

## 軌道構造に関する設計法の変遷と最近の研究開発

軌道技術研究部

部長 古川 敦

### 1. はじめに

平成 23 年 12 月に「鉄道構造物等設計標準（軌道構造）」（以下、「新設計標準」という。）が国土交通省から通達された<sup>1)</sup>。新設計標準は軌道の設計に初めて性能照査型設計法を導入し、軌道を支持する土木構造物と共通の考え方での設計を可能とした。

一方、軌道構造は材料交換やバラストのつき固め等の定期的な保守の繰り返しを前提とした構造物であり、橋梁やトンネルのような、半永久的かつ取り替えが困難な構造物とは、設計思想が大きく異なる。特にバラスト軌道の場合は、その構造が保守コストに大きく影響するため、一般の構造物以上にライフサイクルコストを意識した設計が必要となる。

本稿では、バラスト軌道を中心とした軌道構造の設計法の変遷を、特に保守の繰り返しの取り扱いを中心に解説するとともに、新設計標準に基づいて実施した最近の技術開発例を紹介する。

### 2. 軌道構造設計法の変遷

#### (1) バラスト軌道

##### 1) バラスト軌道の設計法の特徴

バラスト軌道の設計においては、バラスト道床の変形とそれに対する保守の取り扱いが重要であり、設計法の変遷は、両者の取り扱い方法の変遷と言える。以下に、1950 年代から新設計標準までの、設計法の変遷を紹介する。

##### 2) 軌道破壊理論

日本における近代的な軌道構造の設計手法の研究は、星野・佐藤によって 1960 年に提唱されたものが嚆矢である。星野らは、バラスト道床の漸進的な変形を、力学的な破壊とは区別して「軌道破壊」と名付け、その速さの推定モデルである「軌道破壊理論」を体系化した。

軌道破壊理論では、バラストの漸進的な変形（ここでは、上下方向の沈下を対象とする）の尺度として「軌道破壊係数  $\Delta$ 」を導入する。この軌道破壊係数は荷重係数  $L$ 、構造係数  $M$ 、状態係数  $N$  の積 ( $\Delta = L \times M \times N$ ) と定義される。それぞれの係数は、以下のように算定する。

##### i) 荷重係数 $L$

荷重係数  $L$  は、設計における作用（列車荷重）、衝撃的荷重による割り増しおよび繰り返し数のそれぞれに比例する係数である。

##### ii) 構造係数 $M$

構造係数  $M$  は、軌道構造の破壊に対する難易度を表す指標で、まくらぎ下面圧力、道床振動加速度および衝撃係数に比例する式で表される。軌道構造に応じたバラスト沈下量の違いを表現するために用いられる。

##### iii) 状態係数 $N$

状態係数  $N$  は、軌道材料の種類および経年に伴う軌道状態の劣化によるバラスト沈下の速さの違いを表すもので、a) レール係数、b) まくらぎ係数、c) 道床係数、d) 継目係数の積で表される。

軌道破壊係数は、それだけでは物理的な意味を持たない数値であるが、基準軌道構造に対する

沈下量（ $\propto$ 必要軌道保守量）の比を簡便に算定できる指標となっている。これにより定まる軌道構造の建設コストと長期的な保守費との和を最小とする「最適軌道構造」は、国鉄における標準的な軌道構造として広く用いられた。さらに、国鉄末期の在来線速度向上や輸送力増強に対応し、列車速度に応じた「投入しうる保守量を最大限投入した上で、所定の軌道状態を維持しうる最低限の軌道構造」として、速度制限別軌道構造基準規程（案）<sup>2)</sup>が提案されている。

### 3) 鉄道構造物等設計標準〔有道床軌道〕（案）<sup>3)</sup>

軌道破壊係数が、それだけでは物理的な意味を持たなかったのに対し、設計作用、作用に対する軌道側の応答とその限界値を明示的に設計に取り入れたのが、1997年に制定された鉄道構造物等設計標準〔有道床軌道〕（案）である。ここでは、設計作用の算定法として、後に推定脱線係数比の算定に用いられる「輪重横圧推定式」が提案され、また実物大模型軌道載荷試験結果から得られた道床沈下量算定式が応答値の算定に用いられるなど、工学的な意味での「設計」が初めて取り入れられた設計手法となった。なお、本設計標準（案）においても、バラスト軌道の構造は保守投入量と軌道劣化量が釣り合うように決定される。

### 4) 新設計標準

新設計標準におけるバラスト軌道の設計は3)に準じたものであるが、バラスト軌道における保守量（保守周期）を、「性能項目」ではなく「設計条件」として扱っている点が特徴となっている。新設計標準における保守周期、応答値、限界値の関係を図1に示す。これにより、設計者が目標とする性能と投入可能な保守量に応じて、性能を満足する軌道構造が設計できるという点で、最も設計者の自由度が高い設計法となっている。一方で、バラスト軌道の設計は、レールの種類、単位長さあたりのまくらぎの本数およびバラスト道床の厚さを選択する問題に帰着できることから、「適合みなし仕様」を準備して設計者の負担を減らす配慮がなされている。

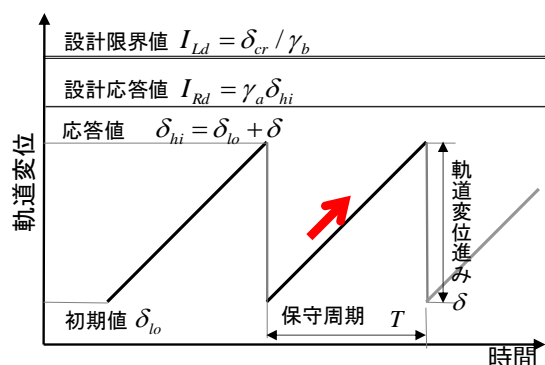


図1 新設計標準における軌道変位照査の概念

表1 軌道スラブの列車荷重載荷時の性能照査指標

照査対象	要求性能	性能項目	照査指標
本体	安全性	破壊	曲げモーメント
		疲労破壊	応力度
	使用性	損傷	曲げモーメント
		外観	ひび割れ幅
埋込栓部	安全性	破壊	せん断力

## (2) 直結系軌道

### 1) 直結系軌道の設計法の特徴

スラブ軌道に代表される直結系軌道は、主として鉄筋コンクリートを用いた構造体であり、その設計法もコンクリート構造物の設計法に準じて変遷している。すなわち、国鉄時代の「A形軌道スラブ設計要領」では許容応力度法が適用されていたのに対し、新設計標準では、限界状態設計法を用いた性能照査型設計法が採用されている。

### 2) 新設計標準によるスラブ軌道の設計

軌道スラブの設計では、共用時、製造・運搬時に対しそれぞれ表1、表2に示す照査指標を照査する。突起およびコンクリート道床も、同様に性能項目と照査指標を定めて照査する。

表2 軌道スラブの製造・運搬時の性能照査指標

照査対象	要求性能	性能項目	照査指標
本体	使用性	外観	曲げモーメント
吊上げ部 保持部	安全性	破壊	せん断力

### 3. 性能照査型設計法に基づく最近の技術開発

#### (1) プレパックドコンクリートを用いたバラスト軌道の直結化

前述したように、バラスト軌道は定期的な保守を前提とした構造物であることから、これを直結系軌道化することで、ライフサイクルコストの削減が可能となる。また、耐震性の向上も期待できる。

既設線バラスト軌道の直結化については、これまでも様々な方法が提案されているが、鉄道総研では、道床バラストを粗骨材として使用するプレパックドコンクリートを用いた、バラスト軌道の直結系軌道化に関する研究を進めている（図2）。

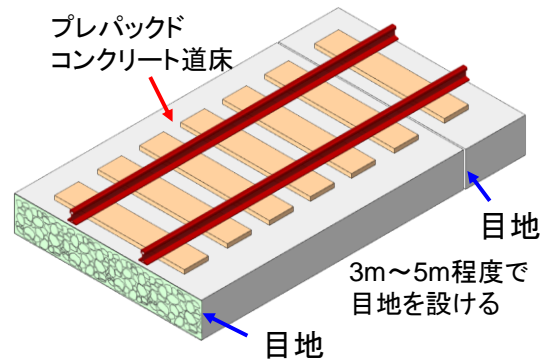


図2 プレパックドコンクリート道床

表3 プレパックドコンクリートの性能照査法のまとめ

性能項目	作用	照査指標	応答値	限界値
曲げ破壊 (鉛直方向)	輪重 (変動輪重係数 2.5)	主応力	曲げ応力	曲げ強度
曲げ疲労破壊 (鉛直方向)	輪重 (変動輪重係数 1.45)	主応力	曲げ応力	曲げ強度
せん断破壊 (水平方向)	横圧+ ロングレール横荷重	せん断力	発生 せん断力	せん断 耐力

プレパックドコンクリート道床の性能照査型設計においては、①要求性能の設定、②作用の算定、③応答値の算定、④限界値の算定、が必要となる。

新設計標準におけるコンクリート道床は高架橋上への敷設を想定している。この場合、鉛直方向の照査を省略して良いこととなっているため、具体的な照査方法は示されていない。一方、ここで示すプレパック

表4 プレパックドコンクリートの性能照査結果

性能項目	設計応答値	設計限界値	照査結果
曲げ破壊	1.63N/mm <sup>2</sup>	1.94N/mm <sup>2</sup>	0.92
曲げ疲労破壊	0.86N/mm <sup>2</sup>	1.18N/mm <sup>2</sup>	0.80
せん断(目地)	54.2kN	130.8kN	0.46

ドコンクリート道床は、土路盤上への敷設も想定していることから、性能照査方法を別途検討する必要がある。ここでは、安全性について表3に示す3つの性能項目、およびそれぞれに対応した応答値、限界値を設定し、それぞれの以下の手順で算定することとした。

作用の算定に用いる変動輪重係数は、軌道スラブおよびバラスト軌道の設計作用を参考に定めた。応答値については、地盤から軌道までを3次元にモデル化したFEM解析によって求めることとした。材料については、列車間合いで施工することを考慮し、てん充時間、可使時間および初期強度を考慮してモルタルの水セメント比および混和材の混入比率を決定した。さらに得られたプレパックドコンクリートの強度を実験的に算定し、これを限界値とした。

新幹線荷重（静止軸重 170kN）に対して表3の性能項目を照査した結果を表4に示す。いずれも所定の性能を満足していることがわかる。

#### (2) レール応急処置器の開発

レール折損時に、短期的（おおむね1日）にレールを接続するレール応急処置器には、これまで明確な設計方法が無かった。このたび、従来の安田式応急復旧



図3 試作したレール応急処置器

装置の代替品（図3）を開発するにあたって、新設計標準に準じた性能照査法をとりまとめた。

表5 レール応急処置器の性能照査法のまとめ

性能項目	作用	照査指標	応答値	限界値
曲げ疲労破壊（鉛直方向）	輪重（変動輪重係数直線 2.0、曲線 1.45） 横圧（A 荷重相当）	応力	平均応力 応力振幅	1 日分の走行回数に対する耐久限度
レール頭部 左右目違い	輪重（変動輪重係数 1.45） 横圧（A 荷重相当）	レール変位	隣接するレールの 変位差	4.0mm

表5にこれらをまとめたものを示す。ここに示すもののうち、輪重・横圧は過去の走行試験結果から決定したものであり、左右目違いの限界値は車輪フランジの格点より下側（レールとの接触角がフランジ角度よりも緩くなるエリア）がレールのゲージジョイナーに接触しないために必要な値である。

レール応急処置器やレール締結装置のような組み立て部材の疲労には、組み立て後の発生応力（≒平均応力）と列車荷重による変動応力の双方が影響する。このような場合の疲労破壊の照査における限界値には、素材に応じた耐久限度線図を用いる。図4に、図3に示すレール応急処置器（材料は S45C）の疲労破壊に対する照査結果を示す。いずれの測点とも、耐久限度線以下であるのがわかる。なお、左右目違いは設計作用載荷時に最大 3.0mm となり、限界値以下であることを確認している。

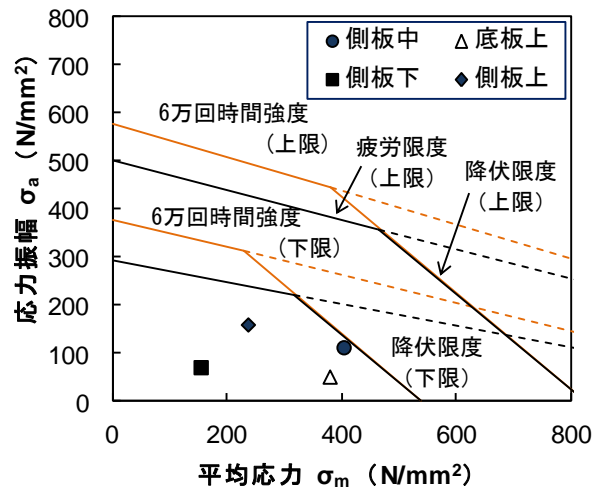


図4 耐久限度線図による照査

#### 4. おわりに

新設計標準は、軌道の分野では新しい考え方である性能照査型設計法を導入している。性能照査型設計では、要求性能とその具体的な性能項目、および性能項目に対応した応答値と限界値の設定が重要となる。本稿では、バラスト軌道の設計法の変遷および最近の技術開発例を通じて、これらの性能照査型設計法の具体的な事例を紹介した。新設計標準は通達されてからまだ日が浅いため、本格的な適用はこれから始まるものと考えている。本稿が、新設計標準適用にあたっての参考となれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省鉄道局監修：鉄道構造物等設計標準・同解説〔軌道構造〕、丸善、2012.1.
- 2) 家田仁、梅原利之、徳岡研三：速度と軌道構造に関する提案、鉄道線路、Vol.34、No.2、1986
- 3) 運輸省鉄道局監修：鉄道構造物等設計標準・同解説〔有道床軌道〕、1997.3.
- 4) 高橋貴蔵、伊藤壱記、湊上翔太、桃谷尚嗣：バラスト軌道のプレパックドコンクリート化に関する基礎的研究、コンクリート工学協会年次講演会、2012.7.
- 5) 西原敬人、片岡宏夫、西田博貴：レール折損時の応急処置器の開発、土木学会第67回年次学術講演会、2012.9.