

論文の内容の要旨

論文題目 鉄道線路の線形整正における経験的交差法の理論化とその現代的応用

氏 名 江原 学

鉄道軌道の多くは、列車の繰り返し荷重により生じる残留変位である「軌道狂い」が、許容範囲内となるように保守管理していくことを前提としたシステムである。

軌道狂いの検出、そのうち線路長手方向に生じる縦方向、または横方向の軌道線形に生ずる狂い（縦方向：高低狂い 横方向：通り狂い）は、わが国では鉄道黎明期より経験的に軌道に沿って 10m の弦を設定し、その中点における弦とレールの直角方向の離れ（正矢）を測定するシンプルな計測方法「正矢法」が用いられている。

理論的には軌道線形の二階差分量の連続測定に相当するこの手法は、列車動揺との関連性からその測定法の持つ理論的な有効性が立証されており、また今日においても列車走行速度向上にあわせた様々な同手法の改良や応用が行われている。

一方で正矢法により得られた測定値を実際の軌道狂いの整備に必要となる各地点での移動量（どこを・どれだけ・どの方向に動かせばよいか）計画に変換する方法である「交差法」については、1930年代のわが国への導入以降、様々な軌道線形整正の現場で用いられ、経験的な実績は多く存在する。しかしながら、理論的には測定誤差の重畳に関連した種々の問題が知られていたため、表立って推奨される計画法とはみなされてこなかった。その一因は交差法の理論的分析が十分になされていなかったことにある。

この交差法に内在する誤差重畳の問題を背景として、1980年代より鉄道技術研究所により「復元原波形法」（以下、復元法）が開発され、軌道検出技術の開発等とあわせ軌道整備に一定の成果を挙げているが、実務者にとっては計算そのものがブラックボックス化しやすいことや対象区間の前後に相当延長にわたる追加測定を必要とするなど、実際上の課題が少なくない。

本研究では、現在の高速鉄道における線形整正実務においても有益な効果を挙げている経験的交差法を理論的に解明し、現代的な応用を行うことを目的として線形代数における固有値問題として定式化をおこなった。その結果

① 交差法・正矢法には観測されたデータを、データ個数 n のみを変数とする簡易な計算により、弦長を $(n+1)$ とする n 個の両端固定弦振動モード（以下、定常波）に分解する正弦波分解機能が内在していること。

② 交差法による測定誤差の影響はデータ個数 n に伴い重畳するものの、第1～第5定常波に全体の95%以上が集中する弦振動の物理法則に従った特性を持ち、列車の速度や固有振動数などを考慮した工学的に有意な除去及び制御が可能であること。

などが明らかになり、同理論の実軌道における検証結果とあわせ、同法をベースとした軌道整正手法が現在においても十分に活用できる実用的かつ合理的な手法であることを報告するものである。

本論文の構成と、その内容の概略を示す。論文は以下の本文 全6章および付録(14章)より構成している。

第1章では 鉄道線路における軌道管理概論と研究の背景と意義についてのべる

列車の走行により軌道長手方向に生じる歪みである軌道狂いを簡便な測定により見つけ出す「正矢法」について、その特性と理論的な意義、および応用法について記述する。

また本論文の主題である正矢法での測定値から軌道の補修作業に必要となる「移動量」への換算を行う「交差法」について、その幾何学的計算原理、学術史的な文献調査内容などを含め詳細な解説をおこなう。また過去より理論上交差法の最大の課題であるとされてきた「測定誤差の重畳」について、改めて式による定義をおこなう。

次に1980年代後半から90年代にかけて行われてきた、既存鉄道施設を活用した列車の速度向上に伴い発生した管理基準の見直しの必要性とこれを背景とした技術的ギャップを具体例とともに明らかにし、本研究の意義を明確にのべる。

第2章では 交差法の理論的な再定義を行う

幾何学的な変形から論じられてきた交差法を、各正矢測定点での法線をy軸とする部分直交座標系における正矢(差)ベクトルと、移動量ベクトル相互間の座標変換を司る行列の問題、1次変換の問題としてとして理論的に再定義する。

あわせて交差法を表す行列の固有値問題として解析することにより交差法の作用の本質を明らかにする。

第3章では 理論的な再定義により得られるメリットをのべる

第2章で得られた各種の理論解析より導かれた値、および式の工学的な意味とメリット、その具体的な応用法について考察する。

特に三角関数を用いて正確に式として得られる固有値が、古くから知られてきた正矢法の検出倍率と一致すること、正矢法及び交差法を行列による1次変換として捉えれば、各行列の中には、あらゆる測定値を正弦波の和として分解する、特に $2p(n+1)$ を基本波長とする n 個の定常波(ここに p :測定間隔 n :測定数)に分解する特殊な機能が内在していることを明らかにする。

さらにこれらの結果を活かすことで、前後の軌道との連続が必ず確保される演算結果を導ける特性をはじめとした数々の工学上のメリットについて具体的に述べる。

第4章では 誤差重畳問題への対応策をのべる

第4章では過去より理論上最大の課題とされた測定誤差の重畳現象について、その実態をコンピューターを用いた数値実験より再現させ、第3章で得られた定常波分解機能と、特異値分解手法(SVD:singular Value Decomposition)の知見を利用し考察を加える。

その結果、誤差の重畳は発散として生じるのではなく、第1~第5定常波に全体の95%が集中する、特に第1定常波(基本振動)には72%が集中する弦振動の物理法則に従った特性があることを明らかにするとともに、過去の曲線整正における技術的指導の理論的な合理性を立証する。

またSVD近似法の知見から、正矢の検出精度と管理対象とする軌道狂いの波長の2つをパラメータとして発生する誤差の絶対値が統計的に推定できること、また同数値を用いS/N

比の観点より交差法演算結果の使用可否判定法を新たに提案する。加えて同判定法が復元法についても適用可能であることを詳記する。

第5章では 実フィールドにおける理論の検証結果をのべる

第4章までの交差法の理論化によって明らかになった事項、特に測定誤差の影響を回避するための使用可否判定手法、および理論的に求められた精度までの施工が実際に可能であるか否かの検証を、過去25年にわたり JR 西日本の実フィールド(=軌道保守現場)で実施してきた交差法による曲線整正の事例を用いて解析し、その整合性を明らかにする。

第6章では まとめと今後の課題をのべる

本論文全体のまとめとして、経験的に使用してきた交差法の技術的総括を行い、同手法の有効性が理論的に立証できること、その知見より現代的な応用が展開できる実用的かつ合理的な軌道実形状演算手法であることを述べる。

今後の課題として測定精度に依存した長波長側の整備限界精度が統計的に推定され、この克服には検測装置の精度向上も含めた技術開発が必要となること。

本論文で明らかにした、正矢法、交差法に内在する任意の入力データを定常波のみに分解する特殊な正弦波分解機能を用いた様々な応用、その可能性についても言及を行う。

また巻末に付録を添付する。付録は14章から構成され、本文中で十分に説明できなかった部分について記述し、本文より引用できる表記としている。

過去より線路保守技術フィールドで常用してきた公式等も、改めて導出プロセスを表記することとした。

また本文第2章の交差法の理論的再定義に関わる証明を付録6～9章において、本文第4章の測定誤差挙動に対する考察に関わる証明を付録14章に記述する。いずれも数学的な証明記述の手法を用いている。