

海绵城市高架立体式排水系统研究分析

赵康

[上海浦东路桥(集团)有限公司,上海市 201206]

摘要: 随着“海绵城市”概念不断推广,对城市雨水的收集利用提出了更高的要求,与之对应的高架排水系统在设计、施工方面也不断改革创新。从龙东大道改建工程1标排水系统组成入手,以介绍海绵城市高架立体式排水系统为目的,采用将排水系统拆解为不同部位,并分析各部位组成及其排水原理的方法,研究雨水在系统中的渗、导、蓄、排过程,得出以下结论:高架立体式排水系统由上、中、下、地下四部分组成,自上而下完成雨水的收集和排放;大孔隙开级配排水式沥青磨耗层 OGFC (open-graded friction course) 依靠其高空隙率使雨水快速下渗,防止路面水漂现象的产生;悬吊管决定系统中部泄水能力,且最大流量发生在非满流状态;地面雨水花园可对雨水进行收集、调蓄和过滤,并能够打造成特色绿化景观带,让市民打卡观赏。

关键词: 海绵城市;排水系统;OGFC;雨水花园

中图分类号: TU992

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)06-0310-07

Research and Analysis on Three-Dimensional Drainage System of Elevated Roads in Sponge Cities

ZHAO Kang

[Shanghai Pudong Road and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 201206, China]

Abstract: With the continuous promotion of the "Sponge City" concept, the higher requirements have been put forward for the collection and utilization of urban rainwater. Correspondingly, the design and construction of drainage systems in the elevated roads have been also continuously reformed and innovated. Starting from the composition of the drainage system in Section 1 of the Longdong Avenue Reconstruction Project, aiming to introduce the three-dimensional drainage system for elevated roads in Sponge City, the drainage system is broken down into different components, and the composition and drainage principles of each part are analyzed to study the process of infiltration, conduction, storage and discharge of rainwater in the system. The following conclusions show that the three-dimensional drainage system for elevated roads consists of four parts, upper, middle, lower and underground to complete the collection and discharge of rainwater from top to bottom. The large-pore open-graded friction course (OGFC) relies on its high porosity to make the rainwater rapid infiltration, preventing hydroplaning on the pavements. The suspended pipe determines the drainage capacity of the middle part of the system, and the maximum flow occurs under non-full flow conditions. And the ground-level rainwater garden can collect, regulate, store and filter the rainwater, and be developed into a distinctive green landscape belt for public appreciation and visitation.

Keywords: sponge city; drainage system; OGFC; rainwater garden

0 引言

城市高架桥梁排水系统对高架的安全正常使用起到关键性作用。高架桥面积水不及时排出会形成水膜和溅水,大大降低桥面抗滑能力且影响司机行车视线,容易造成行车事故^[1]。通过铺设排水沥青面层,增加雨水在高架桥面的下渗速度,对消除水膜和积水至关重要;而建设地面雨水花园则可对雨水

进行有效调蓄,改善城市生态环境。两者也是海绵城市概念的重要组成部分,在保证车辆通行安全,延长桥梁的使用寿命,收集利用雨水等方面作用明显。

国外在推广海绵城市建设方面起步较早,相关研究成果颇多。其中美国研究者发现透水路面材料在提高雨水下渗能力、净化雨水从而改善城市生态环境方面效果显著。并随着海绵城市的持续性评估方法研究的深入,总结了一种评价海绵城市道路设计的指标体系^[2-3];德国学者通过研究发现,合理规划和设计道路系统,利用自然系统对雨水处理能力,能够实现城市的水循环和生态循环^[4];英国学者则

收稿日期: 2025-10-31

作者简介: 赵康(1988—),男,硕士,工程师,从事市政道桥施工管理工作。

从研究生态沟渠和湿地等基础设施入手,发现其能够减少城市径流和污染物排放,从而提高水质,改善生态环境^[5];日本学者也认为在城市道路的设计规划中增加绿地和湿地,可改善生态环境和提高防洪排涝能力,并开发出多项新型的透水性路面材料和雨水收集设施^[6-7]。

国内正式提出海绵城市概念是在 2012 年,起步相对较晚,但经过专家学者几十年的不断努力,海绵城市理论趋于完善。这其中包括聂大华^[8],陈哲^[9],俞孔坚等^[10]在透水人行道构造、雨水回收利用方面的技术路线、标准,下凹式绿地、透水路面组合控制效果等的理论和实践研究。

以上针对海绵城市研究多集中在城市道路理论及设计研究,且系统性方面较为单一,如只针对城市道路设计或只针对地面生态滞留池、雨水园林等方面开展。城市高架林立,整个排水设施组合应该是一个由高架至地面再至地下的立体式系统,在这方面的讨论相对较少。特别在东南沿海降雨量较多的城市,海绵城市概念也不断从理论变为实践。为保证雨水高效收集利用,海绵城市概念下的高架排水系统在设计、施工方面提出了更高要求,这包括桥面铺装、纵横坡、集水井、落水管、地面雨水花园等。文章针对上海市龙东大道改建工程 1 标工程建设,详细介绍高架立体式排水系统组成部分,并研究分析其中各设施的特点及对排水的影响,总结其在施工过程中的要点;突出桥面排水沥青铺设和地面雨水花园这一重要组合,阐述雨水下落到路面后的下渗、径流、收集、排出等环节,为类似工程提供一定参考。技术路线见图 1。

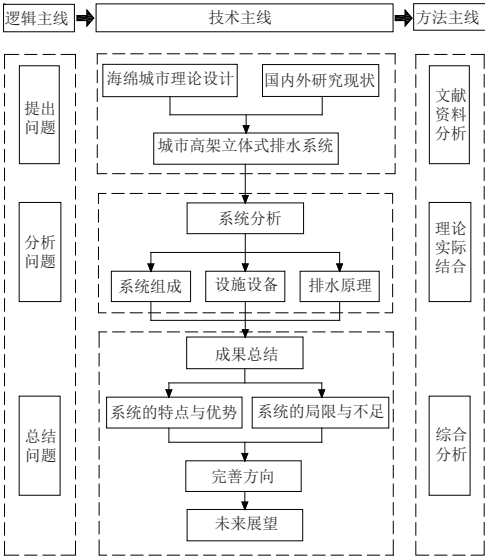


图 1 技术路线图

1 工程概况

龙东大道改建工程位于浦东新区龙东大道(罗山路—G1503),连接内环、中环、外环,是浦东新区东西向交通主干路,承担大量区域过境交通车流量,极大完善和满足了中心城区快速路网骨架及城市空间拓展发展需求,同时优化张江地区路网,改善地区交通和环境。

龙东大道改建工程 1 标段道路断面形式为“主线高架+地面辅路”,高架全长 2 463 m。断面宽度 25 m,设匝道一对。高架道路按照城市快速路设计,双向 6 车道,设计速度为 80 km/h。高架标准横断面见图 2。

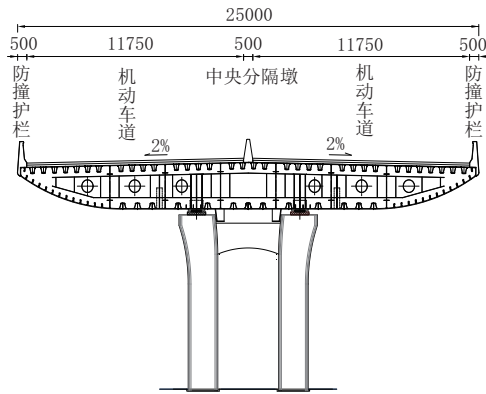


图 2 高架标准横断面(单位:mm)

2 高架立体式排水系统组成及分析

2.1 桥面排水沥青铺装结构组合

上海市大力推进“海绵城市”建设,龙东大道改建工程为市重大工程,设计采用 OGFC 排水沥青面层,其铺装结构组合为:4 cm OGFC-13(高黏度改性沥青)、0.6 cm 稀浆封层+聚酯玻纤布+黏层油、6 cm AC-20C(天然岩沥青改性)、0.2 cm 纤维增强防水层。铺装组合见图 3。

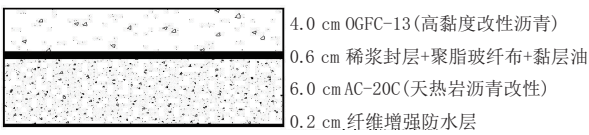


图 3 高架桥面铺装组合

学者设计实验研究^[11],找到了目标空隙率与沥青路面面积、路面坡度和降雨量等参数的计算关系式,计算时忽略透水量,同时排水沥青路面透水量和蓄水量之和不小于降雨总量,见式(1):

$$v \geq \frac{Q_d \times 10^6}{aFJ + \frac{b}{a}} \quad (1)$$

式中: v 为目标空隙率; Q_d 为降雨量,cm/s; F 为排水沥青计算面积,m²; J 为排水沥青路面综合坡度; a 、 b 为比例系数,用试验测定。

要得到有实际应用意义的排水沥青路面,同时保证其排水性、稳定性和耐久性,其目标空隙率应控制在18%~25%之间。大孔隙开级配排水式沥青磨耗层OGFC(open-graded friction course),是一种空隙率在18%以上的沥青混合料。龙东大道高架桥面上面层使用的OGFC-13其空隙率达到20%左右,渗水系数高达1 500 mL/15 s,依靠高黏度的改性沥青作为黏结剂,形成骨架-空隙结构。是国内排水沥青主要应用材料。OGFC-13技术参数见表1。

表1 OGFC-13技术参数	
试验项目	技术参数
马歇尔稳定度击实次数/次	两面50次
空隙率/%	20
连通空隙率/%	14
渗透系数/[mL·(15 s) ⁻¹]	1 500

与排水沥青面层配合设置2%横坡和0.5%纵坡,当雨水下落到路面后,依靠上面层超高的空隙率使雨水迅速下渗,而0.6 cm稀浆封层和6 cm AC-20C沥青层均为不透水结构,保证了雨水向桥面纵、横坡方向流动,最后汇集至集水井中。此时影响雨水下渗、流动的主要是降雨量、沥青空隙率和纵、横坡度。

降雨量越大,越容易形成路面表面水膜。车辆在积水路面制动时,轮胎挤压水膜产生动水压力阻碍轮胎与路面的接触,造成轮胎水漂现象,威胁行车安全^[12-13]。此时,沥青面层空隙率越大雨水下渗速度越快,可有效避免路面积水;纵、横坡度大小需要根据不同位置进行设计,总体上坡度越大对雨水的流动汇集越有利。因此,OGFC排水沥青上面层依靠其超高的空隙率使雨水迅速下渗,起到“渗”水作用;防水层、不透水下面层及钢筋混凝土基层阻止雨水继续下渗,使其沿纵、横坡流动,起到“阻”水作用;纵、横坡,引导水流流向集水装置,起到“引水”作用。

2.2 收水口和集水井

收水口、集水井汇集雨水,起到“集”水作用。从上面层下渗的雨水及降雨量大时的超越水量在纵、横坡作用下,通过收水口汇集至集水井中。收水口的形式分为3种^[14]:平算式、立式和联合式。龙东大道高架收水口采用平算式球墨铸铁进水格栅;集水井设置在伸缩缝上游,底部开排水短管圆孔,侧面开盲沟方孔(见图4)。



图4 收水口和集水井实物图

收水口的位置、数量根据不同收水范围确定,路面收水范围形式有4种:单侧单向、双侧单向、单侧双向和双侧双向(单双侧指雨水横向流动,单双向指雨水纵向流动)^[15]。在路面缓坡及超高段,增加收水口和集水井数量,避免降雨量大时引起积水。不同收水形式特点见表2。

表2 不同收水形式特点汇总	
收水形式	特点
单侧单向	最普遍,与坡度无关,汇水面积取决于收口间距
双侧单向	与单侧单向相同,汇水面积是其2倍
单侧双向	汇水面积纵向对称,存在汇水交叉面,纵坡越大横坡越小汇水面积越大
双侧双向	汇水面积横向对称,存在汇水交叉面,纵坡越大横坡越小汇水面积越大

2.3 排水盲沟和泄水孔

2.3.1 排水盲沟^[16-18]

塑料排水盲沟是一种新型复合土工材料,通常纵向设置于高架桥梁外侧防撞护栏下方排水沥青面层和混凝土防水层之间结合处。滞留于此处的雨水较难排出,长期积存,会造成排水沥青密实度和颗粒间黏结力降低,发生推移、臃包、车辙等病害。排水盲沟的设置可使滞留水分依靠自身重力作用沿横坡渗流入塑料盲沟并排走,很好地解决这一问题。其材质为塑料,断面尺寸为72 mm×32 mm,为三维立体结构。排水盲沟及泄水孔通过引导雨水流向收水口和集水井中,起到“导”水作用。其特点为:(1)空隙率高,在80%~95%之间,通常不会发生堵塞(排水沥青面层空隙率在20%左右,通常堵塞发生在该层,堵塞的清理依靠定期采用特种功能性养护车辆高压冲洗),可有效保证雨水在其中的顺畅流动;(2)抗压强度大,可避免车辆通行载荷将其压坏,同时作为骨架结构可弥补靠近防撞墙沥青路面压实度不够的缺点;(3)抗腐蚀、抗老化性能好,保证在自然环境下的使用寿命;(4)较少的用量即可发挥好的排水效果,每延米用量约0.011 m³,且市场价格较低。盲沟在铺

设时应完整平顺,且深入集水井壁 20 mm(见图 5)。

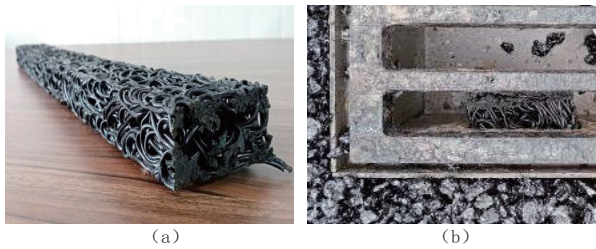


图5 排水盲沟

2.3.2 泄水孔设置在道路中间隔离墩上

如图 6 所示,断面尺寸为 100 mm×60 mm(宽×高)。其作用主要有 2 个:(1)在超高段,道路整体为单侧横坡,中间隔离墩开泄水孔,使雨水可从高坡点跨越中间隔离墩,流向低坡点,从而避免高坡点积水;(2)在降雨量大时,可使雨水在道路横向自由流动,协同雨水收集范围形成多种形式,达到充分利用道路两侧排水设施的作用。泄水孔施工时应参照开口处路面标高,过高则无法贯通两侧雨水,过低则容易被沥青面层堵塞,失去泄水作用。泄水孔的设置相对灵活,施工方便,泄水孔为预制构件,施工时间短,同时可根据路段及集水井的情况进行加密。泄水孔两侧设置钢丝网片,定期清理路面垃圾,防止孔道堵塞。



图6 中间隔离墩泄水孔

2.4 排水短管、悬吊管和排水立管

高架排水管道一般由排水短管、悬吊管和排水立管组成,其中排水立管泄水能力最大,排水短管次之,悬吊管泄水能力最小^[19]。排水短管、悬吊管和立管将雨水排入地面雨水花园或市政雨水管网,起到“导”水作用。

2.4.1 排水短管

排水短管是高架排水系统的重要部件,上接集水井,下接悬吊管,起到承上启下的连接作用,其相对集水井的泄水能力,影响路面雨水的下排速度。根据《城市桥梁设计规范》(CJJ 11—2011)(2019 版本)规范规定:排水管道应采用坚固的、抗腐蚀性能良好的材料制成,管道直径不宜小于 150 mm;当纵坡大于 2% 时,桥面设置排水管的截面积不宜小于 60 mm²/m²。龙东大道 1 标高架排水短管材质采用镀

锌钢管,焊接时采用密封焊,同时根据路面纵坡不同分为两种管径为:φ160 mm(纵坡不大于 2%)和 φ200 mm(纵坡大于 2%);工程集水井收水面积普遍为 2 个/750 m²,根据坡度大于 2% 管径计算,排水管截面积为 83 mm²/m²超过到规范要求。较大的管径可减少了雨水在集水井中的停留时间,加快雨水下排速度。同时,在排水短管与悬吊管连接位置设置有检修口(见图 7 中堵头位置),为管道堵塞时检修提供方便。

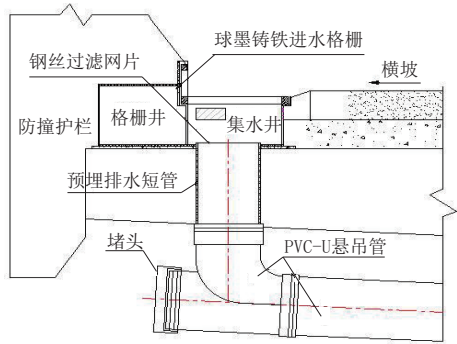


图7 排水短管连接部件

2.4.2 悬吊管

悬吊管采用 PVC-U 管,管径与排水短管配套分 φ160 mm 和 φ200 mm 两种。悬吊管的泄水能力取决于它的坡度和其下方排水立管的高度。降雨量较小时,悬吊管内雨水充满度小,悬吊管坡度是影响泄水能力的主要因素,此时坡度越大,泄水能力越大。当降雨量较大时,其下方排水立管真空抽吸能力是主要的影响因素,排水立管高度越大,真空抽吸能力越强,悬吊管泄水能力越大。此外,降雨量较大时,若悬吊管坡度过小,则管内雨水充满度较大,容易形成气塞,导致与排水短管连接处产生溅水现象,降低其泄水能力^[20]。因此,悬吊管泄水能力计算时应根据设计雨量大小,最大流量管道水深和管道直径的比值被称为充满度($\beta=h/d$)为计算工况。有学者研究并提出了全工况状态下($0 < \beta \leq 1$)非满流管圆管水力计算流量和流速的简化表达式,简化公式如下^[21]:

$$Q = \frac{i^{1/2} d^{8/3}}{32n} \left[-4.093 + \frac{4}{(\beta - 0.916)^2 + 0.274} \right] \quad (2)$$

$$v = \frac{i^{1/2} d^{2/3}}{2^{1/3} n} \left[-1.6455\beta^2 + 2.5275\beta + 0.1597 \right] \quad (3)$$

式中: i 为管道底坡; d 为管道直径; n 为粗糙系数, PVC-U 塑料管取 0.01; β 为充满度。

2.4.3 排水立管

排水立管与悬吊管配套,材质为 PVC-U 管。其

是整个排水系统的最终端,接地面雨水花园或集水井。影响立管泄水能力的因素主要是立管的管径和高度。管径越大,泄水能力越强。高度越大,进、出口高差越大,真空抽吸能力越强,可同时增加自身和悬吊管的泄水能力。龙东大道改建工程 1 标排水立管高度在 8~12 m 之间,具备较好的真空抽吸能力,且出口与大气相通,可有效避免气塞的发生,见图 8。



图 8 排水立管

2.5 地面雨水花园

经高架排水系统下落到地面的雨水,传统方式是直接排入市政道路上的雨水管道系统。随着海绵城市理念的发展,将高架排水系统结合地面雨水花园,可以更好地收集并利用雨水。有研究表明雨水花园是海绵城市设计的典型设施,对浅层地下水的补给效果显著且有一定的滞后性^[22-23]。

在海绵城市概念中雨水花园是指自然形成或人工挖掘的下凹式绿地(见图 9),种植灌木、花草,形成小型雨水滞留入渗设施,用于收集来自屋顶或地面的雨水,利用土壤和植物的过滤作用净化雨水,暂时滞留雨水并使之逐渐渗入土壤。



图 9 常见下凹式绿地

龙东大道改建工程 1 标在常见简单雨水花园设计基础上,增加了与高架、人行道及机动车道雨水的立体式汇集结构和装置,地面雨水花园构造图如图 10 所示。主要包括以下内容。

2.5.1 增加水平导流结构

在人行道面层铺设透水砖,设置中粗砂、透水混

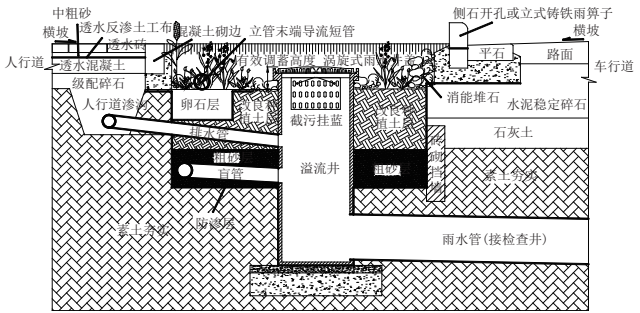


图 10 龙东大道改建工程 1 标地面雨水花园构造图

凝土和级配碎石透水层,下方设置渗水沟,机动车道侧石开孔并设置堆石消能,埋设排水管和盲管使雨水可以水平流动集聚至溢流井等,可将人行道、机动车道、高架雨水收集并导流至生物滞留带和溢流井。

2.5.2 高架雨水与生物滞留带衔接

高架排水立管末端设置导流短管,使雨水自然流淌至生物滞留带(见图 11),初期雨水被认为是路面径流污染负荷最重的部分^[24]。针对这一特点,种植菖蒲、冬青、鸢尾等根系发达、耐水湿、耐旱、气候适应强、污染降解能力强的植被^[25],起到固土、蓄水和降解初期雨水污染物的作用,并缓冲高架下落雨水冲击力,避免造成水土流失。使得生物滞留带成为雨水花园的地面植被,兼具功能带和景观带的作用。



图 11 高架排水进入生物滞留带

2.5.3 滤水层和防渗层

城市雨水径流后对土壤的污染主要包括悬浮颗粒积累、营养元素磷的积累和重金属 Zn、Pb 的积累。众多学者针对种植土和中粗砂作为过滤层的雨水花园进行研究发现:雨水花园对总悬浮颗粒(TSS)有非常好的去除效果,但为防止径流中过多的黏土颗粒造成堵塞,所选择植物的根系深度应尽可能满足 20 cm 的最低要求;不栽种植被时,种植土中磷的含量在较短时间内达到饱和,且集中在 0~10 cm 土层。增加种植土厚度至 10~30 cm,并种植根系较深的乔木,可有效降低磷含量,同时大大增加土壤磷含量达到饱和的时间;种植土中重金属的垂向分布规律能够有效表征重金属的迁移特性,且有研究表明蓄水

高度对土壤中重金属 Pb 的含量影响显著,表现为蓄水高度从 5 cm 增长至 15 cm,会使其污染物累计通量去除率减少 35%,污染物浓度击穿时间缩短 67%,从而引起重金属 Pb 的快速积累。此外,研究还发现重金属 Zn、Pb 等主要在种植土表层 0~12cm 范围内积累。因此,设置合理的蓄水高度和种植土层厚度可有效降低土壤污染物含量;置换不同深度的种植土也是简单且行之有效的方法^[26-29]。

龙东大道改建工程 1 标滤水层可分为卵石层、改良种植土层和粗砂层(见表 3)。卵石层层间空隙较大,可过滤较大体积污染物,并作为立管消能井填料,起缓冲水流冲击作用^[30];改良土层厚度设置为 40 cm,保证栽种的樱花、木槿等根系较深的乔木生长,同时可防止堵塞(满足大于 20 cm);粗砂层位于滤水层的最下方,层间空隙较小,压实后结构坚实,是常用的地基回填材料,同时具备良好的过滤效果。盲管埋设在最下层的粗砂类滤水层中,接溢流井。下渗雨水经过滤水层过滤净化并通过盲管流入溢流井。地面雨水花园分散布置,规模小而生多,蓄水高度设计为 10 cm,保证良好调蓄功能的同时较大程度提高各类污染物积累饱和的时间。表面栽种鸢尾、菖蒲、冬青等植物起到吸收、降解污染物和景观绿化作用,其生长状况也可反映土壤污染物积累程度。

表 3 滤水层结构

名称	层厚/cm	层内外管道	主要作用
卵石层	20	外接立管末端导流短管	缓冲雨水冲击
改良种植土层	40	埋设人行道渗沟排水管	营养元素磷、重金属的累积和置换
粗砂层	25	埋设盲管	作为基础层,兼具过滤蓄水作用

滤水层和素土地基之间设置不透水防渗层,防渗层为“两布一膜”高密度聚乙烯 HDPE (high density polyethylene) 防渗膜结构(见图 12),即两层土工布,中间一层防渗膜,质量 200 g/m²+PE0.4 mm+200 g/m²,渗透系数小于 10 cm/s,具有防渗效果好、耐酸碱、耐腐蚀、耐穿刺、施工方便、使用寿命长的特点,被广泛应用于工程防渗、污水池防渗、垃圾填埋场防渗、尾矿处理场防渗、固废弃物填埋场防渗等。其“两布一膜”的设置主要作用如下:(1)防渗水作用,防止雨水渗入素土地基,避免造成不均匀沉降,破坏整个道路结构;(2)防止污染物渗入土壤,当种植土层污染物饱和后,会随着雨水下渗至粗砂层,防渗膜起到阻止悬浮颗粒物、磷及重金属等污染物继续下渗至更深

层土壤的作用,使饱和后的污染物随雨水渗入盲管,进入污水管道,作为市政污水处理;c.保护 HDPE 膜体,上下两层土工布避免 HDPE 膜直接接触土壤,防止土壤中的坚硬部分刺破膜体,失去防渗作用。



图 12 “两布一膜”防渗层

2.5.4 多功能溢流井

溢流井是整个地面雨水花园的雨水收集装置,与市政雨水管连接,具有集、排、调蓄多功能。主要功能如下:(1)快速收集过量雨水,保证生物滞留带调蓄深度;(2)上接人行道渗水沟和滤水层盲管,收集下渗雨水;(3)下接市政雨水管,及时将收集水量排入市政雨水管道。井盖采用平算雨水口,涡轮式雨水井盖,井盖下方挂截污挂篮。平算雨水口美观且节省空间;涡轮式雨水井盖(见图 13)能够使雨水流入时产生旋转(类似于用棍子搅动雨水),破坏井内气体空间的相对稳定,避免雨量较大时气阻现象的产生^[31];截污挂篮能够阻挡树叶、垃圾进入汇水井,方便清理,避免堵塞。

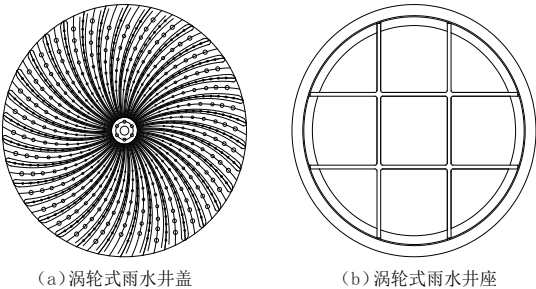


图 13 涡轮式雨水井盖和井座

3 结 语

详细介绍了高架立体式排水系统主要构造和排水原理,各部件既各自独立,又相互结合。系统中 OGFC 通过高空隙率使雨水快速下渗,避免形成水漂现象;悬吊管管径和坡度决定中部“导水”管道泄水能力,其最大流量发生在非满流状态;地面雨水花园可对雨水进行有效调蓄和过滤,土层厚度需考虑污染物饱和时间及置换深度参数。将整个高架、地面的雨水收集排放当作一个整体系统进行研究,重点分析高架雨水的收集和地面雨水花园的调蓄和排水工程。是今后设计、施工很好的一个方向,具有较好

的应用价值。

针对单个项目的分析研究往往具备一定局限性,包括排水沥青的堵塞和清理文章未做过多论述;同时雨水仅有收集和排放方面的讨论,具体利用方式并未具体描述;此外针对种植土在污染物饱和后置换土的去向和进一步处理限于篇幅未做讨论。以上局限性均具备很好的研究价值,相信未来也会有相关成果不断涌现。

参考文献:

- [1] 薛敏蓉,郭林,别继艳.青岛市杭州支路—鞍山路高架快速路桥面排水工程设计[J].给水排水,2009,45(3):53-55.
- [2] Jacob D. Pruitt. Assessment of Urban Stream Restoration Projects: A Case Study of Three Urban Streams in Kansas City[D]. Kansas City: University of Missouri-Kansas City, 2019.
- [3] Francisco J. Escobedo, Timm Kroeger, John E. Wagner. Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices[J]. Environmental Pollution, 2011, 159(8): 2078-2087.
- [4] Yuan J, Emura K, Farnham C. Is urban albedo or urban green covering more effective for urban microclimate improvement: A simulation for Osaka[J]. Sustainable Cities & Society, 2017, 32: 78-86.
- [5] Mike Peacock, Tim G. Jones, Martyn N. Futter, et al. Peatland ditch blocking has no effect on dissolved organic matter (DOM) quality[J]. Hydrological Processes, 2018, 32(26): 3891-3906.
- [6] Zhang L, Ye Z, Shibata S. Assessment of Rain Garden Effects for the Management of Urban Storm Runoff in Japan[J]. Sustainability, 2020, 12(23): 9982.
- [7] Ting Fong May Chui, Dieu Huong Trinh. Modelling infiltration enhancement in a tropical urban catchment for improved stormwater management[J]. Hydrological Processes, 2016, 30(23): 4405-4419.
- [8] 聂大华.城市道路雨水利用设计概要[C]//中国土木工程学会市政工程分会城市道路与交通工程委员会.第九次全国城市道路与交通工程学术会议论文集.第九次全国城市道路与交通工程学术会议论文集,2007.
- [9] 陈哲.“海绵城市”理念下的城市滨水绿道景观设计研究[D].武汉:湖北美术学院,2019.
- [10] 俞孔坚,李迪华,袁弘,等.“海绵城市”理论与实践[J].城市规划,2015,39(6):26-36.
- [11] 赵曜,孙红亮,朱宇杰,等.透水性沥青混合料目标空隙率的确定方法[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2015,16(4):353-359.
- [12] 黄晓明,曹青青,刘修宇,等.基于路表分形摩擦理论的整车雨天制动性能模拟[J].吉林大学学报(工学版),2019,49(3):757-765.
- [13] 张天友.基于数值模拟的多孔沥青路面排水特性研究[D].南京:东南大学,2023.
- [14] GB 50014—2021 室外排水设计标准[S].
- [15] 王荣和,唐剑晖,张力,等.上海市内环线高架道路雨水排水设施分析研究[J].给水排水,2001(8):5-9.
- [16] 刘建华,郭忠印.塑料盲沟材料性能测试分析与应用技术探讨[J].公路,2004(11):113-117.
- [17] 李晓莉.塑料盲沟在城市快速路中的应用[J].中国市政工程,2007(5):45-56;99-100.
- [18] 毛荣华,吴廷楹,吴婷婷.塑料盲沟在高速公路桥面排水中的应用[J].江西建材,2004(3):7-8.
- [19] 刘晓鑫,丁志强,沈健聪.极端降雨频发背景下城市桥梁排水设计探讨[J].城市道桥与防洪,2023(11):66-70.
- [20] 孙明亮,李一鸣,刘超,等.高架桥排水设施优化探讨[J].市政技术,2023,41(2):53-58;97.
- [21] 王亮,吴舒畅,朱世俊.污水非满流圆管水力计算公式简化探讨[J].中国给水排水,2025,41(14):63-68.
- [22] 郭超.雨水花园集中入渗对土壤和地下水影响的试验研究[D].西安:西安理工大学,2019.
- [23] 白鹏凯,方琼,黄晓家,等.雨水花园对地下水补给和径流控制影响研究[J].工程建设与设计,2024(23):13-16.
- [24] 刘书敏,薛露肖,杨珊珊,等.黑臭河道生态治理中生物接触氧化净化槽应用[J].环境科学与学,2018,41(11):115-120.
- [25] 杜建康.基于海绵城市理念的高架桥雨水排水设计[J].城市道桥与防洪,2019(8):134-136;151.
- [26] 李海燕,魏鹏,张悦.生态雨水设施的污染物积累效应及风险研究进展[J].水利水电科技进展,2015,35(6):90-95.
- [27] 王亮,吴舒畅,杨华展,等.基于环境承载力的下沉式绿地污染物迁移数学解析模型[J].净水技术,2023,42(11):149-158.
- [28] 贾忠华,吴舒然,唐双成,等.雨水花园集中入渗对地下水水位与水质的影响[J].水科学进展,2018,29(2):221-229.
- [29] 李怀恩,贾斌凯,成波,等.海绵城市雨水径流集中入渗对土壤和地下水影响研究进展[J].水科学进展,2019,30(4):589-600.
- [30] 黄俊,史如萃,乔建刚.天津市快速路排水工程设计要点分析[J].城市道桥与防洪,2022(3):90-92.
- [31] 吴俊奇,李琛,辛波,等.对于雨水斗气阻现象的研究与讨论[J].科学技术与工程,2016,16(26):285-290;296.