

堤路改造工程差异沉降控制技术实施效果研究

李吉, 谢雨廷, 曾鹏, 朱明, 程攀

Study on the implementation effect of differential settlement control technology in embankment widening project

LI Ji, XIE Yuting, ZENG Peng, ZHU Ming, CHENG Pan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20221230002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

杭州湾跨海大桥南岸接线高速公路深厚软基处理

Treatment technology for deep and thick soft foundation of south linkage expressway of Hangzhou Bay Cross-sea Bridge
水利水运工程学报. 2017(3): 116 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.03.016>

路堤深厚软基管桩复合地基数值模拟

Numerical simulation of pipe pile composite foundation of deep soft foundation under embankment
水利水运工程学报. 2018(2): 43 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.02.006>

窝崩抢护治理中树头石阻水效果试验研究

Experimental study on the water blocking effect of tree head-stone in the treatment of pit collapse
水利水运工程学报. 2021(3): 119 <https://doi.org/10.12170/20200623001>

河湖清淤吹填土固结硬化及生态处治效果

Hardening of hydraulic fill dredged from rivers & lakes and its ecological treatment effect
水利水运工程学报. 2017(2): 1 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.02.001>

基于博弈论组合赋权的水环境综合治理效果评价

Evaluation of comprehensive water environment treatment effect based on game theory combination weighting
水利水运工程学报. 2018(6): 105 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.06.014>

钱塘江九溪涌潮重塑在工程实践中的探索研究

Exploratory research on rebuilding tidal bore in the Jiuxi reach of the Qiantang River in the project practice
水利水运工程学报. 2019(5): 114 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.015>



扫码进入官网，阅读更多精彩内容

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20221230002

李吉, 谢雨廷, 曾鹏, 等. 堤路改造工程差异沉降控制技术实施效果研究 [J]. 水利水运工程学报, 2023(4): 12-21. (LI Ji, XIE Yuting, ZENG Peng, et al. Study on the implementation effect of differential settlement control technology in embankment widening project[J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(4): 12-21. (in Chinese))

堤路改造工程差异沉降控制技术实施效果研究

李 吉¹, 谢雨廷², 曾 鹏³, 朱 明⁴, 程 攀⁴

(1. 南京市江北新区公共工程建设中心, 江苏 南京 211500; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 3. 衡阳北控水资源管理有限公司, 湖南 衡阳 421200; 4. 江苏中禹水利建设有限公司, 江苏 淮安 223001)

摘要: 针对堤路改造工程中面临的差异沉降控制等难题, 以南京市江北新区滨江堤防道路加宽改造工程为依托, 根据堤防下部地质条件与工程建设特点选取典型断面进行数值计算模拟, 开展天然堆载、台阶开挖联合土工格栅处理和深层水泥搅拌桩(DCM)处理 3 种方案的分析对比研究。结合数值计算结果, 采用上部结合面处置联合下部地基处理的差异沉降控制技术, 对软土地基进行深层水泥搅拌桩处理、在新老堤结合处进行台阶开挖联合土工格栅与锥探灌浆等方式相结合的措施进行加固处理。通过现场监测分析断面沉降、孔隙水压力与水平位移等的发展规律, 验证数值模型的合理性, 并评估该处理方案在实际堤路改造工程中的差异沉降控制效果。结果表明, 采用上部结合面处置联合下部地基处理的试验断面路中及右路肩工后剩余沉降分别为 16 和 20 mm, 二者差异沉降均保持在 4 mm 以下。这验证了该技术对堤路改造工程新老堤协调变形的控制效果, 可为后续滨江堤路改造工程差异沉降控制提供借鉴。

关 键 词: 堤路改造工程; 差异沉降; 地基处理; 实施效果

中图分类号: TV223

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2023)04-0012-10

长江沿线城市滨水道路集防洪、交通、岸线景观等功能为一体, 具有重要的自然生态功能和社会服务功能, 是提升城市整体防洪能力、维护城市生态系统安全、彰显滨江城市特色的强有力支撑, 具有显著的综合效益。由于堤路改造工程新旧堤防存在土性参数的差异性和几何形态变异性, 因此在建设过程中面临差异沉降控制与渗透变形破坏防控等诸多难题。目前已有许多学者开展了相关研究: 汪小茂等^[1]对采用堤路结合形式修建的武汉市滨江大道进行研究, 提出了堤路结合工程在布置形式、衔接处理及压实度标准等关键问题的工程设计建议; 胡晓红等^[2]对堤路结合的路基差异沉降控制技术进行研究, 提出堤防道路改造全要素理念, 并成功应用于武汉市汉口至阳逻江北快速路、长江主轴右岸大道等堤防道路, 为堤防道路的设计提供借鉴; 占鑫杰等^[3]以南京市某堤防拓宽工程为例, 建立数值计算模型研究了新老堤相互作用, 并提出开挖台阶结合土工格栅的施工工艺, 以减小堤身的变形和差异沉降; 李昂等^[4]结合长江干堤防洪能力提升工程, 提出利用开挖台阶联合土工格栅的方式对结合面进行加固。

南京江北新区堤路改造工程沿线地基土地质条件较差, 场地沿线广泛分布着软土(主要为淤泥质土)层, 新旧堤防下部软土地基固结程度的不同也容易产生差异沉降, 过大的差异沉降常会导致堤防结合部产生裂缝, 进而影响堤防的长期稳定。目前, 国内外已有软土路基差异沉降控制的相关研究: 章海明^[5]基于土体固结理论, 运用有限元方法对高速公路软土路基差异沉降进行分析, 验证采用粉喷桩加固软土地基的处

收稿日期: 2022-12-30

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC3000103); 国家自然科学基金面上项目(51979174); 水利部水旱灾害防御重点实验室开放基金资助项目(KYFB202112071053)

作者简介: 李 吉(1972—), 男, 江苏启东人, 高级工程师, 硕士, 主要从事市政、水利、建筑工程施工。

E-mail: 156227957@qq.com 通信作者: 谢雨廷(E-mail: 958278848@qq.com)

治效果;赵明华等^[6]对滨海道路软土路基特性进行相关研究,提出沉降预测模型;Yu等^[7]认为路面裂缝的产生主要由路基处理不当导致,通过数值计算证明可以使用轻质填充材料减小路堤沉降;宋书昌^[8]通过一维和三维蠕变试验,揭示了沿海公路软土路基长期沉降机理;Hao等^[9]通过对岸坡稳定性的数值模拟研究,验证了新老堤的渗透系数比对新堤坝边坡稳定性影响显著;张军辉^[10]运用有限元方法,对不同施工方法下软土地区新老堤的沉降进行数值模拟,得出新路基优先采用复合地基处理方法可降低对施工期老堤的扰动,并减小新老堤的工后沉降。虽然国内外学者对新老堤的差异沉降问题展开了大量研究,但缺乏对差异沉降的控制效果进行综合评价研究。

实际工程通常会结合现场监测数据对地基的沉降发展进行预测,从而验证和评估沉降控制效果。双曲线法根据实测数据进行拟合预测,并假定沉降曲线按沉降平均速度呈双曲线递减的规律变化,是当前应用较广的一种经验方法。有学者^[11-12]利用双曲线法分别对采用深层水泥搅拌(deep cement mixing, DCM)桩的软土路基和铺设土工格栅的黄土路基沉降进行预测,根据拟合优度验证了双曲线法在不同处理方式下路基沉降预测的应用可行性。本文结合南京江北新区堤防加宽道路改造工程,采用数值模拟和现场试验相结合的方式,提出堤路改造工程中软土路基的处理方案,并结合双曲线法分析评价设计方案的差异沉降控制效果。

1 江北新区堤防加宽道路改造工程概况

南京江北新区堤防加宽道路改造工程上起南京长江三桥、下至浦仪公路,场地沿线广泛分布着软土地基,其中主要为两类软土软土^[13]:①-3层淤泥和②-2层淤泥质粉质黏土。现状堤防经多年运行,下覆软土地基的固结沉降已基本完成,新建路堤在上覆堤身荷载作用下,易在新老堤结合处产生差异沉降,如不采取相应的加固处理措施,容易造成堤防道路拉裂破坏。根据《堤防工程设计规范》(GB 50286—2013),路基容许工后沉降值如下:(1)桥台与路堤相邻处 $\leq 10\text{ cm}$;(2)涵洞、箱涵、通道处 $\leq 20\text{ cm}$;(3)一般路段 $\leq 30\text{ cm}$ 。根据该地软土地基特点,结合工程实际,需从稳定和沉降两个方面分析,确保路基稳定的同时控制工后沉降,通过对沉降的分析计算,拟定需要处理的软基路段,选取安全经济的措施进行处理。

2 数值建模及差异沉降控制方案设计

2.1 数值模型方案及参数

根据堤路工程设计方案与工程地勘资料,选取填筑高度较高的K0+500断面进行数值模拟分析,该断面属于典型的新路-旧堤结合断面,针对3种处理方案开展计算分析,具体见表1。数值模拟计算参考汪璋淳等^[14]的有限元建模方案,地基土、新路堤填土、褥垫层及DCM桩使用摩尔库伦弹塑性本构模型,路面结构层与土工加筋使用弹性本构模型,主要材料的物理力学参数见表2。

表1 3种处理方案下的数值模型对比
Tab. 1 Comparison of numerical models under three schemes

处理方法	设计方案	研究重点
天然堆载	单纯路堤堆载预压处理	新老堤堤身、路基和结合部位的沉降变形规律
台阶加筋	使用开挖台阶结合土工加筋处理新旧路堤结合面,同时利用路堤堆载对地基进行预压处理	新老堤的沉降变形规律、结合部位的变形规律和土工织物的力学变形特性
DCM处理	采用深层水泥搅拌桩(deep cement mixing pile)复合地基法进行地基处理,在新旧堤结合段采用变桩长进行过渡,并在新旧路堤结合面采用台阶开挖结合土工加筋处理	新老堤的沉降变形规律、新老堤结合部位的变形规律和复合地基的变形规律

表 2 数值模型参数
Tab. 2 Parameters of numerical models

材料	孔隙比	渗透系数/(cm·s ⁻¹)	天然重度/(kN·m ⁻³)	弹性模量/kPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/°	泊松比
①-2素填土	0.907	1.00×10 ⁻⁵	18.9	2 680	16	18	0.35
②-1粉质黏土、黏土	0.881	1.00×10 ⁻⁵	19.0	2 460	15	16	0.38
②-2淤泥质粉质黏土、淤泥质黏土	1.019	7.57×10 ⁻⁶	18.2	1 200	14	12	0.44
②-3粉土	0.769	1.00×10 ⁻⁴	19.3	5 380	10	18	0.32
③-1粉砂	0.619	1.40×10 ⁻³	20.1	7 580		27	0.30
新路堤填土	0.500	1.00×10 ⁻⁵	21.2	12 900	50	18	0.35
路面结构			24.0	10 000 000			0.20
褥垫层	0.500	1.00×10 ⁻⁵	21.5	20 000	100	20	0.30
加筋				1 750 000			0.20
实际水泥土桩	0.500	1.00×10 ⁻⁷	21.0	150 000	200	30	0.25
二维等效水泥土桩	0.500	1.00×10 ⁻⁷	21.0	56 000	200	30	0.25

2.2 平面应变模型等效

本文通过建立二维平面应变模型对不同方案进行分析对比,其中在 DCM 桩数值模型建立中需要对水泥土桩进行平面应变等效处理。水泥土桩复合地基属于柔性桩复合地基,按照《复合地基技术规范》(GB/T 50783—2012),参考汪璋淳等^[14]的建模方案,将正三角形布置的深层水泥搅拌桩转化为平面应变桩墙,不改变桩间距及桩径,按照复合模量等效的思路进行转换可得:

$$E_{p3}m_3 + E_s(1 - m_3) = E_{p2}m_2 + E_s(1 - m_2)$$
 (1)

式中: E_{p3} 、 E_{p2} 分别为三维工况和平面应变等效工况下桩的弹性模量; m_3 、 m_2 分别为三维工况和平面应变等效工况下桩的面积置换率; E_s 为多层土的复合弹性模量。取路中心断面为计算断面, E_s 按照如下厚度加权公式进行计算:

$$E_s = \frac{h_s}{\sum_{i=1}^n h_i/E_i}$$
 (2)

式中: n 为土层数; h_s 为桩长; h_i 、 E_i 分别为桩长范围内各层土的厚度及弹性模量。实际三维情况的深层水泥搅拌桩,其桩身 28 d 无侧限抗压强度不小于 1.0 MPa,压缩模量可取桩体水泥土强度的 100~200 倍(取 180 MPa),泊松比取 0.25,换算后弹性模量为 E_{p3} =150 MPa,置换率 m_3 =14.5%。对于二维平面应变情况, m_2 =0.6/1.5=40%。根据以上参数,求得 E_{p2} = 56 MPa。

2.3 荷载、特征点、填筑设置

在数值模型的填筑过程模拟中,假设路堤填筑施工期为 3 个月,共分 5 层填筑,如图 1 所示,工后沉降基准期假设为 10 年。为了对比不同处理方式下的差异沉降控制效果,选取 5 个特征点进行分析,分别为老堤防临水侧坡脚、防浪墙墙脚、老堤防背水侧路肩、新堤防右路肩之下原地表、新堤防路中之下原地表,以 DCM 模型为例,5 个特征点分别对应图 2 中的 A~E。

2.4 数值模拟沉降分析

图 3 为新填筑道路中心位置(图 2 中 E 点)及右路肩位置(图 2 中 D 点)的沉降发展曲线,天然堆载与台阶加筋在两个位置的沉降曲线基本重合,最终沉降分别为 715 和 623 mm,采用 DCM 软土地基处理技术,路中与右路肩位置沉降分别缩减为 229 和

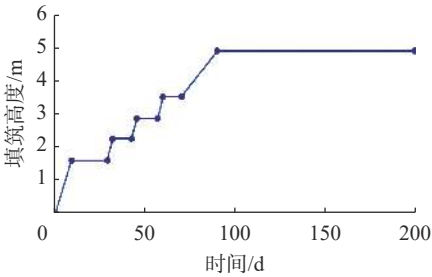


图 1 路堤分层填筑过程

Fig. 1 Diagram of the layered filling process of the embankment

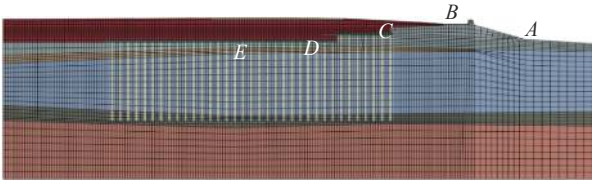


图 2 数值模拟特征点与 DCM 方案网格划分

Fig. 2 Feature points of numerical simulation and DCM condition meshing

183 mm。分析图 3 中路中断面原地表的工后沉降,天然堆载、台阶加筋和 DCM 处理 3 种地基处理方案的工后沉降分别为 305、305 和 88 mm。根据数值计算结果,天然堆载、台阶加筋均不能满足一般路段工后沉降小于 300 mm 的要求,而 DCM 处理方案在控制地基沉降方面具有显著作用,其工后沉降可以满足规范要求。

图 4 为路面范围内工后沉降分布结果,其中天然堆载方案路面最大工后沉降为 305 mm,路中与路肩工后差异沉降值为 59 mm;台阶加筋方案路面最大工后沉降及路中与路肩工后差异沉降值分别为 305 和 57 mm,且这两种方案的沉降曲线基本重合;DCM 处理方案的路面最大工后沉降为 88 mm,路中与路肩工后差异沉降值为 15 mm。从数值计算结果可以看出台阶加筋处理方法对降低路面差异沉降的作用微弱,而 DCM 设计方案不仅可以显著减小地基总体沉降变形量,还可以大幅缩减路面工后沉降及差异沉降。

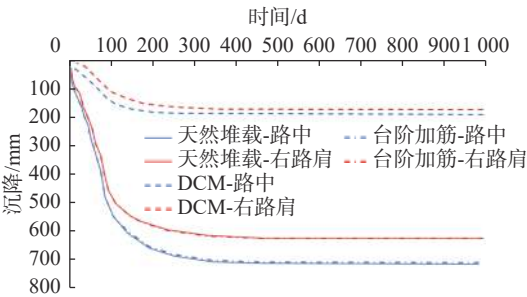


图 3 路面范围下原地表沉降对比

Fig. 3 Comparison of in-situ surface settlements under the pavement range

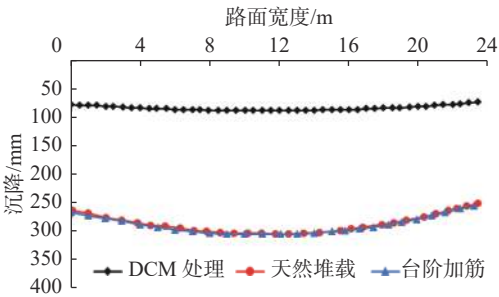


图 4 断面工后沉降分布

Fig. 4 Distribution of post-construction settlement in the cross section

图 5 为 3 种工况下最终沉降云图,台阶加筋与天然堆载工况最终沉降分别为 820 和 827 mm,最大沉降区均位于路面宽度之下的原地表位置。DCM 处理工况路面之下原地表沉降量大幅缩减,对应图 2 的 D、E 点沉降分别为 183 和 229 mm,最大沉降区位于左侧远离路面的未进行地基处理的场平堆载区,沉降极值为 706 mm。

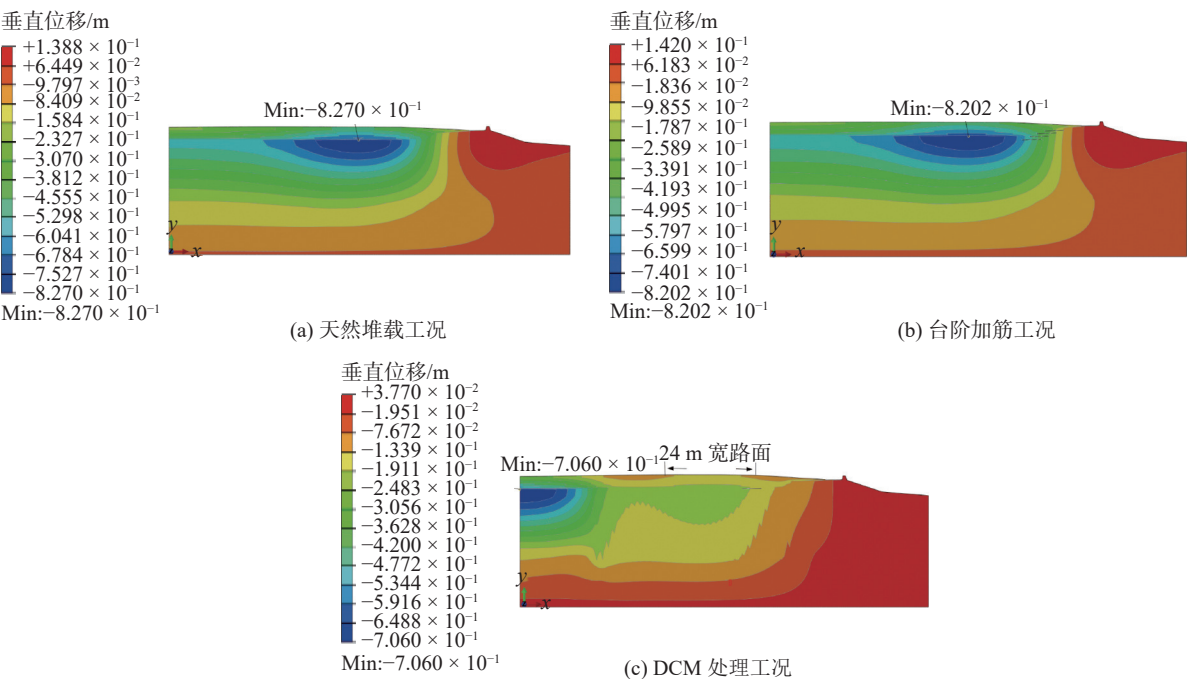


图 5 3 种工况下最终沉降云图

Fig. 5 Final settlement nephogram for three working conditions

2.5 数值模拟水平位移分析

图 6 为 3 种工况下最终水平位移云图。天然堆载工况下,地基最大水平位移为 440 mm,发生在新旧结合面之下的②-2 软土层中,距离填筑后地表约 10.4 m,台阶加筋工况与天然堆载工况的地基水平位移基本一致;DCM 处理工况的新旧堤结合面以下地基最大水平位移为 110 mm,位于②-2 软土层顶面处,地基最大水平位移转移至道路左侧场平区之下的软土层中,为 195 mm,距离地表约 12.6 m。计算结果表明,DCM 复合地基处理同时也能显著缩小软基的水平位移。

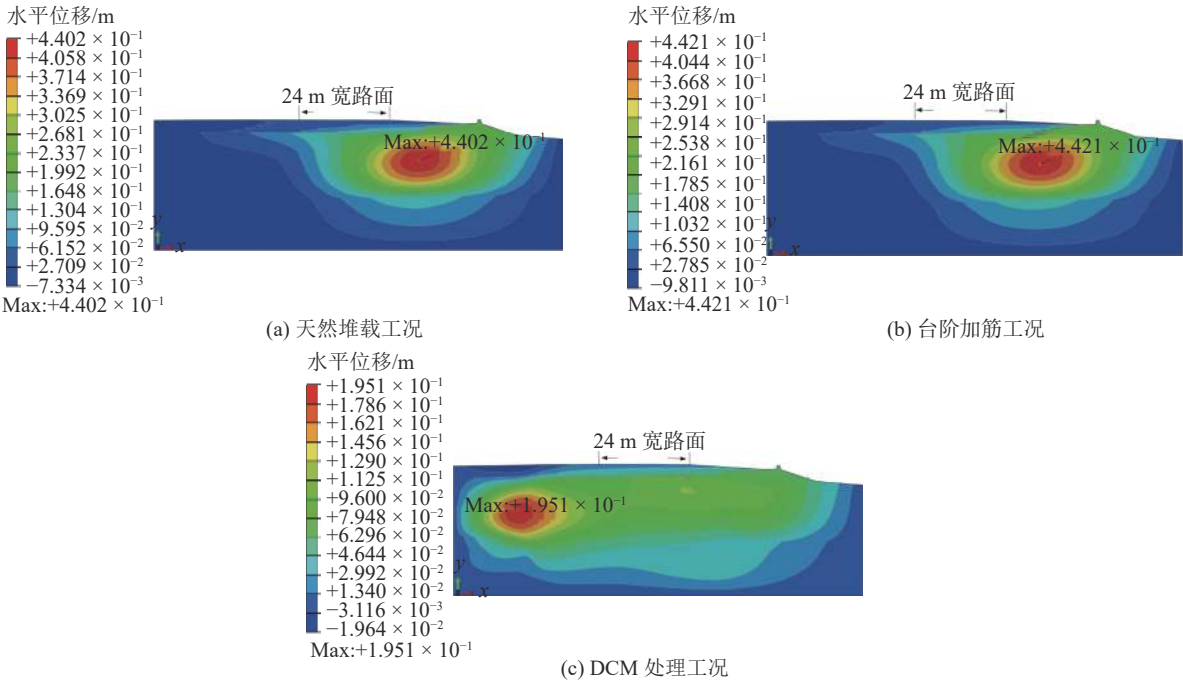


图 6 3 种工况下最终水平位移云图

Fig. 6 Final horizontal displacement nephogram for three working conditions

2.6 差异沉降控制设计方案

根据数值计算结果,在满足防汛和交通要求条件下,为解决新老路堤的差异沉降及其后续变形问题,拟采用上部结合面处置协同下部地基的联合处理技术对南京江北新区堤路改造工程进行加固处理。根据本工程特点,下部软土地基的处理方案为:对于浅表层软土,道路布置范围内进行清除换填;对于深层软土,由于堤路结合对堤身防渗要求较高,施工时需尽量避免对原状土扰动,地基处理采用双向深层水泥搅拌桩法,桩径 60 cm,桩间距 1.5 m,桩长 10~19 m,按正三角形布置。在堤身结合面的处置方面,拟采用“土工格栅+锥探灌浆”的处理方案:通过在浅层换填处理与深层搅拌桩处理交接处理设三向土工格栅,路堤填筑沉降完成后,对老堤防一级平台至堤脚部分灌注黏土浆液(图 7)。为进一步保证新老路基拼接的整体性,结合部采用台阶式的衔接方式。对本路堤结合段地面横坡陡于 1 : 5 的路段设计选用开挖台阶处理,沿老路坡面开挖台阶,台阶型式采用内倾式,如图 8 所示。该方案基于数值计算的分析结果,并借鉴了国内外的新旧路堤处理经验^[15],较好结合了本工程实际情况。

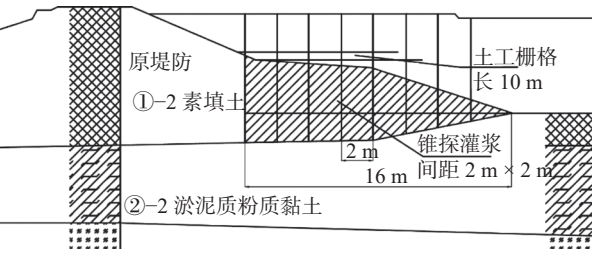


图 7 新老路堤结合面处理方案

Fig. 7 Treatment scheme of the joint surface of the old and new embankments

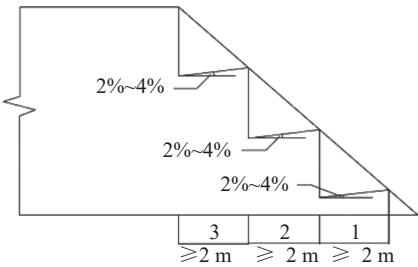


图 8 内倾式台阶

Fig. 8 Inverted steps

3 堤路改造工程实施效果评价

为了验证和评估上述差异沉降控制的应用效果,在南京江北新区堤路改造工程建设中选取 K0+500 断面为试验监测断面,开展孔隙水压力、表面沉降和深层水平位移等监测工作,通过分析对比数值模拟和试验监测数据对堤路改造工程的实施效果进行验证评价,其中剖面布置如图 9 所示。

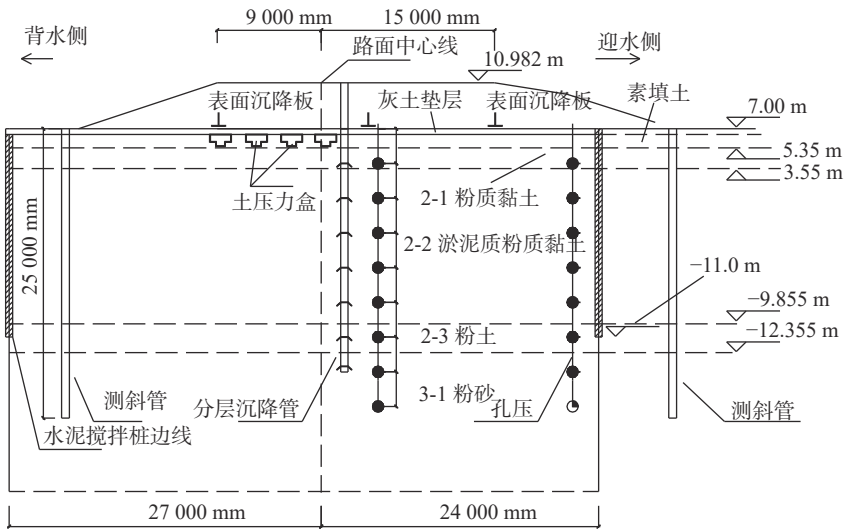


图 9 监测仪器布置

Fig. 9 Monitoring instrument layout

3.1 孔压监测成果分析

图 10 为 3 种不同技术方案超静孔隙水压力的数值模拟计算结果,其中台阶加筋方案与天然堆载方案曲线基本重合,且整体高于 DCM 处理方案,最后一次填土完成时刻超静孔压达到峰值,达到 35.4 kPa, DCM 处理方案的峰值超静孔压为 20.9 kPa,峰值超静孔压与路堤荷载之比分别为 0.34、0.20。超静孔压的数值计算结果表明,DCM 复合地基对上覆填土荷载进行了应力重分布,改变了荷载的传递,降低了新路堤填筑后主要软土层产生的超静孔压水平。

图 11 为超静孔隙水压力监测数据与数值计算的对比,在路堤填筑过程期间(0~90 d),测得地基主要软土层中部超静孔隙水压力消散规律与数值模拟结果基本一致,路面施工完成时(220 d)测得超静孔压约为 5.0 kPa,超静孔隙水压力大部分消散完成,在上覆堆载作用下地基主要软土层的压缩变形大部分已完成,上覆堆载产生的附加应力大部分转换成土体的有效应力,土体处于稳定状态。

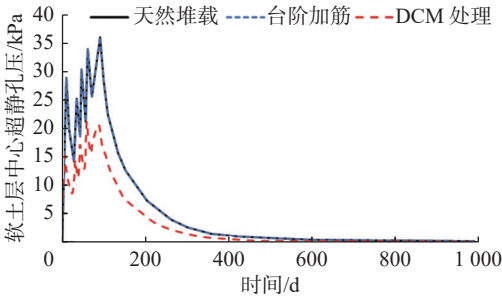


图 10 软土层中心位置孔压变化

Fig. 10 Change of pore pressure at the center position of soft soil layer

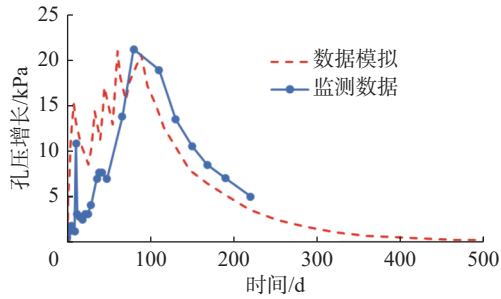


图 11 孔压数值计算与监测数据对比

Fig. 11 Comparison of hole pressure numerical calculation and monitoring data

3.2 沉降分析及工后沉降预测

K0+500 断面实测沉降如图 12 所示,路堤填筑期间断面沉降速率为 0~5 mm/d,未超过 10 mm/d 的监测预警值。在路堤填筑期间(0~90 d),随着荷载增加,沉降值逐渐增大,路中、右路肩和左路肩在填筑期产生的沉降分别为 107、91 和 101 mm。填筑结束后,地基在恒定荷载作用下沉降发展稳定。3 个位置(路中、右路肩和左路肩)在路面施工完成后(220 d)的沉降分别为 139、128 和 132 mm。为进一步分析工后沉降的发展,选取现有研究常用的双曲线法对工后沉降进行预测,计算公式如下:

$$(t-t_0)/(S_t-S_0)=\alpha+\beta(t-t_0) \tag{3}$$

式中: t 为满载预压时间; t_0 为到达满载的时间; S_t 为满载 t 时间的实测沉降量; S_0 为满载开始时的实测沉降量; α 和 β 为计算参数,可根据实测资料确定。最终沉降量为: $S_\infty=S_0+1/\beta$ 。

图 13 对比了 K0+500 断面路中(S12)和右路肩(S11)的实测结果、数值计算结果和基于实测沉降数据的双曲线法预测结果,其中双曲线法与实测数据吻合较好,拟合优度 R^2 均大于 0.97(图 14),验证了双曲线法在该加固措施下沉降预测适用性。根据沉降实测资料预测的路中和右路肩最终沉降量分别为 155 和 147 mm,剩余沉降分别为 16 和 20 mm,工后沉降较小。根据实测数据分析,工程结束前的沉降接近总沉降的 90%,与超静孔隙水压力消散的监测数据基本对应。基于实测沉降采用双曲线法预测的运行期路中与右路肩位置的差异沉降始终保持在 4 mm 以下,远远小于规范要求的差异沉降临界值,验证了本工程采用的 DCM 处理技术对差异沉降控制的有效性。

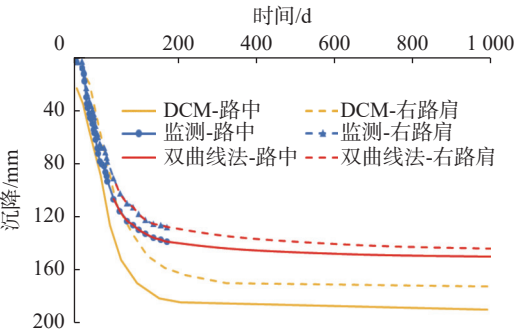


图 13 地表沉降模拟与监测结果对比

Fig. 13 Comparison of surface subsidence simulation and monitoring results

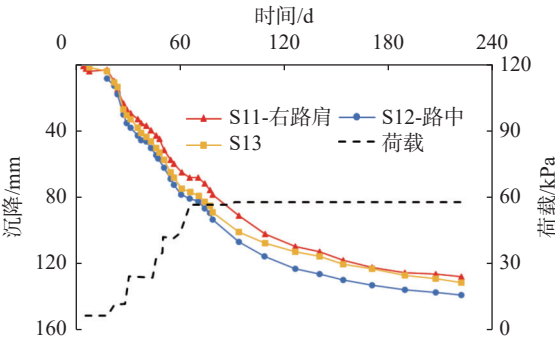


图 12 地表沉降监测成果

Fig. 12 Surface subsidence monitoring results

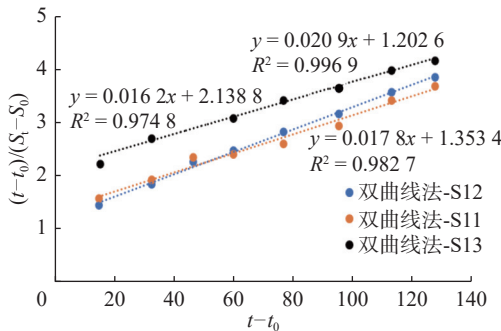


图 14 $(t-t_0)/(S_t-S_0)$ 与 $t-t_0$ 关系曲线

Fig. 14 Curve of $(t-t_0)/(S_t-S_0)$ and $t-t_0$

3.3 水平位移对比分析

图15为施工完成后水平位移监测数据与数值模拟DCM方案下的最终水平位移对比。填筑完成后,水平位移监测数据相差较小,最大偏差仅为1.5 mm左右,这说明本工程采用的加固处理技术同时对水平位移具有较好控制效果。此外,实测水平位移自地表向地下分布规律与数值模拟结果接近,且最大水平位移发生的位置均在深度为4 m左右的软土层中,实测最大水平位移为13.05 mm,小于数值模拟结果的65.89 mm,这表明该工法在实际应用中对于土体的变形控制效果更好。

结合沉降对比分析可知,目前的数值模拟存在一定的局限性,主要是文中采用的计算模型难以合理考虑土工格栅与土体的相互作用及对下部地基产生的应力重分布作用,无法体现土工格栅对地基侧向变形的限制作用,导致数值计算的水平位移大于实际监测值。在后续的研究工作中可进一步研究土工格栅与土体的相互作用机理,构建相应的力学模型从而为加宽培厚堤中采用土工格栅控制差异沉降与侧向变形提供理论支撑。

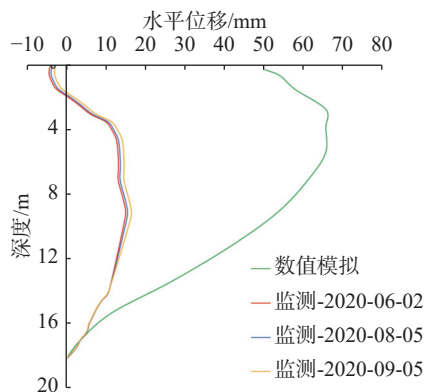


图15 水平位移数值计算与监测数据对比

Fig. 15 Comparison of horizontal displacement numerical calculation and monitoring data

4 结 语

本文结合南京江北新区堤路改造工程,通过对3种不同加固措施的沉降进行数值计算,选取合适的工法对软土地基进行处理,结合现场监测和双曲线法分析评价设计方案的差异沉降控制效果,得出结论如下:

(1)根据数值计算结果,DCM工况下路中与路肩差异沉降仅为15 mm,远小于天然堆载的59 mm和台阶加筋的57 mm,说明了DCM处理对工后沉降和差异沉降控制的有效性,可为堤路改造工程的差异沉降设计提供参考。

(2)根据现场试验断面监测结果,并结合双曲线法分析表明试验断面路中与右路肩位置的差异沉降控制在4 mm以内,进一步验证了上部结合面处置联合下部地基处理在新旧路堤协调变形控制的可行性和有效性,可为后续滨江道路堤防拓宽改造工程的差异沉降问题提供借鉴,具有良好的工程应用价值。

参 考 文 献:

- [1] 汪小茂,高红艳,李亮.城市堤路结合建设工程关键技术问题研究:以武汉市滨江大道建设工程为例[J].人民长江,2011,42(20):4-6. (WANG Xiaomao, GAO Hongyan, LI Liang. Study of key issues of construction of levee road by river side: the case of Wuhan riverfront road[J]. Yangtze River, 2011, 42(20): 4-6. (in Chinese))
- [2] 胡晓红,邓越胜.堤防道路改造技术研究及应用[J].长江科学院院报,2020,37(12):67-71,80. (HU Xiaohong, DENG Yuesheng. Research and application of Levee road reconstruction technology[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(12): 67-71, 80. (in Chinese))
- [3] 占鑫杰,腾昊,李文伟,等.软土地基上堤防拓宽工程变形协调措施研究[J].水利与建筑工程学报,2020,18(3):82-86. (ZHAN Xinjie, TENG Hao, LI Wenwei, et al. Deformation coordination measures of embankment widening project on soft soil foundation[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2020, 18(3): 82-86. (in Chinese))
- [4] 李昂,花剑岚,卢发周.新老堤防结合面加固措施探究:以南京长江干堤防洪能力提升工程为例[J].水利技术监督,2013,

- 21(5): 73-75. (LI Ang, HUA Jianlan, LU Fazhou. Exploration on reinforcement measures for the joint surface of new and old embankments: A case study of Nanjing Yangtze River dry embankment flood control capacity improvement project[J]. *Technical Supervision in Water Resources*, 2013, 21(5): 73-75. (in Chinese))
- [5] 章海明. 高速公路软土路基沉降及处治数值分析[J]. *水利与建筑工程学报*, 2017, 15(6): 211-215. (ZHANG Haiming. Numerical analysis of settlement and treatment of soft soil subgrade under highway[J]. *Journal of Water Conservancy and Architectural Engineering*, 2017, 15(6): 211-215. (in Chinese))
- [6] 赵明华, 刘建华, 刘煜, 等. 滨海公路软土路基变形机理及其沉降预测研究[J]. *公路交通科技*, 2006, 23(1): 32-35. (ZHAO Minghua, LIU Jianhua, LIU Yu, et al. Deformation mechanism and settlement forecast of soft clay embankment in coastal region[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2006, 23(1): 32-35. (in Chinese))
- [7] YU H, WANG YM, ZOU C, et al. Study on subgrade settlement characteristics after widening project of highway built on weak foundation[J]. *Arabian Journal for Science & Engineering*, 2017, 42(9): 3723-3732.
- [8] 宋书昌. 沿海公路路基沉降分析与修复措施[J]. *中国公路*, 2022(10): 100-101. (SONG Shuchang. Analysis and restoration measures of subgrade settlement of coastal highway[J]. *China Highway*, 2022(10): 100-101. (in Chinese))
- [9] HAO W, FAN H H, YANG X J. Numerical simulation on stability of widened levee slope with different widened widths a13nd different permeability coefficients[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(4): 1-9.
- [10] 张军辉. 不同软基处理方式下高速公路加宽工程变形特性分析[J]. *岩土力学*, 2011, 32(4): 1216-1222. (ZHANG Junhui. Analysis of deformation behavior of expressway widening engineering under different foundation treatments[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(4): 1216-1222. (in Chinese))
- [11] 杨青连, 张成良, 李小强. 双曲线法在软基沉降计算中的应用与分析[J]. *山西建筑*, 2006, 32(22): 140-141. (YANG Qinglian, ZHANG Chengliang, LI Xiaoqiang. The application and analysis of hyperbola method in soft foundation settlement calculation[J]. *Shanxi Architecture*, 2006, 32(22): 140-141. (in Chinese))
- [12] 李志雷, 王伟, 蔡旺. 曲线拟合法在黄土路基沉降预测中的应用[J/OL]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*. (2023-02-09)[2023-03-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1824.U.20230209.0918.004.html>. (LI Zhilei, WANG Wei, CAI Wang. Application of curve fitting method in loess subgrade settlement prediction[J/OL]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)*. (2023-02-09) [2023-03-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1824.U.20230209.0918.004.html>. (in Chinese))
- [13] 长江勘测规划设计研究有限责任公司.《江北新区长江岸线湿地保护与环境提升工程详细勘察阶段工程地质勘察报告(一期工程)》[R]. 武汉: 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 2019. (Yangtze River Survey, Planning and Design Research Co., Ltd. “Jiangbei Area Yangtze River Shoreline Wetland Protection and Environmental Enhancement Project Detailed Investigation Stage Engineering Geological Investigation Report (Phase I Project)” [R]. Wuhan: Yangtze River Survey, Planning and Design Research Co., Ltd., 2019. (in Chinese))
- [14] 汪璋淳, 姜彦彬, 何宁, 等. 城市堤路结合工程变形控制措施研究[J/OL]. *水利水运工程学报*. (2023-05-31). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1613.TV.20230530.1005.002.html>. (WANG Zhangchun, JIANG Yanbin, HE Ning, et al. Study on deformation control measures of urban levee road combination[J/OL]. *Hydro-Science and Engineering*. (2023-05-31). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1613.TV.20230530.1005.002.html>. (in Chinese))
- [15] 娄炎, 何宁, 娄斌. 高速公路深厚软基工后沉降控制成套技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011. (LOU Yan, HE Ning, LOU Bin. Complete settlement control technology for deep soft foundation of expressway[M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese))

Study on the implementation effect of differential settlement control technology in embankment widening project

LI Ji¹, XIE Yuting², ZENG Peng³, ZHU Ming⁴, CHENG Pan⁴

(1. *Public Works Construction Center of Jiangbei District in Nanjing*, Nanjing 211500, China; 2. *Nanjing Hydraulic Research Institute*, Nanjing 210029, China; 3. *Hengyang Beikong Water Resources Management Co., Ltd.*, Hengyang 421200, China; 4. *Zhongyu Water Conservancy Construction Co., Ltd.*, Huaian 223001, China)

Abstract: The construction of the embankment-road widening project experiences challenges, such as differential settlement control. To handle the difficulties, the computational research was conducted to examine the waterfront embankment-road combination project in Jiangbei District, Nanjing. Based on the geological and engineering features, the research was carried out to investigate the three working conditions, known as the natural pile load, step excavation combined with geogrid treatment, and deep cement mixing (DCM) pile treatment. According to the quantitative results, a combination of cement-soil mixing pilecone and probe grouting and geogrid treatment, as well as the step excavation treatment, was used at the stage of the combination of old and new embankments based on data analysis so that the differential settlement could be controlled. The reasonableness of the numerical model was verified by carrying out field monitoring work at the typical section and analyzing the settlement, pore water pressure, and horizontal displacement indexes. Additionally, the actual differential settlement control effect of this design scheme in the embankment-road combination project was evaluated. The results show that the remaining settlement after work in the middle and right shoulders under this design scheme is 16 and 20 mm, respectively, and the differential settlement of the two is below 4 mm. The research indicates that this technique is effective for the coordinated deformation control of the old and new embankments in the project. The approach can guide further treatments of soft soil roadbeds in subsequent riverbank road combination projects.

Key words: embankment-road widening project; uneven settlement; foundation treatment; implementation effect