

脱線リスクを考慮した軌道変位保守計画モデル

軌道技術研究部 軌道管理研究室
室長 三和雅史

1. はじめに

バラスト軌道では、列車の繰返し通過により軌道面の不整（軌道変位 [軌道狂い] ）が徐々に大きくなり、その程度によっては、脱線事故の発生確率が高まることになる。この軌道変位保守には多くの費用を要しており、健全な鉄道経営のためには、その削減、効率化が望まれている。このように、軌道保守計画の策定においては、安全性と経済性の両立は重要なテーマである。そこで、脱線事故リスクを考慮した軌道変位保守計画モデルを開発したので、以下に紹介する。

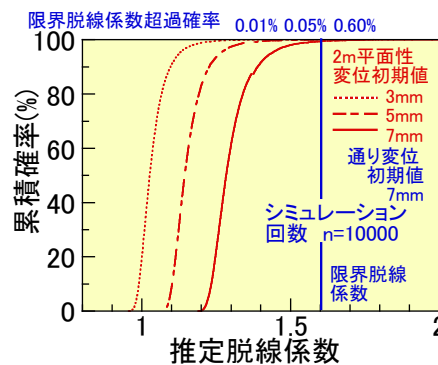
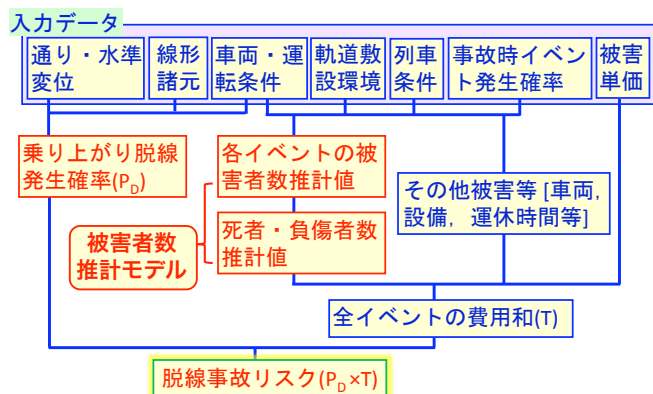
2. 脱線事故リスク推計モデル

(1) モデルの構造

本研究では、マルチなどによる軌道変位保守計画の策定に活用することを想定し、乗り上がり脱線を対象としたリスク推計モデルを図1のように構築した。ここで、脱線事故リスクは、脱線の発生確率と発生時の費用の積により算出する。この発生確率は、軌道変位と線形諸元、車両・運転条件を考慮して算出する。また、脱線事故発生時の被害者数については、車両・運転条件、軌道敷設条件（軌道の周辺環境など）、列車条件（乗車人数、運転密度など）、事故発生時のイベントの発生確率とから算出する。このイベントとは、脱線事故に付随して発生する様々な事象である。そして、車両被害などを含む事故発生時の被害を合算して脱線事故発生時の費用を推計し、脱線発生確率との積により、脱線事故リスクを推計する。

(2) 脱線事故の発生モデル

乗り上がり脱線の発生確率には、列車走行時に発生すると推定した脱線係数（推定脱線係数）が限界脱線係数を上回る確率を用いる。推定脱線係数が限界脱線係数を上回ると必ず脱線するわけではないが、各箇所をリスクを相対的に比較、評価することが目的であるため、この確率を脱線発生確率として用いる。この各脱線係数の算定には、推定脱線係数比の算出式¹⁾を用いる。本式では、平面性変位と通り変位が入力データとなる。よって、例えば、今後1年間の保守計画を策定する際には、保守を1年間行わなかった場合における1年後の軌道変位を予測して用いる。



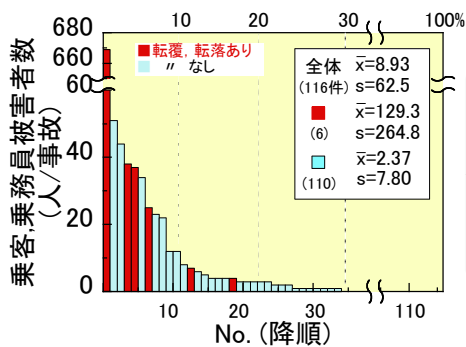


図3 列車脱線事故被害者数分布

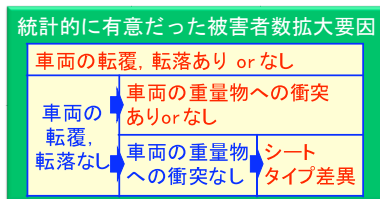


図4 被害者数拡大要因

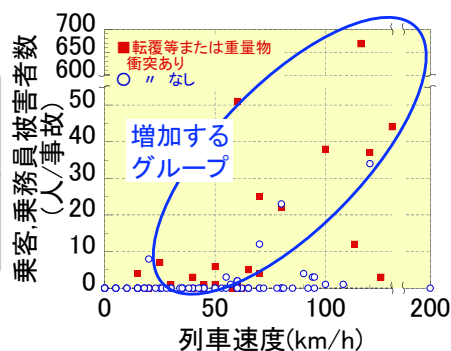


図5 列車速度と被害者数

さて、この平面性と通りの各軌道変位進みについては、実測データの分析結果から、対数正規分布に従うとしてモデル化できる。この分布に従う乱数を10,000個発生させて各軌道変位の初期値と合算し、脱線係数を算出する確率シミュレーションを行った。推定脱線係数と限界脱線係数の超過確率の算出例を図2に示す。推定脱線係数が限界脱線係数を超える確率は、軌道変位が増加すると大きくなる事が分かる。

以上のように、軌道変位の大きさを考慮して脱線事故の発生確率を推計できる。

(3) 被害者数推計モデル

被害者数の推計では、検討対象とする列車編成中の各車両の乗車人数に被害者率（乗車人数に占める被害者の割合：被害者数 / 乗車人数）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する。また、この被害者数に死者率（被害者数に占める死者の割合：死者数 / 被害者数）を乗じて死者数と負傷者数を得る。この被害者数推計モデルを構築するために、国の運輸安全委員会の鉄道事故調査報告書（2001.10～2011.5に公表分の116件）のうち、脱線事故に関するデータを分析した。

まず、今回分析したデータにおける最大被害者数の事故は、通勤列車が高速で脱線して建築物に衝突したものであることから、脱線後の車両の挙動や速度、乗客数などが被害規模に影響すると考えられる。そこで、「車両の転覆や転落の有無（貨車を除く）」、「重量物（鉄道車両、建築物、大型自動車、1m以上の岩など）との衝突の有無」、「シートタイプの差異（サバイバルファクターの1つ）」を被害者数の拡大要因として区別して分析した。図3には、このうち転覆などの有無を区別して列車脱線事故の被害者数（乗客、乗務員）の分布を降順で整理した例を示す。

70%以上の事故においては被害者数は0人であるが、転覆などを伴う事故では全事故で被害者が発生し、また転覆などを伴わない事故に比べて被害者数が多い傾向にある事が分かる。そこで、転覆などの有無を含む上記の要因が被害者率、死者率に与える影響を統計的に分析した結果、図4のように「転覆などの有無」、「転覆などしなかった車両における重量物への衝突の有無」、「転覆などおよび重量物への衝突がなかった車両におけるシートタイプの差異」は被害者率に影響し、また「転覆などの有無」は死者率に影響することが分かった。

次に、列車速度が明確な事故について、列車速度と被害者数の関係を図5に示す。多くの事故では、速度に関係なく被害者数は10人未満であるが、速度と共に被害者数が増加する傾向が強いグループがあり、転覆などまたは重量物との衝突を伴った事故では、この傾向が比較的強い。よって、特にこれらの事故では、速度が高いと被害者数が増加する可能性が高いと考えられる。

また、被害者数には列車の乗車人数が影響すると考えられることから、乗車人数と被害者数の

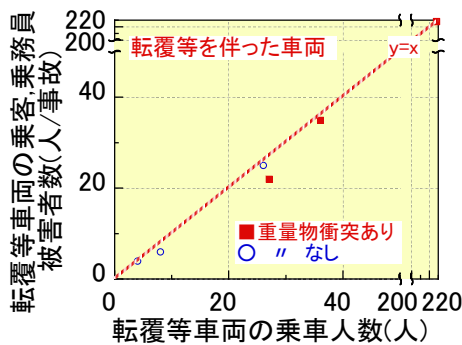


図6 各車両の乗車人数と被害者数

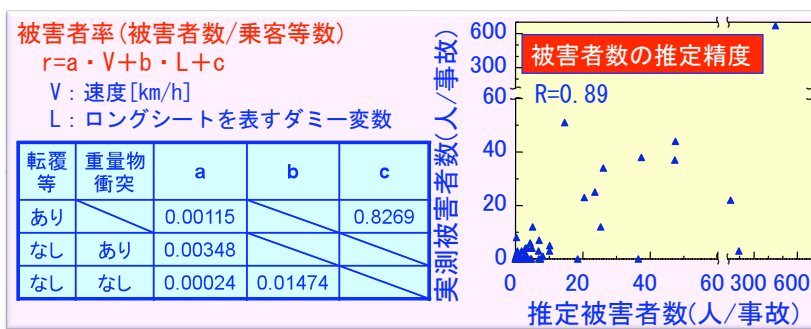


図7 被害者数の推計結果

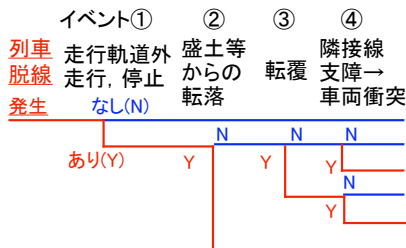


図8 イベントツリー

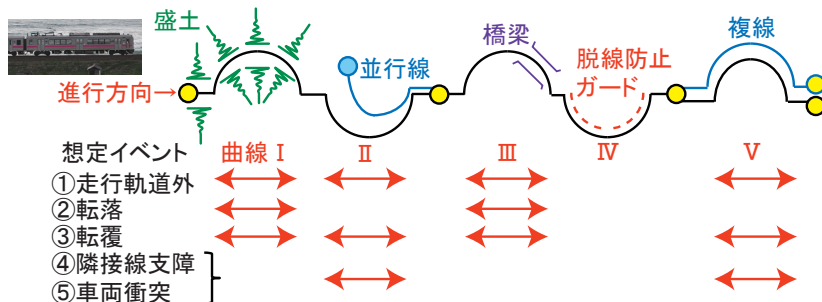


図9 想定するイベント

関係を図6に示す。ここでは、転覆などを伴った車両について示す。乗車人数と被害者数との間の相関は強く、また回帰直線の傾きは重量物などの衝突の有無に関係なく1に近いことから、転覆などした車両の乗客などは、死傷する可能性が極めて高いといえる。一方、転覆などしなかった車両では、乗車人数と被害者数との関係は明確ではなかったが、重量物と衝突した際には死傷する可能性が高い。

以上の他、被害者数に影響すると考えられる事象としては、脱線した車両が隣接線を支障し、他の列車と衝突する事故の発生が想定される。こうした事故は今回分析したデータには含まれなかったが、列車脱線事故リスクの推計の際には考慮しておくべき事象と考えられる。

以上の分析結果に基づいて被害者数を推計した。ここで、被害者率については、図7に示す式により推計した。本モデルにより得られた被害者数と実測値との比較を同図に示す。被害者数の推定値は実測値に概ね近いことが分かる。

(4) リスクの推計結果

脱線事故発生時の被害の推計では、脱線後の車両の挙動を考慮した図8に示すイベントツリーと各イベントの発生確率を設定する。ここでは、重量物との衝突については隣接線車両との衝突で代表させる。各確率には、図9に示すような各箇所の軌道の敷設環境、脱防ガードの設置状況、列車長、速度、減速度、隣接線の運転密度などに応じて想定されるイベントを対応させる。

リスクの推計結果を表1に示す。車両被害、運転被害については、事故の内容に応じて変化させたが、平面性と通りの各軌道変位の大きさに応じてリスクが変化することが分かる。

3. リスクを考慮した軌道変位保守計画法

従来の軌道変位のみを考慮した軌道変位保守計画モデル²⁾において、新たに脱線事故リスクを考慮した保守計画の作成法を検討した。

従来のモデルでは、各ロットの軌道変位推移履歴の他、図10のように線区レイアウトと計画

表 1 リスクの推計結果

条件		1	2	3	4	5	6	300人 乗車、 複線 区間
走行軌道外停止		—	●	●	●	●	●	
転落		—	—	●	—	—	—	
転覆		—	—	—	●	●	—	
隣接線衝突		—	—	—	—	●	●	
死者数		0.01	0.01	1.45	1.45	8.12	0.47	
負傷者数		2.17	2.17	14.9	14.9	208	167	
通り	平面性	リスク(万円)						計
5mm	5mm	1.36	0.72	0.18	0.34	0.09	0.33	3.02
7	3	0.27	0.14	0.04	0.07	0.02	0.07	0.60
7	5	2.26	1.19	0.30	0.57	0.15	0.55	5.03
7	7	27.2	14.3	3.60	6.89	1.81	6.54	60.3
10	5	4.53	2.38	0.60	1.15	0.30	1.09	10.1

Min. 計画期間中の平均軌道状態 +①リスク
 Subject to 線区レイアウト、各期の保守可能日数、軌道変位上限値 他 +②リスク
 上限値

モデル適用結果の比較			計画条件	
ロット	高低変位 標準偏差	リスク	高低変位 のみ	高低変位 とリスク
A	3.82mm	3.38E-07		●
B	3.54	2.56E-04		●
C	4.96	3.59E-09		●
D	7.63	6.49E-01	●	●
E	8.11	3.03E-03	●	●
F	5.12	2.35E+02		●

図 10 軌道変位保守計画モデルと適用結果

作成上の制約を入力データとし、各箇所軌道変位推移を予測して次年度の軌道変位保守計画を出力する。本モデルの目的関数は、軌道変位標準偏差の平均値（計画期間中）の最小化である。

本モデルにおいてリスクを考慮するためには、以下の方法が考えられる。

①目的関数での考慮

従来の目的関数にリスクの項を追加する。この場合、軌道変位とリスクという次元が違う指標を合算することになるため、両指標を目標値で除して無次元化する必要がある。軌道変位については整備目標値、リスクについては全ロットの平均値などを目標値として用いることができる。

②制約条件での考慮

計画期間中にリスクが上限値を超えると想定される箇所については、必ず保守する制約を設定して保守計画を作成する。この上限値については、絶対値として設定する他、全ロットの中でリスクが高い(ex. 上位 p%) 箇所を指定する方法がある。

提案したモデルの妥当性を検証するために、実線区を模擬した軌道データを用いて上記①に示した考慮法により年度保守計画を作成し、高低変位のみを考慮して作成した計画と比較した。

リスクが比較的大きかった箇所への保守計画の有無を同図に示す。高低変位のみを考慮した計画には、リスクが大きくても保守が計画されない箇所があるが、リスクも考慮した計画においては、リスクの高い箇所への保守も計画されていることが分かる。このように、推計したリスクを考慮して保守計画を作成することで、より安全性の高い保守計画を作成できると考えられる。

4. おわりに

提案したモデルでは、主に事故による人的被害を詳細にモデル化してリスクを推計したが、実際には軌道変位が脱線に至る大きさまで放置されることは稀である。よって、軌道変位がある程度増加して発生すると考えられる輸送障害を対象としたリスクモデル、保守計画モデルについても構築し、適切な維持管理レベルの検討や保守計画の策定などに役立てたいと考えている。

参考文献

- 1) 内田他：輪重横圧推定式による乗り上がり脱線に対する安全性評価，鉄道総研報告，第15巻，第4号，2001.4
- 2) 三和他：経済的な軌道保守計画，RRR，第60巻，第9号，2003.9