

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.012

多桩型复合地基支承路堤破坏模式及优化设计研究

刘 剑¹, 夏博洋², 郑 刚²

(1. 沧州曲港高速公路建设有限责任公司; 2. 天津大学建筑工程学院)

摘要: 为系统研究桩体类型对复合地基支承路堤破坏模式及整体稳定性的影响, 基于三维有限元分析方法开展了桩体破坏特性及地基剪切应变演化规律研究。采用全生命周期成本-效益分析方法对不同复合地基经济性进行了评估, 以确定具备最优经济效益的复合地基设计方案。结果表明: 路堤荷载作用下, 桩体类型显著影响复合地基支承路堤破坏模式, 随着桩体刚度增加, 破坏模式从剪切破坏转变为弯曲破坏, 破坏发展由同时破坏转变为渐进破坏; 碎石桩复合地基塑性剪切应变沿路堤中心线呈渐进式发展趋势, 而素混凝土桩复合地基剪切应变分别在路堤中心与坡脚区域呈渐进式与倒退式发展特征, 最终形成贯通性临界滑动面; 相较于同时提升全区域桩体强度, 仅在路堤坡脚至坡肩之间设置高强度桩体即可显著提升路堤整体稳定性, 表现出更优投资回报率与经济性。

关键词: 路堤; 复合地基; 碎石桩; 素混凝土桩; 破坏模式; 成本效益

Study on failure mode and optimization design of embankment supported by multi-pile type composite foundation

Liu Jian¹, Xia Boyang², Zheng Gang²

(1. Cangzhou Qugang Expressway Construction Co. Ltd.; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University)

Abstract: To systematically investigate the influence of different pile types on the failure modes and overall stability of embankment supported by composite foundations, a three-dimensional finite element analysis method was employed to study pile failure characteristics and the evolution patterns of shear strain in foundation soils. A full lifecycle cost and benefit analysis framework was applied to evaluate the economic performance of various composite foundation configurations, thereby identifying the optimal design strategy with the highest cost efficiency. The results demonstrate that under embankment loading conditions, pile type significantly alters the failure mode of embankment supported by composite foundations. As pile stiffness increases, the failure mode transitions from shear failure to flexural failure, and the failure development pattern shifts from simultaneous failure to progressive failure. Specifically, in gravel pile composite foundations, the plastic shear strain in soils exhibits progressive development along the embankment centerline. In contrast, the shear strain evolution in plain concrete pile composite foundations displays distinct forward propagation at the embankment center and backward propagation at the slope toe region, ultimately forming a continuous critical sliding surface. Compared to strengthening piles across the entire area, installing high-strength piles only beneath the embankment slope toe to the shoulder of the embankment can significantly enhance the overall stability of the embankment, demonstrating superior return on investment and cost-effectiveness.

Key words: embankment; composite foundation; gravel pile; plain concrete pile; failure mode; cost and benefit

软土地区道路面临诸多挑战, 其中地基处理方式是关键问题之一^[1-2]。软土具有高压缩性、低强度和较差的排水性能, 导致在路堤荷载作用下易发生沉降变形甚至失稳破坏, 从而影响道路的稳定性和安全性^[2-4]。复合地基技术可显著减少沉降, 提高路堤整体稳定性, 是软土地区道路工程中常用的地基处理方法。然而近年来, 深厚软弱土地基上复合地基支承的高填方道路失稳事故频繁发生, 因此, 确保路堤的整体稳定性仍然是道路工程建设和使用中需要解决的关键问题。

根据复合地基中桩体的胶结特性、施工方法及刚度性能等技术参数的差异性, 可将其划分为 3 种基本类型: ①散体桩, 包括砂桩、碎石桩等; ②半刚性桩, 包括水泥土搅拌桩、旋喷桩等; ③刚性桩, 包括素混凝土桩、

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52408385); 河北省交通运输厅科技项目(201405)

作者简介: 刘剑(1974—), 男, 正高级工程师, 主要从事交通岩土工程研究。E-mail: liujian000202@126.com

通信作者: 夏博洋(1993—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事岩土工程研究。E-mail: 1019205010@tju.edu.cn

CFG 桩等^[1-4]。对于不同桩体类型的复合地基,国内外学者针对其稳定性开展了广泛研究。例如: Almeida 等^[5]基于离心机试验研究了路堤荷载作用下碎石桩复合地基的稳定性,发现碎石桩通过抗剪强度的发挥,进而对路堤的稳定性起贡献作用,主要破坏模式为剪切破坏,且路堤下所有桩体同时发生破坏;针对有黏结性的水泥土搅拌桩及素混凝土桩复合地基,Kitazume 等^[6-7]通过离心机试验发现,相较于抗剪强度,其抗弯强度普遍较低,路堤荷载作用时易发生弯曲破坏,且破坏具有显著的脆性特性;Zheng 等^[8-9]采用离心机试验与数值分析相结合的方法,揭示了刚性桩破坏发展过程,即路堤下最外侧桩首先达到极限拉应力而发生弯曲破坏,受弯截面处应力完全释放导致临近桩体拉应力上升,发生渐进破坏导致整体失稳。但已有研究对于桩-土之间相互作用的渐进破坏机理研究较少,且对于路堤体系中结构物破坏过程的研究仅限于桩体,缺乏对于土体破坏过程的相应研究。

实际工程应用中通常需要考虑安全效益与经济效益,传统的通过简单提高置换率以及桩体强度的方法增强路堤稳定性并不适用^[10-11],需要寻找既能满足路堤稳定性要求,又经济高效的复合地基设计方案。为平衡交通基础设施投资成本与抗失稳风险能力,需建立综合评估方法为基建投资决策提供有效依据^[12-13]。其中,Dennemann 等^[14-15]提出的全生命周期成本-效益分析方法通过整合风险因素与投资回报率,被视为评估工程设计成本效益的有效手段。

本文基于 ABAQUS 有限元软件系统研究了不同桩体类型对复合地基支承路堤结构破坏模式与整体稳定性的影响,采用全生命周期成本-效益分析方法对多种复合地基的经济性进行了对比评估,旨在寻找经济高效的复合地基设计方案,为软土地区道路工程实践提供理论依据与决策参考。

1 数值模型构建与验证

1.1 数值模型与本构模型参数

本文研究依托蒙西至华中通道某铁路路堤建造段,该路段土体以冲洪积淤泥质粉质黏土、淤泥及粉质黏土为主,根据地质调查、静力触探、钻探确定软土层厚度为 8~24 m,局部最厚处达到 35 m。基于以上地质工况,采用 ABAQUS 有限元软件建立数值模型如图 1 所示(图中 H 为填筑高度)。为了节约计算成本,考虑路堤及路基截面的对称性,取一半截面进行建模^[16-17]。考虑纵向桩体间距的一致性,模型纵向(y 方向)取 1/2 桩间距进行建模^[17-18]。为防止产生边界效应,模型总宽度为 40 m。路堤下方土体总厚度为 24 m,分为两层,上部为 15 m 软土层,下部为 9 m 粉质黏土层。路堤下共设置 7 排桩体,桩长 18 m,桩径 0.8 m,桩间距 3.2 m。其中,路堤坡脚至路堤坡肩位置以下的第 2、3、4 排桩为增强区域。粉质黏土层底部采用铰接边界,限制所有方向的位移,横向边界则采用滚动边界,限制水平方向的位移,模型可以沿深度方向移动。为了模拟地基的流固耦合行为,采用可以同时表征线性位移以及孔隙水压力的八节点六面体实体单元(C3D8P),八节点六面体线性减缩积分单元(C3D8R)则用于模拟路堤填土和桩体的变形以及破坏行为^[18-19]。共设计了 4 组方案(方案 2、4 分为增强区和非增强区):方案 1 全部采用碎石桩复合地基;方案 2 非增强区为碎石桩,增强区为 C30 素混凝土桩;方案 3 为 C30 素混凝土桩;方案 4 非增强区为 C30 素混凝土桩,增强区为 C50 素混凝土桩。

路堤填土、下方的粉质黏土层和碎石桩均采用理想弹塑性本构模型模拟,并假定土体符合摩尔-库仑屈服准则^[20-21]。采用修正剑桥本构(modified Cambridge clay, MCC)模型对软土层进行模拟,软土层的不排水抗剪强度 c_u 可通过表 1 中各项参数的取值自动计算,其计算公式为^[22]:

$$c_u = \frac{M}{2} \exp \left[\frac{e_1 - (\lambda - \kappa) \ln 2}{\lambda} - \frac{e_0}{\lambda} \right]$$

(1)

式中: M 为强度参数; λ 为正常固结线的斜率; κ 为回弹线斜率; e_1 为参考应力 $p_1 = 1 \text{ kPa}$ 情况下对应的孔隙比; e_0 为初始孔隙比,其取值与土体受到的初始应力状态有关。通过式(1)计算得到的不排水强度随深度的

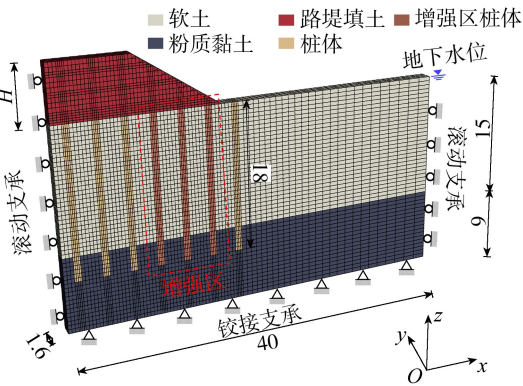


图 1 数值模型示意图(单位:m)
Fig. 1 Numerical model (unit: m)

增加而增大,这种分布特点与实际情况一致。表 1 为数值模型中材料本构模型及参数选取。

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料	本构模型	M	λ	κ	p_1	e_1	ν	$k/(m/d)$	$\gamma/(kN/m^3)$	E/MPa	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	$\psi/(^{\circ})$
软土	MCC	1.02	0.26	0.05	1	3.28	0.37	4.32×10^{-4}	18.00				
路堤填土	MC						0.30		16.47	34.4	1	41	12
粉质黏土	MC						0.30	1×10^{-3}	18.00	100	40	30	0
C30 素混凝土桩	CDP						0.20		25.00	29 500		30	0
C50 素混凝土桩	CDP						0.20		25.00	34 500		30	0
碎石桩	MC						0.30	1×10^{-3}	18.00	60		45	13

注: k 为渗透系数; γ 为容重; E 为弹性模量; ν 为泊松比; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角; ψ 为剪胀角。MC 为摩尔-库仑模型。

对于素混凝土桩,采用混凝土塑性损伤(concrete damaged plasticity, CDP)模型模拟混凝土基体的破坏全过程^[23]。CDP 模型通过输入混凝土结构在单轴受力状态下的应力和非弹性应变,可以真实地模拟混凝土材料在荷载作用下的破坏行为。其基本假定如下:①混凝土材料为连续的实体单元;②混凝土材料损伤是各向同性的;③混凝土材料的主要破坏原因是拉伸开裂以及压缩破碎^[24-25]。CDP 模型中,混凝土两种破坏形式主要表现为在拉伸屈服后软化导致开裂和在压缩屈服后先硬化再软化导致压碎破坏。模型中需要分别输入非弹性应变以及受拉开裂应变,同时要保证与之对应的压缩/拉伸等效塑性应变大于 0,并随着损伤因子增大而增大。

当混凝土材料处于弹性阶段时,CDP 模型通过初始弹性模量 E_0 描述材料的力学特性,而当材料进入损伤阶段时,通过降低混凝土材料初始强度来描述其损伤破坏行为,计算公式分别为:

$$E_c = (1 - d_c) E_0 \tag{2}$$

$$E_t = (1 - d_t) E_0 \tag{3}$$

式中: E_c 、 E_t 分别为受压和受拉损伤后刚度; d_c 、 d_t 分别为受压和受拉塑性损伤因子。损伤因子的取值由单轴拉伸和压缩下的应力-应变关系确定,取值范围为 0~1,其中 1 代表混凝土强度完全丧失,0 代表混凝土没有发生任何损伤。

1.2 数值模型验证

数值模型中分别采用 C30 与 C50 素混凝土材料模拟非增强区和增强区桩体特性,根据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》,C30 混凝土材料的弹性模量为 29 540 MPa,轴心抗压强度为 21.2 MPa,抗拉强度为 2.43 MPa;C50 混凝土材料的弹性模量为 34 500 MPa,轴心抗压强度为 38.4 MPa,抗拉强度为 3.42 MPa。Xia 等^[13]研究表明,C30 混凝土三点弯梁数值模拟与室内模型试验数据具有良好的吻合性,图 2 进一步呈现了 CDP 模型中受拉塑性损伤因子随开裂应变的演化规律,揭示了材料损伤累积的非线性特征。在进行参数分析前,将不同方案的极限路堤填筑高度数值模拟结果与 Xia 等^[13]进行的离心机模型试验结果进行了对比,数值模拟结果与离心机模型试验误差均在 10%以内,进一步验证了数值模型的准确性。

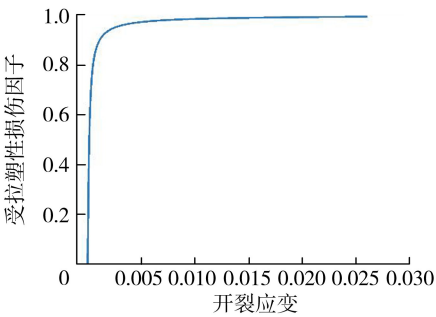


图 2 C30 混凝土受拉损伤特性

Fig. 2 Tensile failure characteristics of C30 concrete

2 桩体类型对复合地基支承路堤破坏模式及稳定性的影响

2.1 不同类型复合地基支承路堤极限填筑高度

图 3 为不同方案下路堤填筑高度-路面沉降的关系曲线。填筑初期,路面沉降随着填筑高度的增加而增大,填筑高度-路面沉降曲线表现为线性关系。当路堤临近破坏时,沉降增量显著增大,曲线斜率发生改变。为了定量确定各方案对应的极限路堤填筑高度,采用 Villalobos^[26]提出的方法,对填筑高度-路面沉降关系曲线的起始段与末段分别进行直线拟合并延长,延长线交点定义为屈服点,对应的填筑高度确定为极限路堤填筑高度,如图 3 中方案 2 所示,按此方法确定方案 2 的极限路堤填筑高度为 8.0 m,相应方案 1、3、4 对应的极

限路堤填筑高度分别为 7.0、9.8、11.3 m。

2.2 不同类型复合地基桩体破坏特性

图 4 为路堤填筑过程中不同方案下桩体破坏模式。方案 1 碎石桩复合地基在达到极限路堤填筑高度时,桩体破坏同时发生,破坏类型为剪切破坏(图 4(a))。对于方案 2(图 4(b)),增强区的 C30 素混凝土桩发生弯曲破坏,且破坏具有渐进特性。其中,第 2~4 排素混凝土桩首先在软硬土层交界面处同时发生一次弯断,随后第 2 排桩在浅层发生二次弯断;临近整体失稳时,第 3、4 排桩也同时发生二次弯断。对于素混凝土桩复合地基(图 4(c)(d)),坡脚位置处的第 1、2 排桩首先在软硬土层交界面发生一次弯断,随着路堤填筑高度逐渐增加,破坏由路堤坡脚向路堤中心逐渐发展,当第 4、5 排桩发生二次弯断后,路堤整体发生失稳。在坡脚与坡肩之间采用 C50 混凝土材料不会改变桩体破坏顺序但会提高桩体发生二次弯断对应的极限路堤填筑高度(图 4(d)),进而有效地提高路堤的整体稳定性。

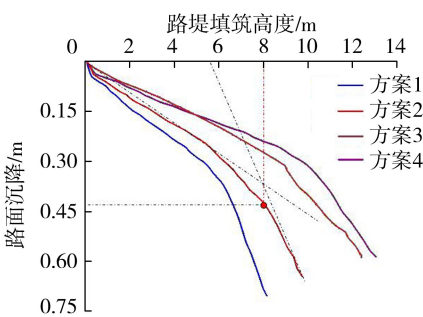


图 3 路堤填筑高度-路面沉降关系曲线
Fig. 3 Relationship curves between embankment filling height and pavement settlement

在坡脚与坡肩之间采用 C50 混凝土材料不会改变桩体破坏顺序但会提高桩体发生二次弯断对应的极限路堤填筑高度(图 4(d)),进而有效地提高路堤的整体稳定性。

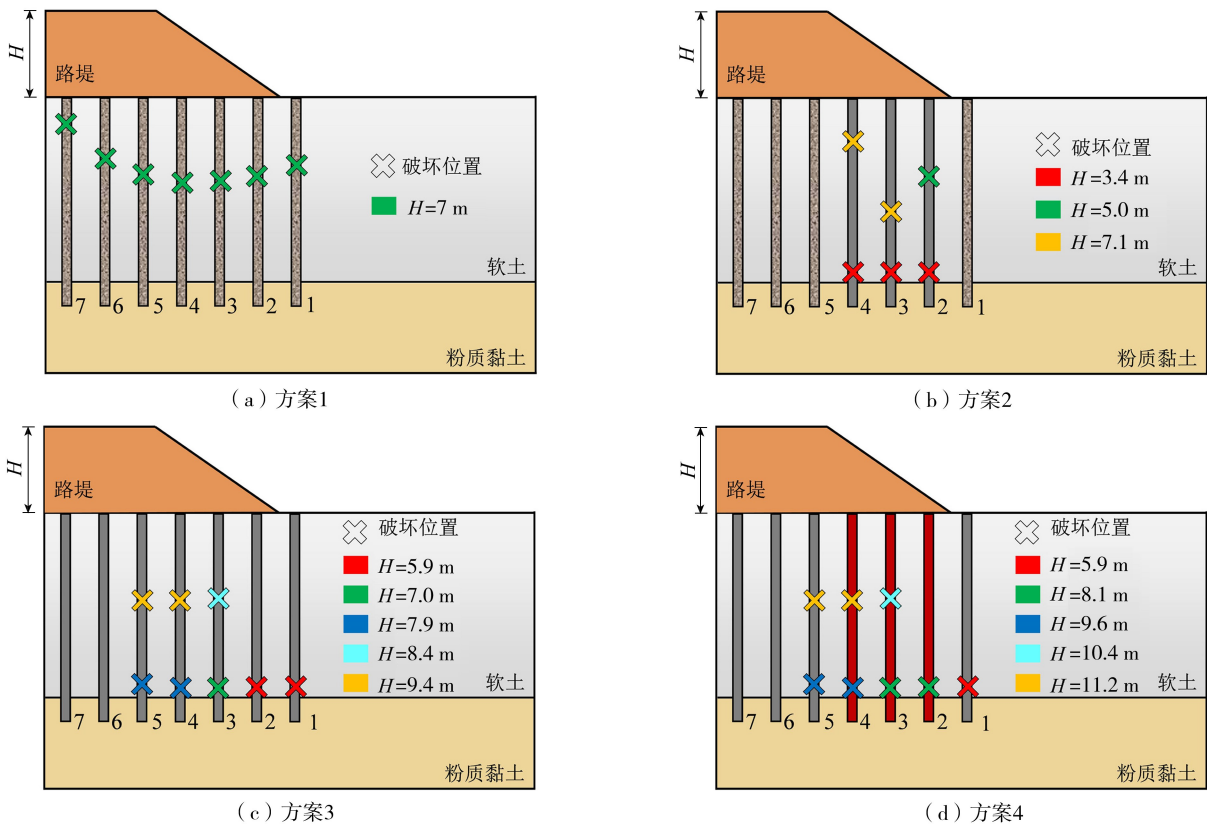


图 4 不同方案桩体破坏模式

Fig. 4 Failure modes of pile under different schemes

2.3 不同类型复合地基剪应变发展规律

图 5 为碎石桩复合地基(方案 1)在填筑过程中地基土的塑性剪应变发展过程。塑性剪应变首先在路堤中心出现并逐渐向坡脚发展,当填筑高度到达 7 m 时,路堤和路基中出现一条完整贯通的滑动带,此时路堤发生整体失稳。当采用碎石桩与素混凝土桩组合布桩方式(方案 2)时,塑性剪应变主要在坡脚以及路堤中心位置处累积,而增强区由于桩体强度较大,土体塑性应变累积量较小,表现为路堤中心与坡脚以外出现高剪应变区域,但相邻剪应变区不连通(图 6(a)(b)),然而当增强区的素混凝土桩发生弯断破坏以后,塑性区贯通,路堤发生整体失稳(图 6(c))。图 7 为 C30 素混凝土桩复合地基(方案 3)的塑性剪应变发展过程,软土层中的塑性剪应变首先出现于路堤中心以及坡脚以外区域,路堤中心处剪应变向坡脚处发展,坡脚位置处剪应变则向路堤中心方向逐渐发展,当填筑高度为 9.8 m 时,塑性区整体贯通,路堤发生整体失稳。对比图 7

与图 8 可以发现,当在坡脚与坡肩之间采用高强度混凝土桩时,可以有效限制坡脚外土体塑性剪应变的产生与发展,进而显著提高路堤的整体稳定性。

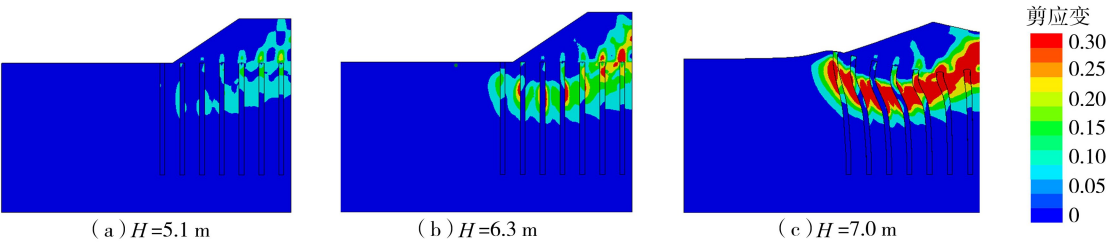


图 5 方案 1 塑性剪应变发展过程
Fig. 5 Development process of plastic shear strain in Scheme 1

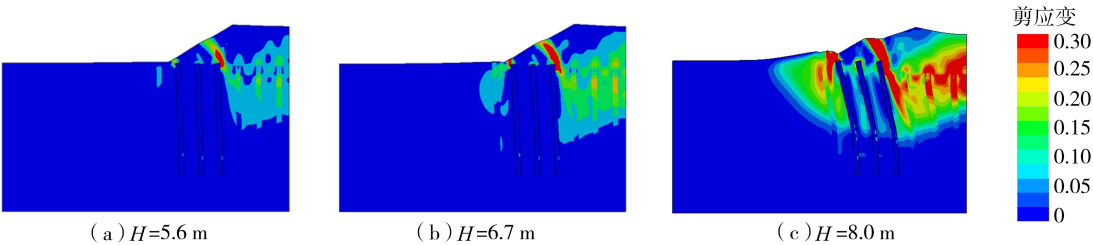


图 6 方案 2 塑性剪应变发展过程
Fig. 6 Development process of plastic shear strain in Scheme 2

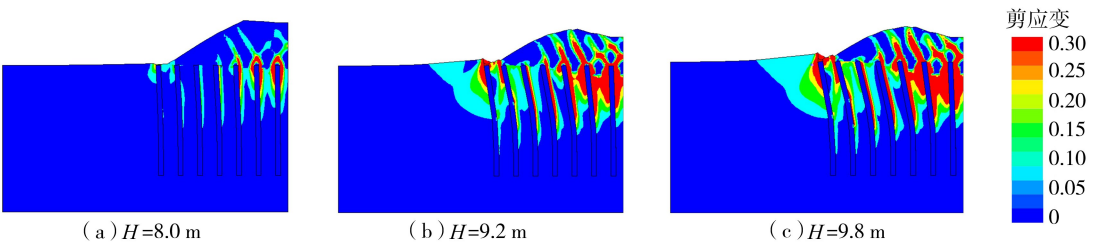


图 7 方案 3 塑性剪应变发展过程
Fig. 7 Development process of plastic shear strain in Scheme 3

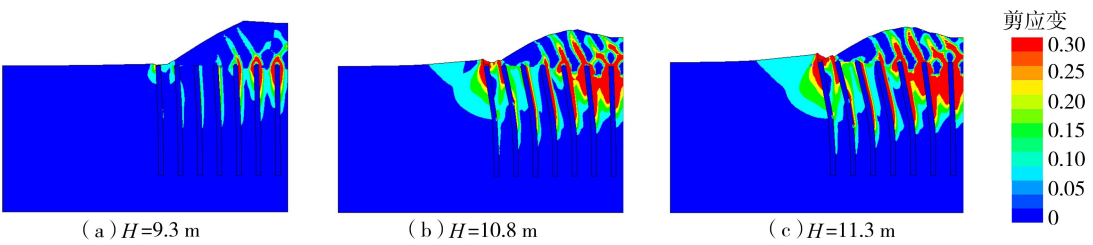


图 8 方案 4 塑性剪应变发展过程
Fig. 8 Development process of plastic shear strain in Scheme 4

2.4 不同类型复合地基整体破坏模式

图 9 为不同类型复合地基在路堤荷载作用下的破坏机制以及临界破坏面形态特征。①如图 9(a)所示,碎石桩复合地基在路堤荷载作用下,剪应变首先在路堤中心区域呈渐进式发展趋势,碎石桩同时发生剪切破坏,随后土体中形成完整贯通的塑性剪切区,最终导致路堤整体失稳。②如图 9(b)所示,碎石桩与素混凝土桩组合复合地基桩体同时存在剪切破坏与弯曲破坏现象,其中素混凝土桩呈渐进式弯曲破坏特征。值得注意的是,土体剪应变场在此类复合地基中表现出渐进式与倒退式发展并存的规律,当增强区素混凝土桩发生二次弯断后,塑性剪切区贯通,路堤发生整体失稳。③如图 9(c)所示,素混凝土桩复合地基在路堤荷载作用下,桩体破坏由坡脚位置处开始触发,向路堤中心逐渐发展,坡肩以外桩体会发生两次弯断破坏,并将桩体分为上、中、下 3 个部分,上部与下部桩体呈逆时针旋转趋势,中部桩体则呈顺时针旋转趋势。在土体塑性应变发展方面,坡脚区域剪应变为倒退式发展,路堤中心区域为渐进式发展,而坡肩位置则出现渐进与倒退应变

发展现象。当达到极限路堤填筑高度时,塑性剪切区贯通的临界滑动面位于两次弯断破坏位置之间。此外,混凝土桩体强度参数的提升虽不改变其破坏发展规律的基本模式,但可通过提高破坏阈值从而有效延缓破坏进程。

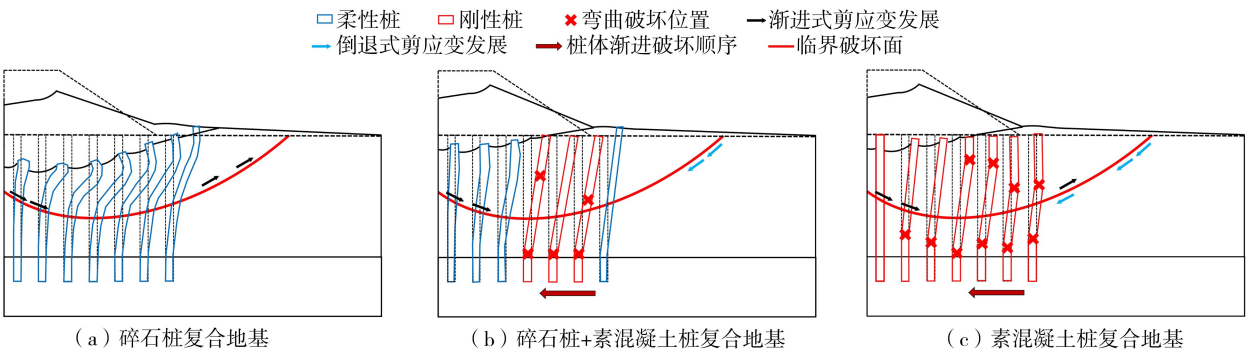


图 9 不同类型复合地基破坏模式及临界破坏面形态特征

Fig.9 Failure modes and critical failure surface characteristics of different composite foundation types

3 复合地基优化设计方案

3.1 全生命周期成本-效益分析方法

在实际工程中,在确保路堤稳定性以及安全性的情况下,需要选择经济性最优的设计方案。全生命周期成本-效益分析方法是一种优化资源分配、选择经济性最优的防灾策略的一种评估方法^[15,27],通过计算资产(如建筑、公路等)在整个生命周期内因各种原因受损可能导致的总经济损失,并与加固措施的成本对比,判断投资是否合理。成本-效益分析是一种广泛认可的用于比较多种替代性投资的工具,可以应用于多种情景中。本文采用成本效益比指标评估加固措施经济回报,特定加固措施的成本效益比为加固措施的效益净现值与实施加固措施的初始成本的比值,其中特定加固措施的效益净现值为完全破坏时的预期损失现值与加固措施下的损失现值之差。成本效益比大于 1 表示投资回报为正,即资产全生命周期内的经济效益超过加固措施建设成本,成本效益比越高,加固措施的经济效益越显著;成本效益比小于 1 表示投资回报为负,但若考虑其他协同效益(如减少交通中断、提升安全性、保护环境及更广泛的社会效益等),仍可能具有实施价值。

3.2 最优复合地基设计方案选择

本文基于全生命周期成本-效益分析方法,对比不同方案地基处理方式,确定在稳定性具备冗余度的情况下,选择最具经济效益的设计方案,进而实现路堤系统的优化设计。

对不同方案地基处理方式进行全生命周期成本-效益分析,需要计算各方案的效益净现值和初始成本,进而得到各方案的成本效益比,成本效益比最高的地基处理方式即为经济性最优选择。以整幅宽度路堤、纵向长度 3.2 m 作为标准进行计算,各方案工程建设成本计算基于公路工程估算指标。

为了计算不同地基处理方式下的效益净现值,以蒙西至华中通道某铁路路堤标准段填筑高度作为基准($H=5.0\text{ m}$),通过计算路堤在建设与服务过程全周期的破坏概率以及对应的修复成本,计算不同方案地基处理方式的成本效益比,计算结果如表 2 所示。可以发现,随着桩体强度的增大,路堤的破坏概率逐渐降低,对应进行修复的费用逐渐减少,效益逐渐提高。

根据表 2,采用不同复合地基设计方案,均可有效提高路堤的安全性,且具有良好的经济性,即具有良好的投资回报率(成本效益比大于 1)。随着复合地基桩体强度的提高,路堤受损修复费用显著降低,但成本效益比并不与之成简单的线性关系。分别对比方案 1、2 以及 3、4 的增强措施效果,其中增设 3 排增强桩后,路堤受损概率降低,安全冗余度显著提升,同时受损修复费用减少,成本效益比提高。这表明增强桩体强度虽然会增加初期造价,但通过减少维修损失与延长服役周期,实现了更好的投资回报。对比方案 2 与方案 3 的强度调整影响可以发现,方案 3 通过提升非增强区桩体强度,虽进一步降低了受损概率,但导致成本效益比下降。该现象表明,非增强区的桩体强度提升对提高投资回报率呈负作用,其经济效益弱于提高增强区桩体强度。相比于提高全部复合地基桩体的强度,通过在增强区(即路堤坡脚至路堤坡肩位置以下的 2、3、4 排桩)设置增强桩,安全系数显著提升,同时有效提高了成本效益比,具有良好的投资回报率,经济效益最佳。

其中方案4(设置4排C30素混凝土桩与3排C50素混凝土增强桩)在具有最高安全性的同时,具有最好的经济性,是本文工程背景下的最优复合地基设计方案。

表2 不同方案地基处理方式成本效益比

Table 2 Cost and benefit ratio of foundation treatment methods under different schemes					
方案	破坏概率	修复费用/元	加固策略效益/元	复合地基成本/元	成本效益比
1	0.64	82 821	46 587	37 633.36	1.24
2	0.49	63 410	65 998	49 978.16	1.32
3	0.33	42 255	87 152	66 437.90	1.31
4	0.25	31 782	97 626	71 866.57	1.36

4 结 论

- a. 在路堤荷载作用下,碎石桩复合地基桩体发生剪切破坏,且路堤下所有桩体同时发生破坏;碎石桩与素混凝土桩组合复合地基桩体同时存在剪切破坏与弯曲破坏现象,其中素混凝土桩发生渐进式弯曲破坏;素混凝土桩复合地基桩体破坏由坡脚位置处触发,向路堤中心逐渐发展,坡肩以外桩体会发生两次弯断破坏,并将桩体分为上、中、下3个部分,上部与下部桩体呈逆时针旋转趋势,中部桩体则呈顺时针旋转趋势;此外,在坡脚与坡肩之间采用高强混凝土可防止桩体二次弯断,有效提高路堤整体稳定性。
- b. 碎石桩复合地基在路堤荷载作用下,土体塑性区首先在路堤中心区域累积,呈渐进式发展趋势,最终形成贯通性塑性剪切区,导致路堤失稳。素混凝土桩复合地基坡脚及路堤中心剪应变分别呈渐进式与倒退式发展特征,坡肩位置同时存在以上两种演化形式。当达到极限路堤填筑高度时,临界滑动面位于桩体两次弯曲破坏位置之间。坡脚与坡肩之间设置高强度混凝土桩可有效抑制坡肩土体塑性剪应变发展,路堤整体稳定性提高。
- c. 相比于提高全部桩体强度,通过在路堤坡脚至路堤坡肩之间设置增强桩体,安全冗余度显著提升,同时有效提高了成本效益比,具有良好的投资回报率。采用C30素混凝土桩和C50素混凝土增强桩组成的刚性复合地基是本文4个方案中的最优复合地基设计方案,该设计方案既确保了路堤的最佳稳定性与安全性,同时最大限度地降低了施工以及之后维护过程中所需要的成本。

参考文献:

[1] 龚晓南. 广义复合地基理论及工程应用[J]. 岩土工程学报,2007,29(1):1-13. (Gong Xiaonan. Generalized composite foundation theory and engineering application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1): 1-13. (in Chinese))

[2] 郑刚,龚晓南,谢永利,等. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报,2012,45(2):127-146. (Zheng Gang, Gong Xiaonan, Xie Yongli, et al. State-of-the-art techniques for ground improvement in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2): 127-146. (in Chinese))

[3] 张秀勇,王海龙,李杰. 碎石桩复合地基在大丽高速公路软土地基处理中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):455-459. (Zhang Xiuyong, Wang Hailong, Li Jie. Application of gravel pile composite foundation in improving soft subgrade of Da-Li Highway[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5) :455-459. (in Chinese))

[4] 郑刚,周海祚. 复合地基极限承载力与稳定研究进展[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2020,53(7):661-673. (Zheng Gang, Zhou Haizuo. State-of-the-art review of ultimate bearing capacity and stability of composite foundations[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2020, 53(7) :661-673. (in Chinese))

[5] Almeida M S S, Davies M C R, Parry R H G. Centrifuge tests of embankments on strengthened and unstrengthened clay foundations[J]. Géotechnique, 1985, 35(4):425-441.

[6] Kitazume M, Maruyama K. Internal stability of group column type deep mixing improved ground under embankment loading[J]. Soils and Foundations, 2007, 47(3):437-455.

[7] 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. (Liu Hongyang, Luo Qiang, Xue Yuan, et al. Centrifugal model tests on failure characteristics of CFG pile composite foundation under embankment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(8): 1502-1511. (in Chinese))

[8] Zheng Gang, Xia Boyang, Zhou Haizuo, et al. Influence of deep-cement-mixing column rows on the performance of geosynthetics-

- reinforced column-supported railway embankment[J]. *Transportation Geotechnics*,2023,41:101012.
- [9] Zheng Gang, Yang Xinyu, Zhou Haizuo, et al. Numerical modeling of progressive failure of rigid piles under embankment load [J]. *Canadian Geotechnical Journal*,2019,56(1):23-34.
- [10] Chai J C, Shrestha S, Hino T, et al. 2D and 3D analyses of an embankment on clay improved by soil-cement columns [J]. *Computers and Geotechnics*,2015,68:28-37.
- [11] 郑刚,程雪松,周海祚,等. 岩土与地下工程结构韧性评价与控制[J]. *土木工程学报*,2022,55(7):1-38. (Zheng Gang, Cheng Xuesong, Zhou Haizuo, et al. Resilient evaluation and control in geotechnical and underground engineering[J]. *China Civil Engineering Journal*,2022,55(7):1-38. (in Chinese))
- [12] Jamsawang P, Yoobanpot N, Thanasisathit N, et al. Three-dimensional numerical analysis of a DCM column-supported highway embankment[J]. *Computers and Geotechnics*,2016,72:42-56.
- [13] Xia Boyang, Zheng Gang, Zhou Haizuo, et al. Stability analysis and optimization of concrete column-supported embankments in soft soil[J]. *Acta Geotechnica*,2024,19(5):2515-2531.
- [14] Dennemann K L. Life-cycle cost-benefit (LCC-B) analysis for bridge seismic retrofits[D]. Houston:Rice University,2010.
- [15] Shadabfar M, Mahsuli M, Zhang Y, et al. Resilience-based design of infrastructure: review of models, methodologies, and computational tools[J]. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*,2022,8(1):03121004.
- [16] 郑刚,郭知一,杨新煜,等. 桩体刚度对复合地基支承路堤失稳破坏模式的影响研究[J]. *岩土工程学报*,2019,41(增刊1):49-52. (Zheng Gang, Guo Zhiyi, Yang Xinyu, et al. Influences of stiffness of piles on failure modes of embankment of composite foundation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*,2019,41(Sup1):49-52. (in Chinese))
- [17] 郑刚,杨新煜,周海祚,等. 基于渐进破坏的路堤下刚性桩复合地基的稳定性分析及控制[J]. *岩土工程学报*,2017,39(4):581-591. (Zheng Gang, Yang Xinyu, Zhou Haizuo, et al. Stability and control strategy of ground improved with rigid piles to support embankments based on progressive failure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*,2017,39(4):581-591 (in Chinese))
- [18] Liu K W, Rowe R K. Numerical study of the effects of geosynthetic reinforcement viscosity on behaviour of embankments supported by deep-mixing-method columns[J]. *Geotextiles and Geomembranes*,2015,43(6):567-578.
- [19] 韦芳芳,包淑珉,邵盛,等. 砂土中螺旋桩在斜拉荷载作用下的承载性能[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2024,52(2):77-83. (Wei Fangfang, Bao Shumin, Shao Sheng, et al. Bearing performance of helical piles in sand under oblique tensile load [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,2024,52(2):77-83. (in Chinese))
- [20] 姚云龙,刘鑫,邵志伟,等. 桩土复合路基浅层垫层内摩擦角测试研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2025,53(4):108-115. (Yao Yunlong, Liu Xin, Shao Zhiwei, et al. Test on internal friction angle of shallow cushion layers in pile-soil composite subgrade [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,2025,53(4):108-115. (in Chinese))
- [21] 黄俊杰. 路堤下素混凝土桩复合地基变形失稳机理与注浆加固试验研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.
- [22] Liu Hanlong, Ng C W W, Fei Kang. Performance of a geogrid-reinforced and pile-supported highway embankment over soft clay: case study[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*,2007,133(12):1483-1493.
- [23] Montazeri M, Amiri G G, Namiranian P. Seismic fragility and cost-benefit analysis of a conventional bridge with retrofit implements[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*,2021,141:106456.
- [24] 池寅,黄乐,余敏. 基于 ABAQUS 的钢-聚丙烯混杂纤维混凝土损伤塑性本构模型取值方法研究[J]. *工程力学*,2017,34(12):131-142. (Chi Yin, Huang Le, Yu Min. Calibration method of damage plasticity model for steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete based on abaqus [J]. *Engineering Mechanics*,2017,34(12):131-142. (in Chinese))
- [25] Zheng Gang, Zhang Xiaokai, Zhang Tianqi, et al. Numerical study on mechanical behavior and ultimate bearing capacity of shield segment joints under different load conditions[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*,2023,139:105204.
- [26] Villalobos F A. Model testing of foundations for offshore wind turbines[D]. Oxford:University of Oxford,2006.
- [27] Padgett J E, Dennemann K, Ghosh J. Risk-based seismic life-cycle cost-benefit (LCC-B) analysis for bridge retrofit assessment [J]. *Structural Safety*,2010,32(3):165-173.

(收稿日期:2025-07-29 编辑:熊水斌)