

鉄道軌道を考慮したSEA法の適用に関する研究

建設設計工学研究室 佐藤 千春

指導教官 宮木 康幸

1. はじめに

近年、人口の都市への集中が増加し、都市部においては鉄道や地下鉄網の整備による輸送力の強化が図られてきた。鉄道橋を列車が走行する際に発生する騒音は、大別すると“走行音”と“固体音”(構造物音)に分けることができる。前者は電車の機器音や車輪とレール間の音などを指し、後者はレールで発生した振動が軌道を介して床版等に伝わり、その振動が原因で生じる音を指す。鉄道橋の騒音において、特に鋼製の場合は、固体音が卓越する。よって、本研究では固体音に着目し、研究対象としている。

本研究は、騒音として重要な中高周波数域の計算を得意とする、統計的エネルギー解析法(以下SEA法)を用いている。SEA法では橋梁への入力データとして、鉄道橋で測定された振動加速度を用いる必要がある。このデータは、軌道や音源として寄与度の高い床版・桁などが考えられる。床版や桁は、橋梁のスパン長、構造形式など個々の橋梁で大きく異なるのに対し、軌道はこれらによらず異なる列車においても比較的類似した振動加速度スペクトルとなり類型化が可能である。したがって、本研究では、軌道での振動加速度を想定して、新橋でも、発生する騒音をある程度予測できるようにすることを最終目標としている。

2. 本研究の目的

昨年度の研究では橋梁で測定された、騒音・振動調査のデータを用いて、騒音伝搬を考慮し回折効果を導入したSEA解析が行われた。しかし、SEA法の計算では、入力位置を床版とし、軌道スラブ部での振動加速度値で計算が行われた。本来は鉄道橋の固体音伝搬はレールを介し橋梁構造へと伝搬される。したがって、入力位置および入力振動加速度を類型化可能なレールとし計算を行う必要がある。よって、本研究では実橋でのSEA法による解析において、軌道構造を考慮した解析を行うと共に、固体音伝搬予測の汎用性の向上を目的としている。

3. SEA法の概要

SEA法は、中高周波数域の振動騒音解析において注目されており、車・船舶・航空・宇宙などあらゆる分野で適用検討がなされている。

SEA法では振動、音響をエネルギーという統一量で表す。解析対象である構造物はFEMに比べて比較的少数な要素(SEA法ではサブシステム)に分割され、そのサブシステム内の損失パワー、サブシステム間の伝達パワー、サブシステム外からの入力パワーの平衡関係から伝達を計算する。結果として、ある周波数帯域の振動速度、音圧が求まるものである。

SEA法では振動、音響をエネルギーという統一量で表す。解析対象である構造物は多数のサブシステムと呼ばれる要素に分割される。図1に2つのサブシステム系のパワーフローを示す。

SEA法は、サブシステム内の損失パワー P_{1d} 、 P_{2d} 、サブシステム間の伝達パワー P_{12} 、サブシステム外からの入力パワー P_1 、 P_2 の平衡関係からエネルギーを計算する。多サブシステム系は基本的に2サブシステム系の応用で表すことができる。

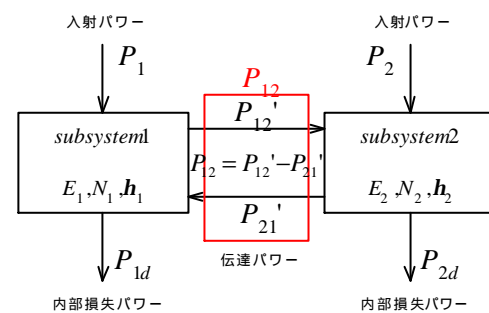


図1 サブシステム間のパワーフロー

4. 入力位置の概要

図2に入力位置の概略図として橋梁の簡略断面を示す。昨年度のSEA法を用いた騒音予測の計算では、入力位置は図2(a)のように床版入力とし解析が行われた。しかし、実橋の鉄道橋での固体音はレールから侵入し伝搬される。そこで、本研究では新たに軌道構造を考慮し入力位置を図2(b)のようにレールとし解析を行う必要がある。

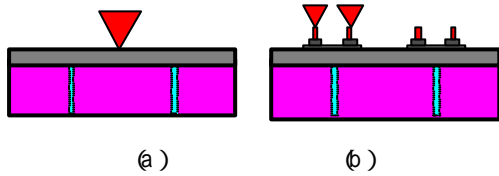


図2 入力位置の概略図

5.解析モデル

SEA法では、サブシステムの分割により計算結果が異なると考えられるので表1表2のようなType-AおよびType-Bの2つのタイプのモデルを考えた。橋梁部の分割数によりA、Bの2つのType分けをしている。ここで、表内に記してある[有][無]は軌道パットの有無であり、()の数字は1部材あたりの分割数である。

表1 Type-Aの分割数

Type-A	A-K		A-KS (3)		A-KS (7)		A-R (3)		A-KP+SP
	[有]	[無]	[有]	[無]	[有]	[無]	[有]	[無]	
レールR	4	4	4	4	4	4	12	12	4
軌道パットKP	-	4	-	4	-	4	-	4	4
軌道スラブKS	2	2	6	6	14	14	2	2	2
スラブパットSP	-	-	-	-	-	-	-	-	2
床版	1	1	1	1	1	1	1	1	1
横桁	8	8	8	8	8	8	8	8	8
縦桁	14	14	14	14	14	14	14	14	14
分割数合計	29	33	33	37	41	45	37	41	35

表2 Type-Bの分割数

Type-B	B-K		B-KS (3)		B-KS (7)		B-R (3)		B-KP+SP
	[有]	[無]	[有]	[無]	[有]	[無]	[有]	[無]	
レールR	4	4	4	4	4	4	12	12	4
軌道パットKP	-	4	-	4	-	4	-	4	4
軌道スラブKS	2	2	6	6	14	14	2	2	2
スラブパットSP	-	-	-	-	-	-	-	-	2
床版	21	21	21	21	21	21	21	21	21
横桁	24	24	24	24	24	24	24	24	24
縦桁	14	14	14	14	14	14	14	14	14
分割数合計	65	69	69	73	77	81	73	77	71

5-1) 軌道部モデルの寸法

軌道部はレール、軌道パット、軌道スラブ、スラブパットの4要素とした。図3に軌道構造の概略として軌道構造の断面図を示す。レールは、現在列車の高速化、重量化に伴い使用頻度の高い60kgレールを使用している。(a)は防振材無し、(b)は防振材有りのモデルである。

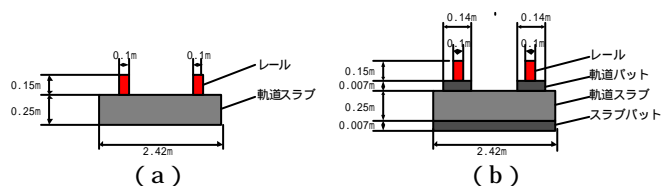


図3 軌道の断面寸法

5-2) 音源のサブシステム番号

橋梁部は床版、縦桁、横桁の3要素の構成とした。図4に23分割、図5に59分割のサブシステム番号を示す。ここで、23分割では床版が1分割であるのに対

し、59分割では床版が分割されている。

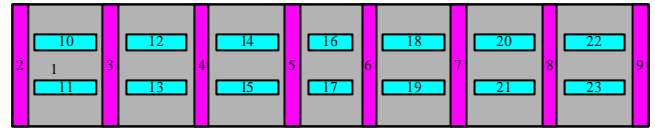


図4 Type-A(23分割)

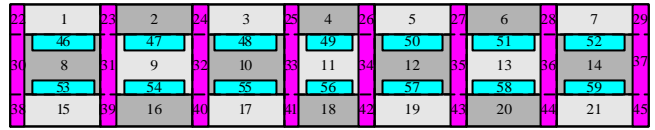


図5 Type-B(59分割)

6.SEA法の計算フローチャート

SEA法の計算は、図6のフローチャートに従って行う。フローチャートより、主要なSEAパラメータは、モード数、内部損失率、結合損失率、入力パワーである。防振材の周波数特性検討にあたり、これらのパラメータをどのように扱うかが問題となる。本研究では、防振材をサブシステムにモデル化し、内部損失率 $h = 0.1$ で計算した後、防振材を結合とみなしたSEA解析プログラムを作成した。

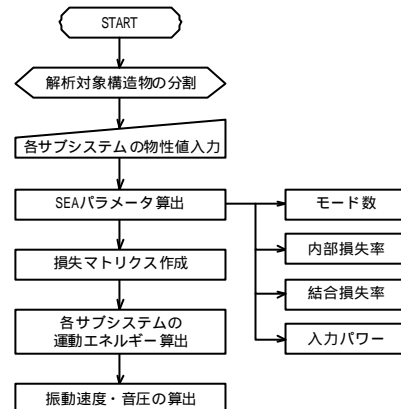


図6 SEA法の計算フローチャート

7.解析結果

7-1) 昨年の解析結果と比較

SEAプログラムにおいて、新たに軌道構造をモデル化し解析を行った。昨年の23、59分割モデルと、今年度の軌道構造を考慮したA-K[有]、B-K[有]モデルの計算値の比較を図7に示す。入力条件については昨年と比較をするため入力振動加速度と入力位置を同じ条件とした。

軌道部を考慮したことで、内部、結合損失率の影響により、エネルギー損失が増大したため、音圧レベルが1~4dB低下している。しかし、この計算は入力位置が床版全体となっており、実際の鉄道橋での固体音伝搬を表現していない。よって、個々の形状が異なる橋梁での騒音予測は、困難であるといえる。

衰材料へ、サブシステムとして適用することは課題とされており、今回の計算結果においても、サブシステムとしての適用は困難であるといえる。

そこで、防振効果をサブシステムとしてではなく、防振材そのものが弱結合であると仮定した。そして、防振材のエネルギー損失を結合損失率として得られるのではないかと考えた。

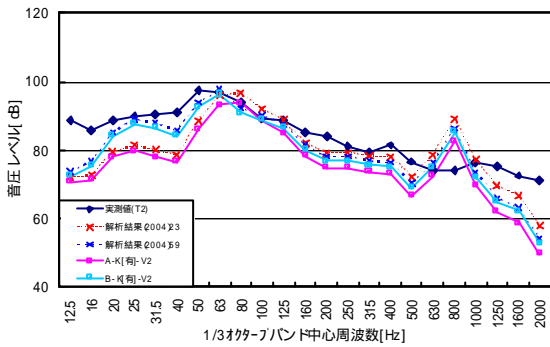


図7 昨年の解析結果とモデル A, B の比較

7-1) 入力の大さの検討

レール入力とする際、入力の大さの検討が必要になる。そこで、入力の大さの検討を行った。軌道構造を考慮し、防振材無しの A-K[無], B-K[無]モデルの計算値の比較を図 8 に示す。下図において、点線は、レールの質量のみで入力パワーを算出したものである。また、実線はレールと列車が同時に加振されると考えた場合の計算結果である。これは、レール質量に列車ばね下質量 $M = 100t$ を加え、入力パワーを計算している。

計算結果より、今回のレール入力での SEA 解析において、入力の大さはレール質量に列車ばね下質量を加える必要があるといえる。

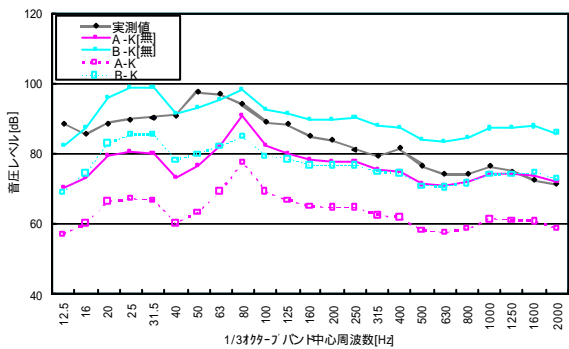


図8 解析結果とモデル A, B の比較

7-2) 防振材[無]-[有]の比較

防振材[無]の場合の計算結果を図 9 に示す。また、防振材[有]とした場合の計算結果を図 10 に示す。ここで、Type-A, B の両者ともに同じような結果を得たので Type-B のみの解析結果を示す。

計算結果より、防振材[有]とすることにより、防振材[無]の場合の計算結果と比べ、大きな減衰を表現することができた。しかし、防振材[有]での約 40dB の減衰は、騒音予測ができていないとはいえない。また、O.A. 値からも分かるように、約 40~60dB の誤差がみられる。SEA 法の解析において、防振材のような減

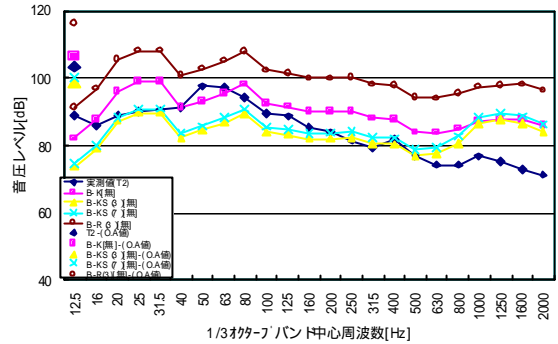


図9 Type-B[無]モデルの音圧レベル

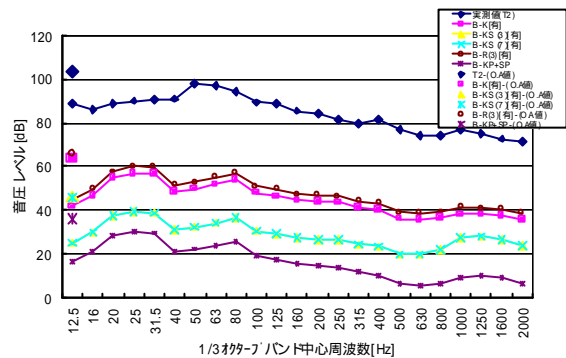


図10 Type-B[有]モデルの音圧レベル

7-3) 防振材を結合とした場合

防振材をサブシステムとしてではなく、結合要素とした場合の計算結果を図 11, 図 12 に示す。

計算結果より、防振材の防振効果を結合損失として与えることで、防振材[有]および[無]とした場合の計算結果と比べ、高周波数域の音圧レベルのスペクトル形状を実測値に近づけることが可能となった。O.A. 値に関しても、多少の誤差はあるが、比較的に実測値と近い値を示していることがわかる。Type-B-K モデルにおいては、実験値と比べ約 2dB の誤差で予測できている。また、分割数の影響について考察すると、Type-A の場合においては、分割数の影響は少なく、音圧レベルとしては表れていないということが分かる。Type-B の場合は、軌道スラブを分割することで、音圧レベルの低下がみられ、分割数により音圧レベル予測精度に大きく影響していることがわかる。今回の解析結果において、Type-B の場合は、軌道スラブは

分割しない方がよいといえる。

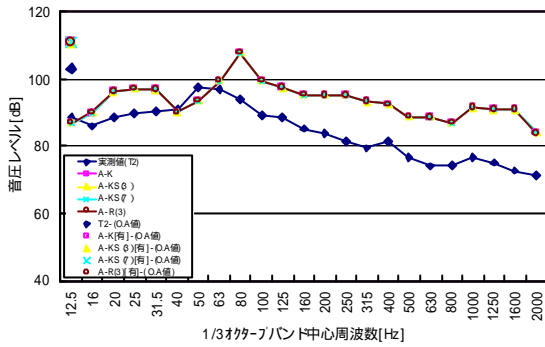


図 11 Type-A モデルの音圧レベル (結合)

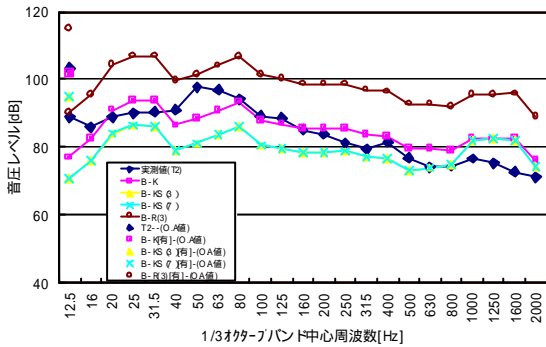


図 12 Type-B モデルの音圧レベル (結合)

7-4) 防振材を結合とした場合の効果

ここで、結合とした場合の確認を行う。Type-A, B の両者とも同じような結果を得た。よって、一例として、Type-B-K モデルについての結合効果の周波数特性のみを示す。計算値により、軌道部の透過係数を求めることで結合効果を見た。図 13 は B-K[無]モデル、図 14 は B-K[有]モデル、図 15 は防振材を結合とした場合の透過係数である。ここで、図中の ER/ES はレール 軌道スラブ間、ES/Ecp は軌道スラブ 床版間の透過係数 $1/t$ を示している。なお、透過係数 $1/t$ は対数で示している。

図 13 より、B-K[無]モデルの場合の透過係数は、ほぼ一定の値を示していることがわかる。また、図 14 より、B-K [有]モデルの場合の透過係数では、レール - 軌道スラブ間の透過係数は高周波数域になるにつれ増加している。さらに、軌道スラブ - 床版間の防振効果は B-K[無]モデルと同様に一定値を示していることがわかる。一般的に防振材を挿入すると、共振域と防振域を示す。よって、前述のモデルの場合は、防振材による防振効果とは一致しないことが分かる。一方、図 15 の B-K モデル (結合) の場合では、高周波数域に向かい透過係数が増大していることが分かる。よって、防振材の防振効果の周波数特性が取り入れられたといえる。

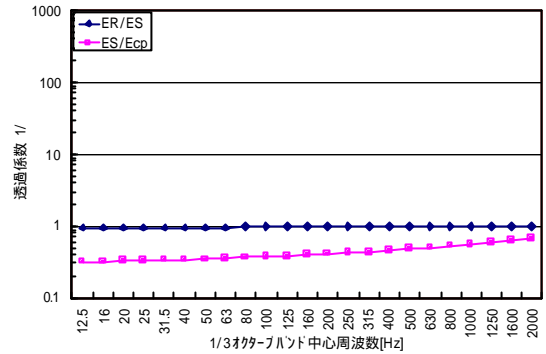


図 13 Type-B-K[無]モデルの防振効果

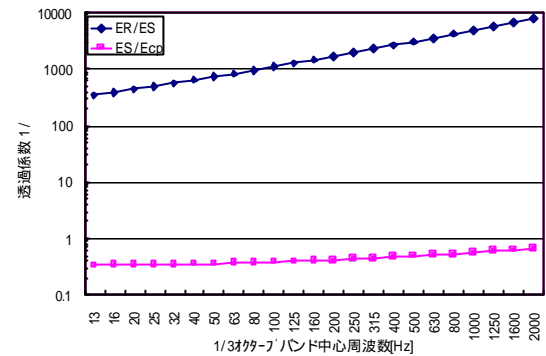


図 14 Type-B-K[有]モデルの防振効果

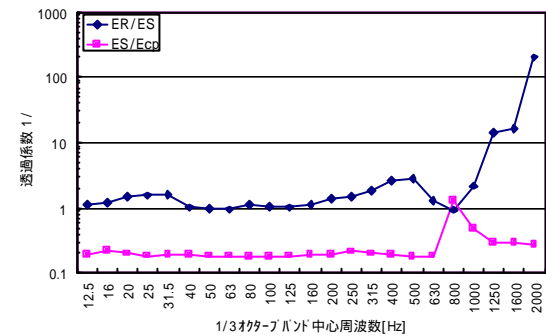


図 15 Type-B-K モデルの防振効果 (結合)

8.まとめ

昨年の SEA プログラムに新たに、軌道部のモデルを加えることにより、レール入力での SEA 解析による騒音予測が可能となった。軌道構造を考慮したときの入力大きさ、分割数についてよりよい方法を提案できた。また、防振材要素をサブシステムとしてではなく、結合要素として計算することにより、SEA 解析において、防振効果の周波数特性を導入できた。軌道部による、防振効果をサブシステム間の透過係数により確認できた。これにより、各橋梁において、防振材の透過率をデータベース化することにより新橋においても簡易的に騒音予測ができるのではないかといえる。

課題として、透過率の理論的推定法の確立。ゴムパットの結合損失率を実験により測定し、データベース化を図る等が挙げられる。