

路基上 CRTS II 型板式轨道纠偏作业损伤扩展规律

许玉德^{1,2}, 严道斌^{1,2}, 邱俊兴³, 徐伟昌⁴

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804;
3. 深圳市城市交通规划设计研究中心, 深圳 518021; 4. 中国铁路上海局集团有限公司上海高铁维修段, 上海 200439)

摘要: 基于纠偏作业工艺, 建立了路基上中国铁路轨道系统(CRTS) II 型板式轨道有限元模型, 研究轨道板-宽窄接缝离缝、轨道板-砂浆层离缝、支承层裂纹在纠偏作业中的扩展规律。结果表明: 宽窄接缝离缝会减弱轨道板-宽窄接缝粘结界面抵抗损伤的能力; 砂浆层离缝对轨道板-砂浆层粘结界面损伤的影响较小; 支承层裂纹在纠偏作业过程中会进一步向支承层内部扩展。

关键词: 高速铁路; 板式轨道; 纠偏; 损伤扩展

中图分类号: U216

文献标志码: A

Damage Propagation Laws of Subgrade CRTS II Slab Track Under Displacement Correction

XU Yude^{1,2}, YAN Daobin^{1,2}, QIU Junxing³, XU Weichang⁴

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Shanghai 201804, China; 3. Shenzhen Urban Transport Planning Center, Shenzhen 518021, China; 4. China Railway Shanghai Bureau Group Co., Ltd. Shanghai Express Railway Maintenance Section, Shanghai 200439, China)

Abstract: Based on the displacement correcting method, the China railway track system(CRTS) II slab track was modelled in a finite element software. The damage propagation laws of wide and narrow joint separation, mortar-layer separation and supporting-layer cracks during the correction process are studied. The results show that the wide and narrow joint separation would decrease the ability to resist damage of the bonding interface; the mortar-layer separation made little influence on bonding interface; the supporting-layer cracks would grow deeper into the inside of the supporting-layer during the correction process.

Key words: high-speed railway; slab track; displacement correction; damage propagation

板式无砟轨道具有高稳定的特点^[1], 是我国高速铁路主要采用的轨道结构形式, 中国铁路轨道系统(CRTS) II 型板式无砟轨道在京津城际、京沪高铁、沪杭高铁上广泛使用。随着运营时间的增加, 无砟轨道结构的病害损伤逐渐累积, 养护维修困难的问题也日益凸显。

路基的不均匀沉降和轨道结构偏移是常见的病害^[2-3], 会对行车安全产生直接影响。调整扣件是常用的整治方式之一^[4], 但当结构偏移量超出扣件调整量时, 扣件调整方式受到限制。养护维修部门通过长期的现场实践, 摸索出了一套板式无砟轨道抬升纠偏技术, 对路基上 CRTS II 型板式轨道偏移的整治通常采用“注浆抬升纠偏法”^[5-7]。

现场调研表明, 待纠偏区段通常存在其他结构病害, 板式轨道的层间病害损伤较为常见, 工务部门特别反映轨道板-宽窄接缝离缝、轨道板-砂浆层离缝、支承层裂纹等病害在纠偏作业中易出现加剧趋势。纠偏作业中这些损伤的扩展规律如何, 如何保证损伤不发生进一步扩展, 是关系到纠偏作业能否顺利进行的重要问题。因此, 本文基于注浆抬升纠偏工艺, 建立路基上 CRTS II 型板式轨道有限元模型, 研究轨道板-宽窄接缝离缝、轨道板-砂浆层离缝、支承层裂纹在纠偏作业中的扩展规律, 以期优化纠偏作业工艺提供指导, 减少纠偏作业对轨道结构的破坏。

1 注浆抬升纠偏作业模型化

1.1 注浆抬升纠偏工艺

文献[6-7]详细阐述了 CRTS II 型板式无砟轨道注浆抬升纠偏工艺, 其基本原理是: 通过注浆孔向支承层底部注入解粘剂, 解除支承层与级配碎石间的

收稿日期: 2018-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(51678445), 同济大学中央高校基本科研业务费专项资金(22120180239)

第一作者: 许玉德(1965—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为轨道管理, 轨道养修技术。E-mail: xuyude2000@163.com

约束;然后采用机械顶推的方式横向纠偏到位;再将高聚物注浆材料注入支承层底部,利用其注浆压力和浆体膨胀特性对上部轨道结构进行可控的抬升。

1.2 纠偏作业有限元模型

如图 1 所示,按照 CRTS II 型板式轨道结构的实际尺寸建立空间三维模型.由于待纠偏区段的扣件在作业前已松开,因此纠偏作业不受钢轨和扣件系统的影响,因此建模仅考虑轨道下部结构,从上至下依次为轨道板、砂浆层、支承层、路基,各部件结构尺寸及材料属性见表 1.模型中各部件均以 C3D8R 实体单元模拟,材料采用线弹性本构模型.需要说明的是,为避免边界效应影响,建立的是含有九块轨道板的模型,对模型的两端及底部施加固定约束,仅对最中间的轨道板、砂浆层、支承层进行分析。

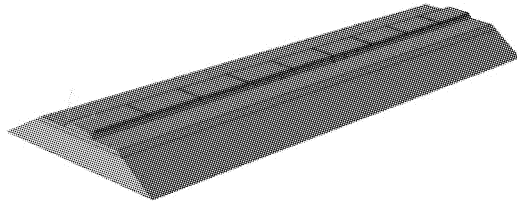


图 1 CRTS II 型板式轨道有限元模型

Fig.1 Finite element model of CRTS II slab track

本文以内聚力模型^[8-10]模拟轨道板-宽窄接缝、

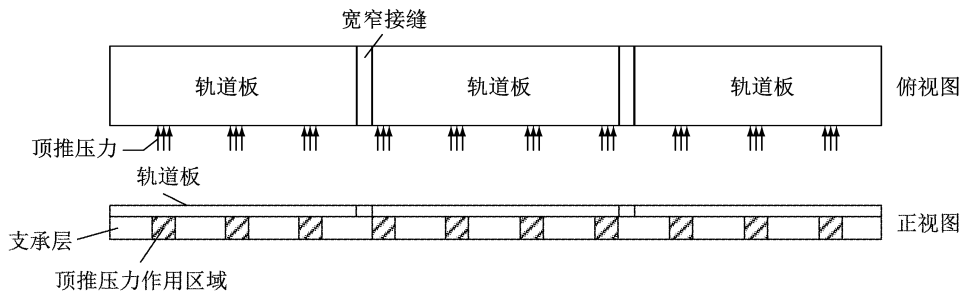


图 2 顶推机械布置

Fig.2 Arrangement of pushing machines

2 轨道板-宽窄接缝离缝扩展规律

轨道板-宽窄接缝的粘结界面因开裂而形成离缝^[11],离缝宽度通常在 0.1~2.0 mm 之间,最宽可达 3.0 mm.利用有限元软件中的“生死单元”功能模

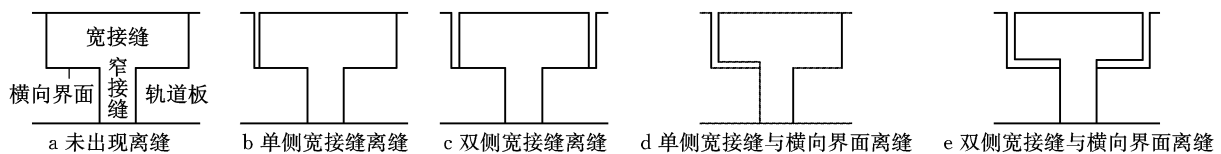


图 3 宽接缝离缝类型

Fig.3 Types of wide joint separation

表 1 结构尺寸及材料属性

Tab.1 Structural dimensions and material properties

轨道部件	尺寸/mm	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
轨道板	长×宽×高 (6 450×2 550×200)	35 500	0.2	2 500
砂浆层	宽×高(2 550×30)	7 000	0.2	1 900
支承层(水硬性混合料)	宽×高(3 250×300)	5 000	0.2	2 500
宽窄接缝	宽接缝:210×100 窄接缝:50×100	35 500	0.2	2 500
纵连钢筋	Φ20	210 000	0.3	7 900

拟轨道板-砂浆层的层间接触,内聚力参数参考文献[8],以双线性张力位移法则描述各粘结界面处内聚力单元的法向与切向张力-位移关系,法向内聚强度 1.792 MPa,界面刚度 708.485 MPa·mm⁻¹,临界断裂能 0.025 2 mJ·mm⁻²;切向内聚强度 0.956 MPa,界面刚度 63.039 MPa·mm⁻¹,临界断裂能 0.018 mJ·mm⁻².砂浆层-支承层的层间接触则采用摩擦接触。

根据注浆抬升纠偏工艺,仅对中间三块轨道板进行横向顶推纠偏,采用位移控制的加载方式.如图 2 所示,每隔 2 m 布置一个顶推机械(通常为千斤顶),在千斤顶与支承层间布置一块 300 mm×300 mm 的钢板防止应力集中.为简化模型计算,将支承层上作用的力看作在钢板区域内作用的均布力。

拟轨道板-宽窄接缝的层间离缝,离缝宽度取为 1.0 mm,假定离缝均为横向贯通离缝,针对不同的离缝位置分别展开分析。

2.1 宽接缝离缝

如图 3 所示,分别为未出现离缝、单侧宽接缝离缝、双侧宽接缝离缝、单侧宽接缝与横向界面离缝、

双侧宽接缝与横向界面离缝 5 种工况. 定义每一工况中未出现离缝的粘结界面为剩余粘结界面.

对每一工况计算在 0~0.8 MPa 顶推压力作用下剩余粘结界面的损伤深度, 结果如图 4 所示.

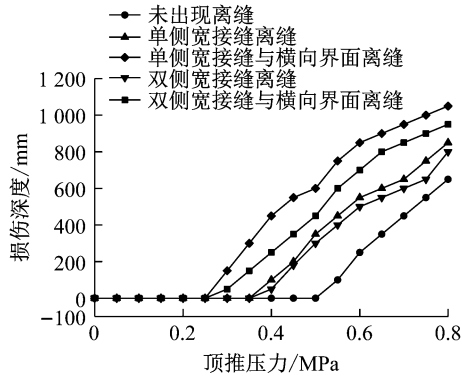


图 4 宽接缝离缝剩余粘结界面的损伤深度

Fig. 4 Damage depth of remaining bonding interface with wide joint separation

定义即将出现损伤时对应的顶推压力称为损伤临界顶推压力. 对于未出现离缝的轨道板-宽窄接缝粘结界面, 损伤临界顶推压力为 0.5 MPa; 存在离缝的粘结界面, 单侧与双侧离缝的剩余损伤临界顶推压力均为 0.35 MPa, 离缝的出现使得剩余粘结界面抵抗损伤的能力减弱. 当存在横向界面离缝时, 单侧与双侧离缝的损伤临界顶推压力均降至 0.25 MPa, 横向界面离缝使得剩余粘结界面抵抗损伤的能力进一步减弱. 随着顶推压力的增大, 损伤深度呈现递增的规律.

2.2 窄接缝离缝

如图 5 所示, 分别为单侧窄接缝离缝、双侧窄接缝离缝、单侧窄接缝与横向界面离缝、双侧窄接缝与横向界面离缝 4 种工况示意图.

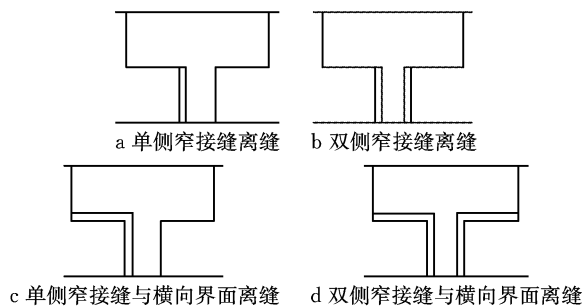


图 5 窄接缝离缝类型

Fig. 5 Types of narrow joint separation

对每一工况计算在 0~0.8 MPa 顶推压力作用下剩余粘结界面的损伤深度, 结果如图 6 所示.

对于未出现离缝的轨道板-宽窄接缝粘结界面, 损伤临界顶推压力为 0.5 MPa; 存在离缝的剩余粘

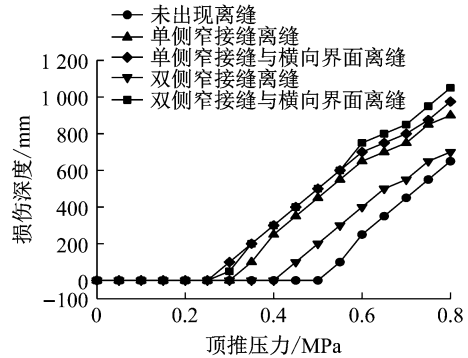


图 6 窄接缝离缝剩余粘结界面的损伤深度

Fig. 6 Damage depth of remaining bonding interface with narrow joint separation

结界面, 单侧离缝的损伤临界顶推压力为 0.3 MPa, 双侧离缝的损伤临界顶推压力为 0.4 MPa, 单侧窄接缝离缝使剩余粘结界面抵抗损伤能力减弱的程度要大于双侧窄接缝离缝. 随着顶推压力的增大, 损伤深度呈现递增的规律.

在相同顶推压力作用下, 单侧离缝的损伤发展速率要高于双侧离缝, 出现横向界面离缝时同样呈现相同的规律. 以宽接缝离缝为例说明, 单侧离缝时, 窄接缝左右两侧受力不均匀, 左侧宽接缝损伤主要集中在上部区域, 而右侧主要集中在下部; 由于损伤分布较为集中, 随着顶推压力的不断增大, 损伤区域快速发展. 相反, 当双侧宽接缝均出现离缝时, 左右两侧窄接缝受力较为均匀, 所以与单侧宽接缝离缝相比, 损伤区域发展速率较为缓慢.

定义轨道板-宽窄接缝粘结界面即将出现开裂时的纠偏位移为开裂临界纠偏位移, 以上共 9 种工况的开裂临界纠偏位移结果, 见表 2.

表 2 剩余粘结界面开裂临界纠偏位移

Tab. 2 Crack critical correcting displacement of remaining bonding interface

离缝类型	宽接缝开裂临界纠偏位移/mm	对应顶推压力/MPa	窄接缝开裂临界纠偏位移/mm	对应顶推压力/MPa
未出现离缝	1.94	0.70	—	—
单侧接缝离缝	2.12	0.75	1.76	0.65
双侧接缝离缝	2.30	0.80	1.94	0.70
单侧接缝与横向界面离缝	1.09	0.45	1.09	0.45
双侧接缝与横向界面离缝	1.40	0.55	1.09	0.45

当粘结界面完好时, 宽窄接缝的开裂临界纠偏位移为 1.94 mm, 此时顶推压力为 0.70 MPa. 当出现宽接缝单侧或双侧离缝时, 开裂临界纠偏位移上升至 2.12、2.30 mm, 对应的顶推压力为 0.75、0.80

MPa,这表明存在宽接缝离缝时,剩余粘结界面抵抗开裂的能力反而上升了;当出现窄接缝单侧或双侧离缝,剩余粘结界面抵抗开裂的能力略微下降。

当出现横向界面离缝时,宽、窄接缝抵抗开裂的能力都大幅下降。以宽接缝单侧接缝、单侧接缝与横向界面离缝为例,单侧接缝离缝的开裂临界纠偏位移为 2.12 mm,对应顶推压力 0.75 MPa,而出现横向界面离缝时,开裂临界纠偏位移下降至 1.09 mm,下降率达 48.6%,对应顶推压力下降至 0.45 MPa,下降率达 40.0%。

2.3 宽窄接缝粘结界面强度

轨道板-宽窄接缝的层间接触的实质是新、老混凝土的接触,研究表明,新、老混凝土的粘结强度为整浇混凝土强度的 60%~80%,在轨道板-宽窄接缝间的粘结界面损伤之后,粘结界面强度与新筑时的强度相比有所下降。在完好的宽窄接缝条件下,取粘结界面强度为 C55 混凝土强度的 60%、50%、40% 和 30%,分析不同粘结界面强度下纠偏作业损伤的扩展规律,结果如图 7 所示。

随着粘结界面强度的减小,损伤临界顶推压力呈现递减的规律,粘结界面强度每下降 10%,临界顶推压力随着下降 0.1 MPa。随着顶推压力的增大,损伤深度呈现递增的规律,4 种粘结强度下损伤的演变规律接近。

3 轨道板-砂浆层离缝扩展规律

轨道板-砂浆层离缝^[12]是轨道结构常见的病害



图 8 顶推压力 0.8 MPa 条件下的刚度下降率
Fig.8 Stiffness reduction rate of a 0.8 MPa pushing pressure

已经出现开裂的情况,由此可见,存在砂浆层离缝时,纠偏作业对砂浆层剩余粘结界面的影响很小,纠偏作业仍由轨道板宽窄接缝粘结界面控制。

若轨道结构状态进一步恶化,当轨道板-砂浆层粘结界面出现板边离缝,两侧轨道板-宽窄接缝又出现离缝时,对轨道结构分别施加 0.7,0.8,0.9 MPa 的顶推压力,250 mm 板边离缝状态下的结果如图 9

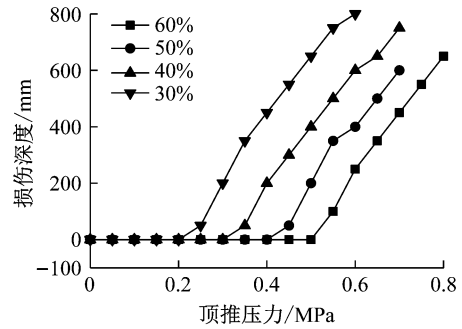


图 7 不同粘结界面强度下的损伤深度
Fig.7 Damage depth of different bonding strength

损伤之一,选取板边离缝进行研究,假定离缝均为横向贯通离缝。由于重力作用,离缝区域的轨道板与砂浆层还存在摩擦作用;未出现离缝的区域,轨道板与砂浆层间为粘结作用。基于此,对于离缝区域,轨道板与砂浆层间设置为摩擦接触,摩擦系数取 0.35^[13];对于未出现离缝区域,以内聚力单元模拟层间粘结。

以“生死单元”模拟砂浆层离缝,即在轨道板与砂浆层间切出薄层,将薄层内单元刚度设置为 0。以刚度下降率 S_{DEG}(以 S_{DEG} 表示)表征材料状态,S_{DEG} 取值为 0~1,取 0 时表示材料完好,取 1 时表示材料已经完全破坏失效。

由 2.1 节可知在宽窄接缝存在离缝时,开裂临界顶推应力的最大值为 0.8 MPa,设置板边离缝为 250、500 mm 两种工况,计算得到其在 0.8 MPa 顶推压力作用下的刚度下降率 S_{DEG},结果如图 8 所示。

刚度下降率 S_{DEG} 为 0,表明轨道板-砂浆层粘结界面未出现伤损,然而由 2.1 节可知此时宽窄接缝

所示。

当顶推压力为 0.7 MPa 时,剩余砂浆层粘结界面并无损伤,纠偏作业对粘结界面无影响;当顶推压力达到 0.8 MPa 时,剩余砂浆层粘结界面在板边四角出现损伤,最大刚度下降率 0.91,即当轨道板-砂浆层粘结界面板边离缝 250 mm,且两侧轨道板-宽窄接缝出现离缝时,以 0.8 MPa 的顶推压力进行纠

偏作业,将使剩余轨道板-砂浆层粘结界面产生损伤;当顶推压力增大至 0.9 MPa,损伤进一步加剧.

500 mm 板边离缝状态下的结果如图 10 所示. 当顶推压力为 0.7 MPa 时,轨道板-砂浆层粘结

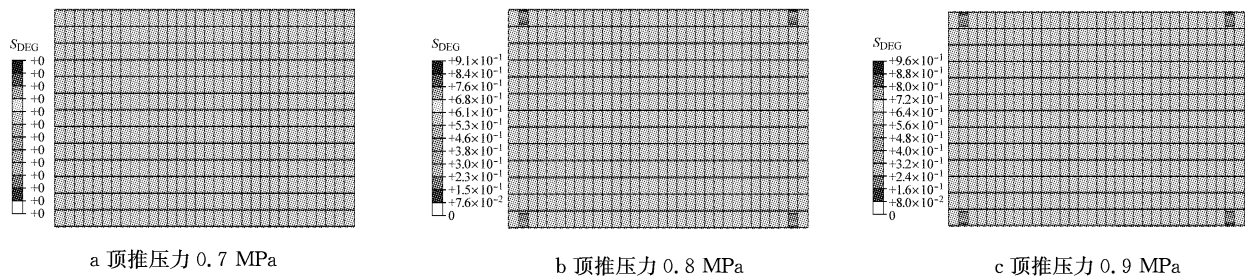


图 9 离缝 250 mm 条件下的刚度下降率

Fig. 9 Stiffness reduction rate of 250 mm separation

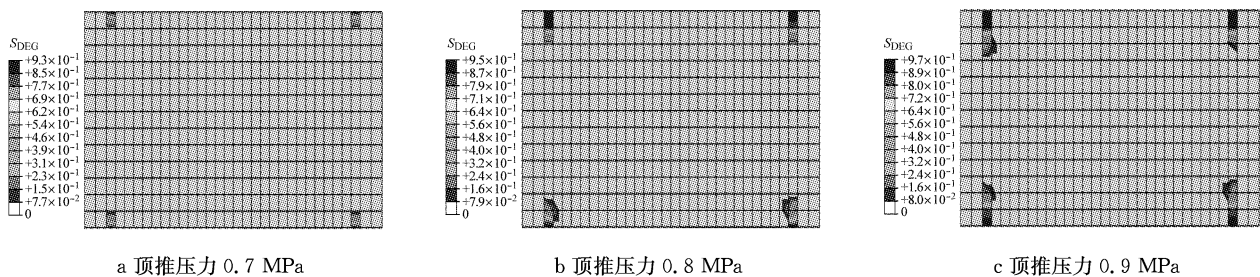


图 10 离缝 500 mm 条件下的刚度下降率

Fig. 10 Stiffness reduction rate of 500 mm separation

界面便开始出现损伤,损伤主要分布在剩余粘结界面的 4 个角,且随着纠偏顶推压力的不断增大,粘结界面损伤区域逐渐扩展.

综上所述,当轨道板-砂浆层粘结界面出现板边离缝,且两侧轨道板-宽窄接缝界面出现离缝后,纠偏作业将导致轨道板-砂浆层粘结界面损伤,这主要是因为顶推压力的作用下,轨道结构出现横向位移,未离缝区域受砂浆层粘结作用,轨道板位移与下部结构保持一致;而离缝区域只受摩擦作用,轨道结构与下部结构存在位移差,这种变形的不协调导致在粘结界面边界出现损伤.

相反,当轨道板与宽窄接缝未发生离缝时,各项推压力作用下,剩余砂浆层粘结界面均未出现损伤,这是因为此时板边砂浆层虽然出现离缝,但由于轨道板与宽窄接缝仍存在相互作用,这种相互作用可以大大减小剩余砂浆层粘结界面所受应力,使其不会受到损伤.

4 支承层裂纹扩展规律

在纠偏作业中,主要由纠偏区段中部以及解粘区边界附近的支承层承受拉力,且纠偏区段中部拉应力最大,因此对纠偏作业受支承层强度控制.由于支承层开裂是轨道结构常见损伤之一,因此研究纠

偏区段中部支承层裂纹^[14]在纠偏作业过程中的扩展规律.

从几何位置来看,裂纹存在横向、纵向和垂向三种基本形式,由于纵向裂纹方向平行于纠偏作业时支承层的拉应力方向,纠偏作业对纵向裂纹的扩展影响较小,因此仅对横向和垂向贯通裂纹形式进行研究.假定裂纹均为贯通裂纹,通过在裂纹尖端布置内聚力单元,以内聚力模型来分析支承层裂纹的发展规律.

4.1 横向贯通裂纹

分析不同裂纹深度的影响,取横向贯通裂纹深度分别为 20、40 mm,计算不同顶推压力下布置于裂纹尖端的内聚力单元刚度下降率 S_{DEG} . 如图 11 所示,当裂纹尖端 A 的刚度下降率 S_{DEG} 为 1 时,裂纹尖端 A 的内聚力单元已经完全失效,裂纹开始扩展;当支承层底部 B 的刚度下降率 S_{DEG} 为 1 时,裂纹已经扩展至支承层底部.

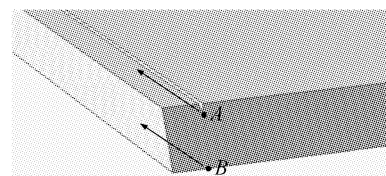


图 11 支承层横向贯通裂纹

Fig. 11 Transverse through crack of supporting layer

对不同裂纹深度下裂纹损伤发展规律进行分析,提取点 A 以内 1 000 mm 范围及点 B 以内 1 000

mm 范围的刚度下降率,结果如图 12 所示。

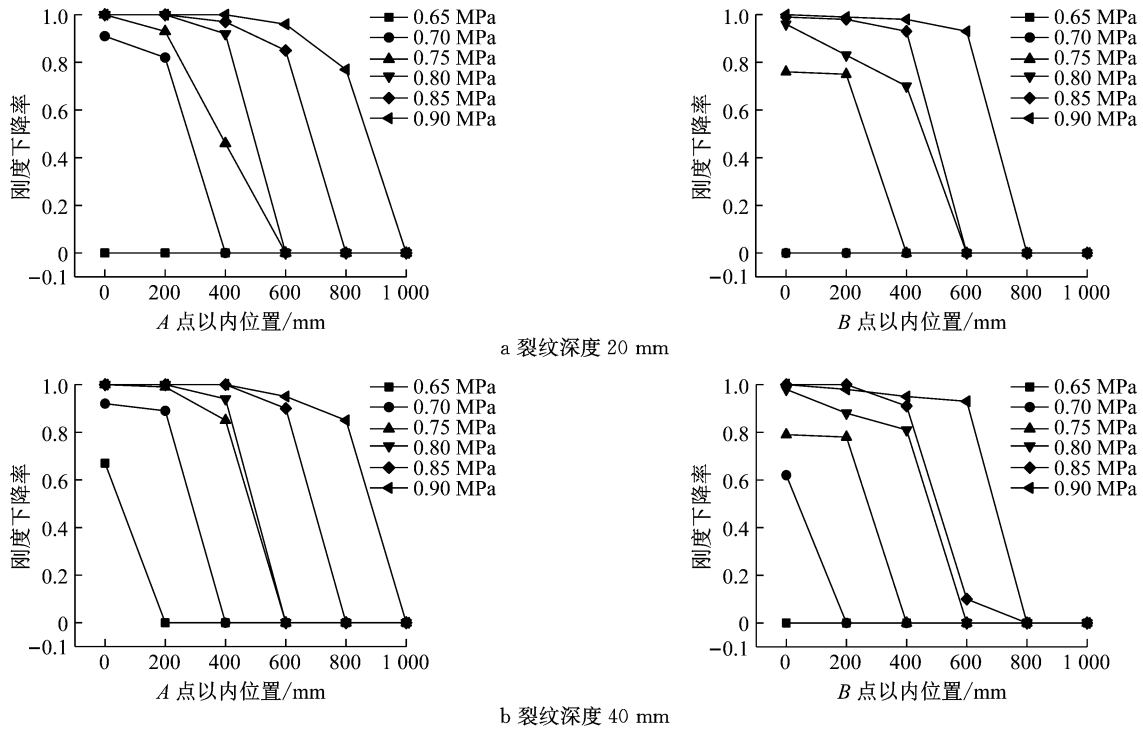


图 12 不同顶推压力下的刚度下降率

Fig.12 Stiffness reduction rate of different pushing pressures

当横向贯通裂纹深度为 20 mm 时,施加 0.65 MPa 的顶推压力,裂纹尖端处的刚度下降率为 0,说明内聚力单元完好,裂纹无扩展趋势,此时纠偏作业不会造成裂纹进一步扩展.当顶推压力增加至 0.70 MPa 时,在顶推对侧裂纹尖端出现损伤,损伤长度约为 370 mm,此时裂纹虽未出现扩展,但裂纹尖端已出现微裂纹.当顶推压力继续增加至 0.75 MPa,裂纹尖端最大刚度下降率已接近 1,横向贯通裂纹会出现局部开裂.当顶推压力达到 0.8 MPa 时,A、B 位置最大刚度下降率均达到 1,说明此时裂纹已扩展至支承层底部.当顶推压力达到 0.90 MPa 时,裂纹延伸至支承层底部的区域达到 450 mm.

从不同裂纹深度的对比来看,相同顶推压力下,随着裂纹深度的增加,裂纹尖端的损伤有加重的趋势.在 0.65 MPa 的顶推压力下,裂纹深度为 20 mm 时,纠偏作业对裂纹并无影响;当裂纹深度为 40 mm 时,纠偏作业将导致裂纹尖端出现损伤.

4.2 垂向贯通裂纹

取垂向贯通裂纹深度分别为 20、40 mm 时,计算不同顶推压力下布置于裂纹尖端的内聚力单元刚度下降率,如图 13 所示.

提取 B 以内 1 000 mm 以及 AB 方向的刚度下

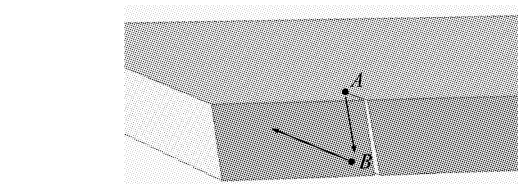


图 13 支承层垂向贯通裂纹

Fig.13 Vertical through crack of supporting layer

率,结果如图 14 所示。

当垂向贯通裂纹深度为 20 mm 时,施加 0.65 MPa 的顶推压力,裂纹尖端已出现损伤,但并未发生开裂,由于支承层上大下小,呈梯形状,底部的裂纹更靠近外侧,裂纹尖端损伤更为严重.当顶推压力增加至 0.70 MPa 时,支承层顶部位置裂纹出现损伤,而底部位置裂纹已发生扩展.顶推压力达到 0.75 MPa 之后,整个垂向裂纹将发生进一步扩展,随着顶推压力的增加,裂纹扩展深度随之增加.当顶推压力增大到 0.90 MPa 时,支承层底部裂纹扩展深度达到 200 mm 左右.

从不同裂纹深度的对比来看,相同顶推压力下,随着裂纹深度的增加,裂纹尖端的损伤有加重的趋势.在 0.65 MPa 的顶推压力下,裂纹深度为 20 mm 时,裂纹尖端仅发生损伤,裂纹进一步扩展;当裂纹

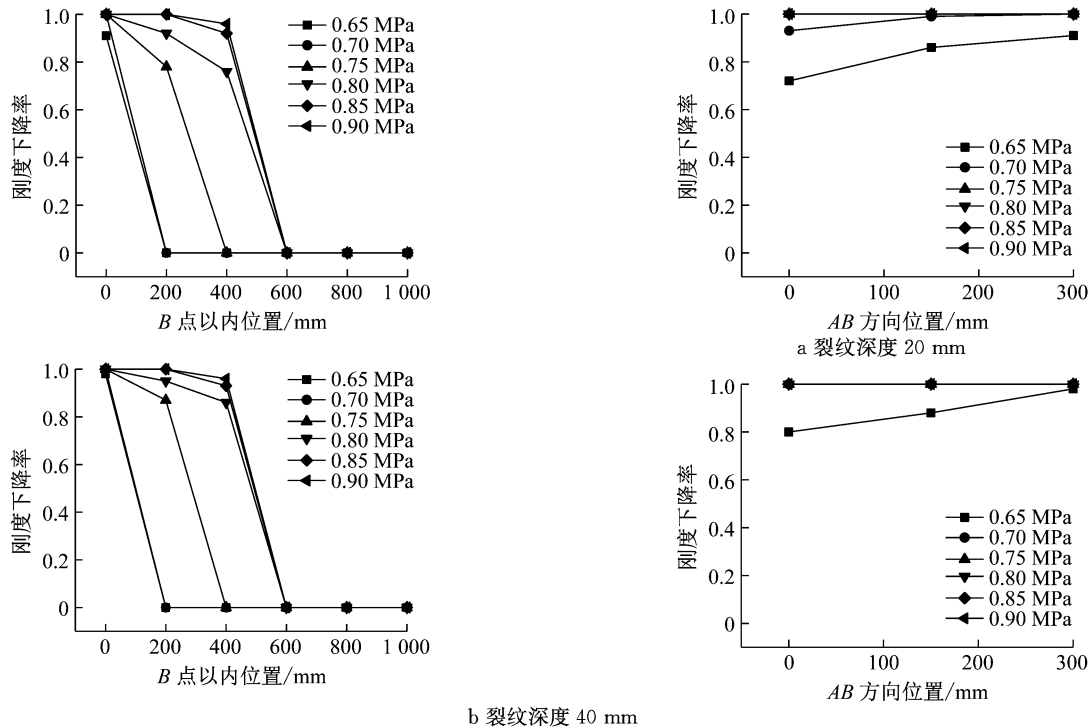


图 14 不同顶推压力下的刚度下降率

Fig. 14 Stiffness reduction rate of different pushing pressures

深度为 40 mm 时, 纠偏作业将导致支承层底部裂纹出现扩展。

5 结论

基于 CRTS II 型板式无砟轨道的注浆抬升纠偏工艺, 建立了路基上 CRTS II 型板式轨道纠偏作业有限元模型, 分析宽窄接缝离缝、砂浆层离缝和支承层裂纹在注浆抬升纠偏作业中的扩展规律, 得到以下主要结论:

(1) 宽、窄接缝离缝会减弱轨道板-宽窄接缝剩余粘结界面抵抗损伤的能力. 单侧离缝的损伤发展速率高于双侧离缝的损伤发展速率. 宽窄接缝粘结界面强度减小使得轨道板-宽窄接缝剩余粘结界面抵抗损伤的能力减弱。

(2) 当轨道板与两侧宽窄接缝粘结良好, 仅与砂浆层存在离缝时, 板边离缝对轨道板-砂浆层粘结界面损伤的影响很小. 当轨道板-砂浆层粘结界面出现板边离缝, 且两侧轨道板-宽窄接缝粘结界面出现离缝后, 纠偏作业将导致轨道板-砂浆层粘结界面损伤。

(3) 对于支承层横向贯通裂纹, 随着顶推压力的增加, 裂纹将发生扩展, 相同的顶推压力下, 裂纹深度越大, 裂纹尖端损伤越严重; 对于支承层垂向贯通裂纹, 随着顶推压力的增大, 裂纹将朝支承层内部

扩展, 扩展深度最后稳定在 400 mm 左右, 在相同的顶推压力下, 裂纹深度越大, 裂纹尖端损伤越严重。

结合上述分析与结论, 高速铁路养护维修部门在进行 CRTS II 型板式轨道纠偏作业时, 应重点关注拟纠偏区段的宽窄接缝病害情况, 宜在纠偏作业前对宽窄接缝病害进行修复. 在纠偏作业过程中应密切关注纠偏区段其他病害的形成与扩展情况, 一旦出现病害加剧趋势应停止纠偏作业, 以防止轨道结构的损伤恶化。

参考文献:

- [1] 赵国堂. 高速铁路无砟轨道结构[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
ZHAO Guotang. High-speed railway ballastless track structure [M]. Beijing: China Railway Press, 2006.
- [2] 徐伟昌, 许玉德, 谭社会, 等. 高速铁路无砟轨道线路质量等级管理[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
XU Weichang, XU Yude, TAN Shehui, et al. Track quality grade management of high-speed railway ballastless track [M]. Beijing: China Railway Press, 2016.
- [3] 肖军华, 王炳龙, 王长丹, 等. 高速铁路路基不均匀沉降及其控制[M]. 上海: 同济大学出版社, 2015.
XIAO Junhua, WANG Binglong, WANG Changdan, et al. Uneven settlement of high-speed railway subgrade and its control [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2015.
- [4] 徐伟昌, 李振廷, 王永华, 等. WJ-7 型大调量扣件地段轨道动力响应测试及分析[J]. 铁道标准设计, 2014(10):26.

- XU Weichang, LI Zhenting, WANG Yonghua, *et al.* Test and analysis of track dynamic response on the sections with WJ-7 fastenings of large adjustment[J]. *Railway Standard Design*, 2014(10):26.
- [5] 谭社会. 高速铁路无砟轨道线形纠偏技术进展研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2018(2):310.
TAN Shehui. State of lifting and inclination correction technique of high-speed railway ballastless track[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2018(2):310.
- [6] 邢小墨. 高速铁路无砟轨道抬升纠偏新技术研究[J]. *铁道建筑技术*, 2016(4):107.
XING Xiaomo. New technology for lifting and inclination correction of the high-speed railway ballastless track [J]. *Railway Construction Technology*, 2016(4):107.
- [7] 温希华. 高速铁路CRTS II型板式无砟轨道纠偏技术研究[J]. *铁道勘察*, 2017, 43(1):6.
WEN Xihua. Research on the deviation rectification technology for high-speed railway of CRTS II slab ballastless track [J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2017, 43(1):6.
- [8] 刘学毅, 苏成光, 刘丹, 等. 轨道板与砂浆粘结试验及内聚力模型参数研究[J]. *铁道工程学报*, 2017, 34(3):22.
LIU Xueyi, SU Chengguang, LIU Dan, *et al.* Research on the bond properties between slab and CA mortar and the parameters study of cohesive mode [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2017, 34(3):22.
- [9] ZHANG Z, PAULINO G H. Cohesive zone modeling of dynamic failure in homogeneous and functionally graded materials[J]. *International Journal of Plasticity*, 2005, 21(6): 1195.
- [10] HU N, ZEMBA Y, OKABE T, *et al.* A new cohesive model for simulating delamination propagation in composite laminates under transverse loads[J]. *Mechanics of Materials*, 2008, 40(11): 920.
- [11] 董佳佳. CRTS II型板式轨道宽窄接缝温度荷载下受力及损伤行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
DONG Jiajia. Research on damage mechanism of wide and narrow joints in CRTS II slab track structure under temperature load [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [12] 刘钰, 赵国堂. CRTS II型板式无砟轨道结构层间早期离缝研究[J]. *中国铁道科学*, 2013, 34(4):1.
LIU Yu, ZHAO Guotang. Analysis of early gap between layers of CRTS II slab ballastless track structure[J]. *China Railway Science*, 2013, 34(4):1.
- [13] 张广义. 砂浆充填层劣化对CRTS II型板式无砟轨道力学特性影响的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
ZHANG Guangyi. Study of the effect of cement asphalt mortar disease on mechanical properties of CRTS II slab ballastless Track[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [14] 朱胜阳, 蔡成标. 温度和列车动荷载作用下双块式无砟轨道道床板损伤特性研究[J]. *中国铁道科学*, 2012, 33(1):6.
ZHU Shengyang, CAI Chengbiao. Research on the damage characteristics of double-block ballastless rack bed slab under temperature and vehicle dynamic loads [J]. *China Railway Science*, 2012, 33(1):6.

~~~~~

(上接第768页)

- WEI Li, CHAI Shouxi, CAI Hongzhou, *et al.* Physical and mechanical properties of wheat straw and unconfined compressive strength of reinforced inshore saline soil with wheat straw[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(3): 93.
- [13] 璩继立, 俞汉宁, 江海洋, 等. 棕榈丝与麦秸秆纤维加筋土无侧限抗压强度比较[J]. *地下空间与工程学报*, 2015, 11(5): 1216.  
QU Jili, YU Hanning, JIANG Haiyang, *et al.* Comparison of unconfined compressive strength of soil reinforced by palm fiber or wheat straw fiber[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2015, 11(5): 1216.
- [14] 卢浩, 晏长根, 杨晓华, 等. 麦秆纤维加筋土的抗冲蚀性及其防护效果试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2017, 14(10): 2138.  
LU Hao, YAN Changgen, YANG Xiaohua, *et al.* Experimental research on anti-eroding property and protection effect of reinforced soil with straw fibers[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2017, 14(10): 2138.
- [15] 余沛, 柴寿喜, 王晓燕, 等. 麦秸秆加筋滨海盐渍土的加筋效应及工程应用问题[J]. *天津城市建设学院学报*, 2010, 16(3):161.  
YU Pei, CHAI Shouxi, WANG Xiaoyan, *et al.* Reinforcement effect and engineering application problems of littoral saline soil reinforced with wheat straw[J]. *Journal of Tianjin Institute of Urban Construction*, 2010, 16(3):161.