

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.06.019

海绵城市理念下透水铺装生态功能浅析

卜政滔

(成都农业科技职业学院, 四川 成都 611130)

摘要: 透水铺装作为 LID 技术系统的源头控制措施之一, 具备降低城市内涝风险、缓减城市热岛效应、改善道路周边声环境、削减径流污染等多种生态功能。分析了透水铺装四项主要生态功能的基本原理、影响因素、应用效果等, 并提出了透水铺装未来的主要研究与发展方向。以为后续透水铺装在生态环保方面的研究与设计提供一定借鉴和参考。

关键词: LID 开发; 透水铺装; 生态功能; 海绵城市

中图分类号: U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2024)06-0074-05

0 引言

随着城市化进程的不断推进, 各个建设项目的陆续上马, 导致土地利用类型不断发生变更, 城市不透水下垫面面积的持续增长将直接导致地表径流系数、地表径流总量和峰值流量的增加, 间接导致城市雨岛与热岛效应、内涝概率、道路交通声环境污染、地表径流污染等一系列的城市生态环境恶化。统计数据表明, 自 2019 年以来国有建设用地供应面积持续增长, 2022 年国有建设用地供应 $7.66 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 同比增长 10.9%, 见图 1。以 2022 年为例, 国有建设用地供应面积中, 基础设施及其他用地的占比为 59.8%, 建设用地的供应结构见图 2。可见, 基建项目用地在整个建设用地中占据主导地位, 这就意味着每年都会新增大量的公共建筑、交通运输、各类型广场与公园等建设项目, 由于用地类型的改变使得城市下垫面的透水性能发生改变。大量工程实践和研究表明, 城市下垫面的加速硬化是打破既有城市水循环机制和加速城市生态环境恶化的重要原因。城市透水铺装作为一种户外地面铺装材料, 目前广泛应用于各级城市道路、各类型的城市公园与广场、商业步行街、建筑小区、露天停车场等众多场所。透水铺装是指一种既具有渗透功能又满足路用功能的铺面结构形式, 主要包括三种类型: 透水沥青混凝土

铺装、水泥混凝土铺装和透水砖铺装。由于透水铺装材料内部存在大量的连通空隙, 材料的大空隙结构决定了透水铺装具有良好的透水透气功能、储滞保湿功能、降温降噪功能以及雨水径流净化功能等良好的生态功能。透水铺装作为 LID 技术系统的源头控制措施之一, 对降低城市内涝风险、缓减城市热岛效应、改善道路周边声环境、削减径流污染等城市生态问题都具有较好的解决效果。

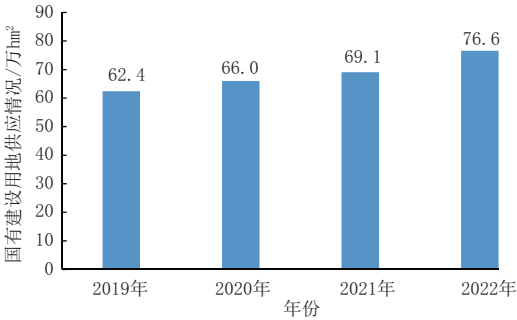


图1 2019—2022年国有建设用地供应情况(来源:自然资源部)

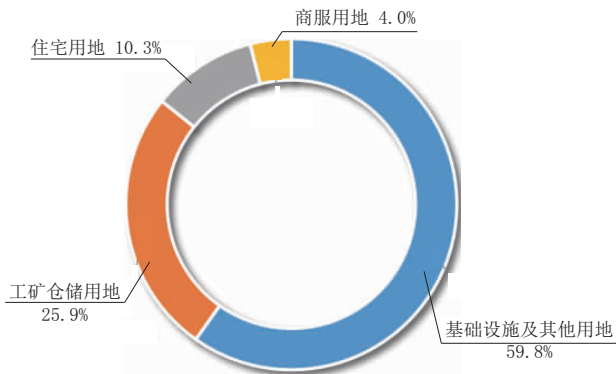


图2 2022年国有建设用地供应结构(来源:自然资源部)

1 降低城市内涝风险

由于土地利用类型的变化, 原有农田、湖塘、沟渠

收稿日期: 2023-08-02
基金项目: 成都市农业科技职业学院科研项目(22ZR212): 海绵城市生态步道路面结构优化研究
作者简介: 卜政滔(1978—), 男, 学士, 高级工程师, 从事道桥工程的教学、科研与工程设计工作。

与洼地、菜地、草地及林地等被硬化地面取代,下垫面的调蓄作用减弱,导致雨水径流的汇流时间缩短、峰现时间前移、径流总量与峰值流量增大,城市化对开发地块既有产汇流特征的影响见图 3。在此过程中,倘若原有的排水河道与沟渠、具备蓄滞功能的池塘以及可渗地表所产生的滞蓄水量和入渗量得不到有效补偿时,根据水量平衡原理可知,当有效降雨量超过既有排水系统的承受能力时,便会出现积水或积涝现象,即内涝。但值得注意的是,并非一出现积水现象就判定为内涝,只要积水深度和最大允许退水时间均满足规范要求,那么就不应判定为内涝。从水文学角度分析,若某区域的径流总量保持不变,而地面硬化必然导致下渗量和洼储量的减少,要维持开发前后的该区域的外排量不变,那么就必然要增设备渗透或蓄滞功能的 LID 设施;同理,若峰值流量或峰现时间不变,则同样也需要增设与之相适应的 LID 设施进行调节。完整的理解海绵城市与 LID 的概念,应从海绵城市的内涵入手,海绵城市概念至少包含三个方面的内容:最大限度的保护既有城市生态系统;对已破坏或受损的生态系统实施修复;低影响开发 LID。就内涵而言,海绵城市包含了 LID 开发的概念范畴,属于海绵城市的子集。低影响开发 LID 属于源头控制措施,旨在通过对下垫面在雨水渗透、蓄滞等功能方面的措施实施,以达到减小对开发地块产汇流特征的改变。常见的 LID 治涝措施包括下渗措施、蓄水措施和滞水措施三类。其中,下渗措施主要包括透水铺装、城市绿地、渗井及渗透塘等,通过增强降雨对地下水的补给能力,从而达到减小径流总量和降低流量峰值的目的。龚应安等^[2]学者的研究表明,透水性铺装替代传统铺装时可增加雨水下渗量且雨水下渗率与降雨量基本呈线性关系。晋存田等^[3]学者研究了透水砖对城市雨洪的影响,并认为透水砖能有效减少洪峰流量与径流系数。透水铺装主要包括透水沥青混凝土铺装、水泥混凝土铺装和透水砖铺装三种类型,三者间的功能差异及选用原则见表 1。蓄水措施主要是指小区、公园、广场等场所内修建的蓄水池以及城市水系(内湖与内河等)等能蓄存一定径流量的设施,该部分流量通常是不计入城市雨水系统的,至于蓄水措施可对某区域的地表径流产生多大影响,主要取决于蓄水措施的有效容积。滞水措施主要是指各类生物滞留带、湿地、下凹绿地等能对雨水产生滞留和调节作用的措施,该措施能延缓径流形成,从而达到影响流量峰值的目的。

的。雷向东等^[4]学者研究了绿色屋顶、生物滞留池、透水铺装三种单项 LID 设施对城市内涝的影响,当暴雨重现期较大时,对洪峰削减率、峰现时间延迟和总流量削减率进行了对比,其中透水铺装的效果最好。值得注意的是,这些单项设施的功能往往并不是单一的,如透水铺装除了具备渗透功能外,还具有蓄滞功能和雨水净化等功能,在工程实践中应注重不同设施间的相互组合,在一个开发地块内几乎不可能只采用某一单项设施,往往都是不同设施的组合系统。对某一已知面积的地块来说,在城市规划阶段就必须控制不透水面积的占比,在设计阶段应合理确定渗透设施、蓄水设施等面积或容积,以便确定在规定设计重现期的外排流量。工程实践经验表明,设计中没有考虑 LID 设施的排水设计可以比考虑了 LID 设施的排水设计所产生的外排流量大 30%以上。很明显,科学的、综合的采用各类 LID 设施,可有效降低城市内涝风险。

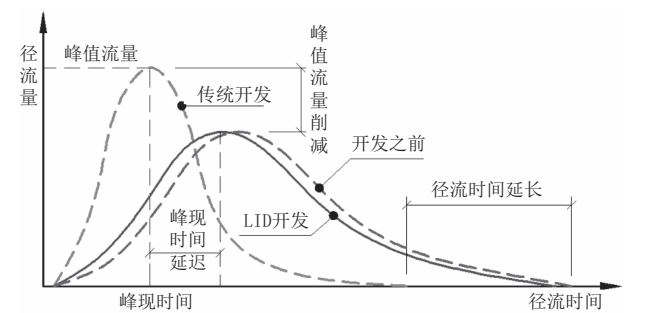


图 3 城市化对区域产汇流机制的影响^[4]

表 1 城镇道路低影响开发设施选用表

透水铺装	功能			控制目标			污染物去除率(以SS计,%)
	补充地下水	削减峰值流量	净化雨水	径流总量	径流峰值	径流污染	
透水沥青混凝土	○	☆	☆	☆	☆	☆	80~90
透水水泥混凝土	○	☆	☆	☆	☆	☆	80~90
透水砖	★	☆	☆	★	☆	☆	80~90

注:★—强;☆—较强;○—弱。

2 缓减城市热岛效应

城市热岛效应(UHI)是指市区地表温度明显高于郊区地表温度的现象,热岛效应的强弱可用热岛强度(UHII)来表征,即 $UHII = T_u$ (城区地表温度,K) - T_r (郊区地表温度,K)。20 世纪 80 年代以来,随着城市化进程的不断推进,城市下垫面不透水面积持续增长,下垫面热容量变大、反射率减小,储存太阳热辐射的能力增强,导致城市地表气温不断升高,使

得城市热岛效应不断加剧。有文献研究表明,20 世纪 50 年代以来特大城市的热岛效应影响为每 10 a 温度上升 0.05~0.11℃;20 世纪 80 年代以来每 10 a 温度上升 0.2~0.30℃^[5]。同时,人类活动、交通运输和工业生产等也会伴随着大量的热释放,也是促进了城市热岛加剧的原因之一。有研究表明,城镇人口数量、水电消耗量等与城市热岛效益之间存在明显的正相关关系,表明了人类活动对城市热岛效应的形成有重要影响^[6]。城市热岛效应促进了城市气温度升高,使城市上空形成热气流,随着热气流厚度的不断增加,大气中含水量和不稳定性也随之增加,同时在城市钢筋混凝土“森林”的地形效应影响下,导致城市区域的降雨频次和降雨强度明显高于郊区的现象,称为城市雨岛效应。有研究表明,城市的热岛效应的增强,使城市年降水量增加 5%以上,汛期雷暴雨的频次和雨量增加 10%以上^[7]。从而可知,城市热岛效应可间接导致城市积水风险的增高,即城市热岛效应会促进城市内涝风险的提高,因此,城市雨水径流的变化应是土地利用类型变化和城市小气候环境变化共同作用的结果。城市硬化铺装 in 服役期间,其温度场受到太阳辐射、对流、蒸发、热传导等多种因素的影响,太阳辐射是引起铺装结构升温的主要外因,是铺装结构的直接热量来源。根据能量守恒原理可知,透水铺装的能量平衡方程如下所示。其中 ΔE 为系统能量的增量, E_{in} 和 E_{out} 为进、出系统的能量, R 为铺装表面反射率,其余参数的含义见图 4。在夏季高温条件下,路表及空气温度随太阳辐射的增强不断升高,例如在夏季高温时段的沥青路面表面温度最高可达 70℃以上。因此,透水铺装对城市热岛效应的缓减主要是针对夏季高温天气。从如下能量方程可知,要使路面温度降低的基本思路有两条:其一,减少对系统的能量输入,即增大路面的反射能量 GR ;其二,加大系统的能量输出,即增大 K 、 E 及 H 值。从技术可行性和经济合理性角度出发,上述方法中最可行和有效的工程技术方案是增强蒸发散热效能和持续时间。

$$\Delta E = E_{in} - E_{out} = G - G_p = G(1 - R)$$
$$\therefore \Rightarrow \Delta E = G_a + Q + H + K$$

对普通铺装结构而言,雨水无法进入到结构层内部,当降雨过程结束后,铺装结构表面很快即可恢复到干燥状态。而对于透水铺装而言,由于铺装材料内部存在大量的连通空隙,水分在基质吸力和重力两种外部驱动作用下完成下渗,首先是雨水在材料

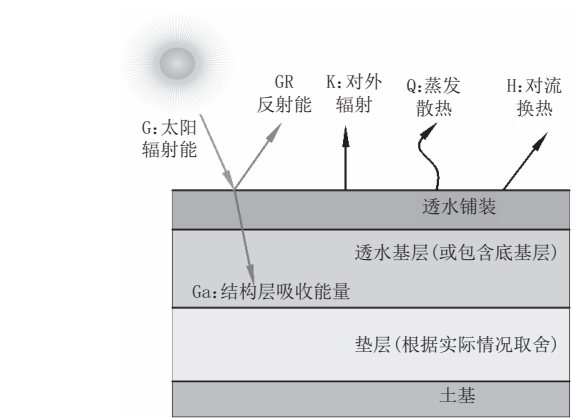


图 4 透水铺装热能分量图

基质吸力的作用下对铺装起湿润作用;由于透水铺装材料相较于土壤具有更大的空隙率,空隙中的自由水在重力作用不断下渗,直至到达土基表面。通常,土基的导水率往往小于铺装结构层,当土基的导水率同时又小于暴雨强度时,结构层中的含水量便会不断增加,直至达到饱和。降雨结束后,铺装层将进入干燥过程,而在干燥过程中离不开蒸发这一物理现象。蒸发是在液体表面上发生的气化现象,在蒸发过程中 H_2O 分子需要从环境中吸收能量,以实现相变并达到降温的目的。有研究表明,多孔介质中充足的水分是实现蒸发降温的先决条件,不仅影响降温效果,还影响降温的有效时长^[8]。对透水铺装结构而言,内部水分的流失速率相对较慢,能在较长的时间内保持持水状态,因此持水状态下的铺装结构能在较长的时间范围内持续产生降温效果。透水铺装相较于同材质的普通铺装有更大的空隙率,因此密度小,比热容也小。因此,当透水铺装处于干燥状态时,假设二者吸收相同的太阳辐射能量,很明显干燥状态下透水铺装升高温度大,同理当太阳辐射减小后,透水铺装的散热速度也较快。这是因为比热容越大的材料升高相同的温度需吸收更多的热量,因此材料的比热容与下垫面温度之间呈现负相关。所以,在相同的环境条件下,透水铺装相较于同材质的非透水铺装具有更高的表面温度,因此如何使透水铺装长时间处于持水状态,将成为铺装层材料设计和储水容量设计重点考虑的内容。

3 改善道路周边声环境

由物理学可知,声音来源于物体的振动,振动在介质中的传播称为声波。噪声属于声音的一种,因此它具备声波的一切特性。道路交通噪声属于噪声的一种来源类型,道路交通噪声主要来至于车辆发动机、冷却风扇和排气装置,当车辆速度超过 60 km/h

时,轮胎与地面之间的接触噪声将成为主要的噪声源。因此,道路交通噪声的主要来源是机动车本身,其次是轮胎与路面的接触噪声。根据规范 GB3096 可知,当道路交通环境的声级超过限值(白天 70dB(A),晚间 55dB(A))时,即可视为交通噪声。据生态环境部发布的相关统计数据可知,2021 年全国声环境质量整体向好,但 4a 类功能区(道路交通干线两侧区域)夜间达标率持续最低(2021 年为 66.3%,2022 年为 70.4%),见图 5。

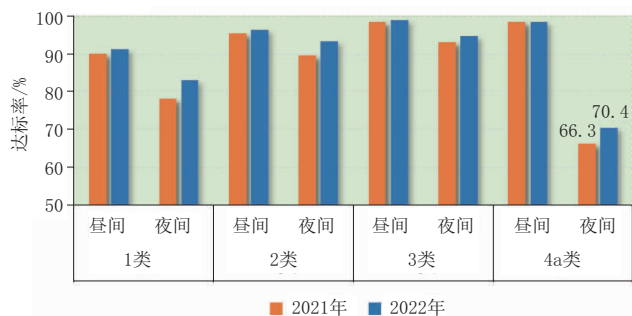


图 5 2021 年全国声环境功能区年度达标率(来源:生态环境部)

很明显,我国目前夜间的道路交通声环境质量有待提升。透水铺装材料是一种多孔介质,内部存在大量的连通空隙且与外界连通,具备了吸声材料的基本结构特征,因此透水铺装具有很好的吸声降噪能力。当声波入射到多孔介质上,一部分声波在介质表面发生反射,另一部分则通过空隙进入材料内部并引起空隙内的空气和材料振动,在空气流动中所产生的内摩擦和黏滞力的共同作用下完成声能向热能的转化,由于该过程是不可逆的,从而达到降噪的目的。董雨明等研究表明,小型汽车以 60 km/h 以上速度行驶时,PAC 系路面相对于 AC 系路面,噪声可降低 3.4~6.7 dB(A)^[9]。张教授等研究表明,由于 OGFC-13 路面内部存在大量由连通空隙构成的共振吸声结构,因此其降噪效果明显优于 AC-13 和 SMA-13 路面^[10]。影响多孔介质吸声效果的主要因素有空气流阻、材料层厚度及空隙率等,其中流阻是最主要的影响因素。根据噪声控制工程学可知,流阻 R_f 是指稳定气流通过多孔介质时,材料两面的静压差与气流线速度的比值;材料单位厚度的流阻称为流阻率 R_s ,即 $R_s=R_f/d$ (d 为材料厚度)。流阻的物理意义反映了气流通过多孔介质时的阻力大小,是对材料透气性能的刻画。由式可知,当厚度 d 较小时,流阻率较大,吸声效果便较差;当厚度 d 较大时,流阻率较小,吸声效果便较好。张教授等研究结果表明,由于交通噪声以中频为主,对降噪沥青路面而言,其面层厚度取 4~5 cm 是适宜的^[11]。同时,多孔材料的

空隙率和空隙特征对吸声效果也有较大影响。李教授等研究表明,透水铺装的吸声系数随空隙率的增加而增大,为保证降噪效果建议将 OGFC 路面的空隙率控制在 20%~23%为宜^[12]。综上所述,要改善城市道路两侧区域的声环境质量,应从声波的特性入手:首先应从交通噪声的源头实施控制(主要针对轮胎与路面之间的接触噪声),采用透水降噪路面对降低交通噪声效果较好。近年来国内的相关研究均表明,PAC 系或 OGFC 系透水路面相较于普通路面的噪音要低 5dB 左右。因此,路面设计时在满足路面路用性能和排水性能的前提下,应注重对铺装材料的配合比设计和铺装层厚度控制,以实现材料流阻值的调整,进而达到控制吸声效果的目的。其次是声波的传播,即在声源与受声点之间设置声屏障,以阻止声波的传播,该技术措施在城市高架道路中被广泛使用。

4 降低城市径流污染负荷

城市径流污染是指地面在降雨的冲刷作用下,晴天地表累积的污染物(SS、COD、重金属、TN、TP等)混合在径流中并经市政排水系统最终排入河流或水系,并使其受到污染的现象。由于土地利用类型的变化,原有农田、湖塘、沟渠与洼地、菜地、草地及林地等被硬化地面取代,导致地面径流系数增加。另外,随着城市化进程的推进,城市人口的持续增长,人类活动产生的地面污染负荷也不断增大。张志彬等研究表明,路面雨水径流中 SS、COD 浓度分别为 528.81 mg/L、284.76 mg/L^[13]。杨默远等研究认为,城市下垫面的面源污染浓度值满足 $SS > COD > TN > TP$,并给出了道路径流主要污染物浓度参考值,SS 质量浓度 406.17~648.06 mg/L, COD 质量浓度 214.93~320.92 mg/L^[14]。以上数据表明,其浓度值已经远大于排放标准(GB 8978—1996)对 V 类水域 SS 和 COD 最高限值 150 mg/L 的要求,因此城市径流若采用直接排放方式必然导致受纳水体污染。同时,大量研究数据表明,SS 和 COD 为城市下垫面主要污染物,且在降雨产流初期(约在前 20 min)产生的径流中污染物的浓度是最高的。城市径流污染会给受纳水体带来一下几个方面的危害:悬浮固体 SS 是造成水体浑浊的主要原因,会导致阳光在水中的透射率降低,进而影响水生植物和鱼类生长;耗氧有机物 COD,如生活垃圾(包括腐败食物、洗涤剂、食用油等)以及枯枝败叶等有机物在水体中的降解过程需要消耗水中

的溶解氧,受到污染的径流进入水体后会导致水体溶解氧的浓度降低,进而影响水中鱼类及其他水生生物的正常生长,当水体中氧气消耗殆尽时,有机物将进入厌氧分解过程,并产生 CH_4 、 H_2S 及 NH_3 等气体,进而导致水体黑臭化;水中过量的N、P会导致水体富营养化,富营养水会导致水中的浮游植物的繁殖速度加快,破坏既有的水生系统平衡;重金属(Cu、Cd、Cr、Pb、Ni、Zn等),不同城市的径流中重金属含量存在较大差异,其含量相对较低;径流中还包括杀虫剂、多环芳香烃等有毒物质,这些物质主要来源于城市绿地等,其含量也相对较低。在影响径流水质的主要因素中,除降雨特征外还有城市下垫面特征,如透水铺装占比和绿化覆盖率高的城市,雨水下渗能力强,可有效降低径流污染物的负荷。因此规范明确要求,人行道、停车场和广场等宜采用透水铺装且可渗地面积面积不低于40%;绿地宜低于有铺装地面5~25 cm,以形成下凹式绿地^[15]。透水铺装作为源头削减径流污染的措施之一,除了具有削减径流污染的功能外,还具备前文的其他功能。大量的研究和工程实践表明,控制城市径流污染最有效、最经济的方法是实施源头控制,除了能净化水质之外还能减少进入管网系统和受纳水体的径流量和污染负荷,同时也降低了管网系统超载运行和污水溢流的风险。透水铺装作为LID技术系统的措施之一,其对雨水净化的机理是通过内部大量的空隙完成对污染物的过滤和吸附,该过程为物理过程;通过铺装材料中的化学充分与污染物间的氧化还原反应、酸碱反应等化学过程而完成对雨水的净化,该过程为化学过程;通过铺装材料内部空隙中生长的生物群落完成对雨水净化,该过程为生物过程。透水铺装自身构成了一个相对独立的渗透系统,通过物理的、化学的以及生物的作用,以达到去除径流中部分污染物的目的。王哲等研究表明,透水铺装地面系统通过物理、化学与生物作用,对耗氧有机物COD具有良好的生物降解作用^[16]。高教授等研究表明,当采用10~20 mm粒径的集料制备空隙率为25%的多孔混凝土对TN、TP的净化效果最佳^[17]。李美玉等认为,透水铺装对雨水径流中总固体悬浮物TSS的去除效果非常显著,不同类型透水铺装对TSS去除率大都在50%以上。^[18]透水铺装路面为层层结构,对SS和COD的去除效果主要是通过内部空隙的过滤、吸附与截留作用达到净化目的。虽然不同城市污染情况存在一定差异,但总体而言,雨水径流中TSS、COD的含量相对较

高,而营养物质和重金属含量相对较低。在工程实践中,应注重多种LID设施的综合运用,如透水铺装与生物滞留带、下凹绿地以及植草沟等的联合运用,以提高对径流污染物的去除率。

5 结 语

透水铺装良好的人渗能力使其具备降低城市内涝风险、缓减城市热岛效应、改善道路周边声环境、削减径流污染等多种生态功能。透水铺装除了具备传统的交通出行功能外,还具有良好的生态功能,因此在进行透水铺装层设计时,除了从道路工程角度关注铺装结构的强度、刚度和耐久性等技术指标外,还应关注铺装层各层的材料设计和结构层组合设计,以达到提高铺装层生态功能效能的目的。目前,透水铺装在实际的工程运用中还存在一些有待解决的问题,如内部空隙易堵塞、重载交通作用下的承载力不足等。因此,完善和优化透水铺装的材料设计、结构设计以及设计与施工标准,以提高透水铺装的路用性能和生态环保性能,是接下来透水铺装研究和发展的方向。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [2] 龚应安,陈建刚,张书函,等.透水性铺装在城市雨水下渗收集中的应用[J].水资源保护,2009,25(6):65-68.
- [3] 晋存田,赵树旗,闫肖丽,等.透水砖和下凹式绿地对城市雨洪的影响[J].中国给水排水,2010,26(1):40-42,46.
- [4] 雷向东,赖成光,王兆礼,等.LID改造对城市内涝与面源污染的影响[J].水资源保护,2021,37(5):131-139.
- [5] 吴绍洪.中国“气候变化的影响、风险与适应”研究进展——中国《第四次气候变化国家评估报告·第二部分》解读[J].中国人口·资源与环境,2023,33(1):80-86.
- [6] 刘勇洪,栾庆祖,权维俊,等.基于多源卫星资料的京津唐城市群热环境研究[J].生态环境学报,2015,24(7):1150-1158.
- [7] 张建云,李纪生.水文学手册[M].北京:科学出版社,2002.
- [8] Qin Y, Hille J E. Water availability near the surface dominates the evaporation of pervious concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016(111):77-84.
- [9] 董雨明,柳浩,杨丽英,等.沥青混合料声学性能试验研究[J].市政技术,2010,28(1):149-151,154.
- [10] 孙俊锋,张海涛,于腾江,等.多孔沥青混合料降噪的细观模拟与宏观试验[J].林业工程学报,2021,6(6):165-171.
- [11] 张玉芬,王波.低噪声路面材料构造吸声性能试验研究[J].西安公路交通大学学报,1996(3):4-7.
- [12] 李金凤,何兆益,官志桃.开级配沥青磨耗层降低路面噪声优化[J].

(下转第89页)

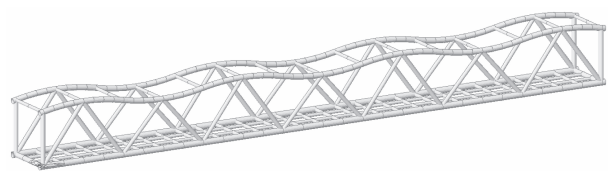


图 6 钢管桁架空间效果

化桁高是将主桁支点处桁高调整为 5.7 m,曲线凸点处 6.2 m,凹点处 5.2 m。

表 3 取消竖杆后的对比计算结果

结构方案	上弦杆最大正应力 /MPa	斜杆最大正应力 /MPa	竖向自振频率 /Hz	钢桁架用钢量 /t	静活载最大竖向位移 /mm
箱形截面桁架(原模型)	135.4	210.0	3.1	249.9	18.1
钢管桁架(有竖杆、桁高不变)	163.0	97.6	3.09	194.8	22.8
钢管桁架(无竖杆、优化桁高)	169.9	115.3	3.08	169.3	26.1

根据对比计算结果可知,在应力水平和竖向刚度相当的情况下,本桥采用有竖杆的钢管桁架用钢量较箱形截面桁架节约 22.0%,无竖杆的钢管桁架用钢量较箱形截面桁架节约 32.3%。由于钢管桁架的截面材料更均匀地分布在中性轴,充分发挥材料强度,使截面同时具有良好的抗压和弯扭承载能力。

6 结 论

本文对该钢桁架天桥进行了动力特征分析,与取消竖杆后的钢桁架、等高度钢桁架和钢管桁架进行了对比分析,得出以下结论。

- (1)当节间距较小时,竖杆对整体竖向刚度的影响小于对整体结构质量的影响,可以取消竖杆,增加天桥的通透性和轻盈度,节约用钢量。
- (2)采用弧形变高度桁架,上弦杆弯曲,导致整体竖向刚度下降,常规条件下宜选用等高度桁架形式,降低桁架高度,节约用钢量。
- (3)钢管桁架能更好地发挥材料特性,较箱形桁架能较好地发挥截面特性,节约用钢量,较大地减少焊接工作量。

参考文献:

[1] 周祥乾.某桁架结构景观人行天桥设计[J].城市道桥与防洪,2022(11):95-97.
[2] 陈政清,华旭刚.人行桥的振动与动力设计[M].北京:人民交通出版社,2009.
[3] CJJ 69—95,城市人行天桥与人行地道技术规范[S].
[4] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].

(上接第 78 页)

东南大学学报(自然科学版),2021,51(5):866-873.

[13] 张志彬,孟庆宇,马征.城市面源污染的污染特征研究[J].给水排水,2016,52(S1):163-167.

[14] 杨默远,潘兴瑶,刘洪禄,等.基于文献数据再分析的中国城市面源污染规律研究[J].生态环境学报,2020,29(8):1634-1644.

[15] GB 50014—2021,室外排水设计标准[S].

[16] 王哲,谢杰,谢强,等.透水铺装地面滞蓄净化城镇雨水径流研究进展[J].环境科学与技术,2013,36(S2):138-143.

[17] 许国东,高建明,吕锡武.多孔混凝土水质净化性能[J].东南大学学报(自然科学版),2007(3):504-507.

[18] 李美玉,张守红,王玉杰,等.透水铺装径流调控效益研究进展[J].环境科学与技术,2018,41(12):105-112,130.