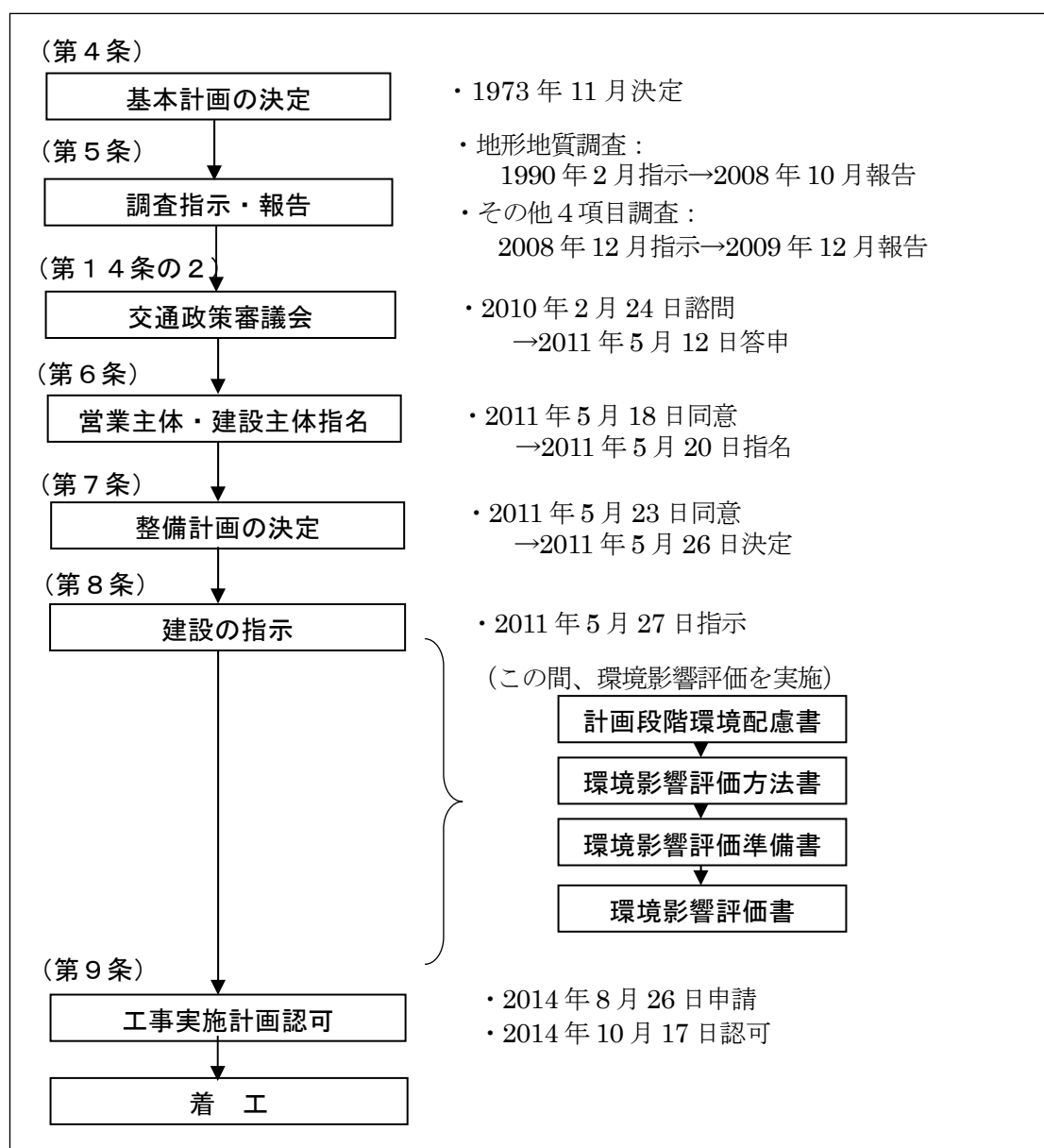
環境影響評価の最初のステップとして東京都・名古屋市間を対象とした計画段階環境配慮書を2011年9月に公表した。これは2011年4月に公布された環境影響評価法の改正により制定された制度であり、当時まだ施行前の段階であったが、その趣旨を踏まえ、先取

りする形で実施したものである。その後、方法書を作成し、各環境要素に関する調査・予測・評価を行った。本研究の成果である列車走行時の騒音予測手法については、この段階において活用されている⁷⁾。調査・予測・評価の結果に基づいて準備書を作成し、知事意見等を踏まえた評価書の作成や、国土交通大臣意見を踏まえた補正を行い、2014年8月には国土交通大臣に最終的な評価書を送付した。

一方、これと同時に工事实施計画の認可を申請し、同年10月に国土交通大臣から認可を受け、同年12月に品川と名古屋のターミナルで工事に着工したのを最初に、各都県で次々と工事に着工し、現在は山岳トンネルの掘削工事等が本格化してきた段階である。

全幹法等によるこれまでの手続きの経緯について、表-1.2.1.2にまとめている。

表-1.2.1.2 全国新幹線鉄道整備法等による手続きの経緯



1.2.2 超高速鉄道の技術開発の経緯

1.2.2.1 国鉄時代の技術開発と山梨実験線の建設

超高速鉄道の技術開発は、東海道新幹線の開業に先立つ1962年に当時の国鉄において開始された。500 km/hの超高速走行を目指して10 cm程度浮上させることが可能な超電導磁気浮上式に着目し、1972年には鉄道技術研究所の構内で初めて浮上走行に成功した。

その後1977年に宮崎実験線での走行試験を開始し、1979年には当時の最高速度であった517 km/hを記録して、超電導磁気浮上式によるシステムの成立性を確認した。その後はそれまでの無人タイプを有人タイプに変更し、開発を継続した。

そうした中で、1987年に国鉄が分割民営化して以降、中央新幹線の実現を目指すJR東海が技術開発にも主体的に関わることとなって、実用化に向けた動きが加速した。しかし宮崎実験線は延長が7kmと短く、全区間単線でトンネルがないなど制約があったことから、実用化に向けた本格的な実験線の建設が必要であった。1988年10月に当時の運輸省が「超電導磁気浮上式鉄道検討委員会」を設置し、実用化に向けた技術開発の方針を審議した結果、新実験線建設地として山梨県が選定され、1990年11月より山梨実験線の建設が開始されて、1997年3月には全体42.8kmのうち18.4kmの先行区間の設備が完成した⁸⁾。

1.2.2.2 山梨実験線先行区間における走行試験

山梨実験線では、1997年4月から本格的な走行試験を開始し、2000年3月までの3年間に区切りに、最高速度確認試験、5両編成走行試験（写真-1.2.2.1）、高速すれ違い走行試験（写真-1.2.2.2）、高速連続走行試験などを実施した。2000年3月には運輸省内に設置された「超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価委員会」において、3年間のまとめとして「長期耐久性、経済性の一部に引き続き検討する課題はあるものの、超高速大量輸送システムとして実用化に向けた技術上のめどは立ったものと考えられる」との評価がなされた⁹⁾。

その後5年間、長期耐久性検証のための走行試験や車両や地上コイル、軌道（ガイドウェイ）、変換器等の技術開発成果の性能検証、581km/hまでの最高速度向上試験や相対速度1026 km/hまでのすれ違い速度向上試験等を実施し、2005年3月に開催された評価委員会で「超電導磁気浮上式鉄道について実用化の基盤技術が確立した」との評価を得た¹⁰⁾。



写真-1.2.2.1 5両編成走行試験



写真-1.2.2.2 高速すれ違い走行試験

1.2.2.3 山梨実験線の延伸・更新とその後の走行試験

2005年度以降の走行試験では、長期耐久性の検証、メンテナンスを含む更なるコスト低減、営業線適用に向けた設備仕様を検討するための最新の技術開発の他、特に環境対策、異常時対応、保守体系について、追加的に深度化した検討・評価を行うこととなった。そのためJR東海は、実験線先行区間の設備を実用レベルの仕様に変更するとともに、図-1.2.2.1のとおり実験線を18.4kmから全線の42.8kmに延伸して走行試験を実施することとして、2006年9月に設備投資計画を決定し、2008年5月より工事に着手した。主な試験内容としては、長大編成車両(12両)による500km/hでの長距離走行、長大トンネルの走り抜けによる走行抵抗等の確認、車両及び地上設備に係る保守体系の確立、大深度地下模擬設備による立坑設備及び防災設備の検証等がある¹¹⁾。

一方で、延伸・更新工事の期間中でもできる限り走行試験を継続して技術開発を続け、2009年7月の評価委員会では、「営業線に必要な技術が網羅的、体系的に整備され、今後詳細な営業線仕様及び技術基準等の策定を具体的に進めることが可能になった」との技術評価がまとめられた¹²⁾。その後さらに走行試験を実施する中、これまで車上電源として実績のあったガスタービン発電装置の代替として開発した誘導集電装置について「実用化に必要な技術が確立している」との評価を受け、この誘導集電装置を車上電源として採用することを前提に環境影響評価を進めることとなった¹³⁾。また、2011年12月には超電導磁気浮上式鉄道に関する技術基準が国土交通大臣によって策定され¹⁴⁾、さらに2012年8月には磁界に関する技術基準も策定されて、技術の実用化がスペックの面でも完成した。

山梨実験線先行区間での走行試験は、延伸・更新工事に専念するため、2011年9月にいったん終了した。その後、2013年5月には全線の設備が完成し、同年8月より再開された。技術のブラッシュアップ及び営業線の建設、運営、保守のコストダウンに向けた開発を進める中で、2014年6月には世界最高速度の603km/hを記録する等、着実に成果を上げた。2017年2月には評価委員会で「営業線に必要な技術開発は完了した」¹⁵⁾との評価を受け、現在は2022年度までの計画で、低コストかつ効率的な保守体系の検証、高温超電導磁石の長期耐久性の検証、快適性の向上を目指した試験が進められている。

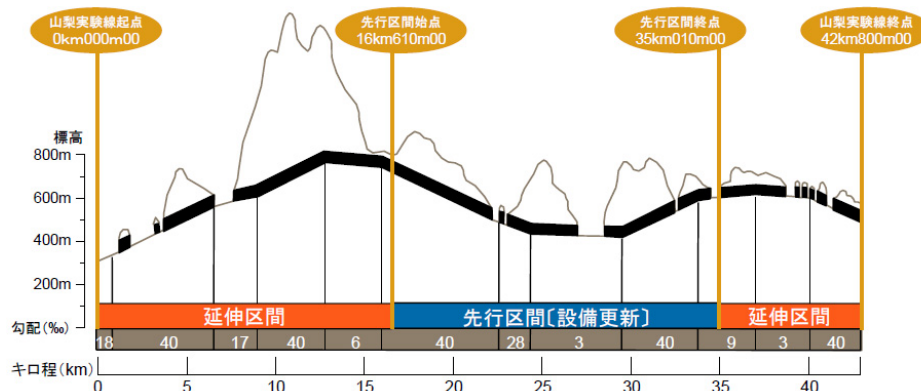


図-1.2.2.1 山梨リア実験線の設備

1. 3 超高速鉄道の技術的特色

1.3.1 推進・浮上・案内の基本原則

従来方式の鉄道では、車両は架線からパンタグラフで集電し、台車のモータで車輪を回転させレールの上を走行する。このような方式で高速化を検討するにあたっては、集電性能、台車の走行安定性、車輪の空転、騒音など沿線環境への影響、ブレーキ性能の確保などの課題がある。たとえば、高速化に伴い走行抵抗が大きくなるが、雨天の日など条件によっては、車輪とレールの間にはたらく粘着力よりも走行抵抗が大きくなるとそれ以上の加速ができなくなるので、安定した営業運転に適した最高速度には自ずと限界がある。

これに対し超高速鉄道では、図-1.3.1.1 に示すリニアモータを用いて走行する。一般的なモータは中心の回転部分と外側の固定部分で構成されているが、リニアモータはこれを直線状に切り開いたものであり、中心の回転部分に相当するものが車両側の超電導磁石であり、外側の固定部分に相当するものが地上側の推進コイルとなっている。地上側の推進コイルは、電気を流した時だけ、磁石となる。地上側には、この他に浮上・案内コイルを設置している。推進コイル、浮上・案内コイルは車両側の超電導磁石と正対するよう、コンクリート製の側壁に設置されている。

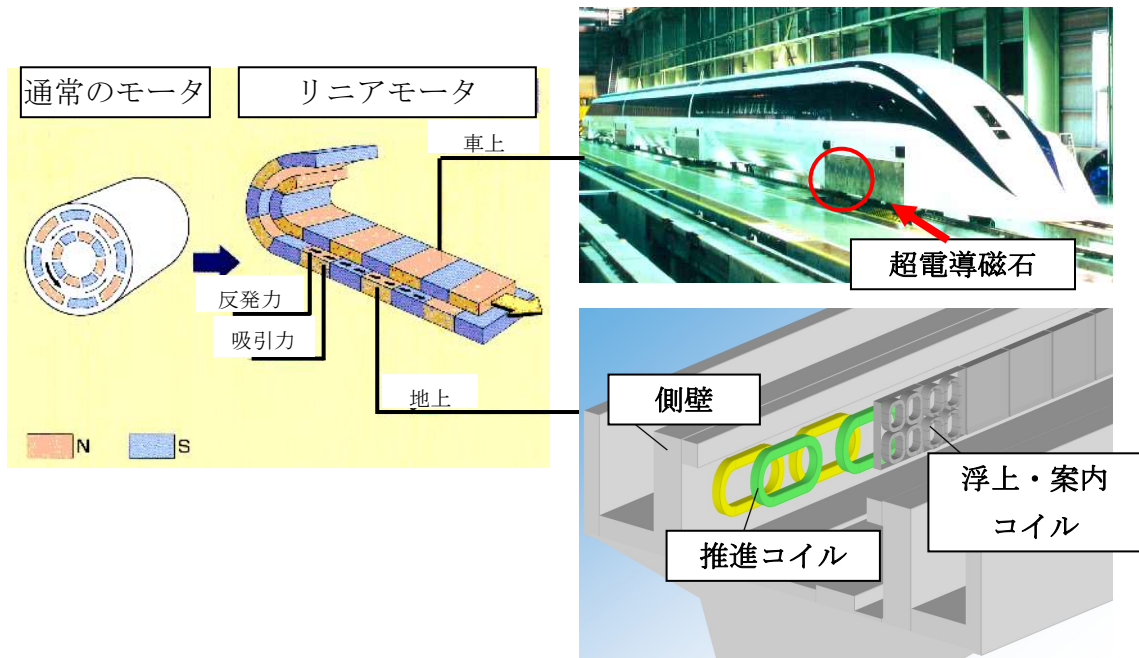


図-1.3.1.1 リニアモータの原理と地上・車上の設備

推進、浮上、案内の原理を図-1.3.1.2に示す。推進については、地上側の推進コイルに電流を流すことで磁界を発生させ、車両側の超電導磁石との間にはたらく磁力によって、車両を推進させる。次に、浮上については車両の超電導磁石が高速で通過する際に、両側の浮上案内コイルに自然に電流が流れて電磁石となり、双方の磁石の間に車両を押し上げる力と引き上げる力が発生する。なお、速度が低い時はこの力が弱いため、ゴムタイヤを用いた車輪走行を行う。また、車両が中心からどちらか一方にずれると、車両の遠ざかった側に吸引力、近づいた側に反発力が働き、車両を常に中央に戻す案内の働きがある。

したがって、超高速鉄道は粘着力に頼らず車両と地上が非接触で走行することで、車輪の空転、架線やレールとの接触による騒音がなくなるなど、在来鉄道の高速化に際しての課題が問題とならないメリットがある¹⁶⁾。

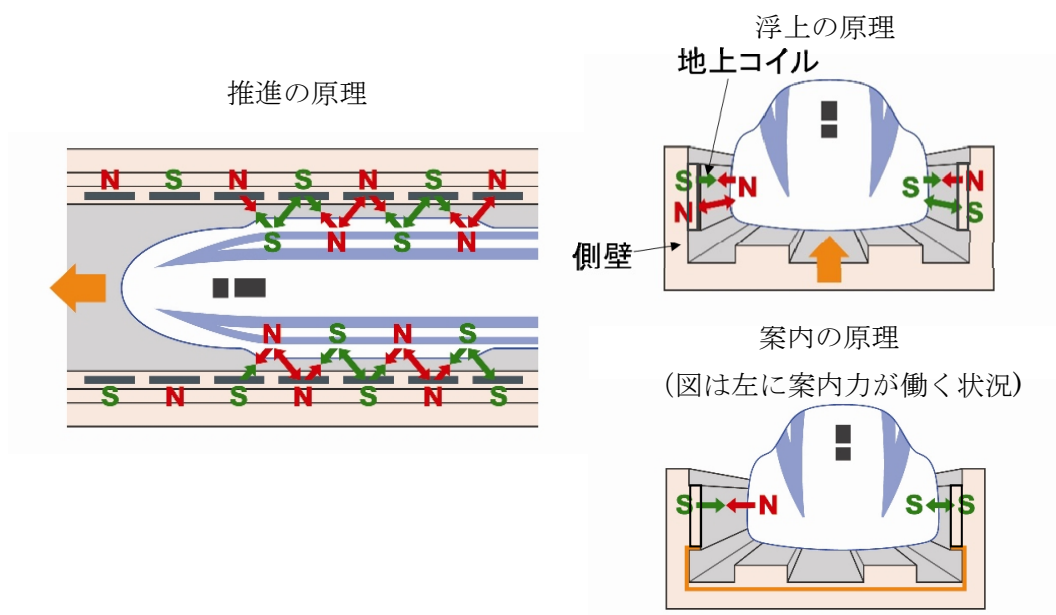


図-1.3.1.2 推進・浮上・案内の原理

1.3.2 設備面での特色

1.3.2.1 車両

超高速走行に伴う車両空力特性の改善は、沿線における騒音や微気圧波・空気振動の低減にとって重要であり、精力的に取り組んできた。具体的には、数値解析の成果等を踏まえて車体の先頭形状について最適化を図るとともに、表面・下部の形状を最適化（車体下部を角型化し、台車部との断面積の変化を縮小）した車両（写真-1.3.2.1、図-1.3.2.1）を設計・製作して2002年から実験線での走行試験を行い、沿線環境の改善、走行抵抗の低減等に大きな効果を挙げることを実証した⁹⁾。その後、2009年には営業線を想定した先頭形状への改良を行い、2013年にはそれらの成果を反映した営業線仕様のL0系車両を投入し、同等の環境性能を有していることを確認している¹⁵⁾。



写真-1.3.2.1 車両空力特性改善のための試験車両

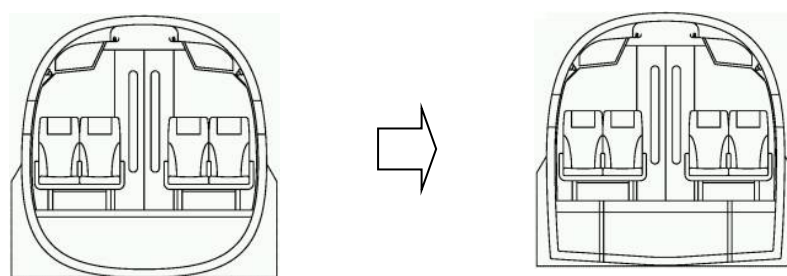


図-1.3.2.1 車両断面形状の変更（円錐断面→角型断面）

1.3.2.2 高架橋・橋梁

超高速鉄道においては、走行速度と桁スパン長が動的な応答倍率に及ぼす影響や、乗り心地等を考慮した変位量の制限値について車両運動も考慮したシミュレーションを実施して¹⁷⁾、設計条件を設定している。さらに、列車荷重や付帯設備の荷重などを考慮して具体的な高架橋の構造形式等を検討し、経済性や景観も考慮のうえで、山梨実験線においては

橋長 37.8 m の PC 箱桁を標準桁として選定した。道路や河川を横断する長大橋梁についてはスパンが長くなるため、上記の設計条件を考慮しつつ、さらに橋脚配置や景観も考慮した個別の設計を行い形式を選定した。山梨実験線に設置した高架橋の断面図を、既存新幹線と比較して図-1.3.2.2 に示す。軌道中心間隔については、すれ違い時における乗り心地への影響等を考慮し、既存新幹線よりも広い 5.8 m としている。なお騒音対策設備として、高さ 2 m の防音壁を設置している。

なお、超高速鉄道においては最小曲線半径 8,000 m と非常に曲率の小さい路線を設定する必要がある。また超電導磁気浮上式鉄道の特性上、最急勾配を 40 % と大きく設定することが出来る反面、乗り心地を考慮して勾配の変化については緩やかに行う必要がある。こうしたことから、地盤高さが変動する場合でも施工基面の高さを一定に設定する必要がある。場所によって高架橋・橋梁の高さが大きく異なることとなる。

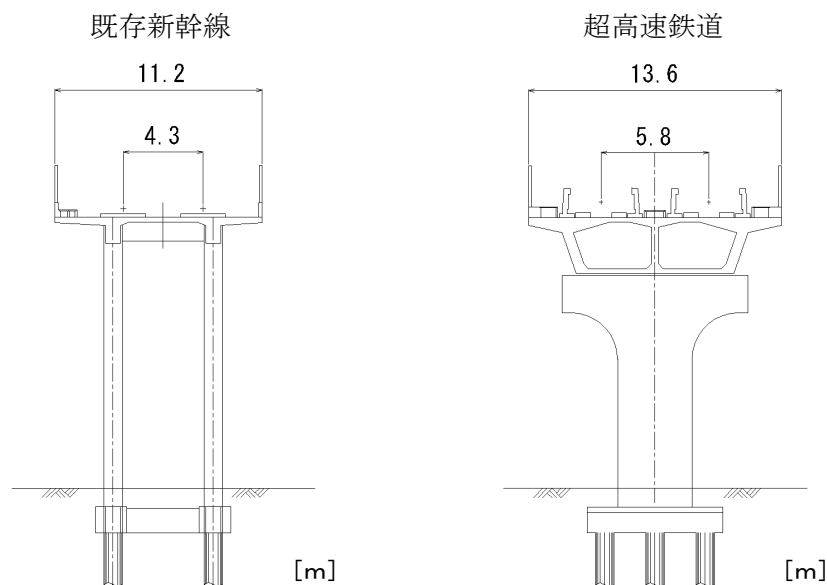


図-1.3.2.2 既存新幹線と超高速鉄道の高架橋断面の違い

1.3.2.3 トンネル

一般的に、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となる余裕を考慮し、地形、地質に応じた形状とするが、超高速鉄道では 500 km/h 走行時に受ける空気抵抗が大きくなるため、変動圧力による影響や経済性(建設費とランニングコスト)、施工性等を総合的に勘案して、新幹線よりも大きい 74 m²の有効断面積を確保することとし、ガイドウェイ等必要な設備配置を考慮して断面を決定した¹⁸⁾。図-1.3.2.3 に断面図を既存新幹線と比較して示す。なお、軌道中心間隔については高架橋と同様である。

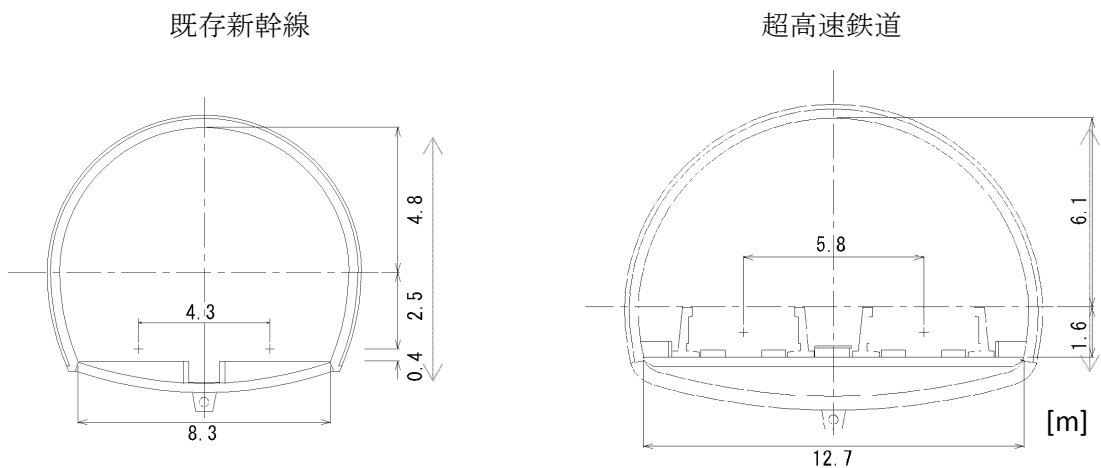


図-1.3.2.3 既存新幹線と超高速鉄道のトンネル断面の違い

1.3.2.4 軌道（ガイドウェイ）

ガイドウェイは従来の鉄道における「軌道」に相当する部分であり、側壁及び走行路で構成される。特に地上コイルを取付ける側壁は、荷重を支える重要な設備であるとともに、乗り心地の観点から高い設置精度を求められる。

そのため、山梨実験線の先行区間で①直付け方式（現場打ちコンクリートで側壁を製作し直接コイルを取り付ける方法）、②パネル方式（現場打ち側壁に予め地上コイルを取り付けたプレキャストPCパネルを取り付ける方法）、③ビーム方式（現場製作のシュー座に予め地上コイルを取り付けたプレキャストPCビームを取り付ける方法）の3種類を区間別に設置し、施工性、保守性、耐久性等を評価した¹⁹⁾。その後評価結果を踏まえ、コスト低減を目標に新方式のガイドウェイ（自立式ガイドウェイ）を開発した（図-1.3.2.4）²⁰⁾²¹⁾。この方式は、側壁をプレキャストコンクリート製として地上コイルと一体化したモジュール構造とし、自立できる形状として取付け時の作業効率を高めたものである。

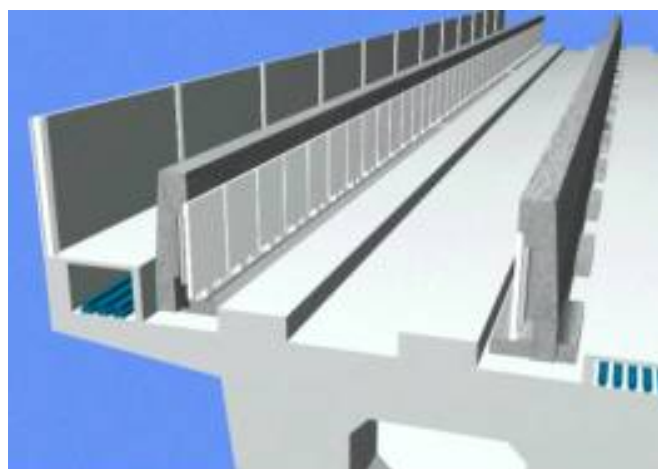


図-1.3.2.4 新方式のガイドウェイ（自立式ガイドウェイ）

1. 4 超高速鉄道の沿線環境保全と本研究の必要性

1. 4. 1 列車走行時の沿線環境保全の検討項目

沿線環境保全については、従来の新幹線から対策がなされてきた「騒音」、「地盤振動」、「トンネル微気圧波」に加え、超高速鉄道特有の「磁界」の4点が主な検討対象となる。

1. 4. 1. 1 騒音

超高速鉄道における騒音は、既存新幹線の騒音を構成する音源のうち集電系音と転動音がなくなって車両空力音と構造物音のみとなる。このうち、車両空力音については既往の研究により速度の6乗に比例する³⁴⁾ことが知られており、既存新幹線の2倍近い速度で走行する超高速鉄道では重要な課題であることから、本論文のテーマとして取り上げるものである。

1. 4. 1. 2 地盤振動

地盤振動については、車両が軽量でかつ土木構造物への荷重が分散しているため小さいという特性を持っており、山梨実験線での走行試験において「環境保全上緊急を要する新幹線振動対策について（勧告）（環大特）」²²⁾に準拠して設定した基準値を下回ることが確認されている¹²⁾。また、構造物や地盤の条件が異なる場合について数値解析での検討が進められており、十分に基準値を達成可能であると示されている²³⁾。

1. 4. 1. 3 トンネル微気圧波

トンネル微気圧波とは、列車のトンネル突入により生じた圧縮波が、トンネル内を音速で伝播し、反対側の坑口や斜坑坑口からパルス状の圧力波となって放射される現象である。また、列車突入時には入口側付近で空気振動が発生する。

これまで、山梨実験線において車両形状の改良やトンネル緩衝工の設置による効果の検証等が行われてきており、模型試験や数値解析による検討も踏まえ、様々なトンネル長の場合において、環境保全の目標としている「民家近傍で20 Pa以下、坑口中心から20 m地点で原則50 Pa以下」という値を下回ることが確認している¹²⁾²⁴⁾。

1. 4. 1. 4 磁界

磁界については、山梨実験線の実測により、用地境界での沿線磁界が国の定める基準値（国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)ガイドラインと同一)以下となることを確認している。また車両の客室内についても、適切な磁気シールドを設けることで基準値を満たすことが可能であることを確認している¹²⁾。

なお、2013年12月には電磁気学の専門家等を交えた公開測定を行い、基準値を下回っていることや、測定方法が国際規格に則っていることを確認している²⁵⁾。

1.4.2 騒音に関するこれまでの計測結果と本研究の必要性

超高速鉄道が 500 km/h で走行する際の騒音については, Yamazaki ら²⁶⁾によって山梨実験線における計測が行われている。平成 2 年に山梨実験線建設を開始した際, 実験段階での環境保全目標値として, 走行音の特質(地上と非接触で, 空力音が中心)や実験線沿線の状況, 試験列車の運転本数等を考慮し, 当時の航空機騒音基準(Ⅱ類型)であった 75WECPNL と設定した。これに対し実測値は 74.5 WECPNL (3 両編成車両, 高架橋高さ 15.9 m, 軌道中心から 25 m の地点)であり, 最も列車本数が多い段階(1 日 100 本を想定)においても環境保全目標値を満足している。

一方で, 営業線における環境保全目標値については, 路線沿線の状況や営業線列車の運転本数等も考慮のうえで設定する必要がある。

新幹線騒音については, 1975 年に当時の環境庁が, 以下の通り「新幹線鉄道騒音に係る環境基準」を制定した²⁾。

1. 環境基準は, 地域の類型ごとに次表の基準値の欄に掲げるとおりとし, 各類型をあてはめる地域は, 都道府県知事が指定する。

地域の類型	基準値
I	70 デシベル以下
Ⅱ	75 デシベル以下

(注) I をあてはめる地域は主として住居の用に供される地域とし, Ⅱをあてはめる地域は商工業の用に供される地域等 I 以外の地域であって通常の生活を保全する必要がある地域とする。

2. 1 の環境基準の基準値は, 次の方法により測定・評価した場合における値とする。
- (1)測定は, 新幹線鉄道の上り及び下りの列車を合わせて, 原則として連続して通過する 20 本の列車について, 当該通過列車ごとの騒音のピークレベルを読み取って行うものとする。
 - (2)測定は, 屋外において原則として地上 1.2 メートルの高さで行うものとし, その測定点としては, 当該地域の新幹線鉄道騒音を代表すると認められる地点のほか新幹線鉄道騒音が問題となる地点を選定するものとする。
 - (3)測定時期は, 特殊な気象条件にある時期及び列車速度が通常時より低いと認められる時期を避けて選定するものとする。
 - (4)評価は, (1)のピークレベルのうちレベルの大きさが上位半数のものをパワー平均して行うものとする。
 - (5)測定は, 計量法(平成 4 年法律第 51 号)第 71 条の条件に合格した騒音計を用いて行うものとする。この場合において, 周波数補正回路は A 特性を, 動特性は遅い動特性(SLOW)を用いることとする。

3. 1 の環境基準は, 午前 6 時から午後 12 時までの間の新幹線鉄道騒音に適用するものとする。

この基準については、新設する新幹線鉄道については開業後直ちに達成することが目標とされている。近年、道路騒音や航空機騒音等、エネルギーベースでの環境基準の策定が進められる中、新たな交通機関である超高速鉄道について、エネルギーベースの環境基準を設定することも一つの考え方である（この場合、継続時間が短いことを考慮すれば、ピーク値で見た場合にはより大きな数値が基準値として設定される方向となる）。しかしながら、中央新幹線を全幹法に基づいて整備する場合、現行の法体系のもとでは「新幹線鉄道騒音に係る環境基準」を達成することが求められる。

山梨実験線における騒音のピーク値は Yamazaki ら²⁶⁾によれば 81.5 dB（前述と同じ測定条件）である。超高速鉄道では曲線半径が 8,000 m と大きく直線に近いルートを設定する必要があり、路線選定上配慮しつつも、一部では住居等が多く存在する地区を通過することを余儀なくされ、これらの地区が I 類型として指定されると 70 dB の基準が適用される。営業線では編成長が長くなり騒音の継続時間が長くなることや、高架橋高さが低い場合等を想定すると、騒音レベルを 10 dB 以上低減させる必要があり、防音壁の嵩上げや防音壁上部への騒音低減装置の設置等、通常新幹線で用いられている設備よりさらに高い性能の騒音対策設備の開発に向けた研究を進めることが必要となる。

一方、新幹線鉄道の環境影響評価にあたっては、「鉄道の建設及び改良の事業に係る環境影響評価の項目並びに当該項目に係る調査、予測及び評価を合理的に行うための手法を選定するための指針、環境の保全のための措置に関する指針等を定める省令」（平成 10 年 6 月 12 日運輸省令第 35 号）に基づいて予測評価を行う必要があり、基づくべき手法（参考手法）として、音の伝搬理論に基づく予測式による計算と定められている。そのため、超高速鉄道においても、速度が高いこと、地上と非接触で走行すること等、既存の新幹線と大きく特性が異なることも考慮のうえで、走行試験結果に基づく研究を進めて、新たに予測評価手法を構築することが不可欠である。

1. 5 鉄道騒音に関する既往の研究

鉄道車両の走行に伴う騒音については、古くは鉄道総研のルーツである鉄道大臣官房研究所において1930年代から研究が進められていたが²⁷⁾、1964年の東海道新幹線開業後間もなく、社会的に大きく注目されることとなった。そのため、大規模な実態調査²⁸⁾を踏まえ、防音壁²⁹⁾や無道床橋梁への防音工の設置³⁰⁾等が行われ、車両側においてもレジン製踏面研磨子の採用による車輪踏面状態の改善³¹⁾等が行われた。その後、1975年に環境庁によって「新幹線鉄道騒音に係る環境基準」が制定され、これに対応するため、車両側ではパンタグラフと架線の離線による騒音を防止するためのパンタグラフ間の特高圧母線引通し対策³²⁾が実施され、地上側ではレール踏面平滑化（削正によるレール凹凸除去）³³⁾や逆L型防音壁や干渉型防音壁の採用等が行われて、大きな効果を上げた。1987年に国鉄が分割民営化されJR各社が発足すると、新幹線の高速化に対するニーズが高まり、さらに研究が進められた。車両側では空力音低減のため、車両上部の平滑化、低騒音パンタグラフの開発、数値解析技術を活用した車両先頭部の空力性能の向上、全周ほろの採用、台車カバーの取付などが行われ³⁴⁾³⁵⁾³⁶⁾、地上側では防音壁のかさ上げや防音壁への吸音装置の取付等が行われ³⁴⁾³⁷⁾、高速化と沿線環境保全の両立が図られてきている。

一方、在来線では、新線の整備や高架化等に際して騒音への対応を求められることが多く、新幹線と同様な対策の他、車両搭載機器の低騒音化、レール継目における騒音を低減するためのロングレール化等が進められてきた。そうした中、1995年（平成7年）に環境庁が「在来鉄道の新設または大規模改良に際しての騒音対策の指針について」を提示し、在来鉄道の新設、または高架化、複線化などの大規模改良に係る環境影響評価に際してこの指針を活用するよう求めており、それに沿った形で対応が進められている³⁸⁾³⁹⁾。

本節では、このように様々な観点で進められてきた鉄道騒音に関する研究の中から、超高速鉄道での適用に向けた地上側の騒音対策設備の開発、及び騒音予測手法の構築に資するという観点で重要な、以下の3点についてこれまでの成果を整理する。また、これらの研究にあたっては道路騒音における研究成果も活用して進められていることから、関連する道路の内容についても併せて整理を行うこととした。

- ①地上側の騒音対策（伝搬路対策）設備に関する研究
- ②地上構造物の発生する音の特性に関する研究
- ③列車走行時の騒音レベルの予測に関する研究

1.5.1 地上側の騒音対策（伝搬路対策）設備に関する研究

東海道新幹線開業後に行われた騒音の実態調査の結果から、車両下部音が主音源であることが明らかになったことを受け、井川ら²⁹⁾は防音壁について模型試験や現地への試験設置、回折効果の理論値との比較による研究を進め、その結果、有効性が確認されたことから、1966～67年にかけて東海道新幹線沿線の都市部の住宅密集地を通過する延長104 kmの高架橋に高さ1～1.5 mの防音壁が設置された⁴⁰⁾。また、開床式の鉄桁橋梁における構造物騒音が非常に大きかったことから、防音工（図-1.5.1.1）の設置等が検討され、阿部ら³⁰⁾がその効果を検証しつつ、1972（昭和47）年頃までに徐々に進められた³⁰⁾。その後、「新幹線鉄道騒音に係る環境基準」が策定されたことや東北・上越新幹線の開業を踏まえて新たな防音壁開発が行われ、逆L型防音壁、干渉型防音装置が実用化された（図-1.5.1.2）⁴¹⁾。

防音壁の遮音性能を向上させるためには嵩上げが考えられるが、一方で実施には構造物の耐荷力による限界もあることから、高さを変更することなく防音壁上部形状の変更によって騒音低減を目指すことが、鉄道や道路において研究されている。金・藤原⁴²⁾や長谷部・千野⁴³⁾は道路騒音の低減に向け先端部への音響管配列による騒音低減装置を開発し、数値解析や模型試験により効果の検証を行っている。藤原⁴⁴⁾は、防音壁の先端に吸音性の円筒エッジを設置する条件で解析的検討を行い、背後の音圧レベルを低減できることを示した。庄野ら⁴⁵⁾は、この原理を活用した騒音低減装置（ノイズリデューサー）について模型試験や高速道路での実物大実験により効果を確認するとともに、形状を景観に配慮したマッシュルーム型リデューサー（図-1.5.1.3）を提案した。渡辺⁴⁶⁾は音の回折と干渉を利用したトナカイ型の上部形状を開発した。一方鉄道に関して、長倉・北川⁴⁷⁾⁴⁸⁾は新幹線を対象として、遮音板を傾斜させた形状や、複数の遮音板を組合せたY型等の形状について模型試験を行い、車両下部音の多重反射の抑制や集電系音の遮蔽等によりY型防音壁の低減効果が高いことを示す一方で、吸音材の貼り付け位置や、先端部への音響管配列についても検証を行った。また桜井ら⁴⁹⁾は道路に用いられるトナカイ型の形状等を参考にして新幹線向けの騒音低減装置を開発し（図-1.5.1.4）、模型試験及び実車走行試験で効果をj確認している。

一方で基準を達成するうえで必要な場合には、防音壁の嵩上げも実施されてきた。森藤・北川⁵⁰⁾はこれまで鉄道で用いられてきた防音壁について体系的な模型試験を実施し、防音壁高さや吸音処理と騒音低減効果の関係を明らかにしている。その中で、防音壁と車両の間における多重反射の影響があり、車両高さよりも防音壁を高くすることで大きな低減効果が得られることが確認されている。

路線の新設等の際、高所空間における騒音低減等、局所的な対策が必要となる場合においては、道路での事例（例えば、張り出し型防音壁⁵¹⁾）等も踏まえて通常の防音壁より性能の高い設備が設置されている場合がある。その1つが高さをより高くした防音壁であり、1991年に開業した北総線では一部にガラスを用いて透光性を高めた高さ5 mの防音壁（図-1.5.1.5）が⁵²⁾、2009年に開業した阪神西大阪線ではセミシェルター型の防音壁が設置されている⁵³⁾。石川・柳沼⁵⁴⁾は、風荷重を低減させるために遮音板を軌道側に張り出すよう

に設置し隙間を開けた防音壁を提案し，吸音材の設置も併用して最大 8 dB の騒音低減効果を確認した．なお，高さが高くなると隙間からの漏洩音や躯体の透過音が減音性能に影響

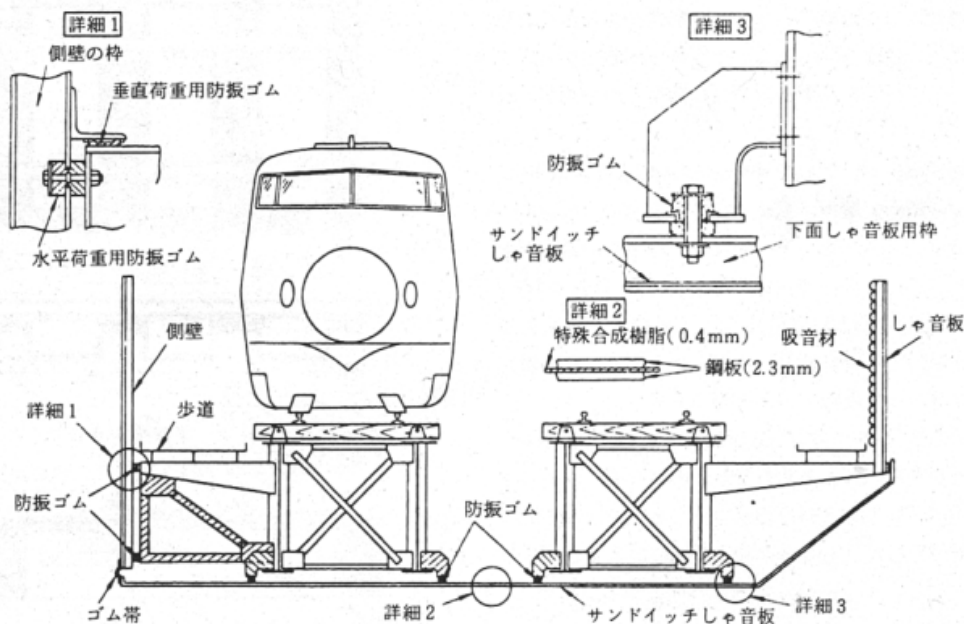
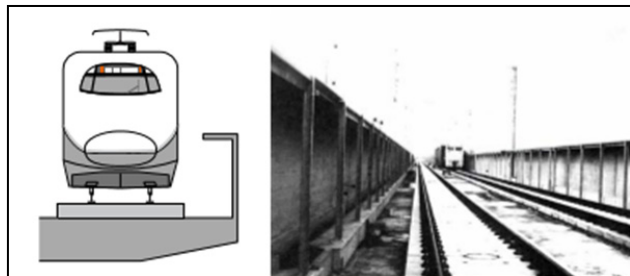
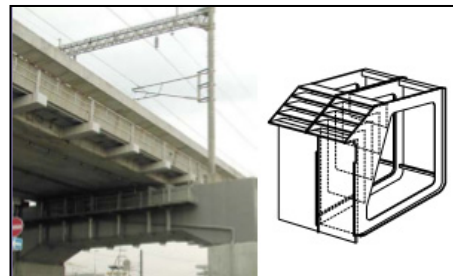


図-1.5.1.1 新幹線の無道床鉄桁に設置された防音工 30)



(a)逆L型防音壁



(b)干渉型防音装置

図-1.5.1.2 国鉄時代から新幹線で用いられてきた防音壁 41)



図-1.5.1.3 ノイズリデューサー 45)



図-1.5.1.4 新幹線用騒音低減装置 49)

を及ぼすと考えられ、前者については堀内・藤原⁵⁵⁾が、後者については朝倉・坂本⁵⁶⁾が数値解析による影響検討を行っている。

さらに性能の高い設備として全覆防音対策（シェルター）を設置した例もあり、八巻・林⁵⁷⁾が中央高速道路で実測を行い、吸音材による効果も併せ、約 33 dB の遮音効果を確認している。また、1979年10月に開業した東海道貨物別線では一部の高架橋に設置され(図-1.5.1.6)⁵²⁾、その後の横浜市の測定⁵⁸⁾により、線路から 40 m 離れた点において設置前後で約 10 dB 騒音レベルが低減したことが報告されている。東京メトロ丸ノ内線では、10～20 dB の騒音レベル低減を見込んでトンネル出口付近の 92 m 区間に設置されている⁵⁹⁾。また福田・長谷部⁶⁰⁾は、積雪対策で設けられたシェルターの騒音低減効果について、模型試験及び実測により確認している。

高所空間への騒音の伝播に対しては、防音壁の軌道の近傍で対策を行うことも研究されており、小方・長倉⁶¹⁾は線間に遮音壁を設置する方法を提案している。また白神ら⁶²⁾はこの方法の他、バラストや半坂・御船⁶³⁾が開発した無機質粒子結合材を軌道面に敷設する方法について数値解析と走行試験により効果を検証している。

超高速鉄道に関連する研究として、緒方ら⁶⁴⁾⁶⁵⁾は音源が高速で移動する場合にドップラ効果による周波数の変調及び音源の指向性の変化を考慮して防音壁の挿入損失を求める簡易な手法を提案するとともに、模型試験を実施して挿入損失について実測を行っている。

超高速鉄道においては前節で述べたように現在の防音壁よりさらに性能の高い騒音対策設備を開発する必要がある、上記の研究成果を踏まえるとともに、超高速走行に特有な圧力変動荷重やメンテナンスの点も考慮しながら進めていく必要がある。

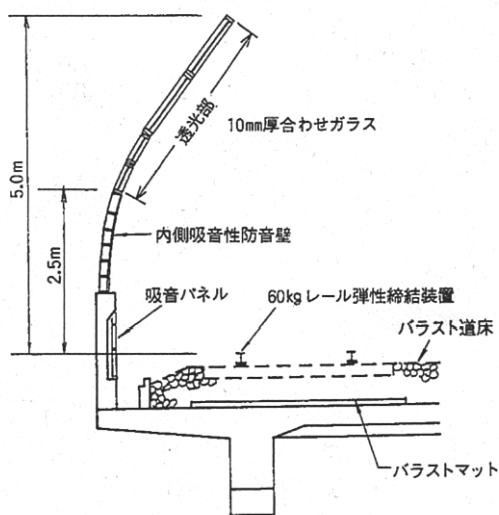


図-1.5.1.5 高さ 5m の防音壁⁵²⁾

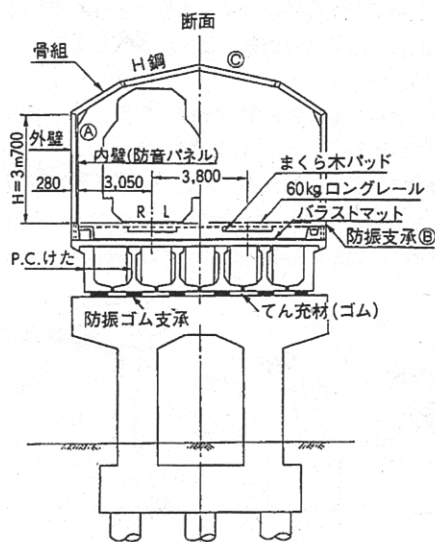


図-1.5.1.6 全覆防音対策（シェルター）⁵²⁾

1.5.2 地上構造物の発生する音の特性に関する研究

構造物音は、軌道と台車相互間に作用する加振力が構造物を振動させ、更にその振動が空気に伝達することで放射される音のことをいう。前述のとおり、新幹線においては東海道新幹線開業当初に開床式の鉄桁の構造物騒音が大きかったため、防音工の設置等が行われた。防音工の設置にあたっては、鉄桁の振動が遮音板に伝わって遮音板自体の振動による騒音を発生させないようにするため、桁と下面遮音板、側面遮音板の接続部には防振ゴムを挟むとともに、下面遮音板には制振鋼板を用いている³⁰⁾。

一方コンクリート構造物に関しては、構造物音の総合音への寄与度が小さく、主要な騒音源として扱われてこなかったが、東北新幹線の総合試験線に高架橋全体を覆うシェルターを設置して高架橋の構造物音のみが観測される状況を設定し、走行試験を行って構造物音の周波数特性やレベルを測定した結果、数十 Hz～1 kHz の範囲の周波数成分であり、鉄道騒音の他の音源に比べてやや低い周波数に偏っていることが確認された⁶⁶⁾。また、森藤⁶⁷⁾は 500～1 kHz を中心とする周波数成分の構造物音は車輪・レールの表面状態による影響が大きいことを示しており、長倉は後述する新幹線騒音の予測モデルの構築にあたり、レールの状態が良好であれば 125～160 Hz の周波数成分が支配的であることを実測により確認して、25 m 点で観測した騒音のうち 160 Hz 以下の成分を構造物音の寄与としてパワーレベルを推定している⁶⁸⁾。また速度依存性については実測で速度の 3 乗程度に比例することを確認し⁶⁹⁾、予測モデルに反映している。さらに、構造物に対する加振力の発生や伝播の対策としてバラストマット、防振スラブ軌道、弾性まくらぎ直結軌道等の研究が進められており⁷⁰⁾、その効果をパワーレベルの補正項として考慮している⁶⁸⁾。

防音壁の振動については江端・二村⁷¹⁾が東北新幹線の供用前の高架橋を利用して加振試験を行い、高架橋や防音壁各部の振動特性を把握したうえで、高いレベルで騒音低減を行う場合には防音壁からの放射音が影響する可能性を指摘している。

道路においては、高架構造物音が主要な音源の一つとなっていることから、特に予測評価につなげる観点から、様々な研究が進められている。田近ら⁷²⁾は、17 の既設橋梁における一般車走行ユニットパターン実測値から、そのパワーレベルを求め、日本音響学会から提案された道路交通騒音の予測モデル ASJ Model 1998⁷³⁾に活用されている。しかし、鋼橋とコンクリート橋では鋼製部材の減衰や伝搬速度といった物理的要素が大きく異なっており、また車両速度や重量の上昇は車両による加振力を増加させ、構造物音も増加すると推定される。そこで紺野ら⁷⁴⁾は、供用前高速道路における試験車走行を行い、躯体各部の振動、躯体周辺部及び沿道騒音の測定と解析を実施し、高架構造物音の速度依存性の評価、パワーレベルの推定を行った。また、西林ら⁷⁵⁾は供用中の高架橋において高架橋裏面の音響インテンシティ測定を実施し、構造種別に応じた音響パワーレベルの設定式を提案している。

近年では、鉄道においても他の音源の騒音レベルが低減されるにつれてコンクリート高架橋の構造物音が無視できないケースが生じ³⁴⁾、構造物振動解析の応用を中心とした研究

が進んでくるようになった。山川・藤原⁷⁶⁾は、防音壁からの放射も含めた構造物騒音について有限要素法(FEM)と境界要素法(BEM)を用いた2次元の数値解析による予測を行い、条件によっては防音壁からの放射が影響することを明らかにした。また、半坂ら⁷⁷⁾は、音の領域に係るkHzオーダーまで計算を精度よく行えるよう、従来の構造物振動解析手法(有限要素法(FEM)や統計的エネルギー法(SEA)等)を構造物音解析へ適用するための課題を検討し、曲げ振動解析をベースに構造物の各要素を梁、板などの単純な部材で表現した解析モデルを構築し、1kHz程度までの構造物音の予測を行って、実測値の性状が再現されることを確認している。さらに渡辺ら⁷⁸⁾は車両/軌道系モデルで加振力を求めてこれを軌道/構造物系モデルに入力して構造物の部材振動を求める手法を開発し、200Hz程度までの構造物振動の予測を行っている。超高速鉄道については、宇野ら²³⁾が地盤振動の周波数領域を対象とした研究ではあるが、構造物及び地盤を立方体メッシュで模擬したボクセル有限要素法モデルを活用し、構造物振動解析を実施している。

超高速鉄道において、現在の防音壁よりさらに性能の高い騒音対策設備を開発するにあたっては、上記の研究成果から考えると構造物音の影響を受ける可能性があり、この点に注意を払いながら検討を進めることが求められる。

1.5.3 列車走行時の騒音レベルの予測に関する研究

在来線では、東京都建設局が鉄道と道路の立体交差化事業を進めるにあたり、鉄道騒音予測調査委員会を設けて昭和52~53年度にかけ騒音の予測手法の研究を行い、バラスト軌道の高架上を走行する列車の騒音とその周辺へ伝搬する際の予測計算手法を構築した(いわゆる東京都の方法、石井らの方法)⁷⁹⁾。ここでは車輪の転動音と高架橋の構造物音の2種の音源で構成されているものと仮定、いずれも指向性を有する有限長の線音源モデルとし、それぞれの音源に対して山下・子安の回折チャート⁸⁰⁾に基づく伝搬モデルを設定の上、列車通過時の騒音レベルの最大値を予測している。この手法は適用範囲がバラスト軌道の高架橋に限定されるなど課題もあったが、環境アセスメントの分野で広く使用された。その後、1995年(平成7年)に環境庁が「在来鉄道の新設または大規模改良に際しての騒音対策の指針について」を提示し、各都道府県や政令指定都市に対して、在来鉄道の新設、または高架化、複線化などの大規模改良に係る環境影響評価に際してこの指針を活用するよう求めた。森藤らはこれに対応する沿線騒音の予測手法を提案した⁸¹⁾。この手法は、石井らの方法を踏襲しながらも、新しい音源(車両機械音)の導入や転動音、構造物音等の主音源のパワーレベルの見直しを行うとともに、指針において評価量として採用された等価騒音レベルを求めるため、個々の列車の単発騒音暴露レベルと列車本数から計算する手法が示されている。その後、この手法に基づいて様々な条件を加味した予測の検討が進められている。白神ら⁸²⁾は高所空間での走行時の騒音分布を調査し、上方への指向特性の影響について検証している。また長倉ら⁸³⁾は高所空間を念頭に、模型試験及び現車試験の結果に基づき、音源の指向特性や車両、防音壁での音の反射を考慮した騒音予測手法を提案

した。また緒方ら⁸⁴⁾は予測精度の向上を目指し、車両と防音壁の間の多重反射に着目して模型試験により検討を行うとともに、吸音材設置の効果を確認している。一方で、音源を点音源と設定した予測モデルの提案も行われており、渡辺⁸⁵⁾は一般的な転動音とレール継目の衝撃音を高架上面と直下に配置するモデルを、朱ら⁸⁶⁾は音響インテンシティ法を用いた実験的検討により算定した転動音と高架構造物音及び貨物列車の機関車音を音源として設定するモデルを、小林ら⁸⁷⁾は車両ごとに点音源を設定するモデルと列車全体のパワーを集中した音源を設定するモデルを提案し、実測結果との比較により妥当性を検証している。これらのモデルでは、防音壁の回折について前川チャート⁸⁸⁾を用いている。

諸外国、特に欧州諸国においても、列車騒音の主音源についての調査や騒音伝搬に関する研究は古くから行われてきており、ドイツやイギリスなど一部の国においては環境騒音としての鉄道騒音の予測手法が定められている⁸⁹⁾。ドイツでは1990年に交通騒音防止法令が制定され、新設ならびに大規模改造の道路及び鉄道に対する騒音の基準値を定めるとともに、付属書の中でそれぞれの騒音予測手法を示している⁹⁰⁾。イギリスでも同様に新設及び大規模改造の鉄道に対する騒音防止基準が1993年に制定され、英国運輸省はこの基準を受けた鉄道騒音の計算方法案を発表している⁹¹⁾。また近年は、鉄道騒音を含めた様々な騒音源についてノイズ・マッピングを行う際の統一的手法を開発するための複数にわたるプロジェクトが組織され、研究が進められている⁹²⁾⁹³⁾⁹⁴⁾。

新幹線では空力音の大きさが、在来線と大きく異なる。在来鉄道の騒音の主な音源は、前述のとおり「転動音」、「車両下部機械音」および「構造物音」の3つであるが、新幹線においては、車両先頭部や連結部、パンタグラフ周辺で生じる「車両上部の空力騒音」、パンタグラフの擦り板の擦動音やスパーク音等の「集電系騒音」が加わる。特に空力音については高い速度依存性を持ち³⁾⁴⁾、高速で走行する新幹線においては、沿線騒音の音源のうちで高い比重を占めている。平成10年度には環境省が鉄道総研に委託し、新幹線鉄道騒音対策手法調査を実施し、この中で沿線騒音予測手法に係る調査が行われている。ここで長倉ら⁶⁸⁾⁹⁵⁾⁹⁶⁾は、それまでの音源分析に関する研究成果をベースに新幹線の音源を有限個の離散音源列とみなし、実測値を基に各音源の指向特性、位置、パワーレベルを設定し、防音壁等の効果を加味した上で沿線の騒音レベルを算出する方法を提案した。この手法は現在も新幹線沿線騒音の予測に広く利用されている。さらにこの手法をベースとした具体的事例への応用として、小方ら⁹⁷⁾は切土区間等に対応した伝播モデルを導入することで新たな予測手法を検討し、適用範囲を拡張した。また西村ら⁹⁸⁾⁹⁹⁾は線路上空構造物による反射の影響を考慮すべく、縮小模型試験による検証を行っている。さらに斎藤ら¹⁰⁰⁾は測定点周囲の建物の条件が騒音レベルに与える影響について、模型試験の結果から推定する式を提案している。一方、高橋¹⁰¹⁾らは走行車両の床下騒音レベルを利用して転動音と構造物音のパワーレベルを変化させることで、レール踏面の状態を反映させることを提案している。

超高速鉄道においても、これらの研究成果をベースとしたうえで、音源の違い等、特有な条件を加味して、適切な予測評価手法を構築する必要がある。

1. 6 本研究の構成

本研究の目的は、超高速走行時に環境保全の目標値を達成可能な騒音対策設備について、山梨実験線における測定結果等に基づいて構造の提案を行い、効果を検証するとともに、それら設備の設置を前提とした各地点の騒音レベルについて定量的な予測を行うモデルを構築することである。

これらの目的を踏まえ、各章の構成を下記の通りとした。

第1章では、超高速鉄道の実現に向けた沿線環境保全の課題と、その中でも特に騒音について、環境保全目標値の達成に向けた騒音対策設備の開発と予測手法の構築が求められていることを述べたうえで、鉄道を主体とした騒音に関する既往の研究内容について整理する。

第2章では山梨実験線の建設時に設置していた中間緩衝工を取り上げ、走行試験時の計測結果により確認された、桁目地等からの漏れ音による影響や、中間緩衝工自体の遮音性能について述べる。

第3章では超高速走行時における気流音の抑制や列車通過時の圧力変動荷重等を考慮して提案する騒音対策設備の構造、及び定置試験により性能を確認した結果や営業線における騒音レベルの予測結果を述べる。

第4章では第3章で提案した騒音対策設備である防音防災フードを山梨実験線に設置し、性能を検証した結果を述べる。

第5章では走行試験やスピーカ試験、加振機試験の結果、及び数値解析により把握した、列車走行時の振動の発生及び桁、フードへの伝達の状況について述べる。

第6章では第5章での測定結果等を踏まえて提案する改良型のフード構造の内容、及び数値解析及び定置試験により性能を確認したうえで実験線に設置し、フード振動や騒音レベルの低減効果等について検証した結果を述べる。

第7章では超高速鉄道において軌道中心からの距離や構造物高さ等の条件を与えた場合に、騒音レベルを予測するモデルを構築し、実測値との比較を行った結果について述べる。

第8章では本研究「超高速鉄道の騒音に係る沿線環境保全対策設備及び予測手法の提案」の結論と今後の課題を示す。

各章の関連を図に示すと、図-1.6.1の通りとなる。

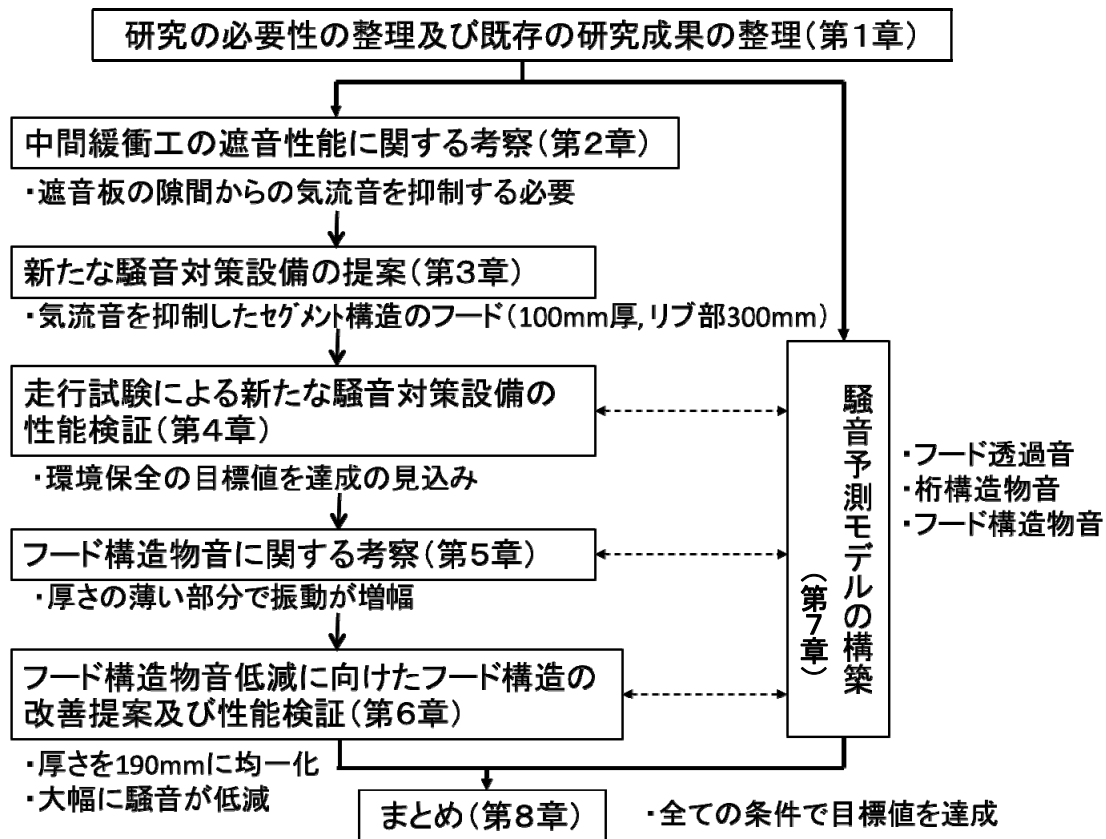


図-1.6.1 本研究における各章の関連

参考文献

- 1) 宇野護：超電導リニアによる中央新幹線計画，土木学会誌，Vol.77, No.12, pp.22-23, 2014.12.
- 2) 環境庁告示第46号：新幹線鉄道騒音に係る環境基準について，1975.7.29
- 3) Curle,N：Proc.Roy.Soc.London A-231, pp.505-514, 1955.
- 4) 森藤良夫：新幹線車両の空力騒音，騒音制御，Vol.14, No.5, pp.13-16, 1990.
- 5) 日本鉄道建設公団：九州新幹線（武雄温泉・新大村（仮称）間）環境影響評価書，2002.1.
- 6) 国土交通省：技術事項に関する検討事項について，交通政策審議会 第2回中央新幹線小委員会，2010.4.15
- 7) 東海旅客鉄道株式会社：中央新幹線（東京都・名古屋市間）環境影響評価書，2014.8.
- 8) 奥村文直，宇野護：超電導リニアモーターカーの開発 東京・大阪1時間への挑戦，土木学会誌，84(12)，1999.12, pp100～103
- 9) 超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価，超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価委員会，2000.3

- 10) 超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価, 超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価委員会, 2005.3.
- 11) 東海旅客鉄道株式会社: 第 20 期有価証券報告書, pp12, 2007.6.
- 12) 超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価, 超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価委員会, 2009.7.
- 13) 誘導集電による車上電源に関する超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価, 超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価委員会, 2011.9.
- 14) 国土交通大臣: 特殊鉄道に関する技術上の基準を定める告示の一部を改正する告示(国土交通省告示第 1244 号), 2011.
- 15) 超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価, 超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価委員会, 2017.2.
- 16) ここまで来た! 超電導リニアモーターカー, 財団法人 鉄道総合技術研究所編, 交通新聞社, 2006.12.
- 17) 曾我部正道, 松本信之, 藤野陽三, 涌井 一, 金森 真, 宮本雅章: 共振領域におけるコンクリート鉄道橋の動的設計法に関する研究, 土木学会論文集, No.724/I-62, pp83~102, 2003.
- 18) 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, 土木学会第年次学術講演会概要集第 3 部, 47 巻, pp712~713, 1992.
- 19) 橋本渉一: 研究展望 浮上式鉄道ガイドウェイの研究と技術開発, 土木学会論文集, No.619/I-47, pp1~12, 1999.
- 20) 上野眞, 浦部正男, 曾我部正道, 永長隆昭, 嶋武正郎, 峰 之久: 自立式ガイドウェイの開発, 鉄道総研報告, 17(5), pp15~18, 2003.5.
- 21) 峰之久, 山崎幹男, 永長隆昭, 上野 眞, 浦部正男, 新方式ガイドウェイの走行試験に伴う測定分析について, 土木学会第年次学術講演会概要集第 6 部, 58 巻, pp477~478, 2003.
- 22) 環境庁長官: 環境保全上緊急を要する新幹線鉄道振動対策について(勧告), 環大特 32 号, 1976.3.
- 23) 宇野護, 永長隆昭, 藤野陽三, 芦谷公稔, 森川和彦: 超高速鉄道走行時の構造物及び地盤の振動に関する実測と予測, 土木学会論文集 A1, 68(1), pp.151-166, 2012.3.
- 24) 本田敦, 高橋和也, 野澤剛二郎, 土肥哲也, 小川隆申, 飯田雅宣, 藤野陽三: 超高速鉄道トンネルにおける微気圧波の評価および緩衝工の提案, 土木学会論文集 A1, Vol.71, No.3, pp.327-340, 2015.9.
- 25) 東海旅客鉄道株式会社: 中央新幹線(東京都・名古屋市間)環境影響評価書 資料編 磁界, 2014.8.
- 26) Mikio Yamazaki, Yasuyuki Goto, Masaaki Miyamoto, Makoto Ueno, Yasuo Zenda,

Masanobu Iida : Aerodynamic noise from vehicles on the Yamanashi Maglev Test Line, 137th meeting of the acoustical society of America and the 2nd convention of the European acoustics association forum acusticum, 1999.3.

- 27) 長倉清：鉄道騒音の測定・音源解析方法, RRR (鉄道総研レビュー), Vol.71, No.2, pp.28-31, 2014.2.
- 28) 荒井昌昭, 井川敬之助, 塚本京一, 智野貞弥：鉄道車両の走行による車外騒音の軽減の研究 - (第1報) 実態調査とその検討-, 鉄道技術研究報告 No.S1, 1967.1.
- 29) 井川敬之助, 荒井昌昭, 塚本京一, 智野貞弥：鉄道車両の走行による車外騒音の軽減の研究 - (第2報) 防音塀-, 鉄道技術研究報告 No.738, 1971.1.
- 30) 阿部英彦：鉄橋の騒音対策, 土木学会誌, Vol.63, No.3, pp.36-42, 1978.3.
- 31) 智野貞弥, 大山忠夫：新幹線車両の走行騒音と研磨子の騒音低減効果について, 鉄道技術研究所速報, No.77-101, 1977.8.
- 32) 真鍋克士, 匹田雅之, 森川武雄, 久須美俊一：東北新幹線の速度向上計画 (240km/h) に伴う集電系騒音レベル調査とその低減対策効果, 鉄道技術研究所速報, No.A-85-50, 1985.
- 33) 須永陽一, 金尾稔：転動音に対するレール削正効果およびレール振動に関する実験的検討, 鉄道総研報告, Vol.8, No.6, pp.31-36, 1994.6.
- 34) 長倉清：新幹線鉄道の騒音問題：日本音響学会誌, 60巻, 5号, pp.284-289, 2004.
- 35) 栗田健：新幹線の騒音低減技術：音響技術, No.163, pp.47-53, 2013.9.
- 36) 北山茂, 鳥居昭彦；N700系新幹線車両の低騒音化技術, 騒音制御, Vol.32, No.2, pp.133-137, 2008.
- 37) 津田英朗, 宮内政信, 和氣秀晃：東海道新幹線の騒音対策の取組と今後の課題, 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, pp.217-220, 2008.9.
- 38) 長倉清：在来鉄道騒音の現状と対策, 音響技術, No.163, pp.54-58, 2013.9.
- 39) 善田康雄：鉄道騒音の発生源と低減対策, 騒音制御, Vol.19, No.3, pp.41-45, 1995.
- 40) 北川敏樹：防音壁, RRR (鉄道総研レビュー), Vol.74, No.7, pp.28-31, 2017.7.
- 41) 北川敏樹, 長倉清：鉄道騒音における伝播系対策, 日本音響学会誌, Vol.68, No.12, pp.622-627, 2012.
- 42) 金哲換, 藤原恭司：音響管配列によるT字型防音壁の遮音性能, 日本音響学会誌, Vol.54, No.3, pp.179-189, 1998.
- 43) 長谷部正基, 千野哲玄：上面に管配列を持つT字型防音壁の性能向上, 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, pp.41-44, 2011.
- 44) 藤原恭司：吸音性円筒エッジをもつ防音塀の遮音性能について, 日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集, pp.257-260, 1987.
- 45) 庄野豊, 吉田幸信, 山本貢平：道路遮音壁先端に設置する騒音低減装置の開発, 土木学会論文集, No.504/VI-25, pp.81-89, 1994.12.

- 46) 渡辺敏幸：トナカイ分岐型遮音壁，音響技術，No.116，pp33-35，2001.12.
- 47) 長倉清，北川敏樹：新幹線用防音壁の形状に関する研究，鉄道総研報告，Vol.16，No.12，pp.17-22，2002.12.
- 48) 長倉清，北川敏樹：新幹線用防音壁に関する模型試験，騒音制御，Vol.28，No.5，pp.356-360，2004.
- 49) 桜井一樹，森啓太郎，増田達：防音壁上に設置する新幹線用騒音低減装置の開発，JR EAST Technical Review，No.22，pp.51-56
- 50) 森藤良夫，北川敏樹：鉄道用防音壁の減音効果について，鉄道総研報告，Vol.10，No.2，pp.23-28，1996.2.
- 51) 大久保朝直，山本貢平：道路交通騒音に対する張り出し型防音壁の騒音低減効果，日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集，pp.121-124，2008.
- 52) 加来治郎：鉄道騒音の現状と対策方法，音響技術，No.75，pp17-23，1991.9.
- 53) 公共用地補償機構：用地ジャーナル，巻頭，2009.8.
- 54) 石川聡史，柳沼謙一：在来線沿線の高所空間を対象とした改良型遮音工による騒音低減効果について，日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集，pp.45-48，2001.
- 55) 堀内章司，藤原恭司：隙間漏洩音とパネル放射音の影響がある遮音壁の性能評価，日本音響学会誌，Vol.65，No.3，pp.121-129，2009.
- 56) 朝倉巧，坂本慎一：音響透過を考慮した遮音壁の減音効果に関する数値解析，日本音響学会騒音振動研究委員会資料，N2007-2，2007.
- 57) 八巻真文，林末夫：高速道路防音施設の概要 防音シェルタについて，建設の機械化，pp.57-60，1977.7.
- 58) 横浜市公害対策局：昭和55年度 横浜市における騒音・振動の測定結果報告書，1981.
- 59) 丸ノ内線騒音対策工事：日経コンストラクション，pp34-38，2004.2.27
- 60) 福田晋平，長谷部正基：シェルター付き高架内の電車走行により騒音について，日本音響学会騒音振動研究会資料，pp.1-5，2007.
- 61) 小方幸恵，長倉清：レール近接位置の低防音壁による騒音低減効果，鉄道総研報告，Vol.25，No.11，pp.6-11，2011.11.
- 62) 白神亮，石川聡史，柳沼謙一：軌道近傍騒音低減対策の高所空間における騒音低減効果に関する解析的検討，土木学会第64回年次講演会，IV-361，pp.719-720，2009.9.
- 63) 半坂征則，御船直人：無機質粒子結合型吸音材「オトメイト」の吸音特性，RTRI REPORT，Vol.11，No.6，1997.6.
- 64) 緒方正剛，鶴秀生，中島弘史，藤原恭司：超高速移動音源に対する防音壁の遮音量算出に関する研究，日本音響学会誌，Vol.59，No.12，pp713-722，2003.
- 65) 緒方正剛，長倉清，高島和博，藤原恭司：高速移動音源に対する防音壁の遮音特性に関する実験的研究，日本音響学会誌，Vol.60，No.4，pp185-191，2004.
- 66) 長倉清：新幹線騒音の音源解析法，鉄道総研報告，Vol.10，No.2，pp.29-34，1996.2.

- 67) 森藤良夫：鉄道車両と騒音(1)，車両と機械，Vol.2，No.6，1988.
- 68) 長倉清，善田康雄：新幹線沿線騒音予測手法，鉄道総研報告，Vol.14，No.9，pp.5-10，2000.
- 69) K.Nagakura，Y.Zenda：Prediction model of wayside noise level of Shinkansen，Wave2002，Balkema Publishers，pp.237-244
- 70) 長倉清：新幹線鉄道沿線の環境を騒音から守る，RRR，pp.2-5，2009.8.
- 71) 江端正直，二村忠元：新幹線騒音の予測手法に関する考察，騒音制御，Vol.2，No.3，pp.34-37，1978.
- 72) 田近輝俊，飯森英哲，渡久地政樹，上坂克巳，山本貢平，橋秀樹：高架構造物音の予測方法に関する検討，音響学会騒音・振動研資，N99-16，1999.3.
- 73) 日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会：道路交通騒音の予測モデル“ASJ Model 1998”，日本音響学会誌，Vol.55，No.4，pp.281-324，1999.
- 74) 紺野義仁，池谷公一，鳥海英宏，山本貢平：橋梁構造物音の測定とパワーレベルの推定，日本音響学会誌，60巻，6号，pp.295-303，2004.
- 75) 西林素彦，中村一平，有馬伸広：高架道路の構造物音の調査およびその予測に関する検討，土木学会第56回年次学術講演会，VII-130，pp.260-261，2001.
- 76) 山川啓介，藤原恭司：鉄道構造物騒音の数値計算による予測，日本音響学会誌，62巻，4号，pp.297-305，2006.4.
- 77) 半坂征則，佐藤大悟，間々田祥吾，鈴木実，長倉清：コンクリート高架橋における構造物音の予測手法，鉄道総研報告，Vol.24，No.9，pp.11-16，2010.9.
- 78) 渡辺勉，曾我部正道，徳永宗正，川口二俊：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.47-52，2013.10.
- 79) 石井聖光，子安勝，長祐二，木庭紀之：在来線高架鉄道からの騒音予測手法案について，騒音制御，Vol.4，No.2，pp.64-70，1980.2.
- 80) 山下充康，子安勝：線状音源に対する障壁の遮音効果—模型実験による検討—，日本音響学会誌，29巻，4号，1973.
- 81) 森藤良夫，長倉清，立川裕隆，緒方正剛：在来鉄道騒音の予測評価手法について，騒音制御，Vol.20，No.3，pp.32-37，1996.
- 82) 白神亮，石川聡史，柳沼謙一，松原隆，石塚康夫：高所空間の在来線騒音測定に関する一考察：日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集，pp.121-124，2011.
- 83) 長倉清，安部由布子，北川敏樹，小方幸恵：鉄道沿線における高所空間に適用可能な騒音予測手法，鉄道総研報告，Vol.23，No.7，pp.23-28，2009.
- 84) 緒方正剛，北川敏樹，長倉清，藤原恭司：在来型鉄道の騒音予測における防音壁の多重反射に関する高架構造モデルによる実験的検討，交通安全環境研究所報告，第3号，pp.1-10，2003.3.
- 85) 渡辺義則：都市鉄道沿線近傍への騒音伝搬に関する研究，土木学会論文報告集，第302号，pp.103-112，1980.10.

- 86) 朱鎮洙, 日高新人, 矢野博夫, 橘秀樹: 在来線高架鉄道の騒音放射特性及び騒音伝搬予測の検討, 音講論集, pp.729-730, 1996.3.
- 87) 小林知尋, 横山栄, 矢野博夫, 橘秀樹: 在来鉄道の音源特性のモデル化, 日本音響学会誌, Vol.66, No.6, pp.257-264, 2010.
- 88) 前川純一: 障壁(塀)の遮音設計に関する実験的研究, 日本音響学会誌, 18巻, pp.187-196, 1962.
- 89) 加来治郎: 鉄道騒音予測モデルの現状, 騒音制御 Vol.20, No.3, pp.11-16, 1996.3.
- 90) Verkehrs-lormschutzverordnung-16. BImSchV 1990.
- 91) Calculation of railway noise (Draft for public comment), THE DEPARTMENT OF TRANSPORT.
- 92) The Harmonoise Sound Propagation Model : ACTA ACUSTICA UNITED WITH ACUSTICA, Vol.97, pp.62-74, 2011.
- 93) Final Report-IMAGINE(Improved Method for the Assessment of the Generic Impact of Noise in the Environment), CORDIS(Community Research and Development Information Service), 2012.10.
- 94) Jrc Reference Reports, Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU), 2012.
- 95) 長倉清, 善田康雄, 橘秀樹: 新幹線騒音の予測評価手法について, 日本音響学会騒音・振動研究会資料, N-2005-01, 2005.
- 96) 善田康雄: 新幹線からの騒音, 騒音制御, Vol.34, No.2, 133-138, 2010.
- 97) 小方幸恵: 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, 2014.3.
- 98) 西村昌也, 斎藤英俊, 小方幸恵, 長倉清: 線路上空構造物が鉄道沿線騒音に与える影響評価, 日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集, pp.289-292, 2012.
- 99) 小方幸恵, 西村昌也, 北川敏樹, 長倉清: 上空構造物による反射音を含めた鉄道沿線の騒音予測手法の検討, 日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集, pp.159-162, 2013.
- 100) 斎藤英俊, 小方幸恵, 長倉清: 建物の立地条件が騒音レベルに与える影響の定量評価, 鉄道総研報告. Vol.25, No.11, 5-10, 2011.11.
- 101) 高橋亮一, 瀬川祥, 玉田哲男: レール踏面状態を考慮した新幹線鉄道騒音の予測法に関する検討, 土木学会第 57 回年次学術講演会, VII-275, pp.549-550, 2002.9.

第2章 実験線の既存設備 (中間緩衝工)における現地計測

2.1 はじめに

前章で述べた通り、超高速鉄道の建設に向けては、1975年に環境庁によって定められた「新幹線鉄道騒音に係る環境基準」¹⁾との整合を図るため、既存の防音壁を上回る、より性能の高い騒音対策設備が必要となる。

山梨実験線の建設時から設置されている騒音対策設備は高さ2mの防音壁であるが、微気圧波を抑制するため、東海道貨物別線で用いられている全覆防音対策(シェルター:写真-2.1.1)と同様に全覆いの構造である中間緩衝工(図-2.1.1及び写真-2.1.2:短いトンネルの中間に設置し、トンネル内を伝播する圧縮波の一部をスリット孔から放出することで圧縮波の波面の切り立ちを緩和し、微気圧波を低減する施設)を設置している。そこでこの中間緩衝工に着目し、走行試験で測定を行い遮音性能を把握するとともに、新たな騒音対策設備の構造を検討するにあたり着眼点を整理する。



写真-2.1.1 東海道貨物別線の全覆防音対策(シェルター)

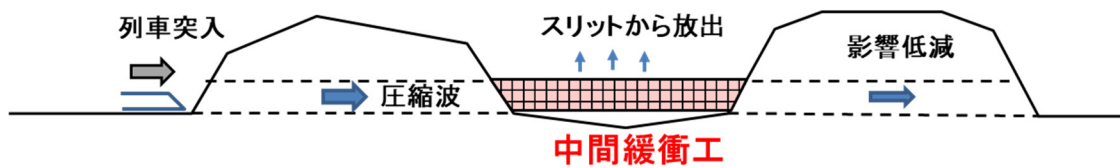


図-2.1.1 中間緩衝工の機能



写真-2.1.2 山梨実験線の中間緩衝工

2. 2 全体的な騒音についての状況把握

2.2.1 既存設備（中間緩衝工）の概要

山梨実験線の建設時から設置されている中間緩衝工は、図-2.2.1.1のとおり H-200 の鋼材で構成された骨組みに厚さ 70 mm の PC 遮音パネルを取り付けた構造となっている。写真-2.2.1.1 に示すとおり桁と桁の隙間（桁目地部）は厚さ 2 mm のクロロプレンゴムで塞がれており、PC 遮音パネルの一部にはトンネル微気圧波を低減させるためのスリット孔があつて、通常はプラスチック板または木板で塞がれている。

本研究では、中間緩衝工を設置した A 橋梁を対象に測定を実施することとした。A 橋梁は図-2.2.1.2 に示すとおり、スパン 59.4 m の PC 箱桁、スパン 25.2 m の PCT 桁及びスパン 12.6 m の RCT 桁により構成されている。

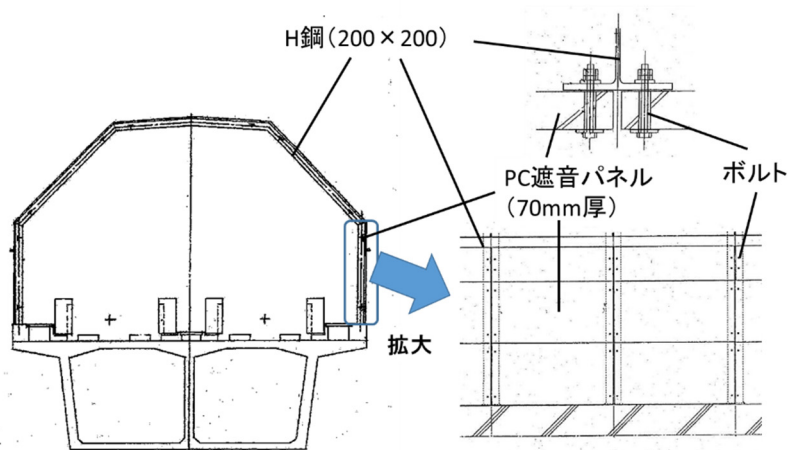


図-2.2.1.1 中間緩衝工の構造

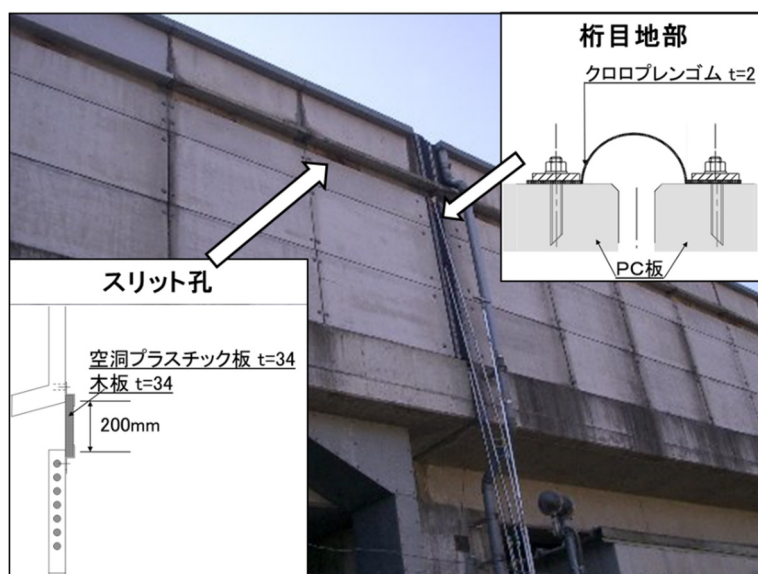


写真-2.2.1.1 山梨実験線の既存設備（中間緩衝工）

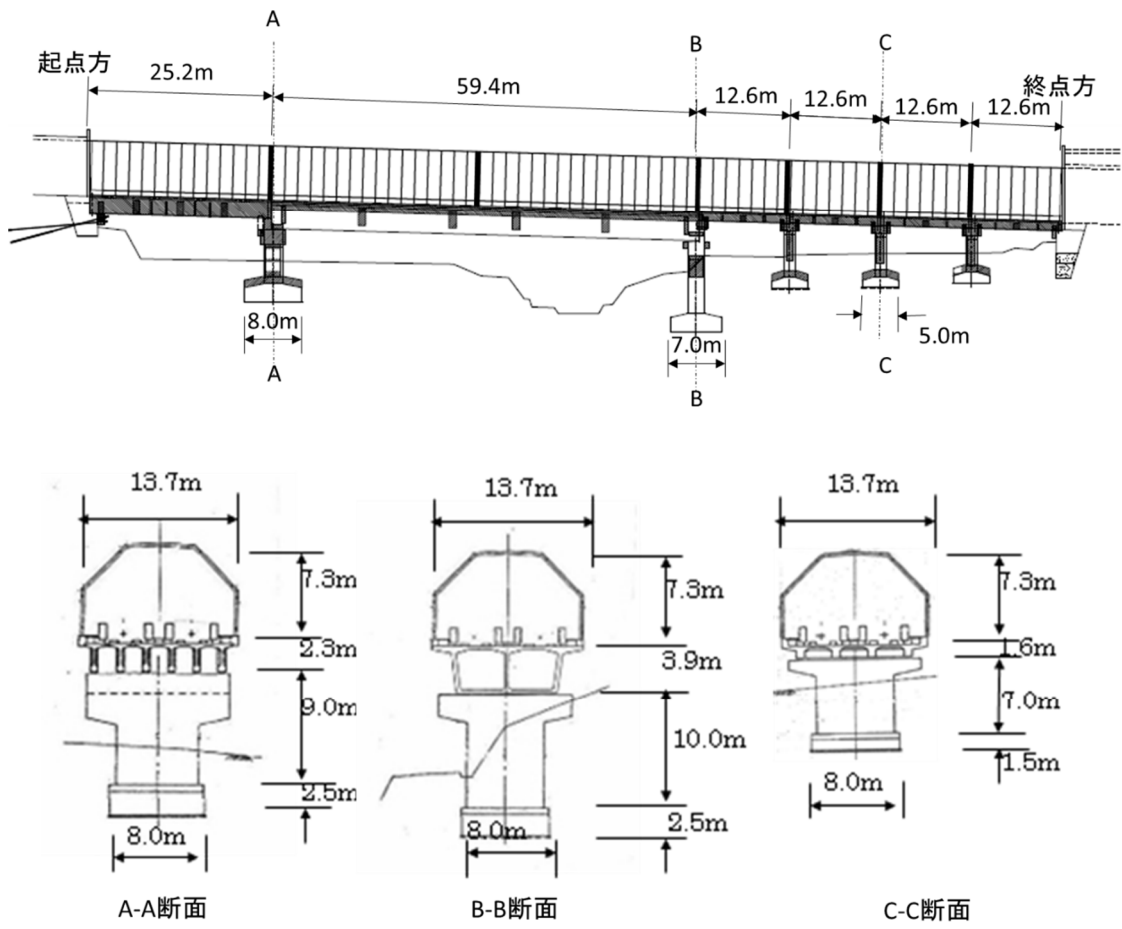


図-2.2.1.2 A 橋梁の概要

2.2.2 現地計測の概要

測定を実施した位置を図-2.2.2.1に示す。目地の数が少ないa断面において、中間緩衝工内壁、中間緩衝工外近傍、新幹線騒音の一般的な測定点²⁾である軌道中心から25 m及び50 mの点（地上高さは1.2 m）を測定点として設定した。また、桁目地部分からの漏れ音による影響を把握するため、目地の数が多いb断面においても25 m点及び50 m点の測定を実施した。

基本的には普通騒音計（RION,NL05）を使用し、測定位置にマイクロホンを設置して実施したが、中間緩衝工内においては大音圧になることや、形状がフラットで壁面付近における音の計測に適することから、定常成分から2 kHzまでの測定が可能である風圧計（SSK,P325W200S）を用いた。なお本研究では、特に断りのない場合、新幹線鉄道騒音の環境基準¹⁾に基づいて騒音計の周波数特性はA特性を、動特性はSLOWを用いた。また走行する試験車両は、3両編成を用いた。

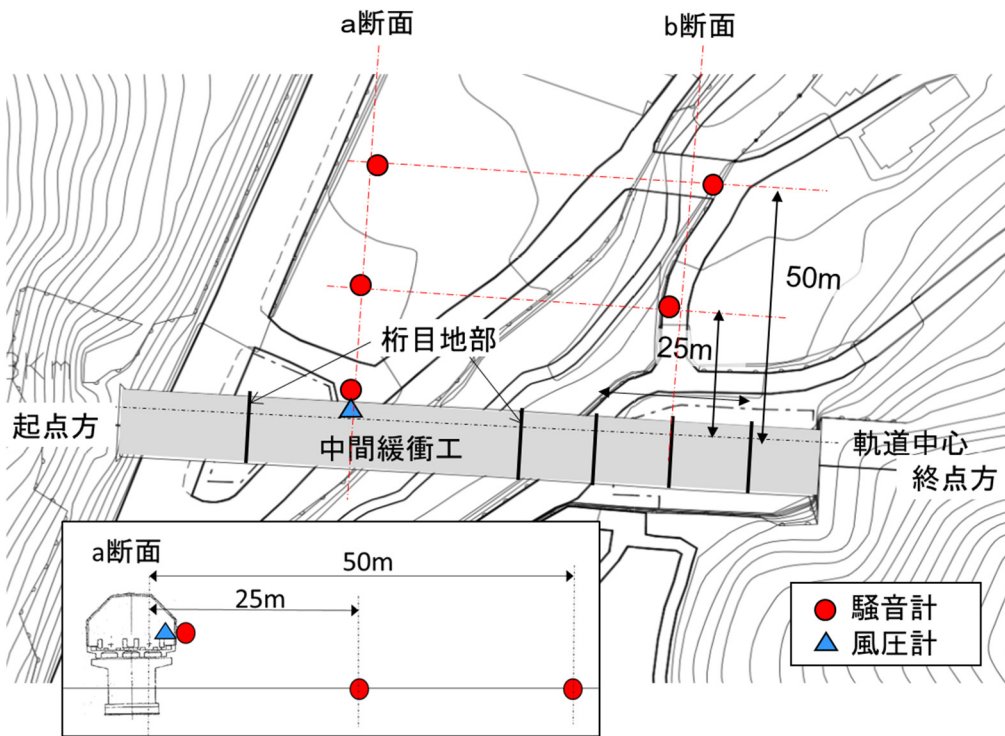


図-2.2.2.1 測定の実施位置

2.2.3 現地計測の結果

a 断面における 500 km/h 走行時（3 両編成）の中間緩衝工内壁面，中間緩衝工外近傍，25 m 点，50 m 点における 1/3 オクターブバンド音圧レベルを整理した結果を図-2.2.3.1 に示す．本研究においては特に断りのない場合，グラフは各地点における 4 本の列車における騒音の平均値（新幹線騒音の測定評価¹⁾と同様にパワー平均としている：以下同様）を表している．また特に断りのない場合，1/3 オクターブバンド音圧レベルの計測値，あるいはこれらをもとに式 2.2.3.1³⁾で計算される AP（オールパス）音圧レベルを，式 2.2.3.2 あるいは式 2.2.3.3 によって補正した相対的なレベル（ $p(x)(i)$ あるいは $p(x)$ ）として表示している．

$$P_{(x)} = 10 \log_{10} \left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{SPL(x)(i)}{10}} \right) \quad 2.2.3.1$$

$$p_{(x)(i)} = SPL(x)(i) - P_0 \quad 2.2.3.2$$

$$p_{(x)} = P_{(x)} - P_0 \quad 2.2.3.3$$

$SPL(x)(i)$ ：点 x における 1/3 オクターブバンド音圧レベルの計測値

i ：以下の周波数帯域における 1/3 オクターブバンドの番号

n ：以下の周波数帯域における 1/3 オクターブバンドの総数=20（中心周波数 50 Hz～4 kHz），但し中間緩衝工内は 17（50 Hz～2 kHz）

P_0 ：新幹線鉄道の騒音基準（I 類型：70 dB）

これは本研究が環境保全の目標である新幹線鉄道騒音の基準達成を目的に進めるものであるとともに，各測定結果の関連性を把握しやすくするためである．

中間緩衝工内壁面においては，周波数が高くなるほど音圧レベルが大きくなり，630 Hz 以上の周波数において最大となっている．一方，中間緩衝工外近傍，25 m 点においては 1～1.25 kHz の周波数でピークとなっており，これより高い周波数では音圧レベルが小さくなることが確認された．一般に，遮音材料では高い周波数ほど遮音性能が高く音圧レベルが低減する傾向があり⁴⁾，今回の測定結果もその傾向を反映していると言えるが，この点については次節以降で詳細に分析する．中間緩衝工外近傍と 25 m 点における音圧レベルの差は各周波数において概ね 3～8 dB 程度であるが，100 Hz 以下の低い周波数においてはその差が小さくなっており，測定高さを考慮すると（中間緩衝工外近傍は桁裏面が見えない軌道高さ付近，25 m 点は桁裏面を見通せる地上 1.2 m），25 m 点では橋桁の振動に伴い裏面から発生する音が影響している可能性があると考えられる．なお 50 m 点では 25 m 点と比べて各周波数で 2～7 dB 小さくなっている．

一方，a 断面と b 断面の 25 m 点において，1/3 オクターブバンド音圧レベルを比較した結果を図-2.2.3.2 に示す．レベルの差は 1 kHz 以下では一部の低い周波数を除いて 2 dB 程度である一方，1.25 kHz 以上では周波数が高くなるとその値が大きくなっている．これは前述の通り，桁目地数の違いによる遮音性能の度合いが a 断面と b 断面で違うことに起因すると考えられる．桁目地部を塞いでいるクロロプレンゴムは 2 mm の厚さであり，面密

度（単位面積当たりの質量）が小さく元々の遮音性能が低いというのに、列車走行時に見ると圧力変動によって大きく変形し、ゴムとゴムの間に隙間が発生している。道路の防音壁を対象とした堀内・藤原⁵⁾の研究によれば、微小な隙間であっても特に中高音帯域の遮音性能に影響を与えることがわかっており、中間緩衝工でも隙間の存在は遮音性能を低下させる要因となる。これらのことから、桁目地部が多いb断面においては、遮音性能が低い桁目地部から漏れ出す走行音が原因となって、沿線で観測される音圧レベルが大きくなったことが考えられる。

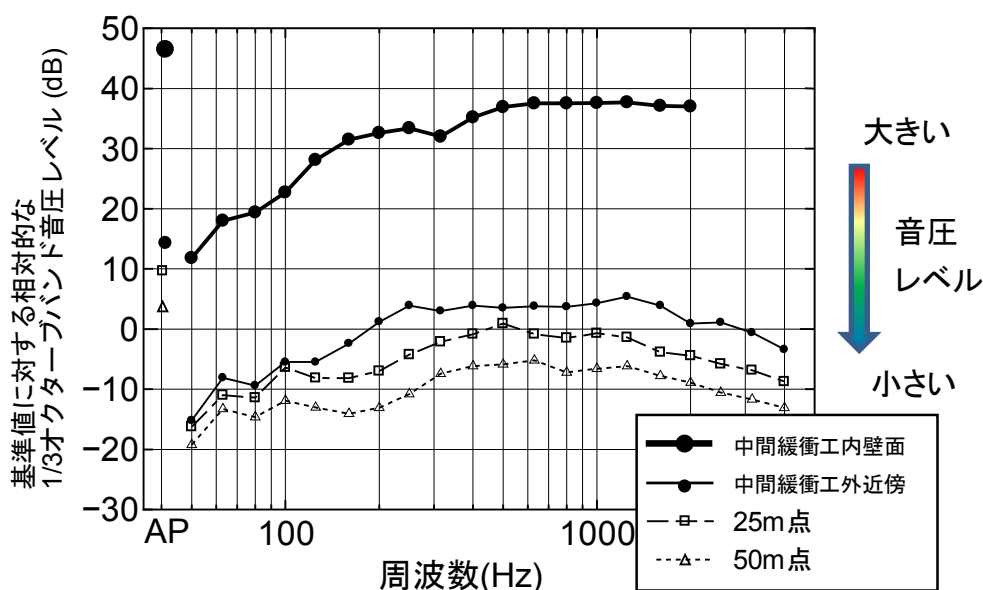


図-2.2.3.1 a断面における 500km/h 走行時の各点の 1/3 オクターブバンド音圧レベル

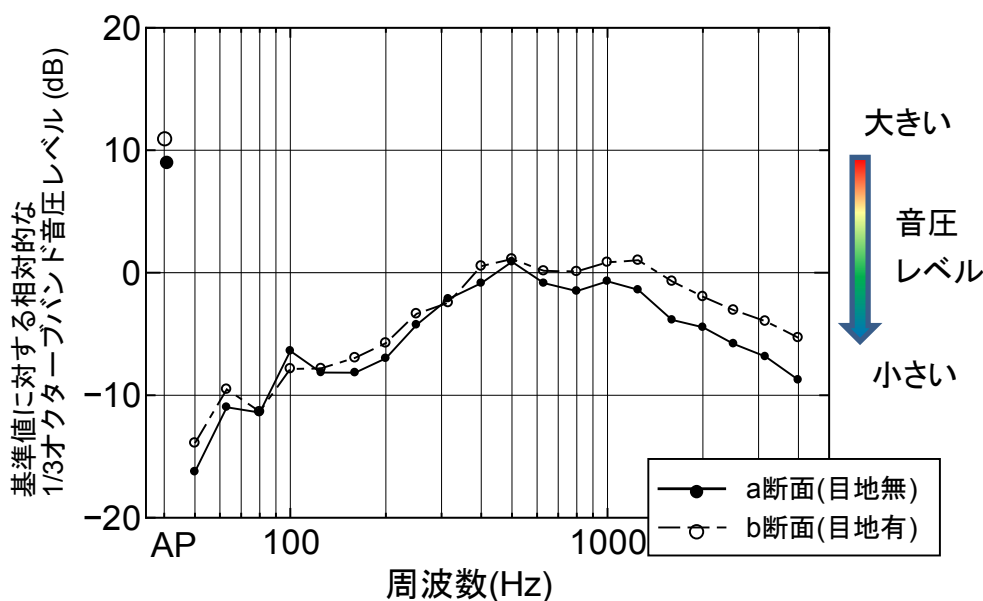
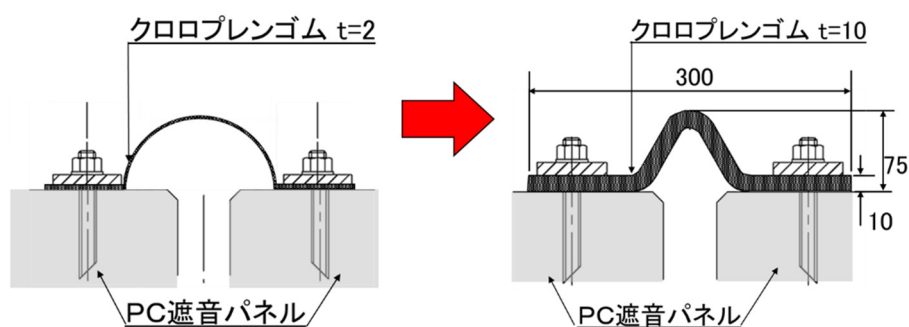


図-2.2.3.2 桁目地部による 1/3 オクターブバンド音圧レベルの違い (25m 点)

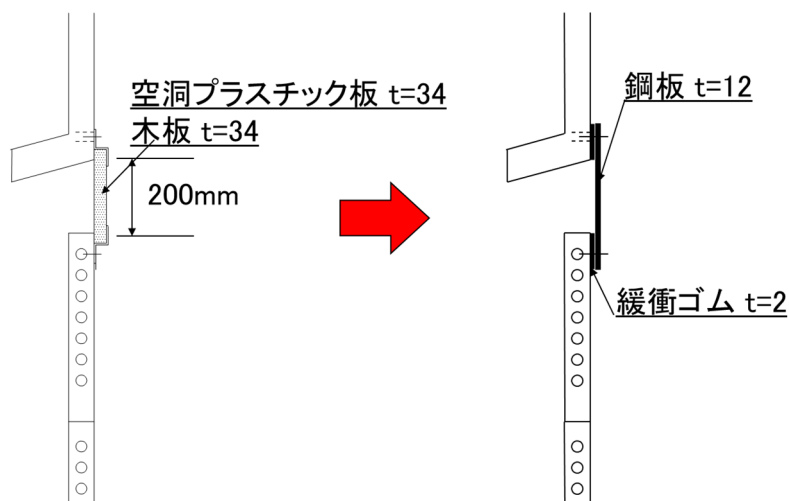
2. 3 桁目地部等の対策による効果

2.3.1 桁目地部等の対策の概要

本節では、遮音性能が低い桁目地部等の影響についてさらに確認するため、これらの部分の遮音性能を向上させる対策を実施し、走行試験で効果を検証することとした。前述の桁目地部の他、スリット孔も対象として、A 橋梁（135.0 m）の全ての箇所において、図-2.3.1.1の通り 2 段階で対策を実施した。まず、第 1 段階として厚さ 2 mm のクロロプレンゴムを 10 mm のものに替えて遮音性と密閉性を向上させた。10 mm のゴムについては列車通過時の瞬間的な圧力変動荷重（大気圧の約 0.06~0.07 倍⁶⁾）を作用させ、変形が微小な量に収まり、隙間が生じる可能性がないことを事前に確認した。さらに、第 2 段階としてこれに加え、スリット部を塞ぐ材料をプラスチック板や木板から PC 遮音パネルと同程度の面密度を確保した鋼板に交換した。鋼板については、桁目地部と違い温度変化による収縮に対応する必要がないことから、コストを考慮して選定した



(1)第 1 段階（桁目地部の対策）



(2)第 2 段階（スリット孔の対策）

図-2.3.1.1 桁目地部等の対策の概要

2.3.2 現地計測による効果の検証

対策の効果を実施前後で比較検証するため、図-2.2.2.1のb断面と同じ条件で計測を行った。なお走行試験の関係上、本節以降の測定については4両編成車両で実施しており、3両編成と4両編成では、騒音のレベルや周波数構成にほとんど差がないことを確認している。

500 km/h 走行時の25 m点における、1/3オクターブバンド音圧レベルを対策の前後で比較した結果を図-2.3.2.1に示す。第1段階の対策により各周波数において音圧レベルが小さくなっており、さらに第2段階の対策を実施することで、200 Hz以上の周波数を中心に音圧レベルの低減が図られることが確認された。またAPの騒音レベルの変化について図-2.3.2.2

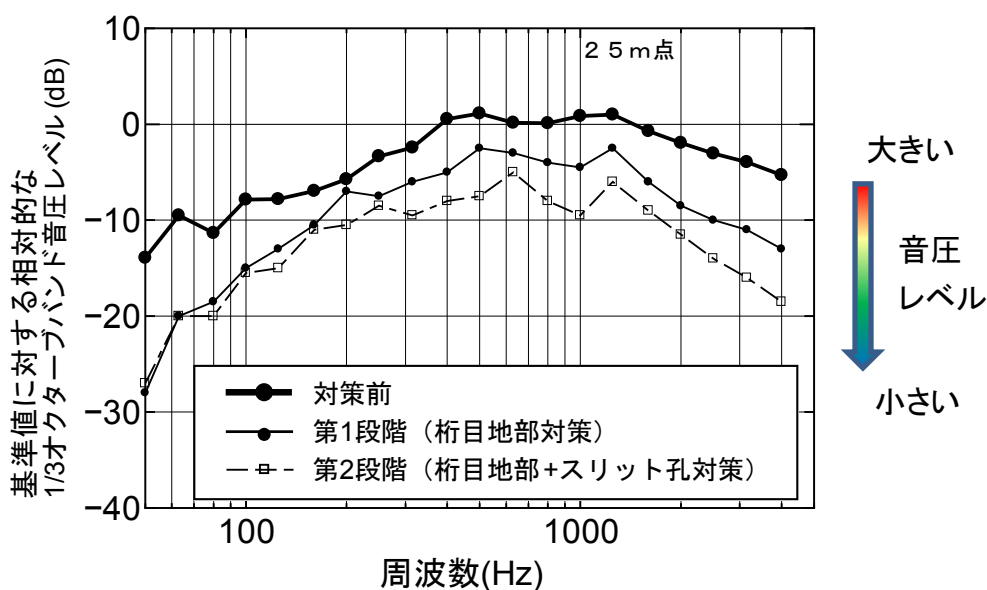


図-2.3.2.1 対策の前後における 1/3 オクターブバンド音圧レベルの変化

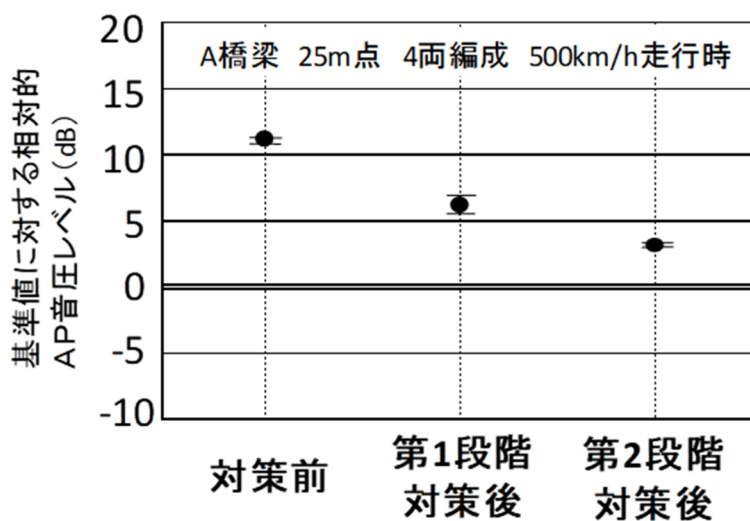


図-2.3.2.2 対策の前後における AP 音圧レベルの変化

に示す。プロットした点は4本の列車における測定値の平均を表しており、その上下の線は測定値の最大と最小を表している。対策前においては環境保全の目標値を10 dB以上上回る状況であった。その後、第1段階の対策により約5 dB、第2段階の対策によりさらに約3 dB低減が図られたが、対策後においても目標値を2~3 dB上回っており、営業線に向けてはさらに改善を図る必要があることが判明した。桁目地等の対策を行っても不十分ということは、PC遮音パネル全体の遮音性能を向上させる必要を示唆している。そのため、次節では中間緩衝工の遮音性能について、現地における測定結果に基づきさらに考察を行うとともに、環境保全の目標値を達成する観点から、営業線の騒音対策設備で必要となる遮音性能について検討する。

2. 4 中間緩衝工の遮音性能に関する考察

2.4.1 現地計測による遮音性能の把握

本節では図-2.4.1.1のとおり、桁目地等の隙間対策を実施した状況での中間緩衝工の詳細な遮音性能を確認するため、PC 遮音パネルで構成する中間緩衝工の内外における測定を中心に、走行試験及びスピーカ試験による測定を実施した。

走行試験に際しては、PC 遮音パネル間やPC 遮音パネルと鋼材の間に隙間が確認される箇所について、事前にコーキング材等で気密対策を行った。中間緩衝工内の測定においては前述と同様の理由により風圧計（SSK,P325W200S）を用い、中間緩衝工外及び 25 m 点においては普通騒音計（RION,NL05）を使用した。スピーカ試験では上下線の中間部にスピーカを置き、ピンクノイズ（パワーが周波数に反比例するノイズ⁴⁾）を発生させて、列車がない状況で中間緩衝工内各部における音圧レベルを普通騒音計で測定した。

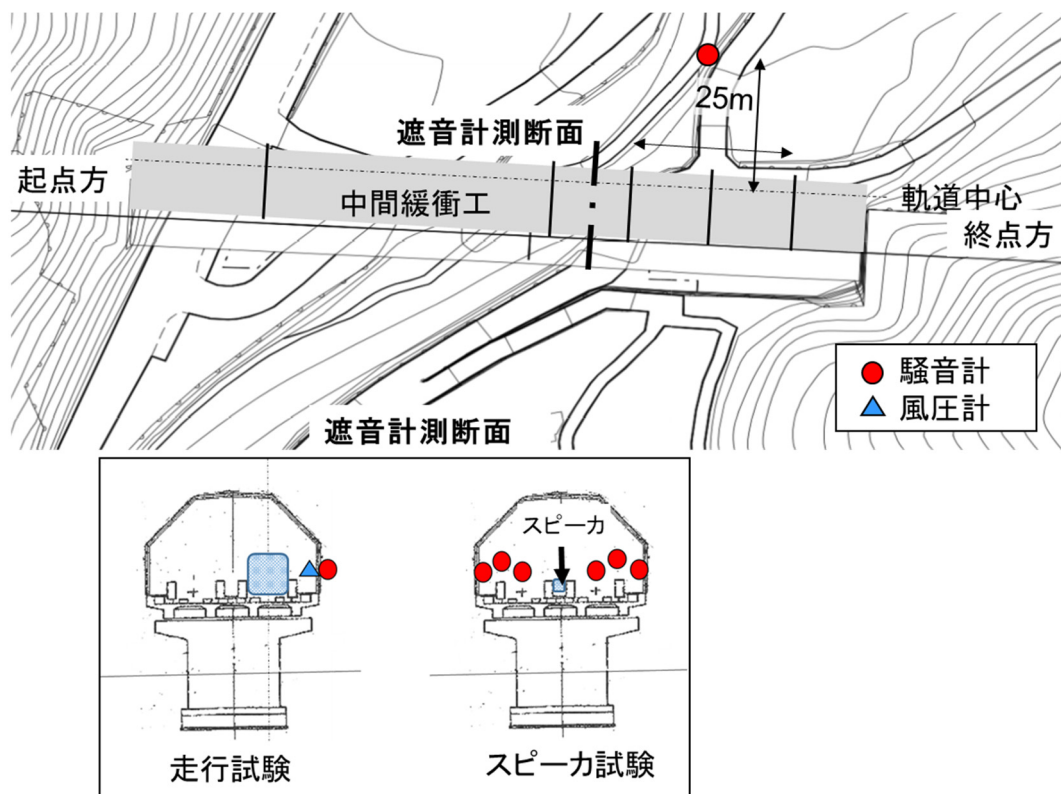


図-2.4.1.1 走行試験及びスピーカ試験の内容

中間緩衝工内壁面及び 25 m 点における 1/3 オクターブバンドの A 特性音圧レベルを、列車速度別に整理した結果を図-2.4.1.2, 図-2.4.1.3 に示す。中間緩衝工内の主要な周波数帯域は 500 Hz～2 kHz であり、走行速度が速くなるにつれて、ほぼ全ての周波数帯域で走行音が大きくなっていることが確認される。一方、25 m 点では 160～200 Hz を除き、ほぼ列車速度に対応して走行音が大きくなっていることが確認されるが、主要な周波数の帯域は 250 Hz～1.25 kHz と中間緩衝工内に比べ低くなっており、前節で述べた通り、遮音材料の特性により高い周波数で多く遮音されたと考えられる。なお 400 km/h 以下の速度では 160～200 Hz にピークが存在するが、測定断面で橋桁裏面の振動加速度レベルを測定すると図-2.4.1.4（グラフは 500 km/h 走行時の AP 振動レベルを基準（0 dB）として表示）の通り同一の周波数にピークが確認され、列車走行に伴う構造物音が影響している可能性が高いと考えられる。

次に、中間緩衝工の遮音性能について詳細に検討する。まず列車走行時の音源にあたる中間緩衝工内の平均的な音圧レベルを直接的に計測することが困難であるため、中間緩衝工内の平均的な音圧レベルと中間緩衝工内壁面の音圧レベルの差を 3 dB と設定し（拡散音場を仮定した場合、壁に入射したエネルギーは反射によって 2 倍になることから理論的に 3 dB となる）、列車走行時の中間緩衝工内壁面付近の音圧レベルから推定した。実際、中間緩衝工においてスピーカ試験を実施し、中間緩衝工内の平均的な音圧レベルと中間緩衝工内壁面の音圧レベルを 1/3 オクターブバンド毎に整理した結果は図-2.4.1.5 に示す通りであり、その差は概ね理論値に近いことが確認された。なお、特に低い周波数領域でばらつきが見られるのは、中間緩衝工内の音場が完全に拡散反射条件になっていないためと考えられる。そのうえで、算出した中間緩衝工内平均音圧レベルから中間緩衝工外で測定した音圧レベルを引き、さらに補正值 4 dB を引くことで列車走行時の中間緩衝工の遮音性能（内外音圧レベル差）を算定した。補正值 4 dB は杉江ら⁷⁾が検討した通り、中間緩衝工外側壁面から測定位置までの距離減衰や音圧レベルとインテンシティレベルなどの違いに起因する値である。片側の室が移動する試験室を用い、厚さ 115mm、面積約 10 m²の RC 壁を試験体とし、その片側を自由空間として現場を模した状況を設定し、内外の音圧レベル差を計測して算出している。

走行試験（速度 500 km/h）とスピーカ試験により算出した中間緩衝工の遮音性能（内外音圧レベル差）を図-2.4.1.6 上段に示す。なお、2.5 kHz 以上のデータについては参考として示している。スピーカ試験においては、200 Hz 以上で周波数が高くなるにつれ遮音性能が高くなっており、質量則の傾向⁴⁾と一致する。一方、走行試験においては 1 kHz 以上の周波数帯域において遮音性能が低下している。両者の差を表示すると図-2.4.1.6 下段の通り、200 Hz 付近ならびに 1 kHz 以上の周波数帯域において差が大きくなっている。中間緩衝工においては前節で述べた通り隙間対策を実施しているが、近傍で走行音を耳で聞くと、シューッという空気が吹き出すような音が聞こえた。このことから、列車通過時にだけ列車周りの圧力変動等によって僅かな隙間が生じ、そこから空気が出入りして、吹き出しや吸い込み

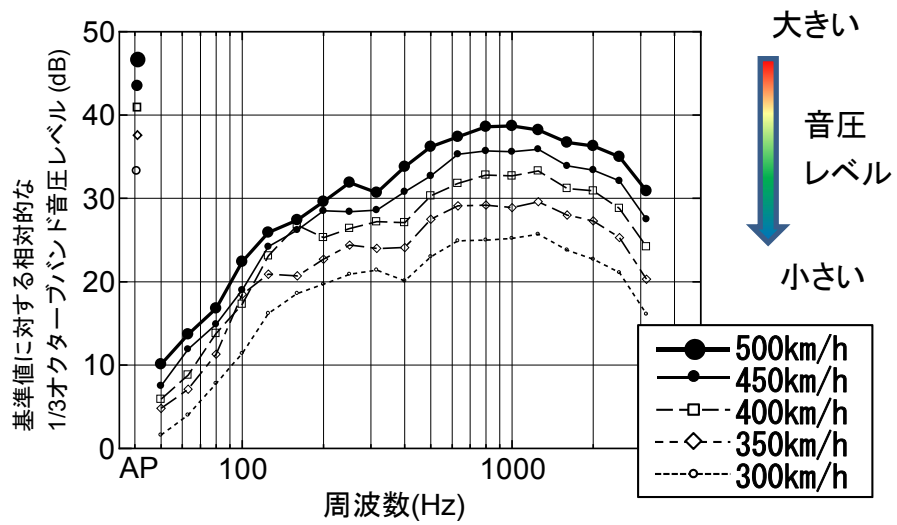


図-2.4.1.2 中間緩衝工内の音圧レベル (列車速度による違い)

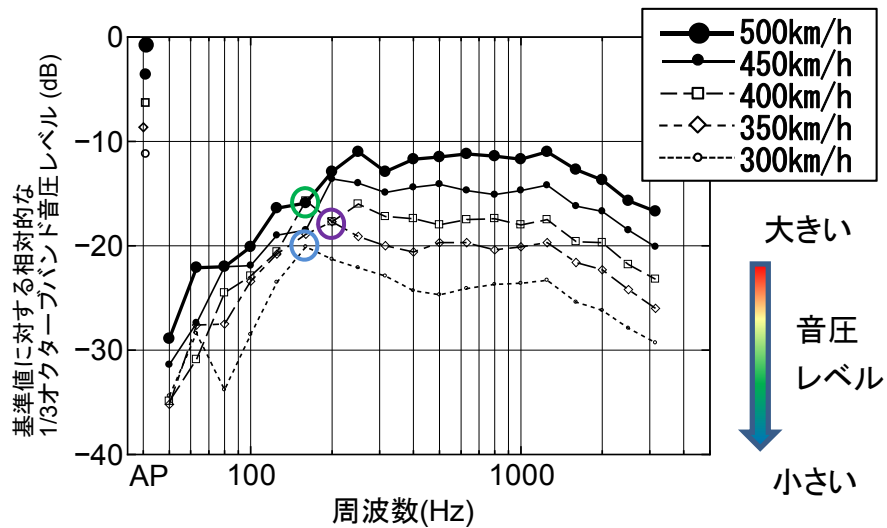


図-2.4.1.3 25m 点の音圧レベル (列車速度による違い)

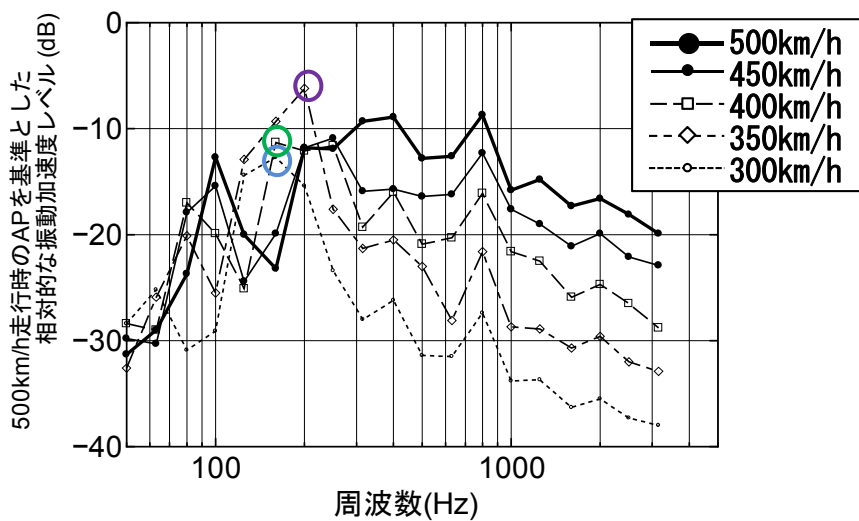


図-2.4.1.4 橋桁裏面の振動加速度レベル

に伴う気流音（以下「気流音」と称する）が発生していると推測できる。

その傾向を裏付けるため、列車が中間緩衝工を通過した瞬間と通過する約1秒前の中間緩衝工外近傍における音圧レベルの比較を行った。走行速度は450 km/hのデータを使用した。図-2.4.1.7の通り、当然通過時の音の方が通過前よりも大きいですが、特に200 Hz付近と2 kHz以上でその差が顕著になっていることが確認され、図-2.4.1.6下段に示した傾向と類似している。トンネルのような閉鎖空間を伝わる音は後述する通り距離による減衰が小さいため、1秒間に列車が走行する125 m程度の距離で10 dBの差を生じることは考え難く、この2 kHz以上の音は、列車通過中の瞬間的な圧力変動によってPC遮音パネルの隙間などから空気が入り出す際の気流音であると考えられる。また200 Hz付近は前述のとおり構造物音の影響と想定される。後者については橋梁全体の振動特性に関係するため、騒音対策設備自体により改善を図ることは難しいが、前者については気密対策を強化した騒音対策設備の新たな構造を検討出来れば、改善を図ることが可能と考えられる。

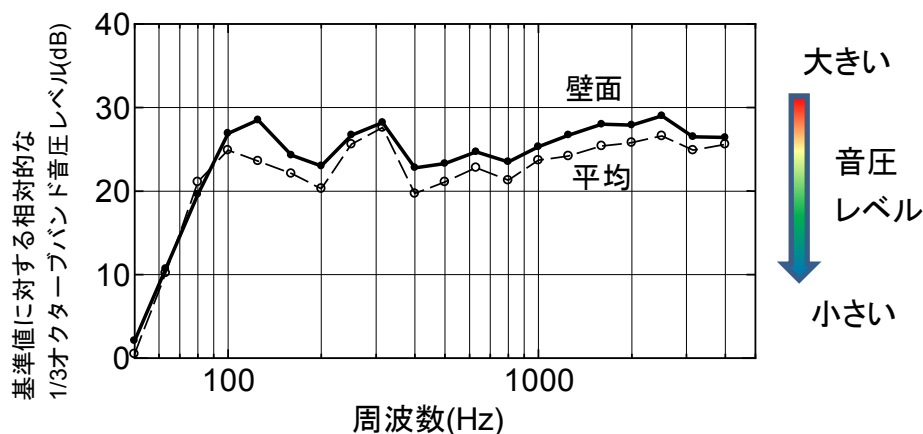


図-2.4.1.5 中間緩衝工内の音の分布（スピーカ試験）

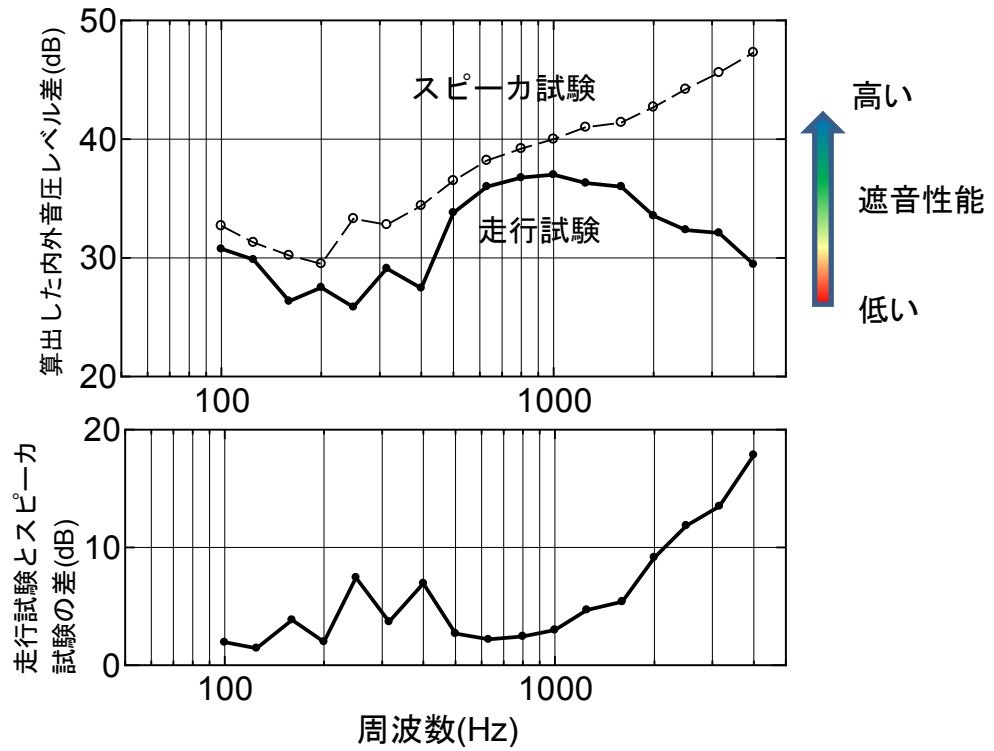


図-2.4.1.6 中間緩衝工の遮音性能 (内外音圧レベル差)

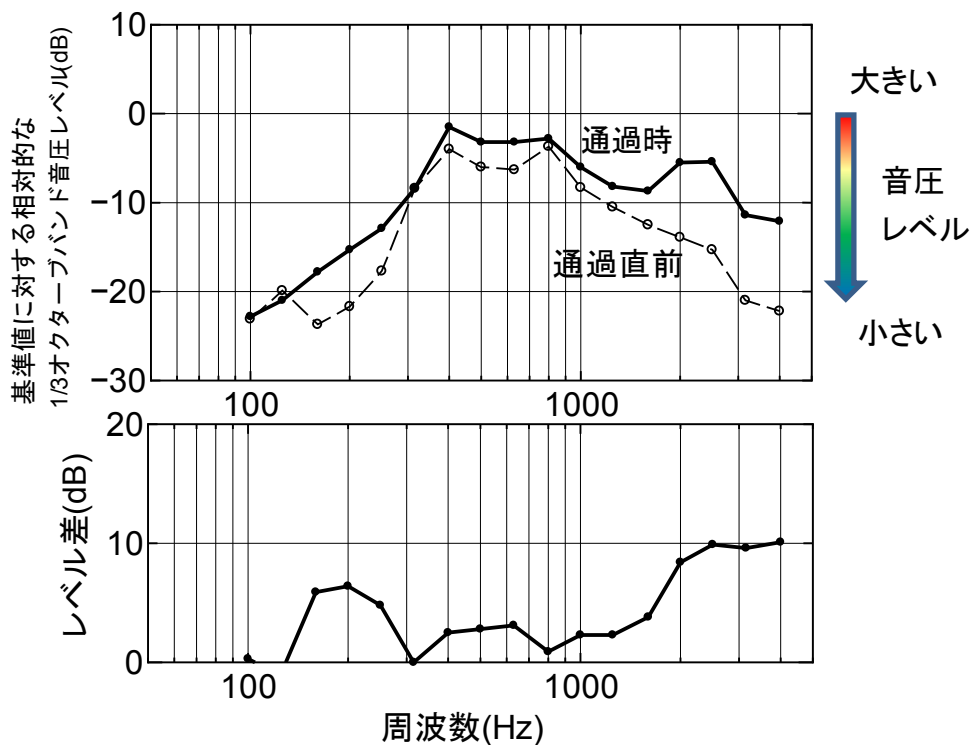


図-2.4.1.7 通過後と通過直前の音圧レベルの比較 (中間緩衝工外近傍)

2.4.2 営業線における低減の見通し

以上の結果を踏まえ、気流音対策が完全になされるとの前提で、図-2.4.1.3 に示す 25 m 点の 1/3 オクターブバンド音圧レベル実測結果から、図-2.4.1.6 に示したスピーカ試験と走行試験の遮音性能の差分（構造物音は低減しないため、500 Hz 以上の成分のみ考慮した）を周波数毎に差し引き、その結果に基づいて式 2.2.3.1 より算定すると、図-2.4.2.1 に示すとおり、AP 音圧レベル（騒音レベル）は対策前と比較して約 6 dB 低減すると推定され、環境保全の目標値を達成可能であると考えられる⁸⁾。

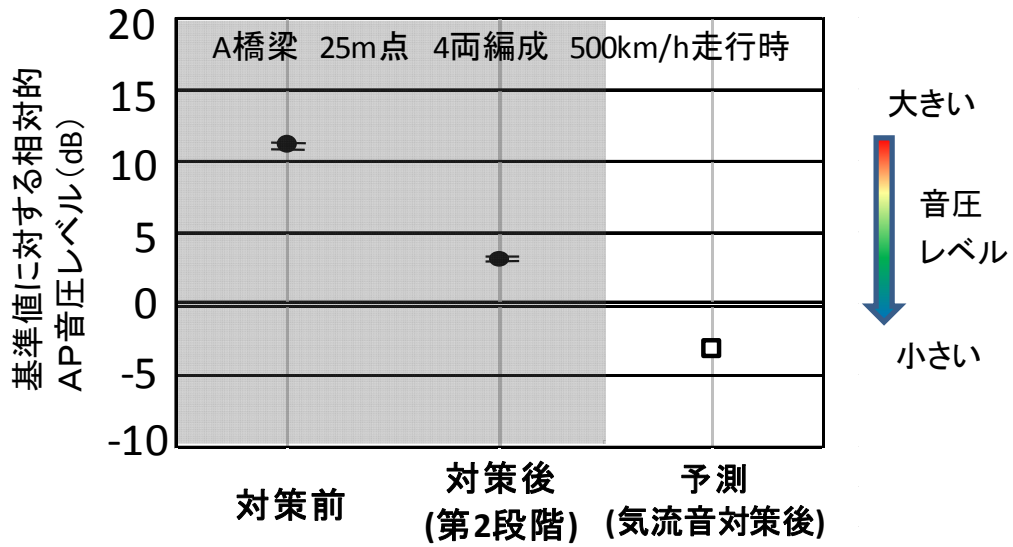


図-2.4.2.1 騒音レベルの低減の見通し

2. 5 まとめ

本章では、山梨実験線の既存設備である中間緩衝工（鋼材の骨組みに PC 遮音パネルを取付けた構造）に着目し、走行試験で超高速走行の際の測定を行って騒音レベルの現状を把握した。その結果、桁目地やスリット孔等からの漏れ音による影響が大きいことが確認されたため、対策を実施して効果を確認する一方、さらに中間緩衝工の遮音性能を詳細に確認するため、走行試験による計測やスピーカ試験を実施した。以下に、本章で得られた知見をまとめる。

- (1) 中間緩衝工においては、桁目地部やスリット部の隙間から漏れ出す走行音の影響が大きいと考えられる。
- (2) 桁目地部やスリット部の隙間を改善することで走行音の低減を図ることができるものの、対策後においても騒音レベルが環境保全の目標値を 2～3dB 上回り、さらに改善が必要な状況である。
- (3) 走行試験とスピーカ試験で内外音圧レベル差を比較すると、200 Hz 付近ならびに 1 kHz 以上の周波数帯域において前者が大きくなっている。このうち 200 Hz 付近については構造物音によるものと考えられ、1 kHz 以上については列車が超高速で通過する際に個々の PC 遮音パネルの細かい隙間等から気流音が発生し、高い周波数領域での遮音特性を悪化させているものと推測される。
- (4) 列車通過時の気流音対策が完全になされた場合には、環境基準の目標値を達成することが可能であると考えられる。

PC 遮音パネルを適切に取り付けた場合でも環境保全の目標値を上回っていることは、超高速鉄道の営業線において、これまでの延長線上にはない、新たな構造の騒音対策設備が求められていることを意味している。そのため次章では、本章で得られた知見も踏まえ、気密性能を十分に確保し気流音の抑制に重点を置いた、騒音対策設備の新たな構造について検討する。

参考文献

- 1) 環境庁告示第 46 号：新幹線鉄道騒音に係る環境基準について，1975.7.29.
- 2) 環境省：新幹線鉄道騒音測定・評価マニュアル，2015.10.
- 3) 守田栄：騒音と騒音防止（新版），コロナ社，1985.
- 4) 日本音響学会編：音響工学講座 騒音・振動（上），コロナ社，1978.3.
- 5) 堀内章司，藤原恭司：隙間漏洩音とパネル放射音の影響がある遮音壁の性能評価，日本音響学会誌，Vol.65, No.3, pp.121-129, 2009.
- 6) 山崎幹男，加藤覚，若原敏裕，岡崎真人，上野眞，藤野陽三：超高速鉄道トンネル内の圧力変動に対する覆工構造の設計，土木学会論文集，No.752/I-66, pp.119-131, 2004.1.
- 7) 杉江聡，吉村純一，山元一平：内部音源法による外周壁の遮音性能測定方法 その 1－測定方法の提案－，日本音響学会講演論文集，pp.1049-1050, 2004.9.
- 8) 永長隆昭，久保淳一郎，土肥哲也，野澤剛二郎，長倉清，藤野陽三：超高速鉄道の騒音対策設備の開発，土木学会論文集 A1, 73(2), pp.399-412, 2017.6.

第3章 騒音対策設備の

新たな構造の提案

3. 1 はじめに

前章で述べた通り, 営業線での適用に向けて更に性能の高い騒音対策設備を開発するためには, 気密性能を十分に確保し超高速走行に伴い発生する気流音の抑制に重点を置く必要がある. そこで本章では, これらを改善するとともに, 超高速鉄道に特有の列車通過時の圧力変動荷重や, 建設や保守の容易性も考慮した, 騒音対策設備の構造を検討する. そのうえで, 提案する構造を模擬した試験体を作成して気密性や遮音性に関する定置試験を実施し, その結果から営業線における騒音レベルの予測を行う.

3. 2 営業線において確保すべき性能

将来の営業線における運用も考慮し、新たな騒音対策設備に求められる性能をまとめると表-3.2.1の通りとなる。以下、個別に考慮すべき点を述べる。

表-3.2.1 騒音対策設備の新たな構造に求められる性能

環境性能	遮音性能の確保 微気圧波の抑制 空気振動の抑制
構造物としての性能	作用荷重への耐力（特に圧力変動荷重） 建設のしやすさ 保守性
コスト	建設コスト（橋梁全体） 保守コスト

○環境性能

・遮音性能の確保

本研究の目的である、環境保全目標値（新幹線鉄道騒音基準 I 類型 70 dB）を達成可能な遮音性能を確保する必要がある。

・微気圧波の抑制

既存の研究により、トンネル緩衝工（微気圧波の発生を抑制するため、トンネル出入口に設置されるフード状の構造物）とトンネルの接続部に段差がある場合はその地点で新たな微気圧波が発生することがわかっており、対策として特別な構造のすり付けが必要となる。したがって、騒音対策設備の計画段階で、なるべくこの段差を小さくしておくことが望ましい。

・空気振動の抑制

列車が地上区間からトンネル緩衝工に突入する際には入口側付近で空気振動が発生するが、騒音対策設備に隙間が多い場合はその隙間から圧力波が放射され、沿線で空気振動が観測される可能性があるため、そうした観点からも隙間を少なくするとともに、影響の有無について確認することが必要である。

○構造物としての性能

・作用荷重への耐力

騒音対策設備の設計にあたっては、固定死荷重、付加死荷重、プレストレスト力、風荷重、雪荷重、地震の影響、施工時荷重等を考慮する必要がある。特に、密閉構造とした場合には列車通過時の瞬間的な圧力変動荷重を考慮する必要があり、トンネルを対象とした山崎ら²³⁾の研究によれば図-3.2.1に示す通り正圧（列車の突入・退出に伴う圧力波）及び負圧（列車通過・すれ違い時）として作用し、500km/hで走行する際には最大（すれ違い時）で大気圧比0.19程度の大きさと予測される。既存の新幹線においても雪対策としてのシェルターを設置している場合があり、同様の荷重を考慮しているもの、値は最大でも大気圧の0.08倍程度であり⁴⁾、超高速走行時には影響がより大きくなる。

- ・建設のしやすさ

資材の運搬を含めて工事が効率的に実施でき、工期の短縮が図れる構造を検討することが望ましい。コストと同様に、高架橋を含めたトータルで最適化を図るという視点も重要である。

- ・保守性

線路上空に存在することや、圧力変動荷重を繰り返し受けることを考慮すると、設備の保守は非常に重要な事柄である。一方で、設備の内側は夜間の作業時間帯以外は詳細な点検ができないこと、また構造物高さが高い場合は外側からの点検も難しいことから、極力メンテナンスフリーな設備とする必要がある。

○コスト

- ・建設コスト

騒音対策設備自体の建設コスト低減も勿論であるが、雪対策として施工されているシェルターの事例では、シェルターを橋梁の部材として活用しているケースもあり

（図-3.2.2は一体のPC下路箱桁とした例⁴⁾、図-3.2.3はPC下路桁+RCシェルターとした例⁵⁾）、橋梁も含めたトータルでの建設コストを低減することが必要である。

- ・保守コスト

コストの観点からも、メンテナンスフリーな設備とすることは重要である。

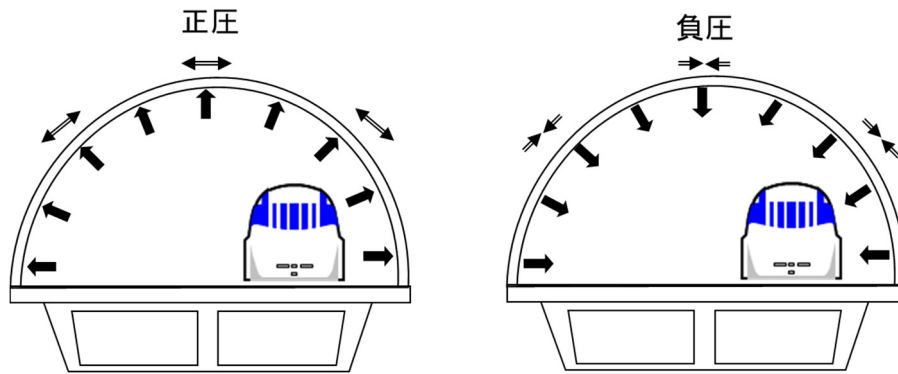


図-3.2.1 列車通過時の瞬間的な圧力変動荷重

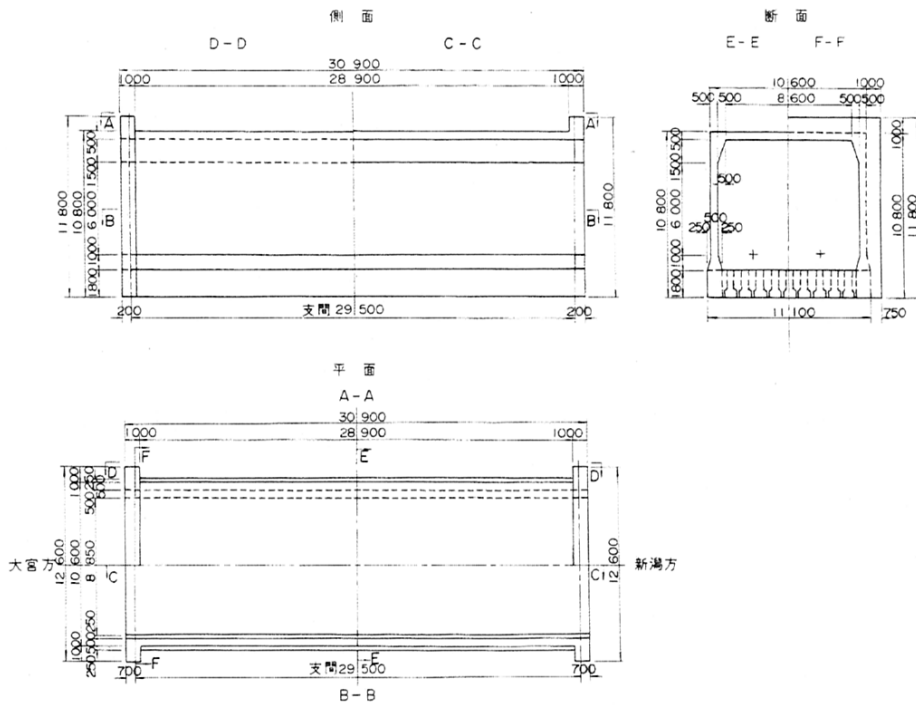


図-3.2.2 橋梁と一体となったシェルター構造 (PC 下路箱桁) 4)

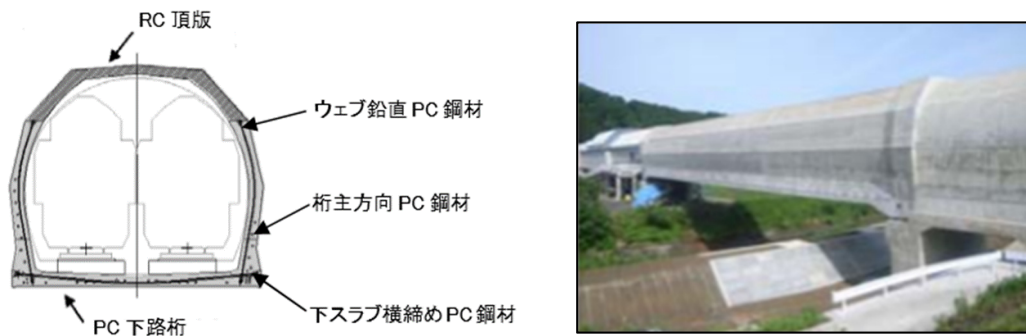


図-3.2.3 橋梁と一体となったシェルター構造 (PC 下路桁+RC シェルター) 5)

3. 3 騒音対策設備の新たな構造の検討

前節で確保すべきとした性能を考慮して、新たな騒音対策設備の構造に求められるポイントを以下の通り整理した。

- [1]ボルトレスで大単位の部材による構成
- [2]トンネル断面と段差なく連続したアーチ形状
- [3]建設コスト低減

[1]について、前章で述べた通り、中間緩衝工は鋼材で構成された骨組みに1 m×2 mの大きさを主体とした多数のPC遮音パネルをボルトで取付けた構造であることから、細かな隙間が発生しやすく列車通過時には気流音が発生し、結果として遮音性能を低下させていることを確認した。そのため、出来るだけ大きな単位のコンクリート部材により構成するとともに、部材の結合方法を見直すことで、密閉度を高め、保守に掛かる手間やコストの低減を図ることとした。

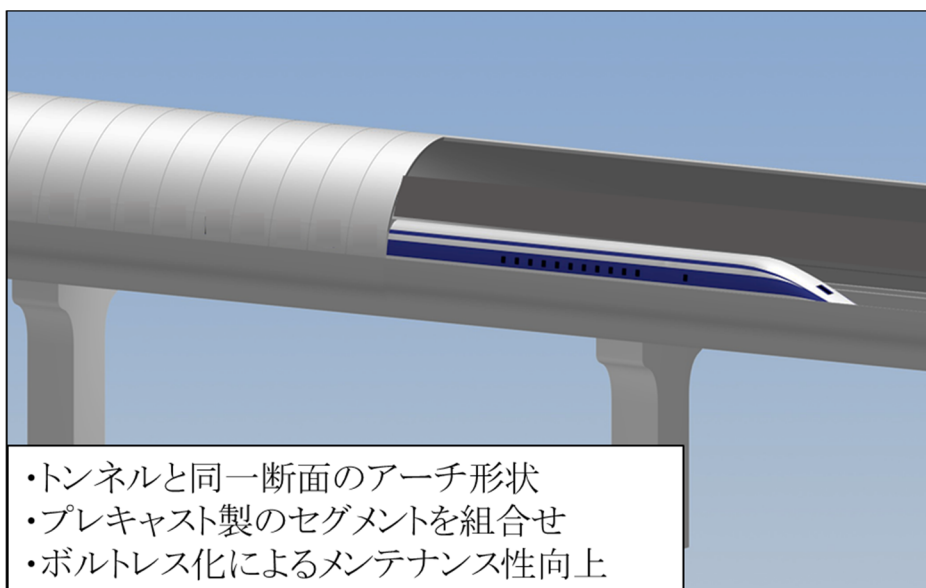
また[2]については、新たな微気圧波や空気振動の発生を抑えるため、トンネル断面と段差なく連続したアーチ形状のフード構造を採用することとした。なおこの形状は、後にトンネル緩衝工の開発にも応用されている（例えば、本田らの研究⁶⁾）。

さらに[3]については、同様の形状であるスノーシェルターの事例等⁵⁾⁷⁾⁸⁾も参考にして検討を行った。構造の案として、標準桁であるPC箱桁に構造上分離された騒音対策設備を設置する形式（以下、構造Aと称する）の他、PC下路桁を採用して屋根にあたる部分に構造上分離された騒音対策設備を設置する形式（構造B）、アーチ状の騒音対策設備を桁と一体の構造部材として利用する形式（構造C）を検討した。構造検討や建設費の比較にあたっては、騒音対策設備の厚さについて、中間緩衝工のPC遮音パネルより大きい遮音性能を有することや、鉄筋の配置や部材の連結（PC鋼線の配置等）を考慮して150 mmと設定した。その結果、表-3.3.1に示す通り、超高速鉄道の標準的な桁スパン37.8 mでは構造Aが最もコスト面で有利となるため、この構造を採用した。なお、桁長や桁下空頭の制限等によっては、構造Bや構造Cが有利となる場合もある。

以上の点を考慮し、提案する新たな騒音対策設備の概要を図-3.3.1に示す。コンクリート部材の構成としては、プレキャスト製のセグメントを組み合わせる方式と一体の現場打ちコンクリートで製作する方式が考えられるが、品質管理が確実に実施できることを考慮して、前者を採用した。そのうえで定置試験等の結果から遮音性能の確認を行い、部材厚さの検討を行った。なお、新たな構造の騒音対策設備については、騒音の低減だけではなく、雪や強風、倒木や落石といった災害から線路を防護する防災機能も発揮することから、「防音防災フード」または「フード」と称することとし、本研究においても、以降の記載においてはこの呼称を用いていく。

表-3.3.1 騒音対策設備の構造案の比較

	概要図	検討結果
構造A		<ul style="list-style-type: none"> ・騒音対策設備を死荷重と考え、桁に作用する力は分担させない ・遮音性能とフードだけに作用する荷重のみを考慮すればよく、フード厚を薄くすることが出来る
構造B		<ul style="list-style-type: none"> ・構造Aと同様であるが、下路桁を採用することで通常の場合では工事費が高価となる。 (標準桁では構造Aの1.05倍)
構造C		<ul style="list-style-type: none"> ・騒音対策設備を構造部材と考え、桁に作用する力を分担させる。 ・スパン中央部は構造Aと同一の厚さと出来るが、支点部はせん断応力に対抗することとPC鋼材の定着を考慮して厚さを増す必要があり工事費が高価となる。 (標準桁では構造Aの1.1倍)



- ・トンネルと同一断面のアーチ形状
- ・プレキャスト製のセグメントを組合せ
- ・ボルトレス化によるメンテナンス性向上

図-3.3.1 新たな騒音対策設備（防音防災フード）の概要

3. 4 騒音対策設備の新たな構造に係る遮音性能の検討

3.4.1 定置試験による遮音性能の確認

防音防災フードにおける遮音性能の確保に向けてはセグメント部材間の結合部の密着性が重要であり、

- [1]圧力変動により気流音が発生しないこと
- [2]結合部の存在により遮音性能が低下しないこと

の2点について、定置試験により確認を行った。試験体の概要を図-3.4.1.1に示す。部材厚は150 mmとして計画した。線路直角方向の部材間の結合については、継手による方法、PC鋼線により緊結する方法等が考えられるが、今回の試験では前者により計画した。後者を用いる場合には、PC鋼線の張力により前者よりもさらに密着性を高めることができると考える。なお線路直角方向の結合部においてはシール材としてシールドトンネルのセグメントと同様のゴム系成形止水材を用い、線路方向の結合部においては吸音材としてウレタンを充填し、表面のシーリング材には油粘土を用いて試験を行った。

[1]の試験はまず、圧力変動発生装置で再現した列車通過時の瞬間的な空気圧の変動（大気圧の約0.06～0.07倍²⁾の荷重：単列車の場合）をエアチューブ及び治具（コンクリート板と鋼材、シール材で構成）を介して試験体に負荷させ、漏れが予想される箇所に洗剤を付けて状況を見つつ、気流音が発生しないか人間の耳や騒音計（RION,NL-05）により確認した。試験の状況を図-3.4.1.2に示す。その結果、線路方向、線路直角方向のそれぞれの結合部において気流音は検知できなかった。また、同程度の荷重をコンプレッサーや真空ポンプにより1分間継続して負荷した場合にも、気流音は検知できず、シーリング材やブッシュグリップ等により密着性が確保されていることを確認できた。

[2]については、ISO15186-1（試験当時：現在はその内容をベースとしてJIS-A-1441-1が策定されている）に準じてインテンシティ音響透過損失を計測した。具体的には図-3.4.1.3に示すとおり、音源室と受音室（反射音の影響を低減するため、吸音材を設置）を隔てる試験体取付け用開口部に試験体を取り付け、音源室で12面体スピーカからノイズを発生させ、音源室内の5つのマイクロホンで平均音圧レベル L_{pl} を計測するとともに、受音室でインテンシティプローブ（RION,SI-34）及びインテンシティメータ（RION,SI-50）を用いて音響インテンシティ L_{in} の計測を行い、拡散音場を仮定して式3.4.1.1を用いてインテンシティ音響透過損失 RI を算出した。⁹⁾

$$RI = L_{pl} - L_{in} - 6 \quad 3.4.1.1$$

なお、比較のため結合部のない一般的なRC壁（厚さ150 mm）についても計測を行った。結果を図-3.4.1.4に示す。線路方向、線路直角方向のどちらの結合部も、質量則を概ね上回っており、一般的なRC壁に対して遮音性能の著しい低下は見られなかった。

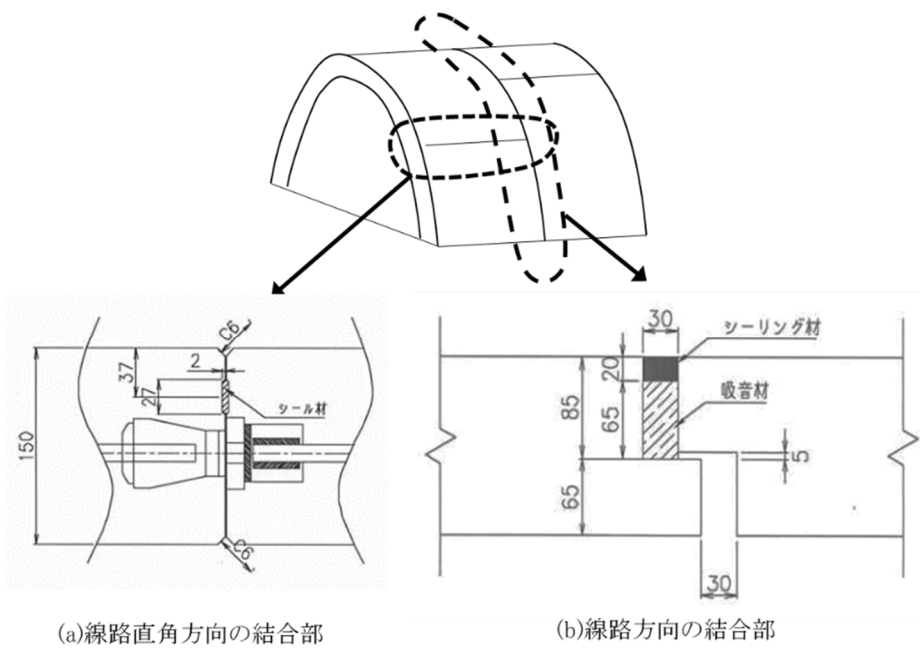


図-3.4.1.1 定置試験に用いた試験体の概要

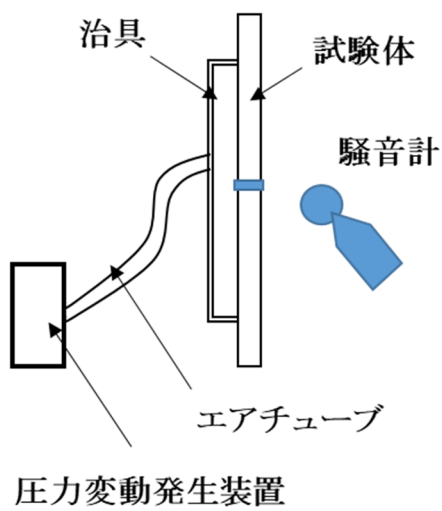


図-3.4.1.2 気流音に関する定置試験の状況

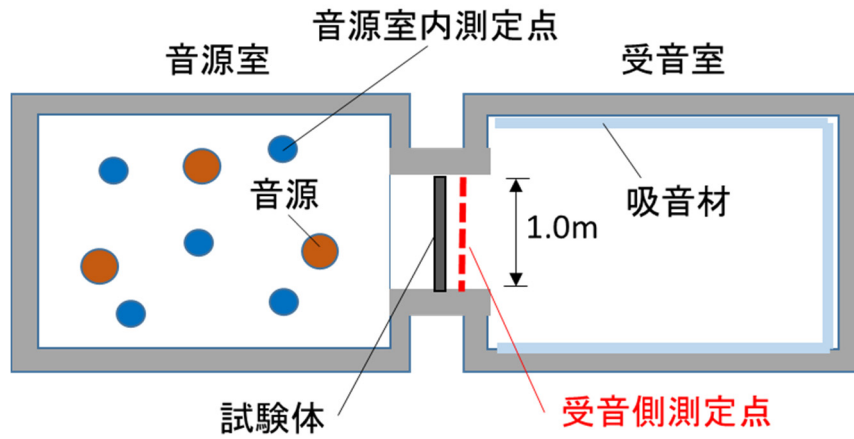


図-3.4.1.3 インテンシティ音響透過損失の測定状況

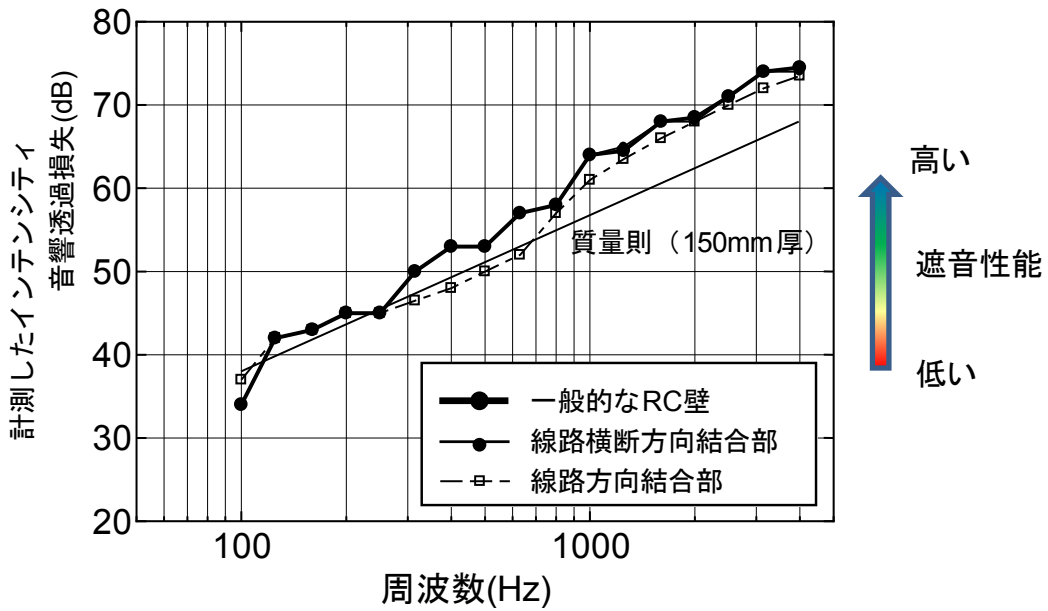


図-3.4.1.4 インテンシティ音響透過損失の測定結果

3.4.2 営業線における騒音レベルの予測

定置試験の結果、セグメント部材間の結合部の密着性が十分であると確認されたことから、フード全体を単一のRC壁と想定し、遮音性能の点から必要な部材厚について検討した。具体的には、部材厚 150 mm, 100 mm, 70 mm の場合における 500 km/h 走行時の評価点における騒音レベルについて、以下の手順により検討を進めた([1]から[4]の手順を図-3.4.2.1に示す)。

- [1]フード内の音圧レベルは中間緩衝工と同一と想定し、4 両編成車両の中間緩衝工壁面付近における測定結果から 3 dB を差し引き、フード内の平均音圧レベルを求める。
- [2]フード壁面に入射する音響インテンシティ(式 3.4.1.1 に基づいてフード内の平均音圧レベルから 6 dB 差引いた値) から各部材厚におけるインテンシティ音響透過損失を差し引いて、フード表面から外に放射する音響インテンシティを求める。
- [3]フード表面を 1 m×1 m のメッシュに区分のうえ点音源を配置し、放射される音響インテンシティとメッシュの面積から、各音源の音響パワーレベルを算出する。
- [4]各音源の音響パワーレベルをもとに回折減衰と距離減衰を考慮し、評価点 (25 m 点) における 1/3 オクターブバンドレベル毎の透過音の音圧レベルを求める。
(算定方法の詳細は第 7 章に示す¹⁰⁾.)
- [5]列車走行時における構造物の振動加速度の実測値をもとに、桁側面及び裏面の表面積と距離減衰を考慮して、評価点 (25 m 点) における 1/3 オクターブバンドレベル毎の構造物音の音圧レベル(図-3.4.2.2)を予測し、[4]の結果と足し合わせる。さらにこれを式 2.2.3.1 により全ての周波数について足し合わせ、評価点の騒音レベルを求める。

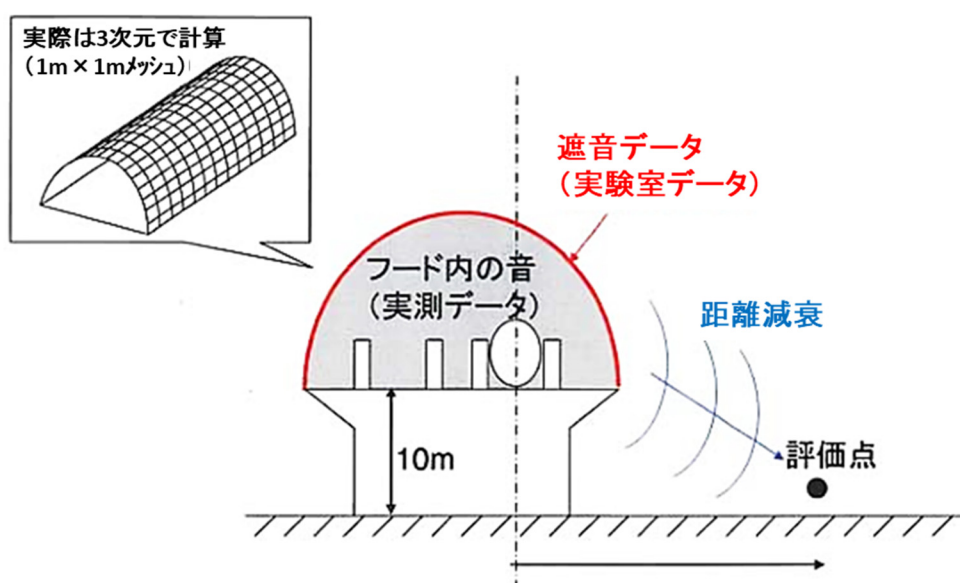


図-3.4.2.1 営業線のフード区間における騒音レベルの予測手順

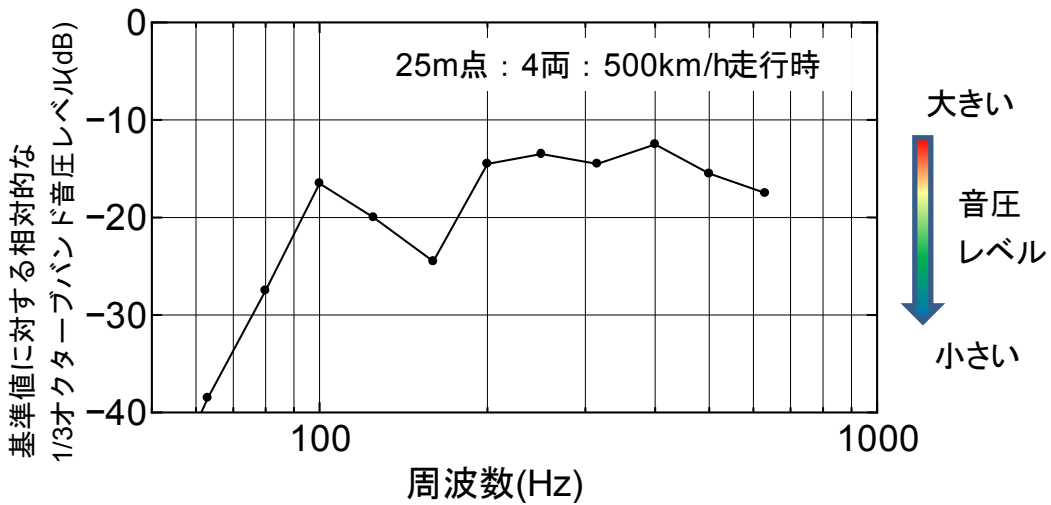


図-3.4.2.2 計算に使用した 1/3 オクターブバンド毎の構造物音の音圧レベル

計算に用いるインテンシティ音響透過損失については、各部材厚毎に図-3.4.2.3の通り設定した。150 mm の値については、前節の定置試験で計測した結果を用いた。70 mm の値については、中間緩衝工で使用していた PC 遮音パネルのカタログ値¹¹⁾を用いた。このうち、250 Hz を中心とした周波数で遮音性能が低下しているのはコインシデンス効果（剛性材料にある周波数の音波が入射すると、その材料の屈曲振動と入射音波の振動とが一致し、一種の共振状態を起こすこと：質量則に従う場合の周波数毎の透過損失に対し、最大約 10 dB 低下している）によるものと考えられる。100 mm の値についても当該厚さのカタログ値¹¹⁾を参考に、質量則に従う場合の周波数毎の透過損失に対し、コインシデンス効果により最大約 5 dB 低下すると想定して設定した。

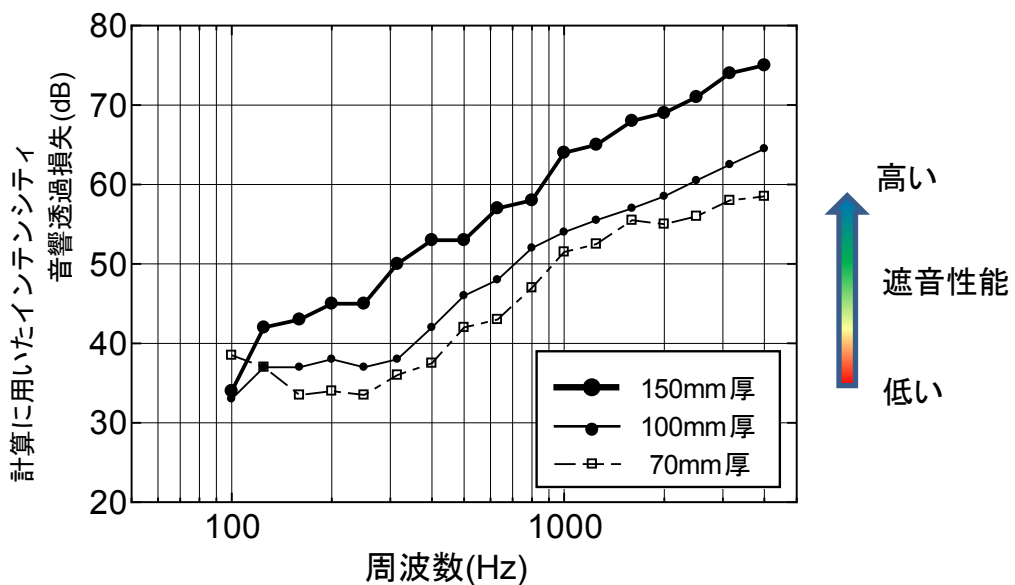


図-3.4.2.3 計算に使用したインテンシティ音響損失

計算結果を図-3.4.2.4に示す。4両編成車両の場合で、150 mm、100 mm、70 mmのいずれの厚さのフードにおいても環境保全の目標値を5dB程度下回ると予測された¹²⁾。厚さが厚くなるに従って低減幅が小さくなっているのは、透過音の低減に伴って構造物音の影響が大きくなっているためと考えられる。しかしながら、気流音が全く発生しない、構造物音が変わらない、などの前提条件を置いて予測をしていることから、実用化に向けては、防音防災フードを実際に製作して走行試験で性能を検証することが不可欠であり、次章において山梨実験線の間接緩衝工を防音防災フードに変更して走行試験を実施することとした。

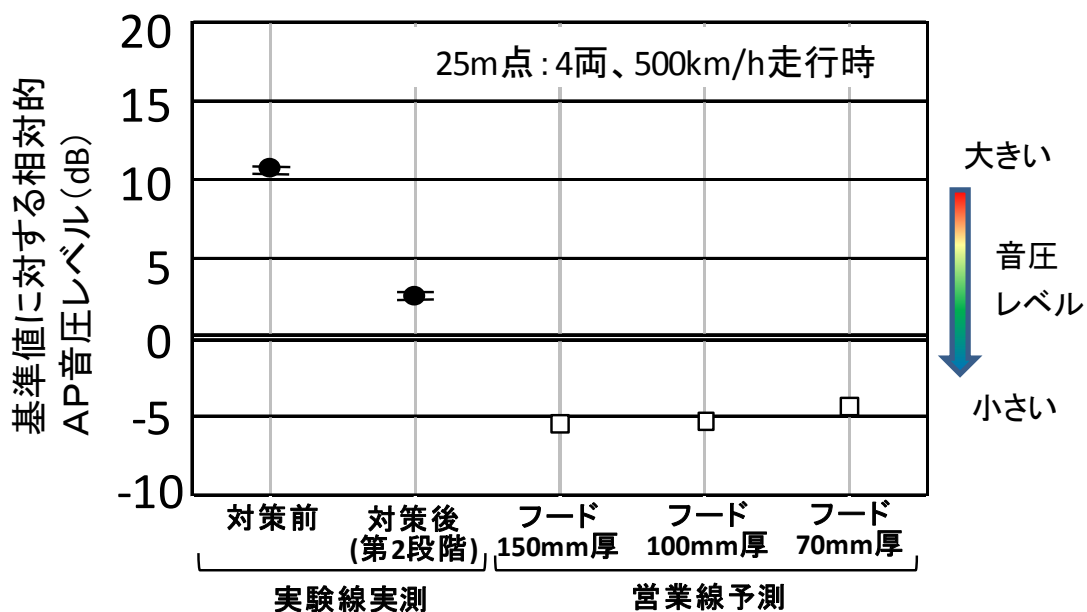


図-3.4.2.4 営業線のフード区間における騒音レベルの予測結果

3. 5 まとめ

本章においては、超高速走行に伴う気流音を抑制するとともに、列車通過時の圧力変動荷重や建設や保守の容易性も考慮した騒音対策設備の構造を検討した。その結果、できるだけ大きな単位のコンクリート部材により構成するとともに、部材の結合方法を見直すことで密閉度を高めたセグメント構造によるフードを提案した。そのうえで、定置試験で気密性や遮音性を確認し、その結果から営業線における騒音レベルの予測を行った。以下に、本章で得られた知見をまとめる。

- (1) 標準桁である PC 箱桁に構造上分離されたフードを設置する形式が、コスト面等で最も有利であり、品質確保も考慮しセグメントを組合せた形状のフードを提案した。
- (2) セグメント構造によるフードを模擬した試験体に圧力変動荷重を試験的に作用させた結果、結合部において気流音は発生しない。
- (3) フードを模擬した試験体を用いてインテンシティ音響透過損失を計測した結果、同じ 150 mm の厚さを持つ一般的な RC 壁に対して遮音性能の著しい低下は見られない。
- (4) 列車走行時の中間緩衝工内の音圧レベルとインテンシティ音響透過損失の計測結果等から、営業線を想定した場合の騒音レベルをフード部材厚毎に予測した結果、150 mm、100 mm、70 mm のいずれの場合も環境保全の目標値を下回ると予測される。

しかしながら、気流音が全く発生しない、構造物音が変化しない、などの前提条件を置いて予測をしていることから、実用化に向けては、防音防災フードを実際に製作して走行試験で性能を検証することが不可欠であり、次章では山梨実験線において既存の中間緩衝工を防音防災フードに変更して試験を実施し、効果を検証していく。

参考文献

- 1) 国土交通省 超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価委員会：超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価，2005.
- 2) 山崎幹男，加藤覚，若原敏裕，岡崎真人，上野眞，藤野陽三：超高速鉄道トンネル内の圧力変動に対する覆工構造の設計，土木学会論文集，No.752/I-66，pp.119-131，2004.1.
- 3) 山崎幹男，若原敏裕，永長隆昭，上野眞，藤野陽三：超高速鉄道トンネル内に生じる圧力変動評価，土木学会論文集，No.738/I-64，pp.171-189，2003.7.
- 4) 日本鉄道建設公団 新潟新幹線建設局：上越新幹線工事誌（水上・新潟間），1983.3.
- 5) 阿部雅史，水谷哲也：PC スノーシェルター桁の設計とたわみ評価，プレストレストコンクリート工学会 第 23 回シンポジウム論文集，pp.523-526，2014.10.
- 6) 本田敦，高橋和也，野澤剛二郎，土肥哲也，小川隆申，飯田雅宣，藤野陽三：超高速鉄道トンネルにおける微気圧波の評価および緩衝工の提案，土木学会論文集 A1，Vol.71，

No.3, pp.327-340, 2015.9.

- 7) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 建設本部東京支社：北陸新幹線工事誌（長野・糸魚川間），2017.3.
- 8) 西村哲男，江田均，小関憲一，水城康男：プレキャスト局面ユニットによるコンクリート製スノーシェルターの設計と施工，コンクリート工学，Vol.26, No.8, pp.30-37, 1988.8.
- 9) 日本音響学会編：音響工学講座 騒音・振動（上），コロナ社，1978.3.
- 10) 永長隆昭，荻田倫之，大森洋志，野澤剛二郎，土肥哲也，長倉清，藤野陽三：超高速鉄道の騒音対策設備に係る構造物音の低減及び騒音予測手法の開発，土木学会論文集 A1, Vol.74, No.1, pp.89-108, 2018.1.
- 11) 日本スパンクリート協会：スパンクリート 壁 技術資料，2014.1.
- 12) 永長隆昭，久保淳一郎，土肥哲也，野澤剛二郎，長倉清，藤野陽三：超高速鉄道の騒音対策設備の開発，土木学会論文集 A1, 73(2), pp.399-412, 2017.6.

第4章 試験用フード構造物による検討

4.1 はじめに

前章で提案したフード構造について、その効果を検証するため山梨実験線において既存の中間緩衝工を試験用の防音防災フードに変更して走行試験等により性能を検証する。まずは走行試験を実施し、フード内や評価点における騒音レベルを計測した他、スピーカ試験を実施して、遮音性能の観点から分析を行い、列車走行に伴う気流音の抑制に関してどの程度の効果を上げているか、検証する。

4. 2 試験用フード構造物の概要

前章の検討結果を反映して設置した試験用フードの概要を図-4.2.1に示す。さらに検討を進めた点は以下の通りである。

- [1]セグメントはスノーシェルターの事例等¹⁾も参考にして線路直角方向に断面を2分割し、PC鋼線で部材間及び部材と桁を結合する構造とした。また線路方向のセグメントの幅は1.8mとした。
- [2]フードはセグメントの端部に円周方向(線路直角方向)のリブを設けてその部分にPC鋼線(列車走行時の圧力変動荷重²⁾を負担)を配置し、円周方向に緊張する構造として、中央部は厚さを薄くした。最低厚さは前章の定置試験結果の他、鉄筋の配置等も考慮して100mmとした。リブ部分の厚さは300mmである。また、線路方向に隣り合うセグメントの隙間にはモルタルを充填した。
- [3]試験用の窓や、供試体を取付けることが可能な開口部を設置した。なお計画にあたっては、窓を模擬した試験体を図-4.2.2のとおり作成して前章と同様の遮音試験を実施し(写真-4.2.1)、適切にシールを行えば図-4.2.3のように100Hz(面材自体や面材-空気層-面材の共振系による共鳴と考えられる)や3kHz以上(固定治具やその周辺からの音の漏洩と考えられる)の周波数で遮音性能の低下が見られるものの、全体的な遮音性能に与える影響は小さいことを確認した。なお、開口部についても面積が小さく、評価点から見通

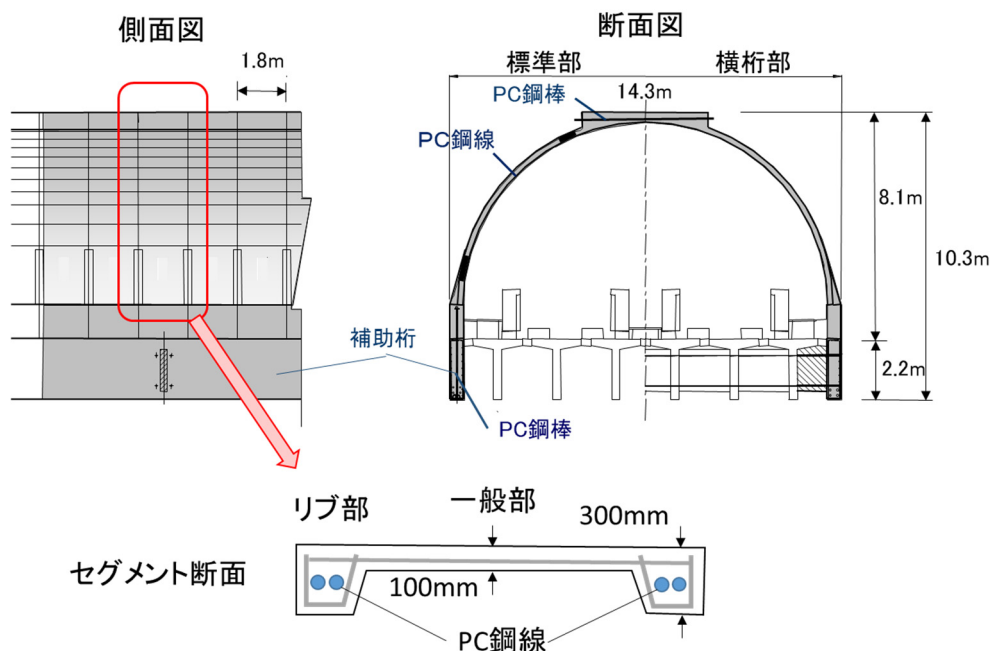


図-4.2.1 試験用フードの概要

せない頂部付近に設置するとともに、鉄板で閉塞するため、全体的な騒音レベルへの影響は小さいものと判断した。

[4]桁と桁の間、桁とトンネルの間は、厚さ 10 mm のクロロプレンゴムで塞いだ。

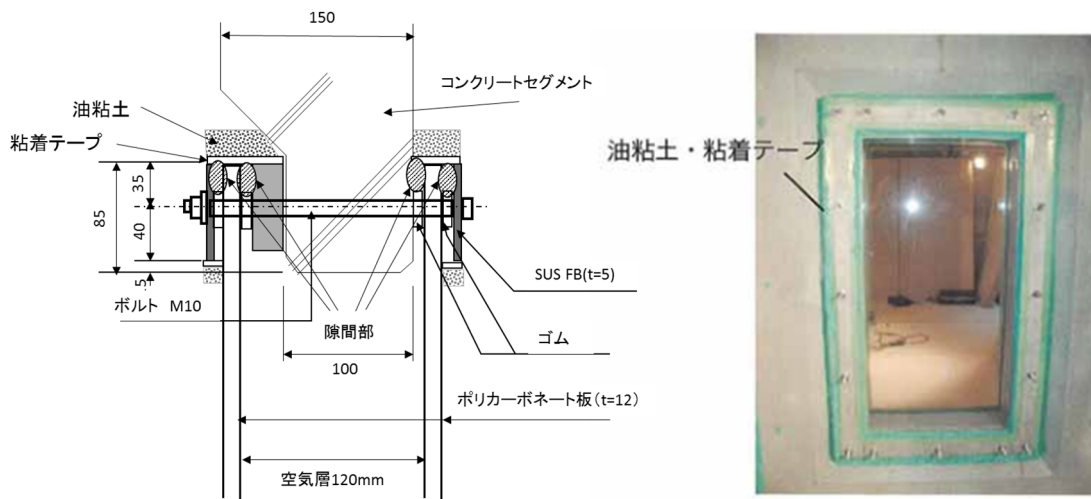


図-4.2.2 窓に関する試験体の構造

写真-4.2.1 窓に関する遮音試験の状況

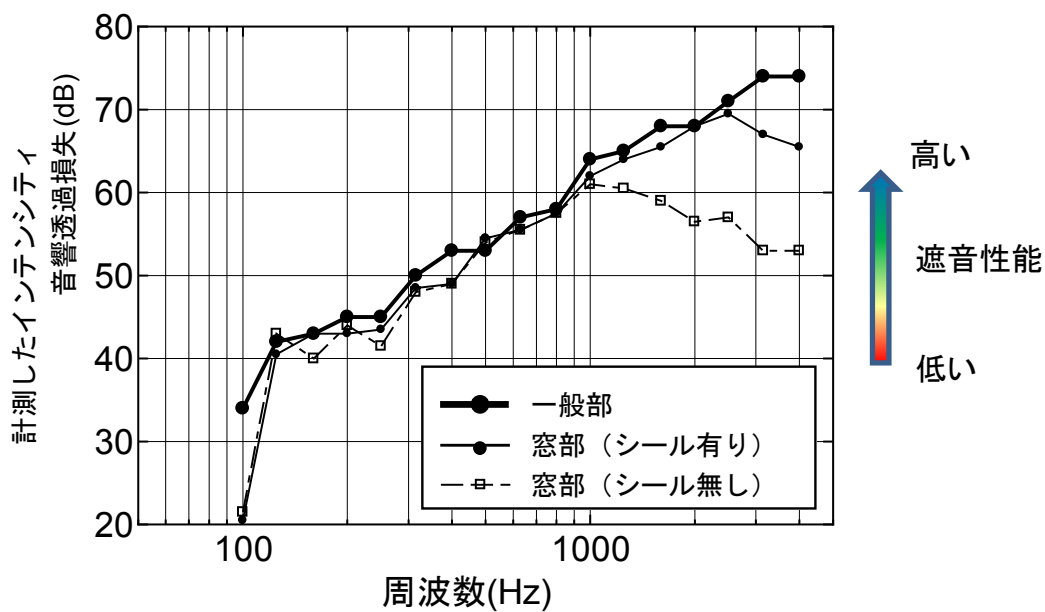


図-4.2.3 窓に関するインテンシティ音響透過損失の測定結果

4. 3 山梨実験線への設置

山梨実験線での試験用フードの設置は，工事实施のため確保可能な走行試験の休止期間等を考慮し，A橋梁よりも全長の短いB橋梁において実施することとした．B橋梁は図-4.3.1に示す通り，スパン 30.6 m の PCT 桁 2 連により構成されている．なお中間緩衝工と比べて部材厚の増加（70→100 mm，リブ部分は 300 mm）に伴い死荷重が増加することから，桁の補強（補助桁の追加）を行った．写真-4.3.1 に設置した試験用フードの状況を示す．

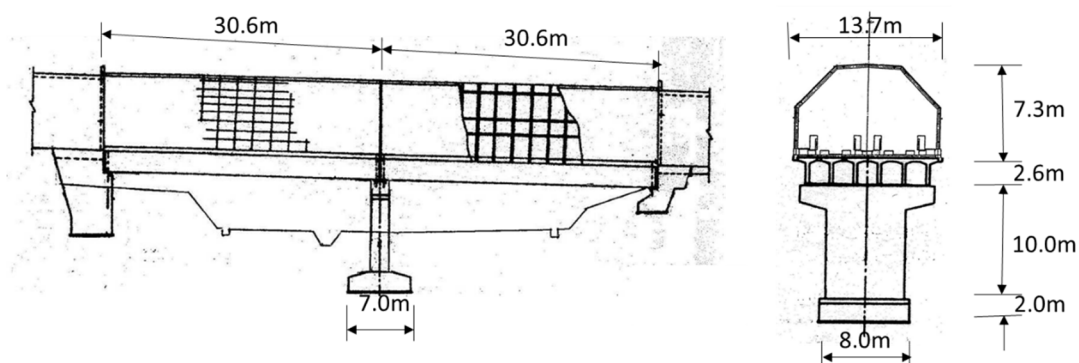


図-4.3.1 B橋梁の概要



写真-4.3.1 試験用フードの設置状況

4. 4 走行試験による検証

4.4.1 現地計測概要

試験用フードに係る測定位置を図-4.4.1.1に示す。中間緩衝工において実施した測定と同様に、フード内壁、フード外近傍、軌道中心から25m及び50mの点を測定点として設定した。測定には普通騒音計(RION,NL05)を使用し、フード内では中間緩衝工と同様の理由から風圧計(SSK,P325W200S)を用いた。また、フード壁面の遮音性能を評価するため、スピーカ試験も実施して、フード内外における騒音の他、フード表面から約30cm離れた点に音響インテンシティプローブ(マイクロホン)及び音響インテンシティメータ(RION,SI38&SI50)を設置し、音響インテンシティを測定した。音響インテンシティの測定はフード内が拡散音場に近いことを確認したうえで、JIS A 1441-1に準じた方法で実施した。走行試験車両は4両編成を用いた。

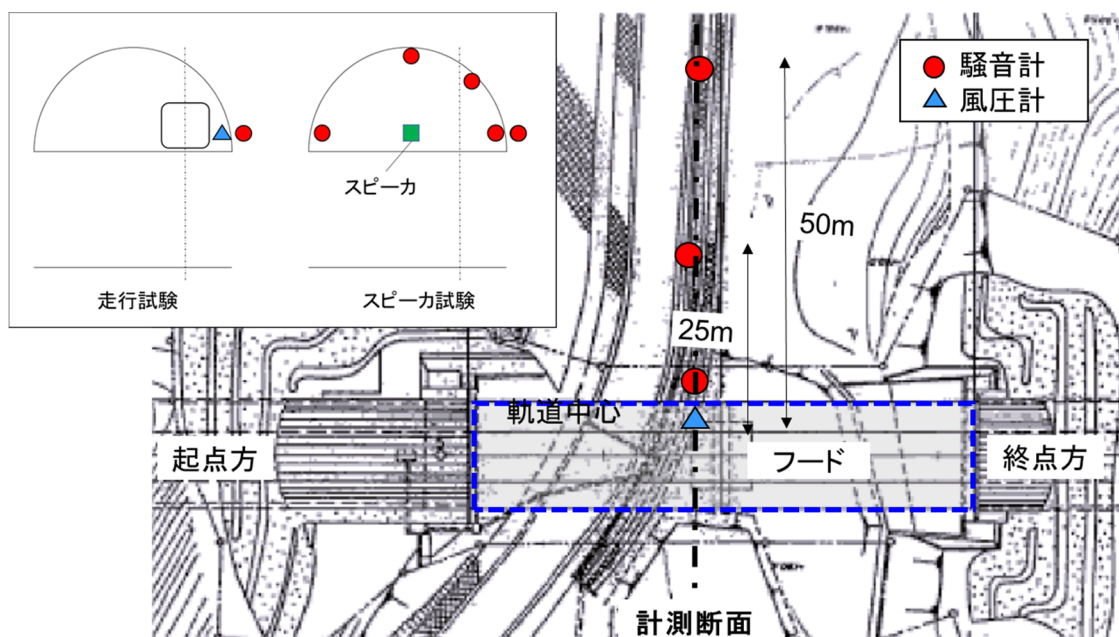


図-4.4.1.1 試験用フードの測定位置

4.4.2 現地計測結果

フード内及び25 m点における1/3オクターブバンドA特性音圧レベルを、列車速度別に整理した結果を図-4.4.2.1、図-4.4.2.2に示す。フード内における主要な周波数帯域は250 Hz～1.25 kHzであり、中間緩衝工の場合と比べてやや低周波数側に移行していることが確認されたが、走行速度が速くなるにつれて、ほぼ全ての周波数帯域で走行音が大きくなっていく傾向は中間緩衝工の場合と同様である。走行音のレベルは、既存新幹線と同様に³⁾、概ね速度の6乗則に従っている。一方25 m点における主要な周波数帯域は100～400 Hzであり、500 Hz以上の成分の寄与が小さくなっていることが確認された。また、中間緩衝工

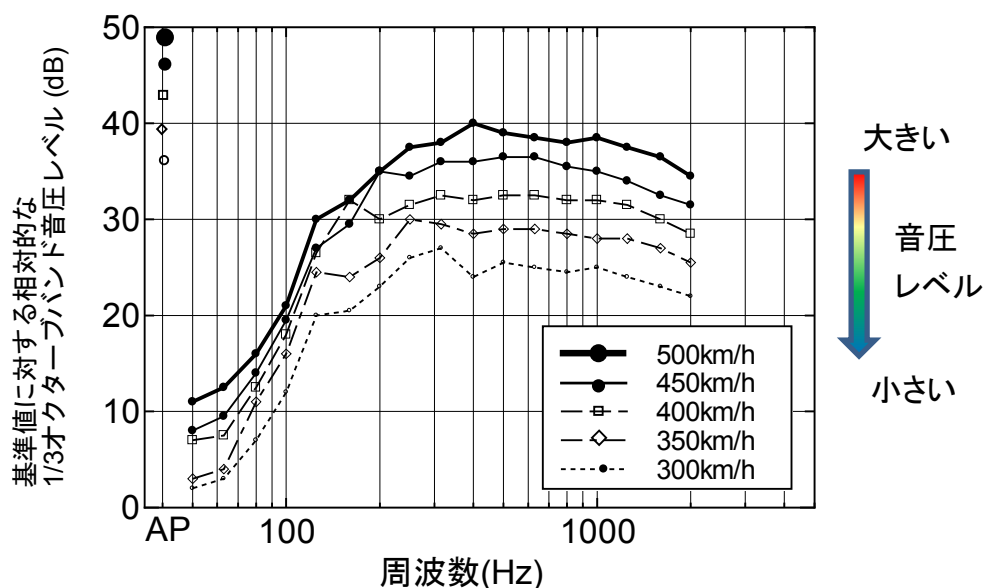


図-4.4.2.1 各速度におけるフード内の1/3オクターブバンド音圧レベル

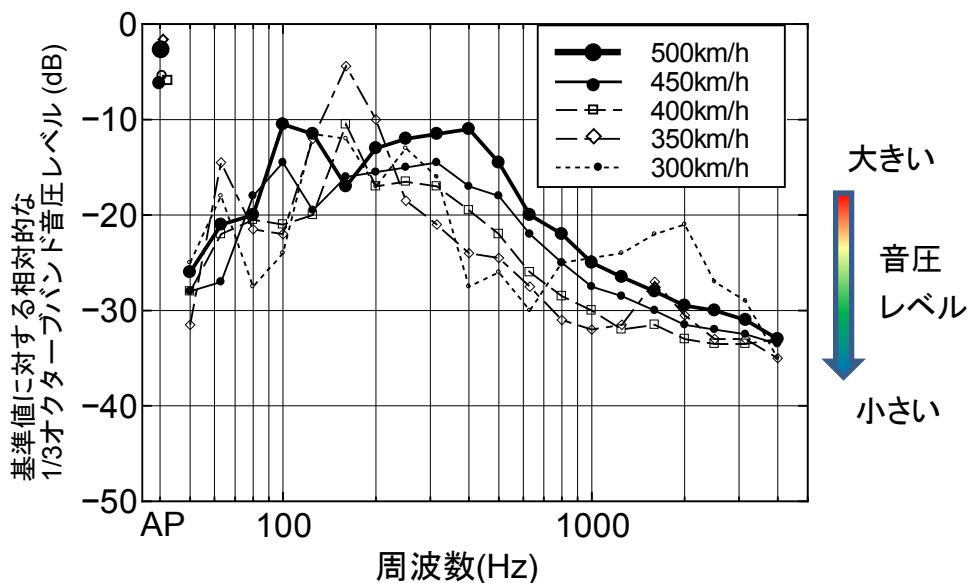


図-4.4.2.2 各速度における25m点の1/3オクターブバンド音圧レベル

の場合と異なり、列車速度と走行音の大きさの関連は不明確で、ピークの周波数も速度により異なっていることがわかった。これは後述のとおり、透過音の影響が低減し構造物音が卓越するようになったためと考えられる。

中間緩衝工のフード化による効果を検証するためには、本来であれば同じ位置におけるフード化前後の測定値を直接比較することが望ましいが、B橋梁付近には試験用フード設置前まで別の試験を実施するための施設を設置しており、比較可能な条件でのデータは取得することができなかった。そのため、参考としてA橋梁で測定した対策前の中間緩衝工のデータとB橋梁の防音防災フードのデータを比較することとし、結果を図-4.4.2.3に示す。気流音の主要な周波数帯域を含む500 Hz～4 kHzのレベルに大幅に差がある一方、400 Hz以下の走行音のレベル差は10 dB以下にとどまっている。特に、100 Hz付近における差が小さくなっている。

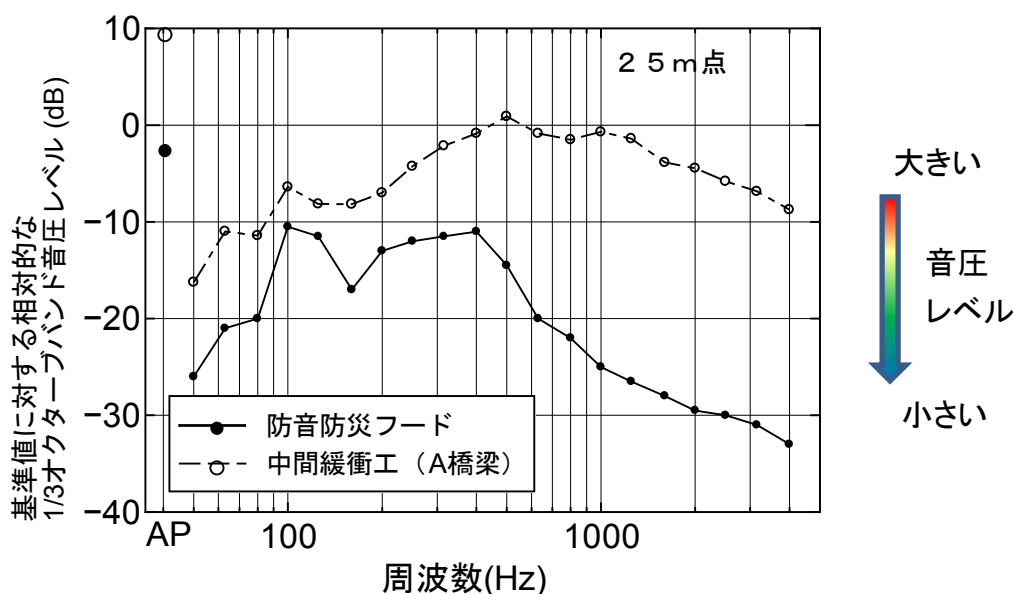


図-4.4.2.3 中間緩衝工と防音防災フードの1/3オクターブバンド音圧レベルの違い

さらに、フードの遮音性能の観点から検討を加える。走行試験（速度500 km/h）とスピーカ試験の結果から、中間緩衝工と同様に算出したフードの遮音性能（内外音圧レベル差）を図-4.4.2.4に示す。500 Hz以上の周波数では内外音圧レベル差がほとんど変わらず、中間緩衝工で確認された気流音の影響がないことが確認された一方、100 Hz及び200～315 Hzにおいては列車走行時の内外音圧レベル差が小さくなっており、構造物音の影響を受けている可能性があるとして推測される。しかも、防音防災フードは桁にPC鋼線で緊結されており、橋桁の振動がフードに伝わって構造物音を発生させていることも考えられる。そのため、道路の高架橋における事例⁴⁾も参考にして列車走行時における橋桁及びフード（計測断面）の振動加速度の測定を実施し、内外音圧レベル差との関係を調べることにした。測定位置及び測定結果を図-4.4.2.5に示す（グラフは500 km/hで走行する際の橋桁裏面におけるAP振

動レベルを基準 (0 dB) として表示). フードの頂部を除き, 100 Hz や 200~315 Hz を中心とした周波数にピークがあり, 透過損失が低下している部分と概ね一致するため, これらが構造物音に起因するものであることが確認された. また振動加速度は, 概ね橋桁の各部よりフードの各部の方が大きくなっている. 評価点 (25 m 点) から見た音源の面積も考慮すると, 観測される騒音レベルに対してフードの振動に起因する構造物音が大きく影響していると推測される. 営業線に向けては, 走行試験による計測結果に基づいてフードの構造物音に関わる研究を進め, 騒音対策設備の性能向上に反映させていくとともに, フード構造物音も考慮した適切な騒音予測手法の確立を図ることが求められる.

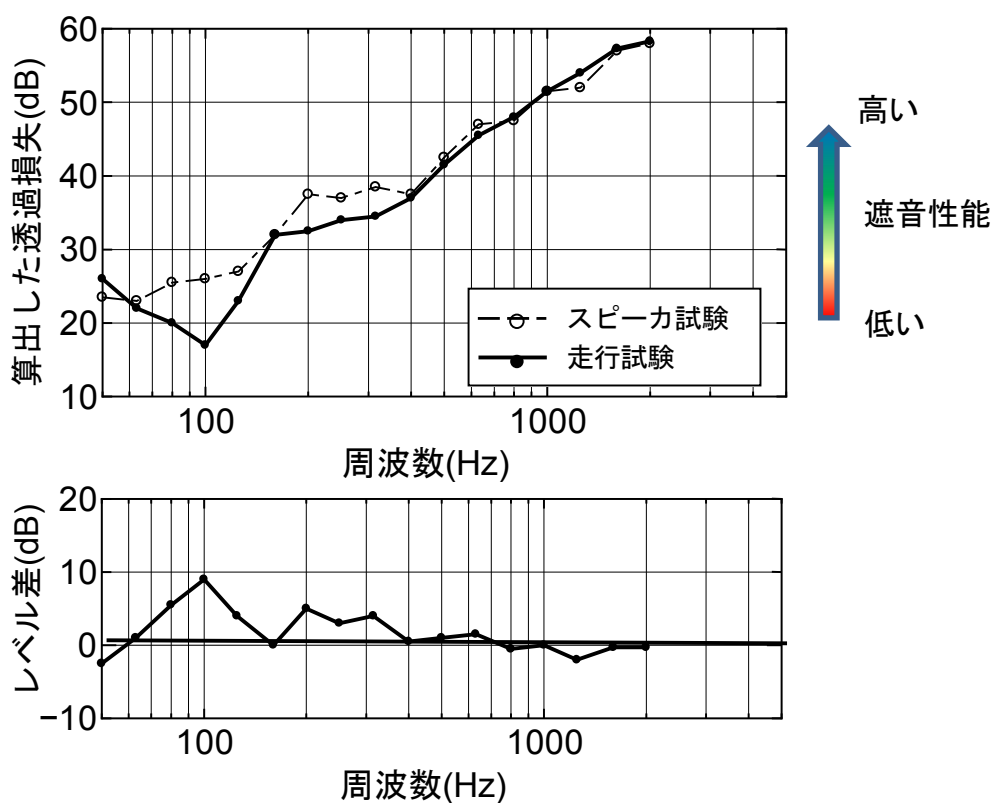


図-4.4.2.4 防音防災フードの遮音性能 (透過損失)

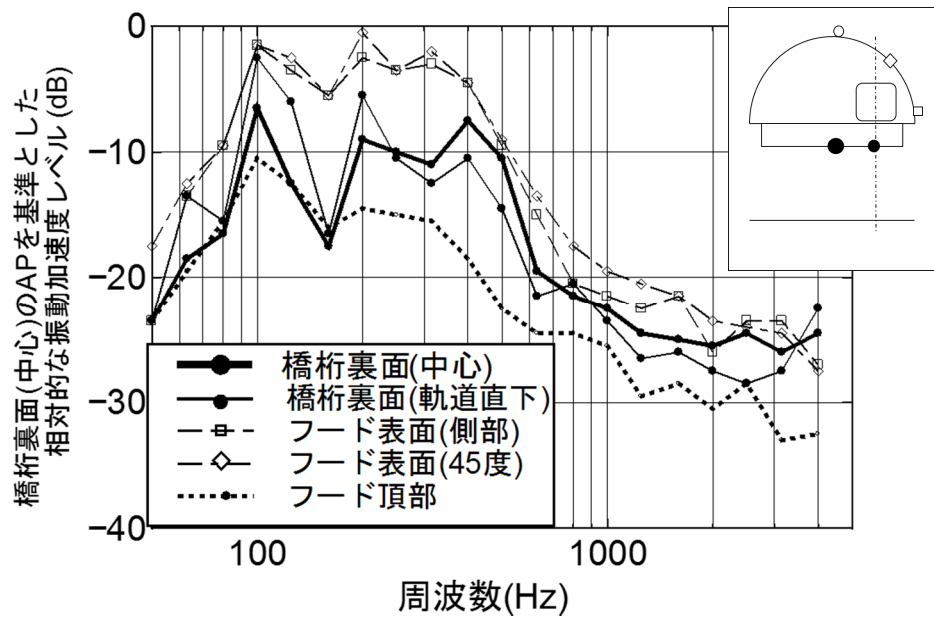


図-4.4.2.5 橋桁及びフードの振動の測定位置及び測定結果

4.4.3 環境保全の目標値との比較

25 m 点における AP の騒音レベル測定結果及びこれに基づいて換算した営業線での 16 両編成車両の騒音レベルを図-4.4.3.1 に示す。なお 4 両編成車両の測定結果から 16 両編成車両の換算を行う手順については、第 7 章で後述する⁵⁾。本研究により開発された防音防災フードであれば、500 km/h 走行時において、環境保全の目標値（新幹線鉄道騒音の環境基準）を達成可能であることが確認された⁶⁾。なお、A 橋梁が全長 61.2 m と短いことの影響や、トンネル坑口部法面における反射の影響については、音響模型試験等を行って騒音レベルへの影響が小さいことを確認したため、特段の補正は実施しなかった。実測の結果は図-3.4.2.4 に示す予測値と比較してやや大きくなっているが、これはフードの振動に起因する構造物音等が影響していると考えられ、前述の通り、今後の重要な研究課題である。

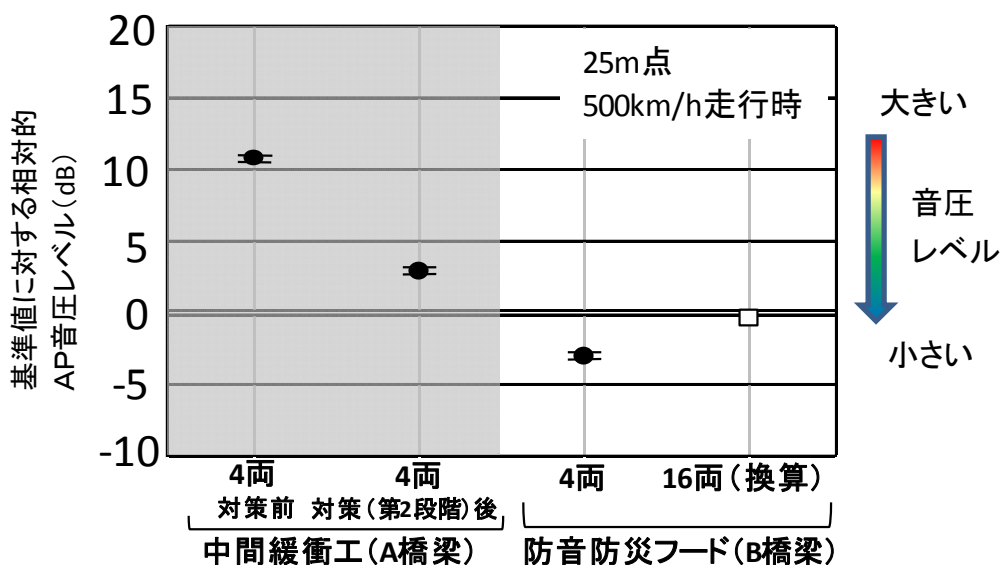


図-4.4.3.1 実測結果と環境保全の目標値との比較

4. 5 まとめ

本章においては、提案した新たなフード構造物を既存の中間緩衝工に代えて山梨実験線の橋梁に設置し、走行試験を実施して、フード内や評価点における騒音レベルを計測した。また、スピーカ試験を実施してフード内外の音圧レベル差を計測し、走行試験時と比較を行って、遮音性能の観点から分析を行った。以下に、本章で得られた知見をまとめる。

- (1) フードの場合の評価点における騒音は、中間緩衝工と比較して、気流音の主要な周波数帯域であった 500 Hz～4 kHz で大幅に低減しているが、400 Hz 以下の低減幅は小さくなっている。
- (2) フードの遮音性能を走行試験とスピーカ試験の結果から算定した結果、500Hz 以上の周波数では内外音圧レベル差がほとんど変わらない一方、100 Hz 及び 200～315 Hz において列車走行時の内外音圧レベル差が小さくなっている。
- (3) 桁やフードの振動を測定した結果、上記の周波数において振動が卓越しており、透過損失の低下は構造物音に起因するものである。特に、フードの振動が桁よりも大きく、フードの発生する構造物音が大きく影響していると推測される。
- (4) 編成車両長の影響を換算し、フードを設置した場合の 16 両編成車両による 500 km/h 走行時の評価点（軌道中心から 25 m, 地上 1.2 m）における騒音レベルを算定した結果、環境保全の目標値を達成可能であると予測される。

このうち、フードの発生する構造物音についてはこれまでの騒音対策設備において予測や対策に関する研究があまり進められていない事柄であり、超高速鉄道に特有な事象である。そのため、更なる騒音レベルの低減に向けてはこれらに関する研究を進めることが不可欠であり、次章において走行試験における計測結果の分析等を進めていく。

参考文献

- 1) 西村哲男, 江田均, 小関憲一, 水城康男: プレキャスト局面ユニットによるコンクリート製スノーシェルターの設計と施工, コンクリート工学, Vol.26, No.8, pp.30-37, 1988.8.
- 2) 山崎幹男, 加藤覚, 若原敏裕, 岡崎真人, 上野眞, 藤野陽三: 超高速鉄道トンネル内の圧力変動に対する覆工構造の設計, 土木学会論文集, No.752/I-66, pp.119-131, 2004.1.
- 3) 森藤良夫: 新幹線車両の空力騒音, 騒音制御, Vol.14, No.5, pp.13-16, 1990.
- 4) 五郎丸英博, 白石捷夫, 原公, 小森武: 中小支間道路橋における低周波空気振動の放射音圧レベルとスペクトルの推定, 土木学会論文集, 第 403 号, VI-10, pp.137-145, 1989.3.
- 5) 永長隆昭, 萩田倫之, 大森洋志, 野澤剛二郎, 土肥哲也, 長倉清, 藤野陽三: 超高速鉄道の騒音対策設備に係る構造物音の低減及び騒音予測手法の開発, 土木学会論文集 A1, 74(1), pp.89-108, 2018.1.
- 6) 永長隆昭, 久保淳一郎, 土肥哲也, 野澤剛二郎, 長倉清, 藤野陽三: 超高速鉄道の騒音対策設備の開発, 土木学会論文集 A1, 73(2), pp.399-412, 2017.6.

第5章 フードの振動に関する現象解明

5. 1 はじめに

前章においては、提案した新たなフード構造物を山梨実験線に設置し、走行試験等を実施して効果を検証した結果、中間緩衝工と比較して騒音レベルが大幅に低減し、環境保全の目標値を達成可能であると予測されたが、一方でフード自体の振動に伴って発生する構造物音の影響が大きいと推測された。

さらなる騒音レベルの低減に向けてはフードの発生する構造物音に関わる研究を進めることが不可欠であるため、本章ではまず列車が超高速で走行する際に、フードや桁の振動が各部でどのように観測されるかを走行試験により調査する。また、スピーカ試験、加振機試験による測定を行って、フードで観測される振動について、フード内から外部へ透過する音に起因して発生する成分と列車から桁を経由して伝達する成分の分離を図り、周波数毎の分析結果から列車走行に伴う振動の発生や伝達の状況について考察を行う。そのうえで、有限要素法によるモデルを構築して数値解析を実施し、これらの現象を再現するとともに、構造物の条件を変更させた場合の影響検討を可能とするモデルを構築する。

5. 2 走行試験結果等に基づくフード振動の影響把握

5.2.1 現地計測概要

本節では軌道における振動の発生，及び桁，フードでの伝達過程について実測データより把握するため，実験線でフードを設置した B 橋梁において測定を実施した．橋梁及びフードの概要は，それぞれ図-4.3.1 及び図-4.2.1 に示すとおりである．測定は以下の 3 つの方法で行った．

- a) 列車走行時に発生する振動の伝達状況を把握するため，桁及びフードの各点で振動加速度レベルを測定した．（走行試験）
- b) フード内にスピーカを設置し，列車がない条件で桁やフードの各点における振動加速度レベルを測定した．（スピーカ試験）
- c) 加振機で桁上面の走行路（車輪で走行する際の軌道に相当する部分）を加振し，桁やフードの各点における振動加速度レベルを測定した．（加振機試験）

列車走行時にフードにおいて観測される振動には，図-5.2.1.1 に示すとおり，

- ・列車の通過に伴いフード内に発生する音がフードを透過する際に発生させる振動
- ・列車荷重により桁が加振されて発生し，フードに伝達する振動

の 2 つが混在していると考えられ，それぞれの振動を分離することが，特性を把握するために重要である．スピーカ試験では音源から構造物に直接伝達する振動が少ないため前者のみを再現することが出来る一方，加振機試験では音の発生が少なく後者のみを再現することが出来る．そのため，これらの試験を組み合わせることで，伝達過程の違う振動の分離を図ることが可能になると考えた．なお加振位置が列車走行時に荷重が作用する側壁の位置と異なるが，T 桁間の同一のスラブ内であり，振動の分布や構造物音の発生状況を把握するうえで影響は小さいと判断した．こうした考え方や後述する式に基づいて音源の分離を図り，各音源の音圧レベルを推定することの妥当性については，第 7 章で詳述する騒音予測手法の構築にあたり，検証を行っている．

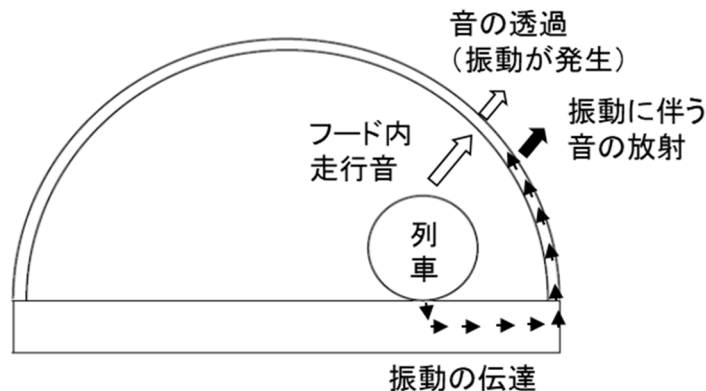


図-5.2.1.1 列車走行に起因して観測されるフードの振動

5.2.1.1 走行試験

走行試験における測定位置を図-5.2.1.2に示す。測定は、評価点の騒音に影響の大きい走行線側のほか、走行線と反対側のフードや桁裏面の各部においても実施した。フードはリブのない厚さ100mmの部分(頂部のみ300mm)で、桁裏面は厚さ250mmのスラブ部で測定を行った。試験車両は4両編成で、測定には圧電式振動加速度ピックアップ(RION,PV85)を使用した。営業時を想定した500km/hの他、速度の違いに伴う影響を確認するため、400km/h、300km/hにおいても実施した。また、フード内壁表面における音圧レベルについて大音量の音圧測定が可能な風圧計(SSK,P325W200S)を設置して1点で測定を行うとともに、フードの振動と構造物音の関係を把握するため、フード上部45度方向でフード表面から約30cm離れた点に音響インテンシティプローブ(マイクロホン)及び音響インテンシティメータ(RION,SI38&SI50)を設置し、音響インテンシティを測定した。

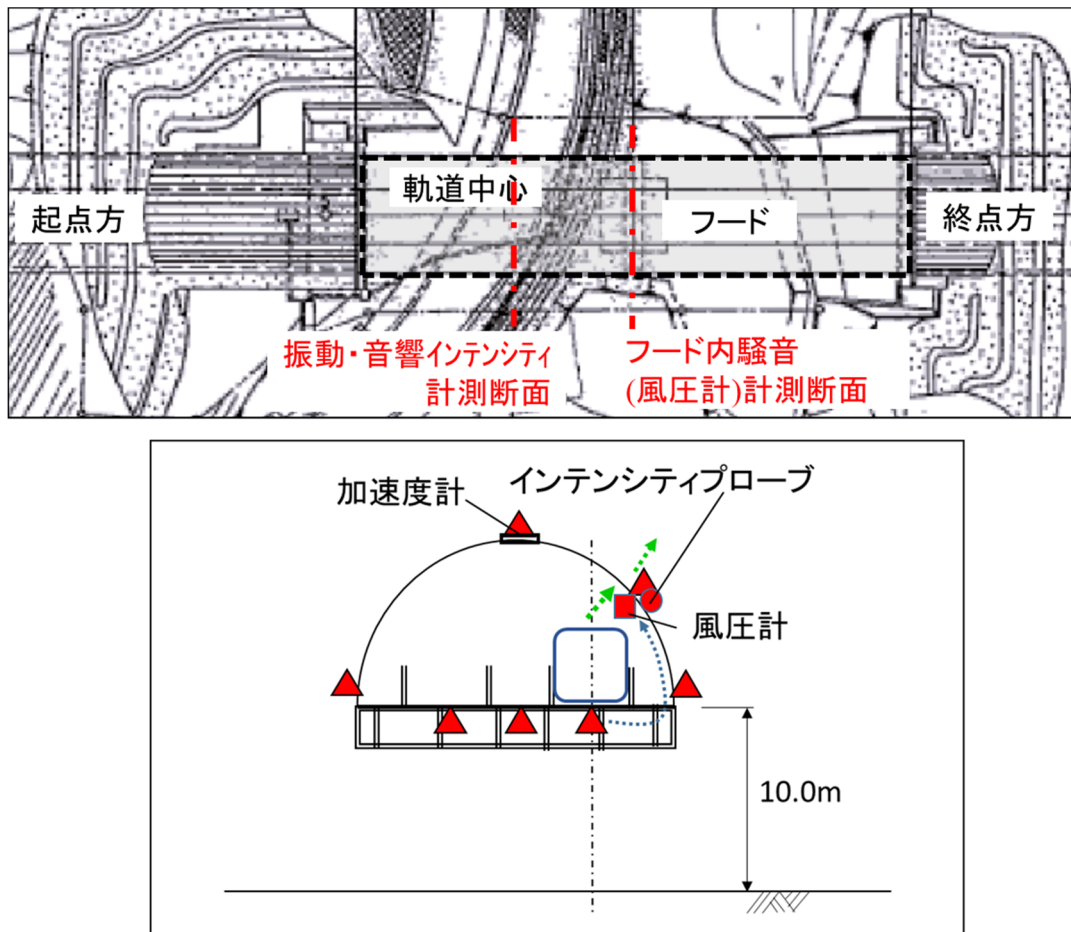


図-5.2.1.2 走行試験における測定位置

5.2.1.2 スピーカ試験

スピーカ試験については図-5.2.1.3に示すように、フード内の中央通路に設置したスピーカから、電力増幅器で増幅したピンクノイズを放射し、フード内壁表面における音圧を測定するとともに、透過音に起因して発生する桁やフード各部の振動を圧電式振動加速度ピックアップを用いて測定した。また、フード外の音響インテンシティについても測定を行った。対象とする周波数は1/3オクターブバンド中心周波数で50 Hz～4 kHzとし、音響インテンシティのS/N比を確保できない場合には1バンド毎に信号出力を調整して行った。

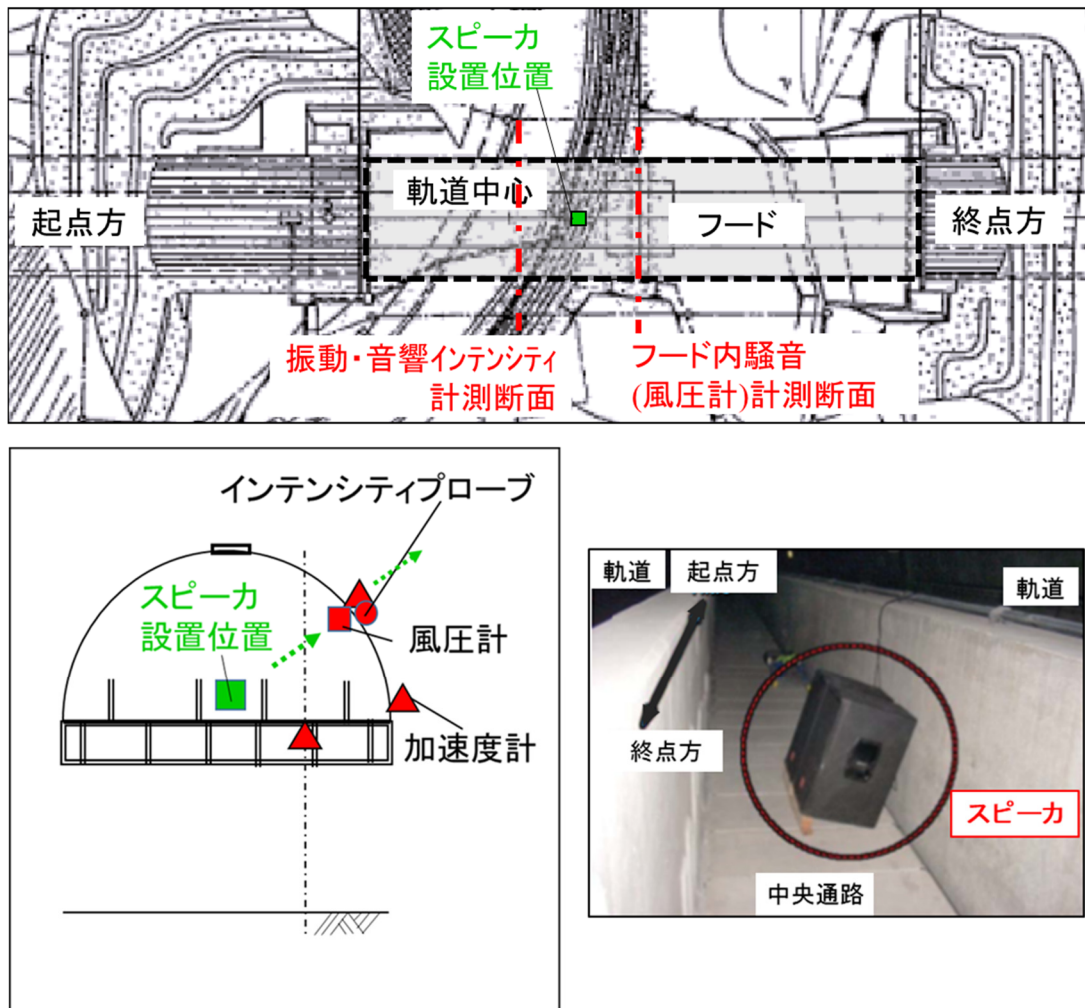


図-5.2.1.3 スピーカ試験における測定位置と試験概要

5.2.1.3 加振機試験

加振機試験については図-5.2.1.4に示すように、加振機（ビイック L100 型）で走行路を加振し、圧電式振動加速度ピックアップで桁及びフード各部の振動を測定した。加振信号にはピンクノイズを用い、電力増幅器で増幅した後に加振機で加振した。対象周波数は1/3オクターブバンド中心周波数で50 Hz～4 kHzとした。

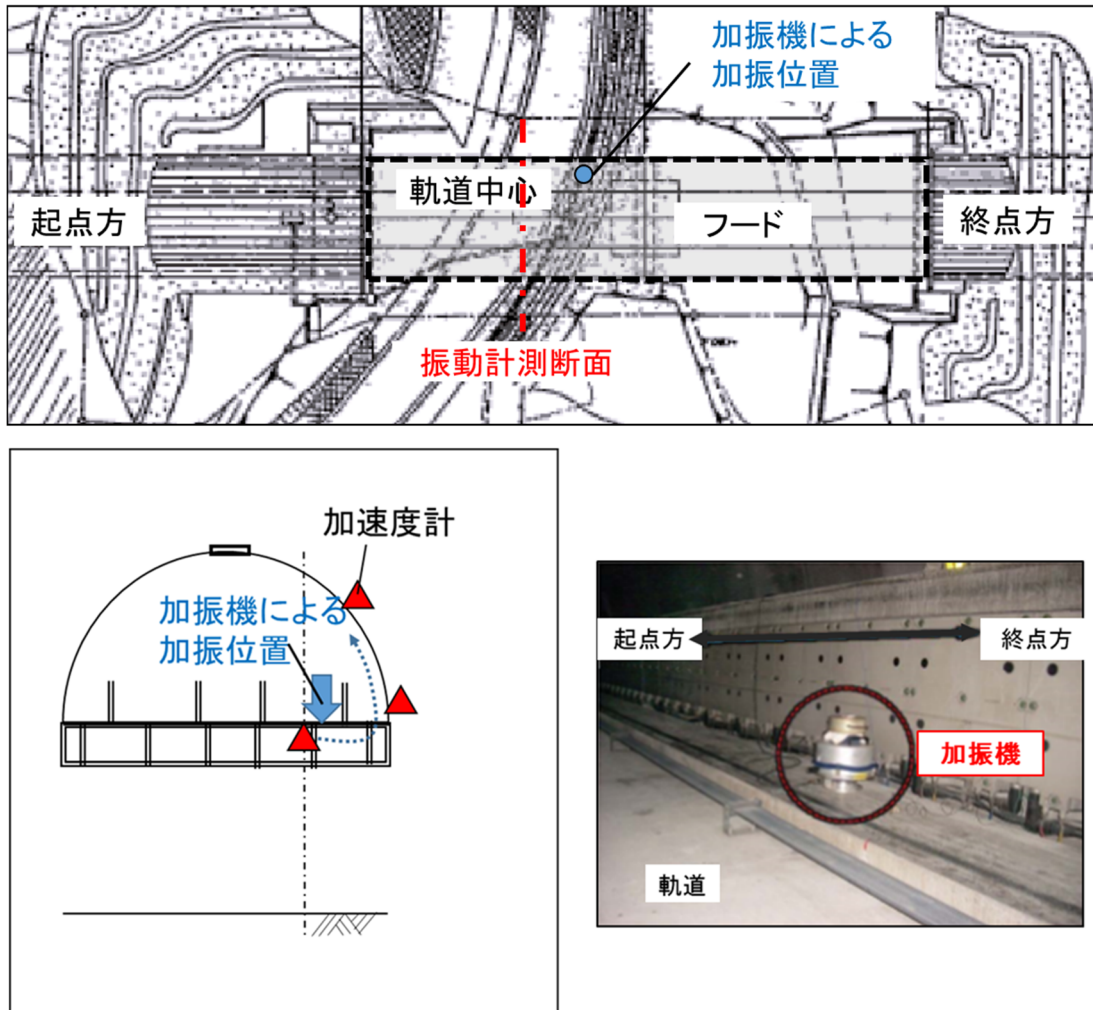


図-5.2.1.4 加振機試験における測定位置と試験概要

5.2.2 現地計測結果

5.2.2.1 走行試験

桁裏面（軌道直下）、フード表面（側部）及びフード表面（上方45度）における列車走行時の1/3オクターブバンド振動加速度レベルを速度毎に整理すると図-5.2.2.1の通りとなる。なお、本研究における振動のグラフは、各測定結果の関連性を把握しやすくするため、騒音の場合と同様に¹⁾²⁾、1/3オクターブバンド振動加速度レベルの計測値、あるいはこれらをもとに式5.2.2.1で計算されるAP（オールパス）振動加速度レベルを、式5.2.2.2あるいは式5.2.2.3により補正した相対的なレベル（ $a(x)(i)$ あるいは $a(x)$ ）として表示している。

$$A_{(x)} = 10 \log_{10} \left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{A(x)(i)}{10}} \right) \quad 5.2.2.1$$

$$a_{(x)(i)} = A(x)(i) - A_0 \quad 5.2.2.2$$

$$a_{(x)} = A_{(x)} - A_0 \quad 5.2.2.3$$

ここに、

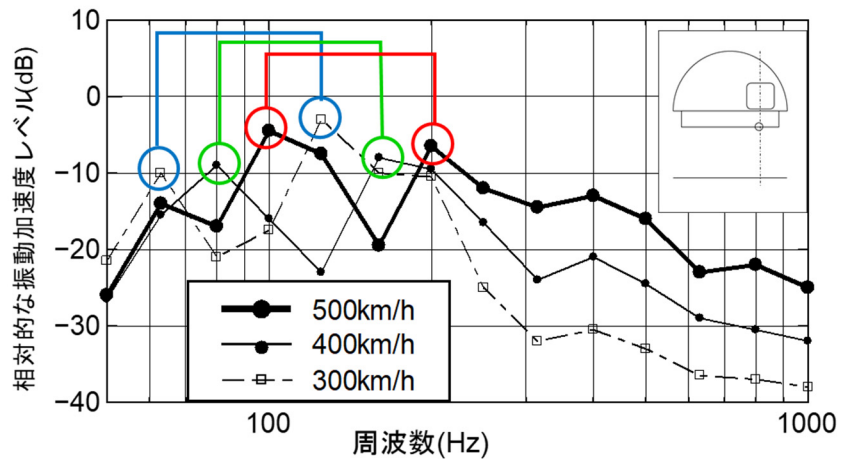
$A(x)(i)$: 点 x における 1/3 オクターブバンド振動加速度レベルの計測値

i : 中心周波数 50 Hz～4 kHz の周波数帯域における 1/3 オクターブバンドの番号

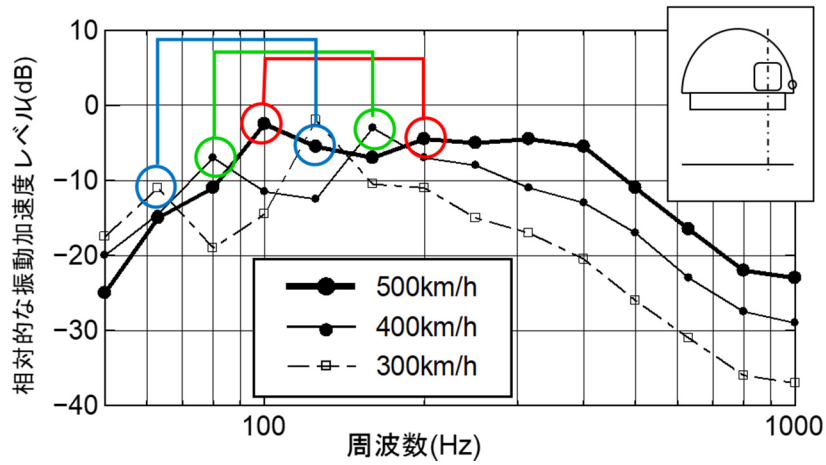
n : 中心周波数 50 Hz～4 kHz の周波数帯域における 1/3 オクターブバンドの総数=20

A_0 : 基準とする振動加速度（500 km/h 走行時の軌道直下における AP（オールパス）の
平均値：95 dB）

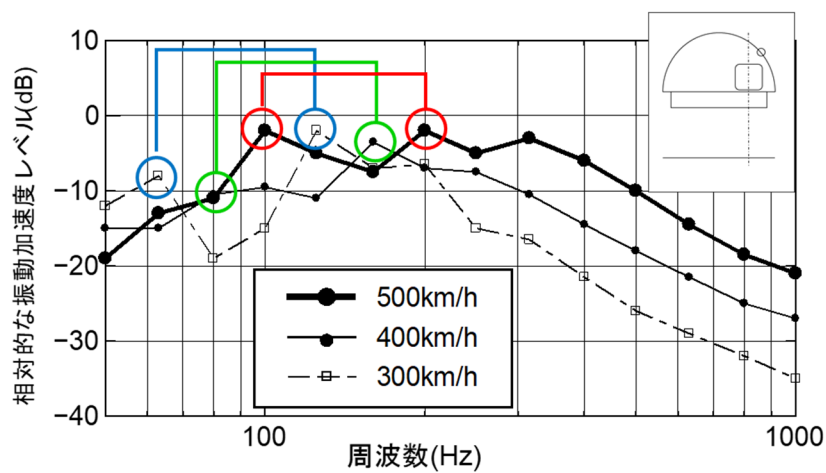
なお本章においては、前章の測定において構造物音の影響する周波数が概ね 1 kHz よりも低かった¹⁾ことから、グラフは 1 kHz 以下の周波数について表示している。一部を除き、全ての地点において速度が増すとともに 300 km/h の場合に見られる 63 Hz 及び 125 Hz のピークが高い周波数側（500 km/h で 100 Hz 及び 200 Hz）に移動していることが確認され、これらは速度に依存する成分であることがわかる。超高速鉄道は図-1.3.1.2に示す通り、車両に搭載された超電導磁石と地上に設置したコイルの間に働く磁力により浮上・案内・推進されており³⁾、車両の浮上力に対する反力が地上コイルを取付けた側壁を介し、構造物に作用している。地盤振動を対象とした宇野ら⁴⁾の研究によって、側壁における振動の発生特性は車両の超電導磁石の極間隔や台車間隔等で繰り返される荷重の影響を受けることが明らかにされており、今回実施した測定においても一例として 500 km/h 走行時の側壁下部における振動加速度波形（90 Hz 以上の成分はカットして表示している）を示すと図-5.2.2.2 となり、台車間隔に起因する周波数の振動が卓越している。図-5.2.2.1において 300 km/h、400 km/h、500 km/h のピークが確認される 63 Hz、80 Hz、100 Hz はそれぞれ超電導磁石の極間隔 1.35 m に依存しており、かつ同様にピークが確認される 125 Hz、160 Hz、200 Hz はその 2 倍となっている。このことから、騒音源となる周波数領域においても地盤振動の場合と同様の傾向が確認されたと考えられる。また、測定を行った全ての点における 500 km/h 走行時の 1/3 オクターブバンド振動加速度レベルを図-5.2.2.3 に示す。軌道と反対側



(a) 桁裏面 (軌道直下)



(b) フード表面 (側部)



(c) フード表面 (上方 45 度)

図-5.2.2.1 桁・フードの振動加速度レベル (走行試験：速度毎)

を含め、厚さが相対的に薄いフードの一般部における振動が軌道直下と比較して大きく、厚さが相対的に厚い桁の各部やフードの頂上における振動は軌道直下と同程度かより小さくなっていることがわかる。フードのリップによる影響を確認するためさらに測定を行い、前述した上方45度の点（一般部：厚さ100mm）と、隣接するリップ部の点（厚さ300mm）における500km/h走行時の振動加速度レベルを比較すると図-5.2.2.4のとおりとなる。100Hz以下の周波数では違いが少ない一方、100Hzを超える周波数においてリップ部の方が振動が小さくなっていることがわかる。

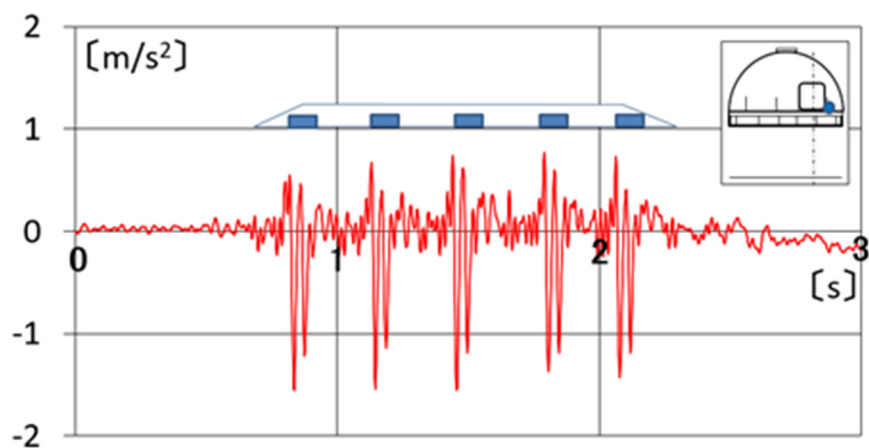


図-5.2.2.2 500km/h 走行時の振動加速度波形（側壁下部）

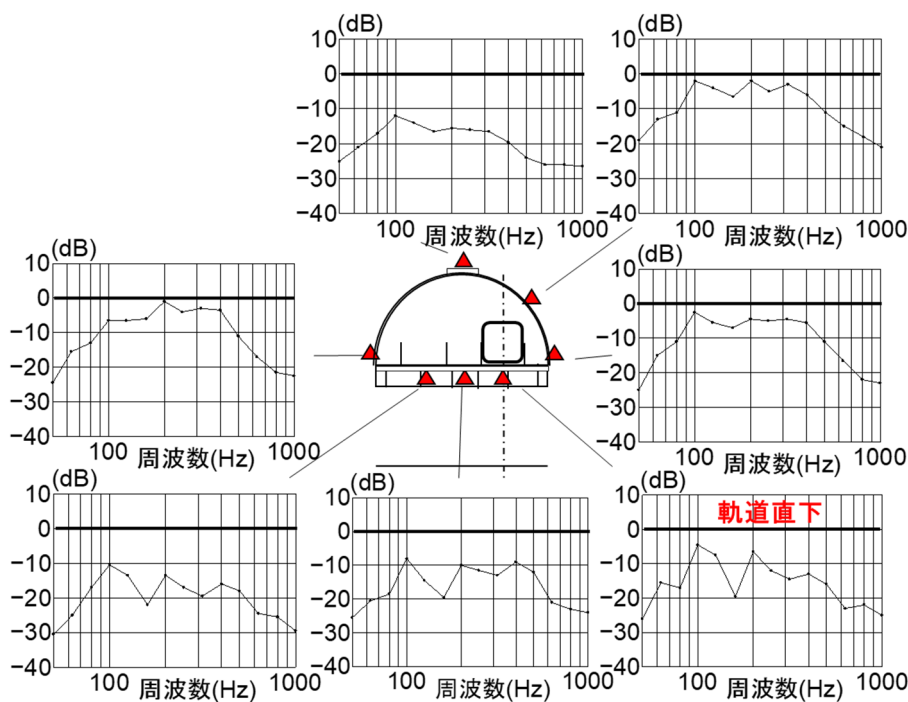


図-5.2.2.3 桁・フード各部における振動加速度レベル

（相対的なレベルとして表示：走行試験 500 km/h）

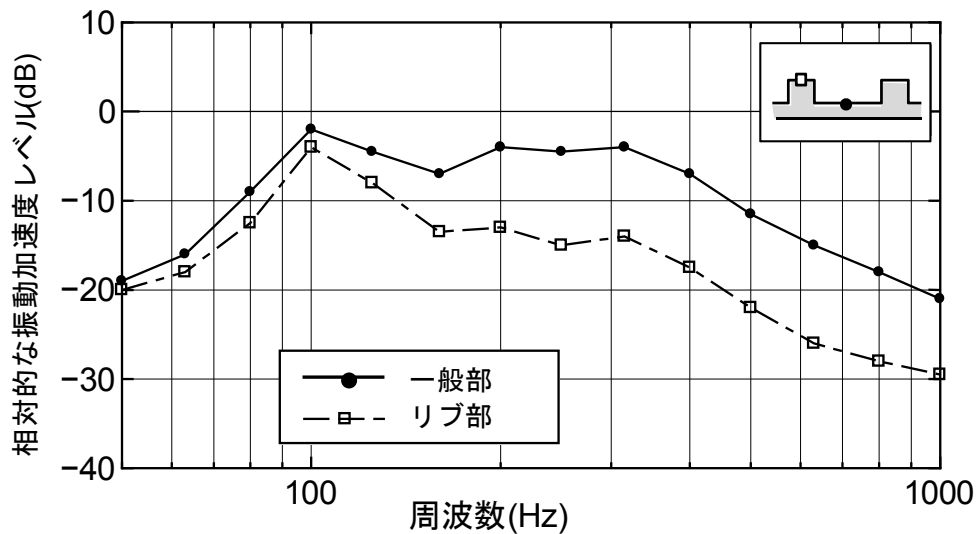


図-5.2.2.4 厚さによるフードの走行時振動の違い

5.2.2.2 スピーカ試験

スピーカ試験の結果をもとに、音がフードを透過する際に引き起こす振動(透過音による振動)が、走行試験時に計測される振動に対し、各周波数でどの程度寄与しているかを整理することとした。スピーカ試験を実施した際の、フード内に発生する音の1/3オクターブバンド音圧レベルを図-5.2.2.5に示す。スピーカの出力に限界があるため、参考に示す走行試験時の音圧レベルよりは小さくなっている。一方、図-5.2.2.6に桁裏面(軌道直下)、フード表面(側部及び上方45度)で測定された1/3オクターブバンド振動加速度レベルを示す。フード表面における振動と比較して、桁裏面の振動はほとんどの周波数で10 dB以上小さくなっており、フード内の音に起因する桁の振動は非常に小さいことがわかる。加振源となるフード内の音圧レベル $L_{p,isp}$ と、結果として発生するフード表面の振動加速度レベル VAL_{fsp} の各周波数における比率が列車走行とスピーカ試験で等しいと想定し、列車走行時におけるフード内音圧レベル $L_{p,ir}$ をもとに、式 5.2.2.4 から列車走行時の透過音によるフード表面(上方45度)の振動について、1/3オクターブバンド毎の振動加速度レベル VAL_{fr} を推定した。

$$VAL_{fr} = VAL_{fsp} + (L_{p,ir} - L_{p,isp}) \quad 5.2.2.4$$

推定値と実際に列車走行時に観測される振動と比較すると、図-5.2.2.7のとおりとなる。400 Hz以上の周波数では振動加速度レベルの差が小さいものの、それより低い周波数、特に100 Hzを主体とした周波数においては最大で8 dBの差が見られ、これはスピーカ試験では発生していない、桁からの伝達による寄与分と考えられる。

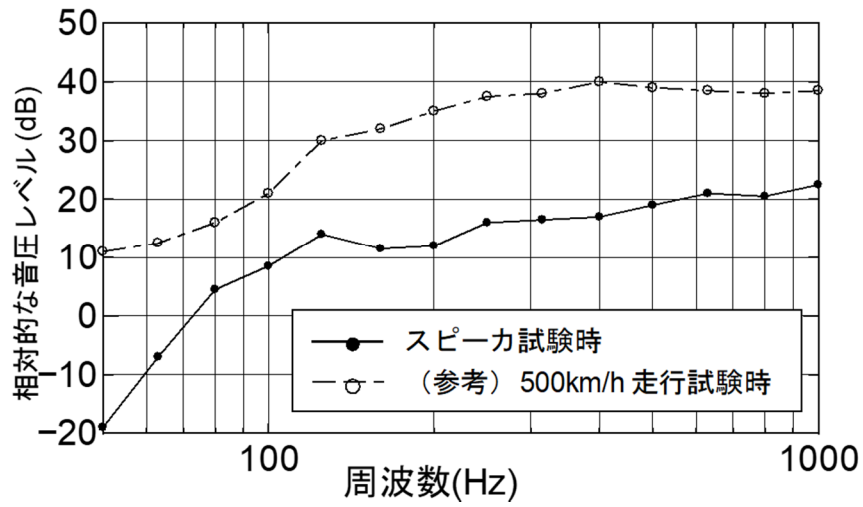


図-5.2.2.5 フード内の音圧レベル (スピーカー試験)

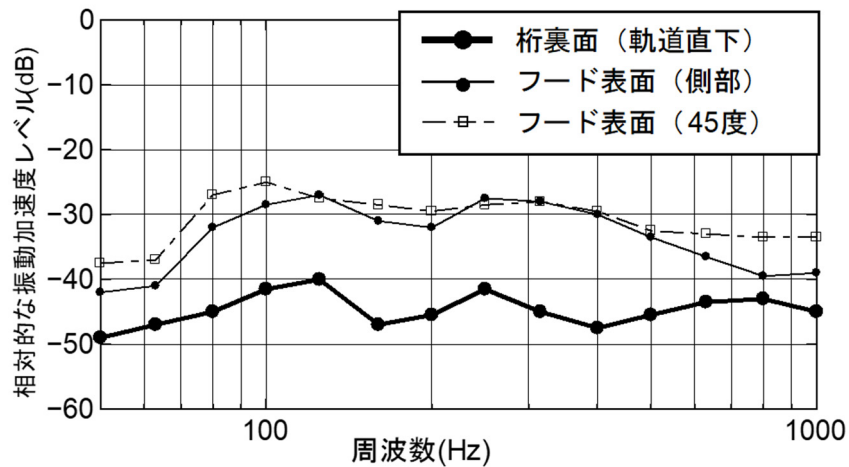


図-5.2.2.6 桁・フード各部の振動加速度レベル (スピーカー試験)

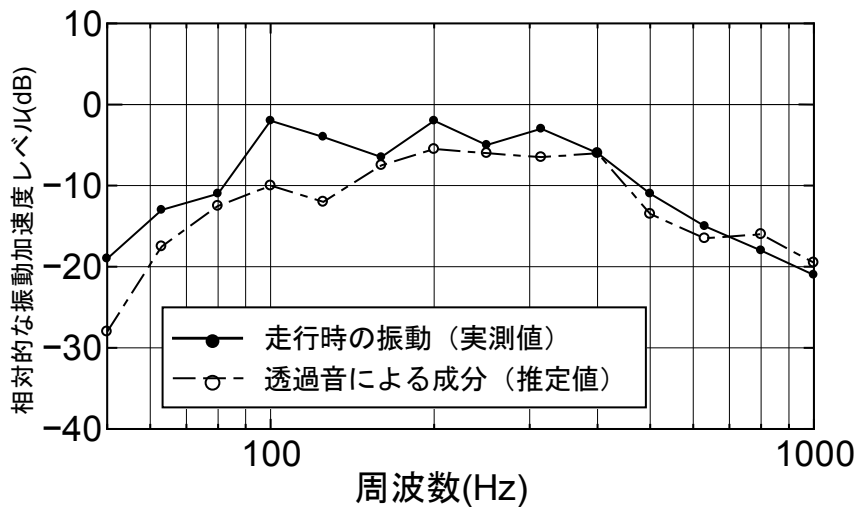


図-5.2.2.7 透過音による振動の推定値と実測結果の比較 (スピーカー試験)

5.2.2.3 加振機試験

加振機試験を実施した際の、桁裏面（軌道直下）、フード表面（側部及び上方45度）における1/3オクターブバンド振動加速度レベルを図-5.2.2.8に示す。桁裏面とフード表面の振動加速度レベルの違いはスピーカ試験よりも小さくなっているが、63～125 Hz、250～400 Hzにおいて後者が前者を上回っており、厚さの薄いフードの部分で振動が増幅されていることが確認される。東北新幹線における江端・二村の研究事例⁵⁾を参考に、桁裏面の振動加速度レベル VAL_{sv} とフード表面（上方45度）の振動加速度レベル VAL_{fv} の各周波数における比率が列車走行時と加振機試験で等しいと想定し、列車走行時に測定された桁裏面振動加速度レベル VAL_{sr} をもとに、式5.2.2.5から列車走行時に桁からの伝達により生じるフード表面（上方45度）の振動について振動加速度レベル VAL_{fv} を1/3オクターブバンド毎に推定した。

$$VAL_{fv} = VAL_{fv} + (VAL_{sr} - VAL_{sv}) \quad 5.2.2.5$$

推定値と列車走行時の実測値を比較すると図-5.2.2.9 のとおりとなる。図-5.2.2.7 の場合とは逆に、63～125 Hz、200～315 Hz において列車走行時の測定値との差が小さく、これらの周波数帯域が桁から伝達した振動による影響を大きく受けていると推定される。160 Hz においては振動に起因する成分が少なく、ほとんどが透過音の成分によるものとなっている。元々の加振力に160 Hzの成分が少ない（加振位置に近い点で測定した図-5.2.2.1(a)のグラフに表れている）ことが主な原因と考えられる一方、3次元の複雑な形状をしたフードの振動特性が影響を及ぼした可能性もあり、今後検討を進めていく必要がある。

なお、式5.2.2.4、式5.2.2.5に基づいて音源の分離を図り、各音源の音圧レベルを推定することの妥当性については、第7章で後述する騒音予測手法の構築にあたり、検証を行っている。

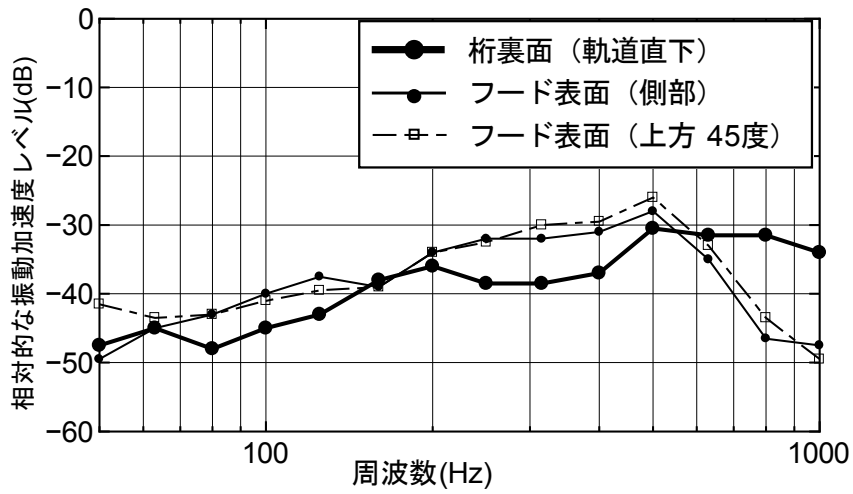


図-5.2.2.8 桁・フード各部の振動加速度レベル (加振機試験)

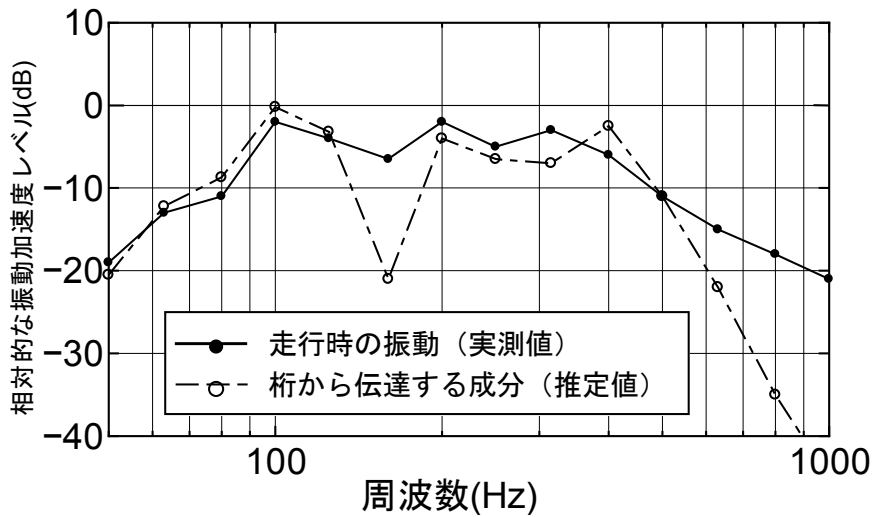


図-5.2.2.9 桁から伝達する振動の推定値と実測結果の比較 (加振機試験)

5.2.2.4 フード構造物音の影響に関する考察

前節までの検討⁶⁾により、列車走行時に軌道に発生した振動が桁及びフードに伝達し、厚さの薄い部分で増幅されていることを明らかにしたが、本節ではその現象が騒音の評価点における音圧レベルに対しどの程度影響を及ぼすかを検討する。

超高速鉄道のフード区間において計測される騒音について、フード自体が振動して発生する構造物音を考慮すると、図-5.2.2.10 のとおり

[1]フード透過音

[2]桁構造物音

[3]フード構造物音

の3つに分割されると考えた。そのうえで、走行試験の結果やスピーカ試験の結果、加振機試験の結果から音源を設定し、距離減衰等を考慮して評価点（新幹線騒音に係る一般的な測定点⁷⁾である軌道中心から25m：地上高さ1.2m）におけるそれぞれの音の1/3オクターブバンド音圧レベルを推定した。これらの方法の詳細や妥当性については、第7章で後述する。なお、構造物振動と音圧レベルの関係については、500km/h走行時のフード（上方45度）における測定結果から図-5.2.2.11の通りレベル差（放射効率）を算定し、桁及びフードの振動加速度レベルから音源のパワーレベルを設定する際に使用した。推定結果を図-5.2.2.12に示す。グラフの左側にはAP（オールパス）の音圧レベルも示している。評価点における騒音に対して、フード構造物音はフード透過音、桁構造物音とほぼ同程度の寄与度となっており、今後フードのさらなる性能向上に向けては、フード構造物音にも着目し、影響の検討を進めながら開発を行うとともに、その低減を図ることが重要である。

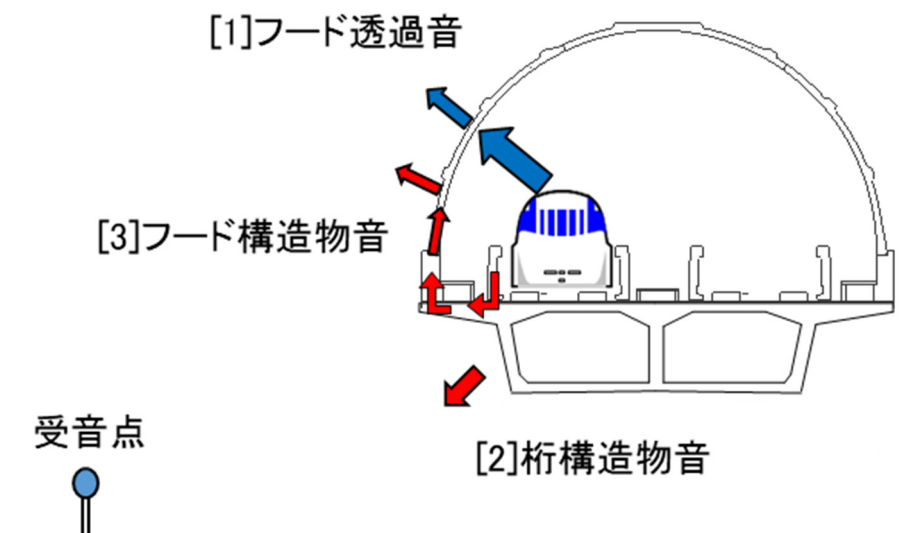


図-5.2.2.10 超高速鉄道のフード区間における音源の分割

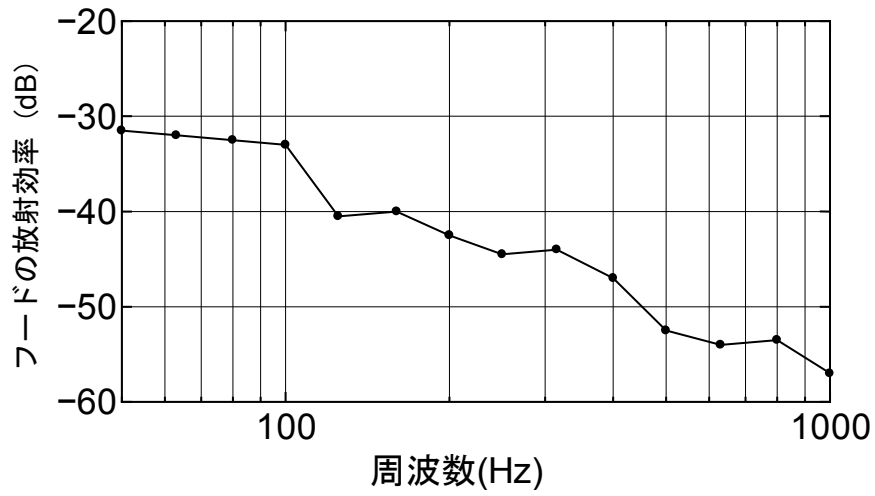


図-5.2.2.11 フード内（上方 45 度）騒音と振動の関係

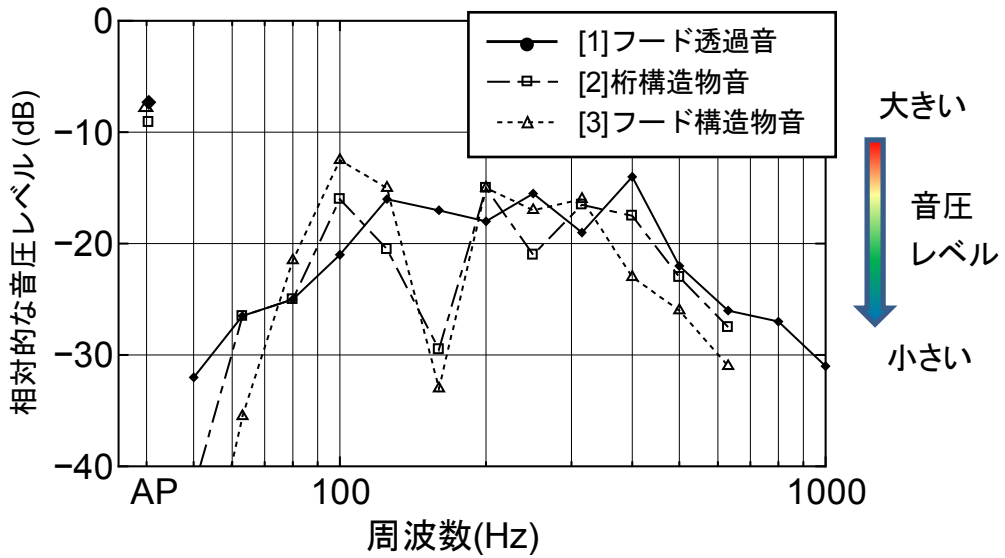


図-5.2.2.12 各音源による評価点（25m）の音圧レベルの推定値（500km/h 走行時）

5. 3 数値解析によるフード振動の現象再現

本節では、列車走行時の桁及びフードの振動について、数値解析によりさらに特性の確認を進めるとともに、構造物の条件を変更させた場合の影響検討を可能とするモデルを構築することを考える。

5.3.1 解析のモデル

本研究では、宇野ら⁴⁾が超高速鉄道の地盤振動の予測に用いたボクセル有限要素法のモデルを活用し、動的評価を実施することとした。ボクセル有限要素法⁸⁾は一様な直方体要素(voxel)で解析対象を分割して表現する有限要素法の一つであり、要素形状が単一なため要素マトリックスを全て記憶する必要がなく、計算メモリを節減できる結果、地震波の広域的な伝播など⁹⁾、通常のFEMよりも格段に負荷量の大きい解析が可能となるため、高周波数の構造物音を取扱う本研究に適していると考えた。解析に用いた構造物モデルは基本的に宇野ら⁴⁾の研究と同一であり、モデル図を図-5.3.1.1に、設定した材料定数を表-5.3.1.1に示す。側壁とは第1章に記載したように、地上側のコイルを取付けている車両の両側の壁を指す。フードの一般部の厚さは100 mm(頂部は300 mm)であり、解析に用いたボクセル要素サイズは100 mmメッシュである。円形の形状を再現するためにはメッシュをより細かく設定することも考えられるが、50 mmメッシュとした場合でも解析結果がほぼ同一であったことから、100 mmメッシュを用いた。フードの端部については、実際のフードにおいてゴムで塞いでいることを考慮し、拘束していない。また、計算の効率化を考慮して減衰マトリックスが対角行列になる質量比例型の減衰¹⁰⁾¹¹⁾を用いるとともに、橋脚下端(地面境界)の境界条件は固定とした。時間刻み幅 Δt はクーラン条件¹²⁾を満たすように 2.3×10^{-5} 秒とした。

5.3.2 減衰定数の設定

構造物モデルにおける減衰定数の設定を目的に、ハンマー加振を模擬した解析を行い、実測結果と比較を行った。ハンマー加振位置及び測定位置を図-5.3.2.1に示す。図-5.3.2.2は測定されたハンマー加振力の時刻歴であり、本検討ではこの実測と同じ加振力を与えて解析を実施している。質量比例型の減衰定数は磁石の間隔と列車速度に関係する加振周波数であり多くの箇所では振動加速度レベルが最大となる100 Hzを基準に、0.3%及び1.5%の2つのケースで解析を実施した。解析結果の一例として、側壁上部を加振し減衰定数を0.3%とした場合の1/3オクターブバンド振動加速度レベルを実測と比較して図-5.3.2.3のとおり示す。なお、レベルは実測値のAP(オールパス)で基準化している。桁部、フード部ともに実測記録と解析は、周波数315 Hz程度まで概ね対応しているといえる。400 Hzよりも高周波数側では、解析の方がレベルが高くなっているが、質量比例型減衰(減衰定数は振動数に反比例する)を用いていることが原因と考えられる。ただし、列車走行時に構造物音の主

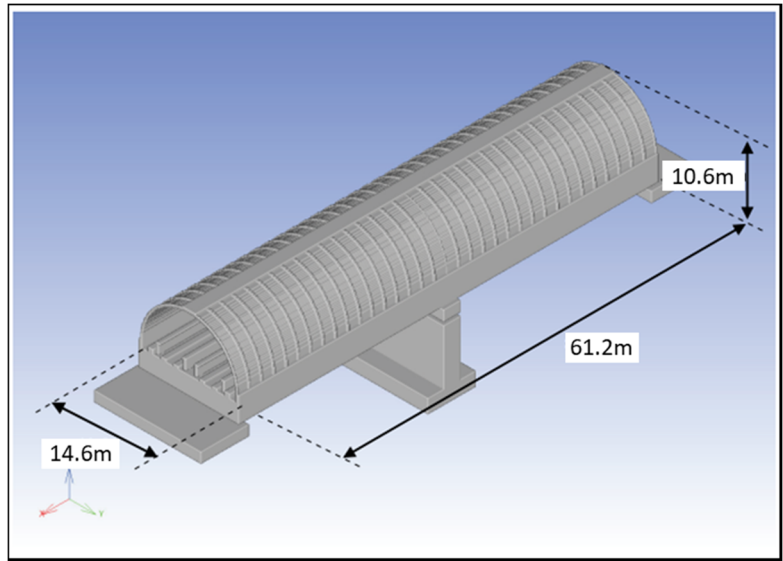


図-5.3.1.1 解析に用いた構造物モデル図

表-5.3.1.1 設定した材料定数

部位	ヤング率 (N/m ²)	ポアソン比	単位体積 重量 (kg/m ³)
側壁	3.2×10^{10}	0.2	2.5×10^3
フード	3.2×10^{10}	0.2	2.5×10^3
桁	3.2×10^{10}	0.2	2.5×10^3
ゴム支承	8.8×10^8	0.475	9.4×10^2
橋脚	2.7×10^{10}	0.2	2.5×10^3

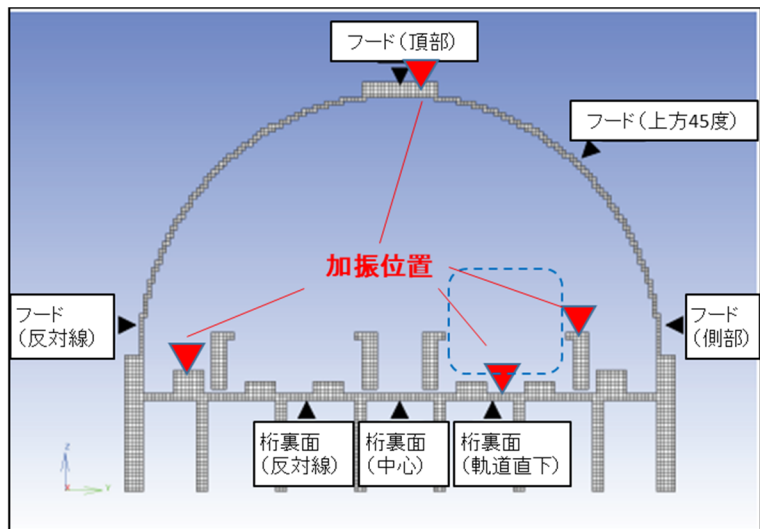


図-5.3.2.1 ハンマー加振位置及び測定位置

体となる周波数に比べると高いため、構造物音の評価に対してはほとんど影響しないと考えられる。各加振位置及び測定位置において解析を行った結果、基準の 100 Hz に着目すると、表-5.3.2.1 のとおり減衰定数 0.3 % の場合に解析結果が実測を上回る点が多い一方、1.5 % の場合は逆の結果が得られたことから、列車走行時の解析に使用する減衰定数についてはその間を取って、100 Hz で 0.75 % に設定することとした。

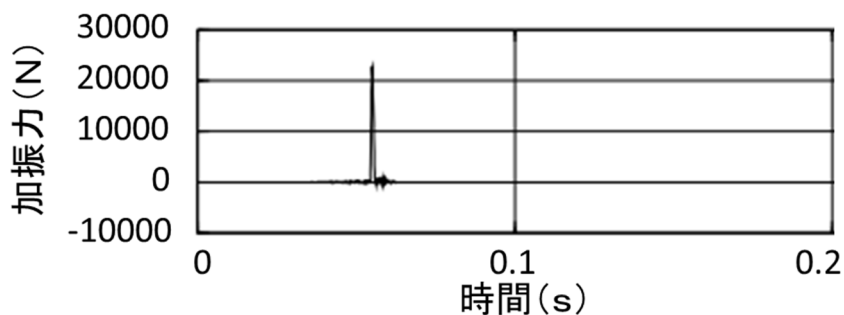


図-5.3.2.2 ハンマーによる加振力

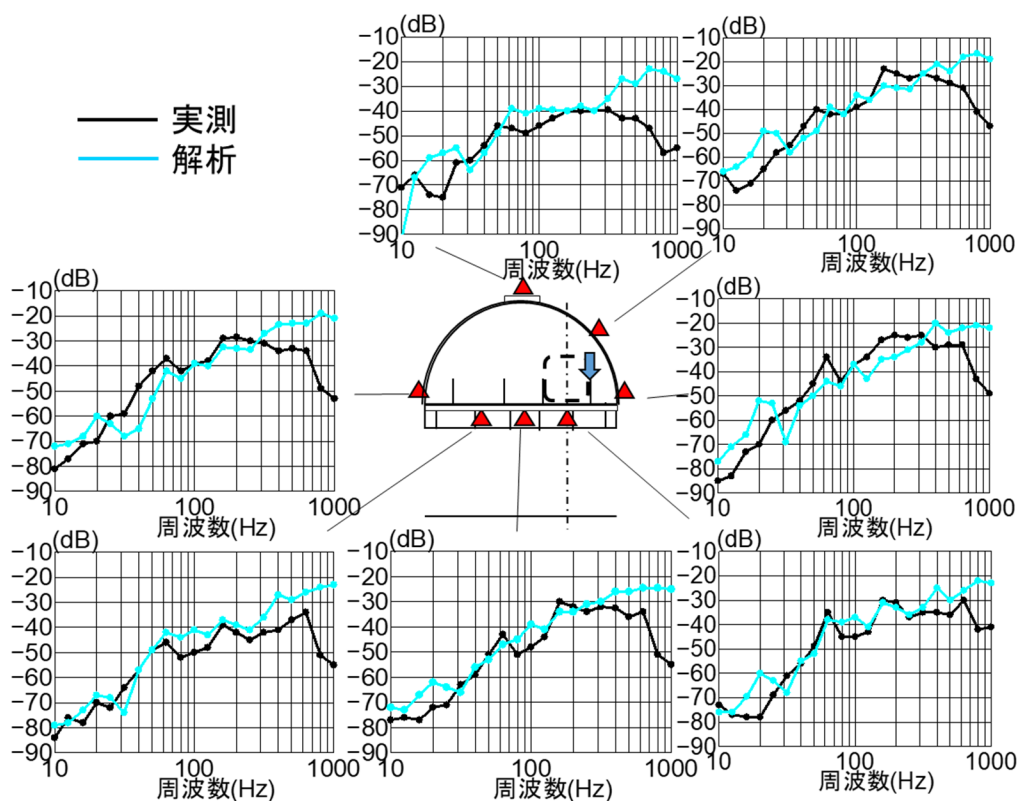


図-5.3.2.3 数値解析と実測の比較

(ハンマー加振：減衰定数 0.3 % の場合)

表-5.3.2.1 各点における 100 Hz の解析結果と実測の比較

解析結果と実測のレベル差 (dB)				
		減衰定数	0.3%	1.5%
フード	頂部		6.9	-0.1
	上部45度 (走行線)		4.8	-2.9
	側部 (走行線)		0.5	-5.3
桁裏面	軌道直下		8.0	4.7

5.3.3 列車走行時の解析の実施

前節の結果を踏まえ、500 km/h の列車走行時における桁、フードの振動について評価を行い、実測結果と比較した。列車走行時の加振力については宇野ら⁴⁾の方法に基づいて、図-5.3.3.1のようにモデル化した。1つのコイルがもたらす加振力のうち、最大加振力に達するまでの時間及び最大加振力の作用時間をパラメータとして、実測値との整合性が最も高い加振力を設定した。そのうえで、4両編成車両における5つの台車の間隔や台車内における磁石の間隔、各台車が支持する荷重の大きさを考慮して図-5.3.3.2の通り加振力を設定し、列車移動速度に合わせ時間ずれを考慮して側壁の各節点に鉛直外力として与えた。設定した加振力の周波数成分は図-5.3.3.3の通りである。

数値解析により算定した1/3オクターブバンド振動加速度レベルを実測と比較した結果を図-5.3.3.4に示す。なお、フードの一般部では部材厚さが100 mmと薄いことから透過音の影響は少なくないが、解析では透過音による影響を考慮していないため、実測結果は前節の測定結果をもとに透過音成分を取り除いた、桁から伝達する振動成分のみを抽出して表示している（図中の破線は、透過音成分を含んだ実測結果である）。

実測では、いずれの測定点においても周波数100 Hzと200 Hz、さらに一部では400 Hzにピークが確認されているが、解析でも同様の周波数にピークが現れており、これらは前述したように、鉛直方向の加振力を与える列車の超電導磁石の極間隔が1.35 mであるのに対して、列車が500 km/h (139 m/s) で走行することで生じる周波数とその2倍、4倍の周波数であり、走行試験で確認されるピークと同一である。また、桁裏面（軌道直下）に比べて頂部を除くフード各点の振動が大きくなっており、走行試験における測定結果の特徴を再現していることが確認された。

振動の大きさについては、表-5.3.3.1のとおりAPの振動加速度レベルで解析と実測の差が2.0 dB程度（各測定点の平均）となっている。フード頂部での差が3.9 dBと大きいものの、地上における構造物音の評価では、フード頂部からの成分による影響が小さいことから、ほとんど問題とならないと考えられる。影響の大きい列車走行側の桁、フードにおける振動

加速度レベルの差は最大でも 1.6 dB となっている。一方で周波数別に見ると、ハンマー試験と同様に、高い周波数（400 Hz 以上）では解析結果が実測記録と比較して過大となっている他、100 Hz より低い周波数では実測記録よりも過小となっているなど、ピーク以外の周波数において、解析結果と実測記録に差が見られる部分がある。これは、100 Hz を基準とした質量比例型減衰を用いている影響（高い周波数では減衰が小さく、低い周波数では減衰が大きくなる。なお、既存の研究における地盤振動の解析では 10 Hz を基準として 3.0 % の減衰を設定しており、実測結果と整合している。）の他、設定した加振力自体の周波数成分による影響が考えられるが、解析精度の向上に向けて更なる検討を進めていく必要がある。

今後、フードの新たな構造を検討するにあたっては、これらのモデルにより数値解析を行い、構造物音の影響を把握しながら進めることが有効であると考えられる。

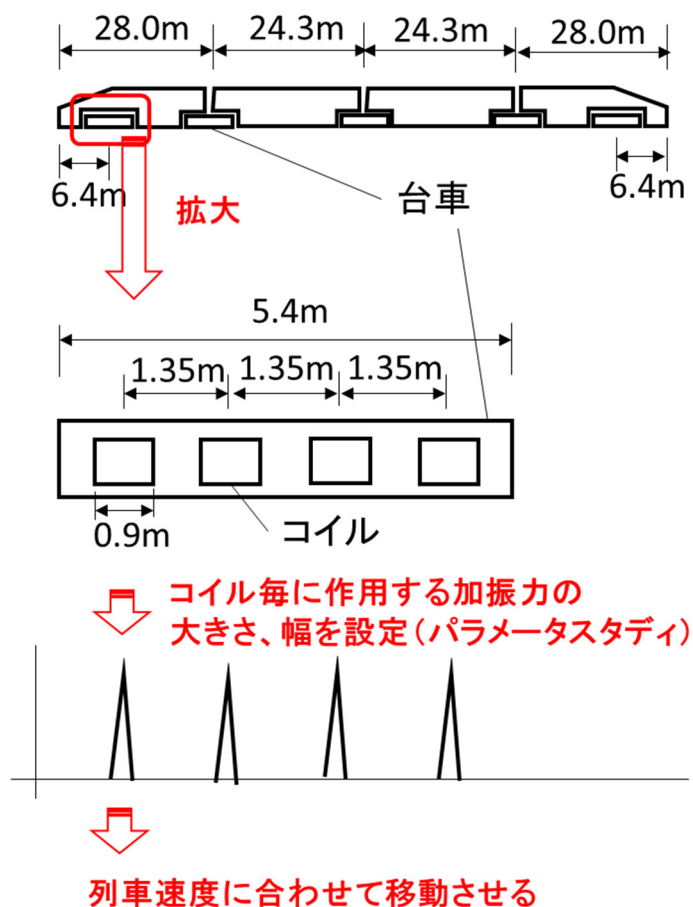


図-5.3.3.1 列車走行時の加振力のモデル化

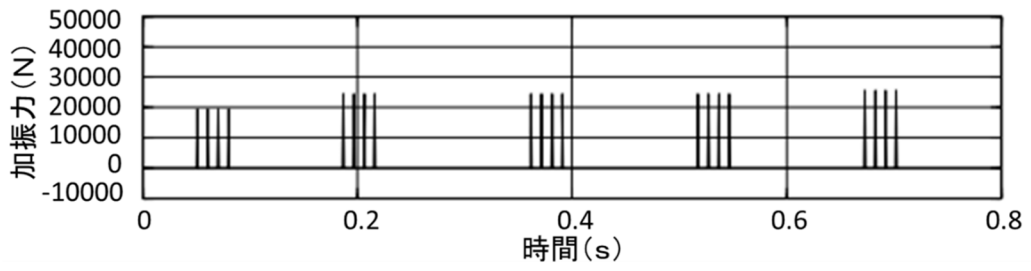


図-5.3.3.2 設定した加振力 (500 km/h 走行時)

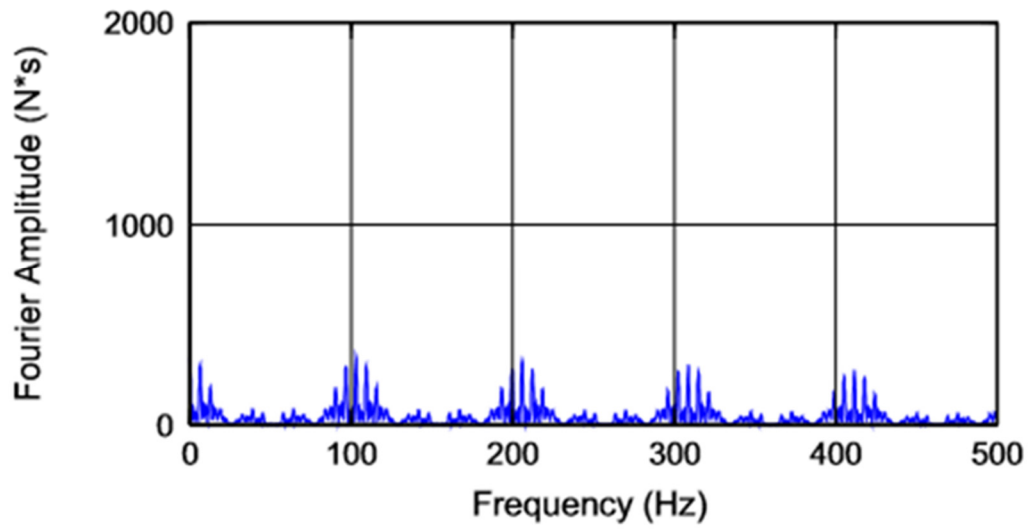


図-5.3.3.3 設定した加振力の周波数成分 (500 km/h 走行時)

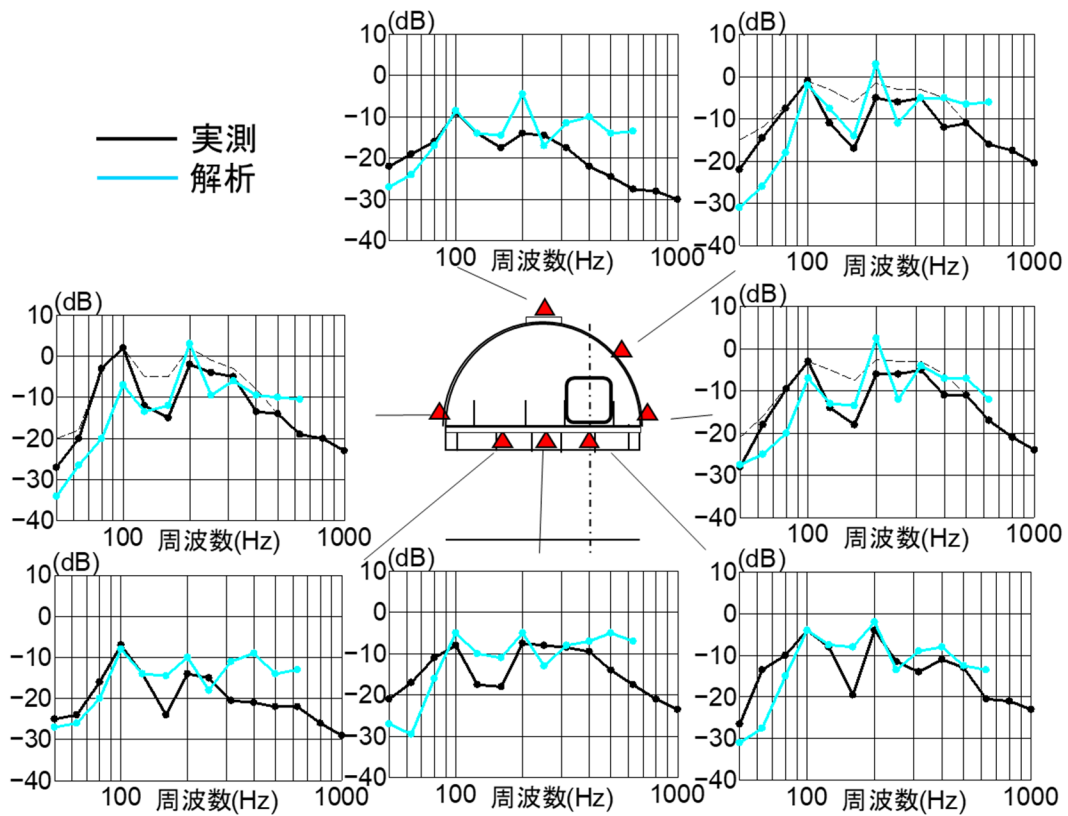


図-5.3.3.4 列車走行時の数値解析と実績の比較
(1/3 オクターブバンド振動加速度レベル)

表-5.3.3.1 列車走行時の数値解析と実測の比較 (AP 振動加速度レベル)

実測結果とのレベル差 (dB)							
軌道直下	桁		フード			平均	
	中心	反対線	側部 (走行線)	上部45度 (走行線)	頂部		側部 (反対線)
1.6	2.9	2.6	0.4	1.3	3.9	-1.7	2.0

5. 4 まとめ

本章においては、フードや桁の振動に着目して走行試験による測定を行い、筆者が着目する車両走行に伴う規則的な加振の観点から考察を進め、列車走行に伴う振動の発生や伝達の状況を明らかにした。また、スピーカ試験、加振機試験の組合せを提案して音源の分離を図り、フードの振動に伴う構造物音の影響が大きいことを確認した。さらに、ボクセル有限要素法による数値解析モデルを構築し、ハンマー加振試験の結果に基づいて減衰定数を設定したうえで、列車走行時の振動解析を行い、実測で見られた振動の発生や伝達の状況を再現した。以下に、本章で得られた知見をまとめる。

- (1) 走行試験により測定される桁やフードの振動について周波数毎のピークは地盤振動の場合と同様、列車速度とともに変化する。浮上して走行する超高速鉄道においても、車輪で走行する在来鉄道と同様、車両の超電導磁石の極間隔 1.35 m に依存する周波数や、その 2 倍の周波数が卓越することが確認される。
- (2) 厚さが相対的に薄いフードの一般部における振動が軌道直下と比較して大きく、厚さが相対的に厚い桁の各部やフードの頂部における振動は軌道直下と同程度かより小さくなっている。
- (3) 厚さ 100 mm の一般部と隣接する厚さ 300 mm のリブ上で比較すると、100 Hz 以下の周波数では違いが少ない一方、100 Hz を超える周波数においてリブ上の方が振動が小さくなっている。
- (4) スピーカ試験の結果をもとに透過音に起因する振動の大きさを推定し、実際に列車走行時に観測される振動と比較すると、400 Hz 以上の周波数では振動加速度レベルの差が小さいものの、それより低い周波数、特に 100 Hz を主体とした周波数において振動加速度レベルの差が大きい。
- (5) 加振機試験の結果、63～125 Hz、250～400 Hz においてフードの振動が桁の振動を上回っており、厚さの薄いフードの部分で振動が増幅されていることが確認される。また加振機試験の結果をもとに桁からフードに伝達する振動の大きさを推定し、実際に列車走行時に観測される振動と比較すると、63～125 Hz、200～315 Hz において列車走行時の測定値との差が小さく、これらの周波数帯域が桁から伝達した振動による影響を大きく受けていると推定される。
- (6) フード区間の評価点において計測される騒音レベルについて、フード透過音、桁構造物音、フード構造物音の 3 つに分割して予測した結果、それぞれがほぼ同程度の寄与度となる。
- (7) ボクセル有限要素法による数値解析モデルを構築し、列車走行時の振動解析を行った結果、車両の超電導磁石の極間隔 1.35 m に依存する周波数やその 2 倍の周波数が卓越すること、厚さの薄いフードの部分で振動が増幅されることなど、走行試験による実測

で見られた振動の発生や伝達の状況が再現される。

今後、フードのさらなる性能向上に向けては、フード構造物音にも着目し、影響の検討を進めながら開発を行うとともに、その低減を図ることが重要である。次章では、フード構造物音の低減を念頭に、新たなフード構造の検討を進めていく。

参考文献

- 1) 永長隆昭, 久保淳一郎, 土肥哲也, 野澤剛二郎, 長倉清, 藤野陽三: 超高速鉄道の騒音対策設備の開発, 土木学会論文集 A1, 73(2), pp.399-412, 2017.6.
- 2) 守田栄, 騒音と騒音防止 (新版), コロナ社, 1985.
- 3) 国土交通省: 技術事項に関する検討事項について, 交通政策審議会 第2回中央新幹線小委員会, 2010.4.15
- 4) 宇野護, 永長隆昭, 藤野陽三, 芦谷公稔, 森川和彦: 超高速鉄道走行時の構造物及び地盤の振動に関する実測と予測, 土木学会論文集 A1, 68(1), pp.151-166, 2012.3.
- 5) 江端正直, 二村忠元: 新幹線騒音の予測手法に関する考察, 騒音制御, Vol.2, No.3, pp34-37, 1978.
- 6) 永長隆昭, 荻田倫之, 大森洋志, 野澤剛二郎, 土肥哲也, 長倉清, 藤野陽三: 超高速鉄道の騒音対策設備に係る構造物音の低減及び騒音予測手法の開発, 土木学会論文集 A1, 74(1), pp.89-108, 2018.1.
- 7) 環境省: 新幹線鉄道騒音測定・評価マニュアル, 2015.10.
- 8) Hollister, S. J. and Kikuchi, N.: Homogenization Theory and Digital Imaging: A basis for studying the mechanics and design principles of bone tissue, Biotechnologies and Bioengineering, Vol.43, pp.586-596, 1994.
- 9) 河路薫, 秋山伸一: ボクセル FEM による地形・海を考慮した大規模 3 次元地震動伝播シミュレーション, 土木学会第 32 回地震工学研究発表会講演論文集, 2012.10.
- 10) 柴田明德: 最新 耐震構造解析, 森北出版, 2014.12.
- 11) 日本機械学会: 計算力学ハンドブック (I 有限要素法 構造編), 1998.7.
- 12) 登坂宣好, 大西和榮: 偏微分方程式の数値シミュレーション 第2版, 東京大学出版会, 2003.4.

第6章 フード構造の改善提案と実証

6.1 はじめに

前章までの検討において、評価点での騒音に対してフード構造物音の寄与が大きく、騒音対策設備のさらなる性能の向上に向けては、フード構造物音の低減を図ることが重要であるとわかった。そこで、本章では構造物音の低減を主な目的としてフード構造の改善を検討する。検討した構造については、数値解析及び定置試験を実施して、フードの構造物音及び透過音の低減性能を確認する。そのうえで、提案する構造のフードを山梨実験線の橋梁に実際に設置して、音源毎の音圧レベルが前章までに検討した試験用のフードと比較してどのように変化したか、また評価点における騒音レベルがどの程度低減されるか、走行試験、スピーカ試験、加振機試験を実施して検証する。

6. 2 フード構造の改善提案

6.2.1 試験用フードの検証結果を踏まえた改善点

前章までの試験で用いたフードは一般部の厚さが 100 mm, リブの厚さが 300 mm となっているが, 前章での考察のとおり構造物振動は一般部で大きくなっていることから, その厚さを厚くすることで構造物振動の低減を図ることを基本とした. 厚さの増加に伴い, フード透過音についても低減が期待される. 一方で, 表-3.2.1 で述べた要求性能から考えて, 以下の点についても配慮することとした.

[1]桁や橋脚等への影響を最小限にするため, 地覆部分を含めた橋面上の死荷重の合計を試験用フードと同等程度以下とする.

[2]施工時も含めた表面のひび割れ防止を考慮し, 最も薄い断面においても複鉄筋とする.

[3]景観に配慮し, 表面の凹凸が少ない構造とする.

6.2.2 新たなフード構造の計画

6.2.1 で提示した条件を満たすフードの厚さを検討すると, 以下のとおりとなる.

(条件[1])

- ・死荷重合計が現状を上回らないためには, 最大でも 190 mm に抑える必要がある.

(条件[2])

- ・円周方向の PC ケーブル (列車走行時の圧力変動荷重¹⁾ を負担する) を挟んで両側に鉄筋を配置し, その上で鉄筋の被りを十分に確保するためには, 160 mm 以上の厚さが必要となる.

(条件[3])

- ・景観上は水平のラインを強調するため, 線路方向の凹凸は出来る限り少なくすることが望ましい. 190 mm 以上の厚さであれば円周方向の PC ケーブル配置を検討した結果, 円周方向のリブを設けることなく配置が可能となる.

これらの検討結果を踏まえてフードの厚さは約 190 mm とし, 提案するフードの構造を図-6.2.2.1 に示す. なお, 総重量を従来と同等としたことで, 断面の均一化に伴う影響を検証することが可能となっている. 以下, 前章までに検討した試験用のフード構造を「従来型フード」, 今回提案するフード構造を「改良型フード」と称する.

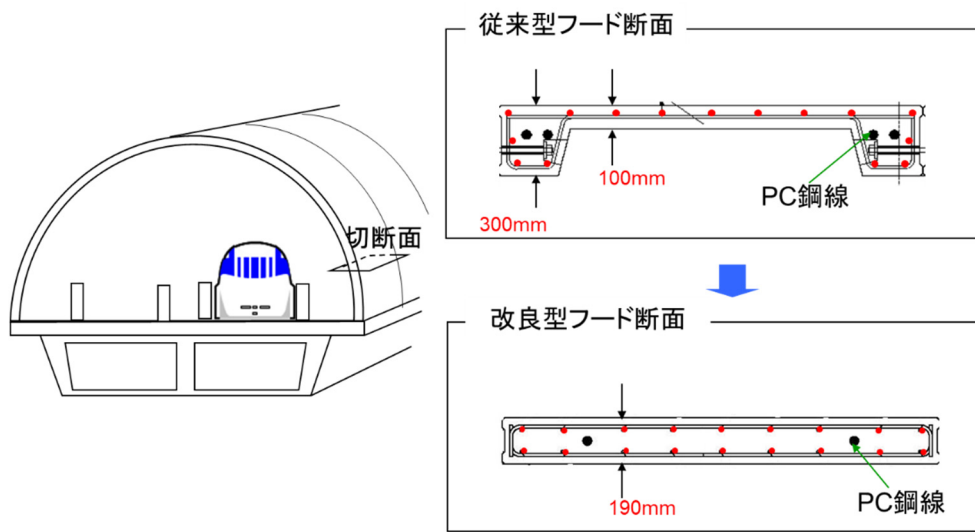


図-6.2.2.1 新たなフード構造の提案

6. 3 新たなフード構造に係る定置試験及び数値解析の実施

6.3.1 定置試験結果

フードの断面形状や厚みが変わった場合の透過音に対する影響を検証するため、実験室においてフード本体の厚みを再現した供試体（表-6.3.1.1 及び図-6.3.1.1 に示す 3 種）を用いて遮音性能試験（透過騒音試験）を実施した。フード自体は曲面であるが、今回の試験における供試体は平板とし、高さは 3.0 m とした。ケース 3 は、ケース 1, 2 と比較して厚みやリブが遮音性へ与える影響を確認するための比較対象として設定した。

測定は「JIS A 1441-1 音響—音響インテンシティ法による建築物及び建築部材の空気音遮断性能の測定方法—第 1 部：実験室における測定」²⁾に準拠して実施した。測定の状況を写真-6.3.1.1 に示す。試験体に対してあらゆる方向から音が入射するように不整形な残響室を音源室とし、受音側の測定は反射、屈折、回折、干渉を受けない屋外で行った。試験音には 50～5,000 Hz の帯域フィルターを通したホワイトノイズ（全ての可聴域の周波数帯のパワースペクトルが同強度となるノイズ³⁾）を用いた。音源室内においては 5 点で精密騒音計（RION,NA-28）を用いて測定を行い、受音側においては試験体から 30 cm 離れた面を測定点として、30 cm 間隔の計 60 点でインテンシティプローブ（RION,SI-34）及びインテンシティメータ（RION,SI-50）を使用し、音響インテンシティレベルの測定を行った。

各供試体の透過損失（本試験においては、試験室内の音圧レベルから推定した音響インテンシティレベル SIL_{room} と受音点で測定した音響インテンシティレベル SIL_{out} との差）について測定結果を図-6.3.1.2 に示す。各試験体の遮音性能は周波数とともに増加しており、500～800 Hz 付近で概ね質量則³⁾と一致している。それより高い周波数では質量則より大きく、逆に低い周波数では小さくなっている。ケース 1 とケース 3 を比較することで厚さによる影響を確認すると、全ての周波数帯域でケース 1 の方が透過損失が大きく、遮音性能が高くなるのが分かる。また、ケース 2 とケース 3 を比較することでリブの有無による影響を確認すると、ケース 2 の方が 250 Hz 以下の透過損失が大きくなっており、低い周波数帯での遮音性能が高くなるのが分かるが、これはリブの存在によりケース 2 の質量が大きくなることから、コインシデンス効果³⁾により低下する透過損失の周波数や低下量が影響を受けているためと考えられる。ケース 1 とケース 2 を比較するとほぼ全ての帯域でケース 1 の方が透過損失が大きくなっており、厚さ 190 mm の改良型フードとすることで、より高い遮音性が得られることが確認された。

表-6.3.1.1 遮音試験の供試体

	供試体厚み (mm)	記事
1	190	改良型フード相当
2	100 (リブ部 300)	従来型フード相当
3	100	

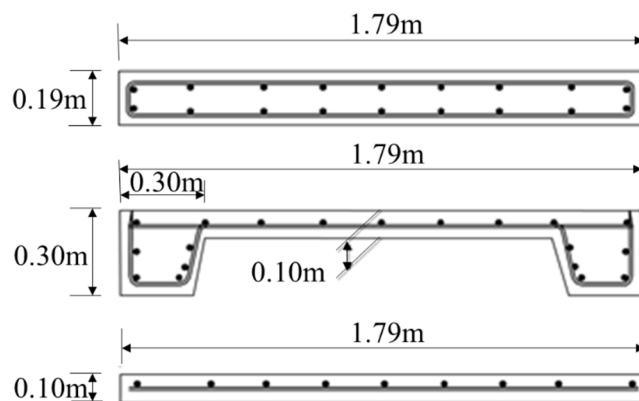


図-6.3.1.1 遮音試験の供試体

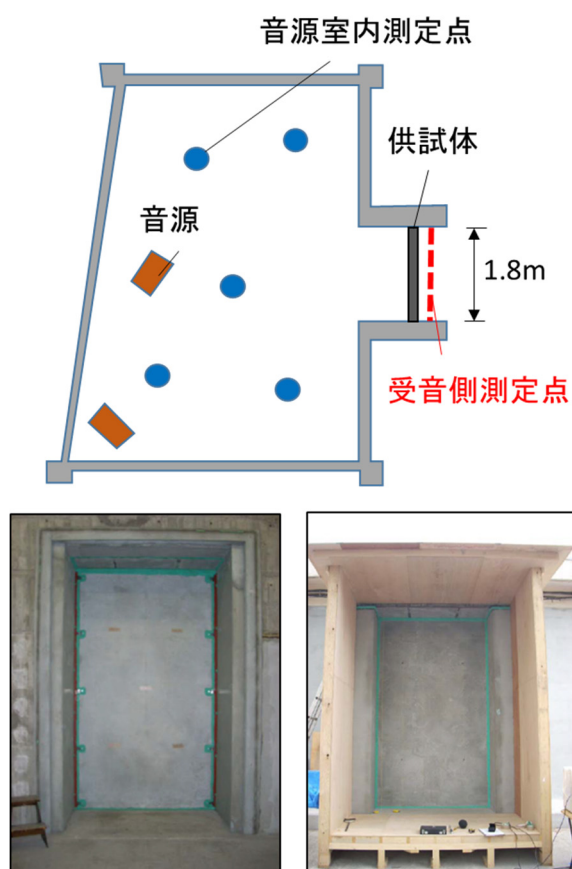


写真-6.3.1.1 遮音試験の状況

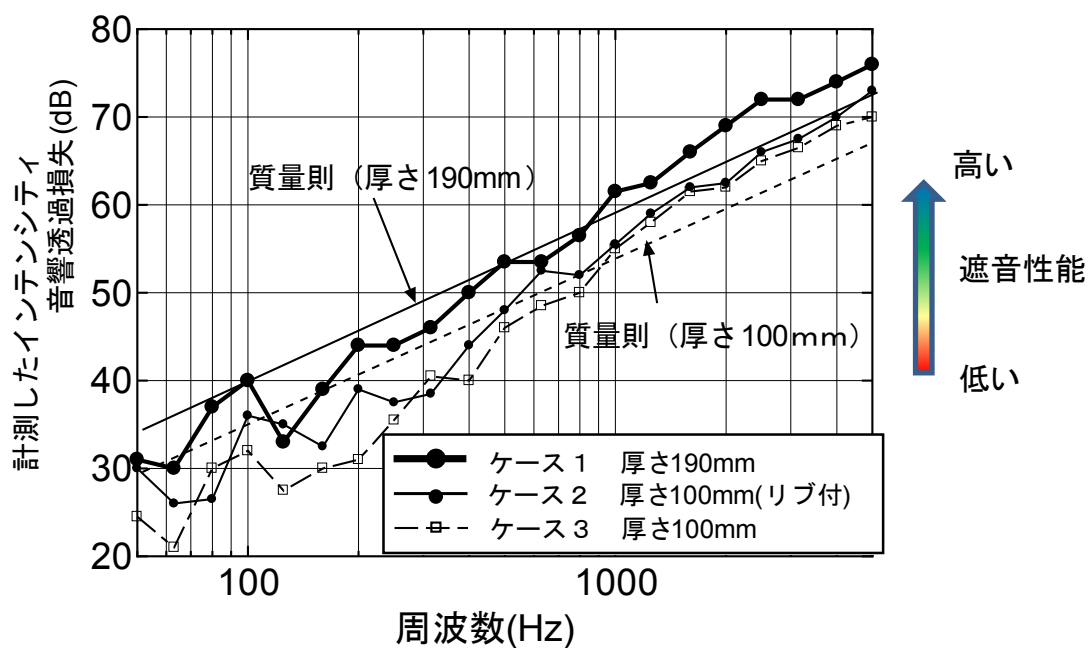


図-6.3.1.2 遮音試験の結果

6.3.2 数値解析結果

ここでは改良型フードの採用により、フード構造物音の原因となる構造物の振動が低減することを数値解析により確認する。解析に用いた改良型フードのモデルを図-6.3.2.1に示す。ボクセル要素は100 mm×100 mm×100 mmとしており、厚さ190 mm厚のフード部分は二要素、または、三要素で階段状に表現されている。高架橋及びびにフード各部位の材料定数は、前章で用いた値⁴⁾と同一としている。また、質量比例型の減衰とし、減衰定数を100 Hzで0.75%としている。列車速度は500 km/hで、加振力は前章で用いたものと同じである。

図-6.3.2.2に各測定点における列車走行(500 km/h)時の改良型フードにおける1/3オクターブバンド振動加速度レベルの予測値を、従来型フードと比較した結果を示す。また、各測定点におけるAPの振動加速度レベルの予測値を従来型フードと改良型フードで比較し、その低減量(dB)を表-6.3.2.1に示している。改良型フードにすることで、頂部を除いた全ての測定点でAPの振動加速度レベルが低減すると予測される。特に列車走行側のフード(側部、上方45度)における低減量が大きい。周波数別に見ると、加振力自体の主要な成分である100 Hzやそれより低い周波数における低減率は小さいものの、100 Hzを超える周波数においては、200 Hzのピーク値も含め大きく低減しており、図-5.2.2.3に示す現地計測(厚さの違うリブ部と一般部の振動加速度レベルの比較)と同様の傾向となっていて、厚さの薄い部分がなくなったことでフード全体が振動しにくくなったと推測される。一方、フード頂部については従来型のフードより厚さが低減しており、振動も増加すると予測される。桁の振動が低減すると予測されている点に関しては、変化する周波数領域から考えてフード全体の振動低減の影響が現れている可能性があるが、桁自体の解析精度の向上と併せ、今後更に研究を進めていく必要がある。

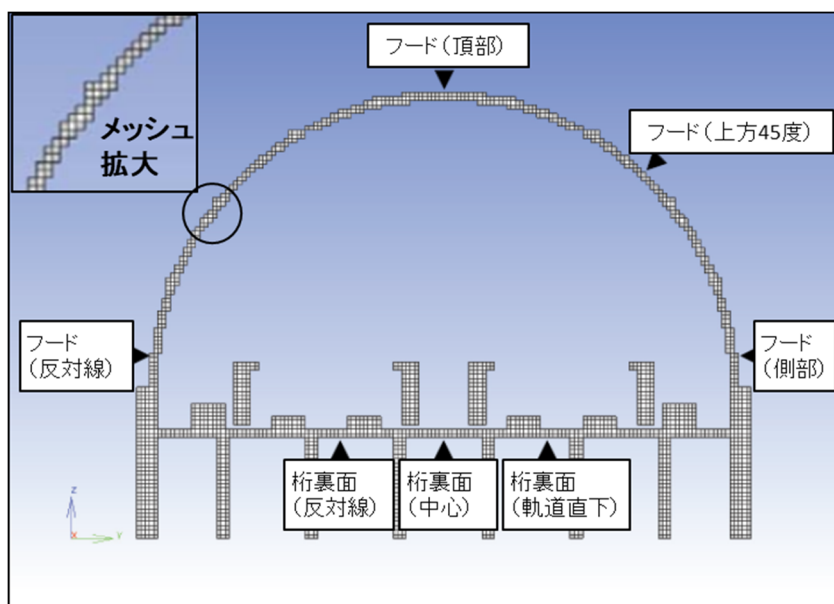


図-6.3.2.1 改良型フードの解析モデル

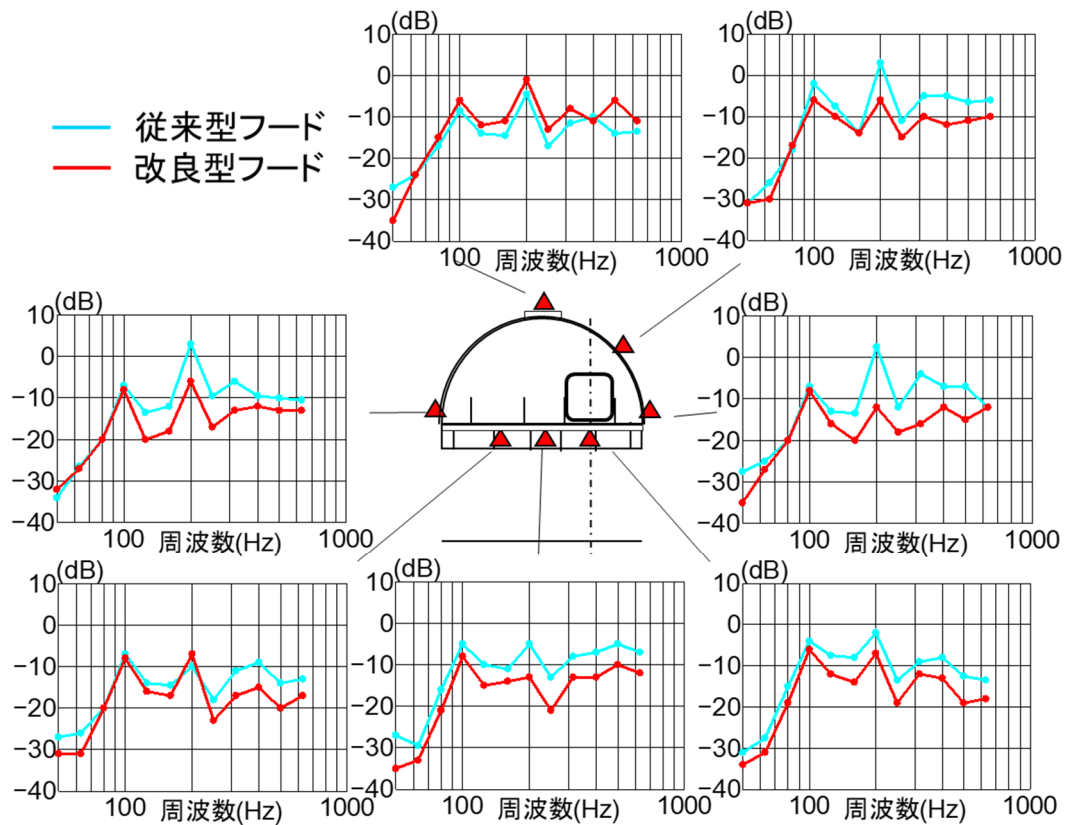


図-6.3.2.2 列車走行時の予測値の違い (1/3 オクターブバンド振動加速度レベル)

表-6.3.2.1 列車走行時の予測値の違い (AP 振動加速度レベル)

改良型フードと従来型フードのレベル差 (dB)							
桁			フード				平均
軌道直下	中心	反対線	側部 (走行線)	上部45度 (走行線)	頂部	側部 (反対線)	
-3.9	-5.0	-1.6	-7.2	-6.2	2.7	-6.0	-3.9

6. 4 山梨実験線への設置

前節までに提案した改良型フードについて、従来中間緩衝工を設置していた山梨実験線のA橋梁（図-2.2.1.2 参照）に設置し、性能を検証することとした。

設置した改良型フードの概要を図-6.4.1、写真-6.4.1 及び写真-6.4.2 に示す。詳細な構造の検討にあたり、従来型フードの開発で得られた知見も反映し、考慮した点は以下のとおりである。

- [1]施工性・運搬性を向上させるため、セグメントの円周方向における分割数を従来の2分割から3分割に変更し、構造上の弱点を減らすために分割位置をずらした千鳥配置を採用した。
- [2]セグメント間の線路方向の接合について、従来型フードでは固定せず隣り合うセグメントの間にはモルタルを充填していたが、保守性向上のため、概ね径間長毎にPC鋼線で一体化する方法を採用した。これにより、フードの構造物としての剛性が向上し、振動が低減することも期待される。線路方向のPC鋼線を収める部分にはリブを設置したが、これについては水平方向のラインを強調する点で景観面でのメリットにもなると考えられる⁵⁾。なお円周方向の結合については、従来型フードと同様にPC鋼線で緊張し、一体化する方法を用いている。

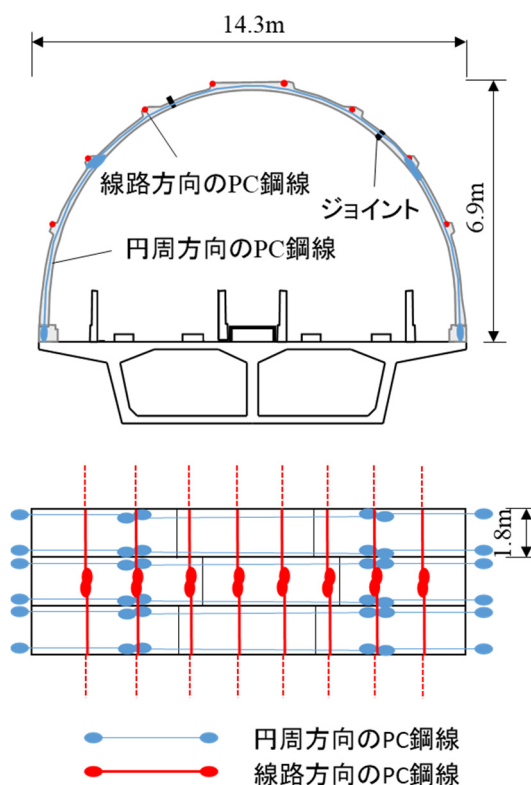


図-6.4.1 改良型フードの概要



写真-6.4.1 改良型フードの概要



写真-6.4.2 改良型フードの断面

6. 5 走行試験による検証

6.5.1 現地計測概要

改良型フードの騒音低減性能を評価するため、列車走行による沿線騒音計測、構造物振動計測を実施した。測定点は、図-6.5.1.1 のとおり設定した。沿線騒音計測には精密騒音計（RION,NL-32）を使用し、軌道中心から 12.5m、25 m 及び 50 m の点（地上高さは 1.2 m）における騒音を計測した。なお点 A は主に PCI 桁、点 B は PC 箱桁、点 C は RCT 桁の区間に対応している。フード内騒音の計測には風圧計（SSK,P325W200S）を用い、フード内表面 4 点において音圧を計測した。なお、新幹線鉄道騒音の環境基準⁶⁾に基づいて騒音計の周波数特性は A 特性を、動特性は SLOW を用いた。音響インテンシティレベルの計測は、音響インテンシティプローブ（マイクロホン：RION,SI-32）と音響インテンシティメータ（RION,SI-50）を用い、1 点で実施した。構造物振動の計測には圧電式振動加速度ピックアップ（RION,PV-85）を用い、測定位置は桁及びフード表面の計 11 箇所を設定した。フードの上方 45 度の点ではなく上方 30 度の点で測定を行うのは、線路方向のリブにより部分的に厚さが厚くなっている点を避けたためである。走行する試験車両は、4 両編成を用いた。

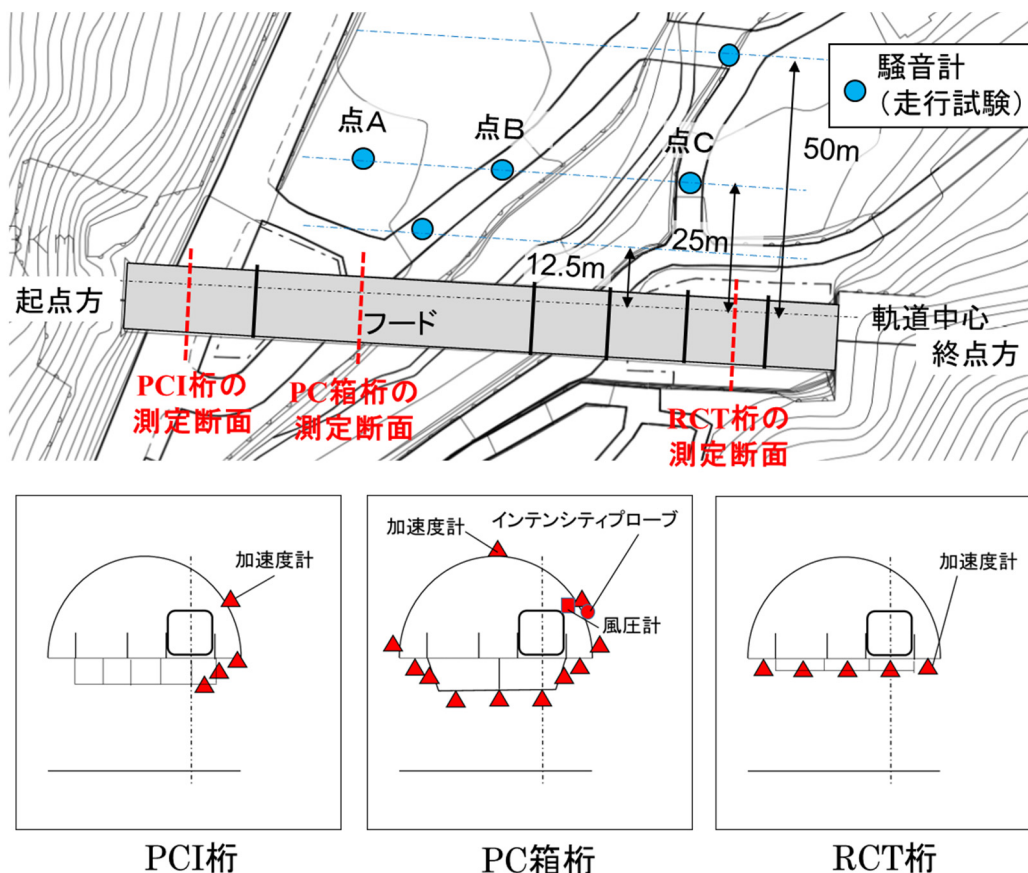


図-6.5.1.1 改良型フードの測定位置（走行試験）

また各音源について分離を図るため、図-6.5.1.2の測定位置でスピーカ試験及び加振器試験も併せて実施した。

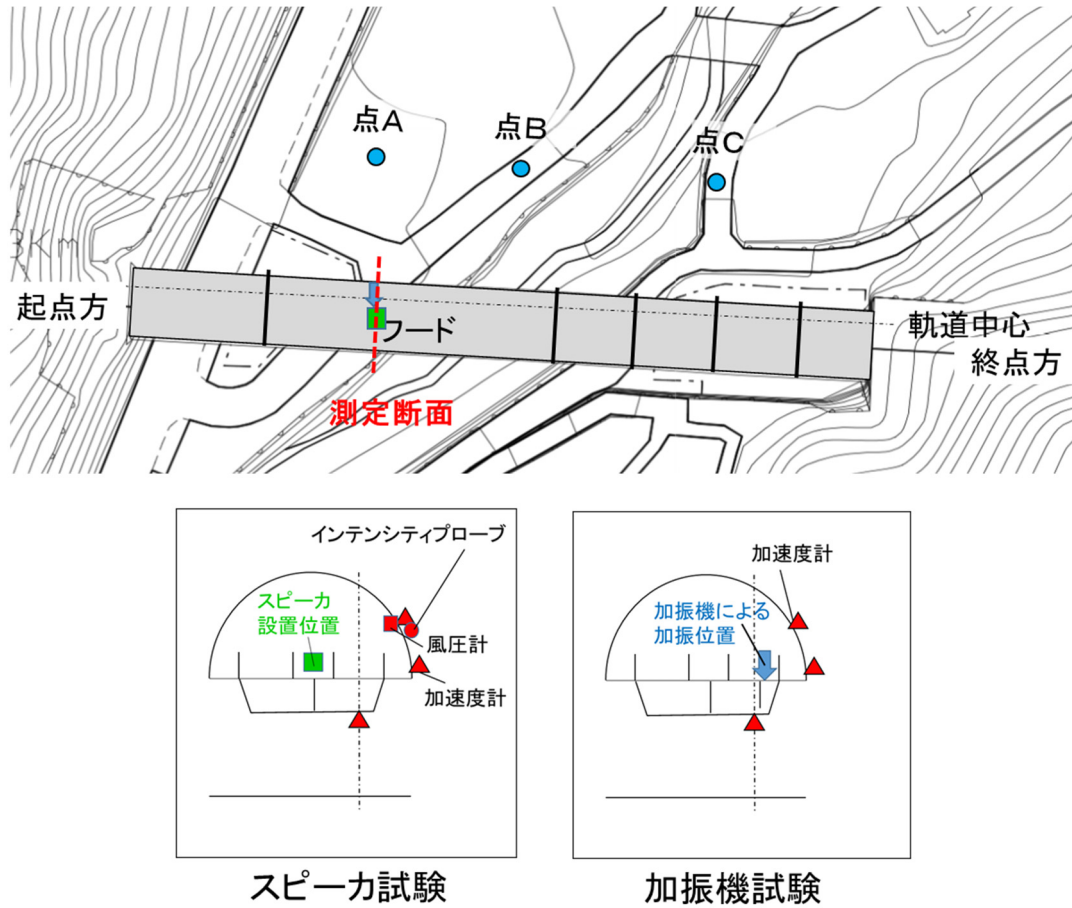


図-6.5.1.2 改良型フードの測定位置（スピーカ試験，加振機試験）

6.5.2 現地計測結果

500 km/h 列車走行時にフード内の各点で観測される 1/3 オクターブバンド A 特性音圧レベルを図-6.5.2.1 に示す。どの点においても同程度の大きさとなっており、従来型フードの計測結果と比較しても同程度かやや大きい程度であった。上方 30 度における測定値を走行速度別に整理した結果を図-6.5.2.2 に示す。従来型フードの場合と同様、各速度において主要な周波数帯域は 250 Hz～1.25 kHz である。また、AP 音圧レベルはほぼ速度の 6 乗に比例しており、フード内の騒音が空力音主体であることがわかる。

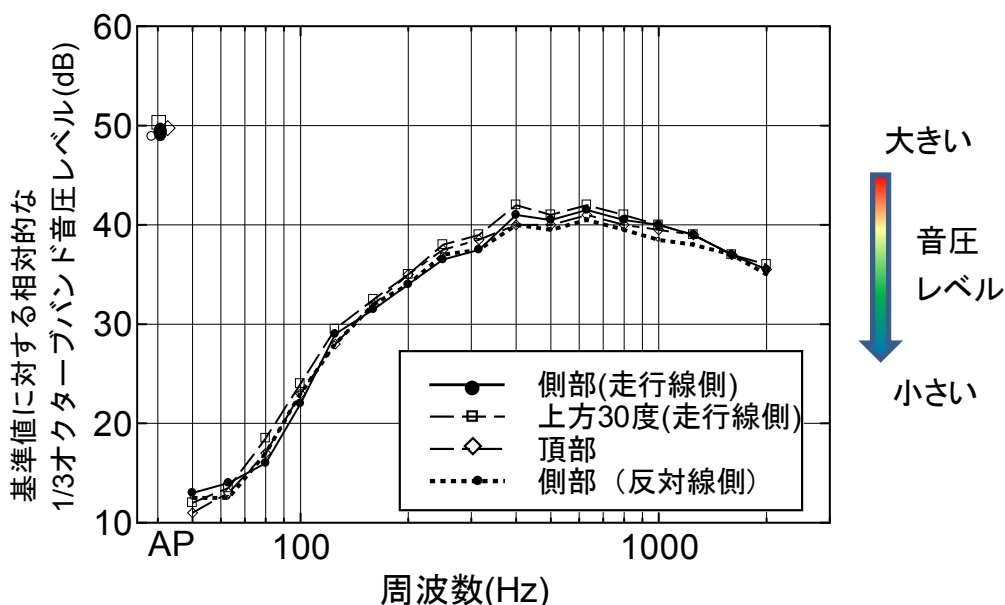


図-6.5.2.1 改良型フードにおけるフード内の各点の音圧レベル

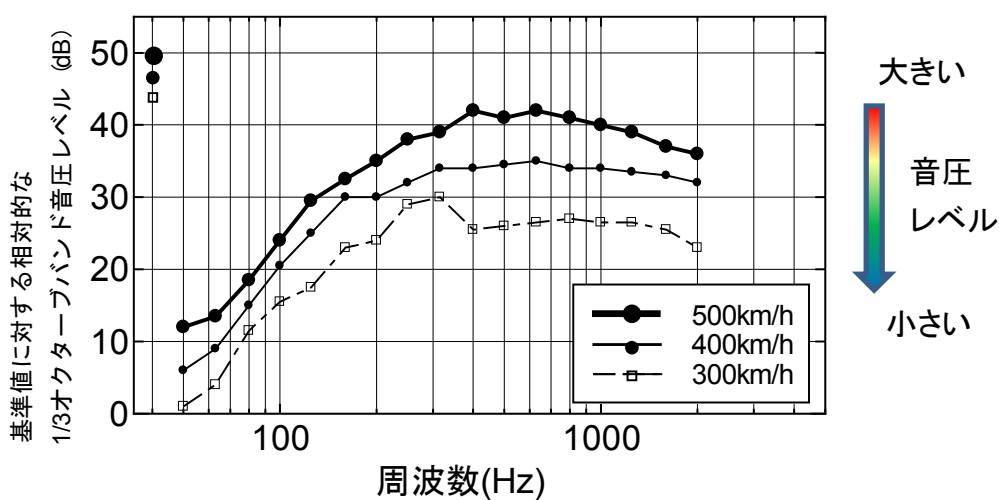


図-6.5.2.2 改良型フードのフード内音圧レベル（速度による違い：上方 30 度）

次に、軌道中心から 25 m 離れた各点で 500 km/h 走行時に観測される 1/3 オクターブバンド A 特性音圧レベルを図-6.5.2.3 に示す。地点による差はあるものの、500 Hz 以下の帯域において従来型フードよりも音圧レベルが低下しており、改良型フードによる沿線騒音低減効果が確認された。なお地点 A、B においては 200 Hz における低減量が小さくなっており、この点については 200 Hz で透過損失がほとんど変化していないことや桁（地点 A は PCI 桁、地点 B は PC 箱桁）の振動加速度レベルにほとんど差がないことが要因として考えられるが、今後さらに研究を進める必要がある。また地点 B における測定値を走行速度別に整理した結果を図-6.5.2.4 に示す。速度によって卓越する周波数帯は異なるが、主要な帯域は 500 km/h 走行時で 100~400 Hz であり、従来型フードとほぼ同じ傾向を示す。速度の変化に従いピーク周波数が変化することも従来型フードと同様に確認されており、列車

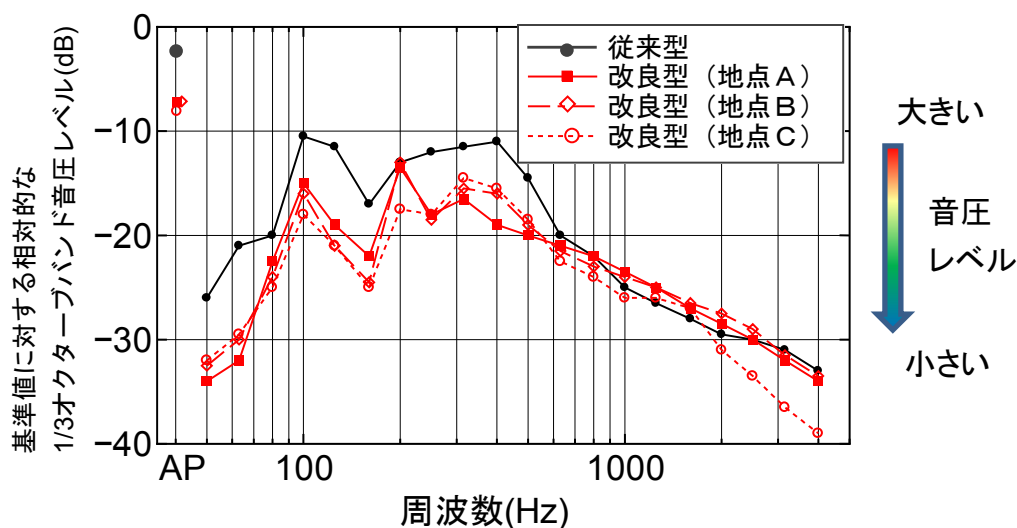


図-6.5.2.3 25m 点の音圧レベル（従来型フードと改良型フードの比較）

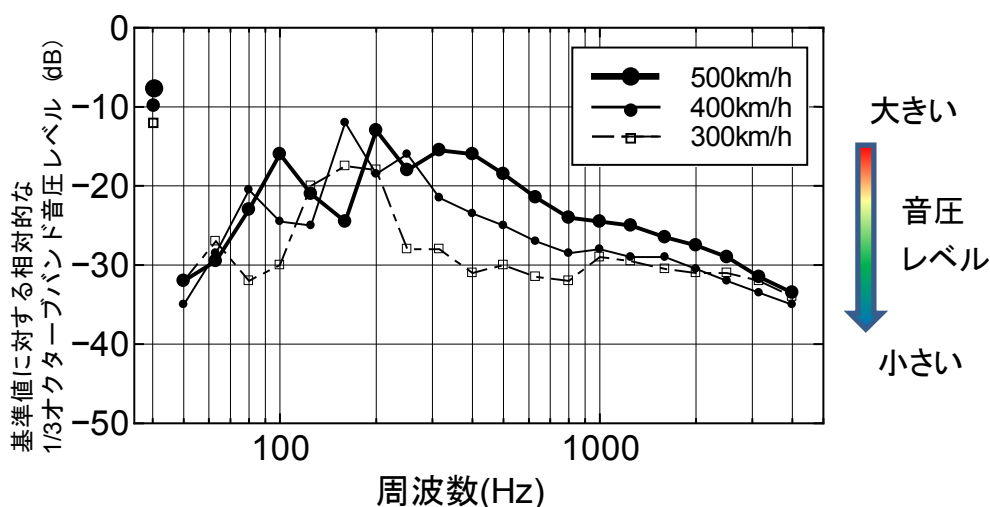


図-6.5.2.4 改良型フードの 25m 点の音圧レベル（速度による違い：地点 B）

走行時の加振力に伴う構造物音の影響が大きいことがわかる。AP音圧レベルは概ね速度の2.5乗に比例しており、構造物音の速度依存性を反映している⁸⁾。

改良型フードの遮音性能について確認するため、スピーカー試験の結果をもとに、後述する式7.3.1.1によってインテンシティ音響透過損失を算定し、従来型フードと比較した結果を図-6.5.2.5に示す。測定はフード内が拡散音場に近いことを確認したうえで、JIS A 1441-1に準じた方法で実施した。ほぼ全ての帯域において改良型フードの方が透過損失が大きく、従来型フードよりも遮音性能が高くなっていることがわかり、フード透過音についても従来型フードと比較して低減が図られたと考えられる。

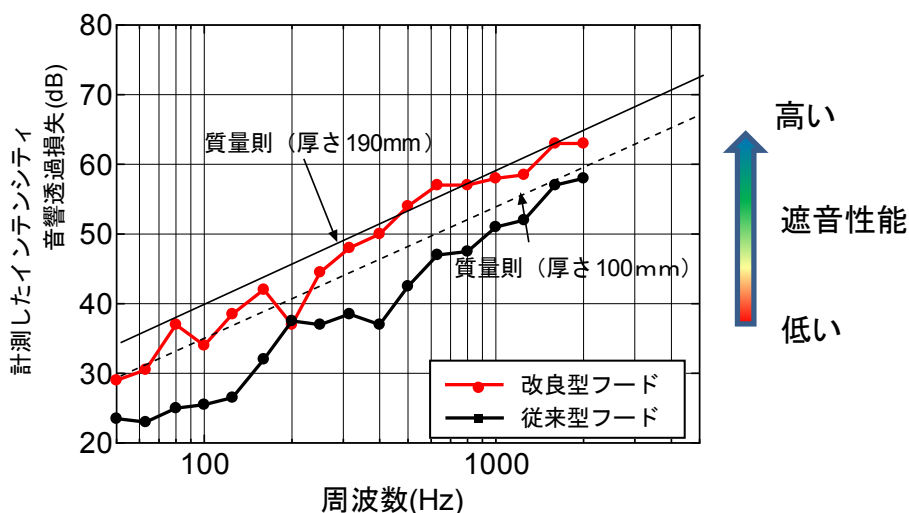


図-6.5.2.5 改良型フードの遮音性能（従来型フードとの比較）

地点 B (PC 箱桁部) において、500 km/h 走行時に桁の各点で 1/3 オクターブバンド振動加速度レベルを計測し、B 橋梁 (PCT 桁, 従来型フード) と比較した結果を図-6.5.2.6 に示

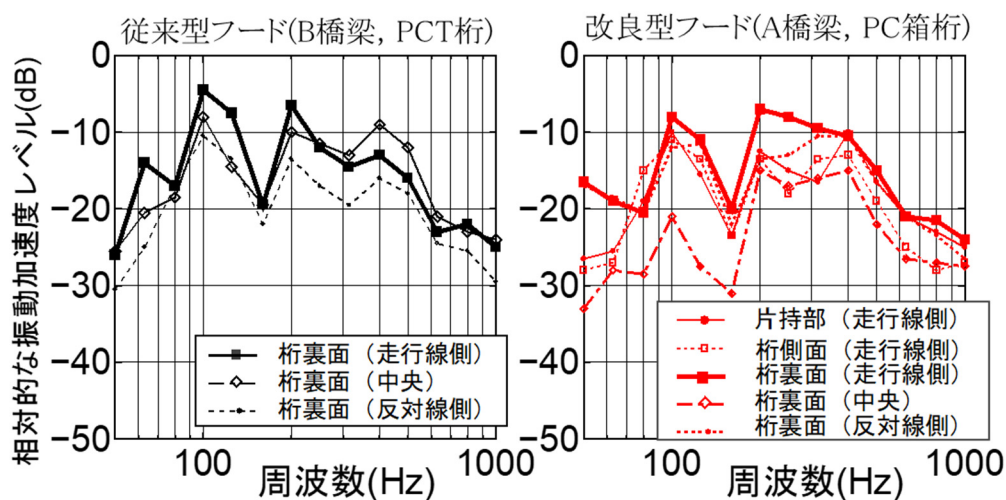


図-6.5.2.6 列車走行時の桁の各部における振動（従来型フードと改良型フードの比較）

す。主桁の直下で剛性の高い桁裏面の中央部を除き、振動加速度レベルは同程度となっている。また、100Hz と 200Hz のピークが卓越する点は図-6.5.2.3 と同一であり、沿線騒音が桁構造物音の影響を大きく受けていることを裏付けている。さらに A 橋梁のうち構造の違う桁で比較を行うと図-6.5.2.7 に示すとおり、PCI 桁部では一部を除いて PC 箱桁よりも小さくなっている一方、RCT 桁は PC 箱桁と同程度である。こうした桁構造の違いに伴う振動特性の違いについては、今後さらに研究を進めていく必要がある。

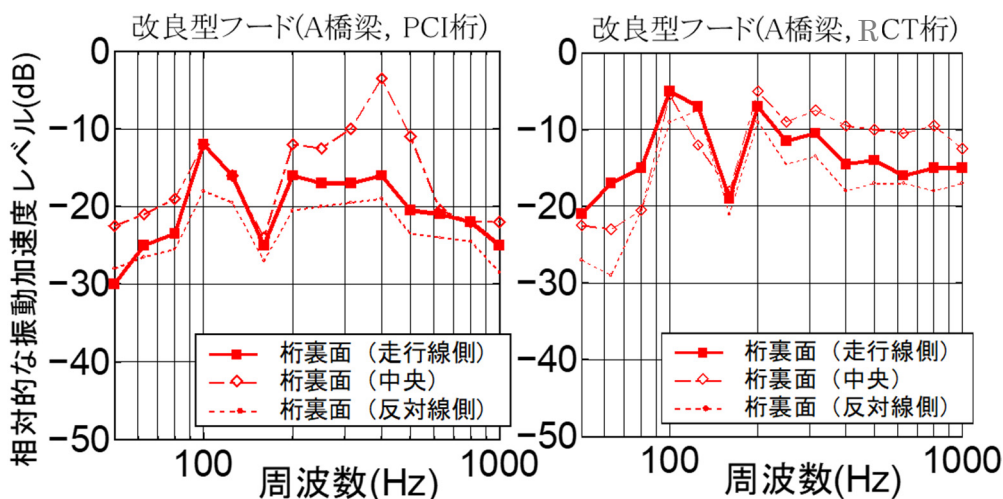


図-6.5.2.7 列車走行時の桁の各部における振動 (PCI 桁及び PCT 桁)

一方、地点 B (PC 箱桁部) において、500 km/h 走行時にフードの各点で同様に振動加速度レベルを計測し、B 橋梁 (PCT 桁、従来型フード) と比較した結果を図-6.5.2.8 に示す。従来型フードの段階で厚さの薄い側部等の振動が大きく頂部の振動は比較的小さくなっていたのに対し、今回の改良型フードでは断面位置によらず概ね同じ大きさであり、かつそのレ

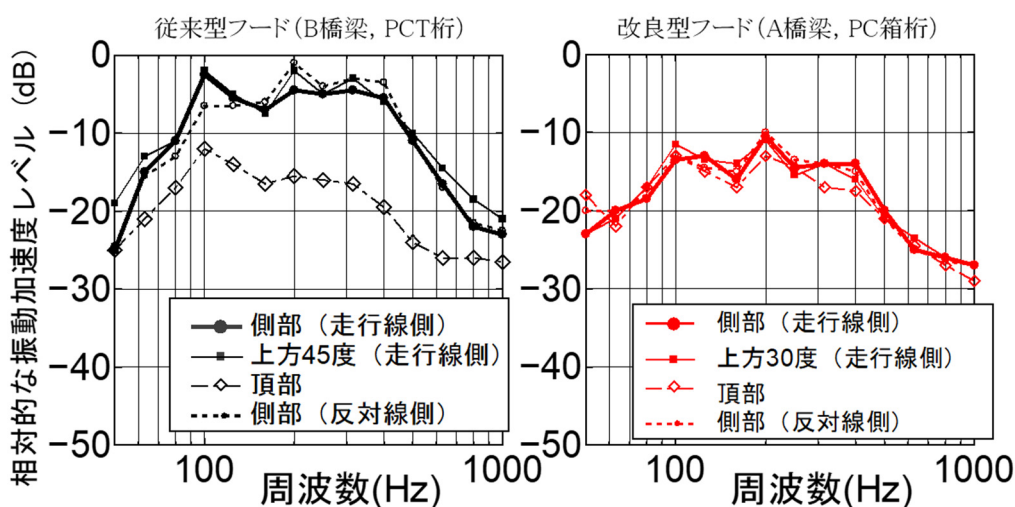


図-6.5.2.8 列車走行時のフード各部における振動 (従来型フードと改良型フードの比較)

ベルについては従来型フードに対して AP で 10 dB 程度低下しているため、フード重量を増やさない方向で断面の均一化を図った効果が振動低減の観点で確認されたと言える。また A 橋梁のうち構造の違う桁に設置されたフードで比較を行うと図-6.5.2.9に示すとおり、PCI 桁上のフードの振動加速度レベルは PC 箱桁上のフードと同程度となっている。

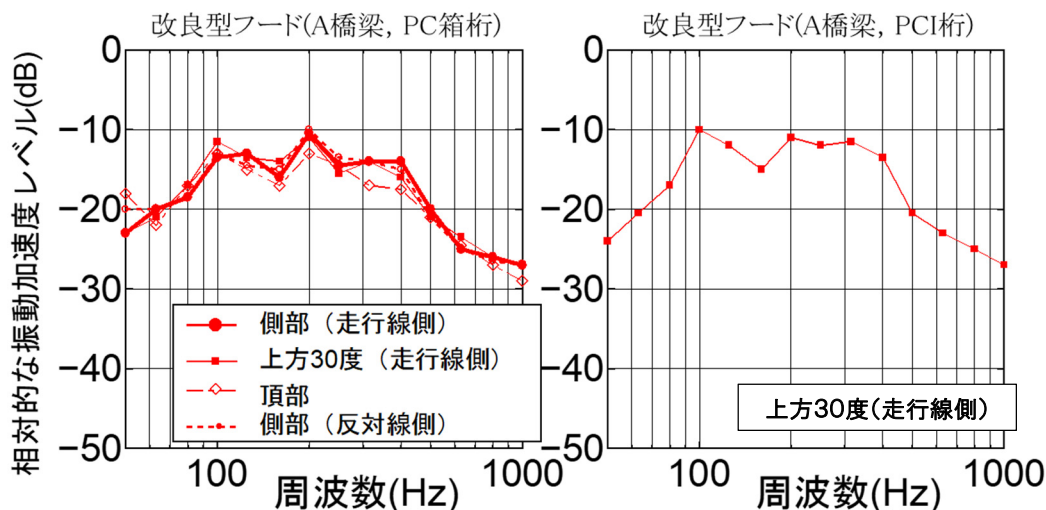


図-6.5.2.9 列車走行時のフード各部における振動 (PC 箱桁と PCI 桁の比較)

フードの振動が低減している点は、加振機試験の結果からも確認される。改良型フードを設置した A 橋梁において加振器試験を実施した際の、桁振動及びフード振動の計測結果を図-6.5.2.10に示す。従来型フードでは、63~125 Hz、250~400 Hz において桁からフードに伝達した振動が厚さの薄い部分で増幅する状況が確認されていた⁴⁾。一方、改良型フードでは箱桁で裏面が振動しやすく振動加速度が大きくなっている可能性はあるものの、125~160 Hz を除いて、全ての周波数で桁よりもフードの振動が低減している。こうしたことから、フード構造の改善によってフード振動の低減が図られ、フードから発生する構造物音についても低減が図られたことが推測される。

次章で後述する方法により全体の騒音をフード透過音、桁構造物音、フード構造物音の3つに分割し、それぞれの音の 1/3 オクターブバンド音圧レベルを推定した結果を図-6.5.2.11に示す。図-5.2.2.12 と図-6.5.2.11 を比較すると、従来型フード区間では3つの音源がほぼ同程度の寄与度となっていたが、改良型フード区間ではフード透過音及びフード構造物音の音圧レベルが低減している。桁構造の違い(従来型は PCT 桁、改良型は PC 箱桁)により影響を受けている可能性はあるものの、桁構造物の寄与度が相対的に大きくなっていることが確認され、フード構造の改善による効果が得られたと評価される。

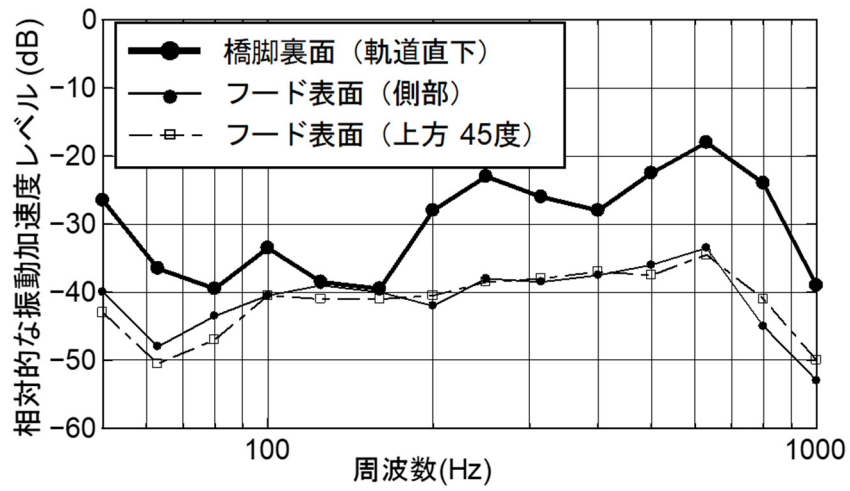


図-6.5.2.10 改良型フードにおける加振機試験の結果

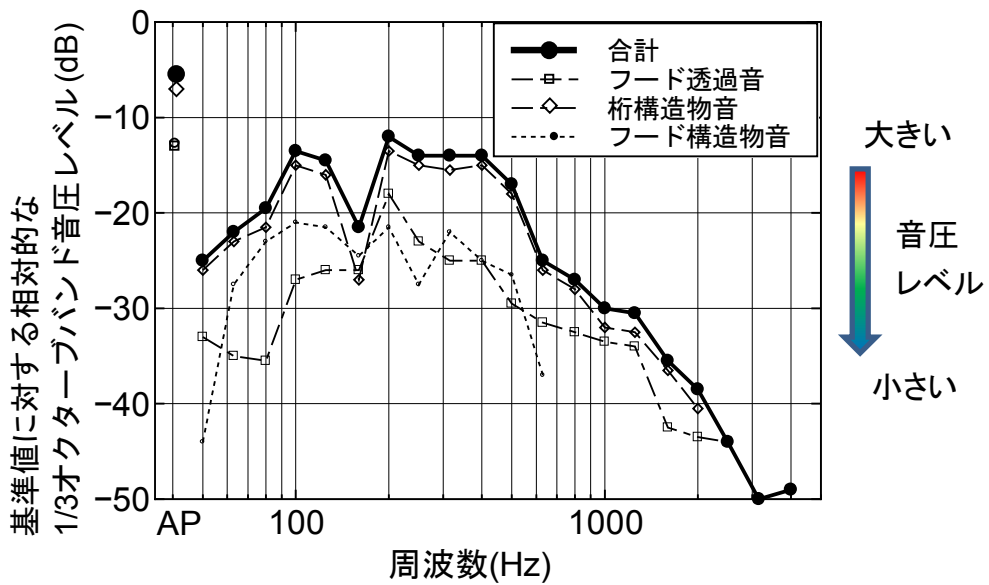


図-6.5.2.11 各音源による評価点の音圧レベルの推定値 (改良型フード)

なお、列車走行に伴う微気圧波及び空気振動についても確認を行った。図-6.5.2.12 の位置において、トンネル内の圧力変動を絶対圧計（SSK DP8H-02）により、空気振動を超低周波音圧レベル計（RION XN-12A）により測定した。車両は4両編成車両、速度は500 km/h である。圧力変動測定の結果を図-6.5.2.13 に示す。列車周りの圧力場により、トンネル内及びフード内で圧力波が観測されているが、その大きさについてはフード通過の前後でほとんど変化がなく、微気圧波の原因となる新たな圧力波が発生しないことが確認された。また、軌道中心から50 m 地点における空気振動の測定結果を図-6.5.2.14 に示す。最大でも1 Pa 以下におさまっており、建物のガタつきに関する目安値である「民家近傍におけるピーク値が20 Pa 以下」⁹⁾を大きく下回っている。



図-6.5.2.12 圧力変動，空気振動の測定位置

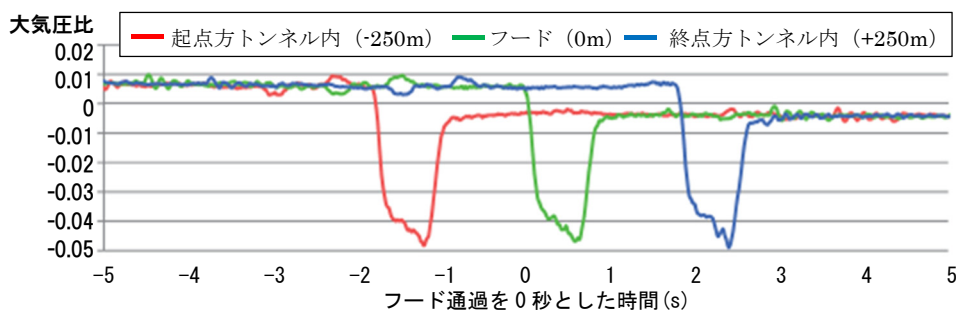


図-6.5.2.13 圧力変動の測定結果

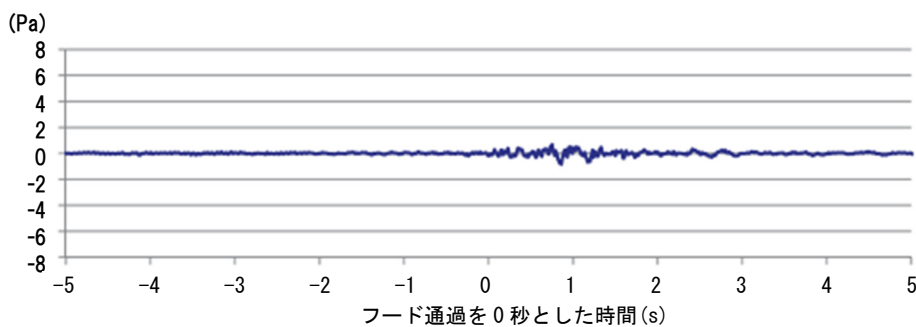


図-6.5.2.14 空気振動の測定結果

6.5.3 環境保全の目標値との比較

こうした結果を踏まえ、軌道中心から25mの点におけるAPの騒音レベル測定結果及びこれに基づいて算定した営業線での16両編成車両への換算結果を図-6.5.3.1に示す。なお、16両編成車両への換算の方法については、次章で述べる⁴⁾。プロットした実測値は4本の列車における測定値の平均を表しており、その上下の線は測定値の最大と最小を表している。本研究により改善を図った改良型のフードを、住居等が多く存在する区間における標準のフードとして適用していくことにより、営業線の500km/h走行時において環境保全の目標値を十分に下回ることが確認された。

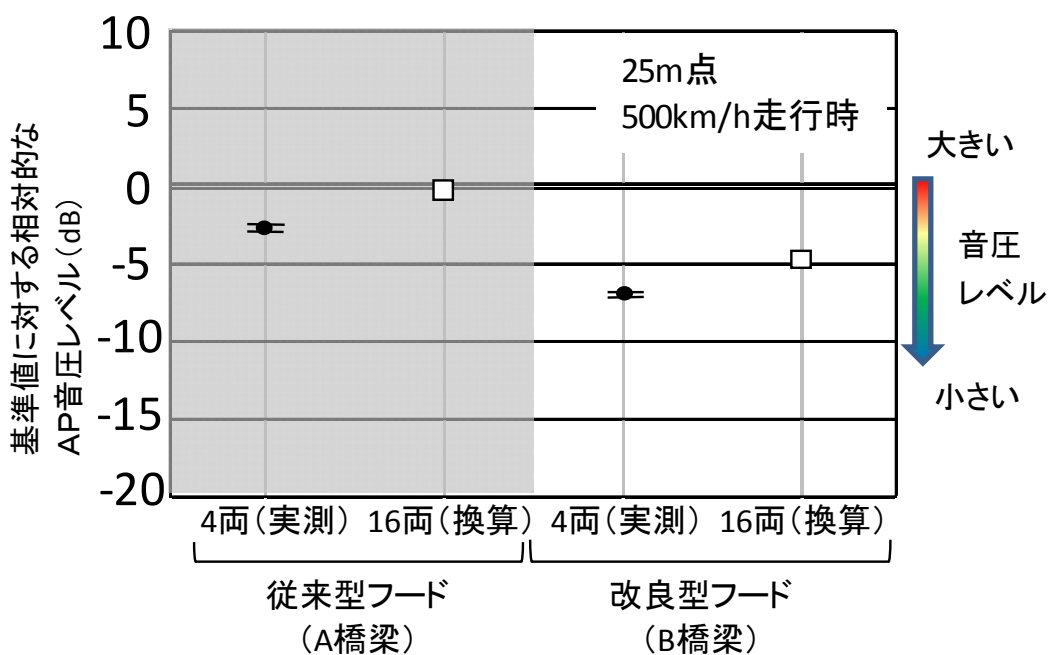


図-6.5.3.1 実測結果と環境保全の目標値との比較

6. 6 まとめ

本章においては、前章までの測定結果等を踏まえ、構造物音の低減を主な目的としたフード構造の改善を検討し、前章までに試験を行ったフードの一般部における厚さが 100 mm、リブ部は 300 mm となっていたところ、総重量は変えずに全体として 190 mm に均一化する構造を提案した。そのうえで提案したフードについて、数値解析及び定置試験を実施してフードの透過音及び構造物音の低減性能を確認した後、山梨実験線の橋梁に実際に設置して、各音源（フード透過音、桁構造物音、フード構造物音）毎の音圧レベル、及び評価点における騒音レベルがどの程度低減されるかについて検証した。以下に、本章で得られた知見をまとめる。

- (1) 定置試験（遮音性能試験）の結果、厚さ 190 mm のフードとすることで、従来型の厚さ 100 mm（リブ部は 300 mm）より高い遮音性が得られると予測される。
- (2) 数値解析の結果、厚さを 190 mm に均一化したフードとすることで、従来型のフードと比較して 100 Hz を超える周波数でフードの振動が低減すると予測される。
- (3) 本研究で提案した改良型のフードを山梨実験線に設置して走行試験による計測を行った結果、地点による差はあるものの、500 Hz 以下の帯域において従来型フードよりも音圧レベルが低下している。また、桁構造が異なる橋梁における比較ではあるが、フードの振動が大幅に低減していることが確認される。
- (4) スピーカ試験や加振機試験の結果に基づいて音源の分離を図った結果、改良型フード区間ではフード透過音及びフード構造物音の寄与度が低減し、桁構造物の寄与度が相対的に大きくなっていることが確認される。
- (5) 営業線で 16 両編成車両が 500 km/h で走行する際の騒音レベルを算定した結果、本研究で提案した改良型のフードを住居等が多く存在する区間における標準のフードとして適用していくことにより、営業線の環境保全の目標値を十分に下回る。

今後は、

[1]軌道中心からの距離や構造物高さ等の条件を与えた場合に、騒音レベルの予測評価を適切に実施できる手法を確立すること

[2]運搬も考慮して分割単位を変更するなどセグメント構造を工夫することや、数値解析モデルの改善も進めたうえで構造物高さ等、場所毎の条件に応じてフードの構造を最適にすることなどにより、コスト低減を図ること

の 2 点が重要であると考えている。[1]についてはこれまで実施してきた走行試験の結果等をもとに、次章で整理することとした。

参考文献

- 1) 山崎幹男, 加藤覚, 若原敏裕, 岡崎真人, 上野眞, 藤野陽三: 超高速鉄道トンネル内の圧力変動に対する覆工構造の設計, 土木学会論文集, No.752/I-66, pp.119-131, 2004.1.
- 2) 日本工業規格: JIS A 1441-1 音響—音響インテンシティ法による建築物及び建築部材の空気音遮断性能の測定方法—第1部: 実験室における測定, 2007.
- 3) 日本音響学会編: 音響工学講座 騒音・振動 (上), コロナ社, 1978.3.
- 4) 永長隆昭, 荻田倫之, 大森洋志, 野澤剛二郎, 土肥哲也, 長倉清, 藤野陽三: 超高速鉄道の騒音対策設備に係る構造物音の低減及び騒音予測手法の開発, 土木学会論文集 A1, 74(1), pp.89-108, 2018.1.
- 5) 東海旅客鉄道株式会社: 中央新幹線 (東京都・名古屋市間) 環境影響評価書, 8-5-1 人と自然との触れ合い-景観, 2014.8.
- 6) 環境庁告示第 46 号: 新幹線鉄道騒音に係る環境基準について, 1975.7.29
- 7) 森藤良夫: 新幹線車両の空力騒音, 騒音制御, Vol.14, No.5, pp.13-16, 1990.
- 8) K.Nagakura, Y.Zenda: Prediction model of wayside noise level of Shinkansen, Wave2002, Balkema Publishers, pp.237-244
- 9) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構: トンネル坑口緩衝工の設置基準, 山岳トンネル設計施工標準・同解説, 2008.4.

第7章 フードの振動を考慮した 騒音予測手法の提案

7. 1 はじめに

前章までの検討において、改良型のフードを山梨実験線に実際に設置し、走行試験により従来型フードより騒音レベルが低下することを実証するとともに、改良型のフードを住居等が多く存在する区間における標準のフードとして適用していくことにより、営業線の環境保全の目標値を十分に下回ることを確認した。一方で、目標値を下回るような状況にあっても、環境影響評価を適切に進めていくためには、軌道中心からの距離や構造物高さ等の条件を与えた場合に、騒音レベルの予測評価を適切に実施できる手法を確立することが求められるが、フードを考慮した検討がこれまで行われていない。

騒音を予測する際にベースとなる、個々の音源の考え方やそれらの分離・推定方法については、これまで各章で述べてきた、従来型フードや改良型フードの検討段階で順次検討してきたものであるが、本章ではそれらを一連の体系として整理し、騒音予測の手法として構築する。

既存新幹線における騒音予測手法¹⁾は、その騒音を以下の4つの音源要素に分類し予測を行っている。

- (a)車両下部騒音 (転動騒音、ギヤ騒音、空力騒音)
- (b)構造物騒音 (コンクリート高架橋の場合のみ考慮する)
- (c)車両上部空力音 (先頭部空力音を含む)
- (d)集電系騒音 (空力騒音、スパーク音)

これらの音源のそれぞれを離散点音源でモデル化し、音源位置とパワーレベルを、音源要素、軌道・構造物条件、車両種別および列車速度ごとに定めることにより騒音レベルを予測している。

一方、超高速鉄道は磁気浮上走行であり、地上と非接触で走行することから、上記4音源のうち(a)と(d)は発生しない。しかし、非接触での走行であっても列車荷重は車上の超電導磁石とガイドウェイに設置される浮上案内コイル相互間の電磁力によって支持されており、列車の走行に伴ってこの電磁力が地上コイルを加振するため、既存新幹線と同様に(b)の構造物騒音は発生する。そのため、超高速鉄道の騒音については(b)及び(c)を音源として予測を行うこととなるが、フード区間においては、フードの内部が拡散音場に近い状況となっていることや、本研究で明らかになった通り、桁のみならずフード自体からも構造物音が発生することを考慮のうえでモデルを構築する必要がある。

7. 2 騒音予測モデルの構築

7.2.1 前提条件

本研究における騒音予測の前提条件は表-7.2.2.1のとおりとする。なお、この条件以外の場合においても、各音源のパワーレベルが走行試験結果等によって得られた場合には、同様に予測を行うことが可能と考える。

表-7.2.2.1 騒音予測の前提条件

項目		条件
車両		L0系車両 16両編成
地上設備	構造物	標準桁（スパン37.8 mのPC箱桁）
	環境対策設備	防音防災フード 内空断面積74 m ²
走行条件	速度	500 km/h, 400 km/h, 300 km/h
	走行形態	浮上走行
標準的な 予測点	距離	軌道中心から25 m
	高さ	地上1.2 m

7.2.2 音源の分類

超高速鉄道におけるフード区間での騒音予測モデルとして、既存新幹線の予測モデル¹⁾を参考に、フードに起因する構造物音の影響を考慮して、図-5.2.2.9に示した3つの音源から構成されるモデルを設定した。各音源の考え方は以下の通りである。

- [1]フード透過音(*LSF*)：列車走行によりフード内で生じる空力音などがフードを透過し、外部に放射される音（上記(c)に相当）
- [2]桁構造物音(*LSS*)：列車走行により加振されたガイドウェイの振動が桁に伝達し、桁下面から音波として放射される音（上記(b)に相当）
- [3]フード構造物音(*LT*)：列車走行により加振されたガイドウェイの振動が、桁を通じてフードに伝達し、フード表面から音波として放射される音（上記(b)に相当するが、フードに特有な音である）

7.2.3 騒音予測手順

山梨実験線での計測データに基づき，上記の3種の音源を考慮した騒音予測手法を検討した．予測手順を図-7.2.3.1に示す．

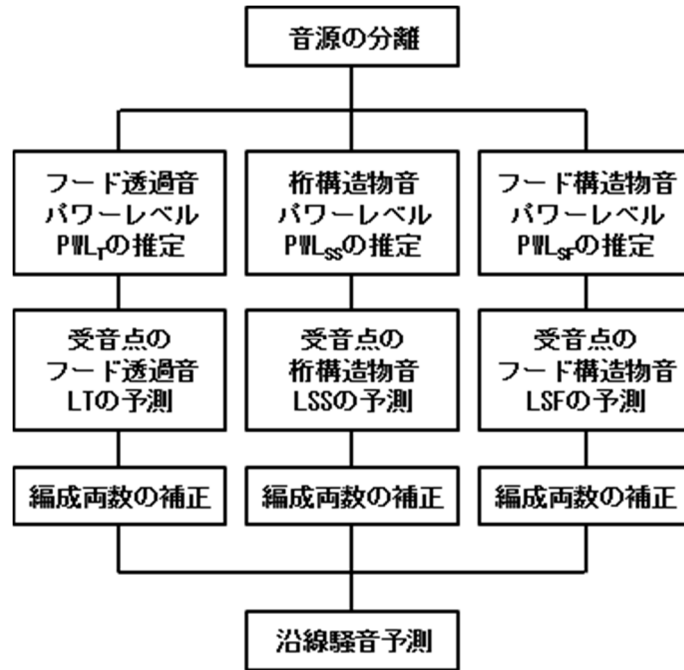


図-7.2.3.1 沿線における騒音レベルの予測手順

まず次節に示す方法で1/3オクターブバンド毎に各音源のパワーレベルを算出する．そのうえで，図-7.2.3.2のとおり回折減衰と距離減衰を考慮した伝播理論式を用い，直達する音と地面で反射する音を合成して，評価点である走行線中心から25 m地点における音源毎の1/3オクターブバンド音圧レベルを求めた．地面における反射については地表面効果²⁾による減衰を無視し，鏡像を考慮して評価した．また回折減衰量については点音源に対する半無限障壁の減衰値（前川チャート³⁾）を用いることとし，計算を簡便にするため，図-7.2.3.3のとおりフード部については周方向に20分割したうち，音源に対して1つ受音点側に寄った要素番号の位置で回折すると考え，算出した．各音源についての予測式を式7.2.1～7.2.3に示す．

$$L = 10 \log_{10} (10^{L_a/10} + 10^{L_b/10}) \quad 7.2.1$$

$$L_a = 10 \log_{10} \left(\sum_i (10^{((PWL(i) - 20 \log_{10} r_a(i) - 11 + \Delta L_{ad}(i))/10)}) \right) \quad 7.2.2$$

$$L_b = 10 \log_{10} \left(\sum_i (10^{((PWL(i) - 20 \log_{10} r_b(i) - 11 + \Delta L_{bd}(i))/10)}) \right) \quad 7.2.3$$

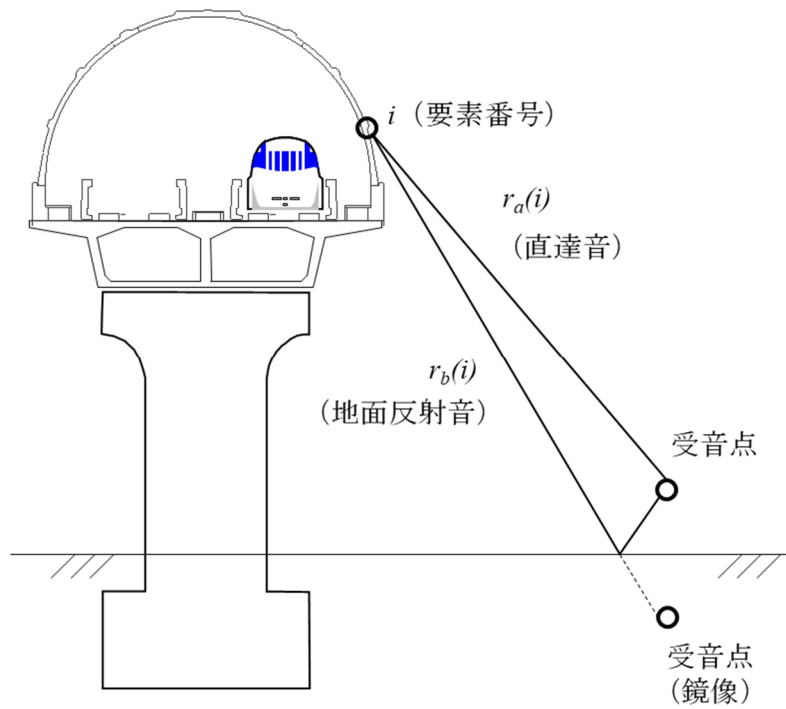
ここに，

L : フード透過音，桁構造物音，フード構造物音の音圧レベル (LT,LSS,LSF) [dB]

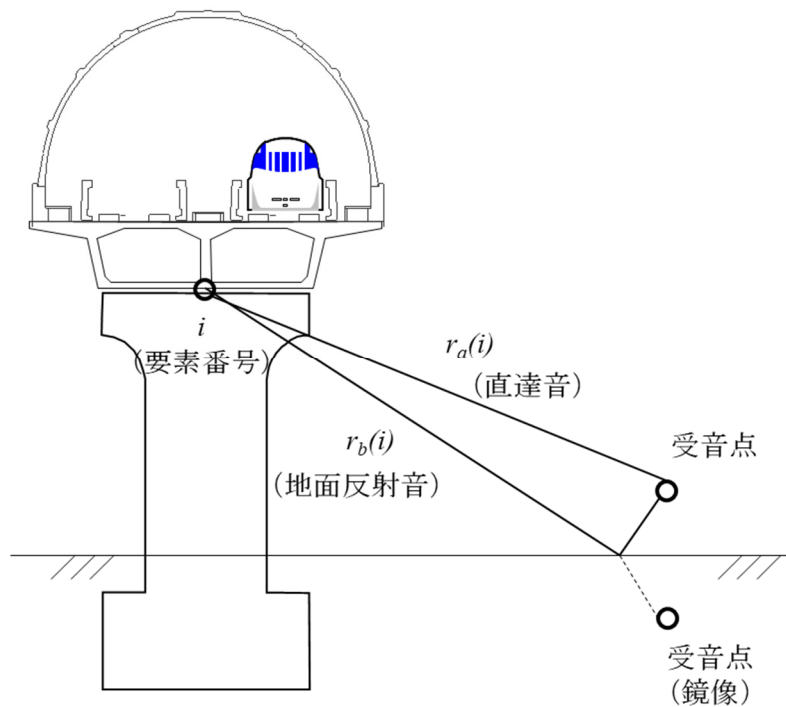
- L_a : 直達音の音圧レベル[dB]
- L_b : 地面反射音の音圧レベル[dB]
- i : 点音源の要素番号
- $PWL(i)$: フード透過音, 桁構造物音, フード構造物音のパワーレベル[dB]
- $\Delta L_{ad}(i)$: 音源から受音点までの回折効果に関する補正量 (負値) [dB]
- $\Delta L_{bd}(i)$: 地面反射音の音源から受音点までの回折効果に関する補正量 (負値) [dB]
- $r_a(i)$: 音源から受音点までの距離[m]
- $r_b(i)$: 地面反射音の音源から受音点までの距離[m]

その後、算定した受音点における各音源からの音圧レベルについて、編成両数の補正を加える。軌道中心から25mの地点(点B)において500 km/h走行時に測定される騒音の時刻歴波形をSLOWの動特性を考慮して示すと、図-7.2.3.3のとおりとなる。試験車両は4両編成車両であるため継続時間が短くなっているが、営業線では16両編成車両の走行を予定しているため、音源の数が増加して騒音の継続時間が長くなり、SLOWの動特性を加味すると観測される騒音のピークレベルが大きくなるため、その点を考慮するものである。

最終的には、編成車両の補正を行った各音源からの音圧レベルを合計し、評価点の騒音レベルを算出する。



(a)フード透過音・フード構造物音



(b)桁構造物音

図-7.2.3.2 受信点における各音源ごとの音圧レベルの算定

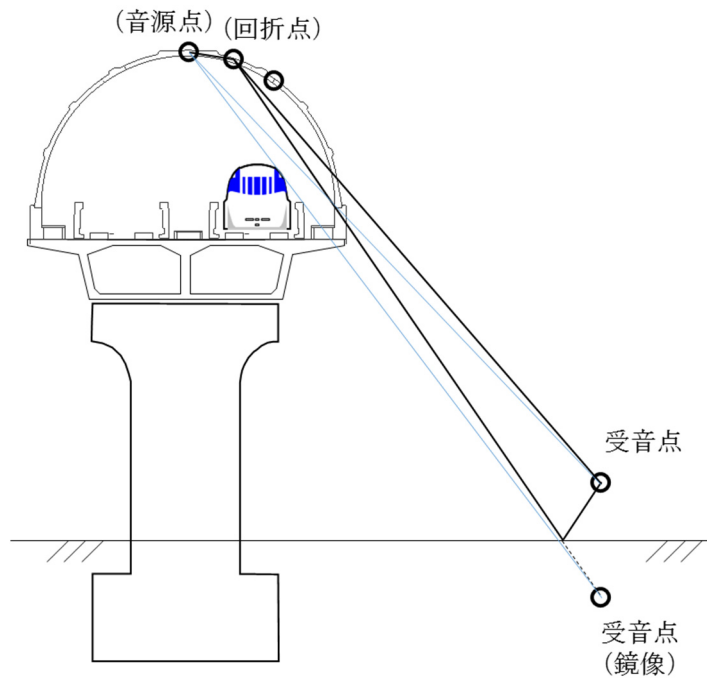


図-7.2.3.3 回折減衰の経路差

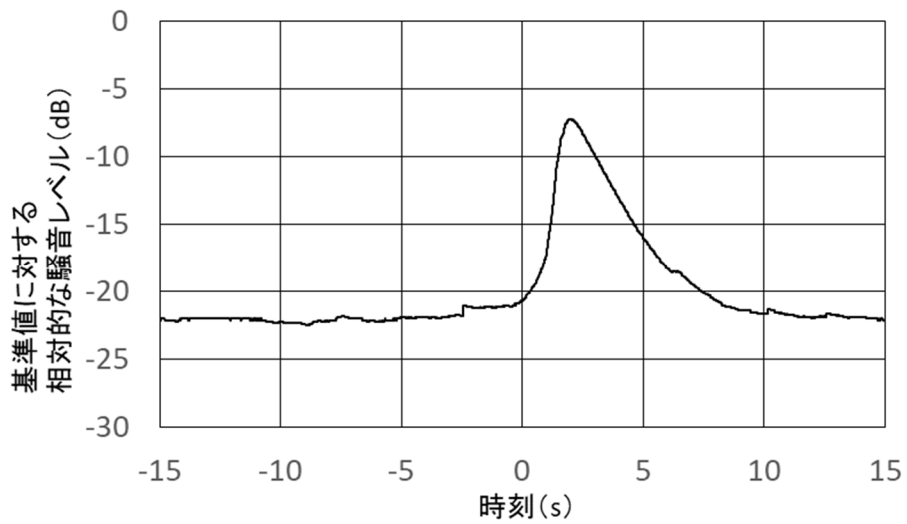


図-7.2.3.4 25m点における500km/h走行時の騒音の時刻歴波形
(4両編成車両)

7. 3 音源パワーレベルの推定

7.3.1 フード透過音

フード透過音は、フード内の音圧レベルとコンクリート製フードの遮音性能から算出できる。列車走行時にフード透過音を測定した場合は構造物音の影響が含まれることから、図-6.5.2.5に示すスピーカ試験の結果に基づいて式7.3.1.1からフードの遮音特性 R_l [dB]を計算し、使用する。

$$R_l = L_{p,isp} - 9 - SIL_{osp} \quad 7.3.1.1$$

ここで、

$L_{p,isp}$: スピーカー試験時のフード内壁面音圧レベル[dB]

SIL_{osp} : スピーカー試験時のフード外での音響インテンシティレベル[dB]

式7.3.1.1中の9 dBについて、遮音性能は本来フード内壁面に入射する音響インテンシティレベル SIL_i と外に透過した音響インテンシティレベル SIL_o の差で求めるが、 SIL_i はフード内の反射音などの影響で直接計測することが出来ない。そのためフード内を拡散音場と仮定し、フード壁面音圧レベル $L_{p,isp}$ から3 dB (壁に入射したエネルギーは反射によって2倍になることから理論的に3 dBとなる)を差し引いてフード内の平均音圧レベルを求め、そこから更に6 dB差引いて(合計9 dB)フード壁面に入射する音響インテンシティレベル SIL_i を求める⁴⁾。

次に、列車走行時にフード内で観測される壁面音圧レベル $L_{p,ir}$ [dB]より、フード透過音の音響インテンシティレベル SIL_{ftr} [dB]を式7.3.1.2のとおり算出する。計算に使用する $L_{p,or}$ は各部位で音圧が同程度のため上方30度の値で代表し、速度毎に図-6.5.2.2のとおりとする。

$$SIL_{ftr} = L_{p,ir} - 9 - R_l \quad 7.3.1.2$$

沿線騒音を算出するための音源の設定にあたっては、図-7.3.1.1のとおりフード表面を1 m×1 mのメッシュに区分し、式7.3.1.2にて算定した音響インテンシティレベルと各メッシュの面積との積から音響パワーレベルを設定する。なお、音源については既存新幹線の予測手法¹⁾を参考に無指向性とする。

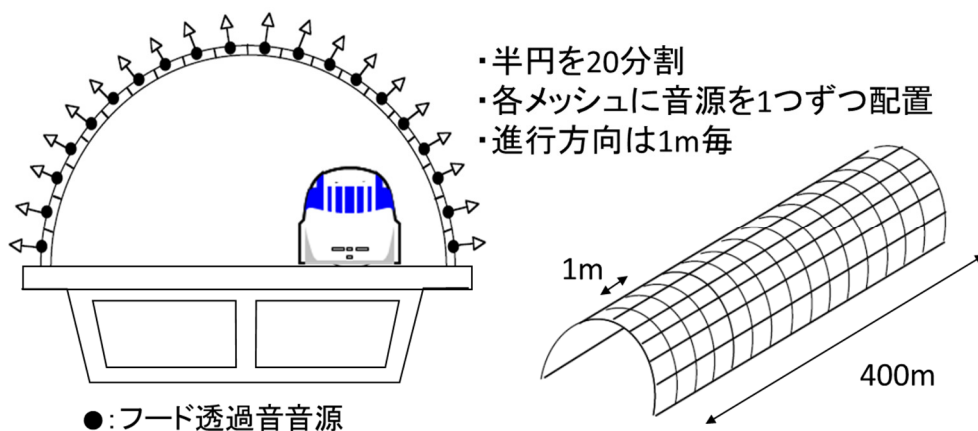


図-7.3.1.1 フード透過音の音源配置

7.3.2 桁構造物音

まず、道路橋の低周波音に関する研究事例⁵⁾を参考に、桁構造物音の音響インテンシティレベルを、桁表面に設置した圧電式振動加速度計による計測データと放射効率 ΔL （構造物表面の振動加速度レベルとその外側で計測される音響インテンシティレベルの差）から式7.3.2.1のとおり算出する。

$$SIL_{sr} = VAL_{sr} + \Delta L \quad 7.3.2.1$$

ここに、

SIL_{sr} ：桁裏面から放射される構造物音の音響インテンシティレベル[dB]

VAL_{sr} ：桁裏面全計測点の平均振動加速度レベル[dB]

ΔL ：振動加速度レベルと放射される音響インテンシティレベルとの差（補正量）[dB]
改良型フードが設置されたA橋梁を対象にした構造物振動の計測については、前章に示すとおり実施した。桁裏面の測定値を用いたのは、振動加速度のレベルが他の箇所比べて大きいこと、振動する面の面積が大きいことから、構造物音への影響が大きいと判断したことによる。計算に使用する VAL_{sr} は標準桁であるPC箱桁における3点の測定値の平均を用いることとし、速度毎に図-7.3.2.1のとおりとする。

また補正量 ΔL の算出にあたっては、本来桁裏面での計測データを用いるべきであるが、桁下面と地面との間の多重反射の影響を排除できないことから、式7.3.2.2のとおり、フード上部30度での振動計測点とその外側で測定した音響インテンシティのデータ（列車走行時）を用いて、図-7.3.2.2に示すとおり設定する。

$$\Delta L = SIL_{f30r} - VAL_{f30r} \quad 7.3.2.2$$

ここに、

SIL_{f30r} ：フード上方30度の音響インテンシティレベル[dB]

VAL_{f30r} ：フード上方30度の振動加速度レベル[dB]

次に、式7.3.2.1に基づいて算定した音響インテンシティレベル SIL_{sr} をもとに桁下面の面積を考慮した上で、図-7.3.2.3のとおり列車進行方向1 m毎に構造物中心に1点の音源として桁構造物音パワーレベルを配置する。配置にあたっては既存新幹線の予測手法¹⁾を参考とし、音源については無指向性とした。

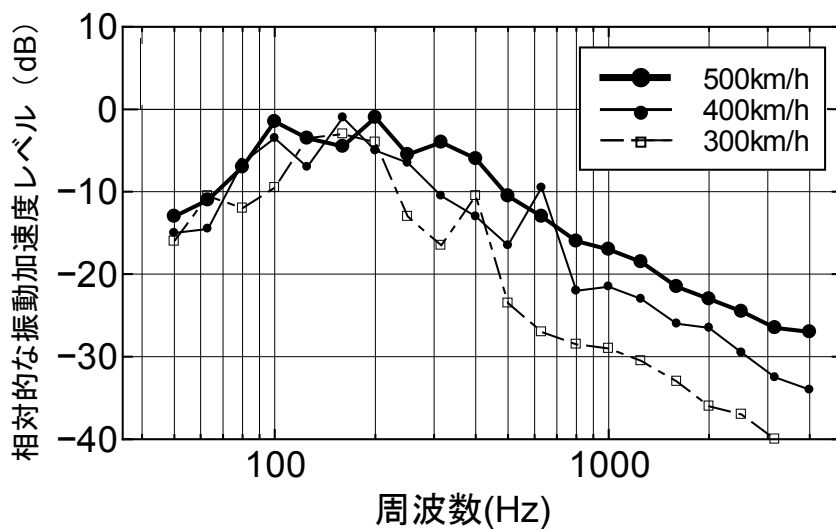


図-7.3.2.1 計算に用いた桁の振動加速度（速度毎の3点の平均値：PC箱桁）

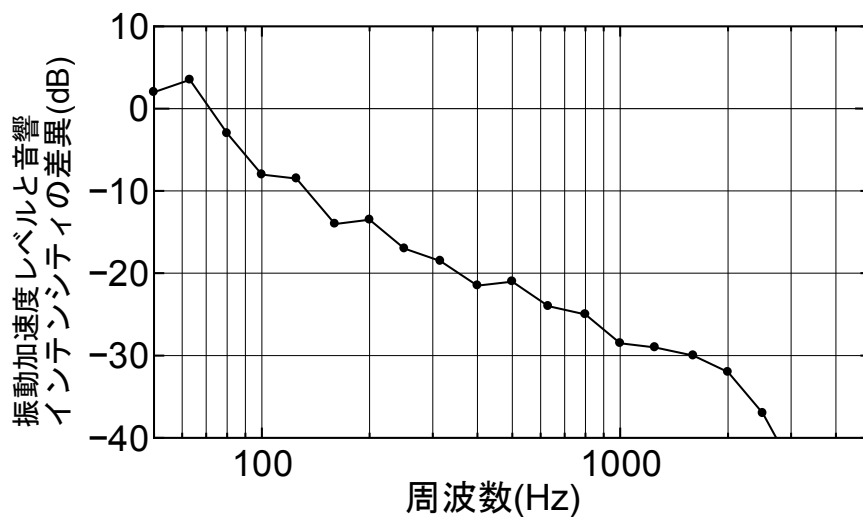


図-7.3.2.2 振動加速度と音響インテンシティレベルの補正值

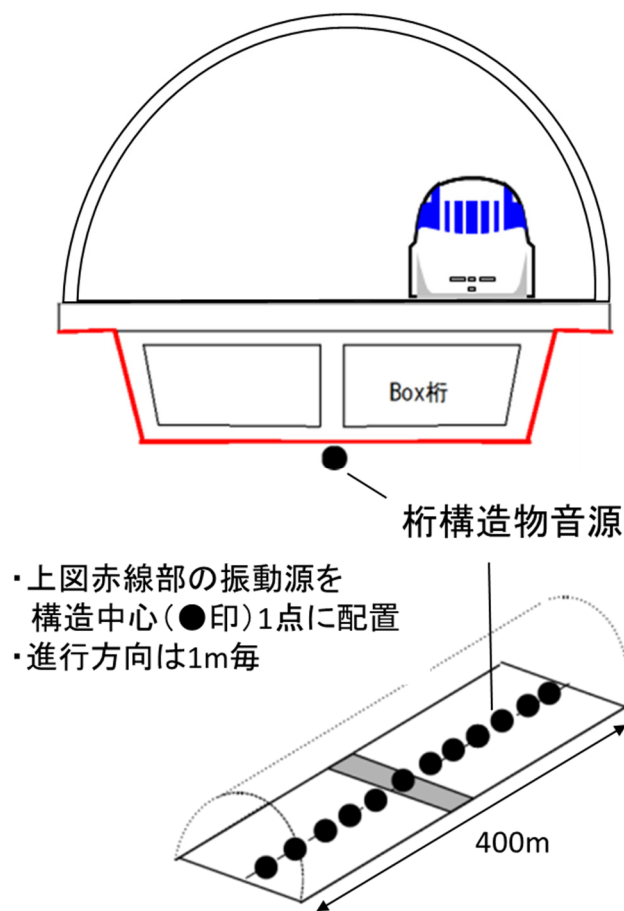


図-7.3.2.3 桁構造物音の音源配置

7.3.3 フード構造物音

フード構造物音の音響インテンシティレベル SIL_{frst} は、式7.3.3.1に示すとおり、列車走行時にフード外で測定した速度毎の音響インテンシティレベル SIL_{frall} から前述のフード透過音 SIL_{frt} [dB]を差し引くことで算出する。

$$SIL_{frs} = SIL_{frall} - SIL_{frt} \quad 7.3.3.1$$

沿線騒音を算出するための音源の設定にあたっては、フード透過音と同様にフード表面を1m×1mのメッシュに区分し、式7.3.3.1にて算定した音響インテンシティレベルと各メッシュの面積との積から図-7.3.1.1と同様に音響パワーレベルを設定する。

7. 4 編成両数の補正

7.4.1 フード透過音

既存新幹線の騒音予測モデル¹⁾を参考に、超高速鉄道車両では先頭・後尾部と車間(台車)部付近に点音源があると設定すると、例えば4両編成と16両編成の違いは図-7.4.1.1のように車間部における音源の数の増減と想定することができる。フード内においてこれらの各音源から放射された音について、ユニットパターン(距離と音圧レベルとの関係)を求め、それらを合成することで、測定点の騒音レベルを求めることが出来るが、そのためにはフードのような閉鎖空間における距離減衰特性を求める必要がある。そこで、トンネル内でスピーカ試験を実施し、その結果から距離減衰特性を求めることとした。トンネル内にスピーカを設置し、その断面を基準(0 m)とし、0, 0.9, 1.8, 2.7, 3.6, 4.5, 9, 18, 36, 72, 144, 200 m 点の各々の壁面で音圧レベルを測定した。図-7.4.1.2に結果の概要を示す。グラフは各周波数帯域における0 m 点の音圧レベルに対する差異を示している。音源から離れるにつれ音圧レベルは小さくなるものの、200 m 点での減衰は5~15 dB程度であり、自由空間における減衰の約40 dB(2 m 点と200 m 点を比較)に比べれば、非常に緩やかな減衰となっている。特に500 Hz以下の低い周波数帯域では、200 m 離れても5 dB程度し

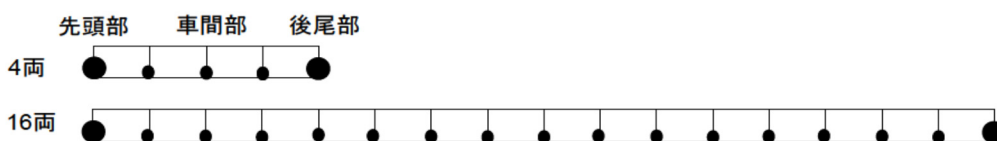


図-7.4.1.1 4両編成と16編成の列車音源モデルの違い

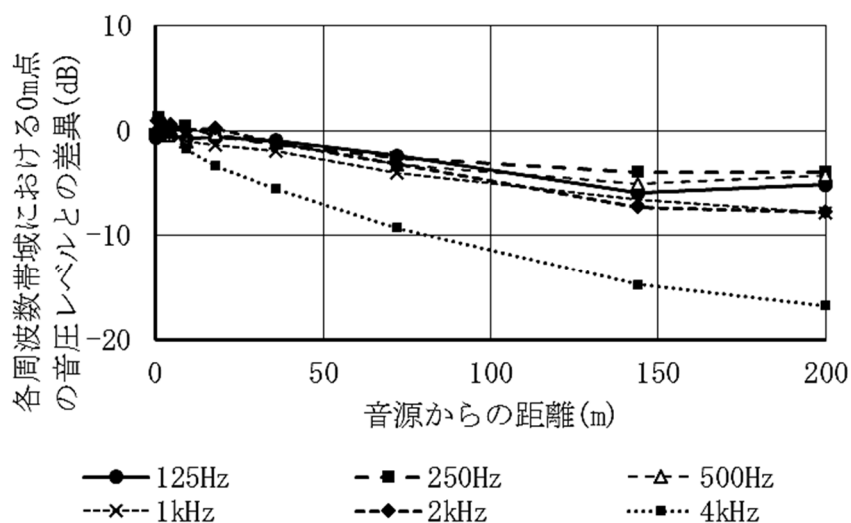


図-7.4.1.2 閉鎖空間における距離減衰特性

か減衰していない。例えば4両編成車両の場合は全長が約100 mであり、先頭部から後尾部まで全ての音源の影響がトンネル内で足し合わされたうえで、評価点で観測されるといえる。そこで、各音源（先頭部、後尾部、車間部）毎にトンネル内の実測で把握した距離減衰を考慮してユニットパターンを求め、それらを足し合わせることで編成両数の影響を把握した。その際、先頭部と後尾部の音源のパワーは車間部に比べて約5 dB大きいものと設定した。なおこの5 dBの差については、河原ら⁶⁾の研究などを参考にパラボラマイクや音響インテンシティマイクを用いて測定した車両先頭部、後尾部、車間部のパワーレベルに基づいて設定している。500 Hzの場合を例に、実験線で試験を行っている4両編成と営業線を想定した16両編成の音圧レベル差を算定した結果は図-7.4.1.3に示す通り、約2.5 dBの違いとなっている。なお、計算の過程でSLOWの動特性を反映させている。同様にして各周波数で音圧レベル差を算定した結果を表-7.4.1.1に示す。周波数が高くなるとトンネル内の減衰が大きくなり、音圧レベル差は小さくなっていることが確認される。なお、100 Hz以下はスピーカ試験で十分なS/N比が確保できなかったため、125 Hzのデータを用いている。

以降、フード構造物音に関する編成両数の補正は表-7.4.1.1の数値を用いる。

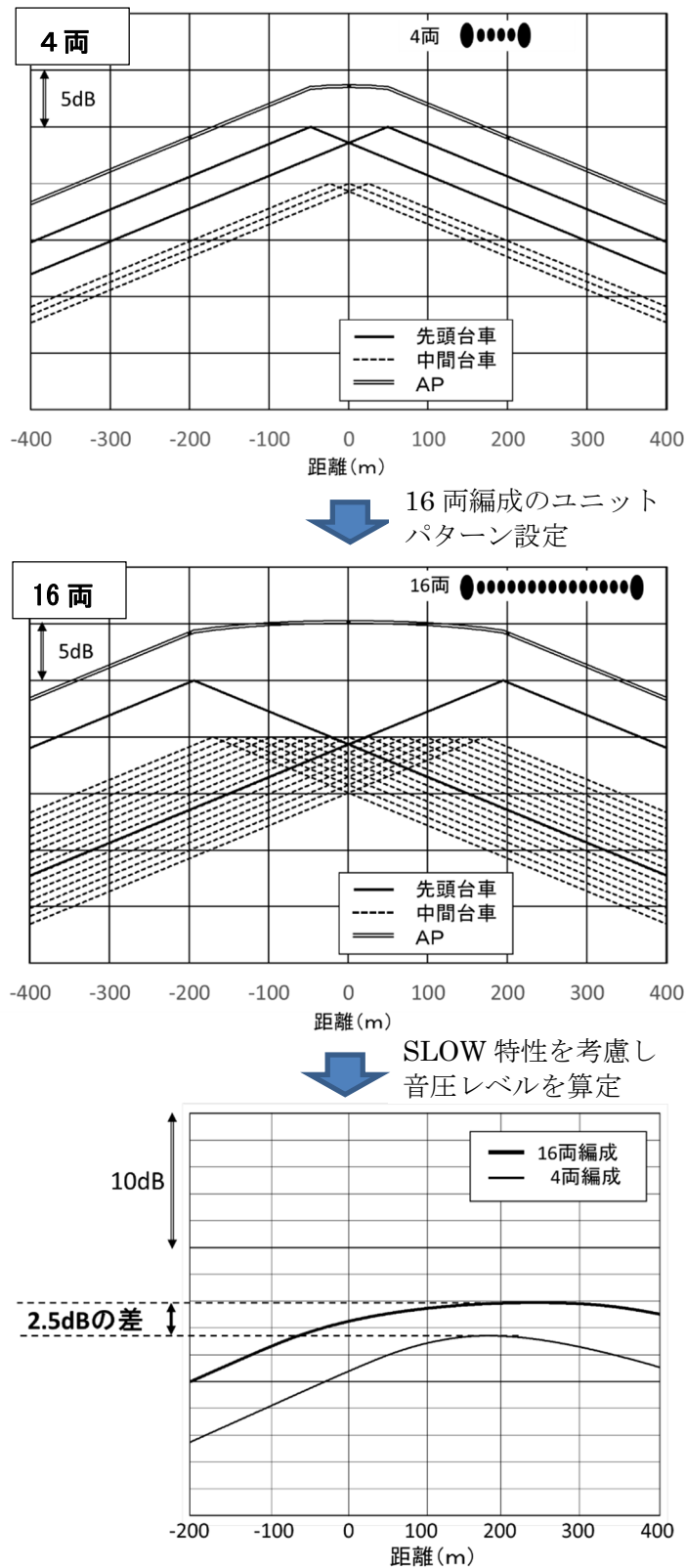


図-7.4.1.3 閉鎖空間の減衰特性を考慮した，編成両数の違いによる音圧レベル差の予測結果（500 Hz の例）

表-7.4.1.1 編成両数の違いによる音圧レベル差の予測結果
(1/3 オクターブバンド毎：4 両と 16 両)

周波数 (Hz)	レベル差 (dB)	周波数 (Hz)	レベル差 (dB)
50	2.4	630	2.5
63	2.4	800	2.3
80	2.4	1000	2.1
100	2.4	1250	1.9
125	2.4	1600	1.9
160	2.5	2000	2.1
200	2.3	2500	2.1
250	2.6	3150	1.8
315	2.5	4000	1.4
400	2.4	5000	1.3
500	2.5		

7.4.2 桁構造物音

編成両数の補正についてはフード透過音で述べたように、両数分の音源が増加したとみなし、例えば4両編成と16両編成の違いは図-7.4.1.1のように中間台車の増減として設定した。但し、先頭台車と中間台車のパワーレベルに差がないこと、トンネル内の反響音などの影響を受けないことがフード透過音と異なっている。各音源から受音点までの間における距離減衰（空气中を音が伝播する場合の一般的な距離減衰特性⁴⁾による）を考慮のうえで、この音源分布が500 km/hで移動したときのユニットパターンを算出し、動特性SLOWを考慮したレベル波形を作成した。図-7.4.2.1に示すとおり、4両編成に対する16両編成の相対的な騒音レベルは+3.0 dBとなる。

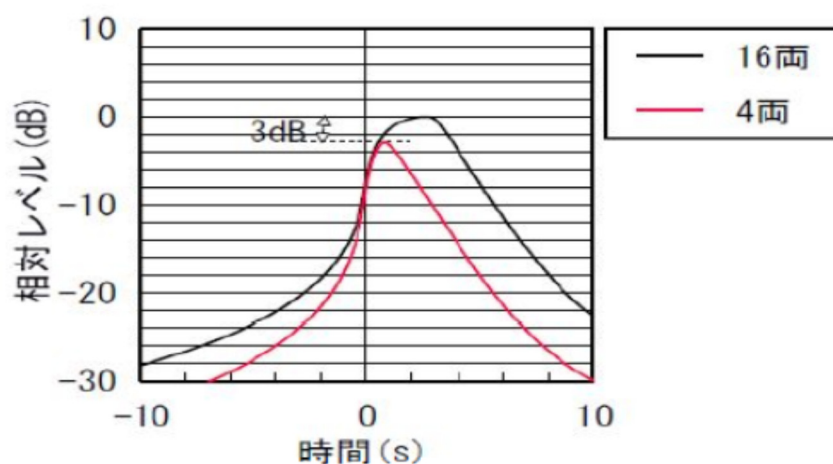


図-7.4.2.1 両数の違いによる騒音レベル差の予測結果（桁構造物音）

7.4.3 フード構造物音

フード構造物音における編成両数の補正は、桁構造物音と同様に両数分の音源が増加したとみなし、桁構造物音におけるレベル差を適用して+3.0 dBと設定する。

7. 5 沿線騒音レベルの予測

編成両数の補正を行ったのち、各音源毎の1/3オクターブバンド音圧レベルについて式7.5.1にて合成し、さらにこれらを式2.2.3.1により全ての周波数について足し合わせ、評価点のAP音圧レベル（騒音レベル）を求める。

$$L_p = 10 \log_{10} (10^{LT/10} + 10^{LSF/10} + 10^{LSS/10}) \quad 7.5.1$$

ここに、

L_p : 評価点における音圧レベル[dB]

LT : フード透過音の音圧レベル[dB]

LSF : フード構造物音の音圧レベル[dB]

LSS : 桁構造物音の音圧レベル[dB]

7. 6 騒音予測の妥当性の検証

従来型フードにおいて実測値と予測値を比較した結果を図-7.6.1に、改良型フードにおける比較結果を図-7.6.2に示す。なお、予測と測定の結果はいずれも4両編成車両で列車速度500 km/hの場合のものである。従来型フードの予測においては、実測結果に基づき、前節と同様の考え方に基づいて音響パワーレベルを設定した。いずれのケースにおいても列車の走行時に観測される主要な帯域である100～500 Hzといった成分は精度よく一致した。一方で630 Hz以上については測定結果の方が予測結果に比べてそれぞれ大きくなっているが、この原因としてはフードに設置されている保守用扉の隙間から生じる吹出し音や保守用足場などからの放射音を受音点（軌道中心から25 m地点）での騒音レベルに影響していることが考えられる。しかし、こうした高周波成分は騒音レベルにはほとんど寄与せず、4両編成車両が改良型フード区間を走行する際の、軌道中心からの距離毎の騒音レベルの予測値と実測値を比較すると図-7.6.3の通りとなり、軌道からの距離に関わらず騒音レベルの差が1 dB程度に収まっていることがわかり、本騒音予測の妥当性が確認されたと考える⁷⁾が、今後異なる箇所新たにフードを設置する等の機会があれば、さらに検証を進めることが望ましい。

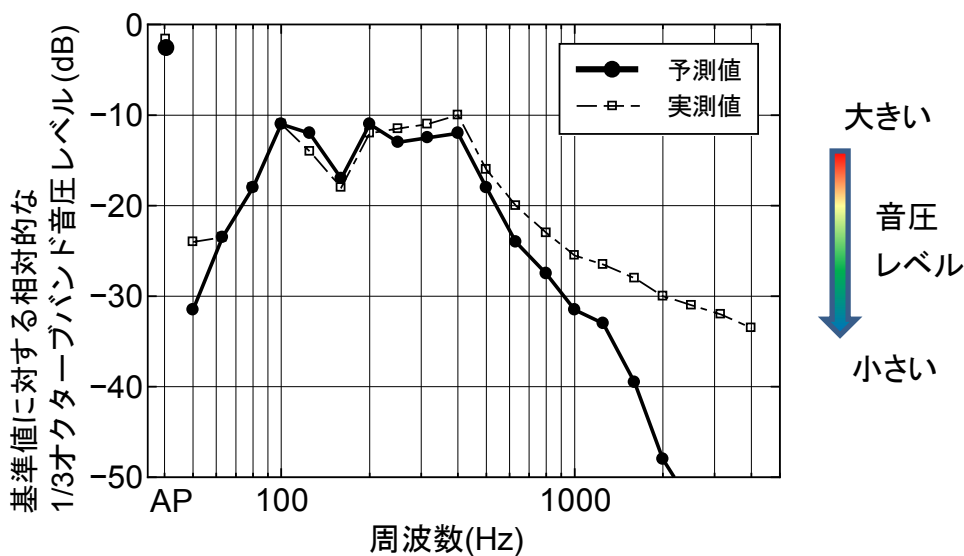


図-7.6.1 従来型フードにおける 1/3 オクターブバンド音圧レベル
(25m 地点：予測と実測の比較)

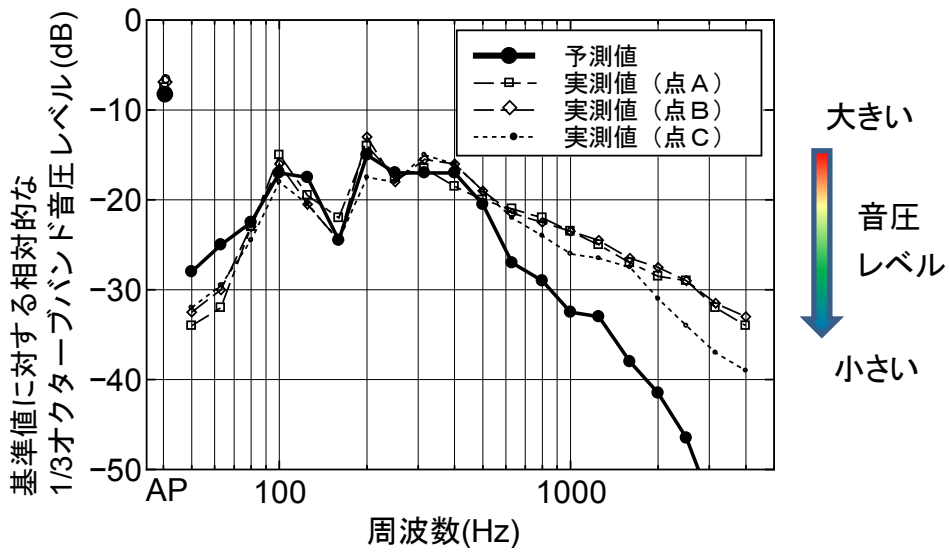


図-7.6.2 改良型フードにおける 1/3 オクターブバンド音圧レベル
(25m 地点：予測と実測の比較)

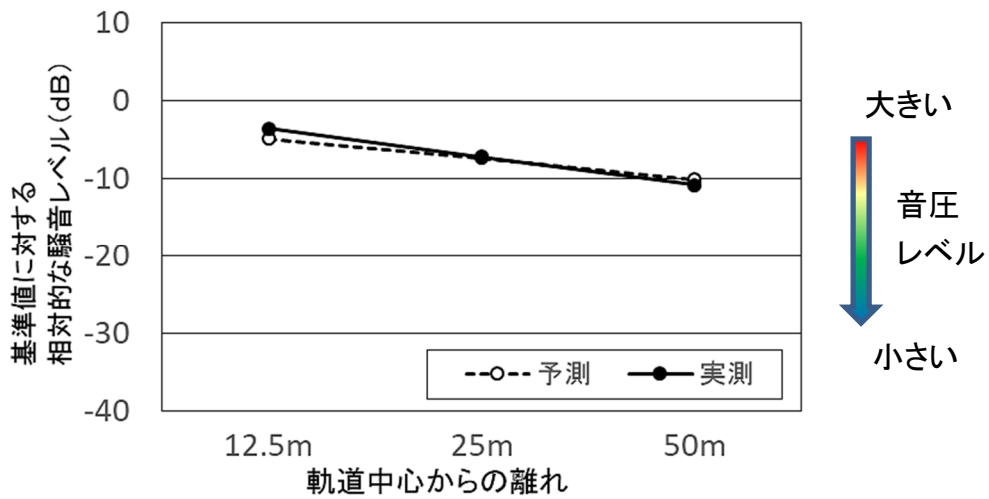


図-7.6.3 改良型フードにおける距離毎の騒音レベル (予測と実測の比較)

7. 7 各条件における騒音レベルの予測

騒音予測手法の妥当性が確認できたことから、本手法を用いて営業線条件における騒音予測を実施した。営業線を想定した16両編成の列車が速度500 km/hでフード区間を走行した場合の高架橋高さ別、軌道中心からの距離別の騒音レベル予測結果(地上1.2 mの点で予測)は図-7.7.1に示すとおりであり、いずれの条件においても新幹線鉄道騒音の基準値(I類型; 70 dB)を下回った。騒音対策設備については、沿線における住居等の分布状況や土地利用の状況に基づいてフードや防音壁等を適切に使い分けていくことが重要であるが、本研究により改善を図ったフードを適用すれば、様々な環境条件においても十分に環境保全の目標値を達成可能であることが確認された。

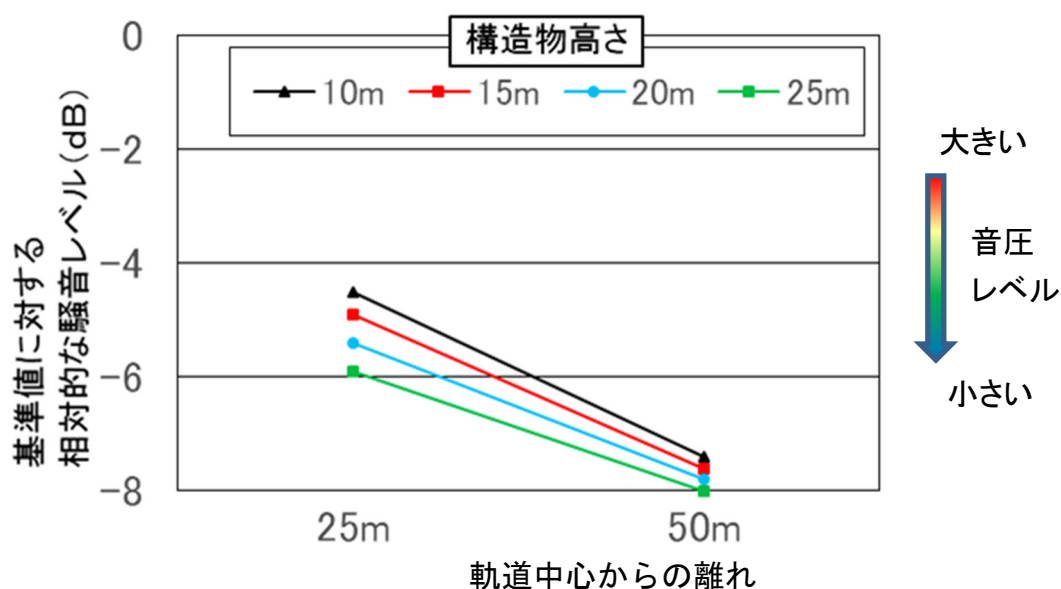


図-7.7.1 フード区間における高架橋高さ別・距離別の騒音レベル予測結果
(16両編成: 500 km/h 走行時)

7. 8 まとめ

本章においては、軌道中心からの距離や構造物高さ等の条件を与えた場合に、騒音レベルの予測評価を適切に実施できる手法を確立するための検討を行った。

超高速鉄道は磁気浮上により地上と非接触で走行し、車両下部騒音（転動騒音等）や集電系騒音は発生しないことから、騒音の音源は車両上部空力騒音及び構造物音（桁構造物音の他、フード区間ではフード構造物音も発生する）と考えて、個々の音源のパワーレベルや配置について整理し、距離減衰式等を用いて各音源による評価点の音圧レベルを推定したうえで、トンネル内の測定結果等に基づいて編成車両長の影響を補正し、合計して評価点の騒音レベルを予測するモデルを構築し、実測値との比較を行った。その結果、高い再現性が確認できたことから、営業線を想定し、当該モデルを用いて軌道中心からの距離や構造物高さ等の条件を与えた場合の騒音レベルの予測を行った。以下に、本章で得られた知見をまとめる。

- (1) 車両が実験線の4両編成から営業線で16両編成となることの影響については、フード構造物音で+2.5 dB、桁構造物音、フード構造物音で+3.0 dBと推定される。
- (2) 予測値と実測値との比較を行った結果、フードや桁の構造、軌道中心からの距離に関わらず、騒音レベルの差は1 dB程度に収まっており、今後の営業線における予測評価に活用可能である。
- (3) 軌道中心からの距離や構造物高さ等の条件を与えた場合の騒音レベルの予測を行った結果、いずれの条件においても新幹線鉄道騒音の基準値（I類型；70 dB）を下回っており、本研究により改善を図ったフードを適用すれば、様々な環境条件においても十分に環境保全の目標値を達成可能である。

参考文献

- 1) 長倉清, 善田康雄: 新幹線沿線騒音予測手法, 鉄道総研報告, Vol.14, No.9, pp.5-10, 2000.
- 2) 日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会: 道路交通騒音の予測モデル“ASJ RTN-Model 2013”, 日本音響学会誌, Vol.70, No.4, pp.172-230, 2014.
- 3) 前川和男: 障壁の遮音設計に関する実験的研究, 日本音響学会誌, 18巻, pp.187-196, 1962.
- 4) 日本音響学会編: 音響工学講座 騒音・振動(上), コロナ社, 1978.3.
- 5) 五郎丸英博, 白石捷夫, 原公, 小森武: 中小支間道路橋における低周波空気振動の放射音圧レベルとスペクトルの推定, 土木学会論文集, 第403号, VI-10, pp.137-145, 1989.3.
- 6) 河原瑞将, 堀田英俊, 廣江正明, 加来治郎: 音響インテンシティ法による新幹線の騒音源の可視化, 騒音制御, Vol.22, No.1, pp.17-19, 1998.
- 7) 永長隆昭, 荻田倫之, 大森洋志, 野澤剛二郎, 土肥哲也, 長倉清, 藤野陽三: 超高速鉄

道の騒音対策設備に係る構造物音の低減及び騒音予測手法の開発, 土木学会論文集 A1, 74(1), pp.89-108, 2018.1.

第8章 結論

8. 1 本研究の結論

本研究は、500 km/h の超高速走行時に環境保全の目標値（環境基準 I 類型：70 dB）を達成可能な騒音対策設備について、山梨実験線における測定結果等に基づいて構造の提案を行い、効果を検証するとともに、それら設備の設置を前提に沿線騒音の定量的な予測を行うモデルを構築することを目的に進めてきたものである。以下に、本研究で得られた結論をまとめる。

第2章では、山梨実験線の建設時に設置していた中間緩衝工に着目し、超高速走行の際の測定を行って騒音の現状を把握した。また、桁目地等からの漏れ音による影響を確認した後、それらの対策を実施した場合の中間緩衝工の遮音性能について、走行試験による計測や、列車がない状態での遮音特性を確認するためのスピーカ試験により確認した。以下に、本章で得られた知見をまとめる。

- 1) 中間緩衝工においては、桁目地部やスリット部の隙間から漏れ出す走行音の影響が大きいが、それらを改善しても沿線の騒音レベルは環境保全の目標値を上回る状況である。
- 2) 200 Hz 付近ならびに 1 kHz 以上の周波数帯域ではスピーカ試験より列車走行時の遮音性能が低下しており、前者は構造物音、後者は列車が超高速走行する際に個々の PC 遮音パネルの隙間等から発生する気流音の影響と推測される。後者の対策が完全になされれば、環境基準の目標値を達成可能と推測される。

第3章では、超高速走行時の気流音を抑制するとともに、列車通過時の圧力変動荷重や建設や保守の容易性も考慮した騒音対策設備の構造を検討した。その結果、できるだけ大きな単位のコンクリート部材により構成するとともに、部材の結合方法を見直すことで密閉度を高めた、セグメント構造によるフードを提案し、定置試験で気密性や遮音性を確認して、営業線における騒音レベルの予測を行った。以下に、本章で得られた知見をまとめる。

- 1) 標準的な桁長 37.8 m の PC 箱桁の場合、桁に構造上分離されたフードを設置する形式が、コスト面等で最も有利となる。
- 2) フードを模擬した試験体に圧力変動荷重を試験的に作用させた結果、結合部において気流音は発生しない。また、音響透過損失を計測した結果、同じ 150 mm の厚さを持つ一般的な RC 壁に対して遮音性能の著しい低下は見られない。
- 3) 列車走行時の中間緩衝工内の音圧レベルとフード音響透過損失の計測結果等から、営業線を想定した場合の沿線騒音レベルをフード部材厚毎に予測した結果、150 mm、100

mm, 70 mm のいずれの場合も環境保全の目標値を下回る。

第 4 章では、第 3 章で提案したフード構造物を山梨実験線の橋梁に設置し、走行試験により騒音の測定を行った。また、スピーカ試験を実施してフード内外の音圧レベル差を計測し、走行試験時と比較を行って遮音性能に対する列車走行の影響について考察を加えた。以下に、本章で得られた知見をまとめる。

- 1) フード区間の 500 km/h 走行時における沿線騒音 (軌道中心から 25 m, 地上 1.2 m) は、中間緩衝工と比較して、気流音の主要な周波数帯域であった 500 Hz~4 kHz で大幅に低減する。
- 2) 500 Hz 以上の周波数では走行試験とスピーカ試験で遮音性能にほとんど差がなく気流音の抑制効果が確認できた一方、100 Hz 及び 200~315 Hz では列車走行時の遮音性能が低く、構造物音の影響と推測された。
- 3) 提案したフードを設置する条件で、測定結果に基づき編成車両長の影響を換算して 16 両編成車両による 500 km/h 走行時の沿線騒音レベルを算定した結果、環境保全の目標値を達成可能であると予測される。

第 5 章では、フードや桁の振動に着目して走行試験やスピーカ試験、加振機試験による測定を行い、列車走行に伴う振動の発生や伝達の状況を明らかにした。またボクセル有限要素法による数値解析モデルを構築し、列車走行時の振動解析を行った。以下に、本章で得られた知見をまとめる。

- 1) 浮上して走行する超高速鉄道においても、車輪で走行する在来鉄道と同様、台車に搭載した超電導磁石の極間隔 1.35 m に依存する周波数の振動や、その 2 倍の周波数の振動が卓越している。
- 2) 軌道から桁、フードへと伝達する過程で、厚さが相対的に薄いフードの一般部において振動が増幅している。
- 3) フードの振動について、フードを透過する音に起因する成分と桁から伝達する成分の分離を図った結果、63~125 Hz, 200~315 Hz で後者の影響が大きくなっている。
- 4) 走行試験結果の他、スピーカ試験や加振機試験の結果も活用し、フード透過音、桁構造物音、フード構造物音の 3 つの音源の分離を試みた結果、フード区間の評価点における騒音レベルについて、それぞれがほぼ同程度の寄与度となっていると推測される。
- 5) ボクセル有限要素法による数値解析モデルを構築し、列車走行時の振動解析を行った結果、走行試験による実測で見られた振動の発生や伝達の状況が再現され、フード表面の振動加速度レベルの予測値も実測と概ね 2 dB 以内の差に収まっている。

フード壁面の振動に伴う構造物音の影響については、これまでの騒音対策設備で明確に確認されたことがほとんどない事象である。また構造物音の実態把握を行うために、今回提案したスピーカ試験と加振機試験を組合せる手法は非常に有用である。

第6章では、第5章の検討を踏まえてフード構造の改善を検討し、前章までに試験を行ったフードの一般部における厚さが100 mm、リブ部は300 mmとなっていたところ、総重量は変えずに全体として190 mmに均一化することを提案した。そのうえで提案したフードについて数値解析及び定置試験による確認の後、山梨実験線の橋梁に実際に設置して、走行試験やスピーカ試験による測定を実施し、性能を検証した。以下に、本章で得られた知見をまとめる。

- 1) 定置試験（遮音性能試験）及び数値解析の結果、新たに提案するフードについて、従来のフードより遮音性が高く、かつ振動の低減が見られる。
- 2) 山梨実験線の橋梁に設置して走行試験による計測を実施した結果、フードの透過音及び振動が従来型のフードよりも大幅に低減し、沿線の騒音レベルも低減することが確認される。
- 3) 沿線騒音について音源の分離を図った結果、フード透過音及びフード構造物音の寄与度が低減し、桁構造物の寄与度が大きくなっている。
- 4) 16両編成車両の換算を行って、500 km/hで走行する際の沿線騒音レベルを算定した結果、提案する改良型のフードを適用することにより、営業線の環境保全の目標値を十分に下回る。

今回提案したフード構造については、既存の新幹線において特別にレベルの高い騒音対策を求められたような場合に、適用は可能であると考ええる。

第7章では、軌道中心からの距離や構造物高さ等の条件を与えた場合に、騒音レベルの予測を行う手法について検討した。超高速鉄道は磁気浮上により地上と非接触で走行し、車両下部騒音（転動騒音等）や集電系騒音は発生しないことから、騒音の音源は車両上部空力騒音及び構造物音（桁構造物音の他、フード区間ではフード構造物音も発生する）と考へて、個々の音源のパワーレベルや配置について整理し、距離減衰式等を用いて各音源による評価点の音圧レベルを推定したうえで、トンネル内の測定結果等に基づいて編成車両長の影響を補正し、合計して評価点の騒音レベルを予測するモデルを構築し、実測値との比較を行った。以下に、本章で得られた知見をまとめる。

- 1) 車両が実験線の4両編成車両から営業線で16両編成となることの影響については、フード透過音で+2.5 dB、桁構造物音、フード構造物音で+3.0 dBと推定される。
- 2) 予測値と実測値との比較を行った結果、フードや桁の構造、軌道中心からの距離に関わらず、騒音レベルの差は1 dB程度に収まっており、本研究の予測モデルは営業線における予測評価に活用可能である。

既存の新幹線でフード構造の適用を検討する場合、音源のパワーレベルと配置を試験結果等から設定できれば、今回提案した騒音予測モデルにより予測することが可能と考える。

8. 2 今後の課題

軌道中心からの距離や構造物高さ等の条件を様々に与えて騒音レベルの予測を行った結果、本研究により提案するフードを沿線の路線条件に合わせて適用すれば、十分に環境保全の目標値を達成可能であることを確認しており、本研究は超高速鉄道の早期実現に欠かせない沿線環境の保全に資するものと考えている。

一方で、今回開発したフードについて最適な構造を目指していくため、以下の課題に対して継続的に研究を進めていくことが望ましい。

- (1) セグメント構造について、運搬も考慮して分割単位を変更するなど、構造を工夫することによる建設性の向上やコスト低減を図ることが望ましい。
- (2) 本研究では標準的なスパンの箱桁を前提にフード構造を提案したが、スパンが長い橋梁、桁下空頭に制限を受け下路桁形式となる橋梁等、検討した前提と条件が異なる場合の桁を含めた騒音対策設備の最適化について検討を進めていくことが求められる。
- (3) 今後のフードのさらなる開発にあたっては騒音の低減効果を適切に予測しながら進めることが不可欠であり、今回構築した数値解析モデルについて、例えば試験的に厚さの異なるフードを設置するなど、さらに多くの条件で走行試験データとの比較検証を進め、精度の向上を図ることが重要である。
- (4) 環境基準のⅡ類型（75 dB）が適用される地域において、目標とする騒音低減性能を確保する一方、別の目的を付加可能な騒音対策設備の開発を進めることも有効である。

例えば、既存の中間緩衝工を本研究で提案したフードとすることにより騒音の低減は図られるものの、トンネルが連続することとなり、微気圧波に対する影響は大きくなる可能性がある¹⁾。そのため、騒音を一定程度に抑制しつつ、列車走行に伴う圧力を緩和する機能を持たせることが出来れば、トンネル緩衝工を含めた環境保全対策設備全体の最適化に大きく寄与することとなる。

参考文献

- 1) 本田敦，高橋和也，野澤剛二郎，土肥哲也，小川隆申，飯田雅宣，藤野陽三：超高速鉄道トンネルにおける微気圧波の評価および緩衝工の提案，土木学会論文集A1，Vol.71，No.3，pp.327-340，2015.9.

謝 辞

本論文は、超高速鉄道としての中央新幹線に向け重要な課題である沿線環境保全の中で、騒音の影響低減をテーマとして取り上げ、環境保全の目標値である新幹線鉄道騒音基準を達成可能な対策設備、及び環境影響評価に不可欠な予測手法の構築について、10年余りの長きにわたって進めてきた研究の成果を取りまとめたものです。

本論文を取りまとめる契機を与えて頂いた横浜国立大学大学院 上席特別教授の藤野陽三博士には、終始懇切なるご指導を頂くとともに、学位論文の審査にあたっては主査をお勤め頂きました。心より御礼申し上げますとともに、深甚なる謝意を表します。

また審査に当たりましては、横浜国立大学大学院 教授の勝地弘博士、横浜国立大学大学院 教授の小長井一男博士、東京大学生産技術研究所 准教授の坂本慎一博士、横浜国立大学大学院 教授の中村文彦博士、横浜国立大学大学院 教授の前川宏一博士、横浜国立大学大学院 教授の山田均博士より様々な観点から貴重なご指導を頂き、研究内容の汎用性を高めることが出来ました。御礼を申し上げますとともに、深く感謝いたします。

小林理学研究所 主任研究員の土肥哲也博士には、特に実験線で取得した実測データの整理、分析にあたり多大なるご協力を頂きました。

大崎総合研究所の野澤剛二郎博士、森川和彦主任研究員には、特にボクセル解析の計画や実施に際しご協力を頂きました。

鉄道総合技術研究所 部長の長倉清博士には、既存の研究成果に関するレビュー、実測データの評価や騒音予測モデルの構築にあたり、既存新幹線での経験を踏まえた有用なご意見を頂きました。

東海旅客鉄道株式会社 中央新幹線推進本部 顧問の山崎幹男博士、宮本雅章担当部長、担当課長の久保淳一郎博士、荻田倫之担当課長、大森洋志氏には、研究全般にわたって絶大なご援助を頂くとともに、研究推進に際し実務的な立場から様々な意見を頂きました。

東海旅客鉄道株式会社 中央新幹線推進本部の副本部長の本田敦博士には、平素から研究の進捗について日頃から気に掛けて頂くとともに、直近のご自身の経験に基づく有難いご助言を頂きました。

東海旅客鉄道株式会社 中央新幹線推進本部の宇野護博士には、終始研究の進捗を温かく見守って頂き、ご支援を頂きました。

本研究に不可欠な各種の現地計測データについては、本部長の白國紀行博士をはじめとするリニア開発本部の各位、及び走行試験を実施する山梨実験センターの各位のご協力によって得られたものであります。

皆様に深く感謝の意を表すとともに、本研究の成果も踏まえ、今後とも中央新幹線の早期実現と沿線環境の保全に向け、精一杯取り組んでまいります。

平成30年3月 永長 隆昭