

性能照査型設計に基づく軌道技術の新たな体系

軌道技術研究部

部長 石田 誠

1 はじめに

鉄道技術の発展において、経験は重要な判断基準である。様々な分野が総合されている鉄道システムには、理論的に定式化されない事柄がまだ多く残されている。特に軌道技術のような保守を中心とする技術は、鉄道開業以来の長い経験によって、新技術を導入しつつ安全確保と効率あるいは経済性という両面から常にバランスを保ちながら体系化されてきた。一方、現在バラスト軌道および直結系軌道の軌道構造設計標準が制定されようとしているが、その中では、性能照査型設計という観点から、改めて軌道技術の体系が見直されている。ここでは、新たな設計標準の意図とこれまでの設計手法とどのような点で異なるのかについて、その基本的な考え方を紹介する。

2 これまでの有道床軌道の設計手法

軌道構造は、レール、まくらぎ、道床バラスト、路盤等で構成される比較的簡単な構造体であるが、列車荷重を支持し、これを分散させて構造物に伝達するとともに、円滑な列車走行のための案内路という重要な役割を担う。その設計は、他の構造物と同様に、列車荷重によりレールやまくらぎ等の軌道部材に発生する応力がそれらの耐力を超えないようにしなければならないことはいうまでもないが、特に道床バラストを有するいわゆる「有道床軌道」については、列車の繰返し通過による道床バラストや路盤の漸進的な塑性沈下・変形によって軌道面の不整（軌道狂い）の発生・成長を伴うため、円滑な列車走行を確保するための復元・補修作業が日常的に必要とされるという特徴を有する。これらに対応する有道床軌道の設計手法として、従来から、次の2つの方法が一般的に用いられてきた。

(1) 軌道を構成するレール、まくらぎ等の部材の強度に着目し、まず列車走行に伴う荷重条件および軌道構造条件から軌道負担力を求め、次にこれによる部材の発生応力と許容応力の照査を行って軌道構造の妥当性をチェックする方法

(2) 列車の繰返し走行による道床バラストや路盤の漸進的な塑性沈下・変形と、これを復元・補修するための保守作業量の関係に着目し、まず列車の走行安全と乗り心地を確保するための列車走行特性値の限度を列車速度と対応した形で求め、次にこれに対応する軌道状態と必要な保守作業量ならびに列車荷重条件や軌道構造条件との関係を求めることにより、列車速度および通過トン数に対応した軌道構造条件を求める方法

また、「軌道構造」は「構造物」とは異なる分野として扱われ、国鉄時代ならびに分割民営化後もしばらく「建造物設計標準」のような設計のための標準・指針等はなく、上記の2つの設計手法を取り入れた部内規定により、軌道構造が決定されてきた。

その後、軌間、まくらぎ種別、レール種別、道床種別、路盤条件などを考慮した軌道構造強度の算出方法、普通継目軌道とロングレール軌道の軌道破壊に対する影響の評価、130km/hを超える高速運転領域に対応した軌道構造条件の検討、さらに曲線通過速度向上における左右方向の列車荷重（横圧）の増加に対して必要となる軌道構造条件の検討、急曲線区間や分岐器区間にロングレールの適

用範囲を拡大する場合の軌道構造条件の検討などが、要求性能を満たす軌道構造を設計する上で重要な課題であると整理された。

そのような経緯を背景に、列車荷重に応じて、安全確保の面から最低限必要な軌道構造条件、サービス水準や保守能力を考慮した軌道構造条件を明らかにするために、より合理的な有道床軌道の設計手法の体系化が図られ、平成9年1月に「鉄道構造物設計標準（案）軌道構造（有道床軌道）」としてまとめられた。その設計の基本は、上下方向および左右方向の列車荷重それぞれに対応した繰返し荷重に対する軌道変位（軌道狂い）進み等の照査ならびに著大荷重に対する部材応力等の照査、さらに座屈安定性に関する照査である。特に、軌道変位進みに関する照査は有道床軌道の軌道構造の設計に特有のものであり、車両走行特性（走行安全性、乗り心地）や保守投入量等の条件設定による軌道変位進みの許容値と、軌道構造と車両・運転条件から軌道変位進みの推定値を比較することにより、軌道構造の妥当性を確認する点に特徴がある。

3 仕様規定から性能規定へ

鉄道建設の技術基準については、基準が定められた当初より、特定の仕様・寸法・方式等を定めることにより、結果的に求められる性能を満足させる仕様規定であった。その後、運輸省（現国土交通省）において平成10年に、運輸技術審議会の答申を受け、鉄道の技術基準について「原則として備えるべき性能を規定する、所謂性能規定とする」方針の決定を受けて、安全を確保しつつ、新技術の導入等に際して規定が障害にならない様に、また鉄道事業者の技術開発の自由度をより向上させることを目的に、仕様規定の体系を抜本的に改め、最終的に鉄道が備えるべき性能をできる限り具体的に定めた性能規定への改訂が進められている。

この性能規定化については、平成4年頃から定められてきた鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物、鋼・合成構造物、土構造物、基礎構造物・抗土圧構造物、シールドトンネル、鋼とコンクリート構造物の複合構造物、耐震設計、省力化軌道用土構造物、開削トンネル、都市部山岳工法トンネル）のうち、平成16年にコンクリート構造物の設計標準が最初に改訂され、最新の設計技術が取り込まれた。以降、それぞれの構造物において同様な取り組みが行われてきている。一方、コンクリート構造物や鋼・合成構造物を中心に、許容応力度法から限界状態設計法が取り入れられている。

4 性能照査型設計の基本的な考え方

以上、これまでは軌道構造の設計のうち特にバラスト軌道の設計については、他の土木構造物と異なり保守を前提とする特徴を有していること、また、仕様規定から性能規定への設計標準の大きな流れや、コンクリート構造物を中心に許容応力度法から限界状態設計法への変更など、軌道構造の設計方法を取り巻く状況について紹介した。一方、バラスト軌道とスラブ軌道等の直結系軌道を同じルールの下で設計し、与えられた条件の下でどのような軌道構造が有利であるかなどの検討を可能にすることは従来からも極めて重要であると考えられてきた。そこで、このような様々な要請や変更を取り入れて、軌道構造の性能照査型設計標準の制定に向けた取り組みが開始された。ここでは、その設計標準の基本的な考え方を紹介する。

軌道は、図1に示すように、バラスト軌道とスラブ軌道を代表とする直結系軌道がある。本標準は、道床バラストのつき固めを基本とする保守を前提としたバラスト軌道と少なくとも定期的な保守を前提としない直結系軌道の両者を対象とし、その両者の構造の性能を照査する場合に適用

する。照査方法については、軌道を支持する各種構造物の設計標準において適用されている限界状態設計法を基本とする性能照査型設計法とする。性能照査型設計法により、軌道を支持する構造物と同一のルールに基づいて性能を照査することができ、所定の性能を有していることが確認できれば新技術の採用もしやすくなる。また、ライフサイクルコストの概念を盛り込み、建設・敷設費等の初期投資と軌道変位の整正や軌道部材の交換・補修等の保守・補修費用との両者を考慮して、バラスト軌道と直結系軌道のどちらが長期的に経済的かを評価でき、より合理的な軌道の選定が可能となる

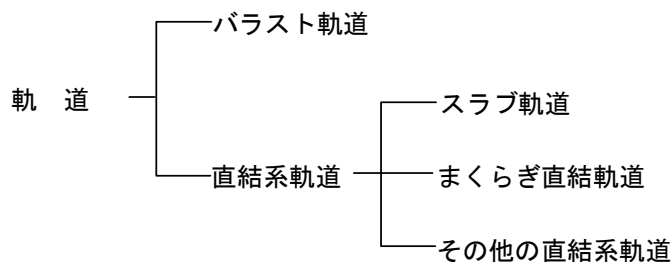


図1 軌道の分類

ことが考慮されている。また、実験や高度な解析等、工学的な方法で所要の性能を満足することを確かめた場合には必ずしも本標準によらなくてよいが、本標準の主旨を十分に尊重し、実情に適合するように適切に照査を行うことが重要であるとしている。

3 性能照査型設計法

3.1 設計の目的

軌道構造の設計にあたっては、その目的に適合し、所用の性能を有するものの中から最も経済的かつ耐久的で合理的な構造を選ばなければならない。そのためには、バラスト軌道と直結系軌道等の特徴を考慮し、建設費等の初期投資と軌道変位の整正や軌道部材の交換・補修等の保守・補修費用との両者を考慮したライフサイクルコストの比較に加え、維持管理のしやすさ、騒音・振動等の周辺環境も検討して、最も合理的なものを選ぶ必要がある。なお、軌道は各軌道部材を組み合わせることにより成立する構造であること、本標準は性能照査型設計法を基本としていることから、設計の自由度はかなり高いと考えるが、軌道部材や軌道構造によっては必ずしも計算によって評価できない部分もあり、設計者の知識と経験から判断しなければならない事柄も多い。そこで、経験豊かな技術者が責任技術者として従事することにより、はじめて目的に適合し、安全で経済的かつ耐久的で合理的な軌道構造の設計が可能となることに留意する必要がある。

3.2 設計方法の基本

本標準の基本的な設計フローを図2に示す。本標準では、性能照査型設計法を基本としており、はじめに、各鉄道事業者が線区の重要度、軌道保守体制、建設費+保守費等のトータルコストや環境条件等を考慮して、バラスト軌道か直結系軌道かを選定する。軌道の選定後、選定した軌道の軌道構造・軌道部材に対して、列車の走行安全性や軌道保守、乗り心地等を考慮し、要求性能を決定する。要求性能の決定後、軌道構造や軌道部材を仮定する。軌道構造の仮定は、例えば、締結装置の間隔、道床厚の仮定であり、軌道部材の仮定は、レール種別、まくらぎの種類、締結装置の種類等の仮定である。仮定した軌道部材に対して、限界状態設計法に基づき応答値を算定し、その応答値が要求性能から定められた制限値（限界値）以内であることを照査する。制限値を満足しない軌道部材に対しては、再度、仮定し直して、性能照査を行うこととする。さらに、仮定した軌道構造に対して、限界状態設計法に基づき応答値を算定して、その応答値が要求性能から定められた制限値（限界値）以内であることを照査し、制限値を満足しない場合には、再度、

軌道構造を見直すこととしている。しかし、軌道は、レール、締結装置、まくらぎ、道床等の各軌道部材の組合わせで成り立つ比較的簡単な構造であり、特に、バラスト軌道については、その主な設計は軌道部材の選定、まくらぎ間隔と道床厚の検討であること、道床バラストの沈下を許容する構造であることから、設計に過度な労力をかけることが必ずしも適切でない場合がある。また、十分な調査や知識、経験を伴わずに設計が行われた場合には、実情にそぐわない設計や危険な設計となる場合もある。そこで、設計の利便性を高めるとともに、設計の不確実性に対処する方法として、要求性能の水準に応じた仕様・構成を示す方法、いわゆる、適合みなし仕様も併記することとする。適合みなし仕様を示された軌道部材、軌道構造の仕様・構成は、適合みなし仕様と併せて示す設計条件下で、本標準で示された方法により性能照査が行

われたものとする。適合みなし仕様による方法は、実務的に有効な方法であり、一般的には要求性能の水準に応じて定められた適合みなし仕様を用いる場合が多いと考えられる。しかし、軌道部材もしくは軌道構造が標準的な仕様・構成で対応できない場合や、新しい形式の軌道構造や軌道部材を採用する場合には、適合みなし仕様によらず性能照査型設計を行うこととしている。

このように、本標準は性能照査型設計法を基本していることから、合理的で自由度の大きな設計を行うことが可能となるが、軌道構造や軌道部材の特性を十分に理解していない経験の少ない技術者が、本標準の意図や適用範囲を超えた設計を行わないよう十分に留意する必要がある。

5 おわりに

以上、現在制定に向けて取り組んでいる軌道構造設計標準により、軌道を支持する構造物と同一のルールに基づく性能照査が可能になり、より合理的な軌道の選定が可能となることを紹介した。一方、保守を前提に発展してきたバラスト軌道とその部材の設計に、限界状態設計法の採用は大変画期的なことであり、これまで培われてきた技術の確実な継承とともに、多様化する軌道への要求に対し柔軟に対応するために軌道技術の研究開発を進めていきたい。

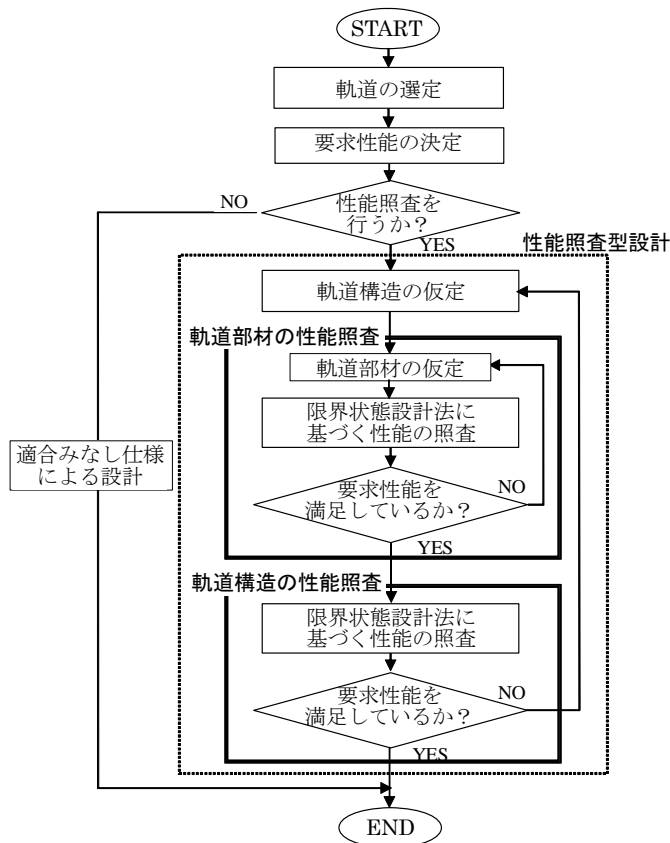


図2 基本的な設計フロー