

DOI:10.11918/202108020

整体式桥台-RC桩-土体系受力性能

黄福云^{1,2}, 李 岚^{1,2}, 何凌峰^{1,2}, 胡晨曦^{1,2}

(1.福州大学 土木工程学院,福州 350108;2.福建省土木工程多灾害防治重点实验室(福州大学),福州 350108)

摘要:为了探究整体式桥台-RC桩-土体系的力学性能,以国内某整体桥为背景,设计并制作了4个不同桩基配筋率和截面形状的整体式桥台-RC桩模型,并开展整体式桥台-RC桩-土相互作用低周往复荷载拟静力试验研究,主要研究RC桩配筋率与截面形状对桥台-RC桩-土体系受力性能的影响,并分析台后土抗力、桩侧土抗力、桩身应变与桩身弯矩的分布规律等。结果表明:在桥台往复位移作用下,距离台背较远处土抗力沿高度方向的分布规律会由“三角形”分布向“抛物线形”分布转变;距离台背较远处的基本呈“三角形”分布;台后土抗力会受到RC桩配筋率和截面形状的影响,提高RC桩的配筋率或采用矩形截面可增大整体式桥台-RC桩-土体系的整体性;桩身累积变形会影响桩侧土抗力的分布规律,使桩后侧土抗力减小、桩前侧土抗力增大;采用配筋率更大或矩形截面RC桩的试件更不易受累积变形的影响,桥台-桩基-土体系整体性更好;整体式桥台-RC桩在向河跨侧挤压前侧土体运动时,桩身应变和弯矩的分布规律与传统桩基一致;向岸坡侧挤压后侧土体运动时,桩身最大应变和弯矩出现在台底与桩顶连接处。提高RC桩配筋率或采用矩形截面RC桩可有效减小桩身应变和弯矩,改善RC桩基的受力性能。

关键词:整体桥;拟静力试验;桥台-桩基-土相互作用;RC桩;配筋率;截面形状;受力性能

中图分类号: U443.15+7

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2023)03-0128-11

Mechanical behavior of abutment-RC pile-soil structure in integral abutment bridges

HUANG Fuyun^{1,2}, LI Lan^{1,2}, HE Lingfeng^{1,2}, HU Chenxi^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory on Multi-disasters Prevention and Mitigation in Civil Engineering (Fuzhou University), Fuzhou 350108, China)

Abstract: To explore the mechanical properties of integral abutment-RC pile-soil structure, we designed and prefabricated four integral abutment-RC pile models with different pile foundation reinforcement ratios and cross-section shapes taking an integral abutment bridge in China as background. The quasi-static test of integral abutment-RC pile-soil interaction under low cyclic loading was carried out. The effects of reinforcement ratio and cross-section shape of RC pile on the mechanical properties of abutment-RC pile-soil system were mainly studied, and the soil resistance behind abutment, the soil resistance beside pile, and the distribution of pile strain and bending moment were analyzed. Results show that under the action of cyclic displacement of abutment, the distribution of soil resistance near the abutment back along the height direction changed from “triangular” distribution to “parabolic” distribution, and that away from the back of the abutment was basically in “triangular” distribution. The resistance of soil behind abutment was affected by the reinforcement ratio and section shape of RC pile, so it is necessary to increase the reinforcement ratio of RC pile or use rectangular section to improve the integrity of integral abutment-RC pile-soil system. The cumulative deformation of pile affected the distribution of soil resistance on the sides of pile, which reduced the soil resistance behind pile and increased the soil resistance in front of pile. The specimens with larger reinforcement ratio or rectangular cross-sectional RC piles were less affected by the cumulative deformation, and the integrity of abutment-pile foundation-soil structure was better. When the integral abutment-RC pile structure moved to the river span side, the distribution of pile strain and bending moment was consistent with that of traditional pile foundation. When moving to the riverbank, the maximum strain and bending moment of pile appeared at the joint between the bottom of abutment and the top of pile. Increasing the reinforcement ratio of RC pile or adopting rectangular cross-sectional RC pile can effectively reduce the strain and bending moment of pile body and improve the mechanical performance of RC pile foundation.

Keywords: integral abutment bridge; quasi-static test; abutment-pile-soil interaction; RC pile; reinforcement ratio; cross-section shape; mechanical behavior

收稿日期:2021-08-04;录用日期:2021-11-20;修订日期:2022-07-20;网络首发日期:2022-09-01

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20220901.1036.002.html>

基金项目:国家自然科学基金(51578161);天津大学-福州大学自主创新基金合作项目(TF2022-8);福建省住建行业建设科技研究开发资助(2022-K-6)

作者简介:黄福云(1979—),男,研究员,博士生导师

通信作者:黄福云, Huangfuyun@fzu.edu.cn

整体式桥台无缝桥(简称整体桥)取消了伸缩缝并将主梁与下部结构固结,从而大幅度提高了行车的舒适性和平顺性,并大大减小了后期养护维修费用^[1]。因此,整体桥在中国已得到一定的应用^[2]。不过,整体桥需要采用变形能力更好的桩基以吸收主梁在环境温度以及地震作用下产生的水平往复变形。国外整体桥多采用H型钢桩来适应水平往复变形作用;而中国多采用混凝土桩(RC桩)^[3-5],最新颁布的中国首部无缝桥行业标准《公路无伸缩缝桥梁技术规程》(T/CECS G: D60-01—2020)^[6]也指出整体桥应采用柔性与变形能力较好的混凝土桩基。因此,开展水平往复变形作用下整体桥混凝土桩基-土体系受力性能的研究较为重要。

目前,国内外开展了较多柔性混凝土桩的受力性能研究^[7-9]。文献[10-11]通过数值模拟研究了RC桩的力学性能,结果表明设计合理的RC桩具有较好的受力性能。文献[12-14]以混凝土桩的埋置深度、配筋率、截面形状和预应力度等为研究参数,开展了系列混凝土柔性桩的拟静力试验研究。试验结果表明,增大桩基埋深、提高预应力度可有效改善混凝土桩的受力性能;且合理配筋或采用矩形截面的RC桩受力性能更好,可更好的满足整体桥桩基的要求。

上述主要是对单桩-土相互作用开展研究,而考虑桥台-土相互作用对台底RC桩受力性能的影响还研究较少,仅开展了少量考虑桥台-土相互作用对台底H型钢桩基受力性能的研究。研究表明,整体桥桩基的变形及内力与传统的桩基有较大不同,桥台对台后土的扰动以及台后覆土压力作用对台底桩基受力性能的影响较大^[15-18]。文献[19]首次对整体式桥台-RC桩-土体系开展了拟静力试验研究,研究表明,在水平往复位移作用下,混凝土桩会出现明显的累积变形现象,并且配筋率和截面形状会显著影响RC桩的变形性能。不过,文献[19]并未对整

体式桥台-RC桩-土体系的台后土抗力、桩侧土压力以及桩身内力等进行研究。为此,本文在文献[19]试验结果的基础上,进一步分析整体式桥台-RC桩-土体系的受力性能,并分析RC桩配筋率与截面形状对其受力性能的影响,为整体桥在中国的推广应用提供理论依据和技术支撑。

1 模型试验

1.1 模型设计与制作

本文研究的整体式桥台-桩基-土体系以国内某整体桥为背景。该桥下部结构桩基础形式为单排4根矩形截面RC桩,本文取其中1/4桥台及下方单桩进行分析。本试验采用0.31的模型相似比,设计制作了4个整体式桥台-RC桩模型,主要研究RC桩截面配筋率与截面形状对整体式桥台-桩基-土体系受力性能的影响。模型编号分别为AP-C-0.8、AP-C-1.6、AP-C-3.2和AP-R-1.6,分别简称为AP-1、AP-2、AP-3和AP-4。

本试验中,桥台尺寸均为560 mm×660 mm×1 000 mm,下方由RC桩支撑,RC桩总长度为3.21 m,入土长度为2.9 m。试件尺寸及涉及参数如表1所示,其中,AP-2为标准试件,其截面形式为圆形,直径 D 为155 mm,配筋率为1.6%。AP-1与AP-3试件为截面配筋率参数对照试件,其截面配筋率为0.8%与3.2%;AP-4试件为的RC桩采用矩形截面,截面尺寸为217 mm×155 mm,配筋率为1.6%。

桥台和混凝土桩均采用C40混凝土浇筑,实测混凝土28 d立方体试块抗压强度为47.6 MPa。桥台纵筋采用为 $\Phi 12$ 与 $\Phi 8$ 的HRB335钢筋,间距为80 mm;箍筋采用 $\Phi 6$ HRB300光圆钢筋,间距为100 mm;桥台保护层厚度为40 mm。桩基采用 $\Phi 6$ 的HRB300钢筋,间距为120 mm,并在桩顶与桩底位置加密布置,间距为100 mm。文献[19]详细阐述了本模型的设计制作,本文仅予以简单的介绍。

表1 试件尺寸及设计参数

Tab.1 Design parameters of specimens

试件编号	桥台			RC桩					
	纵向长度/m	横向宽度/m	高度 h /m	桩长 L /m	入土深度 L_t /m	截面形状	截面尺寸规格	纵筋(6 Φd)	配筋率 ρ /%
AP-C-0.8	0.56	0.66	1.0	3.21	2.9	圆形	$D = 155$ mm	6 $\Phi 6$	0.8
AP-C-1.6	0.56	0.66	1.0	3.21	2.9	圆形	$D = 155$ mm	6 $\Phi 8$	1.6
AP-C-3.2	0.56	0.66	1.0	3.21	2.9	圆形	$D = 155$ mm	6 $\Phi 12$	3.2
AP-R-1.6	0.56	0.66	1.0	3.21	2.9	矩形	长=217 mm, 宽=155 mm	6 $\Phi 10, 2\Phi 8$	1.6

1.2 试验土箱与砂土

本实验所用土箱如图1(a)所示。土箱尺寸为:

长×宽×高=3 m×2 m×4 m,RC桩安装在距土箱前侧内壁0.75 m位置处,底部采用角钢固定。为减小土

箱内壁产生的边界效应,本试验中土箱内壁与 RC 桩的净距均大于 5 倍桩径(截面宽度),同时土箱后侧内壁与桥台后侧间的净距大于两倍桥台高度(2*h*)。

试验砂土采用闽江河砂,根据《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)^[20]测得摩擦角为 35°,压缩模量为 28.9 MPa。此外,砂土的相对密度为 53%,属稍密砂。



(a) 试验土箱

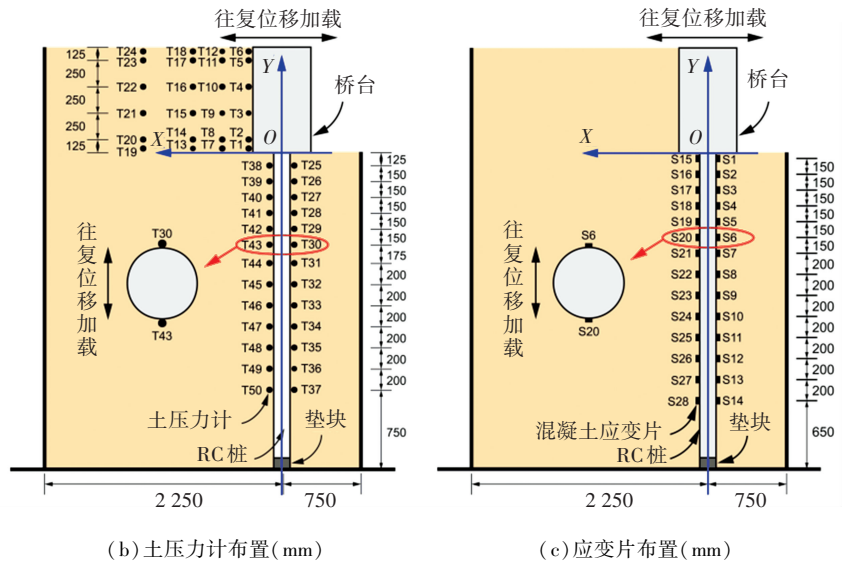


图 1 试验土箱及传感器布置

Fig.1 Soil container and arrangement of sensors

1.3 测点布置

本文主要对分析桩侧土抗力和桩身应变进行分析,台后、桩侧的土压力计与桩身应变片布置如图 1(b)与图 1(c)所示。为便于说明,本文以 MTS 作动器往复位移加载方向作为 X 轴,试件埋深方向为 Y 轴,台-桩交接处为坐标原点 O。同时,定义沿台后侧(岸坡侧)挤压台后土运动为正向,沿台前侧(河跨侧)背离台后土运动为负向;定义桥台高度方向为正向,桩基埋深方向为负向^[21]。

为了测得在加载过程中桩侧土抗力和台后土抗力的分布情况,本试验在台后和 RC 桩身两侧共布置了 50 个土压力计,如图 1(b)所示。其中,在台后布置了 24 个土压力计,编号为 T1~T24。台后土压力计的布置方式为在距离台背中轴线 0 m、0.25 m、0.5 m 和 1.0 m 处各布置 1 列土压力计,每列在距离桥台底部 0 m、0.125 m、0.375 m、0.625 m、0.875 m 和 1.0 m 处各布置一个土压力计。

在桩身受力方向两侧共对称布置 26 个土压力计,编号为 T25~T50。RC 桩土压力计的布置方式为埋深在 -0.125 ~ -0.875 m 之间,桩身两侧每 0.15 m 各布置一个土压力计,编号分别为 T25~T30 和 T38~T43;埋深在 -1.05 ~ -2.25 m 之间,桩身两侧每 0.2 m 各布置一个土压力计,编号分别为 T31~T37 和 T44~T50。

为了在试验过程中测得 RC 桩身应变变化情况,在桩身前侧和后侧对称布置各 14 个应变片,编

号为 S1~S28,如图 1(c)所示。应变片直接布置在模型桩的表面,布置方式为埋深在 -0.05 ~ -0.95 m 之间,桩身两侧每 0.15 m 各设置一个应变片,编号分别为 S1~S7 和 S15~S21;埋深在 -1.15 m ~ -2.35 m 之间,桩身两侧每 0.2 m 设置一个应变片,编号分别为 S8~S14 和 S22~S28。

1.4 试验加载制度

本试验采用 MTS 电液伺服加载系统进行加载,在桥台施加往复水平位移,采用位移控制加载,加载制度如图 2 所示。当加载位移小于 20 mm,每级加载的位移增量为 2 mm;超过 20 mm 后,每级加载的位移增量为 5 mm。当 MTS 作动器实际反力降至最大反力的 85%时,停止试验加载^[22]。

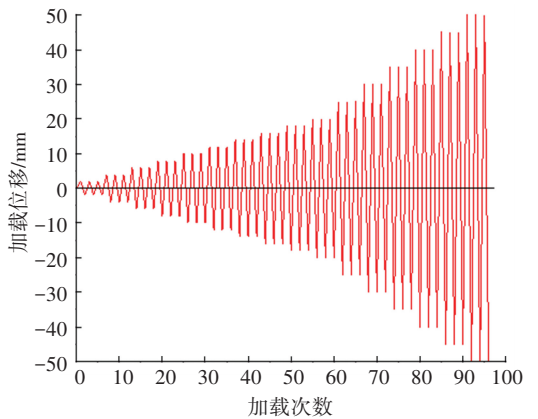


图 2 试验加载制度

Fig.2 Test loading scheme

2 试验结果及分析

2.1 台后土抗力分布规律

2.1.1 台后土抗力沿桥台高度方向分布规律

图3给出了距离台背0h、0.25h、0.5h和h处的

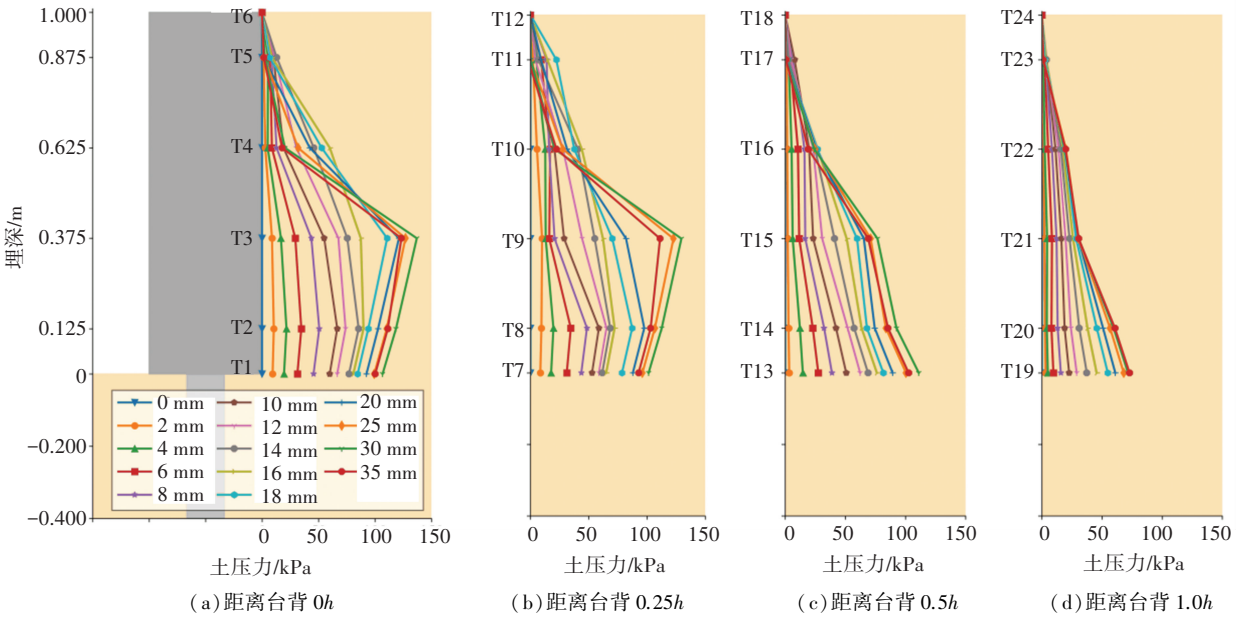


图3 AP-2 试件台后土抗力沿桥台高度方向分布规律

Fig.3 Distribution of soil resistance behind abutment of AP-2 along abutment height

由图3(a)~3(d)可知,距离台背不同位置处的土抗力沿高度方向的分布规律存在一定的差异。如当距离台背较近(如图3(a)和图3(b)的0h和0.25h处)时,其分布规律呈“抛物线形”分布,以填土高度为0.375 m处最大;而当距离台背较远时(图3(c)和图3(d)),则基本呈“三角形分布”,以台底为最大。

由图3还可知,当加载位移较小时,土抗力均呈“三角形”分布,即土抗力沿填土深度方向逐渐增大,这与传统挡土墙的土抗力分布规律基本一致。不过,随着加载位移的增大^[16],在往复位移作用下,台顶区域范围内的填土将逐渐脱空,使得填土高度为0.875 m和0.625 m处的土抗力有所减小。另外,台底(桩顶)区域范围内的填土也会逐渐脱空,使得台底的土抗力的增加相对趋缓,距离台背较近位置处的土压力分布逐渐由“三角形”分布转为“抛物线形”分布,如图3(a)和3(b)所示。

2.1.2 台后土抗力与加载位移关系

为了进一步分析台后土抗力与加载位移的关系,图4给出了AP-2试件距离台背0h处各填土高度0 m、0.125 m、0.375 m、0.625 m和0.875 m处(编号分别为T1~T5)的实测土抗力与加载位移的关系曲线。由于T6(1.0 m)在台顶,其值很小,图中未给出。

土抗力沿桥台高度方向的分布规律曲线。限于篇幅,仅给出AP-2试件的试验结果。同时,由于桥台负向运动时的台后土抗力较小(小于或等于主动土压力),因此也未给出,仅给出桥台正向运动时的土抗力。

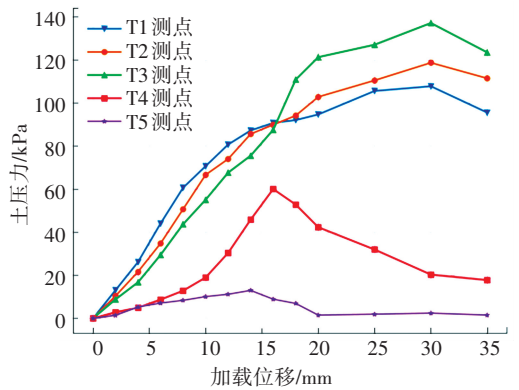
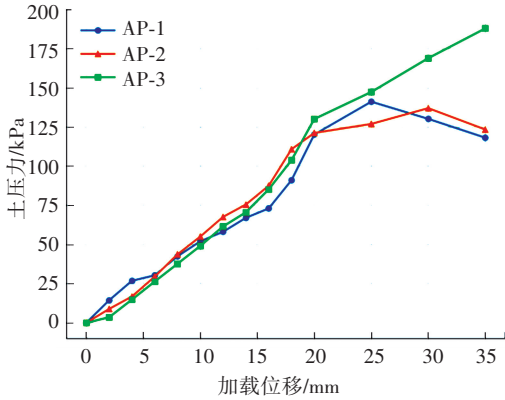


图4 AP-2 试件土抗力与加载位移关系曲线

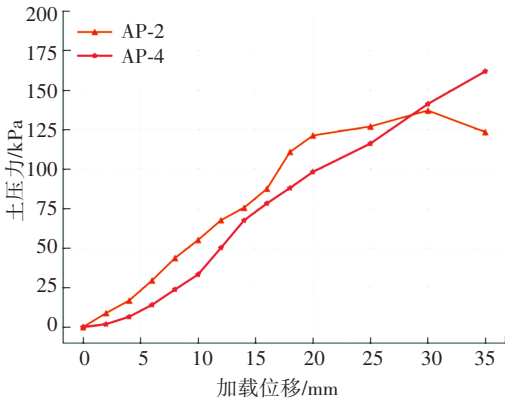
Fig.4 Relationship between soil resistance and loading displacement of AP-2

由图4可知,在加载初期(0~10 mm),各个测点处的土抗力随着加载位移的增大基本呈线性增大。当位移超过10 mm后,各测点的土抗力开始迅速增大。当加载位移超过16 mm后,填土较浅的T4和T5测点的土抗力迅速减小。这是由于桥台的往复运动使台后填土逐渐脱空,所测土抗力值开始减小,且填土较深处(T1、T2和T3测点)的土抗力增大速率也开始减缓。当加载位移为30 mm时,3个测点的土抗力均达到最大值,其值分别为107.32 kPa、118.65 kPa和137.08 kPa。此后,由于试件破坏加剧,土抗力开始减小。

为了对比不同 RC 桩配筋率及截面形状对台后土抗力的影响,图 5 给出了最大土抗力(T3 测点)与加载位移的关系曲线。其中,图 5(a)给出了 AP-1~AP-3 试件的,图 5(b)给出了 AP-2 和 AP-4 试件的。



(a) AP-1~AP-3 试件对比



(b) AP-2 和 AP-4 试件对比

图 5 不同试件 T3 测点土抗力变化曲线对比

Fig.5 Comparison of soil resistance at T3 measuring point of different specimens

由图 5(a)可知,AP-1 和 AP-2 试件 T3 测点的台后土压力随着加载位移的增大呈先增大后减小的变化规律,分别在当加载位移为 25 mm 和 30 mm 时达到最大;而 AP-3 试件在 35 mm 时的土压力仍呈增大的趋势。说明随着配筋率的增大,台-土相互作用

用越显著,桥台-RC 桩-土体系的整体性越好。桩基配筋率对台后土压力产生影响是由于配筋率较小时,在桥台往复位移作用下桩顶与桥台连接处更易损坏(如图 6 试件 AP-1 和 AP-3 连接处照片),使得桥台-桩基结构的整体性下降、桥台挡土能力减弱,台后土压力减小。而当 RC 桩配筋率较大时,其桩顶与桥台连接处整体性更好,台后土压力会持续增加。

由图 5(b)可知,AP-4 试件 T3 测点的台后土压力随着加载位移的增大也持续增大。这表明相比采用圆形截面 RC 桩(AP-2 试件),采用矩形截面 RC 桩可更好的提高整体式桥台-RC 桩-土体系的整体性。



(a) AP-1 试件

(b) AP-3 试件

图 6 桥台底部与桩顶连接处破坏

Fig.6 Damage at connection between abutment bottom and pile top

2.2 桩侧土抗力

2.2.1 负向加载时的桩侧土抗力

图 7 为负向加载时,桩身后侧和前侧土抗力沿埋深方向的分布规律曲线。由于试验前将静止土压力进行初始化清零,因此试验实测的土抗力以大于静止土压力(挤压土体)为正值,反之(背离土体)为负值。为便于说明,图 7(c)还同时给出了文献[19]中试件的变形分布曲线,以进一步分析土抗力与水平变形的关系。限于篇幅,仅给出了 AP-2 试件的试验结果。

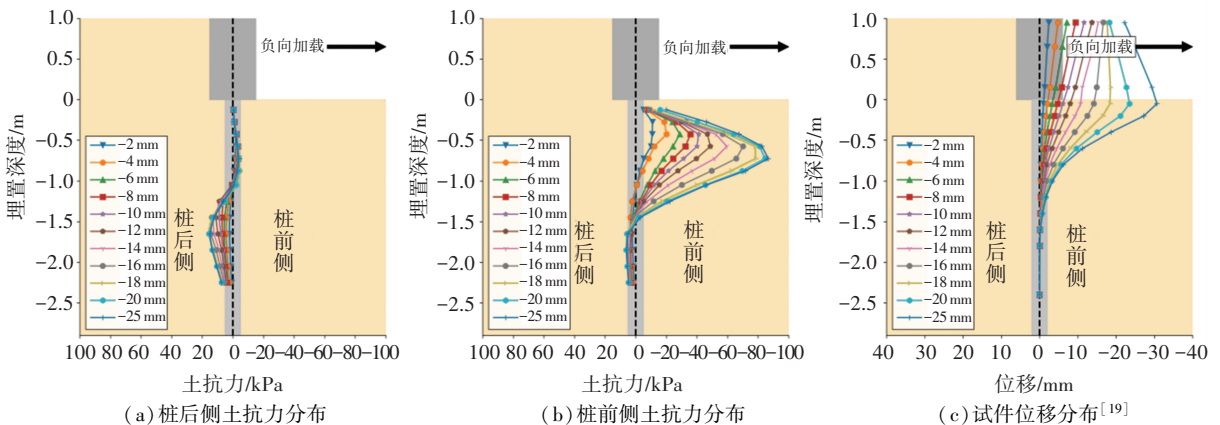


图 7 AP-2 试件负向加载时桩侧土抗力及变形分布曲线

Fig.7 Distribution of soil resistance and deformation of AP-2 under negative loading

由图7(a)可知,在负向加载位移作用下,桩侧土抗力沿埋深方向的分布规律为先小幅增大后再减小并反向增大,当反向增大至最大后又逐渐减小。结合图7(a)和7(c)可知,桩后侧的浅层(土抗力零点以上)土体处于主动土压力状态,因而土抗力很小,几乎为0;较深层(土抗力零点以下)土体处于被动受压状态,但由于水平变形较小,因而土抗力也较小。如当加载位移为-25 mm时,埋深-1.65 m处的桩后侧土抗力仅为15.02 kPa。

由图7(b)可知,桩前侧土抗力沿埋深方向的分布规律为先快速增大至最大,随后又迅速减小至零。结合图7(b)和7(c)可知,桩前侧的浅层土体为被动受压状态,且水平变形较大,因而土抗力较大。如当加载位移为-25 mm时,埋深-0.725 m处的桩前侧土抗力为86.61 kPa。较深层土处于主动土压力状态且水平变形较小,因而土抗力很小,几乎为0。上述的桩侧土抗力与水平变形的关系与传统桩基的基本一致。

为了分析RC桩配筋率和截面形状对桩侧土抗力的影响,图8给出了加载位移为-25 mm时,AP-1~AP-4试件的桩身前侧土抗力沿埋深的分布规律曲线。由于桩身后侧土抗力很小,在此不对其进行对比分析。

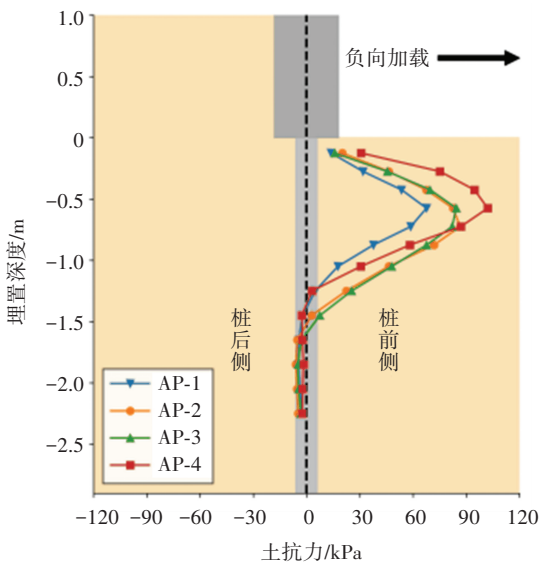


图8 -25 mm加载位移时桩前侧土抗力分布曲线对比

Fig.8 Comparison of soil resistance distribution in front of pile under -25 mm loading displacement

由图8可知,在负向加载位移作用下,配筋率更大的试件,桩前侧浅层土抗力大小及作用范围更大。如AP-1、AP-2和AP-3试件浅层最大土抗力分别为67.61 kPa、84.32 kPa和86.61 kPa,分别作用在0~-1.35 m、0~-1.52 m和0~-1.61 m之间。对比AP-2和AP-4试件可知,AP-4试件桩前侧浅层土体

被动受压范围与AP-2试件的基本一致,但前者的土抗力峰值明显大于后者。AP-1~AP-4试件前侧深层土抗力均很小。

2.2.2 正向加载时的桩侧土抗力

图9为正向加载时,桩身后侧和前侧土抗力沿埋深方向的分布规律曲线。为便于说明,图9(c)还同时给出了文献[19]试件的水平变形分布曲线,以进一步分析土抗力与水平变形的关系。

由图9(a)可知,在正向加载位移作用下,桩后侧土抗力沿埋深方向的分布规律为先快速增大至最大,随后逐渐减小并反向,当反向增大至最大后又逐渐减小。由图9(a)还可知,正向加载时,较浅部位RC桩身也向正向移动、挤压桩后土体,使桩后侧的土体为被动受压状态,土抗力较大;较深部位RC桩身则向负向移动、背离桩后侧土体,桩后侧的土体为主动土压力状态,土抗力较小。不过,结合图9(a)和9(c)可知,RC桩埋深较浅位置的整体水平变形却为负值。如当加载位移为25 mm时,桩身埋深-0.275 m处桩身水平变形为-19.51 mm,而桩后侧被动受压土抗力为37.63 kPa。因此,对于整体桥桩基来说,桩身整体变形方向与土体受压方向并不一致,与传统桩基的受力性能有所不同。分析其原因是由于RC桩出现了累积变形现象,即RC桩在往复位移作用下不断向负向偏移,从而使得桩身整体变形方向与土体受压方向不一致。也即桩身负向累积变形会影响整体式桥台-RC桩-土体系的桩侧土抗力分布规律。此外,由于桩顶变形受到桥台约束,同时受到累积变形影响,导致桩基变形最大值不位于桩顶,而是桩顶以下一定埋深处,这也影响了土压力分布。

由图9(b)可知,在正向加载位移作用下,桩前侧土抗力沿埋深方向的分布规律为先略有增大后再减小并反向增大,当反向增大至最大后又逐渐减小。另外,由于较浅部位RC桩身向正向移动、背离桩前侧土体,使桩前侧的土体为主动土压力状态,土抗力较小;较深部位RC桩身向负向移动,桩前侧的土体为被动受压状态,土压力较大。结合图9(b)、9(c)可知,虽然较浅位置桩身变形为负值(整体处于桩前侧偏位状态),但桩前侧仍为主动土压力状态,土压力很小,几乎为0。

对比负向加载位移作用与正向加载位移作用下的桩侧土抗力可知(图7(b)和图9(a)),对于被动受压状态下的浅层土体,负向加载位移作用下的桩前侧土抗力明显大于正向加载时的桩后侧土抗力;同样的,对于深层土体(图7(a)和图9(b)),也是桩前侧的土抗力大于桩后侧的,也即覆土少的一侧(桩前侧)的土抗力反而大于覆土多的一侧的土抗

力(桩后侧),这与常规的认知不符。分析其原因也是由于 RC 桩的累积变形效应影响,即 RC 桩在往复

位移作用下不断向负向偏移(向桩前侧运动),从而增大了桩前侧土抗力、减小了桩后侧土抗力。

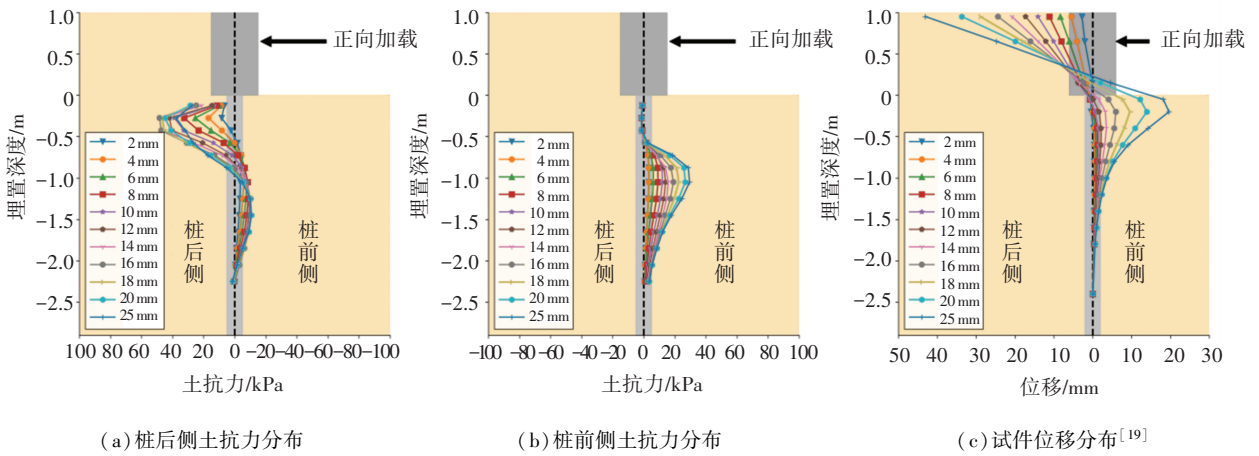


图 9 AP-2 试件正向加载时桩侧土抗力及变形分布曲线

Fig.9 Distribution of soil resistance and deformation of AP-2 under positive loading

图 10 给出了加载位移为 25 mm 时,AP-1~AP-4 试件的桩身后侧土抗力沿埋深的分布规律曲线。由于桩身前侧土抗力很小,在此也不对其进行对比分析。

较小。

分析认为,产生上述现象的原因在于配筋率更大的试件更不易受负向累积变形的影响,桥台-桩基-土体系整体性更好。同时,采用矩形截面也可有效的改善 RC 桩的受力性能。

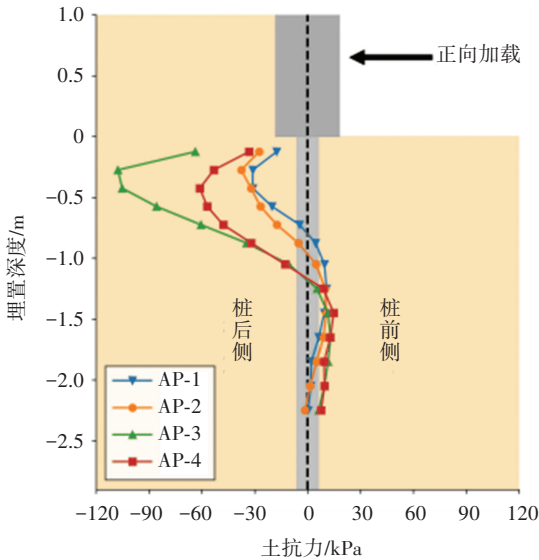


图 10 25 mm 加载位移时桩后侧土抗力分布曲线对比

Fig.10 Comparison of soil resistance distribution behind pile under 25 mm loading displacement

由图 10 可知,在正向位移荷载作用下,配筋率更大的试件,桩后侧浅层土体的土抗力大小和作用范围更大。如 AP-1、AP-2 和 AP-3 试件浅层最大土抗力分别为 31.12 kPa、37.63 kPa 和 107.61 kPa,分别作用在 0~-0.78 m、0~-0.93 m 和 0~-1.25 m 之间。对比 AP-2 和 AP-4 试件可知,AP-4 试件桩后侧浅层土抗力大小和作用范围较 AP-2 试件更大。AP-1~AP-4 试件桩后侧深层土抗力和作用范围均

对比正、负向加载位移(±25 mm)下桩后侧和桩前侧的土抗力分布规律(图 10 和图 8)可知,当 RC 桩配筋率为 0.8%(AP-1 试件)时,正向加载位移下桩后侧的土抗力显著低于负向加载位移下桩前侧的,前者的最大值比后者的小 57.4%,也即覆土多的一侧的土抗力反而显著小于覆土少的一侧的土抗力,说明累积变形效应对低配筋的桩侧土抗力分布规律影响较大;正如前述分析,当 RC 桩配筋率为 1.6%(AP-2 试件)时,正向加载位移下桩后侧的土抗力也显著小于负向加载位移下桩前侧的,前者的最大值比后者的小 34.0%;而当 RC 桩配筋率为 3.2%(AP-3 试件)时,正向加载位移下桩后侧的土抗力则大于负向加载位移下桩前侧的,前者的最大值比后者的大 31.2%,与通常的覆土多的一侧土抗力更大的规律较一致。这进一步说明提高 RC 配筋率或采用矩形截面 RC 桩可更为有效的减小累积变形的影响,从而提高整体式桥台-RC 桩-土体系的整体性。因此,建议实际工程中整体桥 RC 桩配筋率不宜低于 1.6%。

2.3 桩身应变

图 11 给出了桩身两侧的拉、压应变分布规律曲线。由于混凝土开裂后,应变片很快达到量程并破坏。因此,本文仅给出了在较小的位移荷载下,桩身测点的应变值。限于篇幅,仅给出 AP-2 试件的试

验结果。其中,应变正值表示拉应变,负值表示压应变。

由图 11(a)可知,负向加载时,桩身两侧应变的分布规律为沿埋深先增大后逐渐减小。当加载位移为-2 mm 时,桩身两侧拉、压应变分布基本对称,以埋深-0.35 m 处的桩身应变最大,分别为 -70.03×10^{-6} 和 64.31×10^{-6} 。随着加载位移的增加,对称性逐渐变差,最大应变对应的埋深位置也逐渐变化,即最大压应变(桩后侧)埋深往上发展的趋势、最大拉应变(桩前侧)则快速往下发展。如当加载位移增大至-6 mm 时,桩身后侧最大压应变为 -215.26×10^{-6} ,埋深位置为-0.35 m;桩身前侧最大拉应变为 185.13×10^{-6} ,埋深位置为-0.8 m。分析拉压应变不对称的原因,是由于台前与台后填土的高度不对称所致。

由图 11(b)可知,正向加载时,桩身两侧应变分布规律为沿埋深逐渐减小,最大值均位于桩顶。并

且,各加载位移下的桩身拉、压应变明显不对称,埋深为 0~1.0 m 时各埋深处的桩前侧拉应变变值较后侧压应变值更大。如加载位移为 4 mm 时,桩顶的拉、压应变分别为 981.32×10^{-6} 和 -338.81×10^{-6} 。这表明正向加载时 RC 桩顶部前侧的混凝土更易开裂,其与整体式桥台-RC 桩的破坏情况一致^[19]。

对比图 11(a)和图 11(b)可知,桩基负向加载和正向加载时的桩身应变分布规律存在较大差异。这是由于负向加载时,桩基内力主要受桩基-土相互作用的影响,桩顶(台底)所受外力较小、桩身内力和应变也较小,桩基应变分布规律与传统的单桩-土相互作用的基本一致;正向加载时,桩基受到桥台-土、桩基-土相互作用共同影响,桩顶(桥台底部与桩顶连接处)所受到的外力相比大的多,桩顶的应变明显大于负向加载时的,桩身内力和应变也较大,从而使其正负向加载时的桩身应变分布规律明显不同。

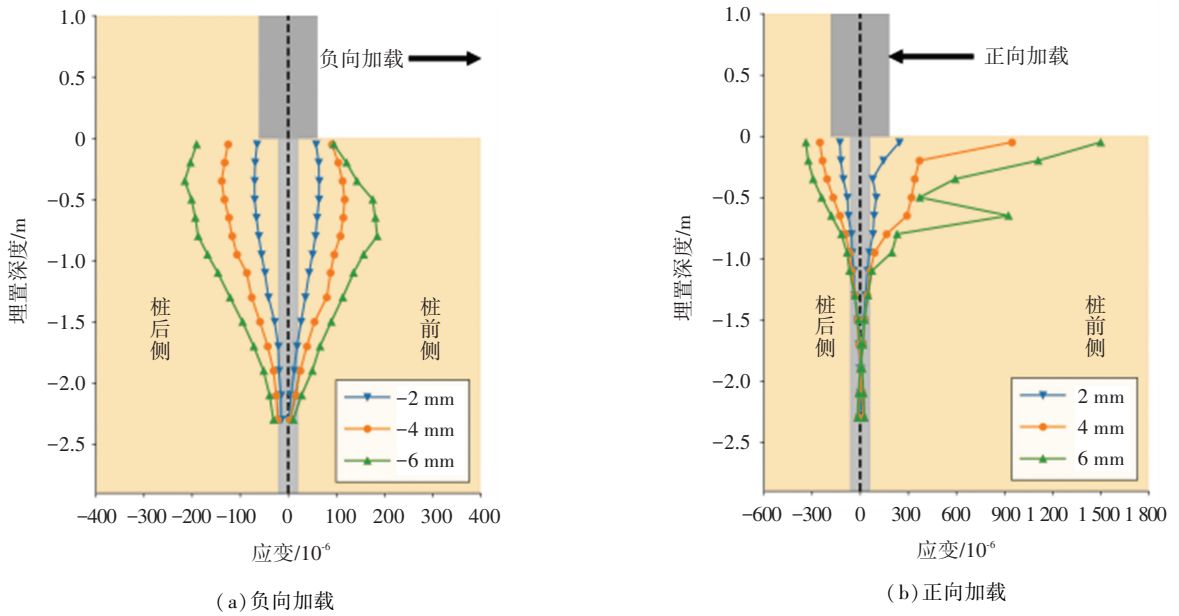


图 11 AP-2 试件桩身应变分布

Fig.11 Strain distribution of pile of AP-2

为了对比 RC 桩配筋率和截面形状对桩身应变的影响,图 12 给出了加载位移为 ± 6 mm 时 AP-1~AP-4 试件的拉、压应变分布规律曲线。由图 12 可知,正、负向加载位移作用下,4 个试件的桩身两侧拉、压应变沿埋深的分布规律基本一致。并且,各试件的 RC 桩的拉、压应变呈 AP-1>AP-2>AP-3>AP-4 的大小关系。如加载位移为-6 mm 时,AP-2、AP-3 和 AP-4 试件的拉应变最大值分别较 AP-1 试件的减小了 3.0%、9.6% 和 40.6%;压应变最大值分别减

小了 6.9%、22.9% 和 9.9%。加载位移为 6 mm 时,AP-2、AP-3 和 AP-4 试件的拉应变最大值分别较 AP-1 试件的减小了 5.2%、9.9% 和 61.8%;压应变最大值分别减小了 3.1%、5.2% 和 57.4%。上述现象表明,提高 RC 桩配筋率或采用矩形截面均可有效降低 RC 桩两侧的拉、压应变。并且,采用矩形截面 RC 桩可更为有效的减小桩身应变,使其更晚开裂,从而有效的改善其受力性能。

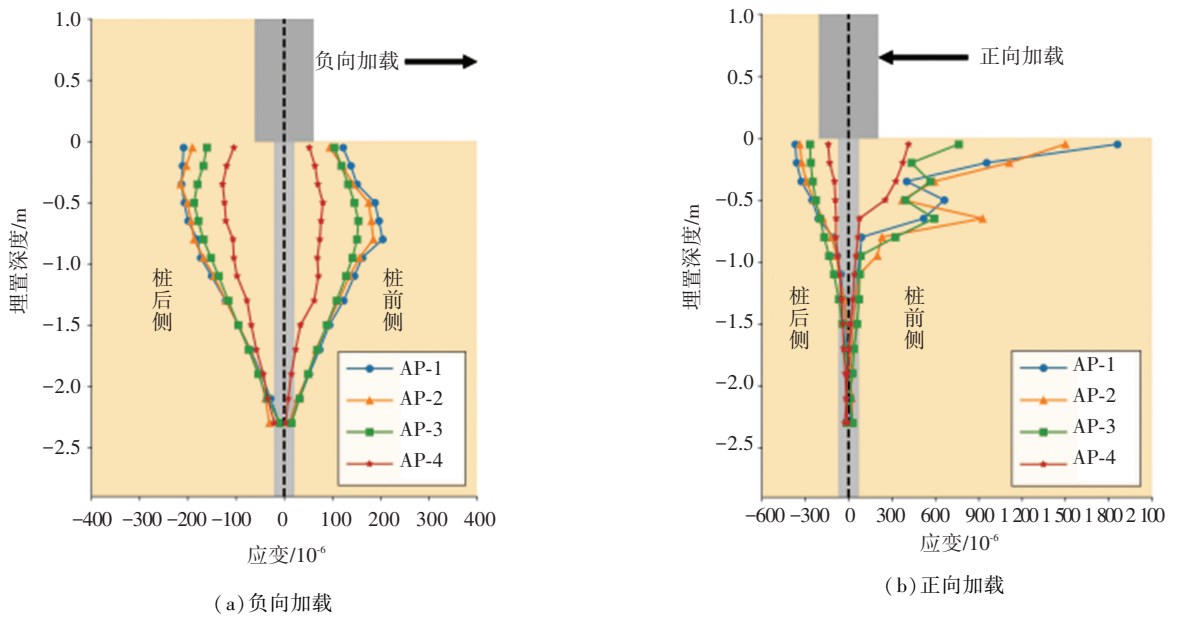


图 12 桩身应变对比

Fig.12 Comparison of pile strain

2.4 桩身弯矩

依据试验测得的桩侧应变,可计算各埋深下的桩身弯矩,即

$$M(y) = \frac{EI[\varepsilon_t(y) - \varepsilon_c(y)]}{D} \quad (1)$$

式中: $M(y)$ 为桩身入土深度 y 处的弯矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$; $\varepsilon_t(y)$ 、 $\varepsilon_c(y)$ 分别为桩身入土深度 y 处的拉应变与压应变; D 为桩径, m ; E 为混凝土弹性模量, MPa ; I 为桩基截面惯性矩, m^4 。

为便于说明,本文以使桩身前侧受拉为正,反之

为负。依据式(1)分别计算得到正向和负向加载时的桩身弯矩沿埋深方向分布规律曲线,如图 13 所示。限于篇幅,仅给出 AP-2 试件的实验结果。由图 13 可知,负向加载时,AP-2 试件的桩身弯矩分布规律为沿埋深先增大再逐渐减小,桩身最大弯矩位于埋深 -0.725 m 处;正向加载时,桩身弯矩分布规律为沿埋深向下逐渐减小,桩身最大弯矩位于桩顶。负向加载和正向加载时桩身弯矩的分布规律明显不同的原因与桩身应变的相似。

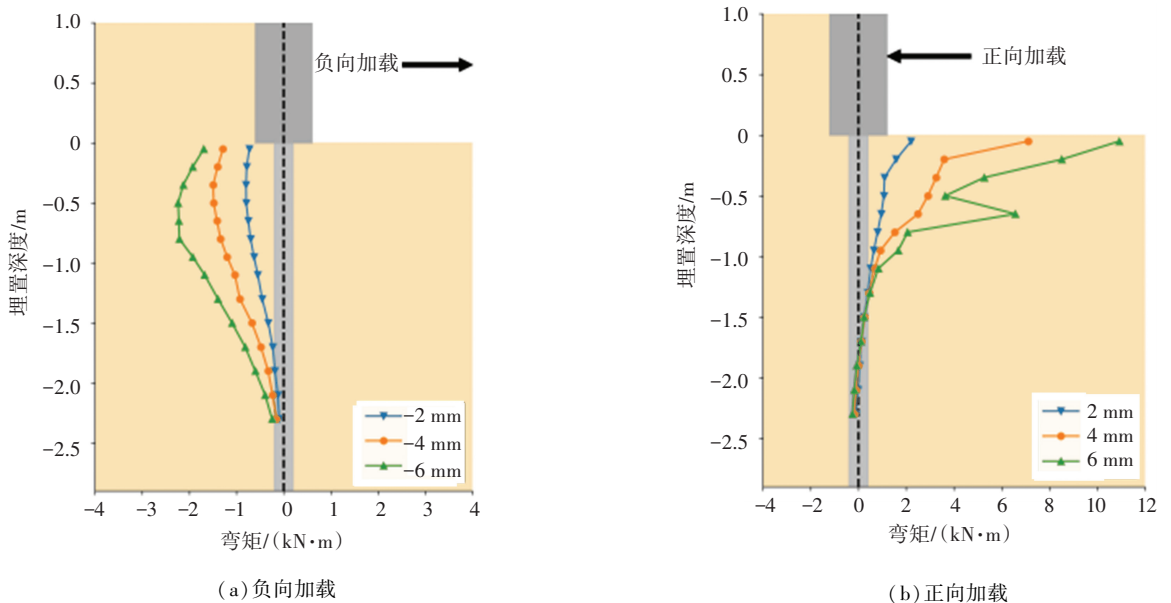


图 13 AP-2 试件桩身弯矩分布

Fig.13 Bending moment distribution of pile of AP-2

为了对比 RC 桩配筋率和截面形状对桩身弯矩的影响,图 14 给出了加载位移为 ± 6 mm 时,AP-1~AP-4 试件的桩身弯矩分布规律曲线。

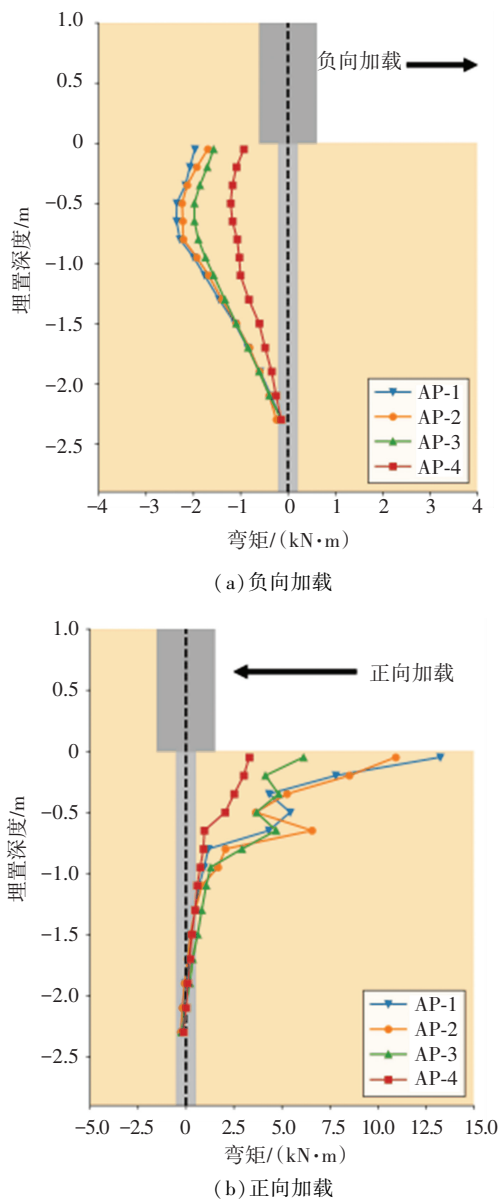


图 14 ± 6 mm 加载位移时试件桩身弯矩对比

Fig.14 Comparison of pile bending moment under ± 6 mm loading displacement

由图 14 可知,正、负向加载时,4 个试件的桩身弯矩分布规律基本一致。负向加载时,4 个试件的桩身弯矩最大值均位于埋深 -0.725 m 处,正向加载时则位于桩顶。并且,各试件的 RC 桩的弯矩呈 AP-1>AP-2>AP-3>AP-4 的大小关系。如加载位移为 -6 mm 时,AP-2、AP-3 和 AP-4 试件的弯矩最大值分别较 AP-1 试件减小了 4.6%、15.7% 和 48.5%;加载位移为 6 mm 时,AP-2、AP-3 和 AP-4 试件的弯矩最大值分别较 AP-1 试件减小了 17.4%、53.8% 和 75.1%。

上述试验现象表明,提高 RC 桩配筋率或采用

矩形截面 RC 桩可有效减小桩身弯矩,改善 RC 桩基的受力性能。

3 结 论

通过对 4 个整体式桥台-RC 桩-土相互作用拟静力试验结果的分析比较,得到以下主要结论:

1) 在桥台往复位移作用下,距离台背较近处土抗力沿高度方向的分布规律会由“三角形”分布向“抛物线形”分布转变;距离台背较远处的基本呈“三角形”分布。台后土抗力会受到 RC 桩配筋率和截面形状的影响,提高 RC 桩的配筋率或采用矩形截面可增大整体式桥台-RC 桩-土体系的整体性。

2) 桩身负向累积变形会影响整体式桥台-RC 桩-土体系的桩侧土抗力分布规律,并会减小桩后侧土抗力、增大桩前侧土抗力。采用配筋率更大或矩形截面 RC 桩的试件更不易受累积变形的影响,桥台-桩基-土体系整体性更好。

3) 整体式桥台-RC 桩-土体系在向河跨侧运动时,桩身应变和弯矩的分布规律与传统桩基一致;向岸坡侧运动时,桩身最大应变和弯矩出现在桥台底部与桩顶连接处。提高 RC 桩配筋率或采用矩形截面 RC 桩可有效减小桩身应变和弯矩,改善 RC 桩基的受力性能。

参考文献

- [1] 陈宝春,庄一舟,黄福云,等.无伸缩缝桥梁[M].2版.北京:人民交通出版社,2019
CHEN Baochun, ZHUANG Yizhou, HUANG Fuyun, et al. Jointless bridges [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2019
- [2] 陈宝春,付鑫,庄一舟,等.中国无伸缩缝桥梁应用现状与发展对策[J].中外公路,2018,38(1):87
CHEN Baochun, FU Cui, ZHUANG Yizhou, et al. Application status and development strategy of jointless bridge in China[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(1):87
- [3] DUNKER K F, LIU D. Foundations for integral abutments[J]. Practice Periodical on Structural Design & Construction, 2007, 12(12):22
- [4] 徐明,刘鹏飞.整体式桥台研究综述[J].工程力学,2016,33(4):1
XU Ming, LIU Pengfei. Research on integral bridge abutments[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(4):1
- [5] 赵秋红,齐朝阳,安泽宇,等.考虑 SSI 的整体式钢桥抗震性能参数分析[J].交通运输工程学报,2018,18(5):35
ZHAO QiuHong, QI Zhaoyang, AN Zeyu, et al. Parametric analysis on seismic behavior of integral abutment steel bridge considering SSI [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(5):35
- [6] 中国工程建设标准化协会.公路无伸缩缝桥梁技术规程:T/CECS G:D60-01—2020[S].北京:人民交通出版社,2020
China Association for Engineering Construction Standardization. Technical specification for highway jointless bridges: T/CECS G:

- D60-01—2020[S]. Beijing: China Communications Press, 2020
- [7] 庄一舟, 黄福云, 钱海敏, 等. PHC管桩-土相互作用受力性能拟静力试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(4): 42
ZHUANG Yizhou, HUANG Fuyun, QIAN Haimin, et al. Pseudo-static test research on mechanic behavior of PHC piles with soil-pile interaction[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(4): 42
- [8] 彭大文, 林志平, 洪锦祥. 无伸缩缝桥梁的研究与实践[J]. 公路, 2006(8): 53
PENG Dawen, LIN Zhiping, HONG Jinxiang. Research and practice for jointless bridges[M]. Highway, 2006(8): 53
- [9] 朱伟庆, 衡江峰, 刘永健, 等. 采用墙式整体桥台的无缝桥受力特征[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(6): 36
ZHU Weiqing, HENG Jiangfeng, LIU Yongjian, et al. Mechanical characteristics of jointless bridge with wall-type integral abutment[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(6): 36
- [10] KONG B, CAI C S, KONG X. Field monitoring study of an integral abutment bridge supported by prestressed precast concrete piles on soft soils[J]. Engineering Structures, 2015, 104: 18
- [11] GAMA D, ALMEIDA J F. Concrete integral abutment bridges with reinforced concrete piles[J]. Structural Concrete, 2015, 15(3): 292
- [12] 黄福云, 陈汉伦, 董锐, 等. 水平低周往复位移下单桩-土相互作用试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1625
HUANG Fuyun, CHEN Hanlun, DONG Rui, et al. Experimental study on single pile-soil interaction under horizontal low-cycle reciprocating displacement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(5): 1625
- [13] 黄福云, 单玉麟, 罗小焯, 等. 基于位移的整体桥混凝土桩基抗震设计准则[J]. 中国公路学报, 2021, 34(5): 99
HUANG Fuyun, SHAN Yulin, LUO Xiaoye, et al. Displacement-based seismic design criteria of concrete piles in integral abutment jointless bridges (IAJBs)[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(5): 99
- [14] 黄福云, 何凌峰, 单玉麟, 等. 整体桥预应力桩-土相互作用试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(1): 31
HUANG Fuyun, HE Lingfeng, SHAN Yulin, et al. Experiment on interaction of prestressed pile soil in integral bridge[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(1): 31
- [15] 黄福云, 陈伟, 徐普, 等. 整体式桥台-H形钢桩-土体系抗震性能试验研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(9): 180
HUANG Fuyun, CHEN Wei, XU Pu, et al. Experimental study on seismic performance of integral abutment-steel H-pile-soil system[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(9): 180
- [16] 黄福云, 林友炜, 程俊峰, 等. 整体式桥台-H形钢桩-土相互作用低周往复拟静力试验[J]. 中国公路学报, 2019, 32(5): 100
HUANG Fuyun, LIN Youwei, CHENG Junfeng, et al. Interaction of integral abutment-H-shaped steel pile-soil under reciprocating low-cycle pseudo-static test[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(5): 100
- [17] 黄福云, 张峰, 单玉麟, 等. 整体式桥台-桩基-土相互作用内力计算方法研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(6): 69
HUANG Fuyun, ZHANG Feng, SHAN Yulin, et al. Study on calculation method of internal force of integral abutment-pile foundation-soil interaction[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(6): 69
- [18] 黄福云, 程俊峰, 薛俊青, 等. 带EPS的整体式桥台-桩-土相互作用拟静力试验[J]. 中国公路学报, 2019, 32(7): 77
HUANG Fuyun, CHENG Junfeng, XUE Junqing, et al. Experiment on abutment-pile-soil interaction with expanded polystyrenes in integral abutment jointless bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(7): 77
- [19] 黄福云, 何凌峰, 单玉麟, 等. 整体式桥台-混凝土桩-土相互作用拟静力试验[J]. 岩土力学, 2021, 42(7): 1803
HUANG Fuyun, HE Lingfeng, SHAN Yulin, et al. Experiment on interaction of soil-abutment-RC-pile in integral abutment bridges (IAJBs)[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(7): 1803
- [20] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵地基与基础设计规范: JTG 3363—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Design specifications for highway bridge and culvert foundations and foundations: JTG 3363—2019[S]. Beijing: China Communications Press, 2019
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Geotechnical investigation specifications: GB 50021—2001[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2002
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: JGJ/T 101—2015[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2016

(编辑 魏希柱)