

論文 在来線におけるスタビライザー施工後の 仕上がり精度向上への取組

沖井 宏也¹・村山 陽一郎²・江原 学³

¹ (株) レールテック 広島支店 山口在来線営業所 (〒754-0002 山口市小郡下郷 3394 番 3 号)
E-mail: okii_hiroya@railtec.jp (Corresponding Author)

² 正会員 (株) レールテック 広島支店 (〒732-0057 広島市東区二葉の里 3 丁目 8 番 21 号 新館 4F)
E-mail: Murayama_youichirou@railtec.jp

³ 正会員 (株) レールテック 広島支店 (〒732-0057 広島市東区二葉の里 3 丁目 8 番 21 号 新館 4F)
E-mail: chara_gaku@railtec.jp

昨今の在来線において道床安定作業車（以下、DTS）はマルチプルタイタンパー（以下、MTT）作業後の道床横抵抗回復による作業平準化等を目的に導入が拡大している。しかしその一方で DTS 作業後、MTT 作業後の線路状態、特に高低狂いを悪化させる副作用が確認され、この対応策が必要となった。

本論文では 2018 年～2019 年の酷暑期（8 月）に広島地区で行われた災害復旧ならびに軌道強靱化工事（道床交換を伴わない PC マクラギ化工事）において使用した DTS 施工結果分析を通じ、道床横抵抗力の回復、ならびに DTS 投入による高低軌道狂い進み抑制効果を明らかにする。

あわせて DTS の強制沈下により発生する高低軌道狂い帯域を分析し、これを増幅させた復元線形演算法と MTT により意図的な上げ越しを行う工法（デザインレベリング工法）の試行結果について報告するものである。

Key Words: *DynamicTrack Stabiliser, Lateral Resistance, Track Maintenance Term, Track Irregularity of Longitudinal Level, Design Leveling work*

1. はじめに

スタビライザーユニットを搭載した道床安定作業車（以下、DTS）は、国内において 1990 年代の新幹線軌道における徐行速度向上を目的とした導入に始まり、在来線軌道においても道床整理機能等を併せ持つ多機能型機種（バラストレギュレータ：図-1）の導入が各所で行われている。

DTS 施工の特徴は、マルチプルタイタンパー（以下、MTT）等によるつき固め作業後の緩んだ道床に対し、水平方向振動と垂直荷重を与えることで軌道を強制沈下させ、均一な締め固めを行える点である。これらの作用によって道床横抵抗力を回復させ、軌道の安定化および保守周期延伸効果をもたらすことは各種文献にて紹介されている¹⁾²⁾。

そのほか、これまでレール張り出し等のリスクにより制限されていた酷暑期の MTT による道床つき固め作業を可能とし、周期に偏りが生じていた同工事期間の平準化を図ることができる。



図-1 DTS 外観（バラストレギュレータタイプ）

2. 2018 年度山陽本線災害復旧工事における DTS 投入効果および副作用

2018 年 7 月に発生した西日本豪雨災害により、甚大な被害を受けた広島地区の山陽本線では、早期の復旧工事完遂のため、酷暑期となる 8 月に MTT 作業を行うこととなった。そのためレール張り出し防止策が必要不可欠となり、DTS 投入による軌道安定化が図られた。

(1) 道床横抵抗力の回復および保守周期延伸効果

施工に際し、MTT 施工後の軌道に DTS の一定負荷モードによる締固めを行い、標題の評価材料として施工前後における道床横抵抗力および高低狂い変遷の確認が行われた。

図-2 に MTT および DTS 施工前後の道床横抵抗力の比較を示す。一般的に MTT 施工後の道床横抵抗力は 50～60%に減少するとされている³⁾が、図-2 に示す様に DTS 等施工後は 60%減少ラインを超えて 6kN/m 以上に回復していることが確認された⁴⁾。

図-3 に高低狂い変遷を示す。施工前の高低狂い（10m 弦）P 値を 100%とし、その後の変化を軌道検測車の検測データをもとに時系列で評価する。なお比較対象とした MTT 単独施工の変遷は同一区間の 2017 年度までの検測データを用いている。

DTS 施工を行った場合、MTT 単独施工と比較して施工直後の高低狂いは P 値レベルで 30～40%悪化する傾向が見られるものの、施工から 6 ヶ月以降の進行度合については、MTT の単独施工と比較して非常に緩やかであることが見てとれる。この状態のまま推移していくと仮定した場合、従来の MTT 施工の場合は施工後 12 ヶ月程度で施工前の状態に戻るのに対し、スタビライザー等施工

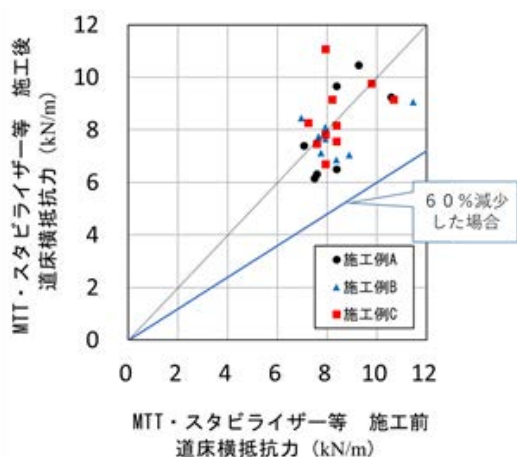


図-2 施工前後における道床横抵抗力の比較

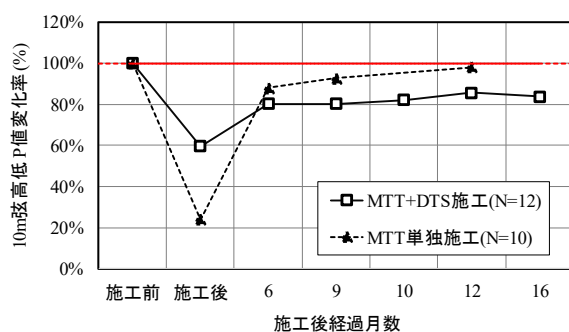


図-3 各施工方式による高低狂い変遷の比較

では 18 ヶ月程度、約 1.5 倍の延伸効果が期待される。

以上のことから、DTS 施工は在来線的环境下においても各種文献¹⁾²⁾で述べられている有用な効果が期待できることが確認された。

(2) DTS 施工による副作用

前述の DTS 施工直後の高低 P 値悪化の副作用に関して、図-4 に施工前および MTT・DTS それぞれ施工直後の 10m 弦高低正矢量を比較した一例を示す。MTT 施工で整備された線形は DTS 投入によって変化し、施工前と同様な波形へ戻っている部分も散見される。このような傾向は施工箇所全体で顕著に観測された。

この副作用をより詳細に調査すべく、DTS 施工後の高低狂い変化をパワースペクトル密度（以下、PSD）により分析をおこなった（図-5）。結果、復元設計で採用したほぼ全域（長波側上限、以下 λ_{dm} 今回： $\lambda_{dm} \leq 40m$ ）に亘って一定の割合（各帯域の振幅換算で約 1.5～2.0 倍程度）で変化しており、こちらも施工箇所全体で同様の傾向になることが確認された。

DTS の強制沈下による高低狂い悪化の副作用は、保守周期延伸効果とトレードオフとなるものではあるが、先の文献¹⁾²⁾ではこの抑制を示唆する図等も紹介されており、MTT 投入の意義を考慮すれば対応が必要である。

DTS 施工のメリットを最大限活かすためにも、この副作用を抑制する手段の確立が重要な課題であると考えた。

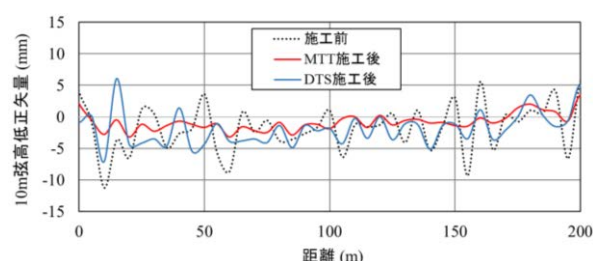


図-4 施工前後における 10m 弦高低正矢量の比較

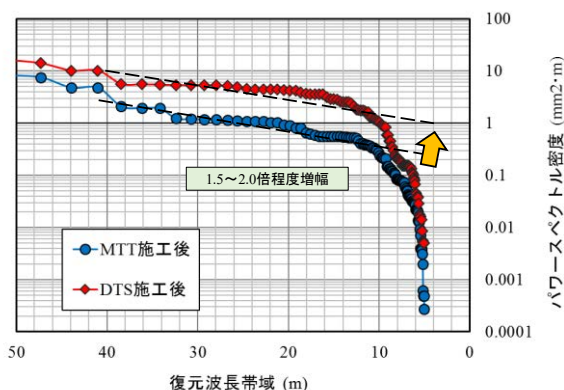


図-5 DTS 投入による PSD 変化

3. デザインレベリング工法の技術的検討

第2章2節で述べたとおり，DTSの強制沈下にはMTT作業後の高低線形を悪化させる副作用があり，対策の必要性が明らかになった。

そこで，この軌道沈下量を見越した意図的な上げ越しをMTT作業で行うことにより副作用を抑制し，通常のMTT単独作業で得られる線形と同等に整備することで，施工品質の維持およびDTSの保守周期延伸効果が両立できると考えた。

なお，この意図的な上げ越しはヨーロッパの少数の文献¹²⁾にて概要が図で示される程度に留まっており，具体的な手法や条件等について解説・検証がなされたものは殆どない。本論文では，この上げ越し量の最適な設計法とMTTでの施工法を併せたデザインレベリング工法（以下，DL工法）を独自の解釈により開発，検証を実施した。以下，そのプロセスについて述べる。

(1) ベクトル交差法を用いたデザインレベリング設計

上げ越し量の策定にあたり，前述のPSD解析から副作用は復元波長帯域のほぼ全域にわたって一定割合で発生するとの観測知見を得た。従ってMTT施工前の高低狂い（正矢値）を波長分解し所望の復元帯域まで一定倍率で増幅させることが有効ではないかと考えた。

DL工法の概略を図-6に示す。MTT施工は復元原波形を用いた絶対基準作業にて行うことを前提とし，波長分解および復元演算には当社のオリジナル技術である定常波フーリエ変換を用いたベクトル交差法⁹⁾を適用する。これは従来の復元法でネックとなる施工区間両外方，相当延長の検測データを必要とせず，簡易型軌道検測装置（以下，トラックマスター）の検測データも容易に導入可能であることから，工期短縮と精度向上の双方を意図したものである。



図-6 DL工法の概略

演算の処理過程は，検測正矢データを波長別に分解し，指定した復元帯域までを指定倍率で増幅する。次にこの増幅正矢値からベクトル交差法により実線形を求め，各種移動制限を満たす最適化演算法（ルートサーチロジック）により上げ越し量を含む補正こう上量（図-7）を得る流れとなる⁹⁾。

(2) MTTレベリング機能への適用

復元MTT施工において計画通りのこう上を行うためには，単に復元原波形に対するこう上量だけでなく，整備後の計画線形（設計正矢）を縦曲線補正值として与えることが重要である⁷⁾。

DL工法においても同様に，補正こう上量による設計正矢（図-8）を逆算しMTT偏心矢へ変換後，一種の縦曲線補正值としてMTTに与えることとなる。但しレベリングの機構上，同補正值並びにこう上量は合成してMTTの弦先端部に与えねばならず，単純な凹凸を作るだけでも入力数値・位置は複雑になる（図-9）。

MTTの弦先端部に与える補正值を式(1)に示す。

$$GMT(x) = (MT(x-a) - MT(x-l)) \times \frac{l}{(l-a)} + MT(x-l) \quad (1)$$

ここに， $GMT(x)$ ：MTTの弦先端部に与える補正值

$MT(x)$ ：DL設計線形

l ：MTTレベリング弦長

a ：MTTレベリングフロントボギーからミドルボギーまでの距離

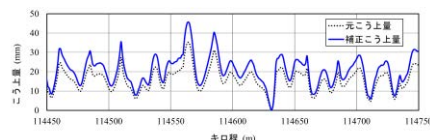


図-7 元こう上量と補正こう上量の比較

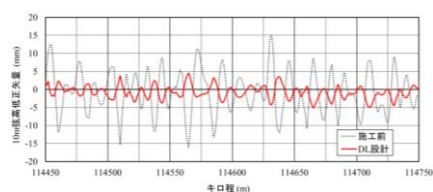


図-8 DL設計正矢

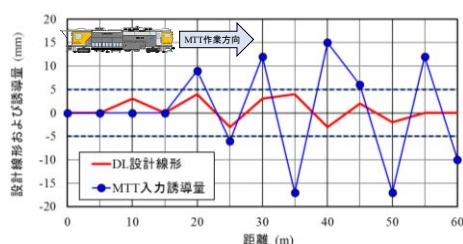


図-9 DL設計線形と入力誘導量の関係

4. 2019 年度芸備線軌道強靱化工事における DL 施工検証

前述の DL 工法の検証にあたり、2019 年 8 月の芸備線軌道強靱化工事（PC マクラギ連続交換・道床交換なし）にて MTT・DTS 同時施工の機会を得た。PC マクラギ交換直後かつ未開通区間での施工になることから、検測データの取得には全箇所トラックマスターを使用し、下記条件にて設計・施工を実施した。

(1) DL 設計条件

各施工区間の設計条件として高低復元帯域 $\lambda_{dm} \leq 40$ m、増幅倍率を 1.3~1.5 倍とした。これは当該線区の列車速度、並びに上げ越しによる影響を 10m 弦正矢 ± 5 mm 未満となるように考慮したためである。また、比較対象として DL 工法非適用区間（経験と感覚に基づくマニュアル上げ越し工法）を一部設定した。

(2) 施工結果の考察

初めに MTT で設計通りの線形（設計上げ越しによる凹凸）に仕上げる事が可能であるか評価する。図-10 に 10m 弦高低正矢による DL 設計と MTT 施工後の両波

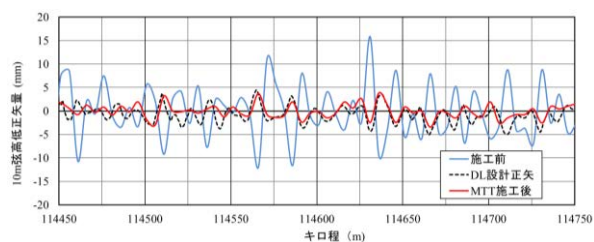


図-10 DL設計正矢と MTT 施工後波形の比較

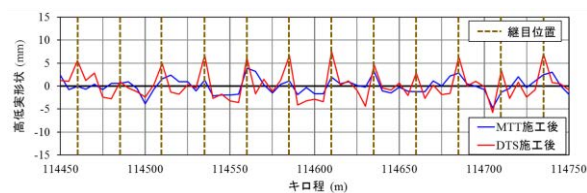


図-11 DL 施工前後の復元原波形比較
(復元帯域 $\lambda_{dm} \leq 50$ m)

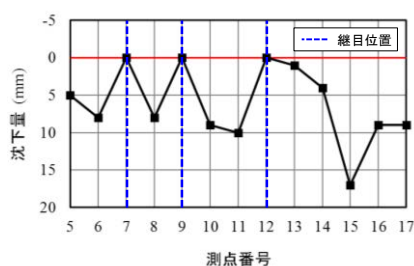


図-12 ホーム限界測定による絶対沈下量測定結果

形比較の例を示す。概ね設計通りの正矢に仕上げられることが確認され、3章2節での MTT レベリング機能制御理論の有効性が裏付けられた。

次に DTS 施工後の線形を考察する。図-11 は DTS 施工前後における高低復元波形 ($\lambda_{dm} \leq 50$ m で表記) を比較したものである。DTS 施工後は継目部の高むらが極めて目立つ線形となり、図-12 のホーム限界測定から得られた絶対沈下測定値が示すように、継目部では殆んど沈下していないことが見てとれる。同傾向は 2019 年度の施工区間全体に亘って確認された。この原因について、継目マクラギ以外の PC マクラギ化を行ったことによる道床攪拌状態の差を考慮せず、DL ならびに DTS 施工を行ったことによるものと考えられる。

上記の結果は意図していなかったものであるが、継目部を除外した中間部のみを対象として PSD 解析を行ったところ、図-13 のとおり DTS 投入による良化が施工箇所の半数以上で確認された。DTS の強制沈下が MTT で意図的に作り出した高むらを均し、線形を改善する方向に作用したものと推測される。

(3) 高低狂いの変遷

保守周期延伸効果を確認するため、第3章1節と同様に 10m 弦高低狂い σ 値の変遷を調査した。初めに図-14 により DL 工法適用の効果を考察する。運転再開後における変遷は DL による副作用抑制分のマージンをそのま

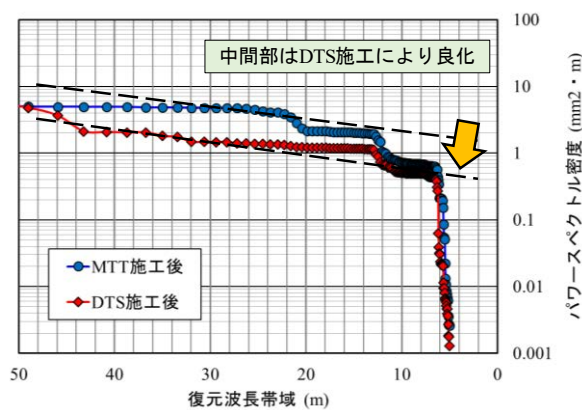


図-13 中間部における PSD 変化

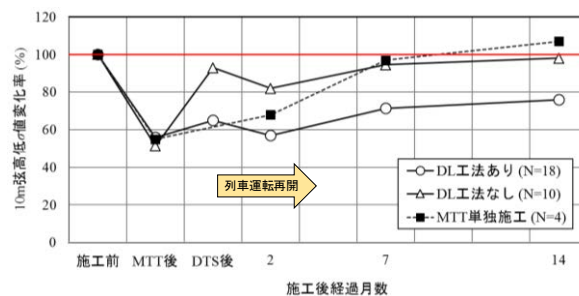


図-14 DL 工法の有無による高低狂い変遷の比較

ま保持しており、再開後 14 ヶ月においても非適用区間と比し 20～25%良好な状態である。理論に基づいた DL 工法の必要性を証明する結果が得られたと判断する。

次に酷暑期前に実施した PC 化+MTT 単独施工区間のデータと比較すれば、図-3 で示した山陽本線での DTS 投入効果を上回る延伸（おおむね 3 倍以上）が観測された。一般的に軌道材料の品質に劣るローカル線区においても、工法の工夫により優れた DTS 投入効果を得られる可能性が示唆されたと考える。

前述した中間部良化の結果と併せ、DL 工法は当初の目論見通り DTS 投入の副作用を抑制し、施工品質と保守周期延伸効果との両立が可能であることが裏付けられたといえる。

5. まとめ

- ① DTS 投入により、道床横抵抗力の回復ならびに高低軌道狂い進行の抑制効果が確認された。
- ② DTS の強制沈下により、MTT 施工後の高低仕上り状態を悪化させてしまう副作用が確認された。
- ③ ②の副作用は復元こう上設計を行う波長帯域のほぼ全域に亘り概ね均等に発生していることが確認された。
- ④ ③の知見に基づき、トラックマスター等の正矢検測データを任意帯域で増幅し、10m 弦残留狂いと各種こう上制限（最大・個別制限）を満たす復元設計法と MTT で意図した設計凹凸を作り出す誘導工法（2つを合わせて DL 施工）を確立した。
- ⑤ DL 施工により DTS の副作用を抑制し、MTT 単独施工にほぼ遜色のない施工品質と DTS 安定化作業による保守周期延伸効果の双方を在来線においても得られることが確認された。

6. 今後の課題

今回の DL 施工検証区間は酷暑期の張出しリスク回避の観点より全て直線区間であり、曲線区間、カントに対しての副作用への検討は未実施である。今回不十分であった継目部に対する増幅倍率設定と併せてさらに検討・検証を行う必要がある。また今回は機械整備の関係上使用できなかったものの、DTS にはレベリング検測機構を利用した可変負荷モードが搭載されている。MTT で意図的に作製した凹凸を感知させ沈下量をコントロールすることで更に高品質な DL 施工が期待できると考える。

検討すべき課題は多いが、国内の在来線軌道におけるスタビライザー活用技術を高め、DTS の持つ様々な効用を享受すべく、本研究をさらに深度化させていく所存である。

参考文献

- 1) Bernhard Lichtberger : 15.6.2.10.11.12 Longer maintenance cycles achieved by the DTS, p.492, Eurail press, 2005.
- 2) Coenraad Esveld : Modern Railway Track Second Edition, pp.374-377, MRT-Productions, 2001.
- 3) 佐藤吉彦, 梅原利之 : 5.2 軌道の座屈安定性, 線路工学, p.288, 日本鉄道施設協会, 1987.2.
- 4) 太田晋一, 清末敦博 : 夏期保守作業制限の見直しに伴う検証, 新線路, 2018 年 2 月号, p.15, 鉄道現業社, 2018.
- 5) 村山陽一郎, 片岡武 : 西日本豪雨災害における復旧 MTT 施工に対する技術的取組, 日本鉄道施設協会誌, P56, 2019
- 6) 江原学 : 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 (その 3), 日本鉄道施設協会誌, p.910, 2016.
- 7) 保線工学編集委員会 : 保線工学〈下〉, pp.176-178, 鉄道現業社, 2018.

(Received April 2, 2021)

(Accepted June 4, 2021)

EFFORTS TO IMPROVE FINISHING ACCURACY AFTER OPERATION OF DYNAMIC TRACK STABILISER ON CONVENTIONAL RAILWAY TRACKS

Hiroya OKII, Youichirou MURAYAMA and Gaku EHARA

Dynamic Track Stabilisers (DTS) are increasingly being used on conventional railway tracks to extend the maintenance cycle of tracks by recovering the lateral resistance of the track bed after tamping.

However, it has been observed that the operation of the DTS worsens the track condition after tamping operation, especially the track irregularity of longitudinal level, which is required a countermeasure.

In this paper, through the analysis of the results of the DTS used in the disaster recovery and track strengthening construction in the Hiroshima area during the summer season (August) of 2018-2019, the effect of the DTS on recovering the lateral resistance of the track bed and the prevention of the progressing track irregularity of longitudinal level are clarified.

In addition, the trial results of the restoration linear calculation method that amplifies the wavelength band of the track irregularity of longitudinal level caused by the forced settlement of the DTS, and the method that intentionally raises over by the tamping machine (design leveling work) are reported.