

論文 軌道改良を考慮したライフサイクルコストを最小化する軌道メンテナンス手法の開発

松本 麻美¹・石川 智行²・三和 雅史³

¹正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: matsumoto.mami.78@rtri.or.jp

²正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: ishikawa.tomoyuki.38@rtri.or.jp

³正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: miwa.masashi.23@rtri.or.jp

軌道保守による改善効果が小さくなっている箇所については、PC まくらぎ化やロングレール化などにより軌道構造そのものを改良することで、安全性の向上や軌道保守の省力化等を図ることができる。しかしこうした軌道改良は、軌道保守に比べて費用が高いため、長期的な影響やその効果を反映したライフサイクルコストを考慮して適切な箇所および時期に行う必要がある。本研究では、様々な軌道改良の費用とその効果を考慮した軌道メンテナンスに関するライフサイクルコストを推計するモデルを構築した。また本モデルの適用事例として、線区の特徴に応じたライフサイクルコストを最小化する軌道メンテナンス手法を開発した。

Key Words: life cycle cost, prediction model for track condition, long-term prediction model

1. はじめに

列車がバラスト軌道上を繰り返し走行すると、列車荷重により道床や路盤が沈下して、軌道変位が徐々に大きくなる。軌道変位が大きくなると、乗り心地の悪化や走行安全上の余裕が減少し、輸送障害や脱線事故が生じるリスクが高まる。そこで、通常は軌道保守として、バラスト道床のつき固め等により軌道変位を改善し、安全性および乗り心地を向上させる。

しかし、噴泥や継目落ち等の影響により軌道保守による改善効果が小さくなっている箇所については、PC まくらぎ化やロングレール化などにより軌道構造そのものを改良することで、安全性の向上や軌道保守の省力化等を図ることができる。ただし、こうした軌道改良は軌道保守に比べて費用が高いため、軌道変位が大きくなった場合のリスクと長期的な経済性の双方を考慮して、適切な箇所および時期に軌道保守または軌道改良を行う必要がある。そのために、長期的な軌道変位の推移予測結果に基づいてライフサイクルコスト（以下、「LCC」という。）を算出し、それを最小化する軌道メンテナンス手法の開発が求められる。

海外における鉄道に関する LCC の推計については、

2006 年から 2009 年に欧州が実施した鉄道メンテナンスの革新プロジェクトである INNOTRACK¹⁾においてガイドラインが検討された。既往の研究としては、不確実性を有する要因や事象の影響を確率的に評価して分析する手法の提案²⁾がなされているが、実際にその事象が発生した場合の具体的な被害の推計モデルは確立されていない。また、輸送障害や事故による被害をコストとし、バラスト軌道とスラブ軌道の経済性を比較した事例³⁾があるが、軌道変位進み等の予測に基づいているモデルではないため、その他工種への汎用性がない。

国内の研究事例としては、鉄道メンテナンスの LCC として鉄道車両の保全を例として検討したものがある⁴⁾が、軌道のメンテナンスに関する具体的な事例は提示されていない。また、リスクに関する既往の研究として、軌道起因の輸送障害や脱線事故について分析した事例⁵⁾があるが、これは我が国全体を対象としたマクロ分析であり、統計的に各箇所の現状を踏まえて分析することは可能であるものの、各箇所の現状や特異性を反映して箇所毎のリスクを推計することはできていない。

以上のことから本研究では、軌道構造が変化した場合も考慮して長期的な軌道変位進みを予測するモデル⁶⁾を用い、様々な軌道改良の費用とその効果を考慮した軌道

メンテナンスに関する LCC を推計するモデルを構築した。また本モデルの適用事例として、線区の特徴に応じた LCC を試算し、それを最小化する軌道メンテナンス手法の提案を行った。なお、本試算で用いた施工単価や軌道変位進みの改善効果は、仮定条件を与えたうえで過去の実績等を参考に算出したものであるため、実際には施工時の条件や地域性等により変動する。

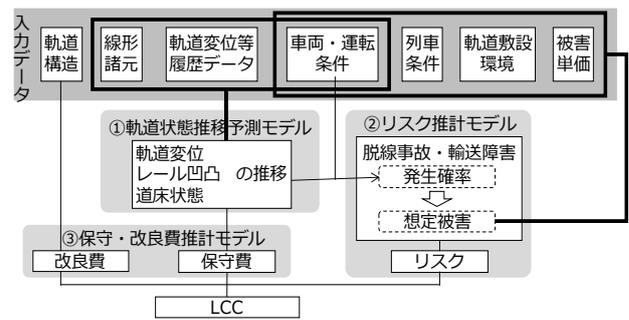


図-1 LCCの構成概要

2. 軌道メンテナンスにおけるLCCの全体像

本研究における軌道メンテナンスに関するLCCは、改良費・保守費およびリスクを合計したものを表すこととし、その構成概要を図-1に示す。なお改良費と保守費は実態に応じて個別に計算ができるが、リスクについては区間や事象に応じて想定される被害が変動するため、推計精度を向上させるには細かな条件設定が求められる。また、軌道改良を行った場合に増額する固定資産税等の諸経費については、軌道のメンテナンスに直接関係する費用ではないことから本研究では検討対象外とした。

(1) 改良費（軌道の改良・更新に要する費用）

道床の改良工事やロングレール化等、軌道の構造を強化する軌道改良や更新に要する費用を「改良費」とする。

(2) 保守費（軌道の維持管理に要する費用）

軌道変位が大きくなると、MIT（マルチプルタイタンパ）等により軌道内に敷き詰められているバラストをつき固めて軌道変位を低減する。また、レール表面上に凹凸ができた区間はレール削正を行い、軌間を維持できなくなった区間は軌間調整等の保守がなされる。加えて、つき固めを繰り返すことで細粒化したバラストを交換する道床交換作業や、省力化軌道であっても材料状態を回復するための定期的な補修が必要なものもある。これらの作業や材料にかかる費用を「保守費」とする。

なお、改良費と保守費については、明確に分けられないことがある。例えば、敷設から長期間が経過し細粒化して砂利状になったバラストを新しい碎石に交換する場合は、道床としての性能が大きく向上する。このように、特に材料交換については、保守費ではなく改良費として考慮するほうが適当な場合もある。

(3) リスク

軌道の保守が十分でないと軌道変位が大きくなり、管理値を超過すると列車の徐行や運転中止などの輸送障害が発生する他、場合によっては脱線事故に至ることもある。しかし軌道改良により構造が強化され、軌道変位進みが小さくなると、事故等の発生確率も低下する。このように軌道状態の推移を考慮して輸送障害や脱線事故の

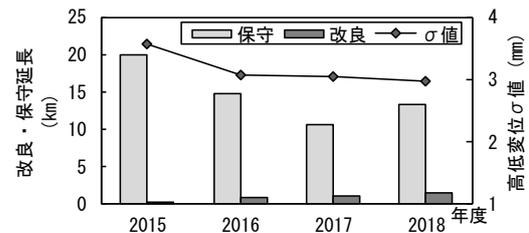


図-2 改良・保守延長の推移

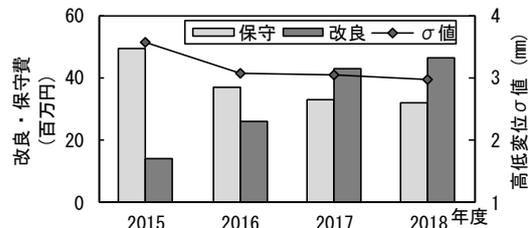


図-3 改良・保守費の推移

発生確率を求め、そのときの想定被害を乗じて得られる値を「リスク」とする。

(4) 各費用間の関係

保守周期が延びると軌道変位は大きくなり、軌道変位が大きくなると管理値を超える可能性が高まるため、輸送障害の発生確率が増えてリスクも増大する。このように、改良費、保守費およびリスクは相互に関係すると考えられる。

例えば、改良費を投じて軌道強度を高めると、軌道変位進みの抑制効果により保守費が減少する。図-2 および図-3 は、平均通過人員 3 万人/日、延長 40km 程度の線区における 4 年間の軌道改良・保守の延長と費用を調査した例である。本線区は、構造強化のため木まくらぎを PC まくらぎへ置き換え、あわせて道床交換とロングレール化を順次進めている線区であり、これらの費用を改良費として分析した。改良・保守費は、これまでの施工実績から概算単価を求め、その単価を施工延長に乗じて計算した。図-2 より、改良延長は保守延長に比べて非常に短く、最も改良延長が長い 2018 年度においても、改良延長は保守延長の 1/10 程度であった。しかし、その費用を算出すると図-3 に示すとおり、2018 年度の改

良費は保守費より高額になった。また同図より、2015年度以降改良費は徐々に増えており、その一方で保守費が減少していることがわかる。これより、改良費が増える、つまり軌道の改良工事が進むに従って、軌道の構造が強化されることから、保守費は減少する傾向にあることがわかる。また、保守が減少しても、改良が進んでいることから、線区の高低変位標準偏差（ σ 値）も良化しており、輸送障害の発生リスクは低減すると考えられる。

以上のように、各費用等の間には相互関係があり、これを総合的に評価する指標がLCCである。

3. 改良費の推計法

表-1 に本研究で想定する軌道改良の工種と、改良時に必要な単価の例等を示す。この単価に施工延長を乗じて改良費を推計する。表-1 に示す単価の例は、本研究における仮定条件を基に過去の実績などから概算金額を

算出しているため、実際には施工時の条件や地域性等により変動する。

4. 保守費の推計法

表-2 に、軌道保守の工種と単価の例等を示す。保守費の推計には、想定期間内における軌道状態を予測して各工種の保守回数を算定する必要がある、その予測には長期的な軌道状態の推移を予測するモデルを用いる⁶⁾。本モデルは、軌道状態を表す指標として軌道変位、レール凹凸、道床状態の3指標を各々予測し、それらに対する保守時期を検討するものである。具体的には、表-2 に示す設計標準⁷⁾や施工実績等から概算した、各軌道改良工種における高低変位進み比（従来軌道に対する高低変位進みの比率）の例を用いて、各工種を実施した場合の軌道状態の推移を予測する。次に、その予測した軌道状態に応じた保守回数を求め、その保守回数に単価を乗

表-1 軌道改良の工種と単価等

工種	単価例 (百万円 /100m)	高低変 位進み 比の例	内容および仮定等
大判まくらぎ化	23	0.9	一般的なPCまくらぎに比べて底面幅が広く、車両通過時のまくらぎ下面圧力および路盤圧力が減少し、軌道沈下量が低減される。費用には道床交換費も含む。
弾性まくらぎ化	22	0.4	弾性化によりまくらぎ下面圧力が下がり、道床沈下量が低減される。費用には道床交換費も含む。
バラスト造粒化 ⁸⁾	10	0.3	噴泥に至っていない経年バラストにグラウトを浸透させ、固化後に粉碎して細粒土を造粒化し、排水性を向上する。継目部（100m中4箇所）のみ施工するとし、費用には10年周期、0.3百万円/100mの定期補修費を含む。
ポリマー安定処理 ⁹⁾	10	0.2	細粒化したバラストに生分解性ポリマーと反応促進剤を混入し、バラスト強度を高め軌道沈下量を低減する。継目部のみ施工するとし、費用には3年周期、0.4百万円/100mの定期補修費を含む。
ロングレール化	13	0.5	継目をなくし高低変位進みを抑制する。費用にはPCまくらぎ化とEJ敷設費を含む。
低コストロングレール化 ¹⁰⁾	7	0.7	上述のロングレール化を中下級線区でも低コストで実現できるようにしたものである。費用には部分的なPCまくらぎ化費を含む。
重軌条化	7	0.8	レール剛性を高めることで輪重の各まくらぎへの分散を向上し、軌道沈下量を低減する。費用にはPCまくらぎ化費を含めたため、PCまくらぎ区間に施工する場合は相当の金額を減少させる。
PCまくらぎ化	4	0.9	木まくらぎをPC化することで、軌間内脱線を防止して道床横抵抗力を増加させる。またまくらぎ底面積が増えるため、軌道沈下量も低減される。
道床厚増	7	0.7	道床厚を増やすことで路盤圧力を減少させると共に、軌道の支持質量が増えることで道床振動が減少してバラストが安定し、軌道沈下量が低減される。
てん充道床化 ¹⁰⁾	15	0.0	グラウト材に超微粒子セメントミルク（SFCミルク）を適用した軌道である。SFCミルクは経年バラストに注入でき、既存のまくらぎやバラストを活用できるため、施工時の道床交換は不要である。費用には25年周期、3.5百万円/100mの定期補修費を含む。

表-2 軌道保守の工種と単価等

工種	単価例 (百万円/100m/回)	内容および仮定等
つき固め	0.1	バラストをMITでつき固めて軌道変位を良化する。軌道変位の管理値を超えないよう実施する。
軌間整正	0.3	軌間を維持する。木まくらぎの場合のみを対象とし、人力施工とする。5年周期で継目付近の延長5mで実施する。
レール削正	0.1	レール削正車によりレール頭頂面を削り、レール凹凸を低減する。レール凹凸の大きさを表す指標が管理値を超えた時に実施する。
道床交換	10	細粒化したバラストを交換して、つき固め効果を改善させる。道床状態を表す指標が管理値を超えた時に実施する。

じることによって保守費を推計する。なお、表-1 に示す高低変位進み比の一部の例についても、単価と同様に、本研究における仮定条件を基にしており、少ない施工実績から算出しているため、モデル適用時には施工時の条件等に応じて適切な値の設定を検討する必要がある。

LCC の計算にあたっては、例えば通トンが少ない下級線区ではレール削正を考慮しない等、軌道状態の劣化指標とその指標に対する保守工種については、線区の個々の条件に応じたものを想定する。なお、軌道保守のうち木まくらぎ交換については、軌間整正ができない程度まで傷んだ場合に現場判断で実施しているが、その評価指標は明確になっていないことから本試算では考慮せず、軌間整正を定期的に行うものとした。

5. リスクの推計法

リスクの推計には、脱線事故（乗り上がり脱線と軌間内脱線によるもの）と輸送障害（著大な軌道変位によるもの）に伴って生じる2種類のリスクを想定する。基本的な考え方としては、軌道変位に基づき各事象の発生確率を算定し、これに想定被害を乗じてリスクを推計する。推計モデルの詳細を以下に示す。

(1) 脱線事故に関するリスクの推計

脱線事故によるリスクは、脱線事故の発生確率と、人的被害の他、車両や地上設備の復旧費や運転支障時間の発生に伴う損失等の積から推計することができる。

a) 乗り上がり脱線の発生確率

乗り上がり脱線は、曲線部での通り変位や平面性変位が大きくなって、脱線係数が増えて限界脱線係数を超えると発生する。どのような軌道においても発生する可能性が有るため、リスク推計は軌道構造に関係なく行う。

ここで、平面性変位を固定し、通り変位を変化させて脱線発生確率を算定すると、図-4 の結果が得られる¹²⁾。しかしながら、実際には通り変位と平面性変位の双方の変化を考慮して算定する必要があるため、また曲線諸元を考慮することから、式(1)に示すように、これらを入力として脱線への余裕 y を評価する¹³⁾。本評価式では、通り変位と平面性変位の初期値を設定した上で、各変位進みを確率分布として与え、「 $y < 0$ 」となる確率を脱線確率として算定する。

$$y = (48.1\gamma - 0.085C + 0.025R - 0.08t - 33.33) - 0.5h_2k \quad (1)$$

ここで、 γ : 外軌側静止輪重、 C : カント(mm)、 R : 曲線半径(m)、 t : 通り変位(mm)、 h_2 : 軸距平面性変位(mm)、 k : 軸ばね上下ばね定数(kN/mm)とする。各軌道変位の進みが対数正規分布に従うとして確率を算出した例を図-5 に示す。この算定結果を用いると、 y の初期値を y_0 とし、

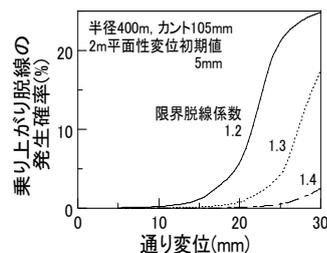


図-4 乗り上がり脱線発生確率

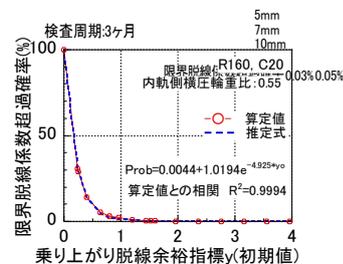


図-5 乗り上がり脱線発生確率推計結果

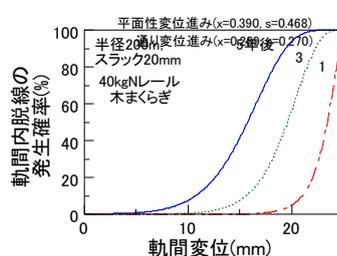


図-6 軌間内脱線発生確率

式(2)により乗り上がり脱線発生確率を推計できる。

$$Prob(y < 0) = 0.0044 + 1.0194 * \exp(-4.925 * y_0) \quad (2)$$

b) 軌間内脱線の発生確率

軌間内脱線は、主に木まくらぎの腐食等によるレール締結力の低下によって軌間が拡大し、車輪が軌間内に落ち込むことで発生する。よって、軌間内脱線のリスクの推計は、木まくらぎ軌道で、且つ軌間拡大が生じやすい急曲線区間を対象に行う。

軌間内脱線の発生確率については、輪重と横圧により生じる動的な軌間（応答値）が限界値（脱線に至る軌間）を超える確率として算定する。ここで用いる軌間の応答値には、軌間の初期値に確率変数で与えられる軌間変位進みを加算した値を用いる。軌間変位進みがガンマ分布に従う¹⁴⁾とした際の軌間内脱線の発生確率の算出例を図-6 に示す。

c) 被害の推計

脱線事故により発生する被害は、車両・運転条件、軌道条件、列車条件、脱線後車両の挙動等に応じて変動する。本研究では、脱線した車両の転落、構造物への衝突、隣接線車両との衝突を想定し、被害者数や車両・地上設備等の被害および運転支障時間に関する被害を推計する。まず被害者数については、対象とする列車編成におけ

表-3 被害者一人あたりの損失額 (単位: 千円)

	死亡	後遺障害		傷害	物損	死傷
		重症	軽症			
人的損失	29,764	8,072	8,072	555	-	1,161
物的損失	368	368	368	368	240	368
事業主体の損失	1,075	241	241	61	-	78
公的機関等損失	1,957	969	969	785	4	803
死傷損失	226,000	-	83,600	-	-	1,823
合計	259,165	9,650	93,250	1,769	244	4,234

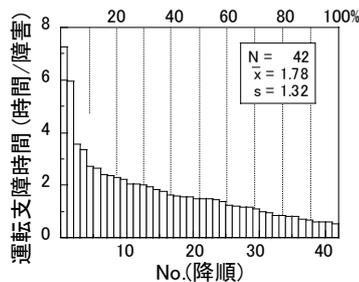


図-9 軌道変位が原因の輸送障害時間分布

表-4 各事象に対する適合度評価結果

順位	1	2	3	4
確率分布	Lognorm	Gamma	Loglogistic	Weibull
χ^2 乗値	1.43	2.19	2.57	10.19

基づいて被害を推計し、データが存在しない場合には一定規模の被害が生じると仮定して被害を推計する。

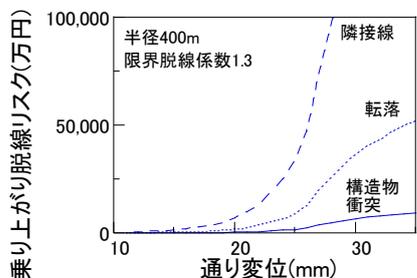


図-7 リスク推計例 (乗り上がり脱線)

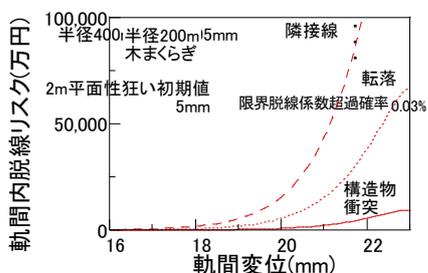


図-8 リスク推計例 (軌間内脱線)

各車両の乗車人数に被害者率を乗じて被害者数を算出し、全車両での被害者数の総和を脱線事故における被害者数として推計する¹²⁾。また、この被害者数に死者率を乗じて死者数と負傷者数を各々得る。被害者率 r については、車両の転覆等や重力物との衝突の有無、シートタイプ、速度 $V(\text{km/h})$ を考慮した式(3)¹³⁾により推計する。ここで L はロングシートを表すダミー変数を示す。

$$r = a \cdot V + b \cdot L + c \quad (3)$$

表-3 は、内閣府がまとめた報告書¹⁵⁾に記載がある交通事故における損失の算定例である。人的損失、死傷損失(被害者本人、家族および友人が被る痛み等の非金銭的損失)が取りまとめられており、これらの損失額を適用する。

次に、車両・地上設備等被害については、それら設備の復旧費が実費として考えられる。

最後に、運転支障時間の発生に伴う損失に関しては、単位時間あたりのコストとして「鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル」¹⁶⁾に時間評価値が示されており、この値を参考にする。この評価値は、全国平均 36.2(円/分)、東京都 47.0(円/分)、大阪府 39.2(円/分)となっており、河川事業の評価等でも用いられている。

過去の実績データを得られる項目については、それに

d) 脱線事故リスクの推計モデル

通り変位と軌間変位の初期値をパラメータとしてリスクを推計した例を図-7、図-8に示す。ここでは、脱線した車両の転落、構造物への衝突、隣接線車両との衝突を想定した。通り変位と軌間変位が大きくなると、脱線リスクもそれぞれ増大した。また、被害者数が多くなる隣接線車両との衝突が最もリスクが高くなった。以上のことから、軌道変位と想定する事象に応じてリスクが増減することを確認できる。

限界脱線係数1.3

(2) 輸送障害に関するリスクの推計

輸送障害のリスクは、輸送障害の発生確率、列車が運転できない運転支障時間、運転支障によって生じる影響人員、および時間評価値の積から推計することができる。ここで検討対象とする輸送障害は、運転士や保線係員、軌道検測車により著大な軌道変位が発見され、列車が運行停止する場合とし、過去に発生した軌道変位を原因とする輸送障害における運転支障時間データを分析して、推計モデルを構築した。

a) 輸送障害の発生確率

各軌道変位について、その進みを確率変数とした上で管理値を超過する確率を算出する。軌道変位進みが従う分布については、5章(1)節に示したとおりである。

b) 運転支障時間の推計

軌道変位を原因とする運転支障時間の発生状況を把握するため、鉄道安全データベース¹⁷⁾に保存されている2001年から2017年までの輸送障害データを分析した。これらのデータのうち、軌道変位を原因とする運転支障時間の分布を図-9に示す。また、本分布に一般的な確率分布をあてはめて適合度を評価した結果を表-4に示す。これより、本分布は対数正規分布(Lognorm)への

表-5 想定する基本条件

線区	線別	年間通トン	速度	軌道構造	乗客数(人)	影響人員(人)	車両重量	時間評価値
下級	単	200万	60km/h	50kgN-普通-木-200mm	30	200	40 (tf)	40 (円/分/人)
中級	単	600万	100km/h	50kgN-普通-木-200mm	300	3,000		
上級	複	2,000万	120km/h	50kgN-ロング-PC-200mm	1,500	10,000		

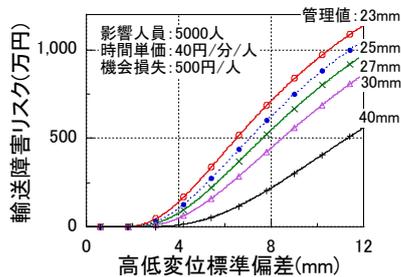


図-10 輸送障害リスク推計結果

適合度が最も高くなった。

c) 輸送障害リスクの推計モデル

輸送障害リスク $E(x)$ の推計式を式(4)に示す。本式は、輸送障害発生確率と運転支障時間分布を用い、軌道変位 x に応じて算出した運転支障時間 h の期待値に対し、想定される影響人員 N と時間評価値 T を乗じて輸送障害リスク $E(x)$ を得るものである。

$$E(x) = N * Plob(x + \Delta x > x^*) \int_0^{\infty} hg(h)dh * T \quad (4)$$

ここで、 Δx : 軌道変位進み、 x^* : 管理値、 $g(h)$: 運転支障時間 h の確率密度関数とする。なお、影響人員や時間評価値は地域差があるため、区間等ごとに設定するのが望ましい。式(4)より求めた、高低変位の管理値超過に伴う輸送障害リスク推計例を図-10 に示す。これより、輸送障害リスクは高低変位が大きくなると共に増加し、また高低変位の管理値に応じて変動することがわかる。

6. LCC の推計と改良計画の検討

以上に示した各推計モデルを用いて、表-5 に示す 3 種類の線区で LCC を推計する。ここでは、線区に応じた乗客数や影響人員を想定した。また、車両重量および時間評価値は一律で設定したが、対象線区が明確な場合はその実態に応じて細かな条件設定をすることで、推計精度を向上させることが可能である。

(1) 下級線区を想定した LCC 推計と改良計画の検討

軌道改良には、表-1 に示した全工種を想定して LCC を推計した。下級線区においては通過トン数が少ないため、軌道保守のうちレール削正は想定しない。LCC の推計結果を図-11 に示す。リスクは改良費や保守費に比べて小さく、99.9% が輸送障害によるリスクであり、0.1% が木まくらぎ区間における軌間内脱線によるリスクであった。本モデルにおいても実際と同様、整備基準値

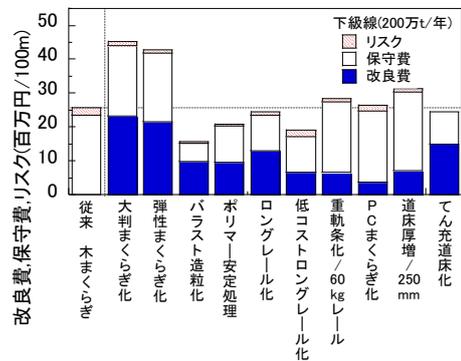


図-11 下級線区における LCC の推計結果
No. (降順)

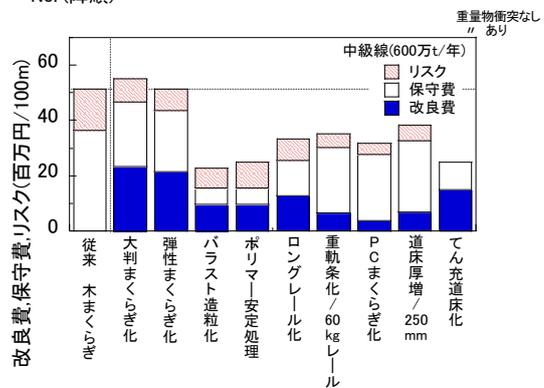


図-12 中級線区における LCC の推計結果
No. (降順)

を超過しないように軌道保守を行っていることがあり、脱線リスクは非常に小さな値になったと考えられる。また、輸送障害によるリスクの原因別内訳は、高低変位と通り変位によるものがそれぞれ 4 割、軌間変位によるものが 2 割であった。

LCC はバラスト造粒化が最小となり、低コストロングレール化、ポリマー安定処理、てん充道床化、ロングレール化が順に従来軌道より小さい結果となった。以上のような、従来軌道より LCC が小さな工種が軌道改良の候補となる。これらの候補から、本モデルで考慮していない軌道材料の状態や施工上の条件等を考慮して、具体的な改良内容を検討すればよいと考えられる。

(2) 中級線区を想定した LCC 推計と改良計画の検討

表-1 に示した工種のうち、中級線区の通過トン数には見合わない低コストロングレール化を除いたものを想定し、中級線区における LCC を推計した結果を図-12 に示す。LCC はバラスト造粒化、ポリマー安定処理、てん充道床化、PC まくらぎ化の順に小さくなった。いずれの場合においても、大判まくらぎ化、弾性まくらぎ化以外の項目は従来軌道に比べて LCC が小さくなるため、

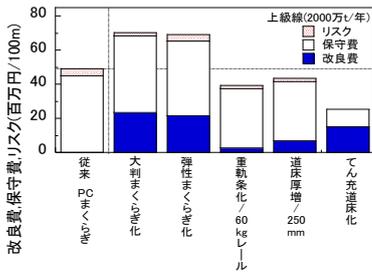


図-13 上級線区におけるLCCの推計結果

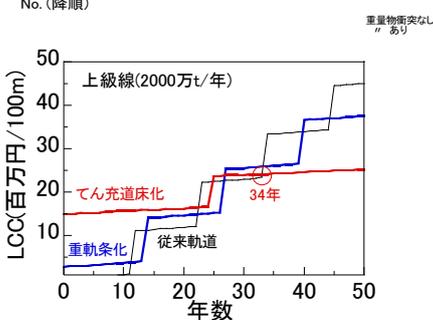


図-14 LCCの時間推移

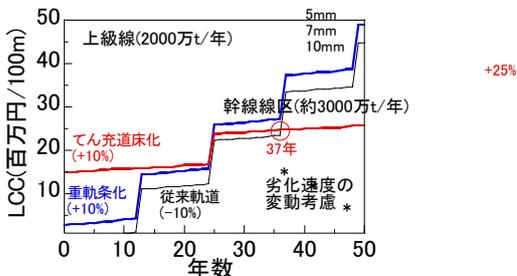


図-15 劣化速度の変動の影響

それらを軌道改良の候補として、軌道材料の状態や施工上の条件等を考慮して、具体的な改良内容を検討することができる。なおリスクについては、下級線区と同様、ほとんどが輸送障害によるリスクであった。

(3) 上級線区を想定したLCC推計と改良計画の検討

上級線区ではすでにPCまくらぎで且つロングレールが敷設されていると考えられることから、軌道改良工種としては大判まくらぎ化、弾性まくらぎ化、重軌条化、道床厚増、てん充道床化の4工種を想定する。LCCの推計結果を図-13に示す。ここでは、てん充道床化、重軌条化、道床厚増の順にLCCが小さくなった。特に、てん充道床化では軌道変位が進まないためリスクはゼロであるのに対し、重軌条化と道床厚増ではリスクが存在するため、てん充道床化とのLCCの差は拡大した。このように、てん充道床化が最も経済的であると推計されたことについては、一部の鉄道事業者において、てん充タイプの道床を既設線の省力化軌道として上級線区で導入している実態と整合していると考えられる。

(4) 軌道改良費の回収期間に関する検討

LCCの推計結果の活用法として、軌道改良費の回収

期間に関する検討を行った。ここでは、上級線区においてLCCが小さかった、てん充道床化と重軌条化におけるLCCの時間推移を従来軌道の場合と比較する形で図-14に示す。なお、ここでのLCCは改良費と保守費の合計とし、比較的小さいリスクは除外して計算した。

てん充道床化のLCCが従来軌道より少なくなり経済的に優位となる時期(回収期間)は敷設から34年目となった。また重軌条化については、推移の中で従来軌道より経済的には一時的に優位となり、その期間は徐々に長くなるものの、50年後でも優位な状態は継続しない。

次に、一般にLCCの評価は長期間に及ぶことから、様々な要因の変動がLCCに与える影響を考慮して分析する必要がある。ここでは、実際の軌道変位進み等の劣化速度が予測値に対してばらつくことを考慮し、従来軌道の劣化速度は10%小さく、一方改良した軌道では10%大きくなるとしてLCCの時間推移を算出した結果を図-15に示す。てん充道床化における回収期間は37年となり、変動の影響を考慮すると、考慮しなかった場合に比べて回収期間は3年程度延びる結果となった。なお、本分析ではLCCにリスクを含めていないが、てん充道床化では軌道変位は進まないためリスクはゼロとなることから、回収期間は上記より更に短くなると考えられる。

以上のことから、想定した上級線区の条件下では、LCCの観点からは、てん充道床化が適当と判断できる。

7. まとめ

本研究では、軌道変位進みの予測結果に基づき、軌道改良費とその効果を考慮した軌道メンテナンスに関するLCCの推計モデルを構築した。また本モデルの適用事例として、線区に応じたLCCを最小化する軌道メンテナンス手法を開発した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 軌道メンテナンスに関するLCCは、改良費・保守費およびリスクを合計したものと定義した。また、改良費が増えるに従って保守費は減少する傾向にあること、また、保守周期が延びると軌道変位は大きくなりリスクも増大することから、各費用等の間に相互関係があることを示した。
- (2) 過去の実績から算出した概算単価と施工延長の積から改良費を推計する手法を示した。
- (3) 過去の実績から算出した概算単価と施工延長および保守回数の積から保守費を推計する手法を示した。保守回数は軌道状態を表す指標とする軌道変位、レール凹凸、道床状態の3指標を各々予測し、それらに対する保守時期を検討する、長期的な軌道状態の推移を予測するモデルを用いて推計した。
- (4) 脱線事故および輸送障害に伴って生じる2種類のリスクを推計する手法を示した。両者とも基本的

には、軌道変位に基づき各事象の発生確率を算定し、これに想定被害を乗じてリスクを推計する。脱線事故リスクについては、脱線した車両の転落、構造物への衝突、隣接線車両との衝突を想定し、通り変位と平面性変位、および軌間変位が大きくなると脱線リスクもそれぞれ増大した。また、被害者数が多くなる隣接線車両との衝突が最もリスクが高くなった。輸送障害リスクは、軌道変位が大きくなるにつれて増加し、また軌道変位の管理値に応じて変動することを示した。

- (5) 上中下級の3種類の線区を想定してLCCを推計した結果、リスクは改良費や保守費に比べて小さく、殆どが輸送障害に関するリスクであることがわかった。LCCが従来軌道より小さくなる工種が軌道改良の候補となり、これらの候補から具体的な改良内容を検討すればよい。
- (6) 本試算で用いた施工単価や軌道変位進みの改善効果は、仮定条件を与えたうえで過去の実績等を参考に算出したものであるため、実際には施工時の条件や地域性等による変動を考慮する必要がある。

参考文献

- 1) Guideline for LCC and RAMS Analysis : INNTRACK, 2011
- 2) Patra, A. P. , Söderholm, P. , Kumar, U. : Uncertainty estimation in railway track life-cycle cost : A case study from Swedish National Rail Administration, Proc.IMEchE, Vol.222, Part.F, J.Rail and Rapid Transit, 2008
- 3) Praticò, F. G. , Giunta, M.: An Integrative Approach RAMS-LCC to Support Decision on Design and Maintenance of Rail Track, Environmental Engineering 10th International Conference, 2017
- 4) 西江勇二, 福岡博: 鉄道システムにおけるライフサイクル, オペレーションズ・リサーチ 経営の科学, Vol.33, pp.16-22, 1988
- 5) 山口剛志, 三和雅史: わが国の鉄道事故の発生状況と列車運行に与える影響分析, 交通と統計, Vol.41, pp.2-15, 2015
- 6) 松本麻美, 三和雅史: 施策の評価・施策の評価・分析に適用可能な軌道状態の長期推移予測モデルの構築, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.22, p.47-54, 2018
- 7) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造, pp.303-306, 丸善出版, 2012
- 8) 中村貴久: 細粒土混入バラストの造粒化による軌道補修工法の開発, 鉄道総研月例発表会, 第325回, 2018
- 9) 中村貴久, 村本勝己, 藪中嘉彦, 野村清順, 三田地利之: 細粒土混入率の高いバラスト軌道に対する生分解性ポリマーを用いた沈下抑制対策, 日本鉄道施設協会誌, Vol.55, No.6, 2017
- 10) 西宮裕騎: 地域鉄道に適したロングレール軌道構造の開発, 鉄道総研月例発表会, 第329回, 2019
- 11) 淵上翔太, 高橋貴蔵, 中村貴久, 桃谷尚嗣: 超微粒子セメントを用いた充道床軌道の開発, 鉄道総研報告, Vol.30, No.10, 2016
- 12) 三和雅史, 大山達雄: 列車脱線事故に関するリスクを考慮した軌道保守計画最適化モデルの構築と検証, 土木学会論文集D3, Vol.75, No.1, 2019
- 13) 古川敦: 輪重横圧推定式による軌道変位目標値の試算, 鉄道力学論文集, Vol.10, 2006
- 14) 昆野修平, 三和雅史: 木まくらぎ区間における軌間変位進みの分析と予測モデルの構築, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2019年秋季研究発表会, 2019
- 15) 内閣府政策統括官: 交通事故の被害・損失の経済的分析に関する研究. 2007
- 16) 国土交通省鉄道局: 鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル (2012年改訂版), 2012
- 17) 鉄道総合技術研究所: 鉄道安全データベース, <https://souken.rtri.or.jp/division/hp80/index.html>

(2020.4.3 受付)

DEVELOPING A TRACK MAINTENANCE POLICY TO MINIMIZE LIFE CYCLE COST CONSIDERING TRACK IMPROVEMENT

Mami MATSUMOTO, Tomoyuki ISHIKAWA and Masashi MIWA

Track improvement requires enormous cost, so it is necessary to perform it at an appropriate place and time considering the long-term impact and the life cycle cost reflecting its effect. In this study, we developing a model to estimate life cycle cost of track maintenance, considering the costs and effects of track improvement. In addition, as an application example of this model, we proposed a track maintenance policy to minimize life cycle cost in various line sections.