

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560578

研究課題名(和文)まくらぎ間隔のバラツキの意図的導入による新たな軌道振動低減法の理論的検討

研究課題名(英文)A vibration reduction method for railway track by introduction of disturbance into sleeper spacing

研究代表者

阿部 和久 (ABE, Kazuhisa)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：40175899

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：まくらぎ間隔のバラツキを意図的に導入することによる新たな軌道振動低減法について理論的検討を行った。また、振動低減に有効な最適まくらぎ配置を求めた。その結果、当該まくらぎ配置が、検討した配置の中ではピン-ピン共振に対して最も大きな振動・騒音低減効果を有することがわかった。また、実際の軌道に存在するまくらぎ間隔のバラツキは、ピン-ピン共振の低減に多少は寄与し得るものの、上述の最適配置程の効果を持たないことがわかった。

研究成果の概要(英文)：A vibration reduction method is proposed for railway tracks. For this purpose, the introduction of disturbance into the sleeper spacing is proposed. The optimal sleeper spacing which can suppress the pinned-pinned resonance is obtained by means of the design sensitivity analysis. Through numerical experiments, the influence of the sleeper distribution on the dynamic reaction of railway tracks is investigated. It is found that, although the randomness in a real track can contribute to the vibration reduction, the best performance is attained by the employment of the optimal arrangement. The wheel/track interaction analysis proves that the optimal track can also contribute to the noise reduction.

研究分野：土木工学

キーワード：鉄道軌道 まくらぎ間隔のバラツキ 振動・騒音低減

1. 研究開始当初の背景

列車走行による軌道振動は、バラスト道床の不同沈下や地盤振動を惹き起す原因となる。よって振動低減は軌道管理上極めて重要であり、軌道のロングレール化やマルチプル・タイタンパーによるバラスト道床の不陸補正など、様々な改善や保全対策が講じられ、毎年多額の費用が投じられている。現在も省力化軌道の研究が行われているものの、その多くは経験則に基づいている。しかし、本質的な改善には、軌道振動論に立脚した新たな対策法の開発が必要である。

鉄道軌道は、まくらぎによりほぼ一定間隔で支持されているため、その動特性は周期性を反映したものとなる。周期波動場の際立った特徴は、波動モードが存在しない周波数帯(バンドギャップ)を持つことにある。一般に卓越応答はバンドギャップ端に存在し、定在波モードを形成する。例えば、まくらぎ締結位置を節とする共振モードである「ピン-ピンモード」は、レールにおける主要な定在波モードの一つであり、輪重変動や軌道振動に大きく影響を及ぼす。そのため、軌道振動低減には、これら共振モードの抑制が効果的であると考えられる。

実際のまくらぎ間隔は多少のバラツキを持つが、その存在により共振振幅は大幅に減少する(図 1)。また、一部に非周期部を有する軌道系の波動透過解析より、バンドギャップ近傍の周波数域での波動透過率が低減され、バンド端が不明瞭になることがわかる。このように、周期性を崩すことで明確なバンドギャップが消滅するため、卓越応答も不明瞭となる。

以上より、まくらぎ間隔のバラツキの存在は、振動低減や軌道破壊の抑制、ひいては軌道保守の省力化に極めて有効であると考えられる。

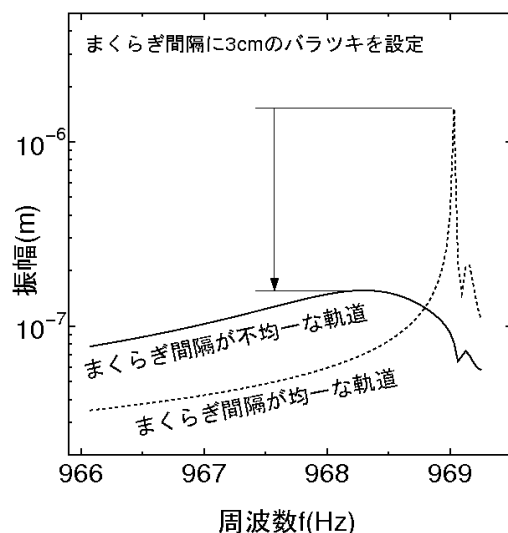


図 1 まくらぎ間隔のバラツキによる共振振幅の低下

2. 研究の目的

軌道における主要な共振モードに焦点を絞り、まくらぎ間隔のバラツキを意図的に導入・管理することによる新たな軌道振動低減法について理論的検討を行い、その実現可能性について探ることを目的とする。

なお、まくらぎ間隔のバラツキが軌道振動に及ぼす影響に関する既往の研究では、1つの確率分布のみによる検討に止まっていたり、1次の摂動までしか考慮していないなど、振動低減効果の評価の面で十分な考察まではなされていない。これに対し本研究では、当研究室でこれまでに構築してきた軌道振動理論と様々な解析技法に基づき、振動低減策の観点から当該問題に取り組む。

3. 研究の方法

(1) ロングレール直線区間を対象に、まくらぎ間隔の計測を実施し、具体的なバラツキに関する基礎データを得る。

(2) 軌道内の波動透過率に基づくまくらぎ配置の最適化解析を、感度解析に基づき実施する。

(3) 軌道の定点加振による定常共振応答を対象に、まくらぎ間隔のバラツキが共振振幅に及ぼす影響について調べる。具体的には、まず軌道の数値モデルを対象に、個々のまくらぎ位置のずれと共振振幅の変動量との関係を調べる。

さらに、当該のバラツキが正規分布等に従う様に設定した多数の軌道モデルを生成して感度解析を実施し、共振振幅の期待値・分散と、まくらぎ配置の分散との関係を求める。

また、まくらぎ位置のずれに関する確率分布を設計変数として、振動低減に有効なまくらぎ配置について模索する。具体的には、ある確率分布に従うまくらぎ間隔を有する軌道を多数生成し、その下で動的応答解析を実施して、振動低減に有効な分布について検討を行う。

(4) 各まくらぎ位置のずれに関する共振振幅の感度を二次の微係数まで求め、これに基づいた摂動展開式を導出し、その適用可能性について検討する。

(5) 等間隔配置の場合を基準とし、実軌道のバラツキを設定した場合、および最適配置とした場合を対象に、走行車輪・軌道連成解析を実施する。その結果より、まくらぎ間隔のバラツキの存在がレールの曲げ応力等に及ぼす影響について調べる。

(6) 走行車輪・軌道連成解析を通して、まくらぎ間隔が既存の軌道のバラツキを有する場合と、本研究で得た最適配置を有する場合を対象に、レール振動やそれにより発生する騒音の低減効果について検討する。

4. 研究成果

(1) 実軌道におけるまくらぎ間隔のバラツキの測定

実際に敷設されている直線ロングレール区間(H-線および U-線)でのまくらぎ間隔を約 1km にわたって測定した。両線区のまくらぎ間隔の度数分布を図 2, 図 3 に示す。何れも平均まくらぎ間隔は 66cm 前後となっている。また, 50~80cm の範囲に分布し, 概ね正規分布に近いものとなっていることがわかる。

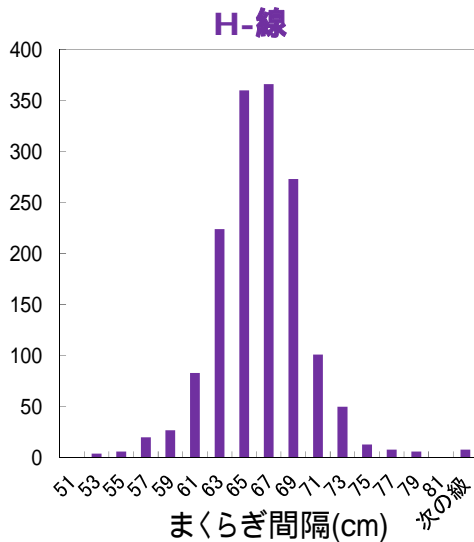


図 2 まくらぎ間隔の分布(H-線)

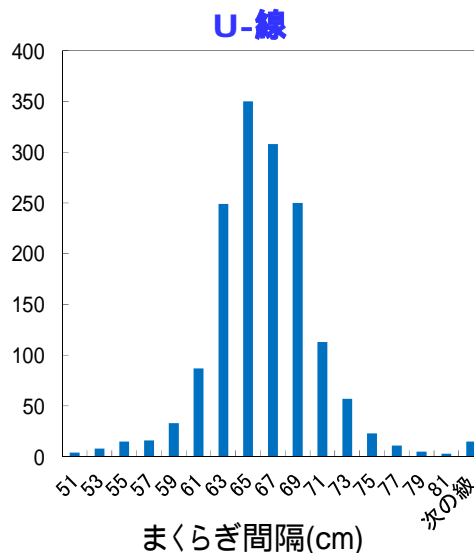


図 3 まくらぎ間隔の分布(U-線)

(2) まくらぎ間隔の最適化

図 4 の様に左右にまくらぎ間隔 l_0 の一様半無限周期区間を持つ軌道系を考える。その間に長さ L (一定)のまくらぎ間隔最適化区間を設ける。当該区間は, n 個のまくらぎ区間からなるものとし, 各まくらぎ間隔を $l_i (i=1, \dots, n)$ で与える。このまくらぎ間隔を設計変数として, 軌道の波動透過率を最小化する

まくらぎ配置を感度解析により求めた。

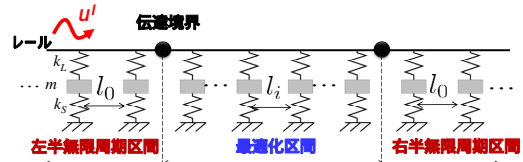


図 4 無限軌道における最適化区間の設定

最適化区間のまくらぎ間隔数を 9, 各まくらぎ間隔の初期値を $l_i=60\text{cm}$, 左右の一樣半無限周期区間のまくらぎ間隔を $l_0=60\text{cm}$ とした。最適化一回当たりの最大変化量を 0.5cm とし, まくらぎ間隔の最小値を 55cm, 最大値を 65cm に設定した。

ピン・ピン共振周波数 942Hz 付近を対象に, まくらぎ区間数 9, 10, 13, 16 の 4 ケースで最適化を行った。いずれのケースにおいても, 左半分のまくらぎ間隔が最短の 55cm, 右半分が最長の 65cm に収束した。

感度解析により得られたまくらぎの最適配置を対象に, 軌道中央スパンの中間点を定点調和加振して定常応答を求めた。なお, 最適化区間 ($L=5.4\text{m}$) を 40 区間分並べ, 216m の軌道モデルを作成した。

一樣まくらぎ配置, 最適化したもの, まくらぎ間隔に正規分布に基づきバラツキを与えたものの 3 ケースについて解析を行った。周波数-振幅関係を図 5 に示す。まくらぎを等間隔に配置した場合は 1000Hz 付近で共振応答が卓越している。ランダムな配置においては, 等間隔よりは応答が小さくなるものの, 比較的大きな卓越応答が認められる。一方, 最適化したまくらぎ配置の場合は, 低周波数帯では他のケースと大差ないものの, 1000Hz 付近の応答は大幅に低減されており, 最適化の効果が顕著に現れている。

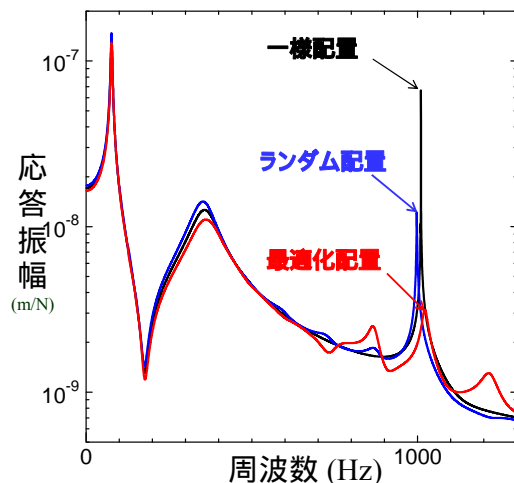


図 5 まくらぎ配置が定点調和加振応答に及ぼす影響

(3) まくらぎ間隔のバラツキが共振振幅に及ぼす影響(定点加振)

軌道モデルを図6に示す. 50kgN レールを仮定し, レール1本当たりのまくらぎ質量は100kgとする. パッド剛性は軌道パッドとまくらぎ下パッドに対してそれぞれ $k_r=110\text{MN/m}$, $k_s=30\text{MN/m}$ と設定した. 基準まくらぎ間隔は60cm ($L=60\text{cm}$)とし, まくらぎ360区間を離散化した. 調和加振は, 180番と181番まくらぎ間中央に設定した.

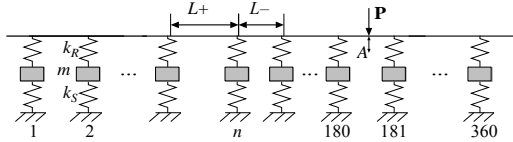


図6 n 番まくらぎ位置にずれを与えた軌道モデル

図7は, まくらぎ位置のずれと共振振幅との関係を示したものである. 図において, 共振応答振幅 A は n 番 ($n=181, 220, 260$)まくらぎ位置のずれ ε_n の関数として表示している. 言うまでもなく, これらはまくらぎ番号について対称となる. 例えば, 180番まくらぎのずれの影響は, 加振点に関して対称に位置する181番まくらぎのずれで評価できる. ($-0.01\text{m} < \varepsilon_n < 0.01\text{m}$)の比較的小さなずれにおいて, 共振振幅は下に凸の曲線を与え, ずれの存在により振幅が増大している. この結果は, 完全な周期構造にわずかなずれを与えると, 共振振幅が増幅し得ることを示唆している. また, まくらぎ位置のずれが共振振幅に及ぼす影響は, 加振点からまくらぎまでの距離と共に減少する傾向にある. 逆に, 加振点に隣接するまくらぎ位置のずれが支配的であることがわかる.

$[1 \times 10^{-7}]$

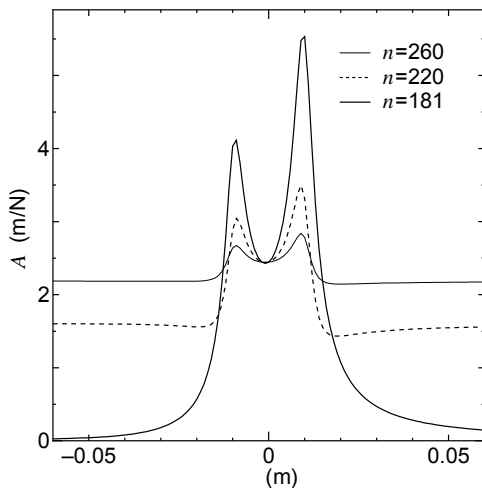


図7 ε と A の関係

まくらぎ間隔が正規分布に従う場合につい

て, 数値実験を行った. 図8は $\sigma_\varepsilon^2 - E(A)$ の関係を示したものである. なお, 様々な σ_ε^2 に対して各々ばらつきを設定した1000個の軌道での解析結果より評価した. 図より, まくらぎ間隔のバラツキの分散と共に期待値は最初増大するが, その後減少して行くことがわかる. 通常まくらぎ間隔は, これらの図に示した範囲より大きなバラツキを有するので, 共振振幅の期待値はバラツキの存在により低減されることとなる. なお, 振幅の分散においても同様の傾向が得られた.

$[1 \times 10^{-7}]$

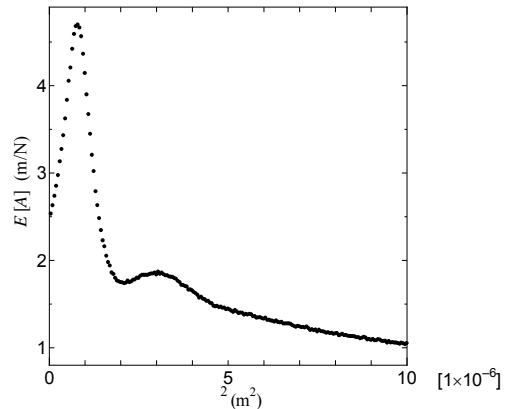


図8 σ_ε^2 と $E(A)$ の関係

また, まくらぎ間隔のバラツキが正規分布に従うものの他に, 平均まくらぎ間隔の前後に連続に一樣分布する場合, およびある値から最大 $\pm 2.5\text{cm}$ までの範囲に一樣に分布する場合の3ケースを対象とした. その結果, 最後のケースに対して最も大きな応答振幅低減効果が認められた. ただし, 以前に求めた最適なまくらぎ配置の場合程の効果は得られなかった.

(4) 摂動展開の適用性に関する検討

(3)と同じ軌道の定点調和加振問題を対象に, まくらぎ間隔のバラツキが統計量に及ぼす影響を摂動展開により求めた. 結果を図9に示す. 図には図8の結果と合わせ摂動近似を直線で示した. 2次の摂動近似の適用可能範囲は, $\sigma_\varepsilon^2 < 2 \times 10^{-7} (\text{m}^2)$ の程度となっている. この値は, 実際の軌道におけるまくらぎ間隔のバラツキが有する分散に比べてはるかに小さい. さらに, たとえ4次近似を用いたとしても, それは図の2次成分にしか寄与し得ない. よって, 実際の軌道に存在しているバラツキレベルでは, 共振振幅の期待値と分散の評価に4次近似を用いることは本質的改善につながらない. 以上より, 本問題に摂動法を適用することは困難であり, モンテカルロシミュレーションの様な数値実験を

実施せざるを得ないことがわかる。

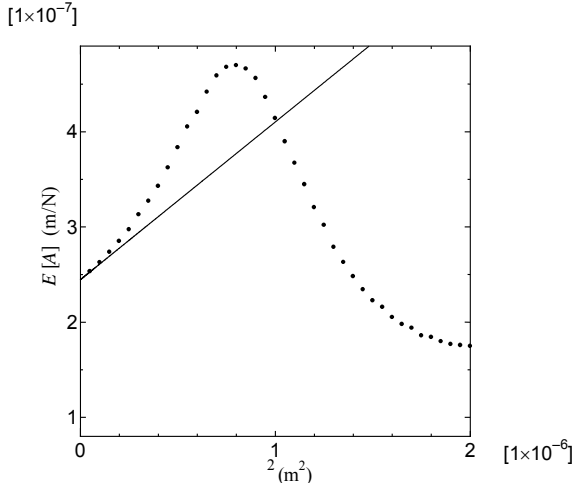


図9 σ_ϵ^2 と $E(A)$ の関係と摂動近似

(5) まくらぎ間隔のバラツキの存在がレールの曲げ応力等に及ぼす影響

まくらぎ間隔の違いによるレール曲げモーメント(曲げ応力)とまくらぎ下作用力それぞれについて解析を行い、その影響について検討した。具体的には走行車輪・レール・まくらぎ・パッド類から構成される車輪・軌道連成振動モデルを用い、まくらぎ間隔の違いが結果に及ぼす影響を数値実験により調べた。

連成解析では、レール頭頂面に凹凸を設定している。レールは 50kgN レール、レール 1 本当りのまくらぎ質量は 100kg、軌道パッドとまくらぎ下パッド(道床)のバネ定数はそれぞれ 110、および 50MN/m と設定した。

まくらぎ間隔は 60cm を基準とし、最適配置では 55cm と 65cm の区間をそれぞれ 5 区間ずつ設けたものを 1 ユニットとして、それを繰り返し設置している。また、実軌道におけるまくらぎ間隔のバラツキに基づき、それを平均まくらぎ間隔 60cm に補正したものを作成した。

軌道は、まくらぎ 200 本から構成される有限長モデルで与え、レール曲げモーメントは 96 番～105 番スパン中央での値を評価した。また、まくらぎ下作用力は、96 番～105 番まくらぎを対象に求めた。なお、車輪走行速度は 20m/s と、30m/s の 2 ケース設定した。

レール曲げモーメントの最大値は、均一なまくらぎ配置、最適配置、バラツキのある配置の各々に対して、それぞれ 13.1, 13.9, 13.5 kN・m (走行速度 20m/s の場合)、13.4, 13.9, 13.9 kN・m (走行速度 30m/s の場合)であった。走行速度の増加と共に、まくらぎ間隔の違いがレール曲げモーメントに及ぼす影響は低減される傾向にある。なお、走行速度 20m/s の場合、均一配置での最大曲げモーメントに対して最適配置では 6%、バラツキのある配置で 3%程度大きめとなっている。また、30m/s の場合では、どちらのまくらぎ配置も 4%程度大きめとなっている。20m/s の

場合、最適配置での曲げモーメントが幾分大きめとなっはいるものの、より曲げモーメントが大きくなる 30m/s の場合では、実軌道に存在し得る程度のバラツキを有するものとで差異は認められなかった。

まくらぎ下作用力の最大値は、均一なまくらぎ配置、最適配置、バラツキのある配置の各々に対して、それぞれ 29.8, 31.4, 31.1 kN (走行速度 20m/s の場合) 29.3, 30.6, 30.2 kN (走行速度 30m/s の場合)となった。レール曲げモーメントとは逆に、速度と共に最大値がわずかに減少する傾向が認められた。なお、走行速度 20m/s の場合、均一配置での最大まくらぎ下圧力に対して最適配置では 5%、バラツキのある配置で 4%程度大きめとなっている。また、30m/s の場合では、それぞれ 4% および 3%程度大きめとなっている。バラツキを有する軌道に比べて、最適配置の場合わずかに大きめの値となっはいるものの、有意な違いは認められなかった。

(6) まくらぎ配置が車輪・軌道連成系の振動・騒音特性に及ぼす影響

図 10 のような N 個のまくらぎによりレールが離散支持された有限長モデルと走行車輪の連成系モデルにより応答を求めた。まくらぎ配置は定点加振同様に、等間隔($l=65\text{cm}$)、H-線、U-線での測定結果に基づき設定した H1～5, U1～5, および最適化軌道の合計 12 ケースを対象とした。またレール頭頂面には凹凸を設定した。

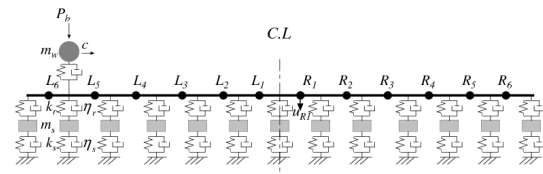


図 10 車輪・軌道連成モデル

振動に及ぼす影響

各観測点におけるレールたわみ時刻歴応答加速度をフーリエ変換し、周波数-応答変位加速度の関係性を求めた。観測点 R1-5 と L1-5 での最大応答の結果を図 11 に示す。なお、図は 1/3 オクターブバンドで平滑化した結果である。また、H-線および U-線の結果は、まくらぎ配置 5 ケースの平均値となっている。

低周波数帯においては、何れのケースにおいても応答に大差が見られない。一方、800Hz 付近の共振周波数においては、等間隔配置に対する応答が最大値を示している。H-線および U-線の両ケースでは、等間隔の場合より応答が小さくなっはいるものの、その低下量は比較的小さい。一方、最適配置の場合他ケースと比較してピークの低下が明瞭に現れており、定点加振の場合と同様にピン-ピン共振の低減に対する有効性が認められる。

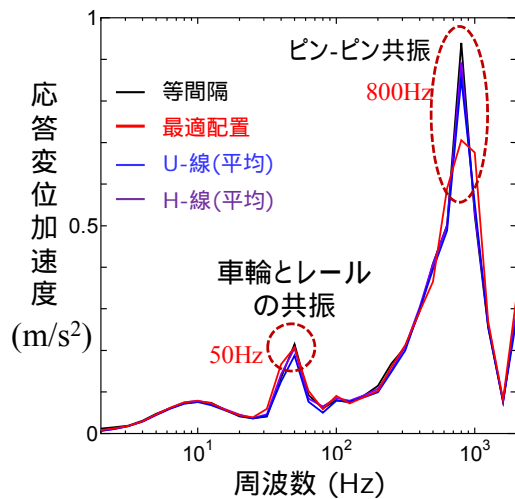


図 11 周波数-応答変位加速度

車輪走行速度が振動応答に及ぼす影響を確認するため、速度 $c=30\text{m/s}$ の場合に加え 20 および 60m/s の 2 ケースに対しても応答解析を行った。その結果、 $c=30\text{m/s}$ のケースのみ、 50Hz 付近に明瞭な卓越応答が認められた。この周波数は走行車輪がまくらぎを通過する際の周波数(約 46Hz)に概ね一致しており、パラメータ共振が発生したものと考えられる。

騒音特性に及ぼす影響

まくらぎ配置が周波数-相対音圧レベルに及ぼす影響を図 12 に示す。まくらぎ間隔がバラツキを有するケースでは、 100Hz 以下の周波数域において相対音圧が増減しており、軌道の不均一性が騒音増幅に至る可能性が認められる。一方 800Hz 付近のピン-ピン共振周波数近傍においては、最適配置の場合において当該共振周波数域で 1dB 程度の騒音低減効果が得られており、最適配置の有効性が確認できる。なお、図は走行速度 30m/s の場合であるが、他の走行速度においても、最適配置の有効性が認められた。

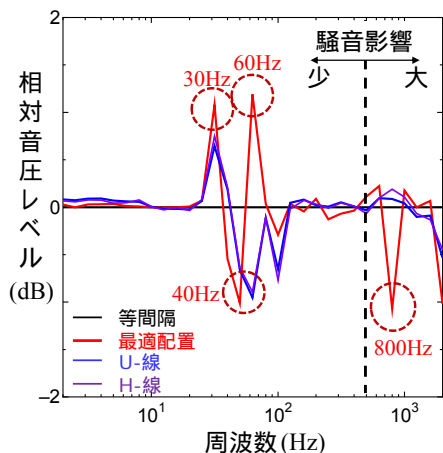


図 12 まくらぎ配置が相対音圧に及ぼす影響 (走行速度 30m/s)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

Batjargal Sodbilig, 阿部和久, 紅露一寛, まくらぎ配置がレールの振動・騒音特性に及ぼす影響, 鉄道工学シンポジウム論文集, 査読有, 第 18 号, 2014, 23-30.

S. Batjargal, K. Abe, K. Koro, Sleeper spacing optimization for vibration reduction in rails, COSEIK J. Comput. Struct. Eng., 査読有, 25(6), 2012, 569-577.

[学会発表](計 7 件)

Batjargal Sodbilig, 阿部和久, 紅露一寛, 振動・騒音低減に有効なまくらぎ配置に関する検討, J-Rail2014, 2014 年 12 月 16 日, 朱鷺メッセ(新潟県・新潟市).

K. Abe, S. Batjargal, K. Koro, Influence of sleeper spacing on vibration and noise of railway tracks, ISMA2014, 2014 年 9 月 17 日, Leuven (ベルギー).

Batjargal Sodbilig, 阿部和久, 紅露一寛, まくらぎ配置が軌道の共振挙動に及ぼす影響, J-Rail2013, 2013 年 12 月 5 日, オリンピック記念青少年総合センター(東京都・渋谷区).

K. Abe, S. Batjargal, K. Koro, Resonant behavior of railway track having random sleeper spacing, ASEM13, 2013 年 9 月 9 日, 西帰浦市(韓国).

Batjargal Sodbilig, 阿部和久, 紅露一寛, まくらぎ間隔の最適化による軌道振動低減効果, J-Rail2012, 2012 年 12 月 7 日, 東京大学生産技術研究所(東京都・目黒区).

B. Sodbilig, K. Abe, K. Koro, Sleeper spacing optimization for vibration reduction in rails, CODE2012, 2012 年 11 月 14 日, 西帰浦市(韓国).

B. Sodbilig, K. Abe, K. Koro, Optimization of sleeper spacing for reduction of wave transmission, STECH12, 2012 年 9 月 18 日, ソウル市(韓国).

[その他]

ホームページ等

<http://applmech.eng.niigata-u.ac.jp/research/track/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阿部 和久 (ABE, Kazuhisa)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号: 40175899