

生态堤堆载对既有高速桥梁的影响及保护加固方案优化研究

黄宇容¹, 陈俊昂¹, 谭鑫²

(1. 广东省水利电力勘测设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510635; 2. 湖南大学, 湖南 长沙 410012)

摘要: 以南沙全民文化体育综合体生态堤建设工程(21涌以南)为例, 探讨深厚软土地区生态堤堆载对既有高速桥梁安全的影响, 运用三维有限差分法对桥梁保护加固方案进行了优化研究。研究表明, 扩大桥梁保护加固区域的宽度和深度均能有效减少桥梁桩基的附加弯矩, 其中增加深度的效果更为显著。最终确定采用单桩搅拌桩与三轴搅拌桩联合处理的方案, 通过数值模拟变形值与实际监测值进行对比, 验证了数值模型的可靠性, 桥墩最大水平位移小于规范允许值, 生态堤堆载引起的桥梁结构影响是可控的。可为类似工程设计提供参考和指导。

关键词: 生态堤堆载; 既有桥梁; 深厚软土; 加固方案

中图分类号: TV871

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)05-0084-05

Research on Impact of Ecological Embankment Loading on Existing Expressway Bridges and Optimization of Protection and Reinforcement Schemes

HUANG Yurong¹, CHEN Jun'ang¹, TAN Xin²

(1. Guangdong Hydropower Planning and Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510635, China; 2. Hunan University, Changsha 410012, China)

Abstract: Taking the ecological embankment construction project of the Nansha Comprehensive Cultural and Sports Complex (south of the 21st tidal creek) as an example, the impact of ecological embankment loading on the safety of existing expressway bridges in deep soft soil areas is discussed. The three-dimensional finite difference method is used to optimize and study the bridge protection and reinforcement scheme. Research findings demonstrate that expanding both the width and depth of the bridge protection reinforcement zone can effectively reduce the additional bending moment of bridge pile foundations, in which the effect of increasing the depth is more significant. Finally, it is determined to adopt a combined treatment scheme of single-pile mixing piles and triple-axis mixing piles. Through comparison of numerical simulation deformation values with actual monitoring data, the reliability of the numerical model is verified. The maximum horizontal displacement of bridge piers is less than the allowable value specified in relevant standards, and the impact of ecological embankment loading on bridge structures is controllable, which provides reference and guidance for the design of similar projects.

Keywords: ecological embankment loading; existing bridges; deep soft soil; reinforcement scheme

0 引言

为加快落实《广州南沙深化面向世界的粤港澳全面合作总体方案》^[1], 广州市拟在万顷沙南部片区建设集文化、体育、旅游、国防教育等功能为一体的全民文化体育综合体。南沙全民文化体育综合体生态堤建设工程是南沙全民文化体育综合体(现名为

大湾区体育中心)的配套设施工程之一。软土在工程区广泛分布, 受用地规划、工期等限制, 在既有高速公路桥梁桩基周边进行工程建设不可避免。由于软土层具有含水量高、透水性差、压缩性高、灵敏性高、抗剪强度低、承载力低等特点, 工程建设将会对临近桩基桥墩产生不利影响, 为此, 很多学者做了许多研究工作, 填土堆载对桥梁结构的影响主要表现为^[2-12]: (1)堆载引起桩周地基土的沉降, 在桩身产生负摩阻力, 导致桩基发生附加沉降; (2)桥墩或桩基的侧向位移增加, 影响上部结构; (3)堆载引起地基

收稿日期: 2025-11-18

作者简介: 黄宇容(1986—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事水利工程设计研究工作。

土侧向变形,使桩身扰曲产生附加弯矩甚至断裂。为确保既有桥梁结构安全,在桥梁周边进行工程建设时需采用相应的加固措施,本文以南沙全民文化体育综合体生态堤建设工程(21涌以南)为依托,基于地勘资料、既有高速桥梁设计资料及市政道路设计资料,采用三维有限差分法对桥梁保护加固方案进行优化研究,并根据分析结果对桥梁保护设计提出合理建议。

1 工程概况

1.1 工程背景

21涌以南生态堤在桩号K2+784~K2+828处下穿南中高速万顷沙支线(简称万顷沙支线,下同)桥梁,其中19#、20#桥墩位于生态堤红线范围内,18#桥墩距离生态堤较近,图1为生态堤与桥梁的位置关系图。该桥梁在生态堤建设开工前已完成桩基、桥墩和桥面板等主体结构的施工。高速桥下为万环西路南延线,其轴线与南中高速重合,道路区域已采用预应力管桩复合地基进行地基处理。图2为万顷沙支线桥梁两侧堤防断面及工程地质剖面。根据上述条件可知:

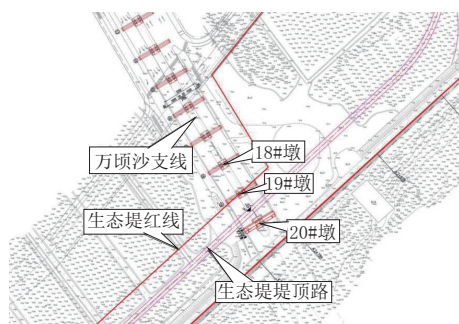


图1 生态堤与南中高速的位置关系图

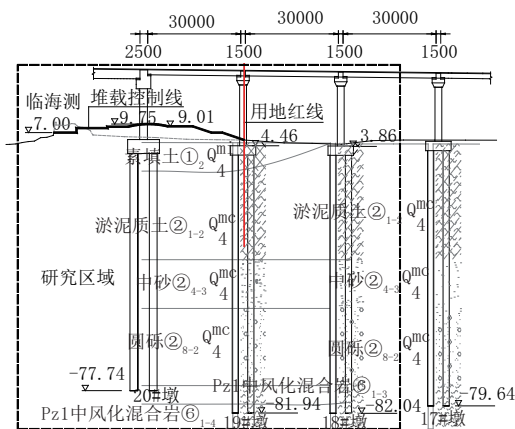


图2 万顷沙支线桥梁两侧堤防断面及工程地质剖面(单位:mm)

(1)场区浅层分布的流塑~软塑状海相淤泥软土厚38~40 m,在生态堤填筑过程中施加的附加荷载

作用下,深厚的软土层将产生较大的沉降和水平位移。

(2)桥梁桩基采用嵌岩桩设计,基底部嵌入中风化混合岩层。从负摩阻力的角度考虑,附加荷载对桩基的主要影响在于基桩轴向力的增加,而对桩基沉降的影响相对较小。

(3)由附加荷载所导致的桩基的水平位移(沿桥轴方向和垂直于桥轴方向)是确保工程安全性的关键控制参数。

1.2 桥梁保护加固方案

基于上述特征,加固措施的主要目标在于减轻桥梁周边区域的沉降及附加荷载对桩基水平位移的影响。根据前人的研究成果,桥梁桩基保护加固的思路为控制土体水平变形的传达路径,陈欢^[13]研究表明在桩基和堆载区域之间采用咬合的灌注桩进行软基加固的效果最好。王周庆^[14]研究得出通过水泥搅拌桩对桥头软土路基进行加固可显著降低桩基侧向变形。受工期及造价限制,本工程选取施工方便、造价较低的水泥搅拌桩复合地基对邻近桩基进行保护加固,并在处理宽度和深度两个方面进行优化,拟定了以下四个方案。

方案一:加固区为桥梁投影两侧约25 m范围,采用20 m长直径 $\phi 500$ mm的水泥搅拌桩进行地基处理,在保护区靠近桥梁侧、堤脚侧及背水侧采用格栅式布置,其余区域布置散体搅拌桩,见图3。

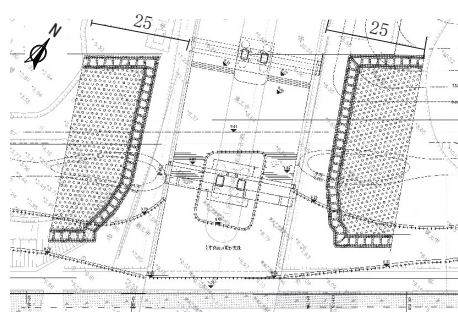


图3 方案一平面布置图(单位:m)

方案二:在方案一的基础上两侧各增加25 m宽20 m长直径 $\phi 500$ mm的水泥搅拌桩,将保护范围拓宽至50 m。在保护区靠近桥梁侧、堤脚侧及背水侧采用格栅式布置,格栅宽度3.2 m,其余区域布置散体搅拌桩,见图4。

方案三:在方案一的基础上东、西侧各增加约5 m宽的三轴搅拌桩,直径 $\phi 850@600$ mm,格栅式布置,三轴搅拌桩穿透软土层至砂层,东、西两侧长度分别为44 m和42 m,桥梁保护区为桥梁投影两侧约30 m

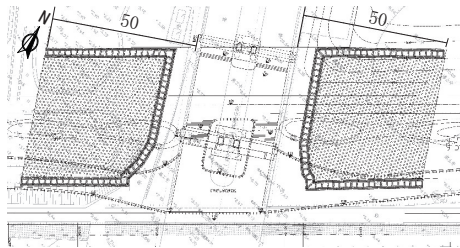


图4 方案二平面布置图(单位:m)

的范围,见图5。

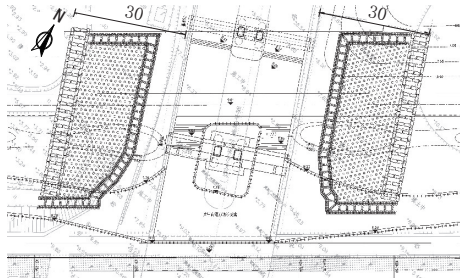


图5 方案三平面布置图(单位:m)

方案四:加固范围及布置型式同方案一,采用直径 $\phi 850@600$ mm的三轴搅拌桩进行地基处理,桩体穿透软土层入砂层,东、西两侧长度分别为44 m和42 m,见图6。

各加固方案下桥梁桩基的附加弯矩(即堆载后弯矩绝对值减去堆载前的初始弯矩)的计算结果见表1。桥梁保护加固区域堤基软基处理宽度与深度对桩基附加弯矩的影响程度统计见表2。桥梁保护

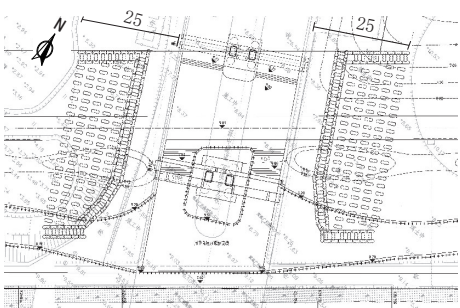


图6 方案四平面布置图(单位:m)

加固方案的比较与选择结果见表3。

由表3可知,桥梁保护加固区域堤基软基处理深度均为20 m时,桥梁两侧软基处理宽度由25 m增加至50 m,各桩基附加附加减少1%~30%,桥梁加固区域堤基软基处理宽度均为25 m时,堤基软基处理深度由20 m增加至42~44 m,各桩基附加弯矩减少19%~40%。由此可见,适当增加桥梁保护加固区域的堤基软基处理的宽度与深度,均能有效降低桥梁桩基附加弯矩,且深度增加对桩基附加弯矩的削减效果更为明显。

由表1和表3可知,方案一19#桥墩桩基顺桥向的附加弯矩超过桥梁设计单位提供的附加弯矩限值,该方案不可行,其余各方案的桩基附加弯矩均小于附加弯矩限值,经综合比选,推荐采用处理效果较好,造价适中的方案三,即采用采用单桩搅拌桩与三轴搅拌桩联合处理的方案。

表1 桥梁桩基附加弯矩计算结果

桥墩 编号	方向	附加弯矩限值 $M/(kN\cdot m)$	方案一		方案二		方案三		方案四	
			$M_{附}/(kN\cdot m)$	$M_{附}/M$	$M_{附}/(kN\cdot m)$	$M_{附}/M$	$M_{附}/(kN\cdot m)$	$M_{附}/M$	$M_{附}/(kN\cdot m)$	$M_{附}/M$
20#	横桥向Y	4 800	3 837	79.9%	3 270	68.1%	2 866	59.7%	2 378	49.5%
	顺桥向Z	3 000	1 467	48.9%	1 034	34.5%	1 051	35.0%	977	32.6%
19#	横桥向Y	3 000	1 948	64.9%	1 720	57.3%	1 381	46.0%	1 162	38.7%
	顺桥向Z	2 400	2 436	101.5%	2 150	89.6%	1 696	70.7%	1 473	61.4%
18#	横桥向Y	3 000	463	15.4%	455	15.2%	323	10.8%	337	11.2%
	顺桥向Z	2 400	1 507	62.8%	1 489	62.0%	1 132	47.2%	1 216	50.7%

注:附加弯矩限值由桥梁设计单位提供。

表2 桥梁保护加固区域堤基软基处理宽度与深度对桩基附加弯矩的影响程度统计表

桥墩 编号	方向	方案一(桥梁两侧加固宽度 25 m,深度20 m)	方案二(桥梁两侧加固 宽度50 m,深度20 m)	方案四(桥梁两侧加固宽度 25 m,平均深度43 m)	附加弯矩减少百分比 (与方案一对比)	
		$M_{附}/(kN\cdot m)$	$M_{附}/(kN\cdot m)$	$M_{附}/(kN\cdot m)$	宽度增加25 m	深度增加23 m
20#	横桥向Y	3 837	3 270	2 378	15%	38%
	顺桥向Z	1 467	1 034	977	30%	33%
19#	横桥向Y	1 948	1 720	1 162	12%	40%
	顺桥向Z	2 436	2 150	1 473	12%	40%
18#	横桥向Y	463	455	337	2%	27%
	顺桥向Z	1 507	1 489	1 216	1%	19%

表 3 桥梁保护加固方案对比表

项目方案	方案一	方案二	方案三	方案四
工程造价	投资 455 万元,造价低	投资 817 万元,造价高	投资 931 万元,造价高	投资 1 176 万元,造价最高
对周边建筑的影响	施工过程中产生的振动、噪声小,无污染,不会使地基侧向挤出,对周围原有建筑的影响很小			
施工工效及质量控制	机械及附属设施需要工作场地小,施工简单方便,速度较快,根据以往施工经验,效果较为理想,施工工艺成熟,但需加强施工现场质量控制	同方案一	需采用两种搅拌桩施工工艺,兼具两种搅拌桩的优缺点	搅拌效率更高、施工效率更高、施工质量更好,机械及附属设施需要工作场地大
工期	较短	较长	较短	最短
运用比较	可减少两侧堆载引起的土体侧向变形,桥墩桩基附加弯矩值为 455 ~ 3 837 kN·m,19#桥墩桩基桥桥向的附加弯矩超过附加弯矩限值, $M_{附}/M$ 的值为 15.4% ~ 101.5%	可减少两侧堆载引起的土体侧向变形,桥墩桩基附加弯矩值为 455 ~ 3 270 kN·m,小于附加弯矩限值, $M_{附}/M$ 的值为 15.2% ~ 89.6%	减少两侧堆载引起的土体侧向变形效果好,桥墩桩基附加弯矩值为 268 ~ 28 66 kN·m,小于附加弯矩限值, $M_{附}/M$ 的值为 10.8% ~ 70.7%	减少两侧堆载引起的土体侧向变形效果最好,桥墩桩基附加弯矩值为 337 ~ 2 378 kN·m,小于附加弯矩限值, $M_{附}/M$ 的值为 11.2% ~ 61.4%
结论	不可行	比较方案	推荐方案	比较方案

2 模型的建立及安全影响分析

2.1 模型的建立

鉴于现有桥梁结构、边界条件以及空间布局的复杂性,无法完全依据现行技术规范进行工程影响评估。因此,在桥梁保护区区基处理方案优化过程

中,运用 FLAC 3D 软件进行数值模拟计算,评估生态堤堆载对现有桥梁结构的影响。

基于地质勘查报告并结合相关工程实践,确定了模型中各岩土层的参数值(见表 4)。建立三维有限差分数值计算模型(见图 7)。

表 4 土层物理力学参数

土层	天然重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 E/MPa		泊松比 μ	黏聚力 c/kPa		摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	
		均值	变异区间		均值	变异区间	均值	变异区间
素填土	18.5	10	—	0.35	15	—	20	—
淤泥质土	17.5	(0.8+0.15) h	$\pm 50\%$ 均值	0.4	(10+0.4) h	$\pm 20\%$ 均值	7+0.1 h	$\pm 30\%$ 均值
中砂、圆砾	20.5	20	—	0.3	0	—	35	—
风化岩石	20.5	200	—	0.2	200	—	40	—
生态路堤填土	20.0	20	—	0.3	20	—	18	—

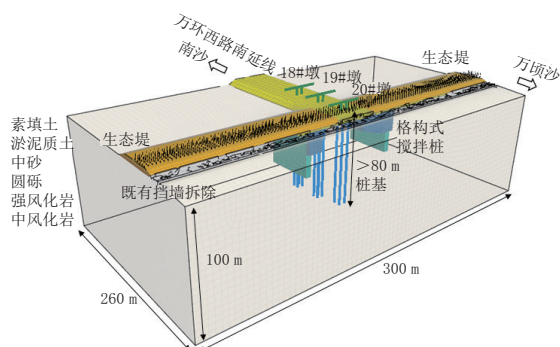


图 7 三维有限差分数值模型(推荐方案)

数值模拟计算含 6 个工况。

工况一:初始应力计算;工况二:生态堤堆载堆载;工况三:堤防补土;工况四:现状挡墙拆除重建降低部分堤坝高程;工况五堤顶路南侧增加 0.75 m 堆载;工况六:施加堤顶路荷载(道路荷载 10 kPa)。

2.2 桥梁结构变形及内力分析

针对推荐的桥梁保护加固方案,对桥梁结构的

变形及内力进行分析。图 8 所示为生态堤堆载后桥梁结构的变形及弯矩等值线图。由图 8 可知,在埋深 20~25 m 范围内,桩基产生了朝向承台中心的水平位移,桥墩桩基的最大水平挠度约为 10 mm。主要附加内力集中在桩基中,其中,18#桥墩距堆载区域较远,产生的内力较小。19#和 20#桥墩承台下方的桩基弯矩分布模式与其水平变形模式一致,最大弯矩均出现在承台下方 20~25 m 处,较大的弯矩(即反弯)则出现在淤泥层底部。

3 数值模拟预测与实际对比

桥梁保护区施工工期为 5 个月,图 9 为桥梁保护区三轴搅拌桩验收现场图,施工过程中桥墩支座处共计安装 12 个位移监测点,桥墩上共计埋设 6 个竖向位移监测点,图 10 和图 11 所示分别为桥墩横桥向和顺桥向水平位移监测曲线图。

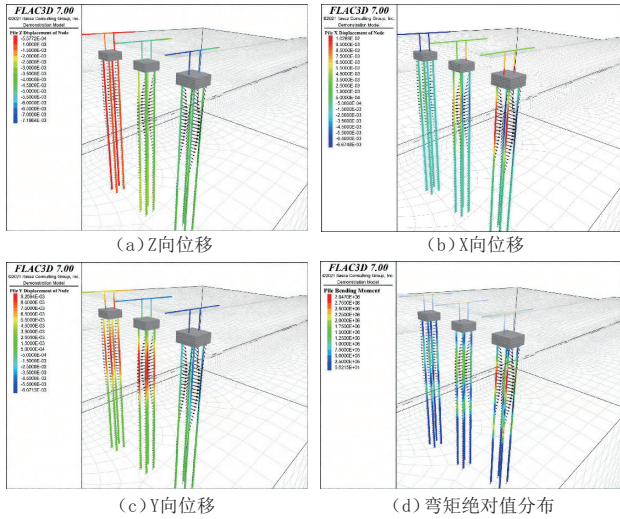


图8 填堆载后桥梁结构结构变形及弯矩等值线图



图9 三轴搅拌桩验收现场图

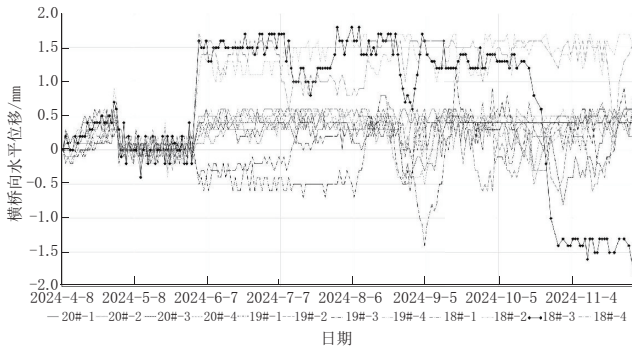


图10 横桥向水平位移累计变形曲线图

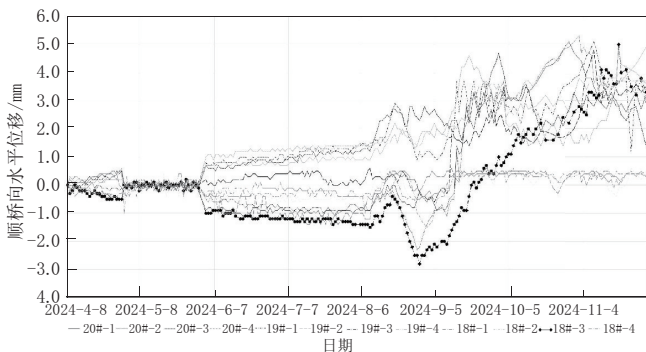


图11 顺桥向水平位移累计变形曲线图

提取第2节中选定方案工况六的数值模拟变形值与实际监测值进行对比,见表5。数值模拟预测和监测值对比可知,桥墩承台位移和沉降数值及整体

趋势一致。验证了数值模型的可靠性。

表5 桥墩承台数值模拟变形值与实际监测值对比表

桥墩 编号	桥墩承台位移/mm							
	横桥向		顺桥向		综合		竖向	
	计算	实测	计算	实测	计算	实测	计算	实测
20#	0.5	0.8	5.1	4.3	5.1	4.4	7	3.9
19#	0.6	1.0	4.9	4.0	4.9	4.1	5	3.2
18#	1.3	1.7	0.5	0.5	1.4	1.8	2	2.0

根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008),桩顶(承台)水平位移允许值,当以位移控制时,可取10 mm^[9],另根据《公路桥涵地基与基础设计规范》,按规范建议值确定非岩石地基水平向抗力系数m取值时,基础在地面处(即桩顶)位移最大值不应超过6 mm^[10]。本着从严控制的原则,可以考虑桩基水平位移6 mm为控制标准。由表5可知,桥墩水平位移最大的为20#桥墩,最大变形计算值为5.1 mm,实测值为4.4 mm,略小于计算值,满足规范要求。

4 结 论

本文以生态堤(21涌以南)在万顷沙支线高速公路桥附近进行堆载为工程案例,充分考虑实际地层空间分布特征,采用三维有限差分法进行数值模拟,研究深厚软土地基上进行堆载对桥梁结构的影响,得出以下结论:

(1)在进行桥梁保护加固过程中,若加固体未能穿透软土层,则其隔离效果受到限制。因此,建议优先考虑采用穿透软土层的竖向阻隔结构,以阻断侧向变形的传递路径。

(2)在采取了科学合理的加固措施后,桥墩桩基的附加弯矩低于设计限值,通过数值模拟变形值与实际监测值进行对比,验证了数值模型的可靠性,桥墩最大水平位移均小于规范允许值,生态堤堆载引起的桥梁结构影响处于安全可控范围。

参考文献:

- [1] 国务院. 国务院关于印发广州南沙深化面向世界的粤港澳全面合作总体方案的通知[N/OL]. 2022-06-14[2025-11-26]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-06/14/content_5695623.htm
- [2] 代恒军,梁志荣,赵军,等. 地面堆载作用下邻近桩基变形的三维数值分析[J]. 岩土工程学报, 2010(增刊2): 220-223.
- [3] 冯昌明,木林隆,孙志伟,等. 基于两阶段法的堆载对公路桥梁桩基础影响分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊2): 528-534.
- [4] 陈雪莹,周卫滨,朱中发,等. 不平衡堆载对桥梁桩基影响试验研究[J]. 公路工程, 2015, 40(6): 36-39; 70.
- [5] 韩东亚,曹平,林杭,等. 堆载和桩顶荷载组合作用下的桩土响应分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(1): 177-183.

(下转第121页)