

# 新しい設計標準と最近の軌道構造の開発動向

古川 敦\*

## Recent Tendencies of Development of Track Structures According to the Performance Based Design Code

Atsushi FURUKAWA

On Dec. 1st 2011, the latest design code for track structures was notified by the Ministry of Land Infrastructure, Transportation and Tourism. This is the first design code which applies performance-based design to track structure domain. Consequently, the RTRI has been developing new track components or structures according to the new code. In this paper, the author gives some examples of design procedures of these components or structures and explains the important points to which we should pay attention when we apply the new code to track design.

キーワード：軌道構造，設計標準，性能照査，作用，応答値，限界値

### 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、「本標準」という。)が国土交通省から通達された<sup>1)</sup><sup>2)</sup>。本標準は軌道の設計で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設計を可能とした。

性能照査の方法として、本標準では限界状態設計法を用いるのを原則としている。限界状態設計法は、土木構造物の設計法として使用されてきた実績があるものの、軌道構造・軌道部材(以下、総称して「軌道構造」という。)の設計法としてはこれまで用いられておらず、関係者に十分浸透しているとは言い難い。これに対し本稿では、鉄道総研が最近実施した、限界状態設計法に基づく軌道構造の性能照査事例を紹介し、本標準の理解を深める一助とするものである。

### 2. 限界状態設計法による軌道構造の設計

#### 2.1 要求性能の設定

性能照査型設計では、設計対象に対する要求性能および性能項目の設定が重要となる。特に、軌道構造特有の

表 1 軌道構造に特有な性能項目・照査指標の例

設計対象	要求性能	性能項目	照査指標
絶縁継目 レール締結装置	使用性	電気絶縁性	電気抵抗
バラスト軌道	安全性	走行安全性	軌道変位
ロングレール	安全性	走行安全性	最低座屈強さ 破断時間口量

\* 軌道技術研究部 部長

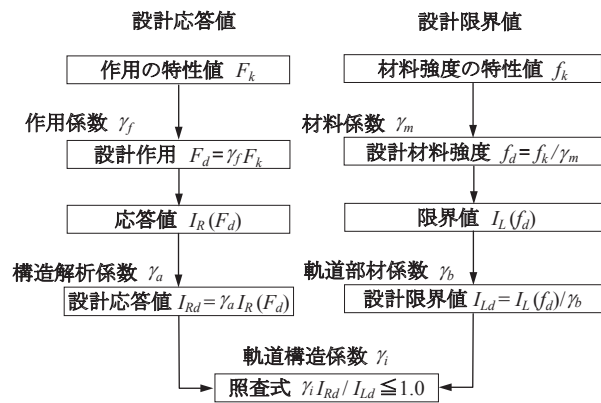


図 1 設計標準における性能照査の流れ

性能項目については、設計対象の使用状況を考慮し、適切な性能項目および照査指標を設定する必要がある。表 1 に、軌道構造に特有な性能項目の例を示す。

要求性能および性能項目を定めた後は、図 1 のフローにしたがって性能照査を行う。その際、照査指標に応じた適切な作用および応答値、限界値を設定する必要がある。これについて次節で解説する。

#### 2.2 設計上のポイント

##### (1) 作用の算定

土木構造物の設計では、EA 荷重等の荷重列で列車荷重を代表させるのが一般的であるのに対し、軌道構造は車両を直接支える構造体であるため、列車走行に伴う荷重をより直接的に算定する必要がある。特に変動輪重・変動横圧は、軌道の保守状態によってその大きさが変化する点、すなわち保守状態によって設計作用が変化する点が、軌道の設計における作用算定の難しさである。

特集：軌道技術

これまでの軌道構造の設計では、この点が曖昧にされていた。例えば、ある部材が力学的な性能を満足しない場合、土木構造物であれば断面剛性を上げる、あるいはより強度の高い材料を用いる等の設計の見直しを行い再照査するが、軌道部材の場合、保守体制を実務的に強化して作用を小さくし、性能を満足させてきた<sup>3)</sup> 経緯がある（ただし、これまでは「性能」という言葉を明示的に用いてはいない）。本標準では軌道に求められる性能を適切に照査するために、保守体制と作用の関係、具体的には軌道変位やレール凹凸状態の管理値と変動輪重・変動横圧との関係を定量的に明確にし、適用する保守体制に見合った作用を用いるのを基本としている。新連続法による輪重・横圧の測定が普及してからは、軌道状態と輪重・横圧との関係が詳細に把握できるようになっており、これらの有効活用が望まれる<sup>4)</sup>。

(2) 応答値の算定

応答値とは、列車荷重等によって軌道に生じる現象を数値化したものである。具体的には軌道スラブやレール締結装置等に発生する応力、道床バラストの沈下、あるいは温度変化によるレール軸力などがある。

土木構造物の場合、各種設計プログラム等が整備され、応答値を計算で算定するのが一般的であるが、軌道構造の場合、特に車両走行時の応答値は、試作品を営業線や運転所構内に敷設し、実測によって把握することが多かった。この理由として以下のことが挙げられる。

- 軌道の分野において、設計での使用に耐えうる動的解析法は普及していないこと。
- 同一の軌道構造であっても、敷設状況によって応答値は大きくばらつき、これを把握するためには結局のところ営業線での測定が必要となること。
- 上述のように、営業線での試験敷設で性能を満足しないデータが観測された場合であっても、保守体制の強化によってこれを克服してきたこと。

一方、近年の解析技術の発達によって、主として静的なモデルではあるものの、複雑な形状をした軌道部材の応答を解析的に得ることが可能となりつつある。これと鉄道総研が所有する、軌道分野に特化した試験機での試験結果を組み合わせることで、営業線を模した応答値の算定も可能となりつつある。また、少子高齢化等に

よる運輸収入の頭打ちを考慮すると、今後軌道保守費の低減がますます求められるようになり、保守体制の強化による対応には自ずと限界がある。

以上のことから、将来的には軌道構造においても設計の段階でばらつきを考慮した応答値を算定し、営業線での試験敷設を省略する方向に進むと想定される。この場合、応答値の算定精度向上のための各種ツールの整備が必要となる。

(3) 限界値の算定

限界値とは、設計対象に要求される性能が失われるときの照査指標の値である。限界値のうち、部材の破壊等に関するものは使用する材料強度から比較的容易に算定できる。一方、車両の走行性に関わる限界値は、車両諸元や線路線形、走行速度等によって変化するため、性能項目に応じて適切な値を定める必要がある。

3. 性能照査型設計法による軌道部材の設計例

3.1 レール応急復旧装置

レール折損時に、短期間（おおむね1日）レールを接続するため、レール応急復旧装置が用いられる。レール応急復旧装置にはこれまで明確な設計方法が無かったが、このたび、従来の安田式応急復旧装置の代替品（図2）を開発するにあたって、本標準に基づいた性能照査法をとりまとめた<sup>5)</sup>。

表2に要求性能および作用、応答値、限界値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る。また左右目違いの限界値4.0mmは、図3に示すように車輪フランジ格点（フランジ先端の、レールとの接触角がフランジ角度よりも緩くなり始める点）より下側がレールのゲー

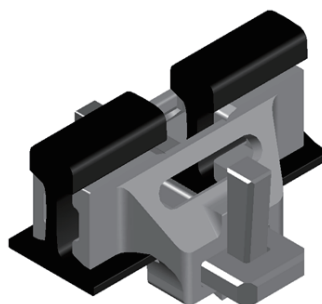


図2 開発したレール応急復旧装置

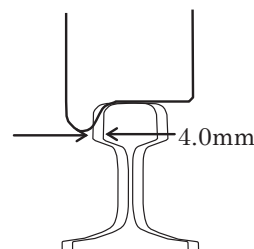


図3 目違い量の限界値

表2 レール応急復旧装置の性能照査法のまとめ

要求性能	性能項目	作用	照査指標	応答値	限界値
安全性	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
	走行安全性	輪重 (変動輪重係数 1.45) 横圧 (A 荷重相当)	レール頭部 目違い量	隣接するレール の変位差	4.0mm

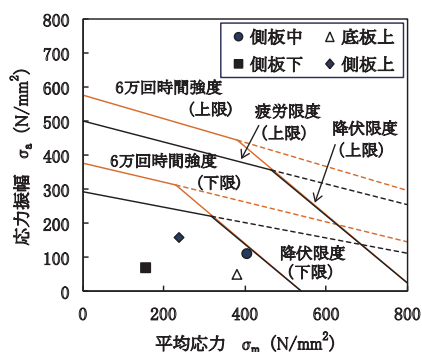


図4 耐久限度線図による照査

ジコーナーに接触しないための値である。

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。このような部材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、レール応急処置器（素材は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。

### 3.2 軌道スラブ端部補強対策工

2004年10月に発生した中越地震では、営業走行中の新幹線が脱線し、脱線した車両によって軌道部材が大きな被害を受けた<sup>6)</sup>。これに対し、脱線防止および脱線後の逸脱防止法の開発が進められている<sup>7)</sup>。これらの各種対策設備には様々な性能項目があり、その中の一つに車輪が軌道スラブ端部を走行しないことがある。これは、中越地震では脱線した車輪が軌道スラブ端部を走行し、軌道スラブ端部に欠落や剥離が見られたためである。これに対し、軌道スラブ端部を鋼材で補強し、コンクリートの欠落を防止するために、図5に示す対策工（以下、「対策工」という）を開発した<sup>8)</sup>。

対策工は、新幹線車両が地震で脱線した後にその性能を発揮するため、要求性能は安全性のみを設定し、具体的な照査指標を表3の4項目とした。

性能照査にあたり、作用は実物の新幹線台車を用いた

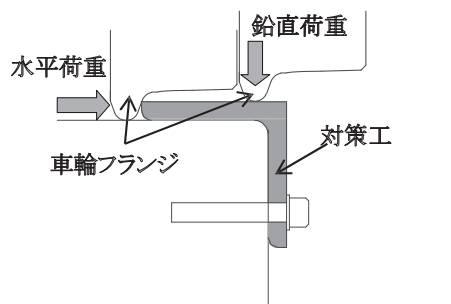


図5 軌道スラブ端部補強対策工

表3 軌道スラブ端部補強対策工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
車輪の落下	水平荷重 (図5。以下同)	車輪走行位置	対策工の水平変位	脱輪限界
	鉛直荷重	軌道スラブのせん断破壊	鉛直荷重	せん断強度
部材の破断	鉛直荷重	対策工のひずみ	曲げ応力	曲げ強度
部材の脱落	水平荷重	ボルトのせん断力	せん断力	せん断耐力
	鉛直荷重			

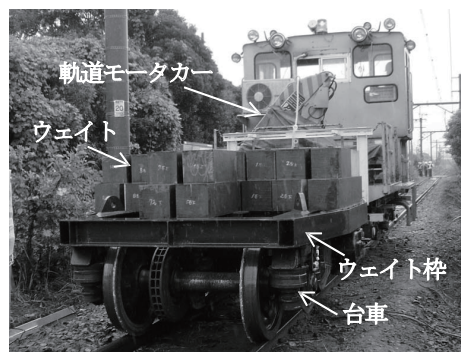


図6 実台車を用いた衝突試験の状況

振動台実験結果から鉛直荷重240kN、水平荷重200kNと定めた。応答値については、模型実験および動的解析によって算定した。特に対策工の破断の応答値については、図6に示すように実台車を用いた衝突試験を行い、これとLS-DYNA<sup>9)</sup>による非線形衝突解析を組み合わせることで算定した。また、限界値のうち部材の破壊に関する事項は、使用する材料の設計強度および実物大模型の破壊試験結果から定めた。脱輪限界については、脱線後の車輪の走行位置と逸脱防止ガードの幾何学的関係から、対策工に許容される最大水平変形量を13mmと定めた。

これらの算定結果に基づく性能照査、および部材の入手しやすさを考慮し、150×150×19mmの等辺山形鋼を軌道スラブ吊り上げ用インサート（2箇所連続のもの）に取り付けることで、所定の性能を有する対策工が成立することを確認している。

### 4. 性能照査型設計法による軌道構造の設計例

既設線の多くはバラスト軌道である。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化の研究を進めている（図7）<sup>10)</sup>。

表4 プレパックドコンクリートの性能照査法のまとめ

要求性能	性能項目	作用	照査指標	応答値	限界値
安全性	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

項目を照査した結果、いずれも所定の性能を満足していることを確認している。

## 5. おわりに

本稿では、鉄道構造物等設計標準・同解説【軌道構造】

の通達に基づいて、最近鉄道総研が実施した技術開発例を3件紹介した。

本稿で繰り返し述べたように、性能照査型設計の適用にあたっては、目的に応じた性能項目の設定およびこれに関連する作用の算定、また性能項目に応じた応答値および限界値の算定が重要となる。特に性能項目の設定については、多種多様な軌道構造・軌道部材に対し、供用期間を通して生じる様々な事象を設計の段階で想定する深い洞察力が求められる。このためには、設計技術者が保線の実務に精通している必要がある。また作用、応答値の算定のためには、適切な解析ツールの開発も必要と考えている。今後鉄道総研では、本標準によってますます合理的な軌道構造が開発されるよう、周辺技術の整備と合わせて、現場力を磨いていきたいと考えている。

なお、実物大台車の振動台実験は、国土交通省の補助金を受けて実施した。

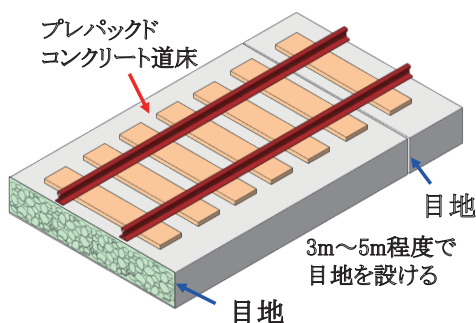


図7 プレパックドコンクリート道床

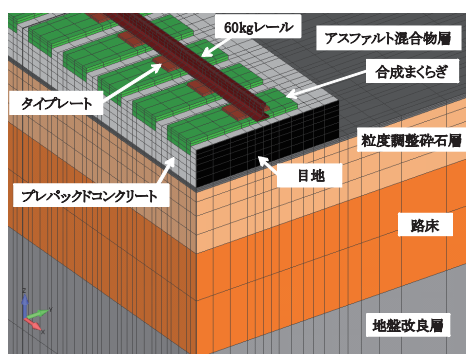


図8 FEMによる応答値の算定

本標準において、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った。ここでは、安全性について表4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、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解析によって求めた(図8)。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4の性能

## 文献

- 1) 国土交通省監修：鉄道構造物等設計標準・同解説【軌道構造】，丸善，2011
- 2) 古川敦：軌道構造の設計手法の変遷と今後の展望，鉄道総研報告，Vol.26，No.2，pp.1-6，2012
- 3) 運輸省監修：在来線運転速度向上試験マニュアル，1995
- 4) 桶谷栄一：レール継目部等における輪重・横圧の実態，日本鉄道施設協会誌，Vol.47，pp.24-27，No.1，2009
- 5) 西原敬人，片岡宏夫，西田博貴：レール折損時に用いる応急処置器の性能評価法，新線路，Vol.66，No.8，pp.27-29，2012
- 6) 航空・鉄道事故調査委員会：鉄道事故調査報告書 上越新幹線浦佐駅～長岡駅間列車脱線事故，2007
- 7) 例えば，森村勉，関雅樹：新潟県中越地震後の東海道新幹線の地震対策について，第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，No.09-65，pp.545-548，2009
- 8) 本野貴志，片岡宏夫，細田充：軌道スラブ端部補強対策工の開発，鉄道工学シンポジウム論文集，Vol.16，pp.67-74，2012
- 9) <http://ls-dyna.jsol.co.jp/>
- 10) 高橋貴蔵，伊藤孝記，洲上翔太，桃谷尚嗣：新幹線に対応したプレパックドコンクリート道床の開発，鉄道総研報告，Vol.26，No.2，pp.19-24，2012