

劲芯水泥土桩复合地基承载路堤失稳破坏模型试验

张 振^{1,2}, 李凌旭^{1,2}, 叶观宝^{1,2}, 王 萌³, 肖 彦⁴

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200011; 4. 广州市城市建设开发有限公司, 广东 广州 510600)

摘要: 劲芯水泥土桩可有效提高软土地基承载力, 减小地基沉降和提高边坡稳定性。目前对于劲芯水泥土桩的研究主要集中在其承受竖向荷载条件下的工程特性上, 对于路堤荷载下桩体失稳破坏模式与计算方法的认识尚不全面。开展 1g 重力场模型试验, 对比研究了路堤荷载下天然地基、水泥土桩复合地基、劲芯水泥土桩复合地基路基变形、桩土应力、桩体应变、桩体破坏形态及路堤失稳模式, 并评价了现有刚性桩复合地基稳定性计算方法对于劲芯水泥土桩复合地基承载路堤稳定性分析的适用性。结果表明: 相较于水泥土桩, 劲芯水泥土桩能有效约束地基土变形, 路面沉降约为水泥土桩复合地基的 61%~71%, 坡外隆起约为 12%~46%, 进而显著提高路堤的稳定性。在路堤荷载下, 劲芯水泥土桩表现出渐进式失稳破坏特征, 桩体可发生纯压破坏、压弯破坏和弯曲破坏, 且与桩体刚度和相对于路堤位置有关, 桩体断裂位置与滑动面位置并未重合。等效抗剪强度法对于劲芯水泥土桩承载路堤稳定性分析具有一定的适用性和应用价值。

关键词: 劲芯水泥土桩; 路堤失稳; 破坏模式; 模型试验; 安全系数

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

Model Test on Instability of Stiffened Deep Mixed Column-supported Embankment over Soft Soil

ZHANG Zhen^{1,2}, LI Lingxu^{1,2}, YE Guanbao^{1,2}, WANG Meng³, XIAO Yan⁴

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. East China Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200011, China; 4. Guangzhou Construction & Development Co., Ltd., Guangzhou 510600, China)

Abstract: Stiffened deep mixed columns (SDMCs) can effectively increase bearing capacity, reduce settlement and enhance stability when they are used to improve soft soil. Currently, the researches on SDMCs have been mainly focused on the engineering properties of SDMC under vertical loading, leaving a gap in improving understanding of failure mode of SDMC under embankment load as well as its calculation approach. This paper conducted a series of 1g gravity scale-reduced model tests, including embankments supported by natural soft soil, deep mixed (DM) column-reinforced soil, and SDMC-reinforced soil. The instability of embankments supported by different foundations were analyzed through a comparison of deformation of embankment, stresses on column head and soil, strains in column, and failure modes of column. The applicability of the existing stability calculation methods were assessed. The results showed that the SDMC columns effectively restrained the soil deformation, namely, its settlement on the embankment crest and the ground heaving outside the embankment were approximately 61% to 71%, and 12% to 46% of those in the model test with DM columns, leading to a significantly enhancement on the global stability of the embankment. The SDMC columns failed progressively, and it may have failure modes of compression, a combination of compression and bending, and bending, depending on the column positions under embankment and column stiffness. The slip plane did not exactly go through the broken positions of column. The equivalent shear strength method had applicability to the stability analysis of SDMC-supported embankment as compared with other methods considered in this study.

Keywords: stiffened deep mixed column; embankment instability; failure mode; model test; factor of safety

收稿日期: 2022-06-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42372317); 国家自然科学基金青年项目(51508408)

第一作者: 张振, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为地基处理、土工合成材料。

E-mail: dyzhangzhen@126.com

通信作者: 叶观宝, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为地基处理、软土工程。E-mail: ygb1030@126.com



论文
拓展
介绍

随着地基处理技术的发展,组合型和复合型地基处理技术由于其良好的经济性和适用性,已成为地基处理技术的发展趋势。劲芯水泥土桩是近年发展起来的一种新型复合桩^[1-2]。它是在水泥土桩初凝前,将小于水泥土桩直径的预制桩插入桩中心,利用强度和刚度较高的混凝土芯桩承担竖向荷载,利用强度和刚度次之的水泥土桩提供侧摩阻力,再由水泥土桩将荷载传递到强度和刚度更低的桩周土体^[3-4]。研究表明^[5-6],劲芯水泥土桩可以有效提高地基承载力,减少地基沉降和提高边坡稳定性,在软土地区工程建设中具有广阔的应用前景。

目前,对于劲芯水泥土桩的研究主要集中在其竖向受荷条件下的工程特性上^[7-8]。钟佳男^[9]探讨了荷载等级、复合桩体置换率、垫层厚度、桩端土模量等因素对劲芯复合桩工作特性的影响。Nguyen等^[10]揭示了路堤荷载下劲芯水泥土桩的荷载传递规律。在理论研究方面,叶观宝等^[11]提出了刚性基础下劲芯水泥土桩复合地基荷载分担计算方法。Ye等^[12]基于EBGEO法提出一种改进的劲芯复合桩土拱效应计算方法。Zhang等^[13]提出了竖向荷载下劲芯复合桩复合地基的固结度计算方法。

在软土地区修建路堤时,路堤的稳定性是工程技术人员关注的关键问题之一。Kivelo^[14]和Broms^[15]研究发现在路堤荷载下桩体会出现弯曲、剪切、受拉和倾覆等多种破坏模式,且与相对于路堤的位置有关。郑刚等^[16]进一步将路堤下桩体破坏划分为拉弯区、弯剪区、压弯区和承压区。俞建霖等^[17]也提出了类似的路堤下桩体破坏分区。Zhang等^[18]指出随着水泥土桩模量的提高,桩体将从弯曲破坏逐渐转变为倾覆破坏。郑刚等^[19]也指出桩体刚度不同将导致路堤失稳时桩体的破坏模式不同。然而,目前人们对路堤荷载下劲芯水泥土桩的破坏模式尚缺乏统一认识。张振等^[20-21]提出了路堤荷载下劲芯水泥土桩的破坏模式,但主要还是通过数值分析方法或桩体破坏后的形态进行推测,并未从桩体荷载传递、桩身应变发展和桩体破坏形态等方面综合分析判定劲芯桩破坏模式,同时缺少与传统搅拌桩的对比分析。

为进一步揭示劲芯复合桩增强路堤稳定性的机理,本文开展1g重力场室内缩尺模型试验,对比分析路堤荷载下天然地基、水泥土桩复合地基和劲芯水泥土桩复合地基的路堤稳定性和失稳破坏特性,揭示不同位置处桩体性能的发挥区别。基于试验结果,评价现有稳定性计算方法对劲芯水泥土桩复合地基承载路堤稳定性计算的适用性。

1 室内模型试验

1.1 试验材料

模型试验以某工程试验段^[6]为参考原型,并进行合理简化。按照实际工况和试验条件,确定1g重力场模型试验的重力加速度相似系数 $C_g=1$,几何尺寸相似系数 $C_l=15$ 。模型箱内部尺寸为3000mm×990mm×1800mm(长×宽×高)。模型箱外部钢结构框架由工字钢焊接而成,三面侧壁和底部均采用8mm加厚钢板密封,正面为10mm厚度透明钢化玻璃,便于试验过程中观察和相机记录。箱体内壁涂抹润滑油并贴有聚四氟乙烯薄膜,以减少边界效应和侧壁摩擦。

图1为模型试验示意图。根据路堤对称性,模型试验选取路堤的一半进行模拟。路堤、软土层及持力层厚度依次为280mm、680mm和400mm,路堤顶部宽度为780mm,坡比为1:1.86。水泥土桩直径为63mm;劲芯水泥土桩外桩直径为63mm,芯桩直径为25mm。两种桩的桩长均为700mm,嵌入持力层20mm,桩间距为220mm,采用正方形布桩。

路堤填土选用粒径0.2mm的石英砂。软土层选用体积比为1:1:0.03的熔融石英砂、EPS颗粒和甘油混合而成。砂层选用级配良好的黄砂模拟。水泥土桩和劲芯水泥土桩外桩采用石膏、高岭土、重晶石、水、甘油按质量比0.2:0.9:0.2:0.8:0.2配制而成;芯桩采用石膏、石英砂、水、甘油按质量比1:1.5:1:0.2配制而成。表1为试验各材料的物理力学参数,材料的主要参数均满足相似理论。

1.2 试验方案

在模型箱底部铺设400mm厚砂层,分层压实,并且保证压实度达到98%。通过定位板固定桩体位置,将模型桩放置在砂层顶端,嵌入砂层20mm。通过体积质量控制桩间软土的密度为 $0.66\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,分层填筑至桩顶。路堤填土按90%压实度分层回填压实至设计高度,并控制坡高比为1:1.86。路堤回填完成后,将6块独立加载板并排放置于路堤顶面,如图1所示。加载板底面宽度为125mm,板与板间留有5mm间隔。每个加载板上连接一个液压千斤顶,通过千斤顶的并联设计模拟路面的均布荷载。

为监测加载过程中路堤的整体失稳破坏,在路堤顶面和路堤外地表布置位移计;在A3排模型桩和桩间土上布置微型土压力盒,并沿芯桩桩身粘贴应变片;在A4排模型桩芯桩上嵌入铝箔形成回路,外接发光二极管,铝箔受拉时极易断裂,若桩身发生弯

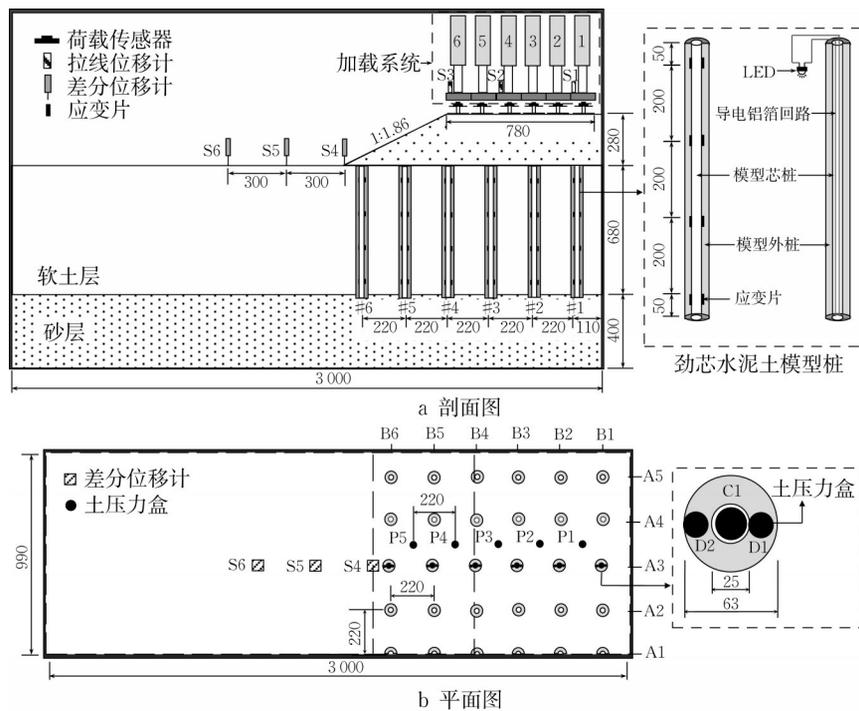


图1 模型试验示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of model test (unit: mm)

表1 模型物理力学参数表

Tab. 1 Physical and mechanical model parameters

材料	材料参数
路堤填土	$\rho=1.58\text{g}\cdot\text{cm}^3, \varphi=34^\circ, E_s=9.1\text{MPa}$
软土	$\rho=0.63\text{g}\cdot\text{cm}^3, \varphi=24^\circ, c=0.6\text{kPa}, E_s=0.2\text{MPa}$
砂土	$\rho=1.67\text{g}\cdot\text{cm}^3, \varphi=41^\circ, E_s=16.2\text{MPa}$
混凝土芯桩	$\rho=2.04\text{g}\cdot\text{cm}^3, \varphi=48^\circ, c=340\text{kPa}, E=1.8\text{GPa}, \varphi_r=37^\circ, c_r=70\text{kPa}, q_u=2060\text{kPa}, \sigma_b=140\text{kPa}$
水泥土外桩	$\rho=1.53\text{g}\cdot\text{cm}^3, \varphi=28^\circ, c=24\text{kPa}, E=8.5\text{MPa}, \varphi_r=23^\circ, c_r=16\text{kPa}, q_u=84\text{kPa}, \sigma_b=10\text{kPa}$

注: ρ 为密度; φ 为内摩擦角; c 为黏聚力; E_s 为压缩模量; E 为弹性模量; φ_r 为残余内摩擦角; c_r 为残余黏聚力; q_u 为无限限抗压强度; σ_b 为抗拉强度。

曲破坏会导致铝箔拉断,导电回路断开,二极管熄灭。因此,可通过二极管熄灭的顺序判断桩体破坏次序。模型试验过程中通过摄像和PIV技术分析有机玻璃一侧路堤的位移场变化情况。

设计了3组模型试验,见表2,分别为T-1天然地基、T-2水泥土桩复合地基和T-3劲芯水泥土桩复合地基。试验时,6个千斤顶同步持续加载直至路堤失稳破坏。整个过程中,记录监测元件数据,并间隔1s持续拍照。

表2 模型试验方案

Tab. 2 Model test scheme

编号	桩型	桩列数	桩长/m		桩截面直径/mm	
			芯桩	外桩	芯桩	外桩
T-1	无桩	0	—	—	—	—
T-2	水泥土桩	6	0.00	0.70	0	63
T-3	劲芯桩	6	0.70	0.70	25	63

2 试验结果与分析

2.1 位移

图2为路堤顶面沉降和坡外隆起随路面荷载变化的 $s-\lg P$ 曲线。由图可知,3组试验的路面沉降和坡外隆起均随路面荷载的增加而增加,但3组试验发生差异沉降时对应的路面荷载不同。当路面荷载较小时,路面各监测点沉降发展基本一致,坡外地基隆起随距坡趾的距离增加而减小。当路面荷载超过某值时,路堤顶面靠近路肩位置(S2、S3)与中心位置(S1)差异沉降增大,坡外隆起也同时出现差异隆起增大(S4、S5与S6)。将出现明显差异沉降/隆起时的路面荷载作为临界失稳荷载,T-1天然地基、T-2水泥土桩复合地基和T-3劲芯水泥土桩复合地基对应的临界失稳荷载分别为40kPa、45kPa和75kPa。相较于水泥土桩,劲芯水泥土桩复合地基失稳临界荷载从45kPa提高至75kPa。由于芯桩的插入,劲芯水泥土桩显著提高了路堤的稳

定性。

表3统计了各试验组在所对应临界失稳荷载下路堤顶面沉降和坡外隆起位移。在临界失稳荷载下,天然地基与水泥土桩复合地基路面沉降相近。这可能是因为水泥土桩复合地基的置换率仅为6%,相对于天然地基的整体刚度提升有限。T-2的坡脚隆起大于T-1,这是由于T-2的滑动面深度较T-1浅,且水泥土桩对桩周土体的约束作用较小,导致地基土滑动产生的塑性变形更易导致坡外隆起。劲芯水泥土桩复合地基的路堤顶面沉降和坡外隆起均小于其他两组试验,表明劲芯桩可显著约束地基土的变形。在45kPa和75kPa路堤顶面荷载下,T-3的路堤顶面沉降为T-2试验组的61%~71%,坡外隆起为其12%~46%。

2.2 桩顶应力

图3为T-3试验组桩顶处竖向应力随路堤顶面荷载的变化,其中外桩桩顶应力为两个土压力盒监测值的平均值,个别监测点由于土压力盒损坏导致数据缺失。#1~4号水泥土外桩桩顶应力增长至峰值90~120kPa后,逐渐降低至稳定值。峰值应力与水泥土的无侧限抗压强度接近,说明外桩材料性能已充分发挥。不同位置的外桩达到峰值应力时所对应的路面荷载并不一致,表明外桩破坏并非同时发生。#2~#4号芯桩的峰值应力为300~360kPa,随后逐渐下降至稳定值。

边坡位置的#5号桩的竖向应力较小,外桩竖向应力最大值约为4kPa,芯桩竖向应力最大值约为8kPa,表明该位置下的桩体未发挥竖向承载作用。

图4为各桩应力集中系数(桩顶应力与路堤顶面荷载之比)随路堤顶面荷载的变化。T-3中芯桩#2~#4应力集中系数显著高于T-2水泥土桩和T-3外桩。T-3芯桩峰值应力集中系数在5.1~5.7,外桩峰值应力集中系数在1.8~2.4;而T-2水泥土桩的峰值应力集中系数在2.6~3.5,表明更多路堤荷载向芯桩集中。T-3试验组中,外桩应力集中系数

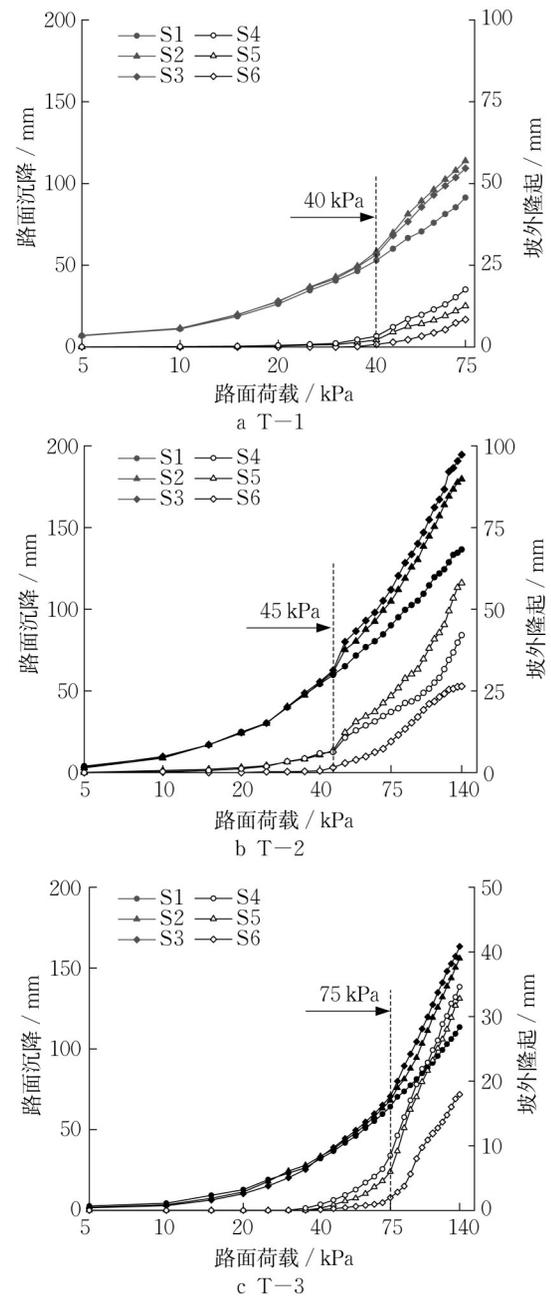


图2 路面荷载—位移曲线

Fig. 2 Pavement surcharge vs. displacement

表3 临界失稳荷载对应的位移

Tab. 3 Displacement under critical loading

荷载/kPa	组号	路面沉降/mm			坡外隆起/mm		
		S1	S2	S3	S4	S5	S6
40	T-1	52.99	58.48	56.48	3.36	2.21	0.84
	T-2	54.17	54.85	55.54	5.84	5.37	0.52
	T-3	32.03	33.54	33.02	0.94	0.35	0.10
45	T-1	60.08	69.87	68.21	6.11	4.61	1.46
	T-2	59.74	61.40	62.67	6.27	6.75	1.52
	T-3	36.61	37.91	38.90	1.60	0.86	0.27
75	T-1	91.33	113.84	109.28	17.56	12.54	8.43
	T-2	90.11	104.86	111.98	18.51	23.52	9.52
	T-3	64.15	68.00	70.55	8.48	5.97	1.98

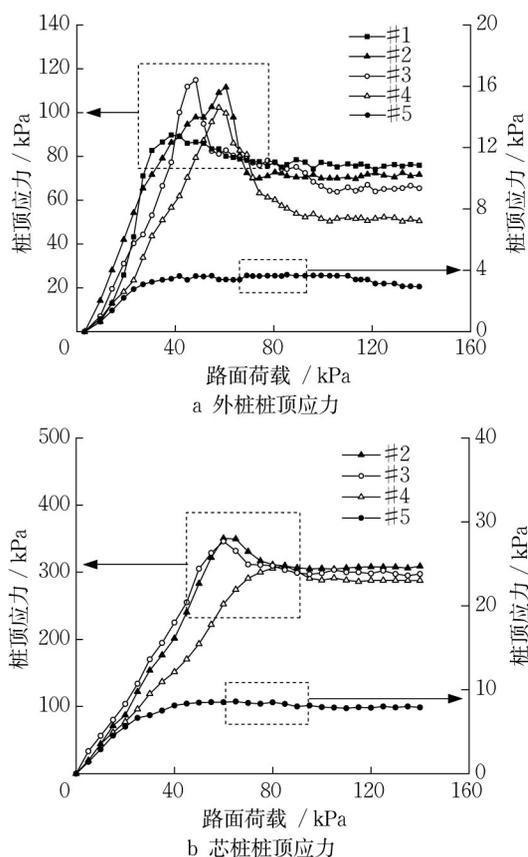


图3 T-3路面荷载—桩顶竖向应力曲线

Fig. 3 Pavement surcharge vs. vertical stress on column top

下降后,芯桩应力集中系数出现二次上升,说明外桩承载能力下降后,路堤荷载将进一步向芯桩集中。随着路面荷载的增加,T-3试验组芯桩的应力集中系数始终大于1,而外桩和T-2试验组的水泥土桩的应力集中系数会减小至1以下。路堤失稳破坏后,路堤顶面下方的芯桩(#1~#4)仍能发挥一定的承载作用,而水泥土桩已丧失承载能力。两组试验的#5号桩应力集中系数接近于0,表明#5号桩几乎不承受竖向荷载。

由以上分析可知,桩体位置与其性能的发挥有密切关系。#1~4号桩发挥了承担竖向荷载的作用,初期路面荷载向桩体集中,当桩体发生屈服后,荷载向桩间土传递;而#5~6号桩未发挥竖向承载作用。

2.3 桩体应变

图5为劲芯水泥土桩不同深度处的芯桩轴向应变,靠近路堤中心为内侧,远离路堤中心为外侧。#3号桩中各深度的轴向应变均为负值,芯桩两侧均为压应变,且内外侧的压应变差异较小,说明桩体主要承担竖向荷载。

#4~#6号桩存在内外两侧应变异号情况,即桩

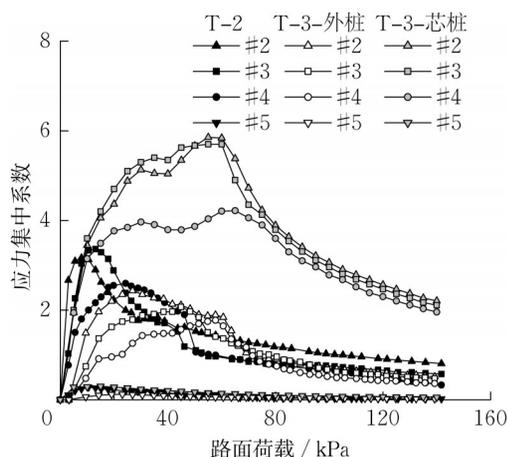


图4 应力集中系数随路面荷载变化

Fig. 4 Pavement surcharge vs. stress ratio

体一侧承受拉应变,另一侧承受压应变,说明桩体承受弯矩作用。#4号桩所受弯矩主要集中在桩身中上部,且发生向内弯曲;桩身中下部均为压应变,发生轴向压缩。#5号桩距桩顶50mm处为拉应变,桩身两侧受拉且外侧拉伸变形略大于内侧;距桩顶250mm处,桩体外侧受拉、内侧受压,距桩顶450mm处,外侧受压、内侧受拉;距桩顶650mm处应变较小,基本不发生变形。#6号桩距桩顶50mm处应变近似为0,距桩顶250mm与450mm处与#5号桩情况类似,距桩顶650mm处,外侧应变几乎为0,而内侧为拉应变。#5号和#6号桩主要承受弯矩,桩体中上部向内弯曲,中下部向外弯曲。

通过芯桩桩身应变分析可知,各桩所受弯矩作用位置不同,表明路堤下不同位置的桩体弯曲破坏模式存在差异。

2.4 桩体破坏形态

试验结束后,小心开挖桩间土,当桩体完全露出后,记录桩体形态,并小心从模型箱中取出,在地面还原定位。图6为T-2和T-3试验组还原后的桩体破坏形态。

T-2试验组:#1~2号桩桩体基本完整,并发生明显的竖向压缩变形,未发生明显水平位移,桩身破坏面为水平方向且无相对错动;#3号桩桩体基本完整,发生明显的竖向变形和倾斜,在桩体中部有剪切破坏面;#4号桩桩身分离成三段,发生剪切错开和弯曲;#5~6号桩桩身上部断裂成两段,桩身发生弯曲破坏,但未发生明显的压缩变形。

在T-3试验组:#1~2号桩桩身完整,桩顶处芯桩刺出约20mm,桩体无明显水平变形,桩身破坏面为水平方向且无相对错动;#3号桩桩身完整,桩顶

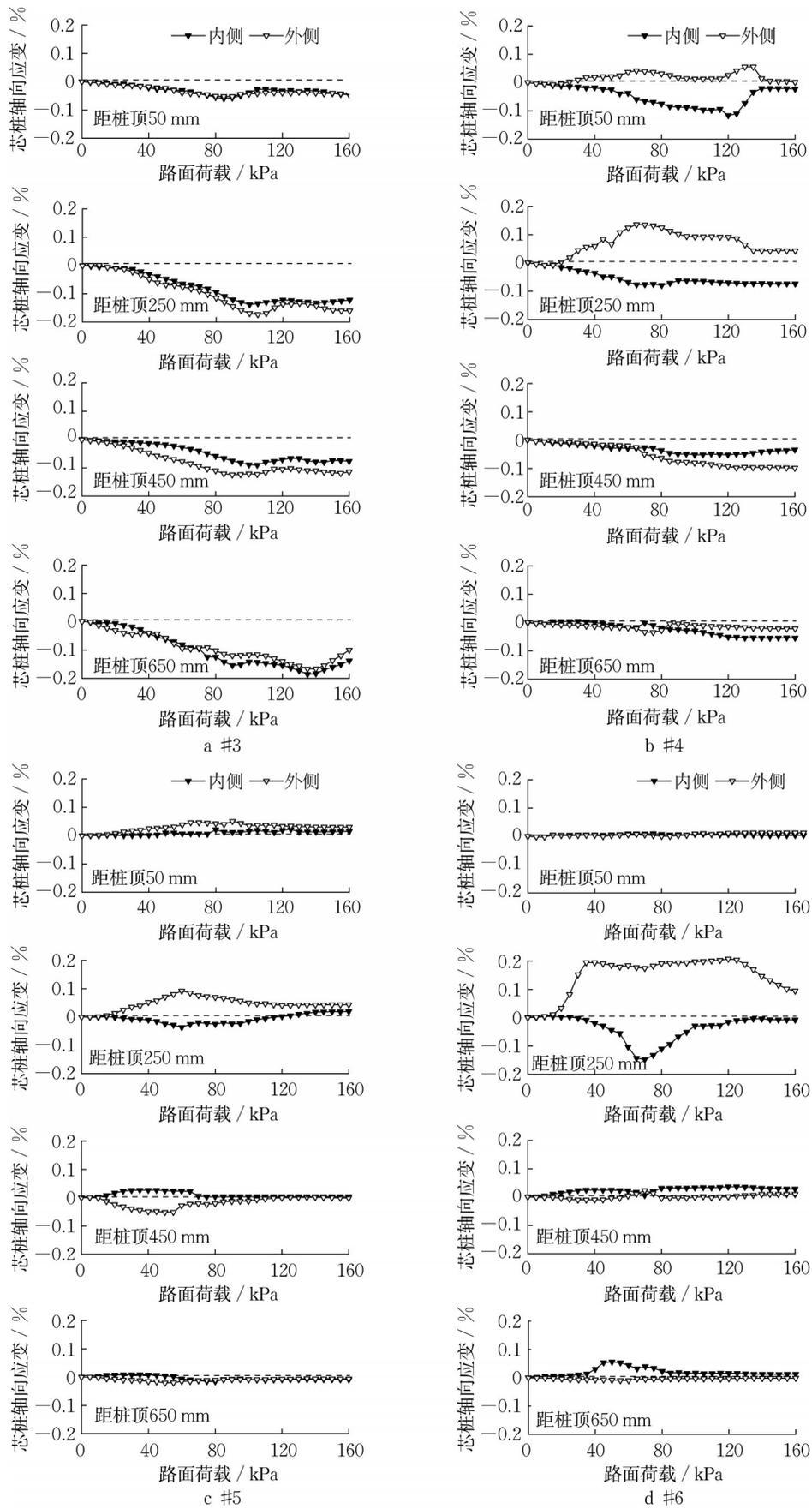


图 5 不同深度芯桩桩身应变

Fig. 5 Strain of core pile at different depths

芯桩刺出,且桩体向坡外倾覆;#4~6号桩桩身发生多处断裂,裂口形态和错位特征表现为弯曲破坏。

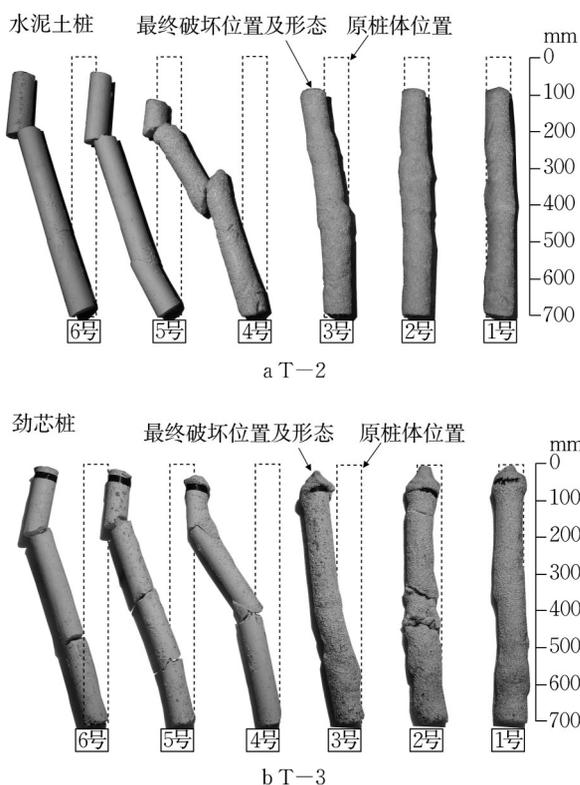


图6 桩体破坏形态

Fig. 6 Failure modes of columns

表4 桩体导电通路熄灭时对应的路面荷载

Tab. 4 Surcharge corresponding to the LED failure

桩号	#4	#5	#6
T-2/kPa	54	51	48
T-3/kPa	72	69	63

由以上分析可知,T-2和T-3试验组#4~6号桩发生弯曲破坏。表4为T-2和T-3试验组#4~6号桩二极管熄灭对应的路面荷载。结果表明,边坡下方桩体自坡脚向路堤内侧发生渐进破坏。该结果与Kitazume等^[22-23]的离心试验结果一致。

结合桩顶应力、桩身应变和桩体破坏形态分析,T-2水泥石桩复合地基:#1~2号桩发生受压破坏,#3号桩发生压剪破坏,#4号桩发生压弯/剪破坏,#5~6号桩发生弯曲破坏;T-3劲芯水泥石桩复合地基:#1~3号桩发生受压破坏,#4号桩发生压弯破坏,#5~6号桩发生弯曲破坏。与T-2试验组不同,T-3试验组中#4号桩未出现压剪破坏,这可能是由于芯桩的插入,使桩体刚度显著提高,更易发生弯曲破坏^[16]。

2.5 路堤失稳模式

根据路堤失稳破坏后路堤沉降和坡外隆起量测,

确定失稳滑动的范围。通过PIV图像获得的路堤位移矢量确定滑动面剪切入口位置,并沿剪入口追踪矢量箭头指向变化,再结合桩体的破坏形态和坡外隆起范围确定滑动面位置。图7为试验前后T-3试验组照片、位移矢量图及滑动面形态。

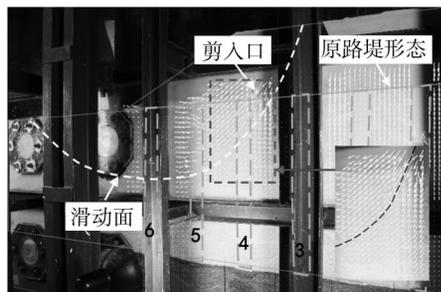
根据滑动面位置和桩体破坏形态,绘制路堤失稳模式示意图(如图8所示)。3组试验的滑动面形态差异明显,T-3试验组滑动面深度更浅,坡外隆影响范围更小,表明劲芯水泥石桩约束地基变形能力优于水泥石桩复合地基,地基土深层滑动更难发生。T-2和T-3试验组的滑动面穿过坡面下3根桩(#4~6),但桩体断裂位置并未与滑动面重合。



a 路堤模型初始形态



b 路堤模型最终破坏形态



c 矢量位移图及滑动面

图7 路堤模型实拍

Fig. 7 Actual photos of embankment model

3 现有稳定性计算方法评价

以T-1、T-2和T-3试验组的临界失稳荷载为路面荷载,此时路堤的安全系数应接近1。采用《复合地基

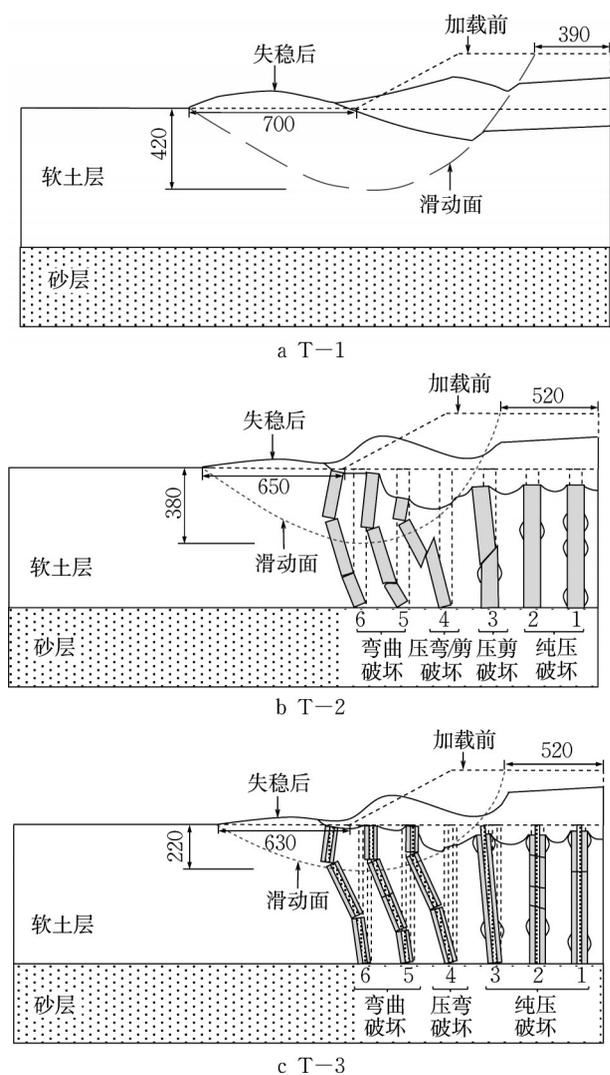


图8 路堤失稳模式示意图(单位:mm)

Fig. 8 Schematic diagram of embankment instability (unit: mm)

技术规范》(GB/T 50783-2012)^[24]、《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2012)^[25]和等效抗剪强度法^[16],基于GEO-SLOPE分析不同方法对水泥土桩复合地基和劲芯水泥土桩复合地基稳定性分析的适用性。

《复合地基技术规范》(GB/T 50783-2012)规定:对于柔性桩复合地基,最危险滑动面上的总剪切力由传至复合地基面上的总荷载确定,最危险滑动面上的总抗剪强度可采用复合土体综合抗剪强度指标计算;对于刚性桩复合地基最危险滑动面以上的下滑力,可只考虑传递至复合地基桩间土地基面上的荷载,而滑动面上的总抗剪强度只考虑加固区桩间土和未加固区天然地基的贡献。对于T-2试验组,复合土体的综合抗剪强度指标由表1中软土和水泥土桩的抗剪强度指标按水泥土桩置换率进行复合;对于T-3试验组,作用在地基面上的荷载为临界

失稳荷载减去实测的桩顶荷载。

《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2012)中规定:柔性桩和刚性桩复合地基取桩断裂后滑动面的摩擦性能确定抗剪强度指标。根据滑动面及桩体破坏情况,T-2与T-3中#4~#6号桩均发生断裂。以表1的桩体残余抗剪强度指标作为桩断裂后滑动面的抗剪强度指标,再根据等效桩墙法^[26]计算桩墙的综合抗剪强度指标。

等效抗剪强度法规定刚性桩体在滑动面位置处达到其抗弯强度并发生弯曲破坏,将其抗弯强度所提供的抗滑贡献等效为桩与滑动面相交截面上由等效抗剪强度提供的抗滑贡献。由此确定对应桩的等效抗剪强度,再利用此等效抗剪强度与桩间土抗剪强度计算复合抗剪强度。由表1中桩体的抗拉强度计算劲芯桩的纯弯曲强度,根据桩体位置与滑动面位置计算综合抗滑力矩,将抗滑力矩等效为等效抗剪强度,再结合等效桩墙法计算复合内摩擦角与黏聚力。

表5为各分析方法计算所用参数。将参数结果导入GEO-SLOPE极限平衡分析软件进行稳定性计算。

表5 参数计算结果

Tab. 5 Parameter calculation results

组号	计算方法	参数
T-2	《复合地基技术规范》	$P=45\text{kPa}, S=0.77\text{m}^2,$ $\varphi_w=24.3^\circ, c_w=2.85\text{kPa}$
	《建筑地基处理技术规范》	$\varphi_w=23.9^\circ, c_w=2.34\text{kPa}$
	《复合地基技术规范》	$P=53.6\text{kPa}, S=0.77\text{m}^2$
T-3	《建筑地基处理技术规范》	$\varphi_w=24.1^\circ, c_w=2.89\text{kPa}$
	等效抗剪强度法	$M_4=18.85\text{N}\cdot\text{m}, M_5=11.21\text{N}\cdot\text{m},$ $M_6=9.86\text{N}\cdot\text{m}, \varphi_w=24.3^\circ,$ $c_{w4}=2.62\text{kPa}, c_{w5}=1.89\text{kPa},$ $c_{w6}=1.74\text{kPa}$

注: P 为路面荷载; S 为路堤面积; φ_w 为复合摩擦角; c_w 为复合黏聚力; M_i 为*i*号桩的综合抗滑力矩; c_{wi} 为*i*号桩复合黏聚力。

T-1试验组安全系数接近1.0,与模型试验结果吻合。对于T-2试验组,《复合地基技术规范》(GB/T 50783-2012)的计算安全系数偏于危险且最危险滑动面偏浅,而《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2012)偏于保守但最危险滑动面基本符合。#4~#6号水泥土桩实际发生弯曲或弯剪破坏。《复合地基技术规范》(GB/T 50783-2012)和《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2012)仍以抗剪强度指标计算桩体抗滑贡献,较难准确评估路堤实际稳定性。

对于T-3试验组,《复合地基技术规范》(GB/T 50783-2012)计算安全系数偏于危险,《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2012)最为保守,等效抗剪强度法相对保守。《复合地基技术规范》(GB/T 50783-

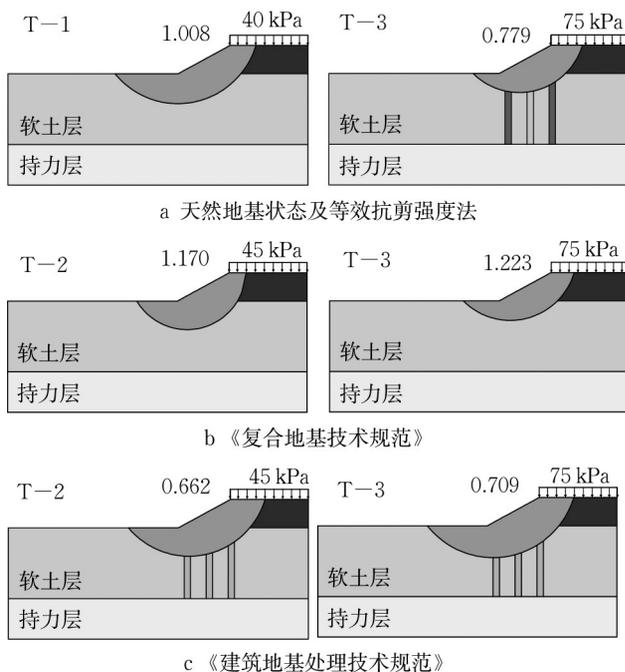


图9 稳定性分析结果

Fig. 9 Results of stability analysis

表6 安全系数计算结果

Tab. 6 Calculated factors of safety

分析方法	T-1 (40kPa)	T-2 (45kPa)	T-3 (75kPa)
Morgenstern-Price法	1.069	—	—
《复合地基技术规范》	—	1.170	1.223
《建筑地基处理技术规范》	—	0.662	0.709
等效抗剪强度法	—	—	0.779

2012)仅考虑到了桩体所起到的荷载分担作用,《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2012)以桩断裂后滑动面的摩擦性能确定抗剪强度指标,忽略了刚性桩抵抗滑动的贡献。《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2012)以桩断裂后滑动面的摩擦性确定桩体抗滑贡献,忽略了桩体实际的抗弯滑动贡献,造成计算结果的偏差。等效抗剪强度法考虑了桩体的弯曲破坏模式,但该方法假设桩体的抗弯强度作为桩体抗滑贡献的控制因素,未考虑路基中桩体实际的受力状态。

4 结论

本文基于1g重力场室内模型试验,对比研究路堤荷载下天然地基、水泥土桩复合地基和劲芯水泥土桩复合地基路堤失稳破坏特性,得出以下结论:

(1)相较于水泥土桩,劲芯水泥土桩大幅提升了路堤的稳定性。劲芯水泥土桩能有效约束地基土的变形,路面沉降约为水泥土桩承载路堤的61%~

71%,坡外隆起约为其12%~46%。

(2)路堤下不同位置的桩体承载性能不同。路堤顶面下方桩体主要发挥竖向承载作用,边坡下方桩体主要发挥抗水平荷载作用。路堤失稳破坏后,路堤顶面下方的芯桩仍能发挥一定的承载作用,而水泥土桩已丧失承载能力。

(3)桩体表现出渐进式失稳破坏,破坏模式与桩体刚度和相对于路堤位置有关。路堤荷载下水泥土桩可发生纯压破坏、压剪破坏和弯曲破坏;劲芯桩可发生纯压破坏、压弯破坏和弯曲破坏。桩体断裂位置与滑动面位置并不重合。

(4)等效抗剪强度法考虑了桩体的抗弯抗滑贡献,对于劲芯水泥土桩复合地基具有一定的适用性,但该方法假设桩体的抗弯强度作为桩体抗滑贡献的控制因素,未考虑路基中桩体实际的受力状态。

作者贡献声明:

张 振:论文整体结构与研究方法指导,论文修改,论文审定,基金支持;

李凌旭:资料收集,理论计算,图表绘制,论文撰写;

叶观宝:论文审定,论文整体结构与研究方法指导,基金支持;

王 萌:资料收集,图表绘制,试验开展,理论计算;

肖 彦:资料收集,试验开展。

参考文献:

- [1] 董平, 陈征宙, 秦然. 砼芯水泥土搅拌桩在软土地基中的应用[J]. 岩土工程学报, 2002(2): 204.
DONG Ping, CHEN Zhengzhou, QIN Ran. Use of concrete-cored DCM pile in soft ground [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002(2): 204.
- [2] 鲍鹏, 姜忻良, 盛桂琳. 劲芯搅拌桩复合地基承载性能静动力分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 63.
BAO Peng, JIANG Xinliang, SHENG Guilin. Static and dynamic analysis of bearing capacity of composite foundation of concrete core mixing piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 63.
- [3] YE G B, CAI Y S. Bearing capacity and settlement calculation of stiffened deep cement mixing (SDCM) pile [C]// International Symposium on Geotechnical Engineering for High-Speed Transportation Infrastructure. Hangzhou: China Civil Engineering Society (CCES), 2012: 320-328.
- [4] YE G B, CAI Y S, LIU Q. Field test on stiffened deep mixed columns [C]//Proceedings of 12th International IAEG Congress. Torino:IAEG, 2014: 12-15.
- [5] WU M, ZHAO X. Bearing behaviors of stiffened deep cement mixed pile [J]. Source Transactions of Tianjin University,

- 2006, 12(3): 209.
- [6] WANG C, XU Y F, DONG P. Working characteristics of concrete-cored deep cement mixing piles under embankments[J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2014, 15(6): 419.
- [7] 刘松玉, 周建, 章定文, 等. 地基处理技术进展[J]. 土木工程学报, 2020, 53(4): 93.
LIU Songyu, ZHOU Jian, ZHANG Dingwen, *et al.* State of the art of the ground improvement technology in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(4): 93.
- [8] LI H J, LIU S Y, TONG L Y. Field investigation of the performance of composite foundations reinforced by DCM-bored piles under lateral loads[J]. Construction and Building Materials, 2018, 170: 690.
- [9] 钟佳男. 劲芯水泥土桩复合地基工作性状及影响因素分析[D]. 杭州:浙江大学, 2019.
ZHONG Jianan. Analysis on working behavior and influence factors of composite foundation improved by concrete-cored DCM pile[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [10] NGUYEN B P, DOAN N P, KIM Y T. Vertical stress distribution on stiffened deep cement mixing column under embankment load [C]// International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics. Springer: International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, 2021: 825-832.
- [11] 叶观宝, 蔡永生, 张振. 加芯水泥土桩复合地基桩土应力比计算方法研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 672.
YE G B, CAI Y S, ZHANG Z. Research on calculation of pile-soil stress ratio for composite foundation reinforced by stiffened deep mixed piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(3): 672.
- [12] YE G B, CAI Y S, ZHANG Z. Numerical study on load transfer effect of stiffened deep mixed column-supported embankment over soft soil[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, 21(3): 703.
- [13] ZHANG Z, RAO F R, YE G B. Analytical modeling on consolidation of stiffened deep mixed column-reinforced soft soil under embankment[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2020, 44(1): 137.
- [14] KIVELÖ M. Stabilization of embankments on soft soil with lime/cement columns[D]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 1998.
- [15] BROMS B B. Can Lime/cement columns be used in singapore and southeast asia[R]. Nanjing: Nanjing Technological University and NTU-PWD Geotechnical Research Centre, 1991.
- [16] 郑刚, 刘力, 韩杰. 刚性桩加固软弱地基上路堤稳定性问题(II)——群桩条件下的分析[J]. 岩土工程学报, 2010(12): 10.
ZHENG Gang, LIU Li, HAN Jie. Stability of embankment on soft subgrade reinforced by rigid inclusions (II)—group piles analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010(12): 10.
- [17] 俞建霖, 李俊圆, 王传伟, 等. 考虑桩体破坏模式差异的路堤下刚性桩复合地基稳定分析方法研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(S2): 37.
YU Jianlin, LI Junyuan, WANG Chuanwei, *et al.* Stability of composite foundation improved by rigid piles under embankment considering different failure modes of piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S2): 37.
- [18] ZHANG Z, HAN J, YE G B. Numerical analysis of failure modes of deep mixed column-supported embankments on soft soils[C]// Ground Improvement and Geosynthetics-Selected Papers from the Proceedings of the 2014 GeoShanghai International Congress. Shanghai: Geotechnical Special Publication, 2014: 78-87.
- [19] 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.
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.
- [20] 张振, 陈云龙, 叶观宝, 等. 短芯劲芯水泥土桩承载路堤失稳破坏模型试验[J]. 工程地质学报, 2019, 27(5): 1063.
ZHANG Zhen, CHEN Yunlong, YE Guanbao, *et al.* Model test on stability failure of short-cored stiffened deep mixed column-supported embankment[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(5): 1063.
- [21] 张振, 张朝, 叶观宝, 等. 劲芯水泥土桩承载路堤渐进式失稳破坏机制[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 2122.
ZHANG Zhen, ZHANG Zhao, YE Guan-bao, *et al.* Progressive failure mechanism of stiffened deep mixed column-supported embankment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6): 2122.
- [22] KITAZUME Masaki, MARUYAMA Kenji. External stability of group column type deep mixing improved ground under embankment loading[J]. Soils and Foundations, 2006, 46(3): 323.
- [23] KITAZUME Masaki, MARUYAMA Kenji. Internal stability of group column type deep mixing improved ground under embankment loading[J]. Soils and Foundations, 2007, 47(3): 437.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 复合地基技术规范:GB/T 50783-2012[S]. 北京:中国计划出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Technical code for composite foundation:GB/T 50783-2012[S]. Beijing:China Planning Press, 2012.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范:JGJ 79-2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Technical code for ground treatment of buildings:JGJ 79-2012 [S]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2012.
- [26] ZHANG Z, HAN J, YE G B. Numerical investigation on factors for deep-seated slope stability of stone column-supported embankments over soft clay [J]. Engineering Geology, 2014, 168: 104.