

The analysis of the tamping-machine's lining work based upon the matrix calculation model

Gaku Ehara, RAILTECH.CO.LTD 5-4-20 Nishinakasima, Yodogawa-ku, Osaka

Shoichi Hashimoto, Prof. Kobe city college of technology 8-3 Gakuenhigashimach, Nishi-ku, Kobe

Almost tamping-machine's work had been making a good performance on the track maintenance. But some cases which in permitted curve section's realignment work had been having the problem of the working quality. This paper shows analysis method using the matrix model of tamping-machine's lining function based upon the theory of the classical chord realignment calculation method. Through the analysis, we suggest a new correcting method for tamping-machine's lining work and show some examples used improved lining work which called "C-point direct correction method" in JR-WEST developed at 2010.

Keywords : track maintenance, tamping-machine, realignment work at curve section, matrix model

1. はじめに

今日の有道床軌道保守では、マルチプルタイタンバ(以下、MTT)を主力として用い改善効果を得ているが、一部の軌道通り変位修正作業(以下、ライニング作業)特に移動に制約条件を伴う曲線部においての施工品質にバラツキがあり、その均質化が求められている。

MTTライニング作業の挙動については周波数解析的アプローチから何例かの知見¹⁾が明らかにされているが、いずれも施工中に発生する誤差への評価、あるいは人為的に与える数値の影響評価を行うまでには至っていない。

本論文ではMTTライニング作業を座標変換行為として捉え、施工中に発生する各種の誤差影響も評価を行える行列モデルを作成して検証をおこない、施工品質向上を目論んだ工法を提案し、その検証結果を報告する。

2. 行列モデル化の前提条件

筆者らは、過去10m弦差法演算を行列モデルとして捉えその有効性を報告²⁾してきたところであるが、今回のMTT行列モデル化においても10m弦差法演算の前提条件³⁾である“線路を5m毎の離散座標として捉えれば、其々の点の移動は独立として考えることができる”を用いて解析をすすめる。5m毎の離散座標とMTTの作業、及び検測位置を合わせるため、図-1に示す弦配置を持つ2種類のMTTモデルを考える。

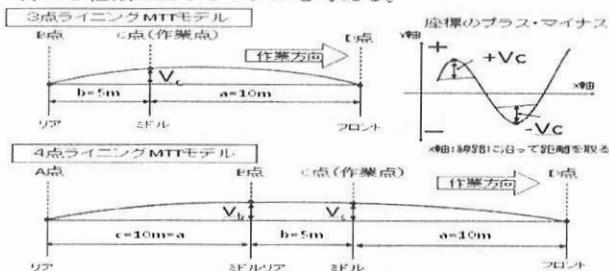


図-1 2種類のMTTモデルと座標系

尚、本論文内で用いる座標は線路に沿った距離をX座標とし、其々X座標に直交したY軸の±を図-1のように定義し記述を進めることとする。

また式や文章中における[]内の太字の大文字は行列

を、細字の大文字は列または行ベクトルを、示すものとす。

3. MTTライニング原理と変換行列 [MTw] [MTwe]

3.1 MTTライニング原理

図-2に先に定義した2種類のMTTライニング原理及び各点の部位名、呼称を示す。

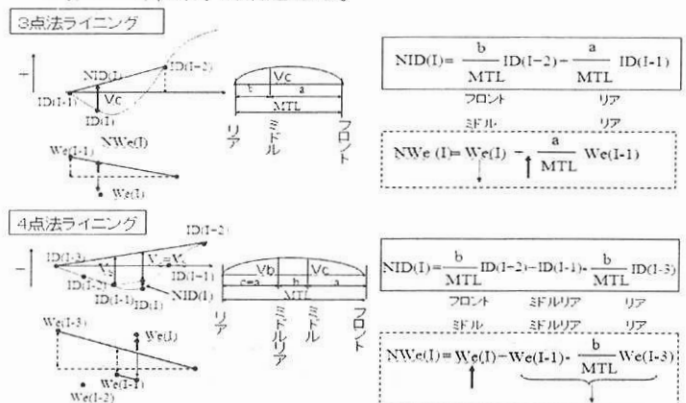


図-2 各モデルのライニング機構原理と部位名

ライニング原理は両モデル共に「フロント、リア間に張られた弦からのミドル位置における矢(Vc)を一定値になるまで線路を動かす」というシンプルなものである。

一定値が0、Vc=0とするのが3点ライニング(以下、3点法)一定値がミドルリアで測定された値Vb、Vb=Vcとするのが4点ライニング(以下、4点法)である。

本原理に基づき曲線で作業を行う場合、3点法では曲線全域にわたり人為的なVcへの補正入力が必要となる。これを“Y修正”と定義する。MTT本体が半径R(m)の本曲線内にある場合は、円距法³⁾により直ちに

$$Vc = a \times b / 2R \quad (m) \quad (3-1)$$

と得られるが、緩和曲線等では平面座標を用いた計算が必要になる。

4点法ではMTT本体が一定の曲率を持つ線形内(直線部はR=∞として考える)にある場合はVb=Vcとなるた

めY修正は不要となるが、連続的に曲率の変化する緩和曲線内においては

$$Vc = \kappa / 2RL \quad (3-2)$$

L: 緩和曲線長(m)

κ : MTT弦配置によって決まる定数
で与えられ、MTTが緩和曲線内にあるときに一定値となる。こちらも平面座標を用いた計算が必要⁴⁾である。

3.2 MTT線形変換行列 [MTw]^X X: ライニング種別

先のライニング原理を作業前線路座標[ID]が作業後、新座標[NIDs]に座標変換する行列として表現する方法を検討する。各ベクトルの一部を抜き出して、ある1点での計算式とすれば、図-2の3点法では任意点id(i)は

$$\begin{bmatrix} \text{id}(i-1) \\ \text{id}(i) \\ \text{id}(i+1) \\ \text{id}(i+2) \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

なる変換により、フロント座標、及びリア座標によって定まる新座標 nids(i)に移動する。同様に4点法の場合は

$$\begin{bmatrix} \text{id}(i-3) \\ \text{id}(i-2) \\ \text{id}(i-1) \\ \text{id}(i) \\ \text{id}(i+1) \\ \text{id}(i+2) \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

と変換され、こちらの場合も作業点の座標 id(i)とは無関係にフロント、ミドルリア、リアの3座標によって定まる新座標 nids(i)に移動する。

この変換がMTT進行に伴い、X軸方向に順次ずれながら作用することになるので、先の行ベクトルを単位行列中で1列ずつずらしながら作成し、掛け合わせることで線形変換行列[MTw]³[MTw]⁴をそれぞれ得ることができる(図-3)

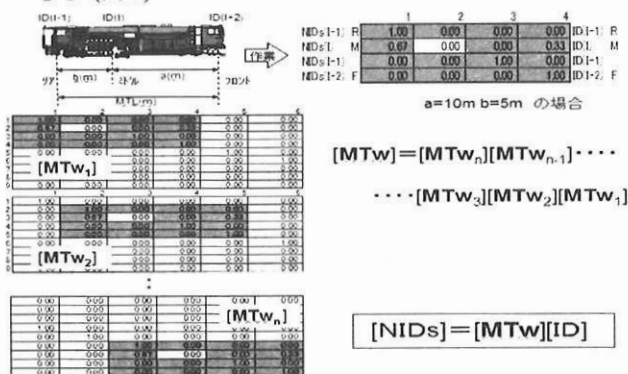


図-3 線形変換行列[MTw]の合成法

尚、前出の論文²⁾によって施工前の線路座標[ID]は、10m弦交差法をあらわす行列[TR10]とその逆行列である[TR10]⁻¹、ならびに10m弦の正矢量[MV]を用いて

$$[ID] = [TR10]^{-1} [MV] \quad (3-5)$$

と測量学的な座標計算をすることなく得ることが可能であることが示されている。

同様の考え方により線路座標[ID]より3点法ミドル位置に発生する矢に変換する行列[TRMT]は図-2に示され

た各点の位置関係より、

1	0	-0.33	0	0
-0.67	1	0	-0.33	0
0	-0.67	1	0	-0.33
0	0	-0.67	1	0

図-4 3点法 MTT 偏心矢変換行列[TRMT]

として導き出すことができる。

また事前に各地点における移動量を知ることができれば、図-2に示すMTTフロント位置に与えることにより影響を除去することが可能である。これが「絶対基準」あるいは「誘導付相対基準」といわれる施工法であり、その際の線形変換行列[MTw]^Xは式(3-3)、(3-4)における行ベクトルの最終項、b/MTL=0とした

3点法:[a/MTL,0,0,0] 4点法:[-b/MTL,0,1,0,0,0]を用いて同様に求めることができる。

3.3 MTT誤差・入力値変換行列 [MTwe]^X

一方、ミドル位置には施工中の誤差の発生、あるいは人為的な数値の付与が考えられる。曲線部におけるY修正値入力の後者の代表例である。この各地点のミドルに発生する、又は付与する数値を列ベクトル[We]、同スカラ要素をwe(i)とすれば、図-2より3点法では

$$\begin{bmatrix} \text{we}(i-1) \\ \text{we}(i) \\ \text{we}(i+1) \\ \text{we}(i+2) \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

同様に4点法では

$$\begin{bmatrix} \text{we}(i-3) \\ \text{we}(i-2) \\ \text{we}(i-1) \\ \text{we}(i) \\ \text{we}(i+1) \\ \text{we}(i+2) \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

なる変換により其々新座標 nwe(i)への移動が行われ、3.2節のMTT進行に伴うズレの反映法同様、図-5に示すプロセスにより、誤差・入力値変換行列[MTwe]³[MTwe]⁴を得ることが出来る。

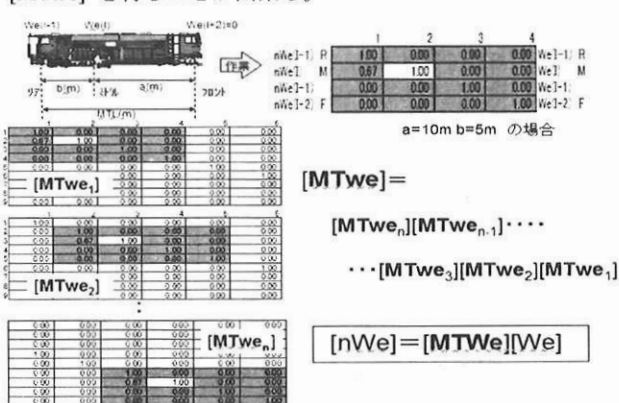


図-5 線形変換行列[MTwe]の合成法

この2組の行列、3点法:[MTw]³[MTwe]³ 4点法:[MTw]⁴[MTwe]⁴を用いることにより、施工後の線路座標[NID]を施工前の線路座標[ID]、各地点の誤差等[We]より

$$3 \text{ 点法: } [NID] = [MTw]^3 [ID] + [MTwe]^3 [We]$$

$$4 \text{ 点法: } [NID] = [MTw]^4 [ID] + [MTwe]^4 [We] \quad (3-7)$$

と分離、重ね合わせた行列モデルで計算、評価することが可能となる。

$$\begin{bmatrix} \text{施工後線路座標} \\ \text{線形変換行列} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{施工前線路座標} \\ \text{誤差・入力値変換行列} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{誤差等} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \text{NID} \\ \text{MTw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{ID} \\ \text{MTwe} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{We} \end{bmatrix}$$

10m弦差法
行列モデルより

$$\begin{bmatrix} \text{ID} \\ \text{MTw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{TR10}^{-1} \\ \text{OV} - \text{MV} \end{bmatrix}$$

設計正矢 測定正矢

図-6 合成行列モデル

4. 行列を用いた各種 MTT ライニング挙動の解析

本行列モデルを用いて種々の条件での MTT ライニング作業の挙動を解析し実際の施工結果との比較、検証をおこなう。

4.1 基本線形への Y 修正を用いた行列モデル検証

軌道変位のない基本線形 $R=1000(\text{m})$ $\text{TCL}=50(\text{m})$ における Y 修正を求め、 $[\text{We}]$ として式(4-2)に入力した場合の挙動を計算することで本行列モデルを検証する。

施工前線路座標 $[\text{ID}]$ は 10m 弦正矢 $[\text{MV}]$ より式(3-5) $[\text{ID}]=[\text{TR10}]^{-1}[\text{MV}]$ で得られる。

この線路座標を MTT で測定して得られる矢 $[\text{MTV}]$ は

$$[\text{MTV}]=[\text{TRMT}][\text{ID}] \quad (4-1)$$

となり前述の Y 修正に相当する。この $[\text{MTV}]$ を式(3-7)における $[\text{We}]$ に入力した場合の計算結果を図-7 に示す。

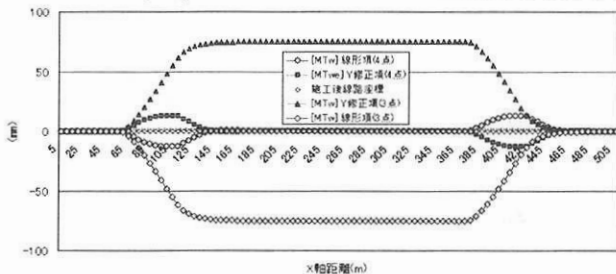


図-7 挙動解析行列モデルで表現した Y 修正

3点法、4点法とも $[\text{MTw}]$ と $[\text{MTwe}]$ の座標変換の重ねあわせにより曲線部であっても施工後線路座標 $=0$ として通過でき、式(3-7)の正当性が検証できる。

4.2 任意波長 SIN 波軌道形状での挙動解析

入力 $[\text{ID}]$ を SIN 波とした場合の出力 $[\text{NID}]$ との振幅の比率を除去率%としてプロットしたものを図-8 に示す。

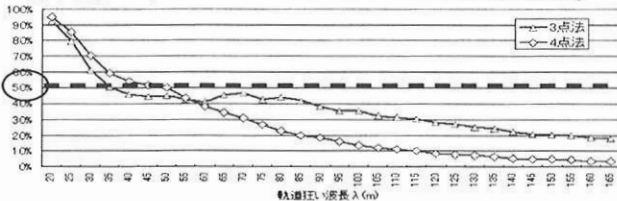


図-8 相対基準施工 波長別除去率

過去の知見¹⁾同様、特定の波長における発散は認められないものの、 $\lambda > 40\text{m}$ 付近より除去率は 50%を下回る。

実際に湖西線で得た両相対ライニング法の施工前後のパワースペクトルの比較と併せ、改めて相対基準施工での長波長整備の限界を理論的に示す結果を得た。

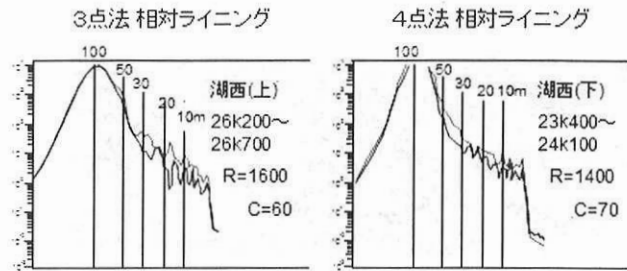


図-9 3点法、4点法施工例 PWS 分析 (湖西線)

4.3 単発・連続発生誤差の挙動解析

作業中に 1mm の単発誤差を生じた場合の挙動を図-10 に示す。

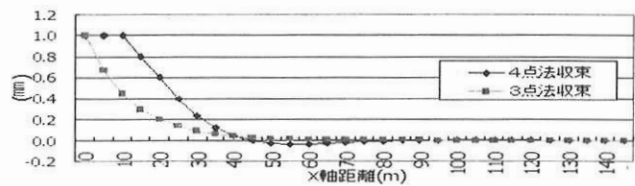


図-10 誤差の挙動解析 (単発発生)

両法ともに誤差は収束するが、4点法の場合、ミドルリアの正矢比較の影響により 10m 間誤差がコピーされる。また 3点法の片側収束に対して 4点法は約 5%程度逆方向への振動収束となる。加えて影響が 1%未満となるまでの距離は 4点法 90m 3点法 70m とより長くなる。次に誤差 1mm の連続発生時の挙動を図-11 に示す。

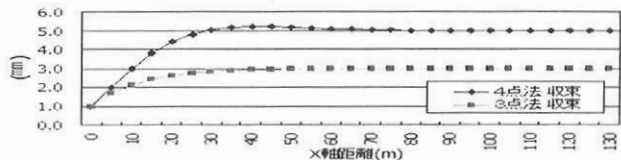


図-11 誤差の挙動解析 (連続発生)

3点法では 3mm、4点法では 5mm の位置に平行移動を生じる。この平行移動の発生は仕上がりを絶対的な座標ではなく 10m 弦等“矢”で評価する場合、気づく事が大変難しい由々しき問題となる。

4.4 曲線内でのライニング挙動解析

4.4-1) 3点法 本曲線内での挙動

誤差が一方に連続発生するケースは、通常の施工では考えにくい、これを曲線の Y 修正入力誤差と捉えれば、特に曲線全域で Y 修正が必要な 3点法では、その可能性を否定できない。図-12 に $R=650$ の曲率(10m 弦正矢 $=19.2\text{mm}$)を持つ曲線に $R=600$ (10m 弦正矢 $=20.8\text{mm}$)の Y 修正を与えた場合に発生する平行移動の例を示す。



図-12 3点法 Y 修正ミスの挙動解析

仮に本曲線中に不動点が存在し、机上では取り付けられる計画であったとしても、平行移動により不動点の際で±5mm/10m弦の通り変位を生じることになる。

実際の曲線区間の不動点近傍のチャートを図-13に示す。上記仮説を裏付ける段違い型波形が散見される。

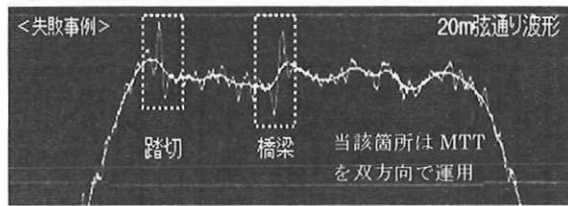


図-13 不動点前後の通り段違い波形例

4.4-(2) 4点法 曲線内での挙動

4点法では本曲線内Y修正=0となることより、平行移動発生リスクは少ない。一方で緩和曲線ではY修正が必要となるが、その値が小さいため過去の技術文献⁵⁾などでは“数mm程度のY修正ならば不要”との記述さえある。しかしこれは誤った指導であり、そのような4点法作業を実施した場合、TCLを半波長とした通り変位を作り出すことが本解析より明らかになった。



図-14 4点法 Y修正ミスの挙動解析

また、Y修正を与える位置を誤った(±5m)場合、図-15に示す乗り心地管理上好ましくない形状の10m弦通り変位波形を生み出す。これは3点法でも同様であり、こちらも実際のチャートで同様の波形が散見される。



図-15 緩和曲線Y修正位置ずれの挙動解析と実際の例

5. 改善案の提言・検証 C点ダイレクト補正法

曲線区間の整備計画において対象区間を完全な一律の曲率にする移動が許容されることは、既設構造物への限界や軌道中心間隔確保の問題から稀であり、何らかの修正を余儀なくされる。この修正された計画移動量に対する正確なY修正値(3点法用)を以下の方法で求める。

修正された計画移動量を $[ID^*]$ とすればこの計画移動後の10m弦 $[DV^*]$ は既出の交差法行列演算式²⁾より

$$[DV^*] = [TR10][ID^*] + [MV] \quad (5-1)$$

ここで $[TR10]^{-1}$ と $[TRMT]$ を用いれば設計正矢 $[DV^*]$ に相当するMTTのY修正値 $[MTV^*]$ は

$$[MTV^*] = [TRMT][TR10]^{-1}[DV^*] \quad (5-2)$$

として求められる。

このY修正 $[MTV^*]$ をミドル(C点)に、修正移動量 $[ID^*]$ をフロント(D点)に連続的に与える絶対基準作業を

「C点ダイレクト補正法」と呼び平成22年度よりJR西日本管内で導入後、制約条件下(マイクロボックスでの復元帯域調整行為も含む)での曲線ライニング作業の品質向上と均質化の効果⁶⁾が確認されている。

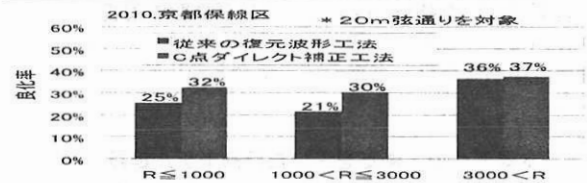
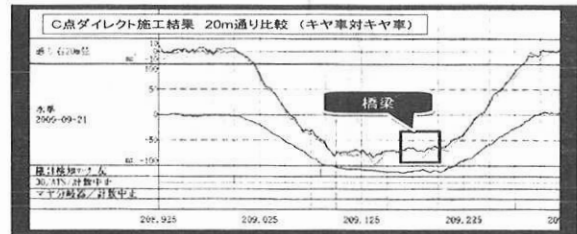


図-16 C点ダイレクト補正施工事例

6. まとめ

- ① MTTライニング作業を座標変換と捉え、10m弦交差法行列モデル、及び各点移動の独立の前提を用いた同作業挙動解析用行列モデルを作成した。
- ② モデルの解析と実施工例の検証より曲線部品品質のバラツキはY修正のミスマッチ(値、位置)による影響が支配的であることを明らかにした。
- ③ 任意線形における10m弦値から、MTTのY修正に変換する手法を考案し、不動点や制約条件に対応したY修正を得ることを可能とした。
- ④ ③のY修正値と制約、修正を行った地点移動量を用いてMTTライニング精度を高める、C点ダイレクト工法を開発し、実施工における検証を行い、その有効性を確認した。

7. 今後の課題

曲線部ライニング作業時のMTT制御値は理論的にはほぼ最適化されたが、冬季における曲線内軌側への偏り現象等、自然発生的な要因に対しては主にMTT本体のパワーアップで対応しているに過ぎない。

現在、この把握には線路外の第3座標からの施工前後の移動数値を測定し、計画移動量と比較する方法を用いているが、これを車上で測定し、補正する方法を試行中である。

参考文献

- 1) 須田他、鉄道施設協会、新しい線路、P504～506、1998
- 2) 江原、鉄道工学シンポジウム論文集 第16号、交差法の評価と実施工での検証、P157～164
- 3) 神谷、交友社、鉄道曲線、P198～200、1971
- 4) 保線機械化検討G、鉄道施設協会、マルタイの構造と保守、P296、1981
- 5) 白井、東洋書店、保線機械の取扱と事故防止、P373、1979
- 6) 辰巳他、平成22年度土木学会年次講演会「復元計画における基準線を考慮したMTT制御法」