

## 城市堤路结合工程变形控制措施研究

汪璋淳, 姜彦彬, 何宁, 钱亚俊, 周彦章, 王艳芳

### Study on deformation control measures of urban levee road combination

WANG Zhongchun, JIANG Yanbin, HE Ning, QIAN Yajun, ZHOU Yanzhang, WANG Yanfang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20220813003>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 深填斜坡中基桩受力变形规律

Deformation of pile foundation in deep filling slope based on ANSYS

水利水运工程学报. 2018(3): 40 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.03.006>

##### 深埋水工隧洞衬砌渗透压力控制措施研究

Seepage pressure control measures for lining of deep buried hydraulic tunnels

水利水运工程学报. 2018(1): 89 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.01.013>

##### 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>

##### 基于BP-ARIMA的混凝土坝多尺度变形组合预报模型

Multi-scale deformation combination forecast model for concrete dam based on BP-ARIMA

水利水运工程学报. 2018(2): 52 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.02.007>

##### 单桩水平承载力鲁棒性设计与分析

Robust geotechnical design and analysis of horizontal bearing capacity of laterally loaded pile

水利水运工程学报. 2017(3): 71 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.03.010>

##### 江心洲地下水浸没预测与控制研究

Prediction and control of groundwater immersion of the mid-channel bar

水利水运工程学报. 2018(6): 62 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.06.008>



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:10.12170/20220813003

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]. 水利水运工程学报, 2023(6): 133-141. (WANG Zhangchun, JIANG Yanbin, HE Ning, et al. Study on deformation control measures of urban levee road combination[J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(6): 133-141. (in Chinese))

## 城市堤路结合工程变形控制措施研究

汪璋淳<sup>1,2,3</sup>, 姜彦彬<sup>1,3,4</sup>, 何宁<sup>1,2,3</sup>, 钱亚俊<sup>1,2,3</sup>, 周彦章<sup>1,2,3</sup>, 王艳芳<sup>1,2,4</sup>

(1. 水利部水旱灾害防御重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 水利部水库大坝安全重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 4. 金陵科技学院 建筑工程学院, 江苏 南京 211169)

**摘要:** 有效控制变形是城市堤路结合工程正常发挥防洪和交通双重作用的重要保障。基于南京长江岸线堤路结合工程典型断面, 建立平面应变有限元数值模型, 分析天然堆载、台阶加筋、深层水泥搅拌(DCM)及透水混凝土桩(PCP)工况等4种工况的变形分布与发展规律。研究表明: 台阶加筋工况的整体变形规律与天然堆载工况基本一致, 不进行软基处理将无法有效缩减新老堤防及地基的沉降和水平位移; DCM及PCP工况均能有效控制上部堤防及下部地基的沉降、隆起与水平位移, 工后沉降均小于100 mm; PCP复合地基可在3.6%的低置换率条件下, 将路面工后沉降减至43 mm, 并将达到99%固结度的时间由365 d缩至155 d, 变形控制能力整体强于DCM工况。PCP复合地基技术在变形控制标准高、建设周期短的软基地区堤路结合工程中具备良好的应用前景。

**关键词:** 堤路结合; 工后沉降; 水平位移; 变形控制; 透水混凝土桩

中图分类号: TV223

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2023)06-0133-09

城市堤防加固拓宽工程通常与交通道路相结合, 使改造后的堤防同时发挥防洪和交通运输的双重作用, 常见堤路结合工程有滨江路、堤顶路等形式。城市堤路结合工程多以主干路、次干路为标准, 依托堤防多为2级以上, 建设标准较高<sup>[1]</sup>。堤防道路改造通常填高较大, 而滨水地基软弱, 老堤防历时多年已沉降稳定, 新堤填筑后不均匀沉降易诱发堤身裂缝等病害, 过大的沉降及工后沉降会降低堤防的防洪标准并危及行车安全。因此, 堤路结合工程变形控制至关重要<sup>[2]</sup>, 应因地制宜地选择合理的处理措施。

胡晓红等<sup>[3]</sup>针对高等级堤路结合工程, 提出了4种堤防道路改造技术方案及全要素理念; 杨永森等<sup>[4]</sup>建立数值模型研究了不同开挖和加筋形式对加高培厚堤防的稳定性及沉降的影响, 提出了堤防加高培厚的优化处理方法; 程万钊等<sup>[5]</sup>通过现场试验研究了混凝土芯砂石桩复合地基法在水利防洪堤软基加固工程中的应用, 探索了新工法在堤防工程变形控制中的有效性。目前, 堤路结合工程处理措施更偏重于上部新老堤防结合面处理及渗流稳定性等研究<sup>[6]</sup>, 对下部地基与上覆堤防的耦合变形发展特征及其控制措施研究尚不深入。

探讨有效的堤路结合变形控制措施有助于提升堤防的防洪、交通功能。本文以南京长江岸线堤路结合工程典型断面为例, 建立有限元数值模型, 详细对比分析堤路结合处理后的变形随时间与空间的分布与发展特性, 揭示透水混凝土桩复合地基在堤路结合工程中的变形控制机理与技术优势。

收稿日期: 2022-08-13

基金项目: 水利部水旱灾害防御重点实验室开放基金(KYFB202112071053); 水利部水库大坝安全重点实验室开放基金(YK323008); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(52208346); 江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究面上项目(22KJB560017)

作者简介: 汪璋淳(1976—), 男, 浙江镇海人, 高级工程师, 主要从事水利、岩土工程安全监测和试验检测的研究与实践。  
E-mail: zcwang@nhri.cn 通信作者: 姜彦彬(E-mail: tumujyb@163.com)

## 1 堤路结合工程

依托工程中的典型断面如图 1 所示,老堤防右侧临江,主要在其左边背水侧进行加宽培厚形成城市道路。按照 I 级堤防标准设计,新路堤左侧紧接大面积场平区域。新堤设计填筑高度为 5.0 m,路面总宽度为 24.0 m,包括 18.0 m 宽的城市支路及 6.0 m 宽的绿道。该场区范围原地基钻孔深度范围内共有 5 层土,自上而下为:①-2 层素填土,可塑状黏性土,层厚 1.0~3.0 m,主要作为老堤填土及浅层地基土;②-1 层粉质黏土,可塑~软塑,层厚 0~2.0 m;②-2 层淤泥质粉质黏土,软~流塑,层厚 9.0~13.9 m,该层土在工程场地内广泛分布,工程性质较差,为主要软土层;②-3 层粉土,层厚 2.6~3.3 m;③-1 层粉砂,稍密至中密状,层厚 11.2~15.0 m。工程所在区域地下水埋深浅,主要类型为第四系孔隙潜水。

不加任何处理措施直接在天然地基上进行堤防加高培厚(图 1),本文称为天然堆载工况。针对图 1 所示的堤路结合断面,提出以下 3 种变形控制措施:

(1)台阶加筋工况。在老堤防开挖台阶并铺设土工加筋是常见的道路拓宽结合面处置方法<sup>[2]</sup>,简称台阶加筋。如图 2(a)所示,针对坡度相对较陡的老堤左侧下半坡段,开挖 4 级台阶,每级台阶宽 2 m,高 0.6~0.8 m,在每级台阶铺设一层宽度 5 m 的三向聚丙烯土工格栅作为加筋,格栅在 2% 拉应变时的拉伸强度为 175 kN/m。该法只处理新老路堤结合面,不处理下部地基。

(2)DCM 工况。深层水泥搅拌(Deep Cement Mixing, DCM)成桩形成水泥土搅拌桩复合地基是常用的软基处理技术<sup>[7]</sup>,具有良好的经济和技术效果。如图 2(b)所示,采用 DCM 法进行地基处理,路堤下 LM 段范围内桩长 17.0 m,新老堤结合面区域的 NP 段桩长 18.5 m,并在桩长变化处设置 1 层 5 m 宽的三向土工格栅。DCM 桩径为 0.6 m,平面为正三角形布置,桩间距为 1.5 m,置换率为 14.5%。

(3)PCP 工况。将透水混凝土桩(Pervious Concrete Pile, PCP)作为竖向增强体加固复合地基是近年来新兴的地基处理技术。PCP 同时具备刚性桩的高承载力和碎石桩的强排水特性,尤其适用于荷载较大、施工较快、排水条件较差的软基处理工程<sup>[8-9]</sup>。如图 2(c)所示,该工况采用 PCP 桩复合地基进行软基处理,横断面布桩方式、桩长及桩径同图 2(b)的 DCM 法,区别在于 PCP 桩间距为 3.0 m,置换率为 3.6%。

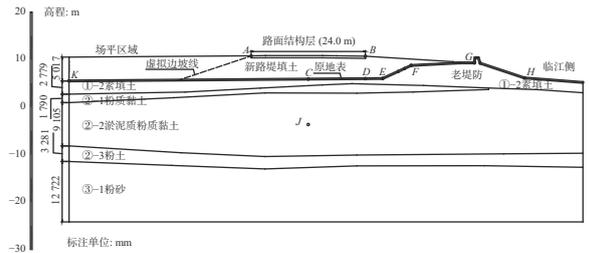
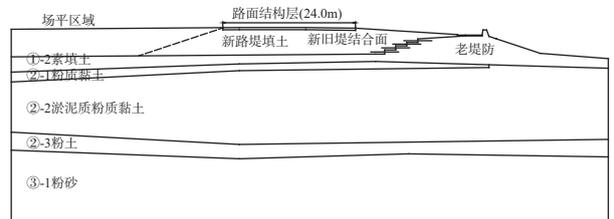
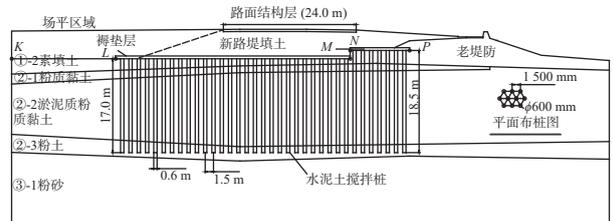


图 1 堤路结合典型断面

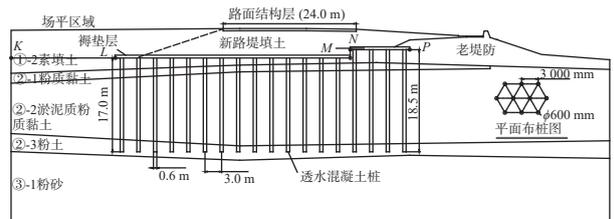
Fig. 1 Key section of the levee road combination



(a) 台阶加筋工况



(b) DCM 工况



(c) PCP 工况

图 2 堤路结合处理方法

Fig. 2 Levee road combination treatment method

区别在于 PCP 桩间距为 3.0 m,置换率为 3.6%。

## 2 数值建模

参考姜彦彬等<sup>[10-11]</sup>的有限元建模思路,路堤填土、褥垫层、地基土及 DCM 桩均使用摩尔库伦弹塑性本构模型,PCP 桩、路面结构层及土工加筋均使用弹性本构模型,参数见表 1。现场地下水埋深浅,模型中认为地基土饱和,将原地表面及其贯穿堤身的延长线(图 1 所示 *KCDEH*)作为排水面,孔压边界设置为 0。网格划分时,地下水位以下部分及桩体均采用四节点平面应变四边形双线性孔压单元(CPE4P),地下水位以上部分及土工加筋均采用四节点双线性平面应变四边形单元(CPE4),土工加筋等效为厚度 5 mm 的均质连续薄膜并嵌入路堤中。

表 1 数值模型参数  
Tab. 1 Parameters of the numerical models

土层	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	孔隙比	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	渗透系数/(m·d <sup>-1</sup> )
①-2素填土	18.9	0.907	2.68	0.35	16	18	8.6×10 <sup>-3</sup>
②-1粉质黏土	19.0	0.881	2.46	0.38	15	16	7.8×10 <sup>-3</sup>
②-2淤泥质粉质黏土	18.2	1.019	1.20	0.44	14	12	6.2×10 <sup>-3</sup>
②-3粉土	19.3	0.769	5.38	0.32	10	18	9.0×10 <sup>-2</sup>
③-1粉砂	20.1	0.619	7.58	0.30	—	27	1.2
新路堤填土	21.2	0.510	12.90	0.35	50	18	8.6×10 <sup>-3</sup>
褥垫层	21.5	0.500	20.00	0.30	100	20	8.6×10 <sup>-3</sup>
路面结构层	24.0	—	10 000.00	0.20	—	—	—
土工加筋	—	—	1 750.00	0.20	—	—	—
水泥土搅拌桩	21.0	0.500	56.00	0.25	200	30	2.6×10 <sup>-5</sup>
透水混凝土桩	21.0	0.200	2 162.00	0.20	—	—	43.2

本文建立二维平面应变有限元模型,对于三维布桩的 DCM 和 PCP 工况可参考《复合地基技术规范》(GB/T 50783—2012),按照式(1)所示的复合模量等效原则进行平面应变转化,可不改变桩间距及桩径将正三角形布置的群桩转化为平面应变的连续桩墙。

$$E_{p3D}m_{3D} + E_s(1 - m_{3D}) = E_{p2D}m_{2D} + E_s(1 - m_{2D}) \quad (1)$$

式中:  $E_{p3D}$ 、 $E_{p2D}$ 为三维工况和平面应变等效工况下桩的弹性模量;  $m_{3D}$ 、 $m_{2D}$ 分别为三维工况和平面应变等效工况下桩的面积置换率;  $E_s$ 为桩长范围内地基土的弹性模量加权均值,  $E_s = h_p / (\sum h_i / E_i)$ , 其中  $h_p$ 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。以路中心断面为计算断面,求得  $E_s = 2.12$  MPa。对于 DCM 工况,  $E_{p3D} = 150$  MPa,  $m_{3D} = 14.5\%$ ,  $m_{2D} = 40\%$ , 则  $E_{p2D} = 56$  MPa; 对于 PCP 工况,  $E_{p3D} = 12$  GPa,  $m_{3D} = 3.6\%$ ,  $m_{2D} = 20\%$ , 则  $E_{p2D} = 2 162$  MPa。DCM 桩及 PCP 桩渗透系数的等效依据桩身断面通水量相等的原则,即  $k_{3D}m_{3D} = k_{2D}m_{2D}$ , 其中  $k_{3D}$ 、 $k_{2D}$ 分别为三维和二维工况下的渗透系数。表 1 所示 DCM 及 PCP 桩的参数为等效后的参数。以 DCM 工况为例,平面应变模型及其网格划分如图 3 所示。模型底部为固定端,侧面约束水平向位移。

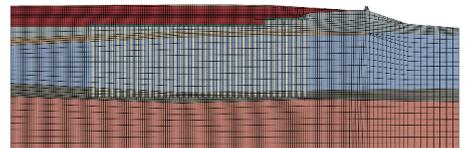


图 3 DCM 工况有限元模型与网格划分  
Fig. 3 Finite element model and mesh of DCM working condition

路堤填筑过程如图 4 所示,新路堤共分 5 层填筑,在有限元中设置生死单元模拟路堤分层堆载。路堤填筑施工工期为 3 个月,填筑完毕 2 个月后通车,交通荷载简化为 20 kPa 的均布荷载。工后沉降的计算基准期为 15 年,自第 90 d 路面结构层施工完毕时起算。

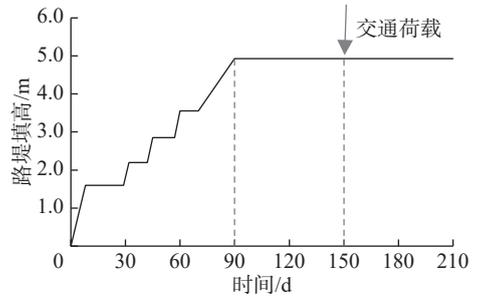


图 4 路堤填筑情况

Fig. 4 Embankment filling conditions

### 3 变形规律与分析

#### 3.1 变形极值分析

表 2 及图 5 为各工况下变形极值的对比,天然堆载工况的地基和老堤防变形较为显著,最终固结完成时刻最大沉降为 827 mm,位于路面中线之下第一、二层填土之间;在路堤填筑完成时刻,老堤防坡外的隆起量达到最大,为 270 mm;在交通荷载施加后,最大水平位移为 446 mm,位于新老堤防结合面之下的②-2 层地基土中。台阶加筋工况的最大沉降、坡外最大隆起和地基最大水平位移的发生区域、时机均与天然堆载工况基本一致,差值仅为-7、-4、5 mm,可见对于本文工况,仅仅在新老路堤结合面处开挖台阶并铺设土工加筋而不进行地基处理时无法有效缩减场地变形极值。对于 DCM 工况及 PCP 工况,表 2 及图 5 所示变形极值都得到了较好的控制或转移,最大坡外隆起及水平位移大幅缩减。由于新路堤填筑前已有竖向增强体进行地基加固,最大沉降由路中心区域转移至左侧大面积场平堆载区。

表 2 变形极值对比

Tab. 2 Comparison of extreme value distribution of deformation

模型	最大沉降			坡外最大隆起			最大水平位移		
	数值/mm	位置	发生时刻	数值/mm	位置	发生时刻	数值/mm	位置	发生时刻
天然堆载	827	路中填土	固结完成	275	上坡面	填筑完成	446	结合面下②-2层	通车时
台阶加筋	820	路中填土	固结完成	270	上坡面	填筑完成	442	结合面下②-2层	通车时
DCM	706	场平填土	固结完成	162	下坡面	填筑完成	195	场平区下②-2层	固结完成
PCP	731	场平填土	通车前	50	坡脚外	填筑完成	226	场平区下②-2层	通车前

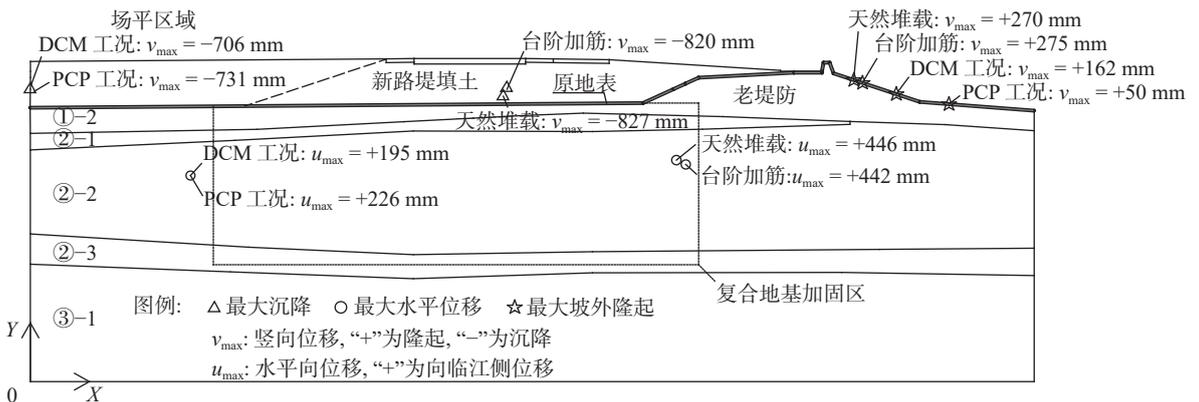


图 5 各工况变形极值分布

Fig. 5 Extreme value distribution of deformation under various working conditions

### 3.2 沉降规律分析

**3.2.1 路面沉降** 图 6 所示为路面(对应图 1 的 AB 段)最终总沉降分布, 呈现出路中大, 两侧小的趋势。天然堆载工况路面最大沉降达 477 mm, 路面沉降极差(即路面宽度范围内最大、最小沉降的差值)为 91 mm。台阶加筋工况与天然堆载工况沉降曲线基本重合, 沉降极差仅缩小 3 mm。自路面施工结束为起算点, 天然堆载工况与台阶加筋工况路面中点位置的工后沉降均为 317 mm。经过复合地基处理后的路面沉降及工后沉降量均显著缩小, DCM 工况的路面最大沉降为 146 mm, 路面沉降极差为 23 mm, 工后沉降为 95 mm; PCP 工况的路面最大沉降为 96 mm, 路面沉降极差为 28 mm, 工后沉降为 43 mm。《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)对设计允许工后沉降的要求为: 桥台与路堤相邻处不超过 100 mm, 涵洞、箱涵、通道处不超过 200 mm, 一般路段不超过 300 mm。可见, 天然堆载及台阶加筋均无法满足该路段的工后沉降变形控制要求, 而 DCM 工况及 PCP 工况的变形控制能力显著提升, 路面工后沉降均能够达到桥头衔接段小于 100 mm 的变形控制要求。同时, PCP 工况对路面沉降及工后沉降的控制能力均强于 DCM 工况。

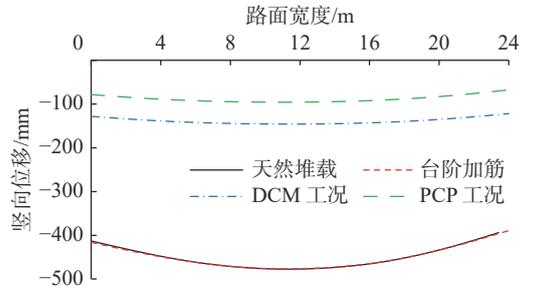


图 6 路面最终沉降分布

Fig. 6 Final settlement distribution of the pavement

**3.2.2 原地表沉降** 图 7 为路中断面原地表(对应图 1 中 C 点)的沉降发展对比, 天然堆载、台阶加筋、DCM 及 PCP 工况的最终沉降量分别为 811、805、228、204 mm, 工后沉降分别为 309、309、90、39 mm。DCM 和 PCP 工况沉降量分别缩减为天然堆载的 28%、25%, 工后沉降分别缩减为天然堆载的 29%、13%。可见, 仅使用台阶加筋进行新旧堤结合面处理基本无法缩减地基沉降, 两种复合地基表现出较强的沉降控制能力。上述 4 种工况达到 99% 固结度的时间分别为第 367、365、363、155 d, 具备良好排水条件的 PCP 工况在路堤填筑过程中变形发展更迅速, 固结所需时间最短, 而其他 3 种工况完成排水固结均需要 1 年以上的时间, 且 PCP 工况的最终沉降和工后沉降均为最小。

图 8 为对应图 7 的路堤填筑阶段的沉降速率, 天然堆载及台阶加筋工况的沉降速率分别为 14.5、13.9 mm/d, 且均多次出现沉降速率超过 10 mm/d 警戒值的情况。新堤分层填筑期间, DCM 及 PCP 两种工况的沉降速率分别为 4.5、5.8 mm/d, 均在预警值范围之内。

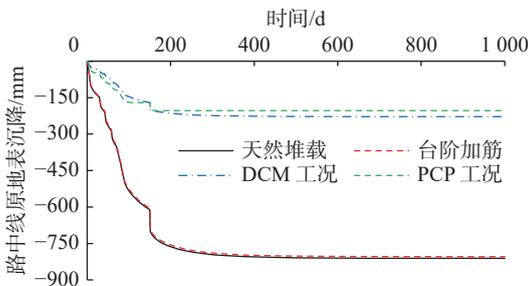


图 7 路中断面原地表沉降

Fig. 7 Original ground settlement of the central section

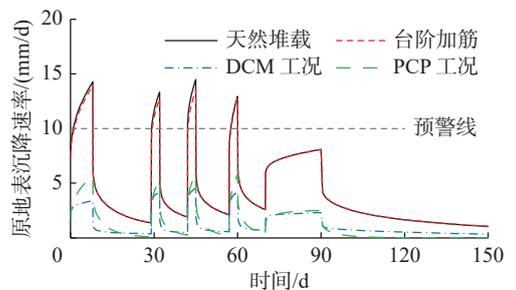


图 8 路中断面原地表沉降速率

Fig. 8 Original ground settlement rate of the central section

**3.2.3 新老堤结合面沉降** 图 9 为新老路堤结合面(对应图 1 中的 DEFG 段)的沉降曲线, 横坐标为离 D 点的水平距离, 纵坐标负值为沉降, 正值为隆起。天然堆载工况下结合面的沉降自左向右逐渐减小, 至老堤防上半坡段的中点处(对应图 1 中 FG 段中点)沉降为 0 后继而转为隆起变形; 台阶加筋工况与之类似, 并未缩减结合面沉降。DCM 及 PCP 两类工况下, 结合面沉降显著缩小, 且结合面上只有沉降而没有隆起, 二者沉降值至 G 点减小为 0。

结合图5及图9可知,各工况老堤防的临江侧边坡均为隆起变形,天然堆载与台阶加筋工况最大隆起位置相近,分别达到270、275 mm,DCM工况及PCP工况最大隆起点依次向下坡段转移,且量值逐渐减小,PCP工况的坡外最大隆起值仅为50 mm。

**3.2.4 分层沉降** 图10为路中断面自路面向下断面的最终分层沉降分布,图11为路中断面地基土层的压缩应变(即单位厚度土层的压缩量)沿深度的分布。不难看出,不进行地基处理无法改变地基土层的压缩性,在附加荷载作用下,台阶加筋工况依然具备与天然堆载近乎一致的沉降量与压缩应变。采用DCM桩及PCP桩的两类复合地基处理工法后,大大缩减了②-2主要软土层的压缩量,进而大幅缩减了总沉降与工后沉降。尽管PCP桩复合地基置换率大幅低于DCM工况,但PCP桩刚度更大,其沉降控制能力仍强于DCM工况。

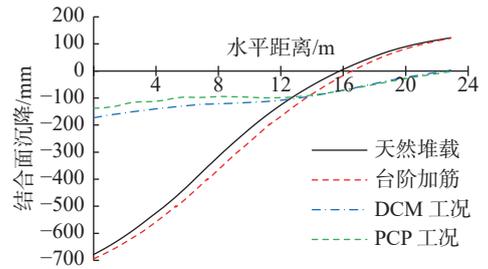


图9 结合面沉降发展

Fig. 9 Settlement development of the joint surface

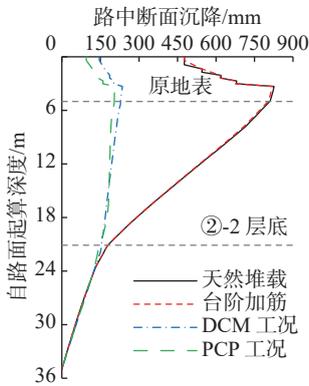


图10 路中断面分层沉降

Fig. 10 Layered settlement of the central section

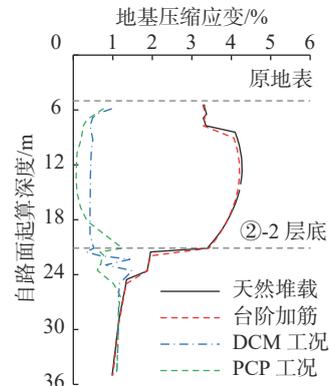


图11 路中断面地基压缩应变

Fig. 11 Compressive strain of foundation of the central section

### 3.3 水平位移分析

图12为新旧堤结合面处老堤防拐角断面(自图1中F点向下)在通车时刻地基的水平位移,可见天然堆载、台阶加筋的水平位移均随深度呈现先增后减的趋势,其最大水平位移均位于②-2软土层中,水平位移在②-2与②-3土层交界处出现转折点。台阶加筋工况仅将最大水平位移由439 mm缩减至428 mm,DCM工况及PCP工况的水平位移得到大幅缩减,将断面最大水平位移分别降至115、110 mm,尤其是②-2软土层的水平位移得到了显著控制。整体上,由于PCP桩的刚度更大,尽管其置换率仅为3.6%,PCP工况仍表现出最优的水平位移控制能力,其最大水平位移被转移至浅层老堤防中。

图13为4种工况的水平位移速率发展,对应图12及图5中位于天然堆载工况②-2软土层的最大水平位移点。参考《软土地基路基监控标准》(GB/T 51275—2017),路堤填筑期深层水平位移预警值设置为8 mm/d。在路堤填筑中的前4个阶段(图4),天然堆载及

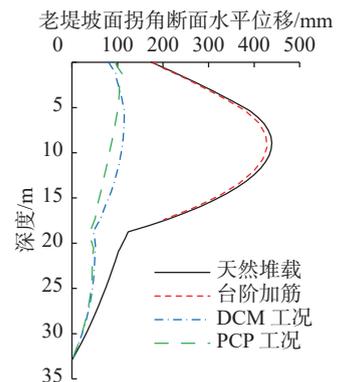


图12 结合面断面的水平位移

Fig. 12 Horizontal displacement of joint surface section

台阶加筋工况的最大侧移速率点超过预警值的 2 倍, DCM 及 PCP 两种工况相应点的最大侧移速率均显著缩减至预警线水平。由于图 13 所取点为软土层最大侧移断面的最大点, 结合图 12 能够判断两种复合地基工况的整体水平位移均在可控范围内。

图 14 为老堤防原地面(对应图 1 中 FGH 段)向临江侧的水平位移对比。通车后, 天然堆载、台阶加筋、DCM 及 PCP 工况的老堤防最大水平位移分别为 221、218、81、95 mm。天然堆载及台阶加筋工况的最大值位于临江侧边坡靠近防浪墙的位置。DCM 工况及 PCP 工况均具备良好的水平位移控制能力, 老堤防的水平位移显著降低且位移最大值也转移至老堤防内边坡拐点处。

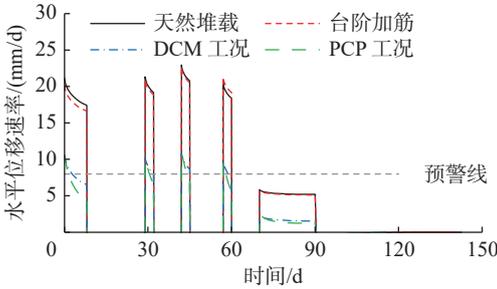


图 13 软土层特征点水平位移速率

Fig. 13 Horizontal displacement rate of characteristic point of soft soil layer

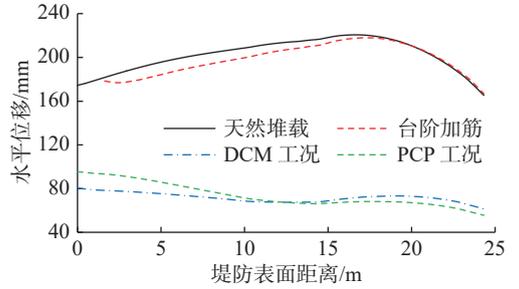


图 14 老堤防原地面水平位移

Fig. 14 Horizontal displacement of original ground surface of the old levee

### 4 受力分析

定义孔压系数  $B$  为孔压增加值与新增荷载值之比, 其预警值设置为 0.5。图 15 为路中断面②-2 软土层中心位置(对应图 1 中  $J$  点)在填筑阶段的  $B$  值。前 4 次路堤填筑, 天然堆载及台阶加筋的  $B$  值均超过了预警值, DCM 工况则在预警线处波动, PCP 工况的  $B$  值则始终在安全范围内。对于上述 4 种工况, 路堤填筑期间超静孔压极值分别为 36.3、37.5、21.5、7.4 kPa, 整体而言, 采用竖向增强体穿越软土层的 DCM 及 PCP 工况的超静孔压值均低于天然堆载及台阶加筋工况。对于桩身可排水的 PCP 工况, 路堤填筑过程地基中的超静孔压消散更快,  $B$  值更低。

图 16 为两种复合地基加固工况原地表的竖向应力分布, 对应图 2(b)及图 2(c)的  $KLMNP$  段。左侧  $KL$  段大面积堆载区, 竖向应力为 117 kPa, 复合地基区填筑路堤附加荷载向桩顶转移, 桩顶竖向应力远高于大面积堆载区, 而桩间土的竖向应力则低于大面积堆载区。PCP 复合地基桩顶应力水平大幅高于 DCM 工况, PCP 桩及 DCM 桩顶应力极值分别达到 620、445 kPa。固结完成时, DCM 工况的桩土应力比范围为 7~12, PCP 工况则为 15~20, 更多的附加荷载通过 PCP 桩传递至强度更高的深层地基, 进而控制了场地变形。

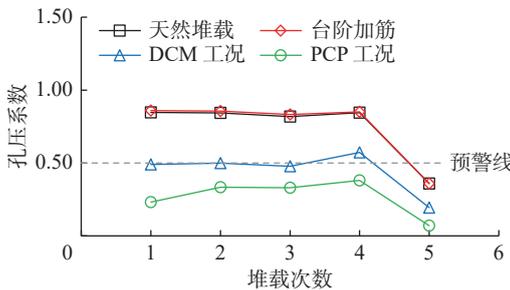


图 15 路中断面软土层孔压系数

Fig. 15 Pore water pressure coefficient  $B$  of soft soil layer in the middle section of the road

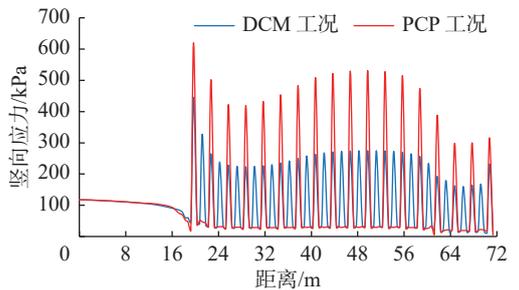


图 16 DCM 与 PCP 工况地表应力分布

Fig. 16 Surface stress distribution under DCM and PCP conditions

## 5 结 语

针对南京长江岸线堤路结合典型断面,建立平面应变有限元模型,耦合上覆堤防与下部地基,多角度对比分析了天然堆载、台阶加筋、DCM及PCP共4种工况的堤路结合变形分布与发展规律,量化评价了上述城市堤路结合工程变形控制措施。主要结论如下:

(1)台阶加筋工况的整体变形规律与天然堆载工况基本一致,二者工后沉降均超过300 mm,路堤填筑过程中沉降速率、水平位移速率和孔压系数超过预警值,变形处于不可控状态。因此,只对新老堤结合面进行台阶加筋处理而不加固堤下软基的工况尚无法有效缩减沉降和水平位移。

(2)通过DCM及PCP将填筑的附加荷载传递至强度更高的深层地基,可大大缩减主要软土层的压缩量及深层水平位移,有效控制地基总沉降、工后沉降、结合面不均匀沉降及老堤防的隆起量。路堤填筑过程中两种复合地基处置下的沉降速率、水平位移速率和孔压系数基本可控,工后沉降能够达到桥头衔接段小于100 mm的变形控制要求。

(3)尽管PCP复合地基置换率仅为3.6%,但其桩身刚度大且具备良好排水条件,因而固结变形发展所需时间最短,达到99%固结度缩短至155 d。PCP工况的最终沉降、工后沉降、坡外隆起值、孔压系数均为最小,路面工后沉降仅为43 mm,对堤路结合工程的变形控制能力整体强于DCM工况,适合变形控制标准高、建设周期短的城市软基地区堤路结合工程。

城市堤路结合工程较为丰富多样,本文研究结论适用于与本文工程背景相近的工况。未来还应开展对比试验、理论分析等,进一步研究PCP复合地基技术应用在堤路结合工程中的技术优势及局限性。

## 参 考 文 献:

- [1] 郝伟,樊恒辉,张争奇.我国堤防道路研究与技术进展[J].长江科学院院报,2018,35(10):58-63.(HAO Wei, FAN Henghui, ZHANG Zhengqi. Advances in research and technology of levee road in China[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(10): 58-63. (in Chinese))
- [2] 占鑫杰,腾昊,李文炜,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))
- [3] 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))
- [4] 杨永森,郭丰华,原晓军,等.松干堤防加高培厚工程土工格栅加筋稳定性研究[J].中国农村水利水电,2018(7):103-108.(YANG Yongsen, GUO Fenghua, YUAN Xiaojun, et al. A stability analysis of geogrid reinforced enlarged embankment of Songhua River mainstream[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(7): 103-108. (in Chinese))
- [5] 程万钊,乐茂华,王富永,等.混凝土芯砂石桩复合地基加固堤防软基试验研究[J].水利学报,2007,38(增刊1):675-681.(CHENG Wanzhao, YUE Maohua, WANG Fuyong, et al. Field tests study of concrete-cored sand-gravel piles applied to strengthen embankment engineering[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(Suppl1): 675-681. (in Chinese))
- [6] HAO W, FAN H H, YANG X J. Numerical simulation on stability of widened levee slope with different widened widths and different permeability coefficients[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(4): 1-9.
- [7] 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.(ZHENG Gang, XIA Boyang, ZHOU Haizuo, et al. Effect of column elasticity modulus on composite foundation failure of deep mixed columns[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(9): 146-154. (in Chinese))
- [8] ZHANG J, CUI X Z, HUANG D, et al. Numerical simulation of consolidation settlement of pervious concrete pile composite foundation under road embankment[J]. International Journal of Geomechanics, 2016, 16(1): B4015006.

- [9] 杜广印,蔡俊,孙长申,等. 透水混凝土桩复合地基的承载特性模型试验[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(5): 814-821. (DU Guangyin, CAI Jun, SUN Changshen, et al. Model test of bearing characteristics on pervious concrete pile composite foundation[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2020, 50(5): 814-821. (in Chinese))
- [10] 姜彦彬,何宁,汪璋淳,等. 加筋路堤下刚性桩复合地基若干有限元建模类型分析[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(11): 2106-2114. (JIANG Yanbin, HE Ning, WANG Zhangchun, et al. Finite element modelling types for rigid pile composite foundation under geosynthetic-reinforced embankment[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(11): 2106-2114. (in Chinese))
- [11] 姜彦彬,何宁,林志强,等. 路堤深厚软基管桩复合地基数值模拟[J]. *水利水运工程学报*, 2018(2): 43-51. (JIANG Yanbin, HE Ning, LIN Zhiqiang, et al. Numerical simulation of pipe pile composite foundation of deep soft foundation under embankment[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2018(2): 43-51. (in Chinese))

## Study on deformation control measures of urban levee road combination

WANG Zhangchun<sup>1,2,3</sup>, JIANG Yanbin<sup>1,3,4</sup>, HE Ning<sup>1,2,3</sup>, QIAN Yajun<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Yanzhang<sup>1,2,3</sup>, WANG Yanfang<sup>1,2,4</sup>

(1. Key Laboratory of Flood & Drought Disaster Defense, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 2. Key Laboratory of Reservoir and Dam Safety Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 4. School of Architectural Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

**Abstract:** Effective control of deformation is an important guarantee for the urban levee road combination works to play the dual role of flood control and transportation. Based on the typical section of the levee road combination project along the Yangtze River in Nanjing, a plane strain finite element numerical model is established, and the deformation distribution and development laws of four conditions, namely, natural surcharge, step-reinforcement, deep cement mixing (DCM) and pervious concrete pile (PCP), are analyzed in depth. The research results show that the overall deformation law of the step-reinforcement condition is basically consistent with the natural surcharge condition, and the settlement and horizontal displacement of the new and old levees and foundation can not be effectively reduced without soft foundation treatment. Both DCM and PCP conditions can effectively control the settlement, uplift and horizontal displacement of the upper embankment and the lower foundation, and the post construction settlement is less than 100 mm. The PCP composite foundation can reduce the post construction settlement of the pavement to 43 mm under the condition of low replacement rate of 3.6%, and shorten the time to reach 99% consolidation degree from 1 year to 155 d, and the deformation control ability of PCP condition is better than that under DCM condition. PCP composite foundation technology has a good application prospect in levee road combination project in soft foundation area with a high deformation control standard and a short construction period.

**Key words:** levee road combination; post settlement; horizontal displacement; deformation control; pervious concrete pile