

上跨铁路桥梁转体结构施工技术分析

曾勇

(中铁十八局集团第一工程有限公司, 河北 涿州 072750)

摘要: 为分析上跨铁路桥梁转体结构施工技术, 依托淮滨至信阳高速公路息县至邢集段上跨京广铁路转体桥的实际情况, 分析了下转盘、球铰及上转盘施工和转体牵引系统等转体结构施工关键点, 并结合工程实际, 从转体不能正常启动, 转体过程中出现擦脚、加速及过转和牵引系统故障等方面提出施工中的问题及解决措施。转体结构施工难度比较大, 经对上述要点严格把控, 并解决好施工中的对应问题, 在不影响既有铁路正常运行的基础上, 实现上跨铁路桥梁转体结构施工的顺利完工, 保证了桥梁的安全、质量, 经济效益和社会效益显著, 值得在施工中借鉴及推广。

关键词: 铁路桥梁; 转体结构; 球铰; 滑道; 转体牵引系统

中图分类号: U445.4

文献标识码: A

Analysis on Construction Technology of Swivel Structure of Upper-span Railway Bridge

ZENG Yong

(First Engineering Co., Ltd. of China Railway 18th Bureau Group, Zhuozhou 072750, Hebei, China)

Abstract: In order to analyze the construction technology of the swivel structure of the upper-span railway bridge, combined with the actual situation of the swivel bridge spanning the Beijing-Guangzhou Railway on the Huaibin-Xinyang Expressway from Xixian to Xingji, the construction technology of the lower turntable, spherical joint and upper turntable was analyzed. According to the construction points of the swivel traction system, combined with the actual engineering, the problems encountered in the construction and the solutions were analyzed from the aspects of foundation pit protection, concrete hydration heat and installation of lower ball hinges and slideways. The construction of the swivel structure is relatively difficult, so it is necessary to strictly control each process and solve various problems encountered in the construction, so as to ensure the construction of the swivel structure of the upper-span railway bridge without affecting the normal operation of the existing railway. The task was successfully completed, and great economic and social benefits were obtained, which is worth promoting in the construction.

Key words: railway bridge; swivel structure; spherical hinge; slideway; swivel traction system

铁路桥梁转体结构施工技术和挂篮施工、预制架设法施工等技术相比, 可有效解决影响铁路桥梁施工中的各种环境因素, 并缩减施工工艺, 更好地保障施工工期和效率。而且在具体施工中, 无需借助支架就能完成, 可节约施工成本。转体法施工始于20世纪50年代, 最早被用于奥地利维也纳机场的多瑙河运河桥。我国于1977

年在四川遂宁首次使用平转法建成跨度为70 m的箱肋拱桥, 取得了良好效果。此后在我国很多桥梁工程中, 都采用了转体法施工技术, 因其有诸多明显优点, 在公路和铁路桥梁施工中被迅速推广使用, 转体部分的最大跨度和重量也在迅速增加。在淮滨至信阳高速公路息县至邢集段上跨京广铁路转体桥施工中, 采用了混凝土轴心转体

收稿日期: 2023-03-19

作者简介: 曾勇, 工程师, 本科, 研究方向为桥梁施工

工艺,和传统施工技术相比,具有操作便捷、桥梁整体承载力好、施工全过程更加安全等优势,非常契合现代化上跨铁路桥梁转体结构施工的要求。基于此,开展上跨铁路桥梁转体结构施工技术的分析研究就显得尤为必要。

1 工程概述

淮滨至信阳高速公路息县至邢集段上跨京广铁路转体桥,左右线上跨京广铁路上部结构均采用(45+45)m T型刚构预应力混凝土+(30+30)m 预应力混凝土装配式预应力混凝土箱梁。采用钻孔灌注桩基础,转体法施工,转体长度为(40+40)m,左右线分布在京广铁路西侧、东侧,现浇完成后同步逆时针转体86.5°就位。左17#、右15#主墩转体承台为台阶式,分上下两层。上承台高2.0 m,顺桥向长8.8 m,横桥向宽8.8 m;下承台为矩形,顺桥梁宽14.4 m,横桥向长14.4 m、高4.7 m。承台转体结构由下转盘、球铰、上转盘、转体牵引系统组成。箱梁顶板宽14.4 m,底板宽9.4 m,两侧悬臂板长各2.5 m。全桥主梁共分9个梁段,0#块长16 m,1#及1'#梁段长10 m,2#及2'#梁段长10 m,3#及3'#梁段长12 m,转体就位后现浇段4#及4'#梁段长4.94 m。主梁0#块采用钢管支架施工,1#~4#块梁段采用满堂支架施工。

淮滨至信阳高速公路息县至邢集段工程上跨京广铁路立交桥位于李新店至明港区间,该区间每日开行列车117对,线路允许最高速度为160 km/h。桥梁转体前后示意图如图1和图2所示。

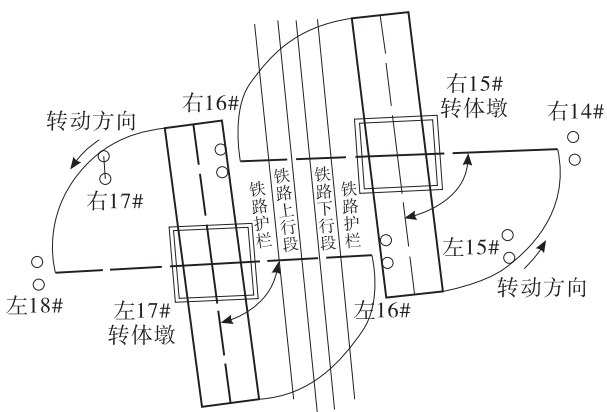


图1 桥梁转体前示意图

2 转体结构施工技术应用的重难点

本工程左线17#和右线15#主墩的基础承台为台阶式,其中上承台的高度为2.0 m,顺桥向的

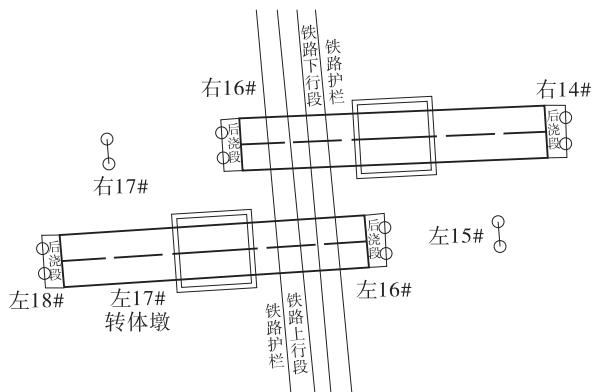


图2 桥梁转体后示意图

长度为8.8 m,横向桥梁的宽度也是8.8 m。下承台呈现矩形,高度为4.7 m,顺桥梁的宽度为14.4 m,横桥的长度为14.4 m。整个承台的转体结构包括下转盘、球铰、上转盘、转体牵引系统。在上跨铁路桥梁转体结构施工中有效保障下转盘的良好支撑效果,促使球铰能够稳定转动;保证上转盘牵引布置索的合理和有效性,以及转体引起系统能够稳定运行,是本工程施工的重难点,也是施工必须需要重点把控的问题。

3 转体结构施工的关键要点

3.1 下转盘支撑施工

下转盘的主要作用为转体结构支撑,在进行转体结构施工前,先安装转体支撑和转体设备。转体支撑应牢固可靠,符合设计要求,能够有效承受上部转体结构传递下来的荷载。转体安装结束后,下转盘和上转盘可共同作为桥梁转体的基础。为保证下转盘拥有足够的承载力,案例工程采用C50商品混凝土来浇筑下转盘,在下转盘之上布设转动系统,包含保险撑脚环形滑道、下球铰、转体拽拉千斤顶反力座等^[1]。

3.2 球铰及滑道安装

球铰是桥梁转体结构施工的关键,决定了桥梁转体结构能否顺利实施。案例工程规模比较大,选择了直径为3.4 m的大球铰。球铰由两块钢制球面板共同组成,但需保证上面板为凸面,下面板为凹面,相互嵌固在下转盘顶面之上。首先安装下球铰骨架,在正式施工时采取高效的方法和措施,以提高安装球铰定位骨架的精度,降低球铰安装时的调整工作量。在施工过程中,使用测微器来控制骨架顶面相对高差,将高差控制标准提升到1 mm内,中心偏差为1 mm内。为了避免在浇筑混凝土过程中出现偏移,对球铰的

安装造成影响,应将骨架与预制的定位钢筋及角钢焊接在一起。在骨架结构完成后,经检验确认无误,才能进行二次浇筑。将滑道骨架的中心与球铰的中心对中重合,且偏离理论中心不超过1 mm,倾斜度不超过3%。其次,利用起重机将下球铰吊起到位,到位后将其与骨架相连,戴上螺母,对其进行对中、调平^[2]。利用全站仪坐标线放样的方法,对中下球铰中心点的位置进行控制,其安装精度控制为:顺桥方向 ± 1 mm,横桥方向 ± 1 mm;水平调节首先用普通水准仪进行初步调平,再用精确水准仪进行精确校正。具体做法是:在球铰圆周上取10个点进行观测对比,使其周围顶面各点相对误差不大于1 mm,球铰调整校平由调节螺母实现。最后进行综合检查,确定在允许误差范围内,将调整螺栓固定。

在进行滑道精度控制时应保证转体牵引力满足要求,施工人员还应应对两个相邻滑板高度差进行控制并保证两者连接位置的平滑度与平整度。环形滑道安装在钢撑脚的下方,应由专业厂家生产,运输到施工现场之后再行分段拼装,盘下通过调整螺栓调整后再固定。控制滑道的宽度在1.1 m左右,半径不小于3.7 m。为最大限度地保证上跨铁路桥梁转体结构施工的平稳性,让撑脚转体时能够在滑道中流畅滑动,环道、球铰支架必须牢固定位,角钢顶面相对平整,最大高差不应超过2 mm。当钢滑道加工完成后,必须切实做好防腐和防锈处理,安装完成后还要进行防尘处理,并在滑道顶面设置好排气孔,在进行混凝土浇筑时要对密实度不足的位置进行浆液填充,以保证滑道的密实性。本工程下球铰及滑道安装现场如图3所示。



图3 下球铰及滑道安装

下盘混凝土灌注完成,且上球铰安装完成后,要及时跟进撑脚施工。上转盘中同时设置了8个撑脚,各撑脚均为双圆柱形,在上转盘下部,



图4 撑脚安装

铺有24 mm厚钢板,双圆柱由2根 $\varnothing 800$ mm $\times$ 24 mm钢管构成,全桥面撑脚钢管内注有C50微膨胀混凝土。为保证施工质量和效率,在施工中,撑脚全部在工厂预制完成,再用平板车运输到施工现场进行安装。撑脚和滑道之间如果存在间隙,用标准石英砂进行填充^[3]。为防止空隙间的标准石英砂流失,砂垫层外侧使用 $\angle 50$ mm $\times$ 50 mm $\times$ 5 mm角钢制作成的钢外模。转体前在滑道面内铺垫聚四氟乙烯板,并在滑板与滑道的接触面涂润滑脂。撑脚安装如图4所示。

3.3 牵引索上转盘施工

工程在牵引索的上转盘上布置了2条牵引索,使整个转体过程始终处于立体化受力状态。上转盘为圆形转台,内镶上球铰、撑脚、牵引索锚具,外围缠绕牵引索钢绞线。上转盘模板支撑体系采用无缝钢管支架,底模采用竹胶板,转台可将球铰、撑脚与上转盘相连接。在转台中预埋转体牵引索,预埋端使用P型锚具,同一对索的锚固端在同一条直线上,并关于圆心对称,保证每根索的预埋高度和牵引方向一致^[4]。每个缆索嵌入转台的长度必须超过400 cm,以确保每对缆索的出线点关于转台中心对称。将露出的索绳绕转台一圈,分别放置在埋设的钢筋上,以防损坏或锈蚀。上转盘牵引索布置图见图5。

3.4 转体牵引系统施工

转体牵引系统是转体结构施工动力系统,案例工程双幅转体牵引系统包含4套ZLD200型液压连续转体千斤顶、4台液压泵站以及2台主控台,采用高压油管和电缆线进行连接,形成了2套转体动力系统,每套连续牵引千斤顶的公称牵引力(前后顶)为2000 kN,包含前后2台千斤顶,且在每台千斤顶(前、后顶)的前端各布设一个夹持装置。在具体的施工过程中,通过拉动锚固并缠绕在直径840 cm转台周面上的19 -

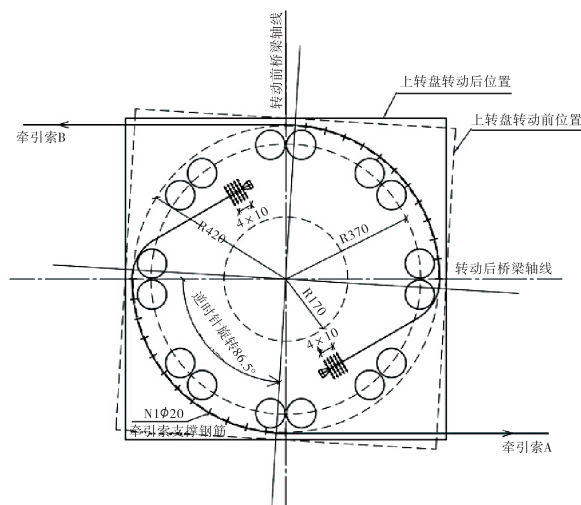


图5 上转盘牵引索布置图

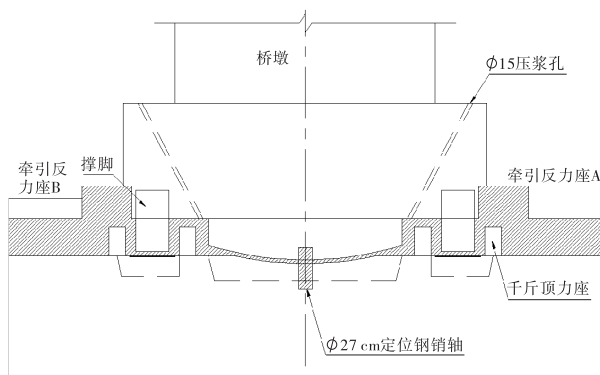


图6 承台转体结构示意图

Φs15.2钢绞线，实现转体结构的稳定转动。具体的承台转体结构如图6所示。

在转盘两边分别平行对称设置两台连续千斤顶，千斤顶的中心线需与上转盘的外圆切入，其中心线高度与上转盘埋入钢绞线的中心线保持一致。根据要求将装置安装好，连接主控台、泵站和千斤顶间的信号线路，同时连接泵站和千斤顶间的油路，连接主控台和泵站的电源。设备空载试运行，检查设备运行是否正常。为防止钢绞线解旋力使得千斤顶活塞旋转，造成牵引索扭成一束，在连续牵引油缸反力座设钢绞线分丝板，分丝板应与反力座相对固定，不得转动，千斤顶与牵引反力座间分丝钢板厚度不小于20 mm，分丝板空洞做圆角处理，避免钢绞线损伤^[5]。

转体索引力、安全系数计算，转体总重量 W 为 65 000 kN。转体结构的牵引力计算公式如下：

$$T = 2/3(R \times W \times \mu)/D \quad (1)$$

R —球铰平面半径， $R = 1.7$ m； W —转体总重量， $W = 65\,000$ kN； D —转台直径， $D = 8.4$ m；

μ —球铰摩擦系数， $\mu_{\text{静}} = 0.1$ ， $\mu_{\text{动}} = 0.6$ 。

计算结果：启动所需的最大牵引力 $T = 2/3 \times (R \cdot W \cdot \mu_{\text{静}})/D = 877.0$ kN，转动所需的最大牵引力 $T = 2/3 \times (R \cdot W \cdot \mu_{\text{动}})/D = 526.2$ kN。采用两台 ZLD 2000 kN 液压千斤顶同步自动牵引，启动时储备系数 $K = 2000$ kN/877 kN = 2.28，转动时 $K = 2000$ kN/526.2 kN = 3.8。

钢绞线的安全系数：本工程在桥梁转体结构施工中，牵引锁采用了 19-Φs15.2 钢绞线，标准强度为 $f_{yp} = 1860$ MPa，每束根数 $n = 19$ ，单根截面积 $A = 140$ mm²。钢绞线锚下控制应力： $f_k \leq 0.75 f_{yp} = 0.7 \times 1860 = 1302$ MPa；单束钢绞线许用拉力 $[T] = n A f_k = 19 \times 140 \times 1302 = 3463.32$ kN > $T = 877$ kN；安全系数： $K = [T]/T = 3463.32/877 = 3.94$ 。计算得出千斤顶动力储备和钢绞线的安全系数均符合工程施工的要求。

3.5 转体结构施工步骤

转体结构施工要求比较高，各步骤之间具有很强的衔接性。在案例工程转体结构施工中，为最大限度上保证施工质量和安全性，具体施工步骤如下。

(1) 下承台施工。下承台第一次混凝土浇筑完成后进行养护，强度达标后，进行下转盘球铰和滑道安装，安装完成后及时检验并调整，确认达标后，进行承台第二次混凝土浇筑^[6]。

(2) 进行上转盘和下承台施工。下承台第二次混凝土浇筑完成且强度达标后，及时进行下球铰聚四氟乙烯滑块、上球铰、上转盘等结构施工。接着进行上转盘和上承台混凝土浇筑。

(3) 墩身施工。安装支架和墩身模板，绑扎墩身钢筋，做好和梁体预留钢筋，现浇混凝土。

(4) 支架安装、预压和现浇梁、桥梁护栏、钢结构防落物网施工。在钢管支架及脚手支架安装完成后预压，合格后，在主梁支架上进行钢筋绑扎、模板安装、混凝土浇筑、预应力安装及张拉，接着进行桥梁护栏、钢结构防落物网施工^[7]。

(5) 拆除主梁支架，桥梁水平转体，由于结构受空间位置限制，转体旋转就位必须平稳进行。实现铁路的跨越，完成墩与承台的固结。

在桥梁转体施工中，为充分发挥桥梁转体施工的优势，在正式施工前，对滑道进行全面打磨和清理，去除杂物，为球铰运动清理阻碍。在滑道中铺设一层四氟板。在上部转盘上粘贴转动的刻度和指针，以便快速读取指针度数，计算出梁体旋转的角度（见图7）。通过梁体的称重试验，

精确测量出梁体的不平衡重,按照实际测量的结果,对梁体进行配重处理,以消除不平衡状态,保证桥梁转体高效、安全、有序完成。在旋转过程中,在梁端距设计位置 1.0 m 左右,利用点动减速操纵,并与测量员紧密合作,获得点动操纵下的最大圆弧长度值。在进行点动操作和精确定位之前,必须先对上部转体结构进行水平矫正。在超载时使用转体限制器,在上盘下设置千斤顶和配重调整纵横向标高^[8]。顶面高程允许偏差 15 mm,合拢前两悬臂端相对高差的允许偏差,为合拢段长的 1/100,且不大于 15 mm。



图7 指针和刻度盘图

4 转体结构施工问题和解决措施

4.1 无法正常启动

经校核计算,在正常运行条件下,2 台 ZLD200 型千斤顶均能满足正常启动要求。如果在第一次启动 ZLD 牵引系统时,因为其它原因,2 台千斤顶加载后不能正常启动,可以利用 2 个已安装好的助推系统千斤顶对其进行均匀的助推加力,使得结构旋转。但若在 ZLD 牵引系统的 2 台千斤顶和 2 个助推系统千斤顶都加载的情况下,转动体仍无法正常旋转,需检查是否有异物卡住撑角和环道的接触点,是否是环道上坡,这时可取出异物或采用 ZLD 的前顶和后顶同时启动,采用手动增大牵引力,使其正常转动。

4.2 牵引系统故障

在旋转过程中,当牵引力装置出现故障时,如果是因为张拉端的反力梁受力变形太大,可以通过提高反力梁受力的刚性来进行处理;如果是因为在张拉端出现锚定端滑束,而钢丝绳出现断裂,可以采取加大钢丝绳数量,在张拉前对每个钢丝绳单独进行应力预紧,以及在施工过程中对埋设的钢丝绳加强防护等措施进行处理;如果发现是施工机械发生故障,要立即找出原因,采取维修或更换备件的办法来解决。

4.3 在转体过程中出现擦脚、加速及过转

试转及转体前应先确定滑道及撑脚间留有间隙,且无杂物,若有杂物需提前清理并涂抹黄油后再进行转体施工。若出现撑脚压死,在特殊情况下,可采用大吨位竖向千斤顶适当地顶进梁体,使撑脚与滑道间脱空,或拆除局部撑脚滑靴钢板的办法^[9]。

梁体旋转突然加快:当梁体转动时,观测人员如果发现旋转速度突然加快,要及时向指挥长报告旋转停止,并检查滑道是否有部分下坡现象,如有,要减慢牵引,使旋转的速度减慢,完成下坡部分;如果由于平台操作错误,使牵引力急剧增加,应将牵引力降至小于 0.02 rad/min。

连续梁过转:根据转体角度进行测量,在转盘上标注撑脚转过位置,当最后一根撑脚即将到位时,在反力座一侧放置 I20 工字钢对其限位,防止转体到位后转体部分继续前移。同时转体到位后在撑脚与滑道钢板之间采用楔铁楔紧并固定。当梁体发生过转时可以采用过转反推混凝土反力墩反顶实现反向转动,反力墩与助推反力墩共用,需要助推或反推时,在反力墩一侧的滑道上焊接 I40 工字钢,通过备用千斤顶反顶实现过转情况的纠偏。

5 结语

上跨铁路桥梁转体结构施工难度比较大,影响施工质量和安全的因素比较多。本文结合工程实例,分析了上跨铁路桥梁转体结构施工技术。在淮滨至信阳高速公路息县至邢集段上跨京广铁路转体桥施工中,通过把控下转盘、球铰滑道安装精度、上转盘施工、转体牵引系统等施工要点,借助 2 台助推系统千斤顶均匀加力,使结构正常转动,降低牵引力来控制转体突然加速,并采用转盘限位装置控制转体结构过转,成功解决转体结构施工中的重难点问题,确保了上跨铁路桥梁转体的顺利实施,将对铁路运输的影响降到了最低,同时保证了桥梁的安全、质量,为类似桥梁的施工提供了有益的实践经验。

参考文献:

- [1]王丰仓,赵香玲,王安东.上跨高速铁路特大桥转体施工技术应用研究[J].甘肃科技,2021,37(15):97-98,166.
- [2]张文进,曹文.上跨铁路转体桥梁设计与施工关键技术[J].城市道桥与防洪,2021(9):125-128,18.

- [3]柳宏伟.大型天桥桥梁工程支架承载力分析与支架应用[J].浙江水利水电学院学报,2021,33(5):61-64.
- [4]张敏,李梦微,李盼,等.重庆铁路转体桥施工力学特性分析及监控[J].安阳工学院学报,2021,20(2):52-58.
- [5]王刚.铁路桥梁工程承台深基坑施工及安全防护[J].浙江水利水电学院学报,2022,34(4):62-66.
- [6]张少硕,魏喜超,姚传勤,等.公路桥梁上跨既有铁路墩底转体施工技术[J].建筑技术,2021,52(11):1334-1337.
- [7]丁仕洪.96m钢-混组合桁架梁桥异位成型及转体施工技术[J].桥梁建设,2020,50(1):116-120.
- [8]陈海南,陈辉华,卢晓栋.跨既有铁路线桥梁转体施工安全影响因素及事故致因机理[J].铁道科学与工程学报,2020,17(6):1595-1602.
- [9]傅安民.高速铁路(90+200+90)m连续刚构拱拱肋施工方法研究[J].铁道建筑,2021,61(6):14-19.

(上接第17页)

- [19]卢海静,王磊,翟国良,等.植物根-土复合体原位剪切试验研究现状及其进展[J].中国水土保持,2013(7):42-46,77.
- [20]刘俊.植物根系分布对边坡稳定性的影响[J].人民珠江,2020,41(4):140-145.
- [21]何鑫南,董晨霄,耿嫣然,等.常见护坡植物的根土复合体力学特性分析[J].山西建筑,2021,47(8):68-70.
- [22]陈攀,葛永刚,孙庆敏,等.根-土复合体抗剪强度影响因素研究[J].应用力学学报,2024,4:1-8.
- [23]刘宇飞,赵燚柯,杨苑君,等.2种草本植物混播根系对土体抗剪强度的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(3):81-88.
- [24]刘薇,杜文亮,苏禹,等.植物根-土复合体原位剪切试验装置的设计与分析[J].农机化研究,2017,39(1):82-86.
- [25]刘明维,傅华,吴进良.岩体结构面抗剪强度参数确定方法的现状及思考[J].重庆交通学院学报,2005(5):65-67.
- [26]周雨奇,张志远,王颖慧,等.浅层土坡草根加筋土原位剪切与室内直剪试验比较研究[J].科技创新与应用,2017(20):50-51,53.
- [27]李东彪,朱磊.穿沙公路边坡植被根系固土力学特征比较研究[J].路基工程,2022(1):8-13.
- [28]BURYLO M, HUDEK C, REY F. Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous slopes (Southern Alps, France) [J]. Catena, 2011, 84(1/2):70-78.
- [29]DING H, XUE L, LI L, et al. Influence of Root Volume, Plant Spacing, and Planting Pattern of Tap-like Tree Root System on Slope Protection Effect [J]. Forests, 2022, 13(11):1925.
- [30]POLLEN N, SIMON A. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model [J]. Water Resources Research, 2005, 41(7).
- [31]朱锦奇,王云琦,王玉杰,等.基于植物生长过程的根系固土机制及Wu模型参数优化[J].林业科学,2018,54(4):49-57.
- [32]LEUNG F T Y, YAN W M, HAU B C H, et al. Root systems of native shrubs and trees in Hong Kong and their effects on enhancing slope stability [J]. Catena, 2015, 125:102-110.
- [33]李雪尔,谢春燕,李岩,等.植物根系护坡的有限元数值分析[J].西南师范大学学报(自然科学版),2018,43(2):76-82.
- [34]POLLEN N, SIMON A. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model [J]. Water Resources Research, 2005, 41(7):226-244.
- [35]嵇晓雷,杨平.基于植被根系分形维数的生态边坡位移场研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(6):1462-1468.
- [36]SAIFUDDIN M, NORMANIZA O. Rooting characteristics of some tropical plants for slope protection [J]. Journal of Tropical Forest Science, 2016:469-478.
- [37]LI Y, Wang Y, Ma C, et al. Influence of the spatial layout of plant roots on slope stability [J]. Ecological Engineering, 2016(91):477-486.