

# バラスト軌道における軌道変位進みの照査方法

古川 敦\* 山崎 雅仁\* 桶谷 栄一\*

## A New Design Method of Ballasted Track Taking into Consideration on Track Irregularity Growth

Atsushi FURUKAWA Masahito YAMAZAKI Eiichi OKETANI

The plastic deformation of ballasted track structure caused by train running gives rise to so-called track irregularity. It is necessary to predict track irregularity growth for reasonable design of ballasted track. For this purpose we propose a new prediction model for it focusing on the difference between the plastic deformation of a ballasted track structure at rail joint and that at other section. Further we propose a new method of design of ballasted track in which we take into consideration the performance of vehicle dealing with track irregularity.

キーワード：軌道変位進み，軌道変位進み予測モデル，継目，継目衝撃率，性能照査

### 1. 研究の目的

#### 1.1 研究の背景

バラスト軌道では、列車の走行とともに軌道に塑性変形が生じ、いわゆる軌道変位（軌道狂い）が発生、進展する。軌道変位が大きくなると車両の走行性に悪影響を及ぼすため、事業者はこれを定期的に測定し、保守を行っている。

近年の新設線では保守コスト削減が求められるために、バラスト軌道が敷設される事例は少ないが、既設のバラスト軌道において、列車の高速化などに伴う構造強化が行われることは少なくない。その際、構造強化と合わせてライフサイクルコストの削減が求められる。このためには、軌道変位の経時変化（以下、「軌道変位進み」という。）と保守による改善量が均衡するようバラスト軌道を設計する必要がある。なお、バラスト軌道においてレール種類、まくらぎ種類・本数、バラスト層の厚さ等を決定する行為を、ここでは「バラスト軌道の設計」と定義する。

バラスト軌道の設計において照査すべき項目はいくつかある。安全性の観点からは、過大な軌道変位による車両の走行安全性への影響が最も基本的な照査項目となる。このためには、バラスト軌道の構造や列車の輸送条件と軌道変位進みとの関係を定量的に評価する手法が必要になる。

以上の背景に基づき、本報告ではバラスト軌道の構造に応じた軌道変位進み予測モデルを提案するとともに、これを用いた設計手順を示す。

#### 1.2 既往の軌道変位進み予測モデル

ところで、仮にバラスト軌道に一樣な塑性変形が生じた場合には軌道変位とはならない。軌道変位の本質は、軌道の塑性変形量が地点毎に異なることにある。一方、バラスト軌道の塑性変形に関する多くのモデルでは、同一条件下では軌道は等しく塑性変形するという結果が得られるため、そのままでは軌道変位進みの予測に用いることができない。

これに対し、地点毎に異なる塑性変形の進展を予測するために、我が国では以下のようなモデルが提案されている。

- ①軌道変位進みの統計解析による方法<sup>1)</sup>
- ②軌道の塑性変形はレール継目部のみで発生し、中間部では発生しないと仮定する方法（図1）<sup>2)</sup>
- ③軌道の塑性変形モデルと軌道／車両の動的相互作用シミュレーションを組み合わせ、軌道に初期変位がある場合の軌道変位進みを予測する方法<sup>3)</sup>
- ④過去の軌道変位データから統計的に推定する方法<sup>4)</sup>

このうち①は、軌道構造と列車運行条件をパラメータとする予測式であり、「S式」と称されている。これを式(1)に示す。

$$S = 2.09 \times 10^{-3} T^{0.31} V^{0.98} M^{1.10} L^{0.21} P^{0.26} \quad (1)$$

ただし S：平均高低変位進み [mm/100 日]

T：通トン [百万トン/年]

V：平均速度 [km/h]，M：構造係数

L：継目有りの場合 10.0，無しの場合 1.0

P：良路盤，可路盤で 1.0，不可路盤で 10.0

S式は1970年代の軌道状態や運行条件の下で得られた回帰式であり、現在の軌道状態や運行条件の下で、この式が適用可能であるかは確認されていない。

\* 軌道技術研究部（軌道管理）

特集：軌道技術

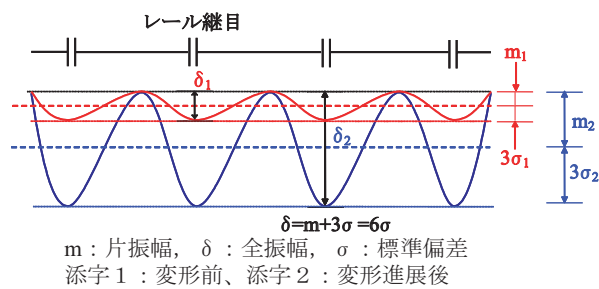


図1 設計標準での軌道変位進みモデル

②は、鉄道構造物等設計標準・同解説[有道床軌道]<sup>5)</sup>(以下、「設計標準」という。)で用いられているモデルである。このモデルは実態を説明するには都合が良いが、現実にはレール中間部でも塑性変形は発生しており、実現象との対応の点で問題がある。また、このモデルでは継目部での変形量を軌道変位の標準偏差の6倍としている。これは、軌道変位の片振幅は標準偏差の概ね3倍、全振幅である変形量は6倍との仮定に基づくものであるが、実際の軌道変位の最大値は、片振幅で標準偏差の5～6倍に達することから、軌道変位による車両の走行安全性を評価するためには、この最大値に着目した予測手法が必要となる。

③は②の持つ前記の問題点を解消するモデルであるが、予測のために膨大な計算量を必要とするため、設計の実務で用いるには難がある。

④は、現行の軌道構造や輸送条件を変えないのであれば最も精度の良い将来予測が可能であるが、これらの条件が変わると予測ができない。

これに対し本研究で提案するモデルは②、③の中間の位置づけのものであり、レール継目部と中間部における荷重の違いに着目し、この違いによって生じる継目部と中間部での塑性変形量の差が軌道変位となって測定されるとの立場で、軌道変位進みを予測するものである。この方法には、以下の特徴がある。

- ①継目部、中間部ともある程度の塑性変形が生じるといふ意味で、現実に即したモデルである。
- ②予測にあたって、計算量を要しない(表計算ソフトで十分である)。したがって、軌道構造の強化や軌道保守計画の策定にあたっての適用性が高い。

次章以下において、このモデルの概要と実測データによる検証結果を紹介する。なお、本報告では高低変位のみを対象としている。

## 2. 軌道変位進みの実態とそのメカニズムの仮説

図2に、同一線区(在来線)の近接する2箇所の継目部(溶接部)における10m弦正矢高低変位の経時変化を示す。両継目は25m離れているが、軌道構造(バラスト

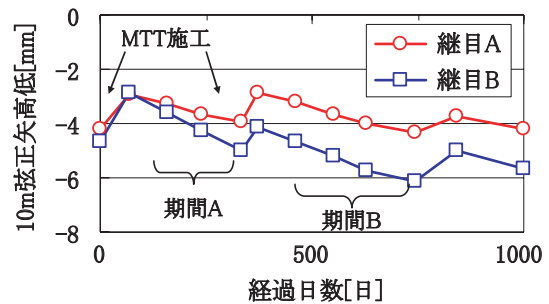


図2 近接する2箇所の継目部の高低変位の経時変化

厚、レール種類、まくらぎ本数等)や輸送条件(列車速度、通過トン数)は等しい。

この図から以下のことがわかる。

- ①両継目は、軌道構造や輸送条件が等しいにもかかわらず、高低変位進み(線の傾き)が大きく異なる。
- ②両継目とも、軌道保守前後で高低変位進みはあまり変化しない。すなわち、高低変位進みの違いは各地点固有である。

この原因として、以下の4つの要因が考えられる。

- ①バラストの締め固めの度合いの違い
- ②バラストの劣化・噴泥
- ③路盤剛性の局所的な変化
- ④レール頭頂面の凹凸による輪重・横圧変動

①は、軌道保守(つき固め)直後のバラスト層の初期沈下には影響すると考えられるが、以後の高低変位進みへの影響は小さいと考えられる。②については、一般にバラストが劣化した箇所ではつき固め直後に高低変位が急激に進展するが、図2で高低変位は高々6mmであり、劣化しているとは考えにくい。③については、開業後数十年を経た在来線では路盤は十分に締め固められており、もともと軟弱路盤である区間を除けば路盤の剛性に差があるとは考えにくい。

以上のような検討を図2以外の継目でも行い、高低変位進みに対し以下の仮説を立てた。

- ① 高低変位は中間部と継目部での沈下量の差によって生じる。
  - ② この沈下量の違いは、中間部と継目部での輪重の違いによって生じる。
  - ③ この輪重の違いは遊間やレール凹凸によって生じ、その大きさは保守の前後で変化しない。
- 以下、次節以降でこの仮説を検証する。

## 3. 継目部における変動輪重

### 3.1 継目部における輪重の実態

前章での考察に基づき、まず継目部における変動輪重の実態を確認しておく<sup>6)</sup>。図3に、在来線車両で新連続法により測定した輪重のうち、継目部における変動輪重(波

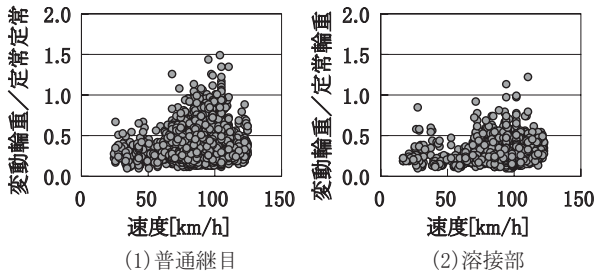


図3 継目部における変動輪重の例

長5m以下の成分の25mロット最大値)と定常輪重(静止輪重+遠心力・カントによる輪重増減分)との比を示す。

同図より、変動輪重にはばらつきが大きく、例えば普通継目の場合、平均すると定常輪重の0.4倍程度であるが、大きいものは1.5倍に達することがわかる。図3のデータを速度幅10km/h毎に区切り、それぞれに対し極値分布をあてはめた。普通継目の100±5km/hでの例を図4に示す。極値分布は実測値の頻度分布によく適合していることがわかる。

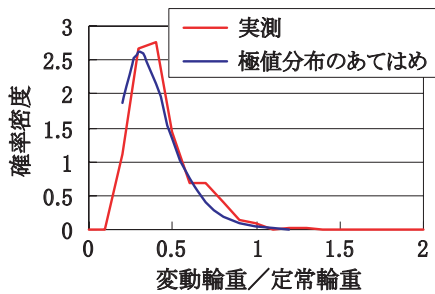


図4 変動輪重に対する極値分布のあてはめの例  
(100±5km/hの例)

### 3.2 継目部における変動輪重の推定法

設計標準では、車両走行時の輪重の変動分を、高低変位により発生する車体質量の上下動揺に伴う慣性力 $\Delta P_{sp}$ と、溶接部または普通継目のレールの凹凸により発生するばね下質量の上下振動に伴う $\Delta P_{unsp}$ との和として表現している。

各々の算出式を式(2)、(3)に示す。 $\Delta P_{sp}$ は、高低変位の標準偏差 $\sigma_y$ から算定される車体上下動揺の標準偏差 $\sigma_{av}$ と<sup>7)</sup>車体質量の積として表される。また、 $\Delta P_{unsp}$ は、輪重変動解析モデルによるシミュレーション結果に基づき、車軸別、継目種別毎の変動輪重を、列車速度、車両条件(車体質量、ばね下質量)、軌道構造条件等を考慮して算定する。

$$\Delta P_{sp} = M_{sp} \cdot \sigma_{av} = M_{sp} \cdot k_v \cdot V \quad (2)$$

$$\Delta P_{unsp} = P_{st} \times i \times V / 100 \quad (3)$$

ここで、 $M_{sp}$ ：車体質量 / (2×軸数) [ton]  
 $k_v$ ：上下動に関する車両動揺係数

空気ばね支持の場合 0.0010  
コイルばね支持の場合 0.0015  
 $\sigma_y$ ：高低変位の標準偏差 [mm]  
 $\sigma_{av}$ ：上下振動加速度の標準偏差 [m/s<sup>2</sup>]<sup>7)</sup>  
 $\sigma_{av} = k_v \sigma_y V$   
 $V$ ：列車速度 [km/h]  
 $P_{st}$ ：静止輪重 [kN]  
 $i = 0.14$  (溶接部 (削正有り))  
 $i = 0.36$  (溶接部 (削正無し))  
 $i = 0.59$  (普通継目)

式(3)は、レールの凹凸形状を波長1mの三角波とし、削正有りの溶接部で振幅を0.2mm、削正無しの溶接部で0.5mm、普通継目で0.8mmとしてシミュレーションを行った結果から得られたものである。すなわち、 $i$ は継目部の状態に応じた輪重の割増率を表している。なお、式(3)で速度を100で除しているのは、100km/hを基準速度として $i$ を定めたためである。

$$\Delta P = 3 \times \Delta P_{sp} + \Delta P_{unsp} \quad (4)$$

ここで、式(4)第1項の高低変位による変動輪重の最大値は、実測値から判断すると静止輪重の高々10%程度の大きさである。一方、第2項の $\Delta P_{unsp}$ の実態は図4に示すようにばらつきが大きく、その最大値は静止輪重の1.5倍程度となる。式(3)の係数はシミュレーション結果に基づくものであることを考えると、実測値のばらつきを設計に反映するためには、図4のような頻度分布に基づいて、式(3)の $i$ を発生確率が十分小さい値とすればよい。

## 4. 軌道変位進みモデルとその検証

### 4.1 モデルの概要

本研究では、2章で述べた3つの仮定に基づく軌道変位進みモデルを検証する。このモデルでは、軌道変位は、レール継目部での沈下量 $\delta_1$ とレール中間部の沈下量 $\delta_0$ との差であると仮定する。図5に、軌道変位進みモデルの模式図を示す。

図5における、中間部の沈下量 $\delta_0$ 、継目部の沈下量 $\delta_1$ は、これらの地点で発生する動的輪重を用いて、式(5)の軌道沈下モデル<sup>5)</sup>から求める。このとき、10m弦正矢法による高低変位は式(6)で表される。

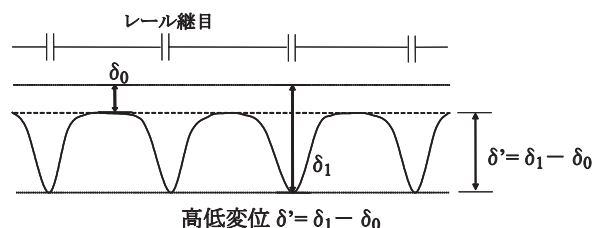


図5 本研究で提案する軌道変位進みモデル

特集：軌道技術

$$\delta_0 = \sum_i N_i a (P_{r0,i} - b)^2, \quad \delta_1 = \sum_i N_i a (P_{r1,i} - b)^2 \quad (5)$$

$$\delta' = \delta_1 - \delta_0 \quad (6)$$

ここで、 $P_{r0,i}$ 、 $P_{r1,i}$ ：それぞれ車種  $i$  による中間部、継目部のまくらぎ下面圧力

$N_i$ ：車種  $i$  の通過軸数

$a, b$ ：バラスト厚さに応じた係数<sup>5)</sup>

なお、式(6)の導出にあたって、「継目部の落ち込み波長は10m以下であり10m弦正矢で測定された高低変位と実高低変位は等しい」と仮定した。図6に、このような継目部の10m弦正矢高低変位波形の例を、図7に継目部における10m弦正矢高低変位の片振幅と復元波形の全振幅の比較を示す。両者はほぼ一致しており、この仮定は妥当であると判断できる。

中間部、継目部、それぞれの箇所の変動輪重 $P_{dy}$ は、式(4)から以下の式で表される。

$$\text{中間部} \quad P_{dy} = P_{st} + 3 \times \Delta P_{sp} \quad (7)$$

$$\text{継目部} \quad P_{dy} = P_{st} + 3 \times \Delta P_{sp} + \Delta P_{unsp} \quad (8)$$

したがって、式(6)の $\delta'$ は式(8)の第3項 $\Delta P_{unsp}$ に大きく依存することになる。これは式(3)で求められるが、この中の $i$ を、個々の継目の状態を表す変数と定義し、改めて「継目衝撃率」と呼び $\eta$ で表す。

$$\Delta P_{unsp} = P_{st} \times \eta \cdot V / 100 \quad (9)$$

すなわち、列車速度、車両条件、軌道条件等が同じ区間

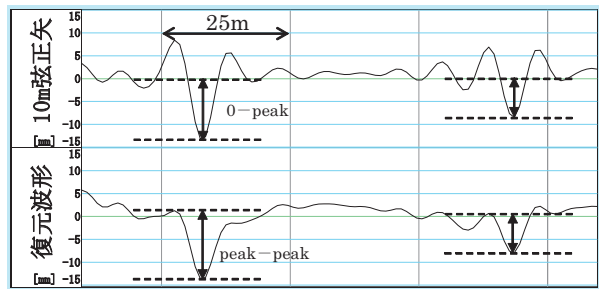


図6 10m弦正矢高低と復元波形の例

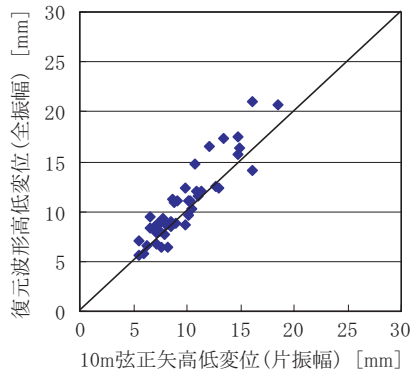


図7 継目部の10m弦正矢高低変位と復元波形高低変位の比較

の複数の継目部における高低変位進みの違いを $\eta$ で説明できれば、地点毎の高低変位進みの差異は継目毎のレールの凹凸の程度の違いにあるということが説明できる。

4.2 モデルの検証

上記のモデルの妥当性を、実際の高低変位進みデータを用いて以下の手順により検証した。分析対象線区は、在来線ロングレールの直線区間(通トン約1,100万トン、最高速度130km/h)であり、2年間分の高低変位データを用いた。検証手順は以下のとおりである。

- (1) 実測データによる高低変位進みの算出
  - (2) 継目衝撃率 $\eta$ を変数とする高低変位進みの算出
  - (3) 継目衝撃率 $\eta$ の算出
  - (4) 同一箇所の2つの期間の継目衝撃率 $\eta$ の比較
  - (5) 継目衝撃率 $\eta$ と軸箱上下加速度との比較
- 以下、具体的手順と結果を述べる。

- (1) 実測データによる高低変位進みの算出

対象線区における2年間の高低変位の実測データより、軌道保守を行ってから2回以上の軌道検測データが取得でき、かつ前後に構造物等が存在しない溶接部70箇所を選定して、期間A、期間Bにおける高低変位 $\delta'$ の1年あたりの増加率を回帰分析により算出した。なお、高低変位は左右レールの平均値を用いている。図8の場合、期間A 0.84mm/年 期間B 0.83mm/年となる。

- (2)  $\eta$ を変数とする高低変位進みの算出

継目衝撃率 $\eta$ をパラメータとし、設計標準による方法で軌道沈下量を予測し、これと式(5)から1年当たりの高低変位進みと $\eta$ との関係を求めた。結果の例を図9に

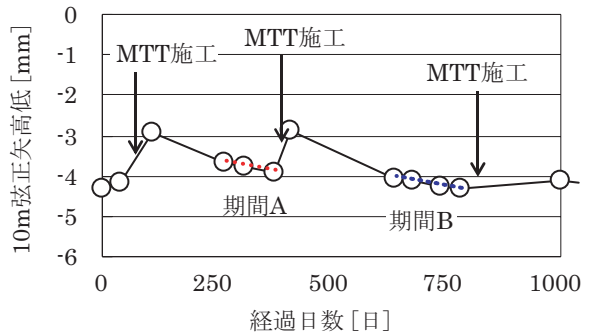


図8 実測高低変位進みの算出

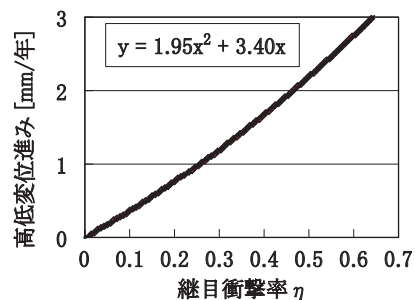


図9 継目衝撃率 $\eta$ と高低変位進みとの関係の例

示す。

(3) 継目衝撃率  $\eta$  の算出

(2) で算出した高低変位進みと、(1) で得た1年当たりの高低変位進みが一致するよう、期間A、期間Bの、継目毎の継目衝撃率  $\eta$  を推定した。例えば図9で、期間Aの0.84mm/年に対し  $\eta=0.219$ 、同じく期間Bの0.83mm/年に対し  $\eta=0.217$  となる。

(4) 同一箇所の2つの期間の継目衝撃率  $\eta$  の比較

各継目において、期間Aの高低変位進みから求めた  $\eta$  と期間Bから求めた  $\eta$  を比較した。結果を図10に示す。同図から、継目衝撃率  $\eta$  は、軌道保守前後での違いが小さいことがわかる。すなわち、軌道構造が大きく変わらない限り、 $\eta$  は継目固有であると言える。したがって継目毎の  $\eta$  がわかれば、各々の継目の高低変位進みが予測できることになる。

(5) 継目衝撃率  $\eta$  と軸箱上下加速度の比較

継目衝撃率  $\eta$  が継目部毎に固有とした場合、式(9)からその大きさは継目部で発生する変動輪重に比例すると考えられる。輪重の測定は困難であるため、軌道検測車で測定した軸箱上下振動加速度(以下、「軸箱加速度」という。)と継目衝撃率とを比較した。結果を図11に示す。なお、軸箱加速度は当該継目部を含む25mロット最大値の左右平均値を用いている。また、検測車の走行速度にはばらつきがあるので、図10に示す各継目のうち、走行速度がほぼ等しい(96~97km/h)地点のものを用いた。

図11より、継目衝撃率  $\eta$  と軸箱加速度には弱い相関がある。軸箱加速度は変動輪重と相関が高いことが知られているので、 $\eta$  も変動輪重と相関があるといえ、式(6)による高低変位進み予測の妥当性を示している。さらにこのことは、軸箱加速度から高低変位進みが推定できる可能性を示唆している。

これらの結果から、2章の仮定③の妥当性が確認できる。

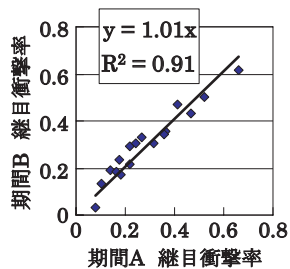


図10 保守前後の継目衝撃率  $\eta$  の比較

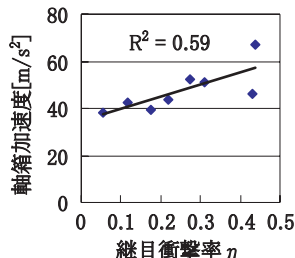


図11  $\eta$  と軸箱上下加速度の関係

4.3 高低変位進みの予測例

ここまで述べてきた高低変位進みモデルを用いて、実際の高低変位進みの予測を行った。具体的にはある期間の高低変位進みから算出した継目衝撃率  $\eta$  を用いて異なる期間の高低変位進みを予測し、実測値との比較を行っ

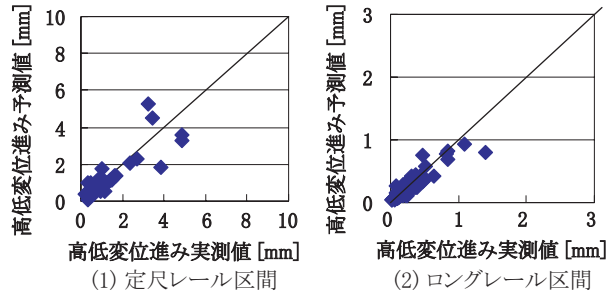


図12 高低変位進みの実測値と予測値の比較

た。図12に結果を示す。

両図より、高低変位進みが大きくなると実測値と予測値との差が大きくなっているが、本モデルによって、一定の精度で実際の高低変位進みが予測できているといえる。

5. バラスト軌道の性能照査

5.1 性能照査の方法

前章で述べた方法は、供用中の軌道における個々の継目部の高低変位進みの予測法である。本章では、これをバラスト軌道の設計に適用する方法を述べる。

性能照査型設計では、対象となる構造物の要求性能を明示し、所要の性能を満足するかどうかを照査する。具体的には、設計作用による応答値と、性能を満たすための限界値を比較する。

バラスト軌道に求められる性能は多岐にわたるが、最も重要なものの一つに軌道変位による走行安全性がある。これは、軌道変位が大きくなり、走行安全性を支障することがないという性能をバラスト軌道に求めるものであり、軌道変位進みを考慮した軌道変位の最大値を応答値、車両の走行安全上許容される軌道変位の最大値を限界値として、設計応答値が設計限界値以下であることを照査する。

軌道変位による走行安全性の照査の概念を図13に示す。軌道変位の初期値を  $\delta_{ylo}$  とする。本報告で示した軌道変位進みモデルにより求められる、1軸通過あたりの軌道変位進みが  $\beta_y$  である。これを保守周期  $T$  だけ累積し

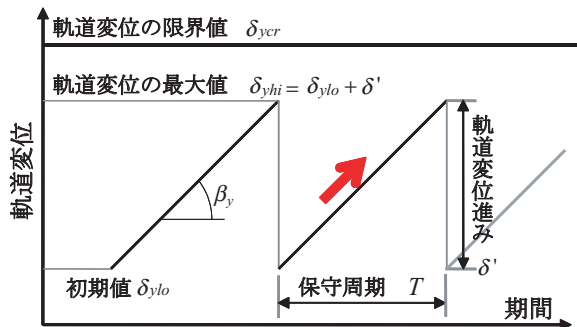


図13 軌道変位に対する走行安全性照査の考え方

特集：軌道技術

軌道変位の最大値  $\delta_{yhi}$  を算定する。これに構造解析係数  $\gamma_a$  を乗じたものが設計応答値となる。保守周期  $T$  は、保守体制等に基づき設計条件として与える。

一方、走行安全上許容される軌道変位の最大値  $\delta_{ycr}$  は、車両諸元や走行速度等からあらかじめ定めておく。これを部材係数  $\gamma_b$  で除したものが設計限界値となる。

最終的な性能照査は、式(10)により行う。

$$\gamma_i I_{Rd} / I_{Ld} \leq 1.0 \quad (10)$$

ただし、 $I_{Rd}$ ：設計応答値 =  $\gamma_a \delta_{yhi}$

$I_{Ld}$ ：設計限界値 =  $\delta_{ycr} / \gamma_b$

$\gamma_i$ ：構造物係数

5.2 性能照査の手順

上記の考え方および本報告で提案した高低変位進みモデルに基づく、高低変位による走行安全性に対するバラスト軌道の性能照査手順を図14に示す。個々の手順の具体的な内容は以下のとおりである。

- (1) 設計条件を設定する。具体的には車両諸元、速度、曲線線形、保守条件（実現可能な保守周期等）、および軌道構造の初期値（レール種類、まくらぎ種類・本数、バラスト厚さ等）を設定する。
- (2) 式(7)～(9)から中間部、継目部の輪重を算定する。
- (3) 式(5)の軌道沈下則<sup>5)</sup>を用いて、中間部および継目部の1軸通過あたりの軌道沈下量を算定する。
- (4) 式(6)から保守期間内の高低変位進み $\delta$ を算定する。

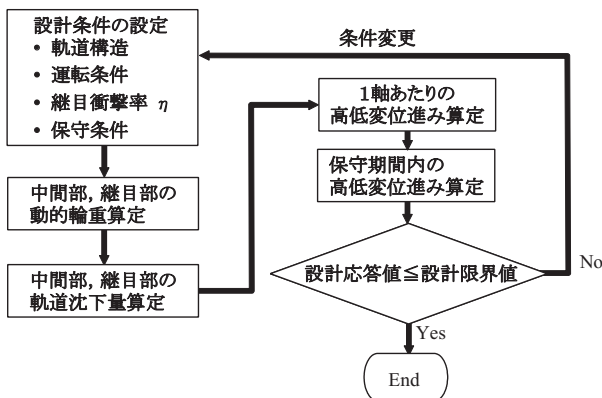


図14 軌道変位による走行安全性に対するバラスト軌道の性能照査手順

これに高低変位の初期値  $\delta_{ylo}$  を加えたものが、高低変位の最大値  $\delta_{yhi}$  となる。

- (5)  $\delta_{yhi}$  に構造解析係数  $\gamma_a$  を乗じ、設計応答値  $I_{Rd}$  を算定する。
- (6) 車両諸元、走行速度および曲線線形から、走行安全上の高低変位の限度値  $\delta_{ycr}$  を算定する。これを部材係数  $\gamma_b$  で除し、設計限界値  $I_{Ld}$  を算定する。
- (7) 式(10)で設計応答値と設計限界値を照査する。不等号が満たされない場合は、軌道構造の初期値を変更する。

6. まとめ

本報告の内容をまとめると以下のとおりである。

- (1) 継目部で発生する輪重変動に着目した、新しい高低変位進みモデルを提案した。
- (2) 直線、ロングレール区間の高低変位実測データを用いて、上記モデルの妥当性を確認した。
- (3) 性能照査型設計に基づき、軌道変位による走行安全性に対する性能照査の手順を示した。

文献

- 1) 杉山徳平：軌道狂い進みの実態調査とその解析，鉄道技術研究報告，No.1081, 1978
- 2) 内田雅夫，森本勝，三和雅史，小林幹人：在来線高速線区の軌道狂い進みの実態と予測手法の検証，鉄道総研報告，Vol.3, No.12, 1998
- 3) 石田誠，内田雅夫，小野重亮：軌道動的応答モデルによる軌道狂い経時変化予測，鉄道力学論文集，No.4, 2000
- 4) 森本勝，三和雅史：指数平滑法を用いた軌道狂い進みの予測法，土木学会第52回年次学術講演会，1997
- 5) 運輸省鉄道局監修：鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造 [有道床軌道] (案)，1997
- 6) 桶谷栄一，古川敦，福山幹康：レール継目部等通過時の衝撃的な輪重・横圧の実態調査と推定法，J-Rail2007, 2007
- 7) 高井秀之，矢澤英治，内藤博行：軌道狂いの標準偏差による車両動揺の推定法，土木学会第48回年次学術講演会，1993