

論文 軌道条件が橋りょう境界の 不同変位の限界値に与える影響評価

箕浦 慎太郎¹・池田 学²・徳永 宗正³

¹正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: minoura.shintaro.51@rtri.or.jp (Corresponding Author)

²正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: ikeda.manabu.14@rtri.or.jp

³正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: tokunaga.munemasa.68@rtri.or.jp.

鉄道構造物等設計標準・同解説(変位制限)では、常時及び地震時における軌道の損傷に関する復旧性に関して、軌道面の不同変位(角折れ・目違い)の限界値の目安が提示されており、実際の設計ではこれらの値を使用することが多い。しかしながら、現在では多様な軌道構造や締結装置が使用されており、実際の条件は変位制限で示されている復旧性の限界値の目安の前提である締結間隔や支持剛性とは異なるケースも多い。また、設計時に適切な軌道構造条件を選択することにより、復旧性の限界値を緩和できる可能性がある。そこで本研究では、現状の復旧性の限界値の目安に対して支配的となる軌道構造条件を整理し、軌道の支持剛性や締結間隔などの各種パラメータが、復旧性の限界値へ与える影響を評価した。

Key Words: design standard, uneven displacement, recoverability, angular rotation, misalignment

1. はじめに

鉄道構造物を設計する際の指針の一つである鉄道構造物等設計標準・同解説(変位制限)¹⁾(以下、変位標準²⁾)では、軌道の損傷に関する復旧性についての照査を行うこととなっている。復旧性とは、想定される作用のもと構造物の機能を使用可能あるいは短期間で回復可能な状態にとどめるために求められる性能である。変位標準では、常時及び地震時において、構造物の変形により軌道パッド、ばね、タイプレート等の締結装置に作用する力(レール圧力)と、レールに作用する応力(レール応力)を一定の値以下とすることで、軌道部材の復旧性を確保する。

図-1 に構造物境界に生じる不同変位(角折れ・目違い)を示す。復旧性に関して、変位標準では軌道面の不同変位(角折れ・目違い)の限界値の目安が提示されており、実際の設計ではこの目安をそのまま使用することが多い。しかしながら、ここで示されている限界値は、特定の支持剛性及び締結間隔の条件を仮定した値である一方で、現在では様々な軌道構造や締結装置が使用されていることから、復旧性の限界値の目安の前提となっている締結間隔や支持剛性とは異なる条件で建設されるケースも多く、この目安が現在の軌道構造条件に適応しているかを

確認する必要がある。また、設計時に適切な軌道構造条件を選択することにより、復旧性の限界値を緩和でき、より合理的な設計が可能となる可能性がある。

そこで本研究では、まず現状の限界値の目安に対して支配的となる軌道構造条件と、各限界値の算出方法を整理した上で、締結間隔や軌道の鉛直方向の支持剛性(鉛直支持ばね定数)といったパラメータが、復旧性の限界値へ与える影響を評価した。さらに、今後の設計への対応のために、実際に使用されている軌道構造条件を想定した限界値の目安を提示した。

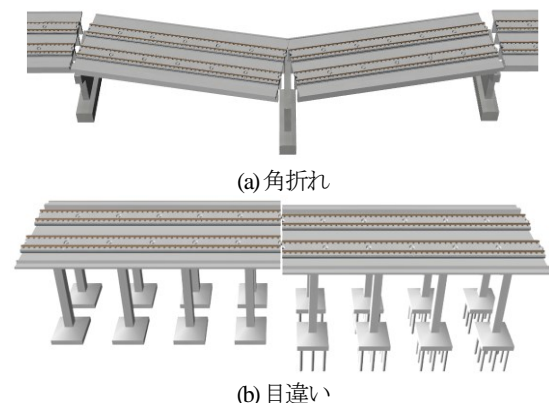


図-1 構造物境界に生じる不同変位のイメージ¹⁾

2. 軌道の損傷に関する復旧性の照査の考え方

現行の変位標準においては、復旧性の照査では、角折れ及び目違いによりレール及び締結装置が常時において損傷しないように照査を行うこととなっている。具体的には、軌道強度上・保守上の限度値には、第一限度値(作用と所要強度から見て特に問題はない値)、第二限度値(注意を要する値)、第三限度(許容されない値)の3段階があるが、復旧性の照査では角折れ及び目違いによってレールに発生する応力(レール応力)と、軌道パッド、ばね、タイプレート等の締結装置に作用するレール圧力を求め、それらの値が常時に対しては第二限度値に示される値を超えないように照査を行う¹⁾。なお地震時の軌道の損傷に係る変位の照査においては第三限度値を用いてもよいこととなっている。

表-1にレール応力とレール圧力の第二限度値及び第三限度値を示す。この限度値は、以下のような考え方に基づいて算出されている。

レール応力については、レール曲げ応力の限度(200N/mm²)からロングレールの温度応力による負担分(100N/mm²)と列車荷重によって生ずる応力(50N/mm²)を差し引いた値(50N/mm²)を第一限度とし、この値を2倍したものを第二限度、3倍したものを第三限度としている²⁾。

鉛直方向のレール圧力については、締結装置の初期締結力(6kN)に着目し、構造物境界部から2つ目の締結装置(第二締結)あるいは3つ目の締結装置(第三締結)がこの値に達して締結力を喪失する条件を第二限度としている²⁾。そのため鉛直方向のレール圧力の照査は締結装置が引き抜かれる方向のみに対して行う。なお、第一締結についてはこの限度値で設計すると過剰に厳しい値となるため除外している。また、地震時(第三限度)については第三締結が締結力を喪失する状態を想定している。鉛直方向の照査は、後述する弾性支持モデルを使用して算出する。

水平方向のレール圧力については、直結4型締結装置、直結5型締結装置及びその改良型である直結8型締結装置を想定して限度値を設定している。直結4型締結装置に対しては、締結装置のばねに作用する荷重に着目している。ここでは、作用荷重が設計荷重より平均で25%増加すると耐用年数は1/2.5になり、荷重が50%増加すると耐用年数は1/5に減少するとし、この耐用年数が1/5になるときの荷重増分(設計荷重の50%)を第二限度としている²⁾。具体的には、横圧の設計荷重64kNに荷重分散係数0.5を考慮して、水平方向のレール圧力の第二限度を64kN×0.5(分散係数)×0.5=16kNとしている。また、第三限度を第二限度の2倍である32kNとしている。直結4型締結装置についての照査では、後述する弾性支持モデルを使用する。直結5型及び直結8型締結装置に対する水平方向のレール圧力については、タイプレートに作用す

る荷重に着目している。直結5型及び直結8型締結装置では、タイプレートが64kNで軌道スラブ上を移動する設計となっていることから、この時の値を第三限度とし、第二限度はその値の1/2をとって32kNとしている。また、タイプレートとレールの間には1mm程度の隙間があるため、限界値の算出に当たっては計算値に1mmをプラスした値を限界値としている。タイプレートが移動するまでは、桁、タイプレート、レールそれぞれの間には相対変位は生じないと仮定し、ここでの照査では後述する等間隔固定支持モデルを使用する。

なお、本検討では軌道部材の限度値は変位標準に合わせて設定したが、この設定についても見直す余地がある。

3. 復旧性の限界値の目安の算出方法

変位標準では、付属資料として復旧性の限界値の目安の算出方法が記載されているが、具体的な計算過程や用いられた値は省略されている。本章ではまず、鉛直・水平方向それぞれの角折れ・目違いに対する限界値の目安の算出方法を整理した。

(1) 鉛直方向の角折れによる軌道の応答値

図-2に弾性支持モデルでの角折れによるレール変形のモデル化を示す。鉛直方向の角折れによる応答値の算出では、弾性支持モデルにより算出する。弾性支持されたレールが曲げ変形を受ける際の力のつり合い式は、以下に示す4階の微分方程式で表される。

$$EI d^4y/dx^4 + ky = 0 \tag{1}$$

$$\text{境界条件: } x = 0, y' = -\theta/2, y''' = 0$$

$$x = \infty, y = 0$$

ただし、 EI :レール曲げ剛性、 y :レール鉛直変位、 k :単位長さ当たりのレールの支持ばね定数である。

ここで、 $y = e^{\beta x}$ 、 $\beta = \sqrt[4]{(k/4EI)}$ とすると、

表-1 レール応力とレール圧力の限度値

照査項目		第二限度値	第三限度値
鉛直	レール応力	100 N/mm ²	150 N/mm ²
	レール圧力 (スラブ)	6 kN	6 kN
水平	レール応力	100 N/mm ²	150 N/mm ²
	レール圧力 (弾性支持)	16 kN	32 kN
	レール圧力 (等間隔固定支持)	32 kN	64 kN

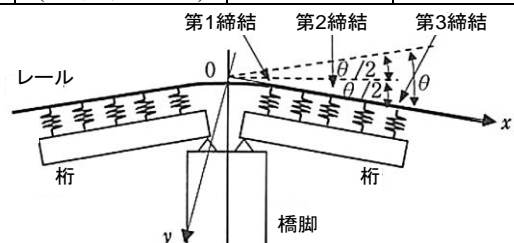


図-2 弾性支持モデルによる角折れのモデル化¹⁾

$$\lambda^4 + 4\beta^4 = 0 \quad (2)$$

$$\lambda = \pm(1+i)\beta \quad (3)$$

となり, この微分方程式の一般解は以下のようになる.

$$y = e^{-\beta x}(A_1 \sin \beta x + A_2 \cos \beta x) + e^{\beta x}(A_3 \sin \beta x + A_4 \cos \beta x) \quad (4)$$

ただし, A_1, A_2, A_3, A_4 : 係数. 境界条件より, $A_1 = -\theta/4\beta, A_2 = \theta/4\beta, A_3 = A_4 = 0$ となるので,

$$y = \frac{\theta}{4\beta} \phi_3(\beta x) \quad (5)$$

ただし, $\phi_3(\beta x) = e^{-\beta x}(\cos \beta x - \sin \beta x)$.

よって, 第一締結, 第二締結, 第三締結でのレール圧力は,

$$P_1 = \int_0^a ky dx = \frac{k\theta}{4\beta^2} \{\phi_2(\beta a) - \phi_2(0)\} \quad (6)$$

$$P_2 = \int_a^{2a} ky dx = \frac{k\theta}{4\beta^2} \{\phi_2(2\beta a) - \phi_2(\beta a)\} \quad (7)$$

$$P_3 = \int_{2a}^{3a} ky dx = \frac{k\theta}{4\beta^2} \{\phi_2(3\beta a) - \phi_2(2\beta a)\} \quad (8)$$

ただし, P_2 : 第二締結のレール圧力, P_3 : 第三締結のレール圧力, a : 締結間隔, $\phi_2(\beta x) = e^{-\beta x} \sin \beta x$.

また, レール曲げモーメントは $x=0$ のとき最大となることから, レール応力の最大値は,

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{D} = -\frac{EIy''(0)}{D} = EI \frac{\theta\beta}{2D} \quad (9)$$

ただし, D : レールの断面係数.

(2) 水平方向の角折れによる軌道の応答値

図-3に等間隔固定支持モデルでの角折れによるレール変形のモデル化を示す. 水平方向では直結4型締結装置を想定した弾性支持モデルに加えて, 直結5型締結装置及び直結8型締結装置を想定した等間隔固定支持モデルを使用して応答値を算出する. 弾性支持モデルによる応答値の算出方法は, レール曲げ剛性, ばね定数, 断面係数の値が異なる以外は鉛直方向と同じである. 等間隔固定支持モデルにおいて, レールが曲げ変形を受ける際の力のつり合い式は, 以下の4階の微分方程式で表される.

$$EI d^4y/dx^4 = 0 \quad (10)$$

これを図-3に示すように締結間隔ごとに区間分けすると, 一般解は以下の通りとなる.

$$y_1 = A_1 + A_2x_1 + A_3x_1^2 + A_4x_1^3 \quad (11)$$

$$y_2 = A_5 + A_6x_2 + A_7x_2^2 + A_8x_2^3 \quad (12)$$

境界条件 : $x_1 = 0, y_1' = -\theta/2, y_1''' = 0$

$x_1 = a/2, y_1 = 0, y_1' = y_2', y_1'' = y_2''$

$x_2 = 0, y_2 = 0, y_2' = y_1', y_2'' = y_1''$

$x_2 = a, y_2 = 0, y_2' = 0$

ここで, y_1 : 区間1のレールの水平方向変位, y_2 : 区間2のレールの水平方向変位, $A_1 \sim A_8$: 係数である. 境界条件より, レールの変位は,

$$y_1 = \frac{a\theta}{6} - \frac{\theta}{2}x_1 + \frac{\theta}{3a}x_1^2 \quad (13)$$

$$y_2 = -\frac{\theta}{6}x_2 + \frac{\theta}{3a}x_2^2 - \frac{\theta}{6a^2}x_2^3 \quad (14)$$

また, 締結装置の位置でのレール圧力は,

$$P_2 = -EIy_2''' = EI \frac{\theta}{a^2} \quad (15)$$

$$P_1 = -P_2 = -EI \frac{\theta}{a^2} \quad (16)$$

レール応力の最大値は,

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{D} = \frac{-EIy_1''(0)}{D} = -\frac{2}{3}EI \frac{\theta}{aD} \quad (17)$$

(3) 鉛直方向の目違いによる軌道の応答値

図-4に弾性支持モデルでの目違いによるレール変形のモデル化を示す. 弾性支持されたレールが図-4に示す曲げ変形を受ける際の力のつり合い式は, 以下に示す4階の微分方程式で表される.

$$EI d^4y/dx^4 + ky = 0 \quad (18)$$

境界条件 : $x = 0, y = h/2, y'' = 0$

$x = \infty, y = 0$

ただし, h : 目違い量.

角折れの場合と同様に, $\beta = \sqrt[4]{k/4EI}$ とおくと, レール変位量は境界条件より以下の通りとなる.

$$y = \frac{h}{2}e^{-\beta x} \cos \beta x = \frac{h}{2} \phi_4(\beta a) \quad (19)$$

ただし $\phi_4(\beta x) = e^{-\beta x} \cos \beta x$. また, 締結装置のレール圧力は,

$$P_1 = \int_0^a ky dx = -\frac{kh}{4\beta} \{\phi_3(\beta a) - \phi_3(0)\} \quad (20)$$

$$P_2 = \int_a^{2a} ky dx = -\frac{kh}{4\beta} \{\phi_3(2\beta a) - \phi_3(\beta a)\} \quad (21)$$

$$P_3 = \int_{2a}^{3a} ky dx = -\frac{kh}{4\beta} \{\phi_3(3\beta a) - \phi_3(2\beta a)\} \quad (22)$$

レールのせん断力が0となる時, すなわち $y''' = 0$ のときに曲げモーメントが最大となり, そのときの x は $x = \pi/4\beta$ である. よって, レール応力の最大値は,

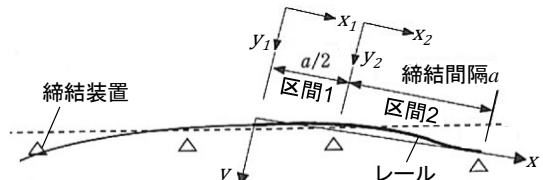


図-3 等間隔固定支持モデルによる水平角折れのモデル化¹⁾

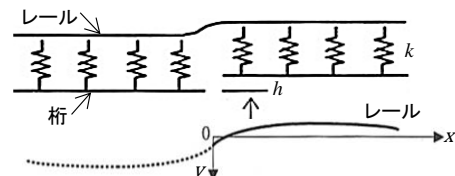


図-4 弾性支持モデルによる鉛直目違いのモデル化¹⁾

$$\begin{aligned} \sigma_{max} &= \frac{M_{max}}{D} = -\frac{EIy''}{D} \left(\frac{\pi}{4\beta}\right) \\ &= -\frac{\sqrt{2}e^{-\frac{\pi}{4}}}{2D} EIh\beta^2 \\ &\doteq -\frac{0.32}{D} EIh\beta^2 \end{aligned} \quad (23)$$

(4) 水平方向の目違いによる軌道の応答値

図-5に等間隔固定支持モデルでの目違いによるレール変形のモデル化を示す。目違いにおいても角折れと同様に、水平方向では弾性支持モデルのほかにも等間隔固定支持モデルを使用して応答値を算出する。角折れと同様に、力のつり合い式は式(10)、一般解は式(11)及び式(12)となる。また、境界条件は以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} x_1 = 0, y_1' = 0, y_1'' = 0 \\ x_1 = a/2, y_1 = \delta = h/2, y_1' = y_2', y_1'' = y_2'' \\ x_2 = 0, y_2 = \delta = h/2, y_2' = y_1', y_2'' = y_1'' \\ x_2 = a, y_2 = \delta = h/2, y_2' = 0 \end{aligned}$$

この境界条件からA₁～A₈を求めることにより、レール変位は以下の通りとなる。

$$y_1 = \frac{6h}{5a}x_1 - \frac{4h}{5a^3}x_1^3 \quad (0 \leq x_1 \leq a/2) \quad (24)$$

$$y_2 = \frac{h}{2} + \frac{3h}{5a}x_2 - \frac{6h}{5a^2}x_2^2 + \frac{3h}{5a^3}x_2^3 \quad (x_2 \geq 0) \quad (25)$$

ただし、h=2δ。また、締結位置でのレール圧力は、

$$P_2 = -EIy_2''' = -\frac{18}{5}EI\frac{h}{a^3} \quad (26)$$

$$P_1 = -EIy_1''' - P_2 = \frac{42}{5}EI\frac{h}{a^3} \quad (27)$$

レール曲げモーメントは式(24)及び式(25)を2階微分することにより求められ、その値はx₁ = a/2 (x₂ = 0)のとき最大となる。よって、レール応力の最大値は、

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{D} = \frac{-EIy_1''}{D} \left(\frac{a}{2}\right) = \frac{12}{5}EI\frac{h}{a^2D} \quad (28)$$

4. 各種パラメータが限界値へ与える影響の評価

現行の変位標準では、復旧性の限界値の目安が示されているが、具体的な計算例が示されているのは一部であり、また算出に用いた各パラメータもすべてが明確に示されているわけではない。また、締結間隔や支持ばね定数についても、特定のケースのみに対する限界値を示しており、締結間隔や支持ばね定数といったパラメータが限界値に与える影響については示されていない。そこで本章では、3章で示した応答値の算出方法に対し、スラブ軌道、50Nレール及び60kgレールを基本ケースとし、締結間隔、支持ばね定数、レール応力の限界値、レール圧力の限界値をパラメータとして、各パラメータが角折れ、目違いの限界値に与える影響について検討した。

(1) 検討方法

表-2及び表-3に応答値の算出の際に用いた各種諸元を示す。レール諸元については日本製鉄(株)のレールのカタログ^{注1)}を、道床諸元については変位標準¹⁾を参考にした。レールの断面係数については、安全側の評価となるように鉛直方向についてはレール頭部、水平方向についてはレール底部の値を用いた。本研究では、表-3に示す変位標準記載のスラブ軌道の諸元を基本とし、50Nレール及び60kgレールに対して締結間隔及び鉛直支持ばね定数の影響を評価した。具体的には、締結間隔を300mm～1100mmの範囲で20mm刻みで変化させた際の限界値を算出した。また鉛直支持ばね定数については、5N/mm/mm～200N/mm/mmの範囲で5N/mm/mm刻みで変化させた際の限界値を算出した。2章で述べた通り、直結5型及び直結8型締結装置は水平方向の荷重をタイプレートで受ける構造となっており、等間隔固定支持モデルによる検討が妥当であると考えられる。そのため、弾性支持モデルで使用する単位長さあたりの水平ばね定数には、直結4型のものを使用した。なお、締結間隔については、現行の変位標準ではスラブ軌道の場合625mmを基本としているが、近年設計された事例としては、整備新幹線において締結間隔750mmに拡大した軌道スラブが使用されている³⁾。また、既往の研究では端部締結間隔を900mmまで拡大可能であるという検討結果が得られている³⁾⁴⁾。支持ばね定数については、変位標準では軌道パッドばね定数が60MN/m(直結4型)のものを基準としているが、地盤振動及び騒音低減を目的として、20MN/mと基準の1/3程度の低ばね定数の軌道パッドが

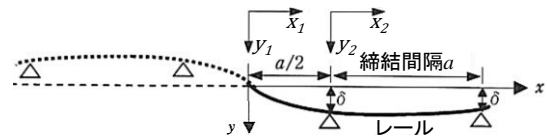


図-5 等間隔支持モデルによる水平目違いのモデル化¹⁾

表-2 レール諸元 エラー! 参照元が見つかりません。

レール種別	50N	60kg
ヤング率 E (N/mm ²)	200000	200000
断面二次モーメント I _x (mm ⁴)	19600000	30830000
断面二次モーメント I _y (mm ⁴)	3340000	5120000
鉛直方向の曲げに対する断面係数 D _x (mm ³)(レール頭部)	242000	321000
水平方向の曲げに対する断面係数 D _y (mm ³)(レール底部)	52500	70700

表-3 道床諸元¹⁾

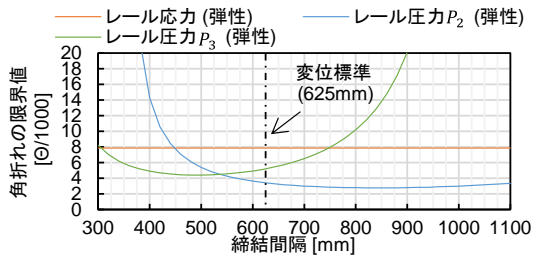
道床種別	スラブ	
単位長さあたりのばね定数 k (kN/mm/mm)	鉛直	96
	水平	32
β	鉛直	0.0015
	水平	0.0019
締結間隔 a (mm)	625	

使用されたケースが報告されている³⁾⁹⁾。

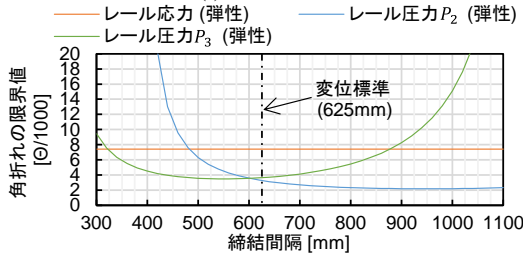
(2) 検討結果

a) 締結間隔の影響

図-6に常時における鉛直方向角折れに対する締結間隔の影響を、図-7に鉛直方向目違いに対する締結間隔の影響を示す。図では、レール応力の限度値及び各締結装置のレール圧力の限度値から求まる角折れ・目違いの限界値を示しており、それぞれの締結間隔に対してレール応力またはレール圧力(常時の鉛直方向は P_2 、 P_3 、地震時の鉛直方向は P_3 のみ)から求まる最も小さい限界値がその締結間隔での限界値となる。また、図中には、変位標準に記載の限界値の算出の際に使用された締結間隔(625mm)も併せて示す。なお、図中で角折れの限界値が常に20mrad以上もしくは目違いの限界値が常に12mm以上のものは省略した。図より、鉛直方向の角折れ及び目違いに対しては、第2締結または第3締結でのレール圧

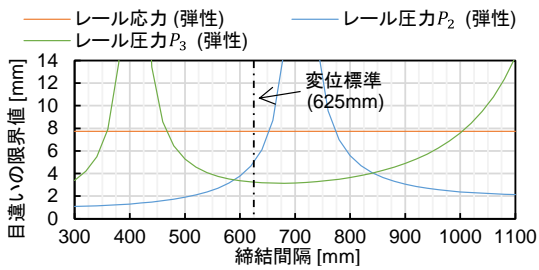


(a) 50N レール

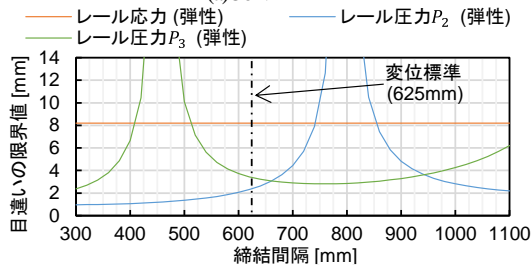


(b) 60kg レール

図-6 鉛直角折れに対する締結間隔の影響(常時)



(a) 50N レール

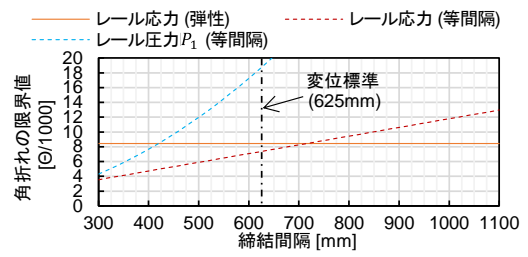


(b) 60kg レール

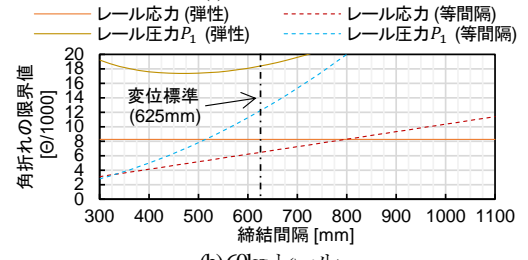
図-7 鉛直目違いに対する締結間隔の影響(常時)

力により限界値が決まることがわかった。角折れに対しては、締結間隔を拡大すると限界値が減少する傾向にあるが、目違いに対しては締結間隔の拡大により限界値を増加させることが可能であった。変位標準に記載の条件から本研究で算出した値と比較して、50N レールでは締結間隔 840mm 付近で約 1mm、60kg レールでは締結間隔 940mm 付近で約 1mm 限界値が増加した。なお、各図ではレール圧力の限界値が無限大に発散しているような箇所がみられるが、これは締結間隔を変化させたことで各締結装置の位置が変化し、それにより締結装置によっては鉛直上向きの荷重がほとんど作用せず、前後の締結装置で鉛直上向きの荷重を負担するような条件となったためと考えられる。

図-8に常時における水平方向角折れに対する締結間隔の影響を、図-9に水平方向目違いに対する締結間隔の影響を示す。水平方向の角折れの限界値は、50N レールでは締結間隔約 700mm まで、60kg レールで約 800mm まで

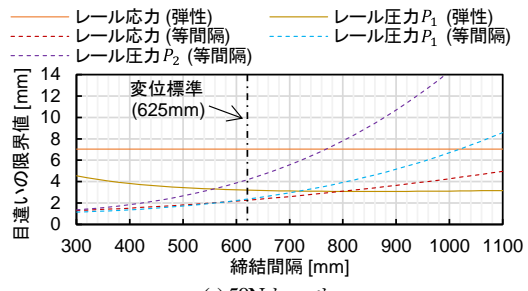


(a) 50N レール

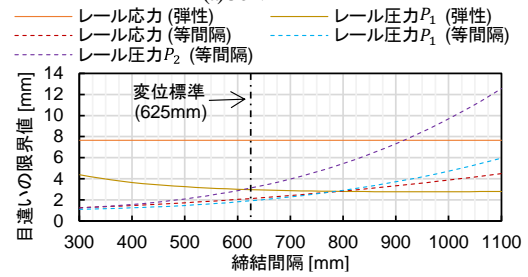


(b) 60kg レール

図-8 水平角折れに対する締結間隔の影響(常時)



(a) 50N レール



(b) 60kg レール

図-9 水平目違いに対する締結間隔の影響(常時)

は等間隔固定支持モデルのレール応力で限界値が決まり、締結間隔の拡大により限界値が増加した。また、それ以上の領域では弾性支持モデルによるレール応力で限界値が決まり、一定の値となった。一方で、目違いに対しては、50N レールと 60kg レールのいずれも締結間隔が 800mm までは、等間隔固定支持モデルでのレール応力または第一締結のレール圧力で限界値が決まり、締結間隔の拡大により限界値が増加した。それ以上では弾性支持モデルのレール圧力で決まる値となることを確認した。

図-10 に地震時における鉛直方向角折れに対する締結間隔の影響を、図-11 に鉛直方向目違いに対する締結間隔の影響を示す。なお、図-11 においては、レール応力による限界値はすべて 10mm 以上となった。地震時には、鉛直方向の角折れの限界値は変位標準での締結間隔よりも大きな値とすることで限界値を増加させることが可能であった。また、目違いに対しては 50N レールでは締結間隔を約 720mm 以上、60kg レールでは締結間隔を約 920mm 以上とすることで変位標準での条件

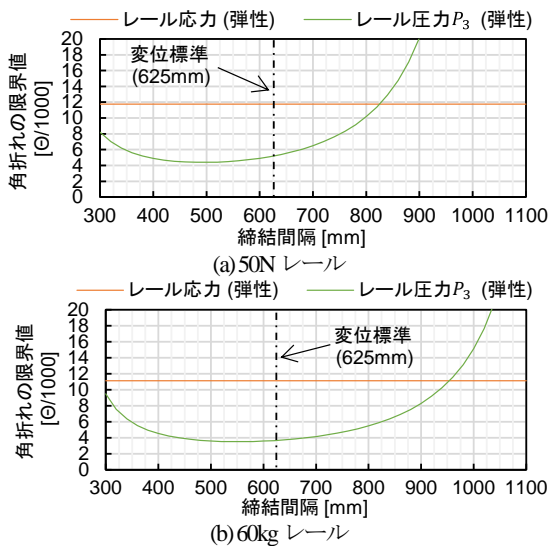


図-10 鉛直角折れに対する締結間隔の影響(地震時)

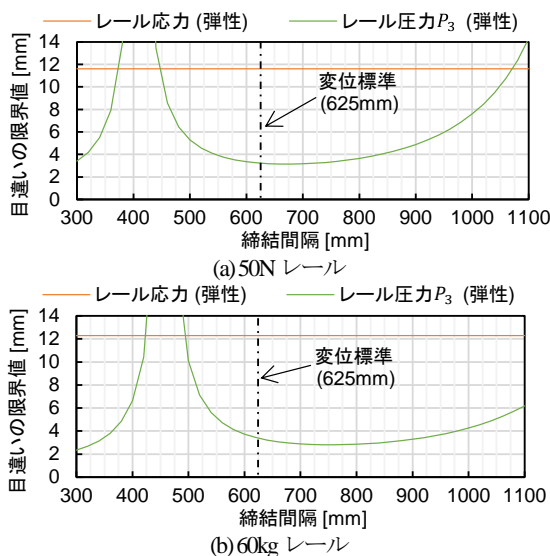


図-11 鉛直目違いに対する締結間隔の影響(地震時)

(625mm)よりも限界値を増加させることが可能であった。

図-12 に地震時における水平方向角折れに対する締結間隔の影響を、図-13 に水平方向目違いに対する締結間隔の影響を示す。水平方向については、常時と同様に、一定の値まで締結間隔を拡大することにより限界値を増加させることが可能であった。

b) 鉛直支持ばね定数の影響

図-14 に常時における鉛直方向角折れに対する鉛直支持ばね定数の影響を、図-15 に鉛直方向目違いに対する鉛直支持ばね定数の影響を示す。角折れに対しては、50N レール 60kg レール共に鉛直支持ばね定数を低下させることで限界値を増加させることが可能であった。一方、目違いについては、鉛直支持ばね定数の低下による限界値への影響は限定的であった。

図-16 に地震時における鉛直方向角折れに対する鉛直支持ばね定数の影響を、図-17 に鉛直方向目違いに対す

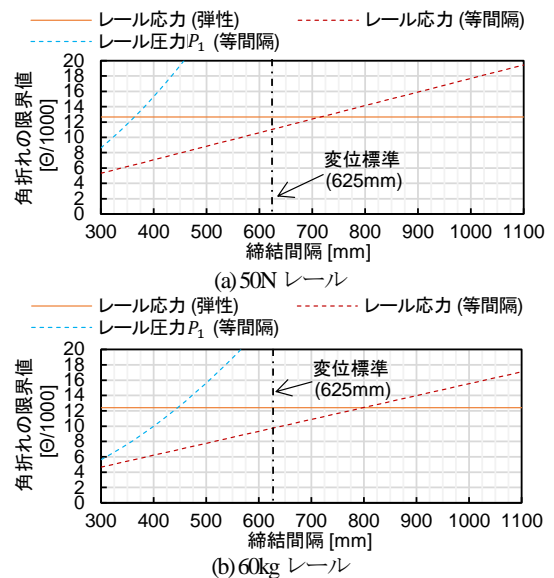


図-12 水平角折れに対する締結間隔の影響(地震時)

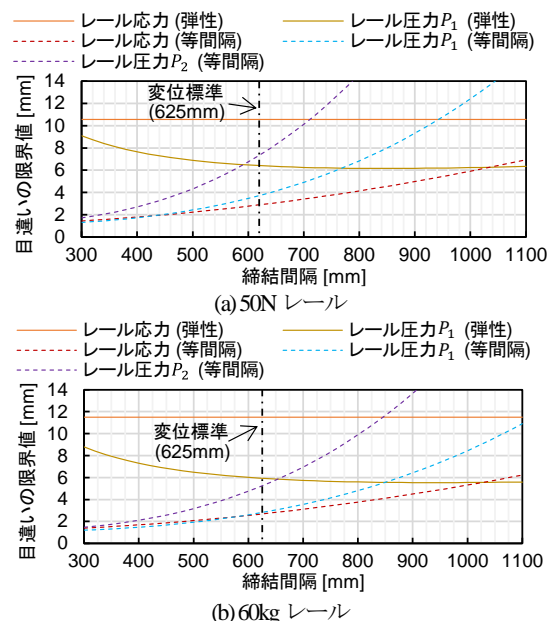


図-13 水平目違いに対する締結間隔の影響(地震時)

る鉛直支持ばね定数の影響を示す。図より、地震時においても常時と同様の傾向が確認できた。

c) 実際の軌道構造条件を想定した限界値の目安の例

表-4 に実際の軌道構造条件を想定した常時の角折れ・目違いの限界値の目安の例を示す。ここでは、変位標準で使用されているスラブ軌道の値を基本とし、既往の研究^{3),5),6)}を参考にして、締結間隔を750mmとしたケースと、軌道パッドのばね定数を20MN/mとして単位長さあたりの鉛直支持ばね定数を算出したケースを想定した。表より、角折れ・目違いともに水平方向に対しては影響が限定的であるが、鉛直方向に対しては締結間隔の拡大または鉛直支持ばね定数の低下により限界値を緩和させることが可能であり、締結間隔を750mm、軌道パッドばね定数を20kN/mm(鉛直支持ばね定数27N/mm/mm)としたケースでの限界値は、変位標準での条件から算出した結果と比較して、50N レールの鉛直角折れで3.5 mrad、60kg レールの角折れで4.5 mrad 増加し、50N レールの鉛

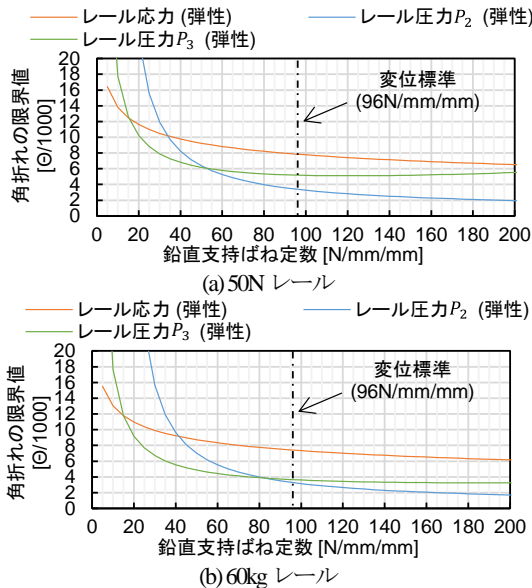


図-14 鉛直角折れに対する鉛直支持ばね定数の影響(常時)

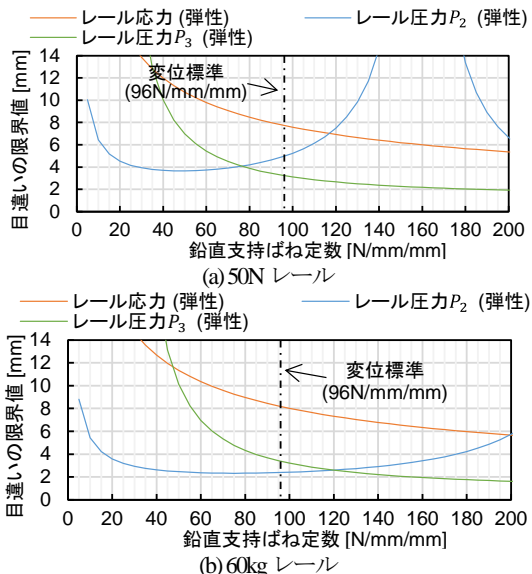


図-15 鉛直目違いに対する鉛直支持ばね定数の影響(常時)

直目違いで3.4mm、60kg レールの鉛直目違いで1.6mmの増加となった。なお、今回の検討は橋りょうの復旧性の照査に対して行ったものであり、実際に締結間隔や軌道

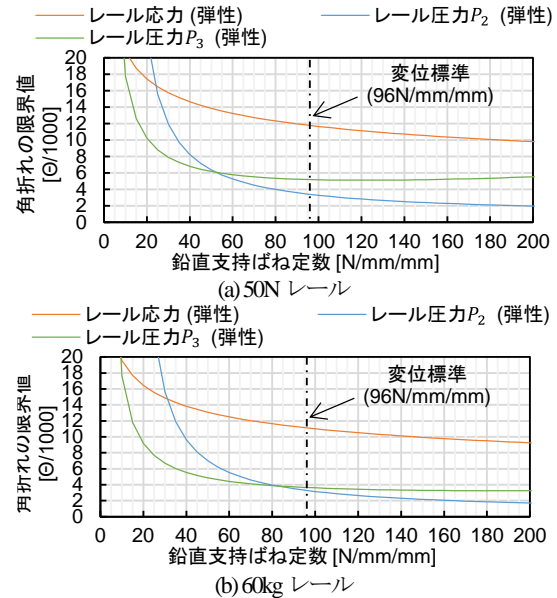


図-16 鉛直角折れに対する鉛直支持ばね定数の影響(地震時)

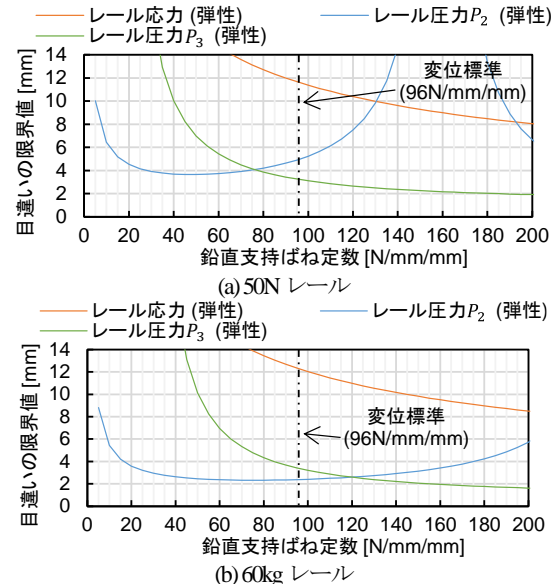


図-17 鉛直目違いに対する鉛直支持ばね定数の影響(地震時)

表-4 限界値の目安の例(常時)

ケース	締結間隔 [mm]	鉛直支持ばね定数 [N/mm/mm]	角折れ [°/1000]		目違い [mm]	
			鉛直	水平	鉛直	水平
(a) 50N レール						
基準値	625	96	3.4	7.4	3.2	2.3
締結間隔拡大	750	96	2.8	8.4	3.3	2.8
軌道パッド低ばね化	625	32	7.6	7.4	3.9	2.3
間隔拡大+低ばね化	750	27	6.9	8.4	6.6	2.8
(b) 60kg レール						
ケース	締結間隔 [mm]	鉛直支持ばね定数 [N/mm/mm]	角折れ [°/1000]		目違い [mm]	
基準値	625	96	3.3	6.5	2.4	1.9
締結間隔拡大	750	96	2.5	7.8	2.8	2.6
軌道パッド低ばね化	625	32	6.4	6.5	2.9	1.9
間隔拡大+低ばね化	750	27	6.1	7.8	4	2.6

パッド等を検討する場合には、列車の走行安全性や経済性などが満足されることが前提となる。

5. まとめ

本研究では、変位標準の軌道の損傷に関する復旧性の限界値の算出方法を整理し、軌道の鉛直方向の支持剛性や締結間隔といったパラメータが与える影響を評価した。さらに、実際の軌道構造条件を想定した限界値の目安を提示した。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 常時の鉛直方向については、角折れ目違いとともに第二締結または第三締結のレール圧力により限界値が決定するケースが多いことが分かった。常時の水平方向については、角折れはレール応力、目違いはレール応力または第一締結のレール圧力で限界値が決まることが多いことが分かった。
- 2) 常時・地震時共に締結間隔の拡大による鉛直方向の目違い及び水平方向の角折れ・目違いの限界値を増加させることが可能であった。鉛直支持ばね定数についても、常時・地震時ともに値を低下させることで鉛直角折れに対する限界値を増加させることが可能であった。

NOTES

注1) 日本製鉄株式会社：レール, https://www.nipponsteel.com/product/catalog_download/pdf/K003.pdf, 最終アクセス：2022年3月31日

REFERENCES

- 1) 鉄道構造物等設計標準・同解説(変位標準)：財団法人鉄道総合技術研究所編，丸善出版社，2006. [Railway Technical Research Institute, Design Standards for

- Railway Structures and Commentary (Displacement limits), Maruzen Publishing, 2006.]
- 2) 佐藤裕，平田五十：構造物の変位とスラブ軌道理論計算，鉄道技術研究報告，No.801，1972.3. [Sato Y., Hirata, G.: Deformation of Substructure and Slab-track, Railway technical research report, No.801, 1972.3.]
- 3) 宮腰豊：経済性，施工性の向上を目指したスラブ軌道の改良-整備新幹線-, JREA, Vol.61, No.12, pp.42701-42704, 2018. [Miyakoshi, Y.: Improvement of slab track for improvement of economy and workability -projected Shinkansen lines-, JREA, Vol.61, No.12, pp.42701-42704, 2018.]
- 4) 名村明，羽賀修，楠田将之，安藤勝敏，川崎祐征：スラブ軌道のレール締結間隔拡大に関する検討，土木学会第55回年次学術講演会，Vol.55, No.IV-266, pp.504-505, 2000. [Namura, A., Haga, O., Kusuda, M., Ando, K. and Kawasaki, H., Examination of expanding the rail fastening interval of slab tracks, Proceedings of the 55th Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers, Vol.55, No.IV-266, pp.504-505, 2000.]
- 5) 横山秀史，岩田直泰，芦谷公稔：低ばね定数軌道パッド敷設による地盤振動に対する影響，鉄道総研報告，Vol.22, No.5, pp.29-34, 2008. [Yokoyama, H., Iwata, N. and Ashiya, K., Vibration Reduction Effect of Softer Rail Pads for High Speed Trains, RTRI Report, Vol.22, No.5, pp.29-34, 2008.]
- 6) 田中靖幸，高橋亮一，出穂浩，江後満喜，田淵剛：軌道パッドのばね定数低下が沿線騒音・振動に及ぼす影響(新幹線スラブ軌道における現地敷設結果)，土木学会第59回年次学術講演会，Vol.59, No. 4-055, pp.109-110, 2004. [Tanaka, Y., Takahashi, R., Izuhō, H., Eto, M. and Tabuchi, T.: Effect of Decrease in Spring Constant of Track Pad on Noise and Vibration along Railway Lines (Results of On-site Installation on Shinkansen Slab Tracks) Proceedings of the 59th Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers, Vol.59, No. 4-055, pp.109-110, 2004.]

(Received April 1, 2022)

(Accepted June 3, 2022)

EVALUATION OF EFFECT OF TRACK CONDITIONS ON LIMIT VALUE OF UNEVEN DISPLACEMENT AT BRIDGE BOUNDARY

Shintaro MINOURA, Manabu IKEDA and Munemasa TOKUNAGA

In the railway structure design standard and commentary (displacement limit), a guideline for the limit value of uneven displacement (angular rotation / misalignment) of the track surface is described with respect to recoverability at usual conditions and after earthquakes, and these limit values are often used in actual design. However, at present, various track structures and fastening systems are developed and used in actual railway track, and there are many cases where the fastening interval and support stiffness are different from the value used in the calculation of the standard limit value. In addition, there is a possibility that the limit value of recoverability can be increased by selecting realistic track structures at the design. In this study, we sort out the track conditions that are dominant over the current standard of the recoverability limit value, and evaluate the influence of various parameters such as the track support stiffness and the fastening interval on the limit value of recoverability.