

I-291

浮上式鉄道の鋼橋に低磁性鋼を用いる場合の磁気抗力

(財) 鉄道総合技術研究所 正員 穴見源八

〃 正員 市川篤司

〃 志村雄三

1. はじめに 浮上式鉄道において超電導磁石(以下SCMという。)を搭載した車両が通過するとき、ガイドウェイに使用されている鋼材には時間的に変動する磁界によって渦電流やループ電流などが誘起され、車両の走行抵抗やエネルギー損失が発生する。この車両の走行抵抗のことを磁気抗力と呼んでいる。この磁気抗力については未だに解明されない部分が多いが、今後計画される浮上式鉄道のガイドウェイでは桁高制限を受ける橋梁、あるいは急速施工を行う橋梁等に鋼構造物を使う必要性が出てくると考えられることから、その大きさをできるだけ小さくすることが望まれている。このようなことから、ここでは鋼構造物の浮上式鉄道に対する適用性等を検討する場合に必要な磁気抗力の解析方法について報告する。

2. 解析方法 一般に磁気抗力を解析するには電磁気学の基本式として知られている次のマクスウェルの方程式を解くことが必要になる。

$$\operatorname{div} \mathbf{J} + \partial \rho / \partial t = 0 \quad (1) \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (3) \quad \operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \partial \mathbf{D} / \partial t \quad (4)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t \quad (5)$$

ここに、 $\mathbf{J}$: 電流密度 (A/m^2)、 ρ : 電荷密度 (C/m^3)、 $\mathbf{B}$: 磁束密度 (Wb/m^3 または T)、

$\mathbf{D}$: 電気変位 (C/m^2)、 $\mathbf{H}$: 磁界の強さ (A/m)、 $\mathbf{E}$: 電界の強さ (V/m)

これらの方程式の解法としては、 $\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}$ で定義される磁気ベクトルポテンシャル $\mathbf{A}$ と電気スカラーポテンシャル ϕ (電位) を未知数として解く方法がよく知られている。すなわち、周波数が低い領域 ($< 10 \text{ MHz}$) を対象とする場合、アンペールの法則(4)式における変位電流 $\partial \mathbf{D} / \partial t$ を無視することができるので¹⁾、上記微分方程式を与えられた境界条件(クーロンゲージ条件)のもとで解くと、電荷が無限に分布する領域では、すべての空間において $\mathbf{A}$ および ϕ が次式で与えられる。

$$\mathbf{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int \frac{\mathbf{J}}{r} d\mathbf{v} \quad (6) \quad \phi = \frac{\mu}{4\pi\epsilon} \int \frac{\rho}{r} d\mathbf{v} \quad (7)$$

ここに、 $\mathbf{A}$: ベクトルポテンシャル、 r : 電位 ϕ を考える点と積分を行う点との距離、 $\mathbf{v}$: 微小体積ところが上式をそのまま計算しようとすると、何も無い空間までメッシュ分割してモデル化する必要があり、浮上式鉄道の場合のようにSCMが移動する磁界の問題では、SCMの移動に伴ってメッシュモデルを刻一刻と変化させなければならないので、現時点ではコンピュータの負荷が大きすぎて解析が不可能である。そこで問題を単純化するため、次のような仮定のもとで解析を行う方法について検討した。

- ① 普通鋼などの強磁性体では、磁束線が鋼材の方向に引き付けられ、また鋼材によって磁束線がささぎられるため、問題がいつそう複雑になる。そこで、磁束線の集中がない低磁性鋼を解析の対象とする。
- ② 表皮効果により鋼材の表面と内部とで誘導電流の状態が変わる影響を無視することのできる薄板を対象にする。鋼材の板厚については電導体としての電気抵抗率で評価する。
- ③ 磁気抗力の発生原因である磁界の変動は、最も影響の大きなものとしてSCMによる移動磁界のみを考慮し、誘導案内コイルなどの地上コイルの影響を無視する。
- ④ 鋼材に発生する渦電流による鋼材周辺の磁界の変動を無視する。したがって、磁束密度に関しビオ＝サバールの式が成り立つものとする。
- ⑤ 渦電流による鋼材内部の電位を考慮する。

このようにすると、移動するSCMの近くに鋼材が配置されている場合の電場 $\mathbf{E}$ および磁場 $\mathbf{B}$ を、次式で

与えることができる。

$$\mathbf{B} \approx \mathbf{B}_{SCM} \quad (8) \quad \mathbf{E} \approx -\mathbf{v} \times \mathbf{B}_{SCM} - \text{grad} \phi_{EC} \quad (9)$$

ここに、 $\mathbf{B}_{SCM}$ ：SCM単独の磁場、 $\mathbf{v}$ ：車両の走行速度、 $\text{grad} \phi_{EC}$ ：鋼材内部の電位の傾き
 上式において $\mathbf{B}_{SCM}$ はビオ＝サバルの式から求めることができる。また、 ϕ_{EC} についてはクーロンゲージ
 条件 $\text{div} \mathbf{A}_{EC} = 0$ のもとで、渦電流部分についてマクスウェルの方程式を解くことにより求めることができ
 る。すなわち、

$$\phi_{EC} = \frac{\mu}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho_{EC}}{r} dv \quad (10)$$

さらに(10)式において電荷 ρ_{EC} を求めるために最小発熱の原理を適用すると、次式の単位時間あたりの発
 熱エネルギー（ジュール損失） W が最小になるような ϕ_{EC} の分布を計算することが可能となる。

$$W = \int \frac{\mathbf{J}_{EC}^2}{\sigma} dv \quad (11)$$

以上により、(9)式の $\mathbf{E}$ を求めることができ、これをオームの法則 $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ に適用すれば、渦電流 $\mathbf{J}_{EC}$ を
 求めることができる。また、磁気抗力 F_{drag} は(11)式の発熱エネルギー W を車両速度 v で除すことによっ
 て求めることができる。なお、この方法では鋼部材のみをメッシュ分割するだけでよいのでコンピュータ
 の負荷はそれほど大きくない。

3. 実験値と解析値との比較

上記の解析手法の
 精度を検討するため、これまで宮崎実験線で行われ
 た磁気抗力の測定実験との比較を行った。一般に磁
 気抗力を直接測定する方法はその測定が強い磁界の
 影響を受けるために難しく、あまり行われていない
 が、ここでは図1のようにSCM中心から約30cm
 の位置に長さ50cmの低磁性鋼の試験体（鋼マ
 ンガン鋼、L70×70×6）を置いたときの測定
 値との比較を行った。

この実験では磁気抗力の測定に車両の進行方向の
 みに感度を有するロードセルを用い、ノイズ成分を
 キャンセルするために積分回路を通して1車両通過
 時の力積を求め、これを通過時間で除して平均的な
 磁気抗力を求めている。

図2にこの実験結果と解析値とを示す。図中の解
 析値は、実験値と比較するため同様の処理を行っ
 て求めた平均値とピーク値についても記入した。この
 結果、計算値は実測値の約80%となり、比較的よ
 い一致を見た。

4. あとがき

本文で紹介した解析はいくつかの
 仮定を設けて現象を単純化しているが、それでも浮
 上式鉄道の橋梁に低磁性鋼を用いる場合の磁気抗力

を把握することは十分可能であると考えられる。今後さらに解析の精度を高めるとともに各種の実験を通
 して磁気抗力に対する理解を深めていきたい。なお、磁気抗力実験データは、(財)鉄道総合技術研究所藤
 原研究室から提供していただいたものであり、藤本研究係長ほか関係の方々はこの紙をかりて謝意を表し
 ます。【参考文献】1) F.C.Moon: Magneto-Solid Mechanics, Wiley-Interscience, 1984

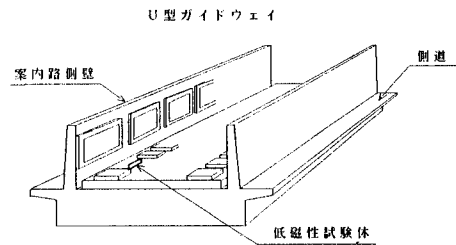


図1 試験体取付状況

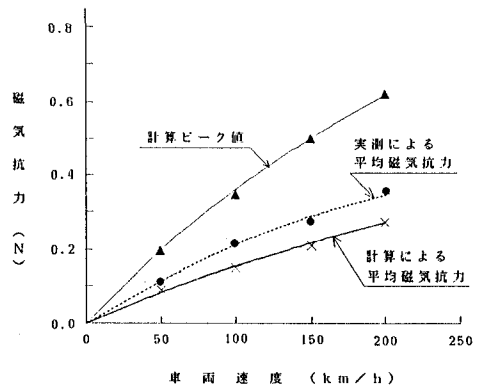


図2 実験値と解析値の比較