

# 城市轨道交通预制轨道板尺寸与线路线型适应性研究

段海滨 段玉振 陈 鹏

(北京城建设计发展集团股份有限公司, 100037, 北京)

**摘 要** [目的]通过研究预制轨道板尺寸与线路线型的适应性关系,并根据相应的限制条件提出合理的预制板尺寸,为预制轨道板的工程设计及标准化提供依据。[方法]依据预制轨道板通过以直代曲和扣件横向调整实现平面曲线线型,通过扣件竖向调整以实现缓和曲线及竖曲线线型的施工,由几何关系得到扣件横向允许调整量和竖向允许调整量与板长的关系表达式。通过几何关系,根据板缝的允许值得出预制板长度与宽度间的关系表达式。[结果及结论]研究表明,轨道板长度限值与扣件横向允许调整量及扣件竖向允许调整量关系密切,线型不是预制板宽度的限制因素。建议扣件横向允许调整量取值 2 mm,竖向允许调整量取值 15 mm;建议同一条线预制板长度的规格不大于两种,当线路曲线半径  $R \geq 950$  m 时采用长度为 5.9 m 板,当  $300 \text{ m} \leq R < 950$  m 时采用长度为 3.5 m 板,当  $R < 300$  m 时采用横向大调整量扣件。

**关键词** 城市轨道交通; 预制轨道板; 线型; 尺寸规格

**中图分类号** U231.3

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.07.031

## Adaptability of Prefabricated Track Slab Dimensions to Track Alignments in Urban Rail Transit

DUAN Haibin, DUAN Yuzhen, CHEN Peng

(Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., 100037, Beijing, China)

**Abstract** [Objective] By investigating the adaptability relationship between prefabricated track slab dimensions and track alignments, and proposing reasonable prefabricated slab dimensions based on corresponding constraints, a basis for the engineering design and standardization of prefabricated track slabs is provided. [Method] Prefabricated track slabs can achieve planar curve alignment through substituting straight segments for curved segments and adjusting fasteners laterally. Construction of transition curve and vertical curve alignment is achieved through adjusting fasteners vertically. The expressions of the allowable lateral and vertical adjustment amounts of the fasteners in relation to slab length are derived based on geometric relationships. Through geometric relationships, the expression of the relationship between prefabricated slab length and width is

determined based on the allowable value of slab gaps. [Result & Conclusion] Research shows that the track slab length limit is closely related to the allowable lateral and vertical adjustment amounts of the fasteners, while the alignment is not a limiting factor for prefabricated slab width. It is recommended to set the allowable lateral adjustment of fasteners to 2 mm, and the allowable vertical adjustment to 15 mm. For the same line, it is suggested that the specifications of prefabricated slab lengths should not exceed two types. When track curve radius is  $R \geq 950$  m, slabs with a length of 5.9 m are recommended. For curve radii  $300 \text{ m} \leq R < 950$  m, slabs with a length of 3.5 m are recommended. When  $R < 300$  m, fasteners with large lateral adjustment amount are recommended.

**Key words** urban rail transit; prefabricated track slab; track alignment; dimension specification

近年来,城市轨道交通预制板式轨道应用逐渐增多,如上海<sup>[1]</sup>、杭州、苏州<sup>[2]</sup>、深圳<sup>[3]</sup>等地均有采用预制板轨道线路。城市轨道交通线路中小半径曲线较多,铁路的预制轨道板不能直接采用,同时各城市采用的预制板轨道结构、尺寸不尽相同。预制板的尺寸设计与多种因素有关,如预制板的动力特性<sup>[4]</sup>等。本文旨在从预制板与线路线型适应性的角度探讨城市轨道交通线路上预制板合适的尺寸。

## 1 线路的线型对预制板尺寸影响分析

预制板的尺寸主要由长、宽、厚构成。厚度一般与盾构半径、轨道结构高度等相关,与线路的线型相关性不大,本文不再考虑。轨道板在曲线上铺设时,一般采用“以直代曲”和扣件调整的方法实现。由于扣件调整能力有限,因此会对预制板的尺寸进行限制。

### 1.1 平面圆曲线对预制板长度的影响

在圆曲线范围,钢轨超高值是统一的,超高可通过板沿纵向中心线旋转得到。平面圆曲线可通过扣件的横向调整来实现。扣件的调整方法有平

分中矢法<sup>[1]</sup>和端部扣件定位法<sup>[4]</sup>。

### 1.1.1 平分中矢法

设轨道板的板长为  $L$ 、板宽为  $W$ ，端部扣件中心至板边的距离为  $b$ ，承轨台中心间距为  $a$ ，平面曲线

的半径为  $R$ 。平分中矢法是将预制板置于曲线上，通过调整扣件使预制板中心位置的偏距与两端扣件位置的偏距相等，设为  $\delta/2$  ( $\delta$  为正矢值)，如图 1 所示。

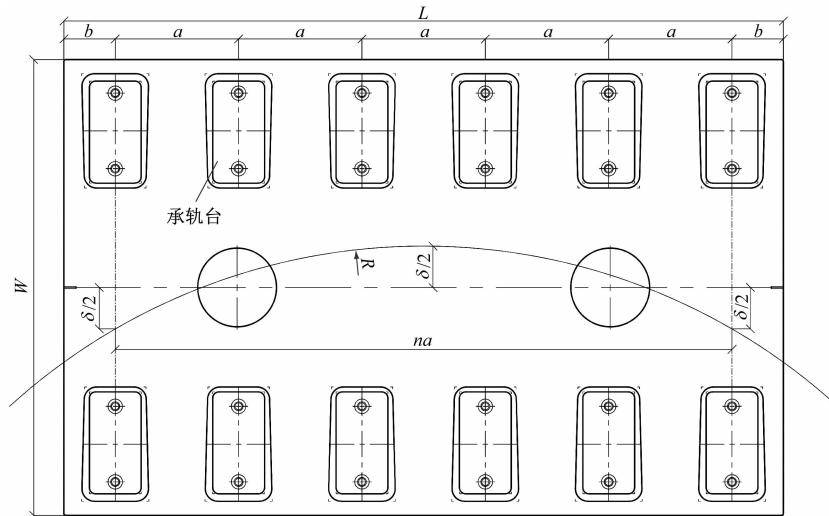


图 1 平分中矢法示意图

Fig. 1 Diagram of bisected mid-ordinate method

根据几何关系，圆曲线的割线长  $l$ 、正矢  $\delta$  以及半径  $R$  的关系可表示为：

$$\delta = \frac{l^2}{8R} \quad (1)$$

由图 1 可知曲线与两端扣件连线的交点连线即为割线  $l$ ，其正矢为  $\delta$ 。当扣件横向允许调整量为  $[\delta]$  时，则有：

$$\frac{(L - 2b)^2}{8R} = 2 \times \frac{\delta}{2} \leq 2[\delta] \quad (2)$$

$$L \leq 4\sqrt{R[\delta]} + 2b \quad (3)$$

### 1.1.2 端部扣件定位法

采用端部扣件定位法时，采用板端第一组扣件横向中心线与板的纵向中心线交点作为定位基准点<sup>[4]</sup>。此时参照式(1)、式(2)可得：

$$L \leq 2\sqrt{2R[\delta]} + 2b \quad (4)$$

比较式(3)和(4)可知，通过板端扣件固定的方法，在  $R$ 、 $b$  以及  $[\delta]$  相同时，式(4)对板长的限制较大。因此有文献采取板端第二组扣件横向中心线与板纵向中心线交点作为定位基准点<sup>[5]</sup>。上述两种端部扣件定位法在施工定位上有其方便性，但是对于板长最大值的计算结果上均不如平分中矢法。

## 1.2 线路曲线内外股长度差对预制板尺寸的影响

在圆曲线上连续铺板时，板与板之间会产生折角。曲线半径相同时，板长越长，相邻板的折角

也越大；板宽越大，曲线内侧的板缝越小，如图 2 所示。由于板与板之间的扣件间距要与板内扣件间距基本保持一致，故相邻板间距不能太大，板缝宽度亦应满足板的铺设需求。

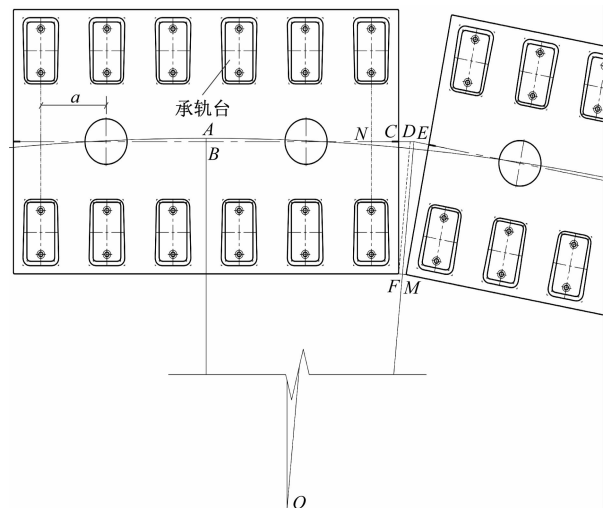


图 2 预制板曲线折角示意图

Fig. 2 Diagram of prefabricated slab curve bending angle

设两板的纵向中心线交点为  $E$  点， $NE$  为承轨台中心间距的一半（即  $a/2$ ）。设板缝  $FM$  的宽度允许最小值为  $[\omega]$ ，圆曲线中心点为  $O$ ，从  $F$  点向  $BE$  点作垂线交于  $D$  点，则：

$$FM \approx 2DE = 2(CE - CD) \quad (5)$$

$$CE = NE - NC = a/2 - b \quad (6)$$

$$CD = CF \tan \angle CFD = \frac{W}{2} \tan \angle CFD \quad (7)$$

由  $\triangle OBE \sim \triangle FCD$ , 可得:

$$\tan \angle CFD = \tan \angle BOE = \frac{L/2 + a/2 - b}{R - \delta/2} \approx \frac{L + a - 2b}{2R} \quad (8)$$

将式(6)、(7)、(8)代入式(5)得板长  $L$  与板宽  $W$  的关系为:

$$FM = 2 \left( \frac{a}{2} - b - \frac{W}{2} \cdot \frac{L + a - 2b}{2R} \right) \geq [\omega] \quad (9)$$

$$W \leq \frac{2R(a - 2b - [\omega])}{L + a - 2b} \quad (10)$$

### 1.3 线路缓和曲线对预制板长度的影响

在缓和曲线范围布板时应考虑缓和曲线范围内超高的渐变,也就是相对超高的影响。当预制板按半超高设置时,可按以下步骤实施:

1) 设圆曲线的超高值为  $h_0$ , 缓和曲线长为  $l_0$ , 缓和曲线上钢轨超高的顺坡率  $i = h_0/l_0$ , 则根据轨道板所在缓和曲线上的位置, 可计算得该轨道板各处的外轨超高值  $h$ 。设轨道板最前端(靠直线端)的第一组扣件位置处的超高为  $h_1$ , 最后端(靠圆曲线端)扣件位置处的超高为  $h_2$ , 则单块板两端扣件处超高, 差  $\Delta h = h_2 - h_1$ 。轨道板按  $h_1$  设超高, 轨道板最前端(靠直线端)扣件位置固定, 以最前端两组扣件横向中心线为轴向上抬高  $\Delta h/2$ , 如图3所示。

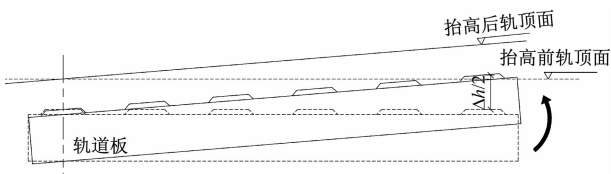


图3 预制板抬高  $\Delta h/2$  示意图

Fig. 3 Diagram of prefabricated slab lifting by  $\Delta h/2$

2) 以外股钢轨中心位置为轴, 曲线内侧向下旋转, 使得内外股钢轨标高差值为  $h_1 + \Delta h$ , 如图4所示。

3) 经过2)步后, 板上每对扣件位置的超高均为  $h_1 + \Delta h$ , 然后需通过将内股每组扣件进行向上抬高以实现每组扣件位置钢轨超高的线性渐变。则最后一组扣件(靠圆曲线端)无需调整, 第一组扣件的调高量最大, 为  $\Delta h$ 。设扣件竖向允许调整量为  $[h]$ , 则有:

$$\Delta h = (L - 2b)i \leq [h] \quad (11)$$

$$L \leq \frac{[h]}{i} + 2b \quad (12)$$

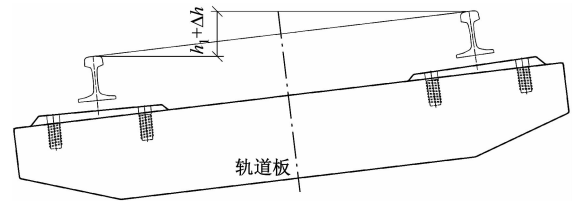


图4 以外股钢轨中心线为轴预制板旋转示意图

Fig. 4 Diagram of prefabricated slab rotation with outer rail centerline as axle

当设置为全超高时, 只需内股扣件固定, 外股扣件抬高即可<sup>[5]</sup>。全超高设置时与半超高设置时板长的限制公式一样。

### 1.4 线路竖曲线对预制板长度的影响

竖曲线一般采用圆曲线, 分为凹形竖曲线和凸形竖曲线, 两种竖曲线形式均需通过扣件的调高来实现。

#### 1.4.1 凹形竖曲线

凹形曲线只能通过扣件调高得到。设扣件调整量为  $\eta$ , 从图5可以看出两端的扣件调高量最大。设扣件竖向允许调高量为  $[h]$ , 竖曲线的半径为  $R_R$ 。

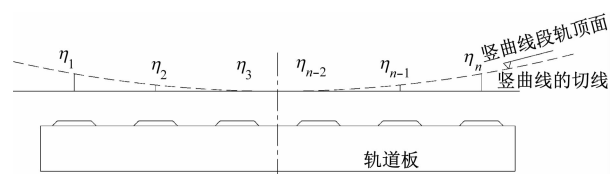


图5 凹形竖曲线扣件调整示意图

Fig. 5 Diagram of concave vertical curve by fastener adjustment

根据式(1)可得轨道板两端扣件调高量应满足:

$$\eta_1 = \eta_n = \frac{(L - 2b)^2}{8R_R} \leq [h] \quad (13)$$

则可得板长的限值公式为:

$$L \leq 2\sqrt{2R_R[h]} + 2b \quad (14)$$

#### 1.4.2 凸形竖曲线

当为凸形竖曲线时, 板端两组扣件调高量为0, 中间位置扣件调高量最大, 如图6所示。

根据式(1)得图6竖曲线中部正矢应满足:

$$\eta_{\text{中}} = \frac{(L - 2b)^2}{8R_R} \leq [h] \quad (15)$$

则凸形竖曲线时, 板长的限值公式为:

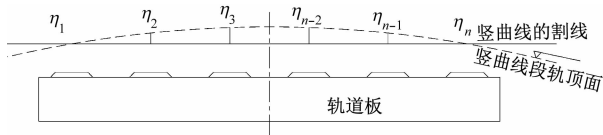


图6 凸形竖曲线扣件调整示意图

Fig. 6 Diagram of convex vertical curve by fastener adjustment

$$L \leq 2\sqrt{2R_R[h]} + 2b \quad (16)$$

由式(14)和式(16)可知凹形竖曲线与凸形竖曲线对于预制板长度的影响是一样的。

### 1.5 竖曲线与缓和曲线重合时对预制板长度的影响

当线路竖曲线、缓和曲线重合时,预制板不仅需要围绕自身旋转设置超高还需要通过扣件调整实现竖曲线及超高渐变。

#### 1.5.1 缓和曲线与凹形竖曲线重合

设第一组扣件位置为坐标原点,板上其他扣件位置距第一组扣件的距离为  $x$ 。根据本文 1.3,缓和曲线对外股扣件无影响,则外股扣件调高量可参考凹形竖曲线的调整量即可。内股钢轨的竖向调整量为缓和曲线超高向上调整量与凹形竖曲线向上调整量之和。设  $x$  位置处的扣件调整量为  $f(x)$ ,则有:

$$f(x) = \frac{(L-2b-2x)^2}{8R_R} + \left[ \Delta h - \frac{\Delta h x}{L-2b} \right] \quad (17)$$

将式(11)代入式(17)并化简得:

$$f(x) = \frac{x^2}{2R_R} - \left( \frac{L-2b}{2R_R} + i \right)x + (L-2b)i + \frac{(L-2b)^2}{8R_R} \quad (18)$$

因  $x \in [0, L-2b]$ , 当  $x=0$  时,  $f(x)$  有最大值, 设扣件竖向允许调高量为  $[h]$ , 则有:

$$f(x)_{\max} = (L-2b)i + \frac{(L-2b)^2}{8R_R} \leq [h] \quad (19)$$

由式(19)可得:

$$L \leq \sqrt{8R_R[h] + (4R_R i)^2} - 4R_R i + 2b \quad (20)$$

#### 1.5.2 缓和曲线与凸形竖曲线重合

与凹形竖曲线假设一致,在  $x$  位置处内股扣件竖向调整量为:

$$f(x) = \frac{(L-2b)x - x^2}{2R_R} + \left[ \Delta h - \frac{\Delta h x}{L-2b} \right] \quad (21)$$

将式(11)代入式(21)可得:

$$f(x) = -\frac{x^2}{2R_R} + \left( \frac{L-2b}{2R_R} - i \right)x + (L-2b)i \quad (22)$$

当  $x \in [0, L-2b]$ , 得  $f(x)$  的最大值为:

$$\begin{cases} (L-2b)i, & L-2b \leq 2R_R i \\ \frac{R_R}{2} \left[ \left( \frac{L-2b}{2R_R} - i \right) \right]^2 + (L-2b)i, & L-2b > 2R_R i \end{cases} \quad (23)$$

设扣件竖向允许调高量为  $[h]$ , 则有:

$$\begin{cases} L \leq \frac{[h]}{i} + 2b, & L-2b \leq 2R_R i \\ L \leq \sqrt{8R_R[h] + (2R_R i)^2} - 2R_R i + 2b, & L-2b > 2R_R i \end{cases} \quad (24)$$

## 2 取值推荐

### 2.1 限值推荐

综上所述可得影响预制板长度的因素主要有  $R$ 、 $i$ 、 $R_R$ 、 $[\delta]$  和  $[h]$  以及  $b$ 。一般  $a$  和  $b$  的值为定值。本文  $a$  按 600 mm 计。预制板的板缝可用于过轨管穿越,在直线地段一般设置为 100 mm, 则  $b$  值为 250 mm。

扣件的横向调整量是有限的,普通扣件的横向调整量一般为 6~8 mm。在设计时还应保留一定的横向调整量来为线路后期的运营服务。建议扣件的横向允许调整量取  $[\delta] = 2$  mm。出于同样的考虑,建议扣件竖向允许调整量取  $[h] = 15$  mm。

### 2.2 公式分析与预制板尺寸限值

将  $[\delta] = 2$  mm 代入式(3)可得图 7 a), 可见曲线半径越大,与线型适应的板长值越大。

将  $[h] = 15$  mm,  $b = 250$  mm 代入式(12)可得图 7 b), 可见超高顺坡率越大,板长越小。当  $i = 2.5\%$  时,式(12)可以简化为:

$$L \leq 400[h] + 2b \quad (25)$$

式中的变量单位皆以 m 计。

线路竖曲线半径不应小于 2 000 m<sup>[6-7]</sup>。根据式(14)可得竖曲线半径与板长的关系如图 7c) 所示,可见竖曲线半径越大,板长越长。当  $R_R = 2 000$  m 时,式(14)可简化为:

$$L \leq 40\sqrt{10[h]} + 2b \quad (26)$$

当缓和曲线与凹形竖曲线重合时,根据式(20)可得图 7 d), 可见超高顺坡率越大、半径越小,则板长越小。当  $R_R = 2 000$  m,  $i = 2.5\%$  时,式(20)可简化为:

$$L \leq 20\sqrt{40[h]} + 1 - 20 + 2b \quad (27)$$

式中的变量单位皆以 m 计。

当缓和曲线与凸形竖曲线重合时,由于式(24)



是关于板长  $L$  的函数组合,当  $R_R$  为 2 000 m 时绘制出  $L$  取值范围图如图 7 e)。图中阴影填充区域为板长取值范围,当超高顺坡率  $i = 2.5\text{‰}$  时在限制条件范围内有最大值。此时板长的限制条件取极小值时与式(12)一致,且与竖曲线半径无关。当采用

其他竖曲线半径时,结论相同。故式(24)和式(12)可合并为一个,统一按式(25)考虑。

式(25)、式(26)和式(27)的比较如图 7 f) 所示。可知当  $[h]$  相同时,式(27)对板长影响最大。

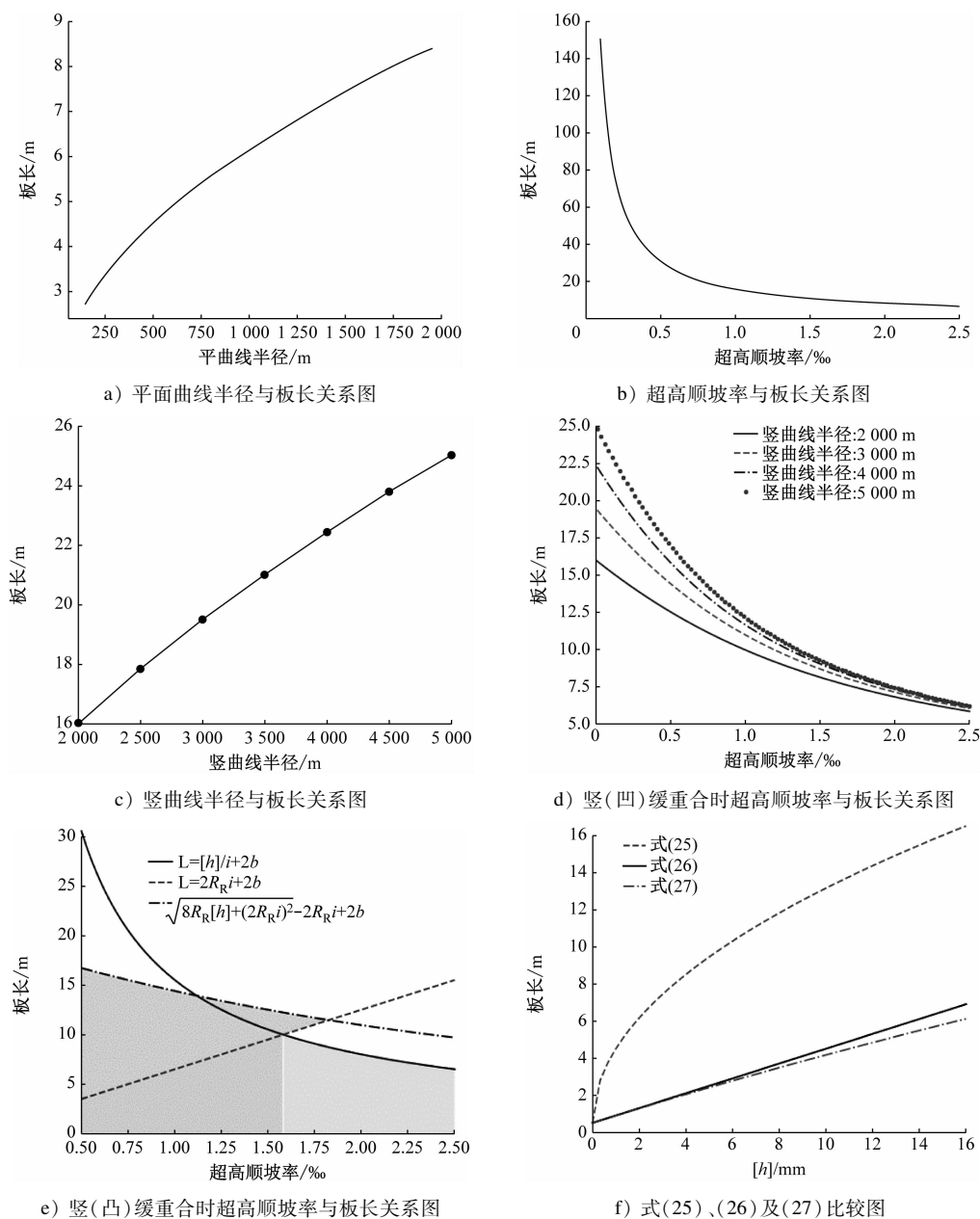


图7 板长与影响因素关系图

Fig. 7 Relation diagram of slab length and influencing factors

综上,预制板长度的限值公式可汇总简化为式(3)和式(27)。

当  $[h] = 0.015$  m,  $b = 0.250$  m 时,由式(27)可得  $L \leq 5.8$  m,因扣件间距配置为整数,且一般情况下缓和曲线超高顺坡率小于  $2.5\text{‰}$ ,则可按 9 对扣

件布置,即预制板长度最大值可取 5.9 m。

从式(3)及图 7 可得板长与平面曲线半径关系较大。《地铁设计规范》中规定正线平面曲线的最小半径为 250 m<sup>[6]</sup>;在《地铁快线设计标准》<sup>[7]</sup>中平面曲线最小半径为 350 m。一般线路上采用特别小

的曲线半径情况相对较少,板长设计时,建议平面曲线最小半径按 300 m 考虑。将 $[\delta] = 2 \text{ mm}$ ,  $b = 250 \text{ mm}$  代入式(3)可得  $L = 3.6 \text{ m}$ 。考虑扣件模数,按 5 对扣件布置,即  $L = 3.5 \text{ m}$ 。当  $R < 300 \text{ m}$  时,可采用横向大调整量扣件,并考虑相应的轨距加宽。由式(27)当板长为 5.9 m 时,平面曲线半径为 911 m。即当  $R > 911 \text{ m}$  时可采用  $L = 5.9 \text{ m}$  的板。为工程方便, $R$  可取 950 m。

一般同一条线路预制板的规格不宜过多,以减少开模费用以及增加施工的便利性。建议采用两种板型。当  $300 \text{ m} \leq R < 950 \text{ m}$  时可采用 3.5 m 板长,当  $R \geq 950 \text{ m}$  时采用 5.9 m 板长。

由式(10)可知预制板的板宽主要制约因素为平面曲线半径及板缝的限值 $[\omega]$ 。当 $[\omega] = 50 \text{ mm}$  时,将  $R = 300 \text{ m}$ ,  $b = 0.25 \text{ m}$ ,  $L = 3.5 \text{ m}$ ,  $a = 0.6 \text{ m}$  代入式(10),可得板宽  $W$  最大值为 8.3 m。由于板缝可用于过轨管穿越,不能太小,当 $[\omega] = 80 \text{ mm}$  时,板宽最大值为 3.3 m,这两个限值均远超预制板宽的需求。所以从预制板尺寸与线型适应性角度,线型不是预制板宽度的限制因素。板宽的限值主要受限界、承轨台等因素影响<sup>[4]</sup>。

### 3 结语

本文主要从线路平、竖曲线、缓和曲线以及缓和曲线和竖曲线重合的情况,对预制板的尺寸与线路的适应性进行探讨,并总结了限值公式,为相关工程轨道预制板设计及标准化提供参考,主要结论如下:

1) 对于平面曲线一般采用“平分中矢法”对预制板进行调整,基于铺设的定位方便性可采用“端部扣件定位法”。

2) 扣件的横向允许调整量是影响预制板长度的关键因素,建议取限值 2 mm。当采用横向大调整量扣件时,可适当放宽该值。

3) 扣件竖向允许调整量也是影响预制板长度的关键因素,建议取限值 15 mm。当凹形竖曲线与缓和曲线重叠时对预制板板长影响较大。

4) 当有条件时尽量使用长板。建议以平面曲线半径 300 m、950 m 为分界点:当  $R \geq 950 \text{ m}$  时采用 5.9 m 板长;当  $300 \text{ m} \leq R < 950 \text{ m}$  时采用 3.5 m 板长;当  $R < 300 \text{ m}$  时,采用横向大调整量扣件。

5) 线型不是预制板宽度的限制因素,预制板宽

度由限界等其他因素决定。

### 参考文献

- [1] 曹德志. 地铁预制板式无砟轨道施工关键技术研究及应用[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2017.  
CAO Dezhi. The construction key technology and application in slab track of urban subway[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2017.
- [2] 黄辉, 尹华拓, 罗信伟, 等. 城市轨道交通预制板轨道设计及应用综述[J]. 铁道勘察, 2022, 48(2): 8.  
HUANG Hui, YIN Huatuo, LUO Xinwei, et al. Design and application of prefabricated slab track for urban rail transit[J]. Railway Investigation and Surveying, 2022, 48(2): 8.
- [3] 杨秀仁, 陈鹏, 高亮, 等. 城市轨道交通智能装配式减振轨道系统成套技术[J]. 都市快轨交通, 2019, 32(6): 51.  
YANG Xiuren, CHEN Peng, GAO Liang, et al. Technology for intelligently assembled precast vibration damping track structure in urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019, 32(6): 51.
- [4] 王伟华, 李大成, 梁延科. 城市轨道交通板式无砟轨道系统设计[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(8): 41.  
WANG Weihua, LI Dacheng, LIANG Yanke. Systematic design of slab track for urban rail transit[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(8): 41.
- [5] 吴凯伟. 装配式轨道曲线轨道板调整方法研究[J]. 铁道勘察, 2023, 49(2): 136.  
WU Kaiwei. Research on the adjustment method of prefabricated track slabs used in curved lines[J]. Railway Investigation and Surveying, 2023, 49(2): 136.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁快线设计标准: CJJ/T 298—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of metro express: CJJ/T 298—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020.

· 收稿日期:2023-08-20 修回日期:2023-10-09 出版日期:2024-07-10

Received:2023-08-20 Revised:2023-10-09 Published:2024-07-10

· 第一作者:段海滨,工程师,dhb1989@msn.cn

通信作者:陈鹏,正高级工程师,55974844@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license