

軌道構造の設計手法の変遷と今後の展望

古川 敦*

The History of Track Structure Design and the Future

Atsushi FURUKAWA

The research of the design method of ballasted tracks in Japan started from the theory of track destruction in the 1950's. Afterwards, some improvements were done, and a new track structure design code has been enforced since December 2011. In case of the design of ballasted tracks, the prediction and verification of track irregularities is important and these are the most different from the design method of infrastructures which are mainly verified against the mechanical destruction. In this text, the author has described the history of the design method of track structure and the view in the future.

キーワード：軌道構造，設計標準，バラスト軌道，直結系軌道，ライフサイクルコスト

1. はじめに

2011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¹⁾。これは、軌道部材、バラスト軌道、直結系軌道、分岐器類および路盤までを包含した、軌道関係では日本で初めての設計標準である。新設計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の設計を可能とした。

土木構造物の設計では様々な性能に対する照査が行われるが、その中心となるのは力学的な破壊に対する照査である。この意味における軌道構造の照査は従来から「入線検討」と呼ばれ、新形式車両の投入や速度向上に応じて、レールやまくらぎに発生する応力等が破壊限度を超えないことを確認している。

一方で、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比較すると、設計に対する考え方は大きく異なる。特にバラスト軌道の場合は、レールの太さやまくらぎ配置間隔によって軌道変位の経時変化（進み）、ひいては保守コストが変化するため、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。労務単価が高い近年では、保守コストの長期的な削減のためにスラブ軌道等の直結系軌道が選択されることも多い。

このように、軌道構造の設計では保守コストの取り扱いが非常に重要となる。本稿では新設計標準の通達を期に、バラスト軌道を中心とした軌道構造の設計法の変遷

を、軌道変位進みに対する設計を中心に紹介するとともに、今後の方向性について解説する。

2. バラスト軌道の設計方法の変遷

2.1 バラスト軌道の設計の特徴

バラスト軌道はバラスト道床の漸進的な変形とこれに対する保守の繰り返しを前提とした構造物であり、その構造がそのまま保守コストに直結する。

現在日本で用いられている軌道構造の設計法につながる研究開発は、東海道新幹線開業前の1950年代後半から始められた。以下では、バラスト軌道の変形と保守のサイクルの設計上での取り扱いを中心に、バラスト軌道の設計方法の変遷を紹介する。

2.2 軌道破壊理論と最適軌道構造

2.2.1 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1950年代に完成されたものが嚆矢である²⁾。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 Δ 」を定義する。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。

(1) 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およびに相当し、

* 軌道技術研究部 部長

特集：軌道技術

以下の式で算定する。

$$L = \sum_i K_i T_i V_i \quad (1)$$

ただし、 K_i , T_i , V_i ：それぞれ車種 i の車両係数、通過トン数、平均速度

式(1)で、車両係数 K は列車の編成長や車両のばねの条件によって定まる値であり、以下の式で求める。

$$K = \frac{1}{n} \sum_n \frac{1}{1 + \xi \eta} \quad (2)$$

ただし、 n ：列車の車両数（編成長）

ξ ：車両ばねに関する係数。貨車で0.5、電車で0.9

η ：ばね上質量とばね下質量の比。機関車で2.5、電車で5.0

(2) 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、以下の式で表される。

$$M = \frac{P_b \ddot{y} S}{(P_b \ddot{y} S)_{ref}} \quad (3)$$

ただし、 P_b ：まくらぎ下面圧力（道床圧力）

\ddot{y} ：道床振動加速度、 S ：衝撃係数

$(P_b \ddot{y} S)_{ref}$ ：基準軌道構造（後述）における、まくらぎ下面圧力、道床振動加速度および衝撃係数の積

式(3)は、当時行われた試験や測定結果によって、バラスト道床の沈下量は、まくらぎ下面圧力と道床振動加速度との積に比例することが明らかになったことから、導出されたものである。

まくらぎ下面圧力 P_b は、レールを連続支持されたはりとなれば、解析的に求めることができる。

道床振動加速度 \ddot{y} には式(4)の性質がある。

$$\ddot{y} \propto \sqrt{k_1} \times \frac{1}{\sqrt{m}} \quad (4)$$

ただし、 k_1 ：まくらぎ支持ばね係数

m ：まくらぎ支持質量（道床厚さによって定まる定数。）

衝撃係数 S は、継目部等の衝撃的な荷重が発生する箇所と一般部における沈下量の違いを表す係数で、以下の式で求める。

$$S = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{EI_{ref} k_{ref}}{EI k} + 1} \right) \quad (5)$$

ただし、 EI ：レールの剛性

k ：レールの支持ばね係数。

EI_{ref} ：基準軌道のレールの剛性

k_{ref} ：基準軌道のレールの支持ばね係数

なお、これらの式において基準軌道構造は以下のとおりとする。

レール：50kgPS，まくらぎ：木，62cm 間隔，

バラスト：碎石，厚さ 25cm

(3) 状態係数 N

状態係数 N は、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、以下の4つの係数の積で表す。

a) レール係数

レールの経年による沈下量の差を表すもので、敷設直後を1.0とし、経年に応じて1.9までの値をとる。

b) まくらぎ係数

PCまくらぎの場合を1.0とし、木まくらぎの不良率に応じて1.6までの値をとる。

c) 道床係数

土砂混入の無い碎石を1.0としたときにふるい（篩い）砂利を6とし、さらに土砂混入率が高い場合に最大100までの値をとる。

d) 継目係数

ロングレールを1.0とし、レール長（継目発現率）とまくらぎ本数に応じて最大1.63までの値をとる。

軌道破壊理論は、その後に行われた様々な実験や解析によって改良されてきたが^{4), 5)}、ここでは省略する。

2.2.2 最適軌道構造

以上の式からわかるように、軌道破壊係数 Δ は、基準軌道構造に対する軌道破壊（＝バラスト沈下量）の相対的な程度を表すものであり、それ単独では物理的な意味を持たない。しかし軌道構造と必要保守量との関係を比較的容易に算定できるので、軌道構造を決めるための基本的な計算方法として用いられてきた。この理論を用いて算定した、資本費と保守費の和が最小となる「最適軌道構造³⁾」は、国鉄における標準的な軌道構造として広く用いられてきた。

最適軌道構造は、以下の式で求まる年間資本費と保守費の和が最小となるように定める。

$$\text{年間資本費} = \text{投資額} \times \text{利率} + \frac{\text{投資額} - \text{残存額}}{\text{耐用年数}}$$

$$\text{保守費} = \text{人件費} + \text{物件費}$$

年間資本費は、軌道構造が定まれば一律に定まる。人件費は、昭和34年度の国鉄における実績から、以下の式で求める。

$$Y = 0.73 + 0.125 p L M + 0.026 T \quad (6)$$

ただし、 Y ：換算軌道1kmあたり（本線軌道を1.0，準本線軌道を1/3とする）の保守要員数

p ：保守水準を表す係数。1級線を1.0，4級線で0.53とする。

T ：通過トン数 [万トン]

各係数は、昭和34年度末におけるサンプリング調査結果から最小二乗法で定められた。

具体的な、最適軌道構造の例を表1に示す。最適軌道構造は、ライフサイクルコストを最小とする構造設計法として、半世紀前の時点では斬新なものであり、1964年に開通した東海道新幹線の軌道構造決定にも用いられた。

表1 最適軌道構造の例

通トン (万トン)	2000>	1000～ 2000	500～ 1000	200～ 500	<200
レール	50	50	50	37	30
まくらぎ*	PC44	PC39	PC39	木37	木14
道床厚 (cm)	25	25	20	20	15

※まくらぎは25mあたりの本数。ただし通トン200万トン未満の欄は10mあたりの本数。

2.3 速度構造別軌道構造基準規程

最適軌道構造は、国鉄における標準的な軌道構造の決定に用いられてきたが、特急電車の120km/h運転の開始や特急列車網の地方への拡大に伴って、以下のような問題点が生じてきた。

- 1) 最適軌道構造はライフサイクルコストが最小の軌道構造であって、“最低限”の軌道構造ではないこと。
- 2) 最適軌道構造を満たさない線区において、軌道構造が速度向上の制約条件となったこと。
- 3) 検討に用いられている人件費と軌道構造との関係が昭和34年度時点のものであること。

以上の問題点に対し、走行安全性を直接軌道構造の評価に取り入れ、かつ軌道変位進みおよび保守の条件を明示的に取り入れた新しい軌道構造の決定方法が国鉄末期の1986年に提案された⁶⁾。この中では、軌道の沈下に関わる計算は従来どおり軌道破壊理論を用いているが、目標とする軌道整備レベル（高低変位の振幅）および車両の走行安全性を明示的に取り入れ、速度に応じた軌道構造を算定する方法を示したという点で意義深いものである。具体的な設計手順は以下のとおりである。

(1) 速度と軌道整備レベルの関係

まず、車体振動加速度と輪重、横圧の関係を以下の式で表す⁷⁾。

$$P = P_{st} - \Delta P = \frac{1}{2}W - \frac{1}{2} \frac{\xi \zeta}{\eta_v} W \alpha_v \quad (7)$$

$$Q = \frac{\xi \zeta}{\eta_H} W \alpha_H \quad (8)$$

ただし、 P ：輪重 [t]、 P_{st} ：静止輪重 [t]

ΔP ：輪重変動量 [t]、 W ：軸重 [t]

$\xi=2/3$ ：輪重のうち、車体重量の割合

$\zeta=3/4$ ：全振幅と片振幅の比

$\eta_v=2/3$ ：車体重量による輪重変動が、全輪重変動に占める割合

$\eta_H=1/2$ ：車体重量による横圧が、全横圧に占める割合

α_v ：車体上下振動加速度全振幅 [g]

α_H ：車体左右振動加速度全振幅 [g]

両式の比で脱線係数が算定でき、これが0.8となる時の上下振動加速度と左右振動加速度の関係は式(9)で算定できる。

$$\alpha_H + 0.3\alpha_v = 0.4 \quad (9)$$

次に、車体上下振動加速度と軌道状態（500mロットP値）との関係は、1970年代後半における実態調査結果から、式(10)で求められる。

$$\log \alpha_v = aP_K + b \log V_{\max} + c \quad (10)$$

ただし、 P_K ：500mロットP値（高低変位が3mmを超過する割合を百分率で表した値。）

V_{\max} ：区間最高速度 [km/h]、

a, b, c ：回帰係数

なお、式(10)の予測誤差の標準偏差は、0.795である。

ここで、 α_v, α_H の限度値を、式(9)を満足するようにそれぞれ0.375g、0.30gとすると、式(10)から速度およびばらつきを考慮した P_K の限度値が求められる。

(2) 保守量、軌道破壊量と軌道構造の関係

これらの関係については、1970年代後半における実態調査結果から、以下の式で表される⁸⁾。

$$S = 2.1 \times 10^{-3} \cdot T^{0.35} \cdot V \cdot M \cdot B \cdot R \quad (11)$$

ただし、 S ：高低変位進み [mm/100日]

T ：通過トン数 [百万トン/年]

V ：区間平均速度 [km/h]

E ：継目係数（ロングレール化率により1.0～1.6の値をとる。）

B ：路盤係数（路盤の状態により1.0～1.8の値をとる。）

次に、保線支区の平均P値 \bar{P}_K とつき固め率 A との関係は、実態調査結果から以下の式で表される⁹⁾。

$$A/S = 2.55 - 0.51\bar{P}_K \quad \text{ただし } 10 \leq \bar{P}_K \leq 35 \quad (12-1)$$

$$\bar{P}_K = 31.6 + 31.7 \log S/A \quad \text{ただし } \bar{P}_K > 35 \quad (12-2)$$

以上の式から、列車速度 V 、通過トン数 T および年間保守投入量（つき固め率） A が定めれば、軌道構造係数 M 、すなわち軌道構造を定めることができる。算定にあたっては式(10)や式(12-1),(12-2)の回帰式が持つばらつきを考慮することもできる。このようにして算定された

表2 保守上最低限の軌道構造の例

通トン (万トン)	2000>		1000～2000	
平均速度 (km/h)	85	75	85	75
レール種類	50N	50N	50N	50N
まくらぎ本数 (25mあたり)	PC37	木44	木41	木39
道床厚 (cm)	25	20	25	20

特集：軌道技術

最低限の軌道構造の例を表2に示す。表1と比較すると、より経済的な軌道構造が認められるのがわかる。

2.4 有道床軌道設計標準（案）の制定

1997年に制定された鉄道構造物等設計標準【有道床軌道】（案）^{10）}（以下「設計標準（案）」という。）は、軌道変位進みを直接照査指標とした初めての設計法である。この設計標準（案）と、構造係数に基づいて軌道構造を決定する軌道破壊理論との違いを以下に述べる。

(1) 具体的な作用を算定している。

軌道破壊理論では、作用は荷重係数で間接的に算定していたが、設計標準（案）では、車両からレールに作用する輪重・横圧を直接算定する^{11）}。この輪重・横圧算定法では、解析的に算定できる定常成分の他、変動成分については実測値から得られた経験式を用いており、軌道破壊理論で用いられている車両係数（式(2)）と比較すると、車両形式、速度、通過トン数を直接考慮できるものとなっている。なお、この輪重・横圧算定法は、2000年に発生した営団地下鉄（当時）日比谷線中目黒駅構内脱線衝突事故の後に、事故対策としての脱線防止ガードの要否の判定にも用いられている^{12）}。

(2) 軌道変位進みを明示的に算定している。

軌道破壊理論では、軌道変位進みは基準軌道構造に対する相対的な比率で算定していたが、設計標準（案）では、模型軌道を用いた道床バラストの载荷試験^{13）}をもとに、輪重・横圧の大きさおよびその通過軸数とバラストの変形量との関係を定量化している。式(13)に、具体的なバラスト沈下量算定式を示す（図1）。

$$\beta = a(P_b - b)^2 j \quad (13)$$

ただし、 β ：1軸载荷あたりのバラスト沈下量 [mm]

a, b ：バラスト厚さに応じて定まる係数

また、保守期間におけるバラストの沈下量を、軌道変位の標準偏差の6倍とすることで、式(13)で求まるバラスト沈下量と軌道変位とを関係づけている（図2）。

(3) 保守投入可能量に応じた軌道構造を算定している。

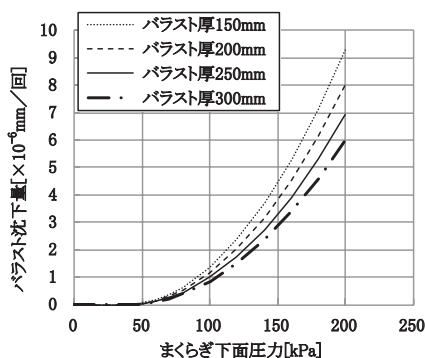


図1 まくらぎ下面圧力とバラスト沈下量の関係

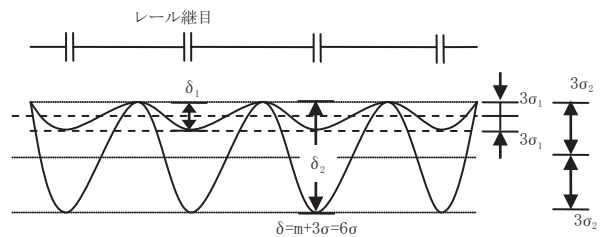


図2 バラスト沈下量と軌道変位の関係

以上の特徴により、軌道構造、列車荷重と軌道変位進みとの関係が明確となり、事業者が軌道保守を投入できる数量を制約条件として、要求される軌道状態を維持するために必要な軌道構造の算定が可能となった。

軌道破壊理論では様々な係数を設定し、設計業務の簡素化が図られていた。この中には物理的な意味が必ずしも明確ではないものもあるが、設計標準（案）では、列車荷重の算定から軌道変位進みの照査までが、実際の軌道変位の推移に即した形で行われており、個々の手順の物理的な意味が明確で、発展性の高い設計法といえる。

2.5 新設計標準におけるバラスト軌道の設計

2011年12月に通達された新設計標準^{1）}は、性能照査型設計の観点から、設計の手順を改めて体系化したものである。新設計標準では、基本的な設計の考え方は設計標準（案）に則りつつ、限界状態設計法の導入により、設計応答値、設計限界値およびこれらの具体的な算出方法を定めた点が特徴となっている。

新設計標準における、軌道変位進みに対する性能照査の設計の概念図を図3に示す。車両の走行安全性から定まる軌道変位の許容最大値を限界値とし、これを軌道部材係数で除して設計限界値を求める。また軌道構造と作用から定まる、保守投入直前の軌道変位を応答値とし、これに構造解析係数を乗じて設計応答値とする。保守周期は設計条件としてあらかじめ定めておく。軌道変位進み量の算定法は、工学的な妥当性が確認されたものであれば良く、例えば式(3)や式(13)を応用しても良い。ただし、算定法によって算定精度が異なるので、構造解析係数を適切に設定して精度の違いを補正する。

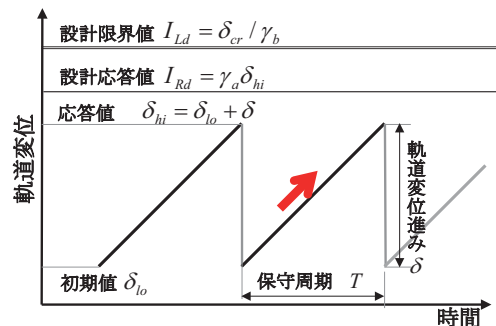


図3 新設計標準における軌道変位照査の概念

3. 直結系軌道の設計方法の変遷

3.1 直結系軌道開発の経緯

前章で述べたように、バラスト軌道は定期的な保守を前提とした構造体であり、ライフサイクルコストを考慮した設計が不可欠となる。一方、つき固め等の保守を不要とするコンクリート直結軌道は、保守の省力化のために古くから望まれていた。しかし、労務単価が安い時代には、建設費を含めたライフサイクルコストはバラスト軌道の方が有利であったため、トンネル内等の一部区間を除いて直結系軌道が普及することはなかった。その後、東海道新幹線開業後におけるバラスト軌道保守の経験、および高度経済成長による人件費の高騰によって、全国新幹線網の軌道構造には直結系軌道が改めて望まれるようになった。このため、1965年、国鉄内に「新軌道構造研究会」が設置され、以下の条件を満たす直結系軌道の開発が進められた。

- 1) 建設費をバラスト軌道の2倍以内とすること。
- 2) バラスト軌道と同程度の弾性をもたせつつ、十分な強度を有すること。
- 3) 施工速度が200m/日以上で、かつ比較的容易であること。
- 4) 下部構造の変状による軌道変位を修正できること。

この結果、プレキャストコンクリートスラブをCAモルタルで全面支持するスラブ軌道の優位性が確認されたため、山陽新幹線の新大阪～岡山間に16km試験敷設された後、岡山～博多間延伸時に全面的に採用された。スラブ軌道は、当初高架橋やトンネル内など、構造物の変状が小さい区間を中心に敷設されてきたが、路盤設計法の発展により、土構造物上においてもスラブ軌道が敷設されるようになった¹⁴⁾。さらに、コンクリート数量を減らし、施工費を下げるために枠型スラブが開発され、現在に至っている。

一方、スラブ軌道は軌道表面が平滑なコンクリート面であるため、供用当初より軌道面からの反射音が問題となってきた。また、CAモルタル層により一定の弾性を付与しているものの、バラスト軌道と比較すると振動が大きいという問題もあった。これらの背景から、スラブ軌道よりも環境に優しい弾性まくらぎを用いたまくらぎ直結軌道が開発された。弾性まくらぎ直結軌道には、まくらぎの形状、弾性の付与方法、保守性等によっていくつかのタイプがあり、在来線の連続立体高架区間などを中心に導入されている。

3.2 スラブ軌道の設計法

3.2.1 許容応力度法による軌道スラブの設計

導入当初の軌道スラブは、当時のコンクリート構造物と同様に許容応力度法により設計されている¹⁵⁾。

軌道スラブの外力モーメントは弾性床上の版として、FEM等で算定する(図4)¹⁶⁾。レールは棒材であるので

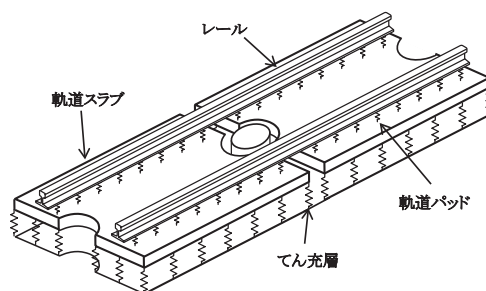


図4 軌道スラブの応力解析のための静力学モデル

はりとしてモデル化し、締結装置毎に線形ばねで軌道スラブと接続する。てん充層(一般にCAモルタルが用いられる)も線形ばねでモデル化する。

3.2.2 新設計標準による軌道スラブの設計

新設計標準は、性能照査型設計法を取り入れている。軌道スラブの設計では、たとえば表3、4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についても、同様に要求性能と照査指標を定めて照査する。

表3 軌道スラブの製作・施工時の照査指標

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	安全性	破壊	せん断力
保持部			

表4 軌道スラブの列車荷重載荷時の照査指標

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

4. 今後の展望

4.1 バラスト軌道の設計法の今後

今後の少子高齢化に伴う労働力不足や、住宅密集地における夜間保守作業が住環境に与える影響を考慮すると、今後は特殊な区間を除いて、バラスト軌道の新設は稀になると考えられる。一方で既設バラスト軌道の直結軌道化は、作業間合いの確保が困難な大都市近郊区間を中心に進められているものの、既設のバラスト軌道のほとんどは、今後もバラスト軌道として維持されることになる。

このような背景の中、バラスト軌道に関する今後の研究開発の動向として以下の2つが挙げられる。

①バラスト層の沈下に関する研究

冒頭から述べてきたように、バラスト層の沈下のモデル化は、古くて新しい課題である。バラストは碎石の集合体というシンプルな素材であるにもかかわらず、その

特集：軌道技術

挙動のモデル化は極めて難しい。

従来は、バラスト沈下のモデル化は実物大試験に基づくものが大半であったが、近年ではバラスト沈下の数値シミュレーションモデルの開発が進められている。このモデル化手法には、バラスト一つ一つを粒状体¹⁷⁾として扱う方法と有限要素解析¹⁸⁾による方法がある。いずれの方法とも、バラストの沈下＝残留変位の表現法がモデル化のポイントとなる。また、バラストの沈下はそれだけでは軌道変位とはならず、地点毎の沈下量の差こそが軌道変位管理上重要となる。これについては、輪重のばらつきが沈下量のばらつきとなることはわかっているものの¹⁹⁾、その定量化はほとんど行われていない。

両者を組み合わせ、軌道変位の経時変化をより精度良く推定できるようになれば、バラスト軌道の設計や保守コストの削減に大きく寄与するものと考えられる。

②バラスト軌道の構造に関する研究

バラスト軌道の設計に関わる最近の動向として、まくらぎ本数の減少が挙げられる。これは、主として木まくらぎのPCまくらぎ化を低コストで行うことを目的に進められているもので、主な技術開発項目は以下のとおりである。

- ・ まくらぎ本数を大幅に減らした場合のメンテナンスコストの評価
- ・ 道床横抵抗力の確保を考慮した低廉化PCまくらぎ
- ・ まくらぎ間隔の拡大に対応したレール締結装置

4.2 直結系軌道の設計法の今後

スラブ軌道が山陽新幹線に初めて大量敷設されてからすでに40年近くが経過し、メンテナンスレスを指向したスラブ軌道にも、保守の必要性が迫っている。特に、海底下にある新関門トンネルでは、塩害による軌道スラブ、CAモルタルの劣化を受け、一部では交換工事も進められている^{20), 21)}。本件に関わる今後の技術開発項目には、例えば以下のものが考えられる。

- ・ 取替用軌道スラブの開発
- ・ 突起代替構造の開発
- ・ 軌道スラブ取替機械の開発
- ・ 取替用CAモルタルの開発

5. おわりに

我が国には軟弱地盤で構造物の変状が生じやすい箇所が多く、また地震国であるため大規模地震後の残留軌道変位が避けられないことから、直結系軌道であっても、軌道変位の整正、軌道部材の交換あるいは軌道構造自身の交換が容易な構造とするのが望ましい。すなわち「極力メンテナンスを少なく、しかしいざという場合にメンテナンスが容易な構造」という相反する性能が、軌道に

は求められる。今後もこの両者を両立する新たな技術開発を行っていく所存であるが、設計標準の性能照査型設計への移行がその普及に寄与するものと考えている。

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) 星野陽一，佐藤裕：軌道構造の動力学的設計，鉄道技術研究報告，No.149，1960
- 3) 佐藤裕：軌道力学，鉄道現業社，1972
- 4) 佐藤吉彦：新軌道破壊理論の構成，鉄道技術研究所速報，No.77-47，1977
- 5) 尾高達男，佐藤吉彦：軌道破壊理論（Ⅲ）の提案と車両条件の影響の検討，第40回土木学会年次学術講演会，1985
- 6) 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
- 7) 佐藤吉彦，三浦重：走行安全性ならびに乗心地を考慮した線路構造物の折れ角限度，鉄道技術研究報告，No.820，1972
- 8) 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
- 9) 杉山徳平，宮井徹，吉見一彦，細川岳洋：保線6支区における軌道破壊量と軌道保守量の実態調査，鉄道技術研究所速報，No.79-120，1979
- 10) 運輸省監修：鉄道構造物等設計標準・同解説【有道床軌道】（案），1997
- 11) 内田雅夫，小倉英章：曲線通過時の列車荷重の一般化に関する検討，鉄道総研報告，vol.6. No.11，1992
- 12) 事故調査検討会：帝都高速度交通営団日比谷線中目黒駅構内列車脱線衝突事故に関する調査報告書，2000
- 13) 石川達也，名村明：実物大試験による道床バラスト部変形特性の検討，土木学会論文集，vol.512，1995
- 14) 運輸省監修：鉄道構造物等設計標準・同解説【省力化軌道用土構造物】，1999
- 15) 日本国有鉄道：A型軌道スラブ設計要領，1983
- 16) 西頭常彦：コンクリートスラブ式直結軌道の構造解析とその設計に関する研究，鉄道技術研究報告，No.1047，1977
- 17) 相川明，浦川文寛：三次元個別要素法によるバラスト軌道の動的応答解析，鉄道総研報告，vol.23. No.2，2009
- 18) 関根悦夫，石川達也：累積損傷度理論によるバラスト軌道の沈下予測手法，鉄道総研報告，vol.21. No.6，2007
- 19) 古川敦，山崎雅仁，桶谷栄一：バラスト軌道における軌道変位進みの照査方法，鉄道総研報告，vol.22. No.8，2008
- 20) 赤野和宏，山下靖二，安藤勝敏：新関門トンネル内軌道スラブの塩害対策，土木学会第50回年次学術講演会4-315，1995
- 21) 柳谷勝，高山宜久，辻崇：山陽新幹線における軌道スラブ交換工事について，土木学会第60回年次学術講演会4-89，2005