

基于桩网结构的反滤混凝土护坡 在临河软土路基中的应用

张昊

中国铁建大桥工程局集团有限公司,天津 300300

摘要:为解决高速公路施工时临河软土路基的沉降控制、边坡稳定与生态保护协同优化等问题,基于津石高速公路第六标段实际工程案例,构建桩网-反滤协同理论模型,采用预应力高强混凝土(prestressed high-strength concrete, PHC)管桩和加筋垫层形成的桩网结构,结合反滤混凝土护坡的新方案,并与传统方法进行对比分析。研究表明:新方案有效提高了地基承载力和路基稳定性,工后沉降不大于52 mm,比传统方法减小37%,差异沉降小于2.0 mm/m;反滤护坡使孔隙水压力减小55.6%,安全系数比传统护坡方案增大14.4%;CO₂排放减少27.6%,悬浮物排放减少78.2%,pH值回归中性(7.6),全生命周期成本降低19.6%,工期缩短66.7%。该方案有效解决承载力-沉降、水流-土体相互作用及施工窗口期限限制三大矛盾,为类似临河软土路基工程提供高效、稳定、环保的解决方案。

关键词:桩网结构;反滤混凝土护坡;管桩;临河软土路基

中图分类号:U213.1⁺5

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)06-0070-08

引用格式:张昊. 基于桩网结构的反滤混凝土护坡在临河软土路基中的应用[J]. 山东交通学院学报, 2025, 33(6): 70-77.

ZHANG Hao. Application of pile-net structure-based filter concrete slope protection in soft soil subgrade by the river[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(6): 70-77.

0 引言

随着我国基础设施建设的快速发展,高速公路建设工程项目在沿海及河网地区日益增多,临河软土路基的处理成为工程中的关键问题^[1-3]。堆载预压、水泥搅拌桩等传统软土路基处理方法存在河道污染、不均匀沉降、施工周期长、对环境影响大、施工控制复杂、处理深度有限,难以控制成本和稳定性差等问题,难以满足现代工程对地基承载力、工后沉降以及边坡稳定性的严格要求^[4-6]。新的软土路基处理技术包括采用真空预压的排水固结法、刚性桩复合地基、轻质材料填筑、动力排水固法等,需要材料科学与岩土工程及生物技术的交叉应用,实现全过程智能化与自适应。

研究人员在桩基加固与路基防护方面提出多种改进方案。在竖向加固技术与桩体性能方面,预应力高强混凝土管桩结合桩帽和加筋垫层形成桩网结构,荷载传递性能和施工效率较好,应用广泛^[7-9]。郑刚等^[10-11]、Zhou等^[12]通过数值分析,揭示群桩系统中桩体空间位置对其破坏模式的显著影响,提出桩-土系统的分区破坏理论。Qu等^[13]通过足尺试验探讨螺杆桩的破坏机理。这些研究为优化桩基设计、预防不同模式的桩体破坏提供理论基础。在边坡稳定性与复合地基协同工作性能方面,研究重点为荷载传递机制与失稳模式。毕俊伟等^[14]通过离心试验提出倾斜软土地基的斜桩加固方案;刘宏扬等^[15]通过离心模型试验揭示水泥粉煤灰碎石桩复合地基中坡脚与路肩桩体不同的破坏形式;王恒等^[16]基于应变软化模型分析边坡支护结构的渐进破坏过程;张振等^[17]通过劲芯水泥土桩、潘高峰等^[18]通过桩网结构路

收稿日期:2025-07-31

作者简介:张昊(1994—),男,天津河西人,工程师,主要研究方向为路基工程与软基处理技术、边坡稳定与防护技术、道路施工技术, E-mail:407499171@qq.com。

基的现场试验, Cheng 等^[19]和 Wang 等^[20]通过土拱效应与土工格栅的相互作用, 分别明确桩-土-加筋体协同承载机理; 余雷等^[21]的地基土分类, 张军杰等^[22]的离心模型试验, 赵艳等^[23]的稳定性计算方法, 以及陈仕文等^[24]、罗强等^[25]、杨勇等^[26]的变形特性与影响因素分析, 共同完善复合地基设计与稳定性评估体系。在可靠性分析与设计理论发展方面, 研究人员致力于提高设计的合理性与经济性: Pramanik 等^[27]、Dos 等^[28]分别提出基于极限沉降的可靠度指标及耦合分析方法; 邓友生等^[29]指出现有可靠度理论未充分考虑土体变异性, 建议发展模糊可靠性理论; Zhuang 等^[30]提出可量化土拱、格栅与软土荷载分担的简化设计方法, 推动设计理论实用化。桩网结构在软基处理中优势显著, 包括沉降控制能力较强, 施工速度较快, 对深厚软土和复杂地质条件适应性较强等。反滤护坡技术在生态护岸方面也取得长足进步。将桩网结构与反滤混凝土护坡进行系统耦合, 实现临河软土路基在承载力、沉降控制、边坡稳定与生态保护方面的协同优化, 仍缺乏系统的机理研究和工程验证。

本文以津石高速公路第六标段为工程背景, 提出桩网结构结合反滤混凝土护坡的综合处理方案(以下简称桩网-反滤新方案), 构建桩网-反滤协同模型, 通过预应力高强混凝土 (prestressed high-strength concrete, PHC) 管桩与加筋垫层组成桩网结构增强地基, 结合反滤混凝土护坡实现渗流稳定与生态防护, 旨在系统解决临河软土路基中的承载力-沉降矛盾、水土相互作用及施工周期限制等关键问题, 并为类似工程提供技术借鉴和理论支持。

1 工程案例介绍

1.1 工程概况

津石高速公路是连接天津与石家庄的重要通道, 是京津冀协同发展、交通一体化的重要组成。津石高速公路(海滨大道—荣乌高速)工程第六标段位于天津市滨海新区和西青区交界处, 为堤路共建段, 双向四车道, 标准段路基宽 27.5 m, 设计速度为 100 km/h。

项目起止里程为 K21+531.031—K26+117.550, 全长约 4.6 km, 线路沿独流减河北堤布设, 主要为路基工程。本标段设计为分离式路基外加一条巡堤路, 利用既有大堤作为高半幅路基, 并于既有河道漫滩内填筑低半幅路基及巡堤路。

1.2 临河软土路基地质条件

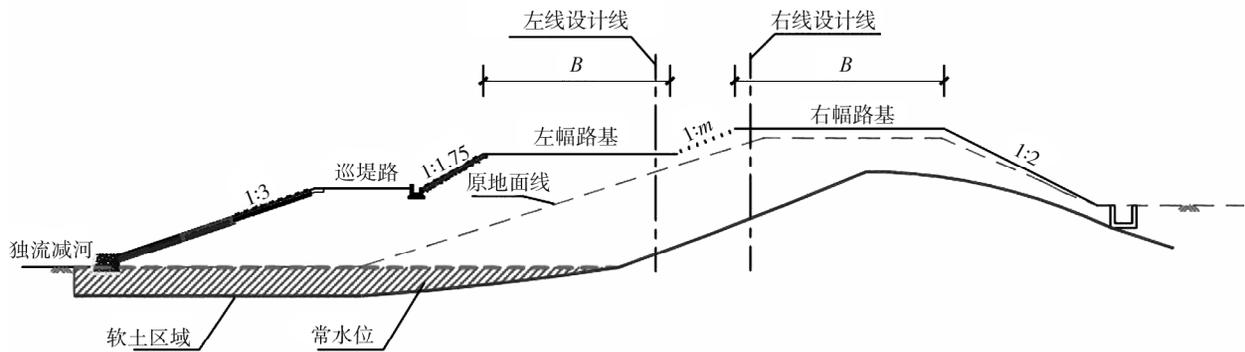
根据地质勘察报告, 独流减河滩地层自上而下分为 3 层: 表层硬壳层厚 1.0~1.5 m, 可塑状粉质黏土, 承载力约 100 kPa; 淤泥质黏土层(主控层)厚 8.0~14.0 m, 灰色流塑状, 孔隙比为 1.2~1.5, 渗透系数为 5×10^{-7} cm/s; 粉砂层埋深大于 15.0 m, 中密状态, 承载力大于 200 kPa, 为桩端持力层。

独流减河软土具有高含水率、高压缩性、高灵敏度(灵敏度 $S_l = 3 \sim 4$)、低强度(内摩擦角为 $5^\circ \sim 8^\circ$)、低渗透性、低承载力(承载力小于 80 kPa)等典型滨海软土工程特性。独流减河软土物理力学参数如表 1 所示。

表 1 独流减河软土物理力学参数

天然含水率 $\omega/\%$	孔隙比 e	渗透系数 $k/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	黏聚力 c/kPa	压缩系数 $\alpha_{1-2}/\text{MPa}^{-1}$
35~45	1.2~1.5	5×10^{-7}	5~8	0.7~1.0

独流减河段需同时解决沉降控制、边坡抗冲、生态保护三大矛盾: 1) 承载力-沉降矛盾, 软土承载力 $f_{ak} \geq 150$ kPa, 但天然地基 $f_{ak} < 80$ kPa; 2) 水流-土体相互作用, 需抵抗流速 5 m/s 的冲刷力, 同时排出渗流水(单宽渗流量 $q > 0.15$ L/(s·m)); 3) 施工窗口期限制, 汛期水位上涨 2 m, 要求处理周期小于 4 个月。传统的处理方法在临河软土路段存在系统性缺陷, 无法满足当前对地基承载力、工后沉降以及临河边坡稳定性的严格要求。临河软土地基的处理是控制路基施工质量的关键环节。本工程软土路基示意图如图 1 所示。



注: B 为路基宽度。

图1 软土路基示意图

2 桩网-反滤协同模型及关键技术

桩网-反滤协同模型的核心是建立竖向加固(桩网)、水平约束(加筋垫层)与坡面防护(反滤层)三者间的力学与渗流耦合关系,此模型综合考虑桩土应力比、加筋垫层的拉膜效应以及反滤层对桩间土固结过程的加速作用。

2.1 模型关键参数与边界条件

1) 桩基承载力。依据文献[31]计算单桩极限承载力,桩侧阻力为 $10 \sim 15 \text{ kPa}$,按粉砂层实测结果取桩端阻力,基于现场静力触探与试桩结果确定关键参数,确保模型的地域适用性。

2) 沉降-渗流耦合。反滤层修正系数 λ 与反滤层的等效渗透系数和厚度相关,引入 λ 优化传统固结度 U_v ,优化固结度

$$U_v' = \lambda U_v,$$

通过室内渗透试验确定 $\lambda = 1.25$,更真实地反映反滤层对排水路径缩短的贡献。

3) 边界条件。设模型底部为固定约束,临河侧坡面为透水边界,模拟河水渗流与排出,设背河侧为对称边界。

2.2 稳定性分析

采用 Bishop 法计算边坡稳定性,将桩体提供的抗剪力 F_p 作为附加抗滑力矩直接纳入安全系数公式,量化桩网结构对边坡稳定的贡献^[32]。

桩网结构结合反滤混凝土横断面示意图如图2所示。

2.3 关键施工技术

桩网结构结合反滤混凝土处理临河软土路基,安装工艺流程为:将路基填筑至桩顶标高,进行 PHC 预应力管桩、桩帽施工,铺设加筋垫层,进行反滤混凝土护坡的施工、养护和检测。

2.3.1 桩网结构协同施工关键技术

为解决竖向承载力不足与不均匀沉降问题,采用精细化沉桩顺序控制,根据先临河后背河、先中间后两边的沉桩顺序,如图3、4所示,有效约束软土挤土效应,从源头控制桩体偏位及由此引发的附加沉降。

进行桩帽-加筋垫层界面强化。桩帽顶部预埋抗剪植筋 ($4\Phi 20 \text{ mm}$),与上层三向土工格栅有效嵌固,形成刚性桩体与柔性加筋层的强力过渡。此构造措施确保上部荷载向桩体的高效转移,是优化桩土

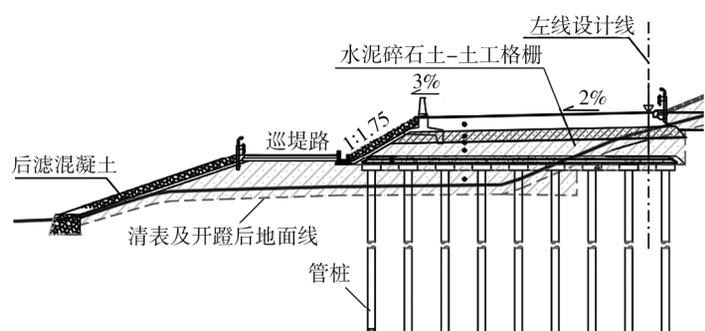


图2 桩网结构结合反滤混凝土横断面示意图

应力比、控制差异沉降的关键。

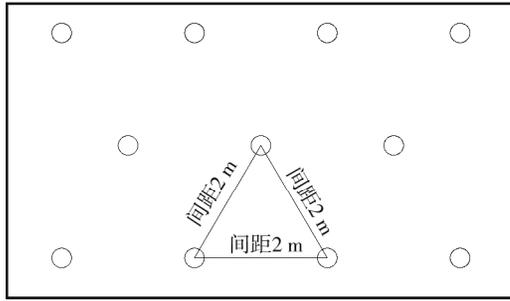


图3 预应力管桩平面布置示意图

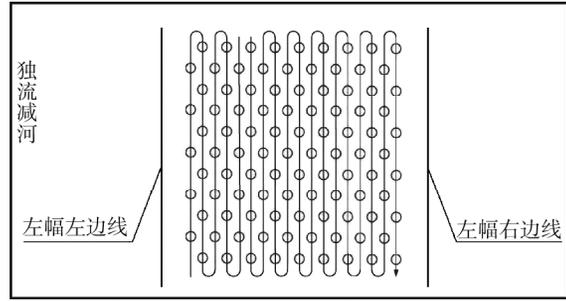


图4 预应力管桩沉桩顺序

2)进行加筋垫层整体性控制。采用方格卸料法与先静压后振压的碾压工艺,保证水泥碎石土密实度,有效保护土工格栅不受损伤,确保充分发挥拉膜效应。

2.3.2 复合反滤护坡体系

为解决坡面渗流稳定、河水冲刷与生态兼容问题,构建复合反滤护坡体系。

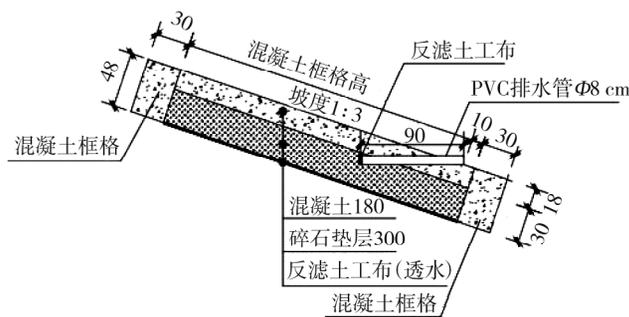
1)构建复合反滤层。根据 Terzaghi 准则^[33]设计并铺设反滤土工布-30 cm厚级配碎石层,形成兼具高效排水与防淤堵功能的反滤体系,能快速消散坡体内超静孔隙水压力,提高渗透稳定性,防止边坡因内部侵蚀而失稳。

2)集成排水与生态设计。在反滤混凝土板接缝下方预埋直径 8 cm 的聚氯乙烯 (polyvinyl chloride, PVC) 排水管,与碎石垫层构成完整的表面水与渗流水导排网络。采用开孔式混凝土板与 L 型闭孔泡沫塑料板填缝,可适应结构变形,也为后期植被恢复提供空间,实现结构稳定与生态功能的统一。混凝土护坡示意图如图 5 所示。



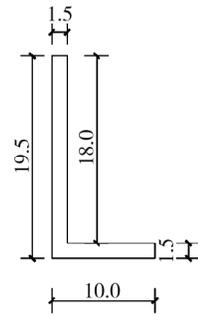
单位: cm。

a) 混凝土护坡立面图



单位: cm。

b) 混凝土护坡俯视图



单位: cm。

c) A放大

图5 混凝土护坡示意图

2.3.3 协同施工与工期优化技术

采取两个步骤在紧张的施工窗口期完成作业:1)先填筑后沉桩流水作业,优化施工组织,在路基填筑至桩顶标高后,立即进行PHC管桩施工,形成紧凑的流水作业面,大幅缩短地基处理的总工期;2)进行模块化施工,将桩网结构与反滤护坡分解为标准化施工模块,实现两个作业面的并行施工,将传统顺序施工周期缩短近2/3。

3 效果验证与对比分析

从沉降控制、边坡稳定、生态环境及经济效益4个维度验证桩网-反滤新方案的应用价值,并与传统方法水泥搅拌桩、堆载预压对比。

3.1 沉降控制机理与效果

采用新方案工后典型断面沉降监测数据如表2所示,沉降控制效果对比数据如表3所示。

由表2、3可知:新方案工后沉降发展迅速并快速收敛,12个月后的沉降仅为48 mm,远小于传统方法。新方案的最大沉降、差异沉降比传统方法分别减小37%、35%。主要原因是结构体系的协同作用,桩网结构是主承载骨架,能将大部分荷载直接传递至深层持力层,压缩层厚度和初始沉降显著减小;反滤层作为加速固结的媒介,通过缩短排水路径显著加快桩间软土的排水固结速率,有效消除次固结沉降的主要来源。桩网结构与反滤层二者协同,实现对总沉降与差异沉降的精准、高效控制。

3.2 边坡稳定性与水力耦合机制验证

3.2.1 孔隙水压力消散效能

暴雨期间,无护坡、传统护坡、反滤护坡条件下的孔隙水压力变化曲线(坡体内距地表2 m处)如图6所示。

由图6可知:反滤护坡在暴雨12 h后的孔隙水压力峰值比无护坡工况减小55.6%,反滤层为坡体提供高渗透性的排水边界,提供利于孔隙水压力快速消散的零边界阻力条件,超静孔隙水压力难以积聚,确保土体有效应力在暴雨期间仍能维持较高水平,提高边坡抗剪强度。

3.2.2 安全系数

采用Bishop法计算安全系数,结果如表4所示。由表4可知:在最不利的水位骤降工况下,反滤护坡方案的安全系数比无处理方案、传统护坡方案分别增大31.2%、14.4%,表明桩网-反滤体系在力学加固与水力调控上的协同效应较好,桩网结构提供抗滑力矩,反滤层通过控制渗流将边坡从濒临失稳状态($f_s < 1.0$)提高至安全储备充足的状态。

3.3 生态环境效益分析

碳减排效益实测数据如表5所示。施工期河道水质监测数据如表6所示。

表2 典型断面沉降监测数据

时间/月	沉降/mm		
	临河侧	路中	背河侧
0	0	0	0
3	18	15	12
6	32	28	25
12	48	42	38

表3 沉降控制效果对比

处理方法	最大沉降/mm	差异沉降/(mm·m ⁻¹)	稳定时间/月
桩网-反滤	52	1.8	4
水泥搅拌桩	142	5.2	12
堆载预压	158	6.0	18

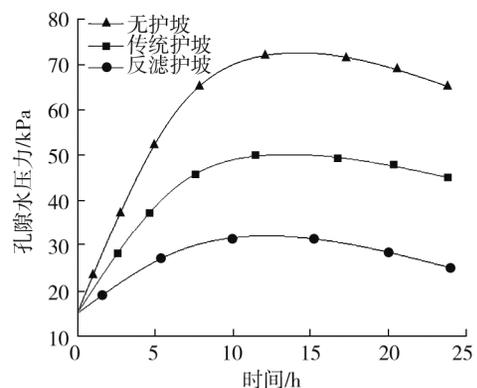


图6 不同护坡孔隙水压力变化曲线

表4 采用Bishop法计算安全系数

工况	安全系数		
	无处理	传统护坡	反滤护坡
正常水位	1.18	1.32	1.51
水位骤降2 m	0.95	1.15	1.38

表5 碳减排效益实测数据

方案	CO ₂ 排放/t			总计
	机械 设备	材料 生产	土方 运输	
传统工法	620	850	410	1 880
桩网-反滤	380	720	260	1 360

表6 施工期河道水质监测数据

方案	悬浮物	pH 值	化学
	质量浓度/(mg·L ⁻¹)		需氧量/(mg·L ⁻¹)
传统方法	220.0	9.8	85.0
桩网-反滤	48.0	7.6	32.0
排放标准 ^[34]	≤70.0	6.0~9.0	≤50.0

由表5可知:采用桩网-反滤新方案,机械设备、材料生产、土方运输的CO₂排放比采用传统方法分别减小38.7%、15.3%、27.7%,CO₂总排放减少27.6%。

由表6可知:采用桩网-反滤新方案的悬浮物质量浓度比采用传统方法减少78.2%,pH值回归中性(7.6),化学需氧量比采用传统方法减少62.4%。

3.4 全生命周期经济效益

采用桩网-反滤新方案和普通水泥搅拌桩方案的全生命周期经济性分析结果如表7所示。控制指标沉降控制、边坡稳定性、环保合规性、工期缩短、成本节约的权重分别为30%、25%、20%、15%、10%,各控制指标综合效益得分如表8所示。

表7 全生命周期经济性分析结果

方案	成本/(万元·km ⁻¹)					工期/月
	材料费	机械费	人工费	建设成本	维护成本	
桩网-反滤	320	180	90	590	50	4
水泥搅拌桩	280	210	120	610	150	12

表8 控制指标综合效益得分

方案	指标得分					综合得分
	沉降控制	边坡稳定性	环保合规性	工期缩短	成本节约	
传统工法	60	65	50	40	70	58.5
桩网-反滤	90	92	85	95	88	89.1

由表7可知:采用桩网-反滤新方案的材料费比采用普通水泥搅拌桩增加40万元/km,机械费、人工费、建设成本、维护成本比采用普通水泥搅拌桩分别减少30、30、20、100万元/km,工期比采用普通水泥搅拌桩缩短66.7%,表明桩网-反滤新方案的全寿命周期经济性较好。

由表8可知:采用桩网-反滤新处理方法,沉降、边坡稳定性、环保合规性、工期缩短、成本节约控制指标综合效益得分比传统工法分别提高50.0%、41.5%、70.0%、137.5%、25.7%。新方案在生态效益(悬浮物质量浓度、pH值、CO₂排放显著改善)和全生命周期成本(维护成本降低100万元/km)上优势较大。新方案综合得分比传统工法提高52.3%,尤其在环保合规性与工期缩短两项指标上优势突出,表明新方案可兼顾施工窗口期与生态保护。

4 结语

针对临河软土路基工程中面临的沉降控制、边坡稳定与生态保护协同难题,提出桩网结构结合反滤混凝土护坡的综合处理方案(简称桩网-反滤新方案)。桩网-反滤新方案通过竖向的桩网结构体系与坡面的反滤防护体系协同作用,系统性地解决承载力不足、渗流不稳定与施工周期紧张的矛盾。

结合工程监测与实践验证,桩网-反滤新方案通过桩网-反滤三者协同作用,在确保结构安全的同时,实现多性能目标的显著提高。在沉降控制方面,路中监测点12个月后的沉降仅为42 mm,差异沉降小于2.0 mm/m;在边坡安全方面,暴雨期间坡体内孔隙水压力峰值比传统方法减小超55.6%,水位骤降工况下的安全系数由0.95增至1.38;在环境效益方面,施工期悬浮物浓度降至48.0 mg/L,CO₂排放比传统方法减少27.6%;在综合经济性方面,每公里建设与维护成本累计节约约120万元,工期较传统方法缩短近2/3。

新方案通过桩网-反滤协同工作机制,在技术可行性、工程可靠性、生态友好性和经济合理性方面均体现显著优势,为类似临河软土路基工程提供可复制、可推广的系统解决方案。后续研究可聚焦于长期性能跟踪、参数精细化调控及环保材料的集成应用,以进一步推动该技术向标准化、绿色化方向发展。

参考文献:

- [1] 李强. 基于钻孔灌注桩技术的高速公路软土路基加固处理方法[J]. 交通节能与环保, 2024, 20(5): 201-204.
- [2] 侯军. 高速公路软土路基加固处理技术研究[J]. 中国新技术新产品, 2024(23): 96-98.
- [3] 杨华保. 基于有限元分析的软土路基加固效果研究: 以茂名市某公路工程为例[J]. 工程技术研究, 2022, 7(22): 30-32.
- [4] 吴楠, 肖军华. 软土地区地铁高架结构不均匀沉降特征与影响因素[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(2): 12-20.
- [5] 左娜, 黄昊. 公路软土路基加固及沉降研究: 以某高速公路 K45+678 断面软土地基为例[J]. 工程技术研究, 2021, 6(15): 84-85.
- [6] 姜毅博. 土石围堰渗流及边坡稳定性研究进展[J]. 南方农机, 2019, 50(15): 264-265.
- [7] 童小娟, 李声虎. 预应力管桩在高速公路软基处理中的应用[J]. 山东交通科技, 2025(增刊1): 22-24.
- [8] 戎贤, 齐晓光, 李艳艳. 预应力高强混凝土管桩滞后性能的试验研究[J]. 河北工业大学学报, 2013, 42(2): 88-91.
- [9] 戎贤, 邱昊, 李艳艳. PHC管桩抗震性能及其改善措施的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2012(9): 32-36.
- [10] 郑刚, 夏博洋, 周海祚, 等. 桩体模量对水泥土搅拌桩复合地基破坏影响研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(9): 146-154.
- [11] 郑刚, 张军辉, 章定文, 等. 地基处理技术现状与发展[J]. 土木工程学报, 2024, 57(7): 51-70.
- [12] ZHOU G Z, LÜ L, YU X X, et al. Coupled influence of geosynthetic reinforcement and column configuration on failure dynamics in deep mixed columns under embankment loading[J]. Acta Geotechnica, 2024, 19(11): 7663-7676.
- [13] QU S Z, ZHANG Q, GUO Y H. Experimental and numerical studies of the failure mode and mechanical performance of helices in screw piles[J]. International Journal of Civil Engineering, 2024, 22(5): 839-857.
- [14] 毕俊伟, 高广运, 张建经. 下覆倾斜地层软土桩-网复合地基破坏机理试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(2): 1-9.
- [15] 刘宏扬, 罗强, 薛元, 等. 路堤荷载下 CFG 桩复合地基失稳破坏特性离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(8): 1502-1511.
- [16] 王恒, 陈峰, 黄建华, 等. 考虑水泥土软化特性的桩承加筋路堤渐进破坏研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(1): 197-209.
- [17] 张振, 李凌旭, 叶观宝, 等. 劲芯水泥土桩复合地基承载路堤失稳破坏模型试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 340-349.
- [18] 潘高峰, 刘先峰, 袁胜洋, 等. 超固结膨胀土地基桩网结构路基承载特性现场试验研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(10): 131-141.
- [19] CHENG X S, CAI X D, ZHA W X, et al. Engineering characteristics test on pile-net composite foundation in loess areas[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering, 2022, 175(1): 3-14.
- [20] WANG H L, CHEN R P, LIU Q W, et al. Investigation on geogrid reinforcement and pile efficacy in geosynthetic-reinforced pile-supported track-bed[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2019, 47(6): 755-766.
- [21] 余雷, 崔俊杰. 高速铁路地基土压缩性分类及中低压缩性土变形特性研究[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(7): 7-11.
- [22] 张军杰, 顾行文, 任国峰, 等. 超大堆载下桩网复合地基变形特性离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(增刊1): 212-216.

- [23] 赵艳,余鹏. 刚性桩复合地基稳定性设计方法分析[J]. 公路,2023,68(7):254-258.
- [24] 陈仕文,唐昌意,李栋. 加筋路堤下刚性桩复合地基变形特性分析[J]. 公路交通科技,2024,41(8):106-113.
- [25] 罗强,程田,薛元,等. 路堤下 CFG 桩复合地基稳定性分析方法及试验验证[J]. 铁道学报,2024,46(11):145-154.
- [26] 杨勇,赵晔伟,刘永杰,等. 复合结构路堤承载特征及关键影响因素研究[J]. 公路,2024,69(11):99-103.
- [27] PRAMANIK R, BAIDYA D K, DHANG N. Implementation of fuzzy reliability analysis for elastic settlement of strip footing on sand considering spatial variability[J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19(12): 04019126.
- [28] DOS PASSOS BELO J L, LINS DA SILVA J, DE QUEIROZ P I B. Reliability analysis of an embankment built and reinforced in soft ground using LE and FE[J]. Sustainability, 2022, 14(4): 2224.
- [29] 邓友生,苏家琳,程志和,等. 桩承结构可靠性理论研究与应用进展[J]. 济南大学学报(自然科学版),2020,34(2):99-105.
- [30] ZHUANG Y, CUI X Y, WANG K Y, et al. A simple design approach to analyse the piled embankment including tensile reinforcement and subsoil contributions[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(2): 466-474.
- [31] 中华人民共和国建设部. 建筑桩基技术规范:JGJ 94—2008[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [32] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑边坡工程技术规范:GB 50330—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [33] TERZAGHI K, PECK R B, MESRI G. Soil mechanics in engineering practice[M]. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons Inc., 1996.
- [34] 国家环境保护总局科技标准司. 地表水环境质量标准:GB 3838—2002[S]. 北京:中国环境科学出版社,2002.

Application of pile-net structure-based filter concrete slope protection in soft soil subgrade by the river

ZHANG Hao

China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300300, China

Abstract: To address the issues of settlement control, slope stability, and ecological protection during the construction of highways on soft soil foundations adjacent to rivers, based on the actual engineering case of the sixth section of the Tianjin-Shijiazhuang Expressway, a pile-net-filtering collaborative theoretical model is established. The model employs a pile-net structure formed by prestressed high-strength concrete (PHC) piles and reinforced cushion layers, combined with a new scheme for filtering concrete slopes, and is compared with traditional methods. The research results indicate that the new scheme effectively improves the bearing capacity of the foundation and the stability of the subgrade, with post-construction settlement not exceeding 52 mm (37% less than traditional methods) and differential settlement less than 2.0 mm/m; the filtering slope reduces pore water pressure by 55.6%, and the safety factor increases by 14.4% compared to traditional slope protection schemes; the life-cycle cost is reduced by 19.6%, construction time is shortened by 66.7%, carbon emissions are decreased by 27.6%, suspended particulate matter emissions are reduced by 78.2%, and the pH value returns to neutral (7.6). This scheme effectively resolves the three major conflicts of bearing capacity-settlement, water flow-soil interaction, and construction window limitations, providing an efficient, stable, and environmentally friendly solution for similar soft soil foundation projects adjacent to rivers.

Keywords: pile-net structure; filter concrete slope protection; pipe pile; soft soil subgrade by the river

(责任编辑:王惠)