

各種軌道条件に適応した TC型省力化軌道の開発



熊倉 孝雄*



堀 雄一郎*



小関 昌信*

TC型省力化軌道は軌道保守の作業量を低減させる目的で1997年に開発され、山手線を始めとした首都圏に導入されて以来、敷設延長は210kmを超えた。敷設から15年を経過し、メンテナンスの削減効果や軌道状態の良化が確認されているが、一部の急曲線部や地下水位の高い軟弱路盤上での敷設箇所など特異な軌道条件において修繕が必要な事象が発生した。これらの軌道条件への対策として、曲線半径300m未満の急曲線部ではレール締結クリップや楔型インシュレータを改良し、地下水位の高い箇所では排水設備の効果の確認と軌道沈下特性を解明することで適正な排水設備の施工標準を策定した。さらに橋台裏の軌道境界部などで路盤空洞が発生した場合の影響を定量的に求め、各種軌道条件に適応したTC型省力化軌道の構造を開発した。

●キーワード：TC型省力化軌道、楔型インシュレータ、レール締結クリップ、排水こう、噴泥指数、路盤空洞

1. はじめに

JR東日本では、少子化による労働力不足や3K作業からの脱却など、今後の保線作業を取り巻く厳しい環境に対応するため、メンテナンスを極力必要としない軌道を目指してTC型省力化軌道を開発した。1997年に山手線への投入を皮切りに比較的軽量の列車が走行する線区に敷設し、2006年からは東海道線など貨物列車が走行する線区にも敷設範囲を拡大し、現在では敷設延長が210kmを超えた。

先進国をはじめとした諸外国の鉄道では、スラブ軌道やRheda2000軌道などバラストレス軌道の採用が新設線における主流となっているが、既設線での大規模な省力化軌道の導入は世界的にも稀であり、技術的価値の高い軌道である。

TC型省力化軌道の導入から15年を経過し、軌道メンテナンスコストの削減効果は約7割であり、軌道状態を示す指標であるP値はバラストレス軌道の約6割に改善したが、曲線半径300m未満の急曲線部や地下水位の高い軟弱路盤上などの特異な軌道条件の箇所では修繕が必要な事象が一部で発生している^{1) 2)}。また、橋台裏の無道床軌道との境界部では列車荷重や地震荷重により路盤空洞の発生が懸念されている^{3) 4)}。

本稿では、急曲線部や地下水位の高い軟弱路盤部、橋台裏などの構造物との境界部など、TC型省力化軌道の各種軌道条件における技術的課題とその対策について報告する。

2. TC型省力化軌道の基本構造

TC型省力化軌道は、まくらぎ幅を400mm、レール締結装置の間隔を750mmとして、道床バラストにセメント系でん充

材を注入して固めた直結系軌道である(図1)。

セメント充填層(以下、充填層とする)は貨物列車の走行の有無によりセメントの配合を変えており、レール締結装置の種類は車両重量と曲線半径に依存する横圧の違いにより座面式とタイププレート式に区分している(図2)。

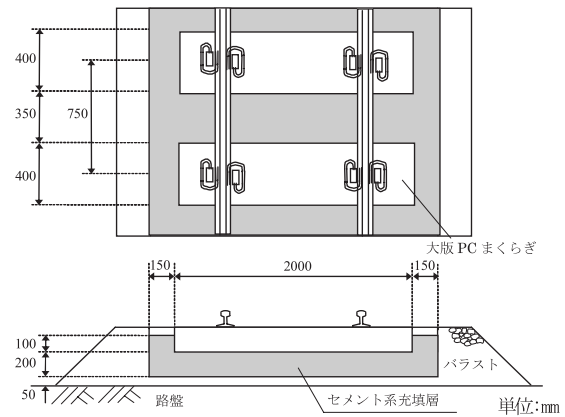


図1 TC型省力化軌道の基本構造図



図2 TC型省力化軌道のレール締結装置

3. 急曲線区間におけるレール締結装置の改良

3.1 楔型インシュレータの変更

初期のTC型省力化軌道では曲線半径300m未満の区間において座面式レール締結装置を使用していたが、急曲線

の一部区間でPOM（ポリアセタール樹脂）製の楔形インシュレータが摩滅する事象が発生した（図3）。

これは、著しい横圧の影響で、インシュレータが瞬時的な摩擦熱により摩滅すると推測されたため、融点が約100℃高いナイロン66製の楔形インシュレータを開発した。その結果、約2倍の耐摩滅性能を確保し、安全性の向上と保守費用の削減に寄与した。



図3 摩滅した楔形インシュレータ（左）とナイロン66製およびPOM製の楔形インシュレータ（右）

3.2 レール締結クリップの変更

曲線半径300m未満のタイププレート式レール締結装置ではe2009クリップを使用していたが、ある特異な箇所ではクリップが折損する事象が発生した。現地での調査の結果、クリップに高い応力が負荷していることを確認したため、発生応力を抑制できるPRタイプのクリップに着目し、現行と同じタイププレートとインシュレータが使用できるPR601AとPR447Aクリップ（図4）の適用について、各種性能評価試験を行った。

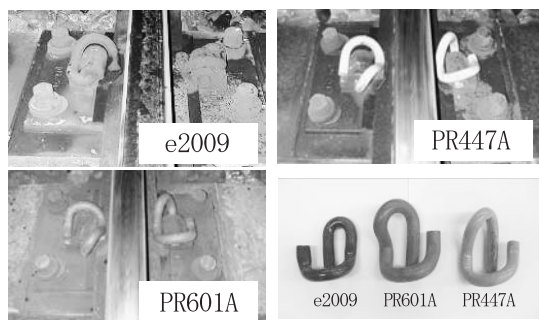


図4 試験した各種レール締結クリップ

(1) 室内基礎試験

3種類のクリップについて斜角載荷試験、2軸疲労試験（図5）などの室内基礎試験を行った。

表1に各クリップの諸元および試験結果を示す。

PR601AおよびPR447Aクリップは設計荷重に対してレール頭部左右変位が許容値以内であり、さらに発生応力については耐久限度線図で照査した結果、第2破壊限度以内にあることから営業線使用に問題がないことを確認した。また、2軸疲労試験において100万回の繰返し荷重に対して折損などの不具合がなかったため、営業線での長期間の使用が可能であることを確認した。

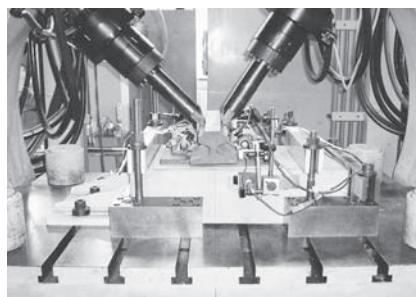


図5 2軸疲労試験

表1 締結クリップの室内試験結果

	単位	e2009	PR601A	PR447A
公称締結力	kN/個	12	9	7
実測締結力	kN/個	12.0	10.1	7.1
先端ばね定数	MN/m	0.49	0.68	0.99
レール頭部左右変位	mm	○2.9	○3.3	○3.4
耐久限度線図の判定	判定→	○限度内	○限度内	○限度内
2軸疲労試験	判定→	○100万回	○100万回	○100万回

(2) 現地試験

曲線半径300mの曲線区間において横圧と各クリップの発生応力を測定した結果を図6に示す。

e2009クリップの発生応力は横圧に対して直線的に比例し、35kNの横圧で250MPa程度に達しているが、PR601AおよびPR447Aクリップは150～180MPa程度で飽和している。これはクリップの形状に起因するものであり、高い横圧が発生する箇所ではPRクリップが優位であることを示している。また、PRクリップに発生するひずみはばね鋼の降伏限度および疲労限界内にあり、耐久性に問題はなかった¹⁾。

以上の各種試験結果から曲線半径300m未満のタイププレート式レール締結装置ではe2009クリップから施工上でも優位であるPR447Aクリップに変更した。

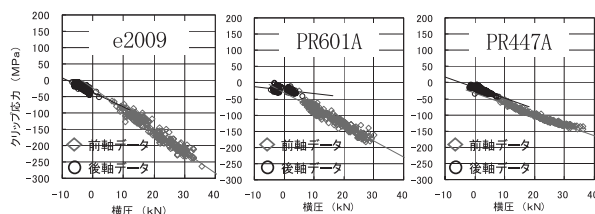


図6 横圧とクリップ発生応力の測定結果

4. 地下水位の高い箇所への排水設備の適用

地下水位が高い箇所や降雨による滞水が顕著な箇所の一部区間において、路盤変状や路盤噴泥により修繕が必要な事象が確認されている。

路盤変状のメカニズムは、図7に示すとおり路盤面付近の滞水が列車荷重による充填層のポンピング作用で水圧変動を受け、路盤材料の泥濁化が促進することで発生していると考えられている⁵⁾。

特に路盤面より500mm以内の領域に滞水がある場合には、列車荷重の影響を顕著に受け、この滞水が路盤変状や路盤噴泥の発生要因のひとつとされている。TC型省力化軌道ではこの領域に定常地下水位がある場合には、排水設備（図8）を線間などに設置することを標準としているが、その効果を検証し、排水設備設置時の軌道初期沈下などの特性を以下のとおり定量化した。

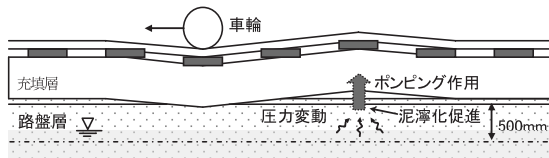


図7 路盤変状のメカニズム



図8 排水設備（排水こう）

4.1 排水設備の効果の確認

地下水位が高い片盛土の箇所において、TC型省力化軌道の敷設前後における地下水位、降雨量および軌道高さを選定した。

図9に排水設備設置前後における地下水位および降雨量の測定結果を示す。排水設備設置前では総雨量25mmの降雨において路盤面から深さ500mmの境界線（以下、境界線とする）を超える地下水位が降雨完了後も長期間滞留している。一方、排水設備設置後では総雨量168mmの豪雨においても降雨完了から3時間程度で地下水位が収束し、境界線を下回っている。排水設備の設置により境界線よりも高い位置の滞水が、降雨後には速やかに排出されることを確認した。

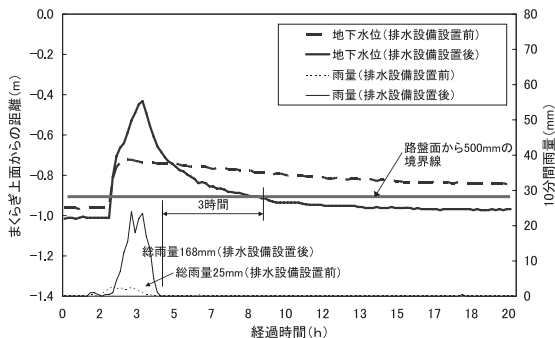


図9 地下水位および降雨量の測定結果

4.2 排水設備の設置による軌道初期沈下量

図10に排水設備設置による定常地下水位の低下量に対する軌道初期沈下量の分布を示す。

排水設備設置後の軌道初期沈下量の平均は3.2mmとなり、定常地下水位の低下量が多いほど沈下量は増加する傾向がある。特に排水設備設置により定常地下水位を0.5mより深く低下させる場合には著しく軌道初期沈下量が増大するため、この場合には初期沈下による軌道状態への影響が無視できないと考えられる。

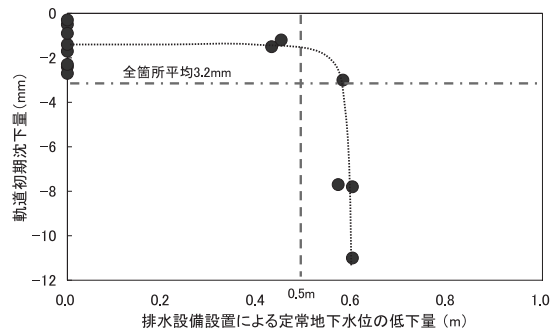


図10 定常地下水位の低下量と軌道初期沈下量の関係

4.3 噴泥指数と軌道初期沈下の関係

図11に路盤噴泥の容易さを示す噴泥指数⁵⁾に対する軌道初期沈下量および初期沈下の収束日数の関係を示す。

噴泥指数が高いほど軌道初期沈下量は増加し、軌道初期沈下の収束日数が長くなる傾向が見られるが、噴泥指数が16程度で初期沈下量が多い特異点も認められた。この箇所は排水設備設置による定常地下水位の低下量が0.5mを超えたことが要因であると考えられる。

軌道初期沈下の収束日数は噴泥指数が40を越える箇所でも6ヶ月程度であることがわかった。

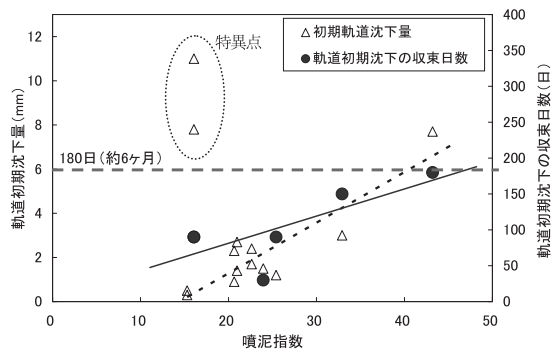


図11 噴泥指数と軌道初期沈下量及び収束日数

以上の結果を踏まえ、TC型省力化軌道の敷設工事と排水設備設置工事の施工標準を図12に示す。この施工標準により、地下水位の高い軌道条件においても品質の高いTC型省力化軌道の敷設が可能となった。

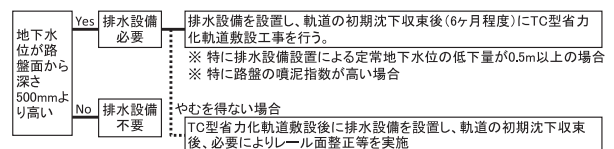


図12 TC型省力化軌道敷設工事と排水工事の施工標準

5. 路盤空洞発生時の評価

橋台裏など構造物との境界部で列車荷重や地震荷重により路盤空洞が発生する事象が確認されており、路盤空洞が発生した場合の列車走行に対する安全性の検討が必要である⁹⁾。そこで、路盤空洞の規模に応じた充填層の発生ひずみおよびレール上下変位を構造解析と荷重載荷試験で算出し、以下のとおり定量化した。

5.1 路盤空洞発生時の構造解析と荷重載荷試験

図13に示す10mの試験体において構造解析と実物大軌道試験装置を使用した荷重載荷試験により、路盤空洞の規模に応じた充填層の発生ひずみとレール上下変位を求めた。なお、構造解析はFEMによる静的弾性解析とした。

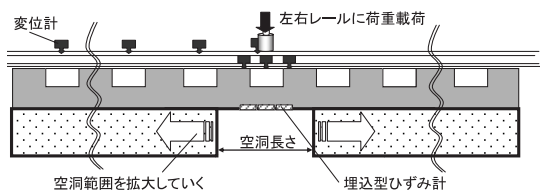


図13 10mの実物大試験軌道の試験体

図14に充填層に発生する最大ひずみ、図15にレール上下変位の解析と測定結果を示す。荷重載荷試験では空洞長さ1.5m程度で充填層の想定許容ひずみ(92 μ)を超過する結果となり、1.5mまでは解析結果とほぼ同様な結果となった。一方で空洞長さが1.5mを超えた場合には、充填層の許容限界を超過し充填層底部にクラックが発生したため、荷重載荷試験では充填

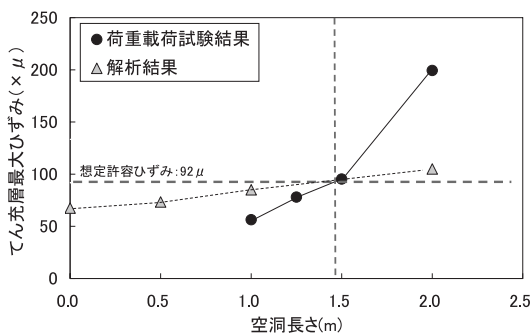


図14 充填層の発生ひずみの解析と測定結果

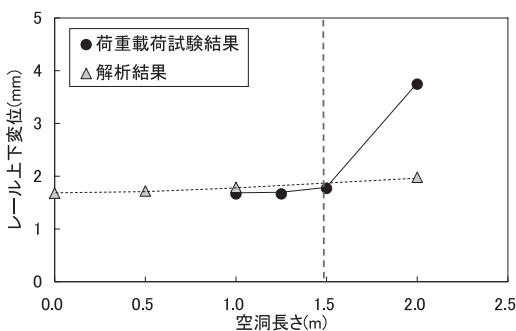


図15 レール上下変位の解析と測定結果

層のひずみとレール変位が著しく増加したと考えられる。

5.2 路盤空洞発生時の列車走行性の評価

TC型省力化軌道下に路盤空洞が発生した場合、空洞長さが1.5m程度までは充填層の発生ひずみは許容限界以内であるが、それを超える場合には充填層にクラックが発生する可能性があり、レール上下変位も著しく増加する結果となった。しかし、レール上下変位は空洞長さが2mで充填層にクラックが発生しても4mm程度にとどまり、列車の走行安全性に直ちに影響を及ぼす値ではない結果となった。

6. まとめ

- (1) 急曲線部における座面式レール締結装置ではナイロン66製の楔型インシュレータを開発することで、耐摩減性能を約2倍とした。
- (2) 急曲線部におけるタイプレート式レール締結装置ではPR447Aクリップを採用することで発生応力を低減し、クリップの折損を抑制した。
- (3) 排水設備の設置により平均で3.2mmの軌道初期沈下が発生するが6ヶ月程度で収束することを解明し、TC型省力化軌道の敷設工事と排水設備設置工事の施工標準を策定した。
- (4) 路盤空洞が発生した場合、空洞長さが1.5m以上では充填層にクラックが発生する可能性があるが、レール上下変位は空洞長さが2mでも4mm程度となり、列車の走行安全性に直ちに影響を及ぼす値ではない。

TC型省力化軌道はメンテナンスの削減効果だけではなく、耐震性能や座屈強度が高く安全性の向上にも寄与している。現在、曲線半径300m未満へのロングレール化の適用など更なる適応範囲の拡大を推進している。

参考文献

- 1) 熊倉孝雄、小西俊之、野本耕一、若月修；省力化軌道に適用する線ばね系レール締結装置に関する考察、鉄道力学論文集、第14号、pp1-6、2010.7
- 2) 熊倉孝雄、石井秀明、堀雄一郎；既設線上路盤上省力化軌道における排水設備と軌道変状の評価、土木学会第66回年次学術講演集、IV-074、pp147-148、2011.9
- 3) T.Kumakura, Y.Hori, M.Kozeki；Studies on Improvement of TC-type Low-maintenance Track、Railway Engineering 2011、2011.6
- 4) 萩尾泰弘、熊倉孝雄、嘉嶋崇志；東日本大震災における山手線省力化軌道の被害報告、土木学会第66回年次学術講演集、I-414、pp827-828、2011.9
- 5) 大塚勝、村本勝己、関根悦夫；既設線省力化軌道下の粘性土路盤の変状要因、RTRI REPORT、Vol.18、No.3、pp23-28、2004.3
- 6) 熊倉孝雄、堀雄一郎；路盤空洞発生時における既設線上路盤省力化軌道の評価、第18回J-Rail講演論文集、pp99-100、2011.12