

模型边界对大型哑铃型承台群桩基础承载变形特性的影响

曾友金, 章为民, 王年香, 徐光明

(南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 利用三维弹塑性有限元, 考虑群桩基础周围外侧土体竖向变形影响范围和桩端土体压缩层厚度的因素, 研究分析其对大型哑铃型承台群桩基础承载变形特性的影响, 从而研究大型超深群桩基础边界问题以及离心模型试验边界对其承载变形特性的影响。研究表明: 群桩基础边界大小由群桩基础变形特性控制, 成桥阶段时大型哑铃型承台群桩基础周围外侧土体竖向变形影响范围和桩端土体压缩层影响深度, 分别为一倍承台宽度和一倍桩长; 设计的离心模型试验边界对群桩基础桩身受力大小与分布影响不大, 而对承台沉降和桩端土体整体压缩变形比等变形特性影响较大。

关键词: 边界; 群桩基础; 离心模型; 数值分析

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2007)02-0260-08

作者简介: 曾友金(1975-), 男, 工程师, 主要从事土与结构相互作用的数值分析与离心模型试验方面的工作。E-mail: yjzeng@nhri.cn。

Influence of modelling boundaries on behaviour of pile groups with dumbbell shaped pile-cap supporting for a super large bridge

ZENG You-jin, ZHANG Wei-min, WANG Nian-xiang, XU Guang-ming

(Geotechnical Engineering Department of Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: Influence of boundaries of centrifuge model on the behaviour of pile groups with dumbbell shaped pile-cap supporting for a super large bridge was analyzed with 3-D elastic-plastic FEM. It was shown that the influential zone of vertical deformation of soil around pile groups and the influential thickness of compressive stratum under pile tips were approximately equal to the width of pile-cap and pile length respectively under the design load. The influence of boundaries of centrifuge model was small on the distribution and magnitude of the axial forces of pile group, but large on the deformation characteristics.

Key words: boundary; group piles foundation; centrifuge modeling; numerical analysis

0 前 言

随着城市地下空间的开发利用与高层建筑密集兴建, 关于隧道施工对邻近群桩基础承载变形影响、新建高层建筑桩箱(筏)基础对邻近建筑物影响及相邻的上下行并行独立桥梁群桩基础的相互影响等, 是目前亟待解决的工程问题。这当中一个最重要的问题是确定群桩基础边界, 即群桩基础周围外侧土体竖向变形影响水平范围和桩端土体影响深度。刘金砺等^[1]在粉土和软土中进行了一系列现场模型试验, 获得了桩端平面外侧土的竖向变形影响范围和不同桩距与荷载水平下桩端土体压缩层影响深度等方面的成果。不过, 目前这方面的模型试验、原型试验进行的研究还不多, 群桩规模不大, 试验成果大多数是反应了小规模群桩基础的边界问题^[2]。由于群桩基础边界涉及荷载特性、

成桩工艺、土体特性、群桩规模、群桩几何尺寸(桩径、桩距、桩长径比等)等众多复杂因素影响, 目前还未有较好的实测成果和有效的理论方法对其进行分析, 对其机理还未完全认识。同时, 桩径较大、桩长径比较大、规模较大的群桩, 特别是超深超大规模群桩, 其群桩荷载传递特性、承载变形特性、破坏模式, 与小规模群桩有较大不同。因此, 对于大规模超深群桩基础的边界问题, 还有待于深入研究。

某大型桥梁主塔群桩基础置于第四系地层厚达300 m左右的覆盖层中, 基础承受荷载大、地质条件差、局部冲刷深, 是设计与施工的重点与难点, 有许多技术难题亟待研究和解决^[3]。由于超大规模群桩基

础特性本身及对其影响因素的复杂性, 需利用能表征原型特征的物理模型试验进行研究。因离心模型试验能再现原型应力水平, 大型离心模型试验是研究该大型哑铃型承台群桩基础的最重要研究手段之一。离心模型试验从理论上来说, 不管模型比尺为多少, 都能准确模拟原型。但离心模型比尺的设计, 不仅取决于模拟的土层、桩体、群桩大小, 还取决于群桩的边界问题。由于要综合考虑离心机吊篮和模型箱的空间大小、控制群桩基础承载变形特性的实际土层的模拟及承台群桩基础模型制作工艺与测试等问题, 对于该大型哑铃型承台群桩基础需设计一定的模型比尺, 截取一定量的群桩基础外侧范围和桩端土体压缩层深度的土体, 来进行离心模型试验。因此, 需研究分析模型边界对其承载变形特性的影响以及大型承台群桩基础边界问题。

1 哑铃型承台群桩基础计算模型

为了研究主塔哑铃型承台群桩基础在考虑不同注浆、冲刷及扩底等 5 种工况条件下的工作特性与性状, 利用模型箱 (1000 mm (长) × 900 mm (宽) × 1000 mm (高)) 在 160g 下进行了 8 组考虑桩端不注浆、部分注浆、全部注浆, 无冲刷、潮汐冲刷形态与最大冲刷深度下的竖向荷载和水平荷载下哑铃型承台群桩基础的离心模型试验^[4]。因该主塔群桩基础规模特大, 未能按弹性力学厚壁圆筒理论、有限元原理及工程经验, 在水平方向范围取承台尺寸的 2.5~4 倍和在竖直方向取两倍桩长以上覆盖层厚度。因此, 需研究分析模型边界对其承载变形特性的影响, 以及大型承台群桩基础边界问题。

因篇幅有限, 本文主要针对最大冲刷深度 (高程为 -46.2 m) 工况下主塔哑铃型承台群桩基础的离心模型试验 (见图 1), 用三维弹塑性有限元来研究分析模型边界对其承载变形特性的影响以及对离心模型试验成果进行深入分析与评价。该离心模型试验模拟的范围在横桥方向取 160 m, 在纵桥方向取 144 m, 在竖直方向取覆盖层深度到 -158.2 m 高程处。三维弹塑性有限元的地基土层、桩与承台及计算荷载的模拟, 计算域边界约束, 群桩基础三维有限元网格剖分形式等均与文献[3]中相同。在桩土界面间设置横桥向、纵桥向及竖直向的 3 个方向的弹簧来模拟桩土相互作用。为了研究群桩基础桩端土体影响深度和群桩基础周围外侧土体变形影响水平范围, 以及离心模型边界的影响, 特设计了 2 种平面尺寸与 5 种覆盖层深度共 8 组计算模型。桩端以下 -227.9 m 至 -307.6 m 高程处土体均近似按 Q2 亚黏土土层来模拟, 具体计算模型边界

尺寸见表 1。土体、桩与承台及桩土界面计算参数见文献[3]中表 1 和横桥向与纵桥向的水平方向的弹簧参数见文献[5]。可见, 模型 C 是模拟设计的最大冲刷深度工况下哑铃型承台群桩基础离心模型试验, 模型 A 是模拟桩端固定的情况。

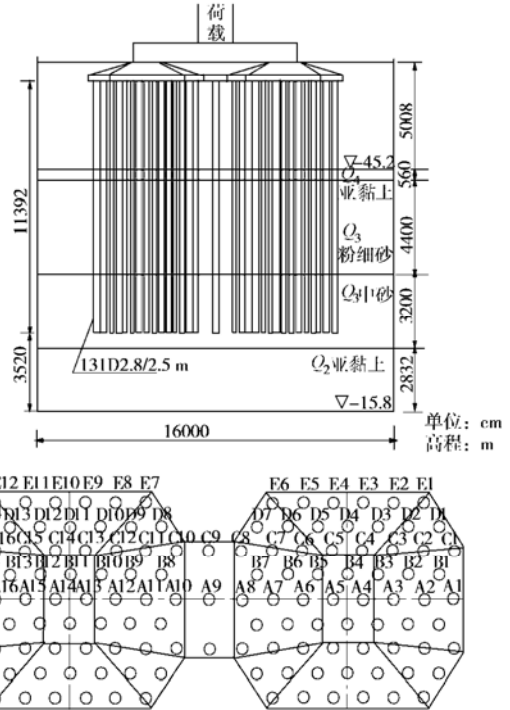


图 1 哑铃型承台群桩基础离心模型试验布置示意图

Fig. 1 Layout of centrifuge model of dumbbell shaped pile-cap and pile groups

表 1 计算模型模拟范围

Table 1 Dimension of numerical models

计算模型	横桥向/m	纵桥向/m	覆盖层土体深度/m
模型 A	160	144	-123
模型 B	160	144	-127
模型 C	160	144	-158.2
离心模型	160	144	-158.2
模型 D	160	144	-227.6
模型 E	160	144	-307.6
模型 F	622	360	-158.2
模型 G	622	360	-227.6
模型 H	622	360	-307.6

2 模型边界对哑铃型承台群桩基础承载变形特性影响

2.1 模型边界对承载特性影响

2.1.1 承台荷载与沉降关系

图 2 为承台荷载与沉降关系曲线。可见, 各计算模型承台荷载与沉降关系曲线相似; 在相同承台荷载下, 各计算模型相对应的承台沉降随模型 A、模型 B、模型 C、模型 F、模型 D、模型 G、模型 H 及模型 E

依次比相邻前一个模型的要大。模型 A 的桩端完全固定，其承台沉降完全由桩身压缩引起的，因而，其承台沉降较小。模型 B 桩端土体压缩层厚度仅为 4 m，各级荷载下桩端土体压缩变形在承台沉降中占主要部分，但其承台沉降也较小。模型 C 和模型 F 的承台荷载与沉降关系曲线与桩端全注浆（所有桩桩端注浆）、部分注浆（群桩外围一圈桩桩端注浆）及完全不注浆方案的离心模型试验荷载沉降关系曲线基本上一致，成桥阶段时其对应的沉降分别为 138, 146, 164, 175 和 186 mm，计算的沉降比试验的要小 10%~20%。

图 3 是承台沉降随桩端土体压缩层厚度的变化关系曲线。可见，在相同承台荷载下，承台沉降均随桩端土体压缩层厚度增加时，开始增加较快，在压缩层厚度达到一定厚度时，其承台沉降增加非常缓慢。从该图变化曲线看，当桩端土体压缩层厚度为 185 m 时，成桥阶段对应的承台沉降为 24 cm，桩端土体影响深度可取一倍桩长（114 m）或一倍横桥向承台宽度（113.8 m）左右的桩端土体压缩层厚度范围。

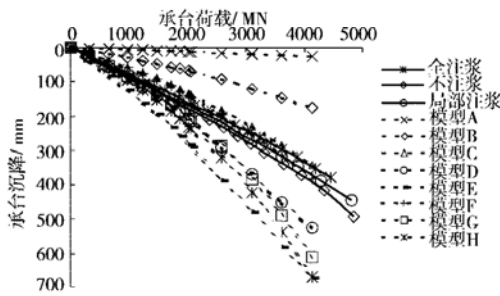


图 2 承台荷载与承台沉降关系曲线

Fig. 2 Settlement and load of pile-cap

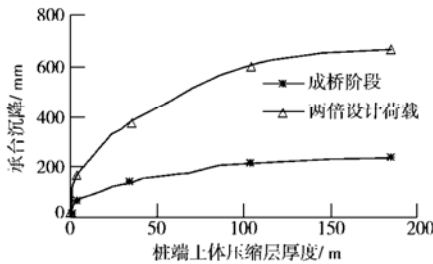


图 3 承台沉降与桩端土体压缩层厚度

Fig. 3 Settlement of pile-cap versus thickness of compressive

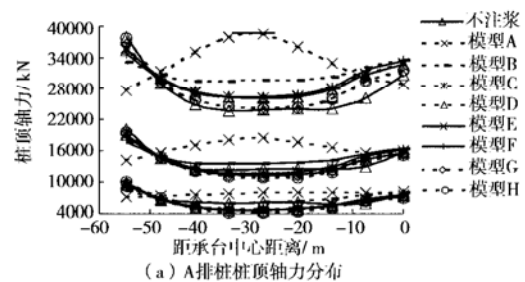
stratum under pile tip

2.1.2 桩身轴力分布

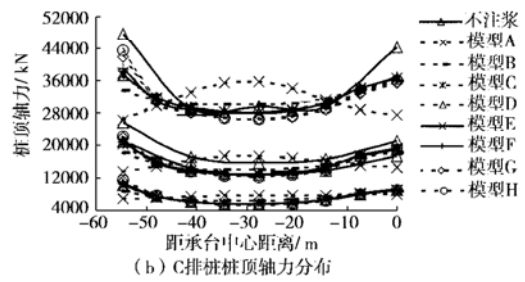
大型承台群桩基础桩顶轴力分布、桩端轴力分布及桩身轴力沿深度的分布受承台、桩及土的整体相对刚度（下文简称为整体相对刚度）等因素控制。承台、桩及土的整体相对刚度是承台、桩群及土相互作用的综合反映，受承台几何尺寸、承台刚度、群桩的几何尺寸及土体特性等因素影响。因该承台平面尺寸特大，可借鉴桩箱（筏）基础整体相对刚度来判断该承台群

桩基础的整体相对刚度。根据桩箱（筏）土整体相对刚度，以及考虑基桩单位荷载下沉降量的影响因素，可初步判断模型 A 的整体相对刚度非常小，处于柔性状态，模型 B、模型 C、模型 F、模型 D、模型 G、模型 E 及模型 H 的各整体相对刚度比相邻前一个模型的要大，但除模型 A 外各计算模型的整体相对刚度不会相差很大，处于弹性状态。

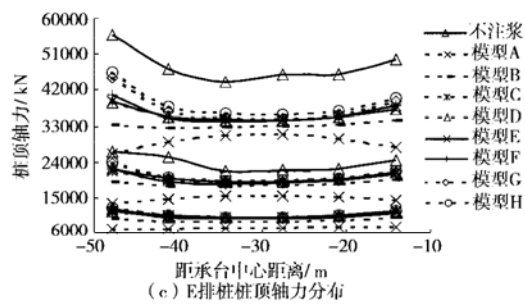
图 4 是承台竣工、成桥阶段及两倍设计荷载时各排桩桩顶轴力分布。因模型 A 计算的深度在桩端处，即桩端固定，桩身压缩变形较小而导致桩土相对位移非常小，承台荷载绝大部分传递到桩端；因承台与桩的整体相对刚度较小，桩顶轴力分布受承台上施加荷载的位置影响较大。因上部结构荷载通过索塔斜腿传递于承台，承台的斜腿位置处桩承受的荷载大，而远离斜腿位置处的桩承受荷载较小，因而各排桩桩顶轴力分布呈凸型，且其起凸的程度取决于整体相对刚度。整体刚度越小，各排桩桩顶轴力分布呈凸型凸得越大。在斜腿与承台交界处下桩桩顶轴力，模型 A 的 A 排桩与 C 排桩的桩顶轴力均大于相应的其它模型的 A 排桩与 C 排桩，远离斜腿位置处桩的桩顶轴力均小于相应的其它模型的 A 排桩与 C 排桩，而 E 排桩桩顶轴力均小于相应的其它模型的 E 排桩。



(a) A排桩桩顶轴力分布



(b) C排桩桩顶轴力分布



(c) E排桩桩顶轴力分布

图 4 各计算模型桩顶轴力分布

Fig. 4 Distribution of axial force on pile top of numerical models

除模型 A 外各计算模型的各排桩桩顶轴力分布呈凹型分布。各模型的 A 排桩与 C 排桩的桩顶轴力分布和 E 排桩的桩顶轴力分布不一样, A 排桩与 C 排桩的中桩桩顶轴力依次随模型 B、模型 C、模型 F、模型 D、模型 E、模型 G 及模型 H 比相邻前一个模型相对应的桩要小, 而其边桩的桩顶轴力以及 E 排桩的桩顶轴力依次比相邻前一个模型相对应的桩要大。因而, 各排桩的桩顶轴力随整体相对刚度增大而其分布越凹, 即各排桩桩顶轴力分布越不均匀, 角桩、边桩及中桩的桩顶轴力差别越大; 对于 A 排桩和 C 排桩, 在斜腿位置处的桩桩顶轴力随整体相对刚度增大而减小, 远离斜腿位置处的桩桩顶轴力随整体相对刚度增大而增大。

模型 D、模型 E 及模型 F 各计算模型与模型 C 各桩桩顶轴力进行比较, 在成桥阶段和两倍设计荷载下其相对应的各桩桩顶轴力差值 (所谓差值均指绝对值), 在角桩和边桩处较大, 而在中桩处差值较小, 绝大多数桩桩顶轴力差值在 2% 之内, 少数部分在 2%~4%, 但差值均不超过 4%; 模型 G 和模型 H 的 E1 桩桩顶轴力在成桥阶段时比模型 C 的 E1 桩分别大 9.8% 和 11.2%, 在两倍设计荷载时分别大 14.7% 和 18.5%, 其 C1 桩桩顶轴力桩在成桥阶段时分别大 7.4% 和 8.8%, 在两倍设计荷载时分别大 11% 和 14.7%, 而其它桩顶轴力差值均小于 8%。

模型 B 与模型 C 各桩桩顶轴力相比较, 除 A4 桩、A5 桩、A6 桩、A7 桩、C1 桩及 E1 桩的桩顶轴力差值在 10%~16%, 其它桩桩顶轴力差值均在 10% 内。因此, 可利用可压缩性垫层厚度来有效调整桩土应力比的复合地基加固机理来简述, 桩端土体压缩层厚度在满足一定厚度条件下, 桩端土体压缩层厚度继续增加对群桩基础桩顶轴力分布影响不大。

图 5 是承台竣工、成桥阶段及两倍设计荷载时各排桩桩端全部注浆、局部注浆及不注浆方案离心模型试验的各排桩桩顶轴力分布。可见, 桩端注浆与否对哑铃型承台群桩基础桩顶轴力分布影响不大。这是因为承台竖向荷载大部分由承台周边土层与其内部桩间土提供的侧摩阻力承担, 桩端刺入变形不大, 桩端土体变形主要以整体变形为主; 对于深厚覆盖土层中的大直径超长桩, 在一定土层深度下, 由于土层的力学性能相当好, 因超长桩荷载传递特性, 桩端无须嵌入坚硬岩层。不过, 对钻孔深度达到百米的泥浆护壁成桩工艺的灌注桩, 桩端注浆在桩端形成一定加固厚度的土层, 可从工程措施加固桩端沉碴, 确保成桩质量, 对于特大型工程具有重要的工程意义。

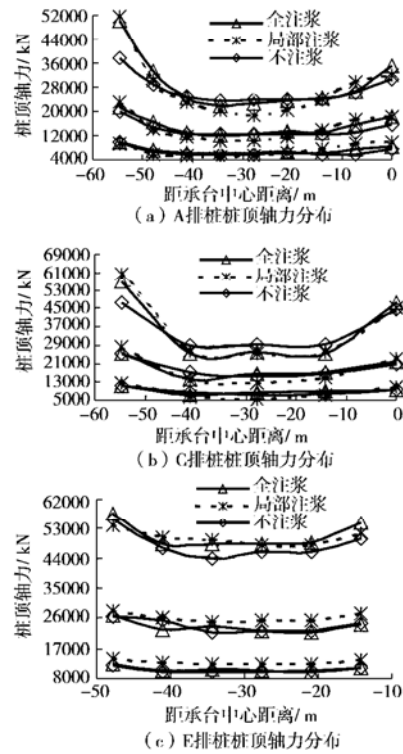


图 5 离心模型试验桩顶轴力分布

Fig. 5 Distribution of axial force of pile top of centrifuge models

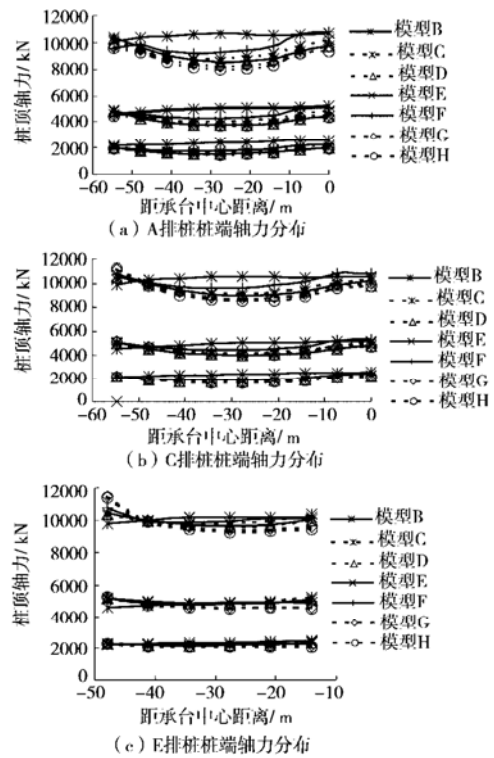


图 6 桩端轴力分布

Fig. 6 Distribution of axial force on pile tip of numerical models

图 6 是承台竣工、成桥阶段及两倍设计荷载时各排桩桩端轴力分布。模型 B 的各排桩桩端轴力分布呈微凸型。除模型 B 外各模型的 A 排桩和 C 排桩及 E 排桩的桩端轴力分布基本相同, 呈凹型。各排桩中桩

桩端轴力随模型 F、模型 C、模型 D、模型 E、模型 G 及模型 H 依次比相邻前一个模型相对应的桩要小，而其边桩的桩顶轴力依次比相邻前一个模型相对应的桩要大。将各计算模型的各桩桩端轴力相应的与模型 C 的桩进行比较，可获知，除模型 G 和模型 H 中的 E1 桩在两倍设计荷载时其差值稍大于 10%，其它桩均不超过 10%，且大多数桩桩端轴力差值不超过 5%；模型 B 与模型 C 相对应的桩桩端轴力差值绝大多数不超过 20%。

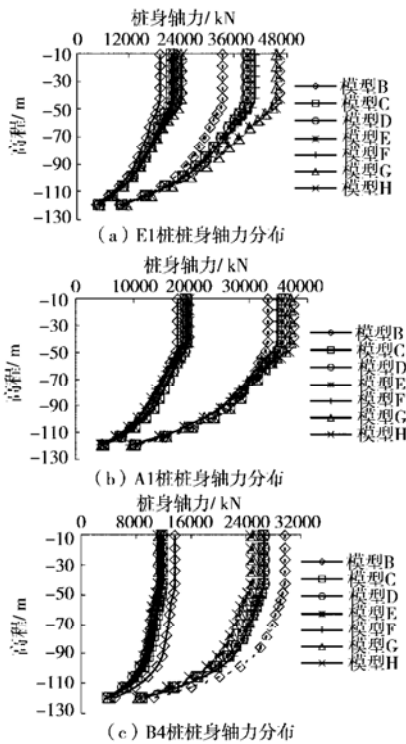


图 7 角桩、边桩及中桩桩身轴力分布

Fig. 7 Distribution of axial force of corner piles, edge piles and middle piles

图 7 为角桩、边桩及中桩在成桥阶段和两倍设计荷载时桩身轴力分布。模型 C 的桩身轴力大小和分布与模型 D 和模型 E 相应的桩身轴力大小差值相差不多，与模型 B 相应的桩身轴力差值相差较大，与模型 A 相应的桩身轴力相差非常大。因而，在桩端土体压缩层厚度一定条件下，桩身轴力大小与分布随桩端土体压缩层深度增大而影响不大。将模型 C、模型 D、模型 E 各桩桩身轴力相对应的与模型 F、模型 G、模型 H 的桩进行比较，除部分角桩和边桩影响较大外，其它桩影响较小。可见，群桩基础周围外侧土体水平范围大小达到一定值条件下，群桩基础周围外侧土体水平范围尺寸增大对桩身轴力大小与分布的影响不大。

从群桩基础各桩桩身受力大小与分布的角度，设计的离心模型试验模型尺寸是满足工程设计要求。从

桩顶轴力分布、桩端轴力分布及桩身轴力分布，当桩端土体压缩层厚度达到 1/4 桩入土长度和群桩基础周围外侧土体水平范围大小达到 1/3 承台宽度（横桥向）时，成桥阶段时模型边界对哑铃型承台群桩基础各桩桩身轴力大小与分布影响较小。

2.2 模型边界对变形特性影响

2.2.1 桩土相对位移

图 8 为角桩、边桩及中桩的桩土相对位移在成桥阶段和两倍设计荷载时沿整个桩身的分布。可见，群桩的荷载传递特性，与单桩的荷载传递性状相反。因桩距径比较小，高桩承台各桩桩土相对位移沿桩身分布特性：靠近冲刷面 1/4 桩入土长度范围内桩土相对位移从上往下逐渐减小，桩身中部的 1/2 桩入土长度范围内的桩土相对位移从上往下逐渐增大，靠近桩端 1/4 桩入土长度范围内的桩土相对位移从上往下迅速增大；桩身中部桩土相对位移较小，而桩身下部较大。对于中桩桩土相对位移沿桩身分布，各计算模型基本相同；对于边桩与角桩桩土相对位移，模型 F、模型 G 及模型 H 靠冲刷面处的桩土相对位移，相应的比模型 C、模型 D 及模型 E 靠冲刷面处的桩土相对位移要大很多，而靠桩端下部两两桩土相对位移相差不大。这说明设计的离心模型水平截面尺寸未满足群桩基础外侧土体竖向变形影响范围的要求，导致模型边界对角桩与边桩的桩土变形特性影响较大，而对中桩桩土变形特性影响较小。因而，模型边界对角桩与边桩桩侧摩阻力沿桩身分布与发挥有较大影响，而对中桩影响较小。

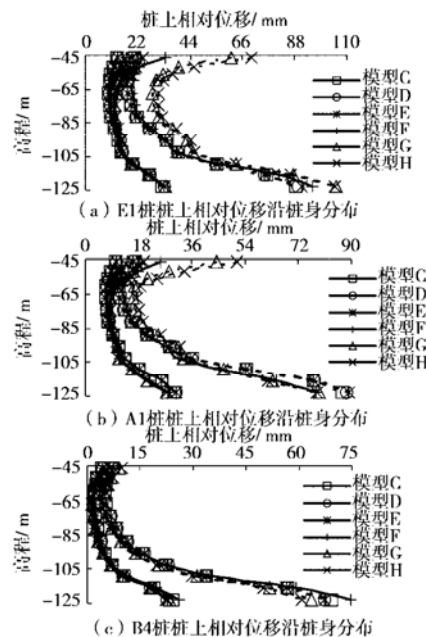


图 8 角桩、边桩及中桩桩土相对位移沿桩身分布

Fig. 8 Relative displacement of pile-soil of corner piles, edge piles and middle piles

图 9 是成桥阶段各排桩在冲刷面处桩土相对位移分布。各计算模型的 A 排桩和 C 排桩及 E 排桩在冲刷面位置处桩土相对位移分布基本相同, 呈凹型。模型 C、模型 D 及模型 E 各相对应的桩在冲刷面处的桩土相对位移差别不大, 而模型 F、模型 G 及模型 H 各相对应的桩土相对位移差别较大, 且相同的桩端压缩层厚度时, 水平截面边界较大的模型的桩土相对位移比其边界较小的模型相对应的桩要大。可见, 桩端土体压缩层达到一定厚度时, 桩端土体压缩层厚度增加对冲刷面处的桩土相对位移影响较小; 当水平截面边界尺寸未达到一定值时, 水平截面尺寸大小对冲刷面处的桩土相对位移有一定的影响。对于大直径钻孔灌注桩, 成桥阶段和两倍设计荷载时, 冲刷面位置处中桩土相对位移不到 1 cm, 以及桩土相对位移沿桩身分布的规律, 说明中桩靠冲刷面 1/2 桩入土长度范围内的桩侧摩阻力未发挥。

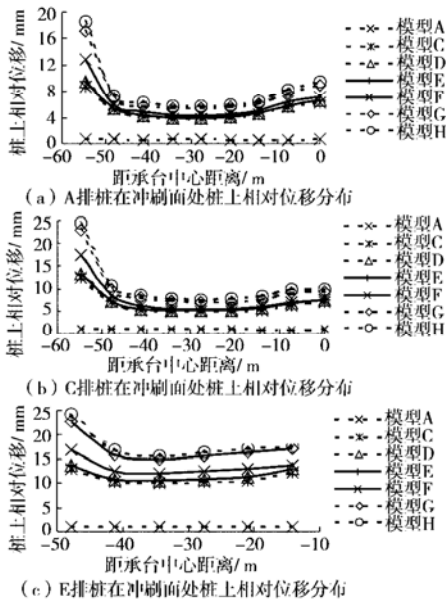


图 9 各排桩在冲刷面处桩土相对位移分布

Fig. 9 Relative displacement of pile-soil interface at the scour plane

图 10 是承台竣工、成桥阶段及两倍设计荷载时各排桩桩端处相对位移分布。各模型的 A 排桩和 C 排桩及 E 排桩的桩端桩土相对位移分布基本相同, 呈凹型。各排桩中桩桩端桩土相对位移随模型 F、模型 C、模型 D、模型 E、模型 G 及模型 H 比相邻前一个模型相对应的桩要小, 而其边桩的桩土相对位移依次比前一个模型相对应的桩要大。两倍设计荷载时, 角桩、边桩及中桩桩端桩土相对位移均超过 65 mm, 以及桩土相对位移沿桩身分布的规律, 说明靠桩端处 1/4~1/3 桩入土长度范围内的桩侧摩阻力较充分发挥。成桥阶段时, 尽管各桩靠桩端处桩土相对位移相应的比冲刷

面处大的较多, 但其靠桩端处桩侧摩阻力仍未发挥充分。

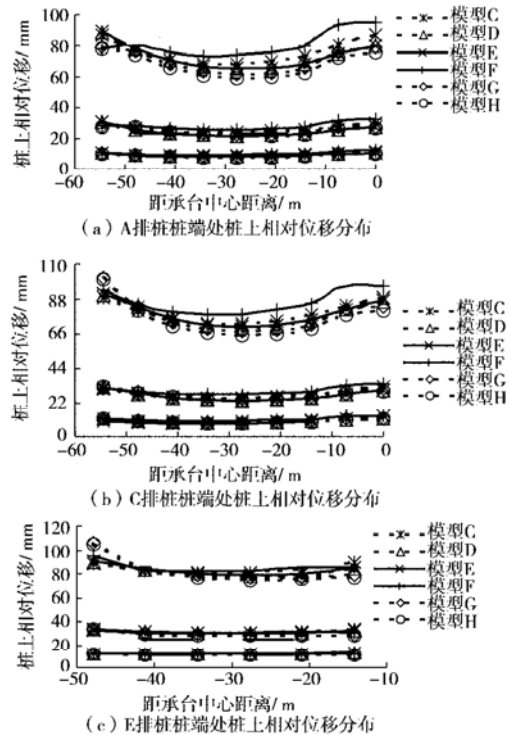


图 10 各排桩桩端处桩土相对位移分布

Fig. 10 Relative displacement between piles and soil at the pile-tip plane

2.2.2 群桩基础周围外侧土体竖向变形影响范围

图 11、12 分别是成桥阶段和两倍设计荷载时冲刷面位置处土体竖向位移沿横桥轴线和纵桥轴线的分布。可见, 群桩基础周围外侧土体竖向变形影响范围随荷载增大而变大, 在外侧土体半倍承台宽度范围内, 土体的竖向位移衰减迅速, 其衰减量占绝大部分 (达 90%), 而在外侧土体半倍承台宽度至一倍承台宽度范围内土体, 其竖向位移衰减很小部分, 大概在 10%之内; 在相同荷载下, 群桩基础周围外侧土体竖向变形影响范围随桩端土体压缩层厚度增加而变大。成桥阶段时, 模型 F 群桩基础外侧土体竖向变形影响范围为半倍承台宽度大小范围, 而模型 H 在一倍承台宽度大小范围内。群桩基础桩间内土体的竖向位移呈锯齿型分布。各计算模型计算域的侧界水平向约束, 而垂直方向不约束, 因模型 C、模型 D 及模型 E 群桩基础外侧土体 (横桥向) 范围为 23.3 m, 尽管靠近边桩附近外侧土体的变形规律与有充足范围外侧土体的变化规律相同, 但靠近计算域侧界附近的土体的竖向变形非常小, 其土体竖向位移近似为平行线, 其规律与有充足范围外侧土体的变化规律不相同, 说明群桩基础外侧土体范围不充足时会对外侧土体的竖向变

形规律影响较大，而对群桩基础桩间土体的变形特性影响较小。对于离心模型试验，因模型箱边壁即使采用涂油脂等降低摩擦措施，仍不能消除侧壁的摩擦，离心模型试验中的群桩基础外侧土体竖向变形规律可能与模型 C 的外侧土体变形规律不相同，从机理分析其变化规律特性与模型 F 的外侧土体竖向变形规律相类似，因而设计的离心模型试验边界对边桩与角桩的受力有影响，但影响不大。因此，对于置于 300 m 深厚覆盖土层的哑铃型承台群桩基础，成桥阶段时其群桩基础外侧土体竖向变形影响范围为一倍横桥向承台宽度。

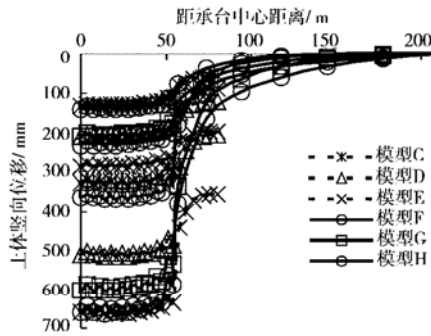


图 11 冲刷面处土体竖向位移沿横桥轴线分布

Fig. 11 Vertical displacement of the scour plane in transverse direction

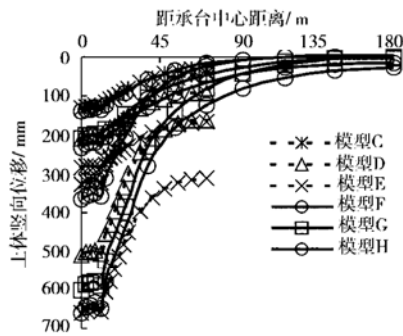


图 12 冲刷面处土体竖向位移沿纵桥轴线分布

Fig. 12 Vertical displacement of the scour plane in longitudinal direction

2.2.3 桩端土体压缩层影响深度

承台沉降由桩端土体以下压缩层变形、桩端刺入变形及桩身压缩变形组成的。桩端整体压缩变形比(桩端土体以下压缩层压缩变形与承台沉降之变形比)随承台荷载增大而减小；模型 C 与模型 F、模型 D 与模型 G 及模型 E 与模型 H 的两两计算模型的桩端整体压缩变形比，在各相对应的荷载阶段基本相同（见图 13）。随桩端土体压缩层厚度增大，桩端整体压缩变形比开始增长迅速，随后随着压缩层厚度达到 40 m 厚后，其增长较缓慢（见图 14）。在桩端土体压缩层厚

度为 35, 100 及 180 m 时，桩端整体压缩变形比在成桥阶段时分别是 61.2%、78%及 81%。从群桩基础桩间土体竖向位移沿深度的分布（见图 15）也可看出，土体竖向位移主要是由桩端土体压缩变形引起的，靠冲刷面 1/2 桩入土长度范围内桩间土体的压缩变形很小，而靠桩身下半部的桩间土压缩变形较大。

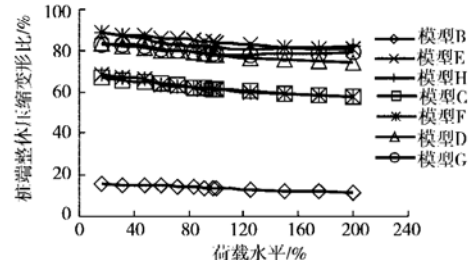


图 13 桩端整体压缩变形比随荷载水平变化

Fig. 13 Compressive deformation ratio of pile tip versus load level on pile-cap

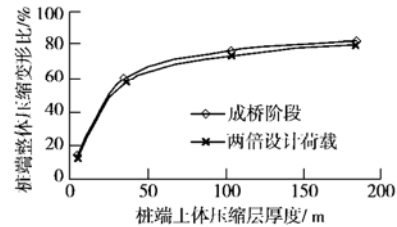


图 14 桩端整体压缩变形比随桩端土体压缩层厚度变化

Fig. 14 Compressive deformation ratio of pile tip versus thickness on compressive stratum under pile tip

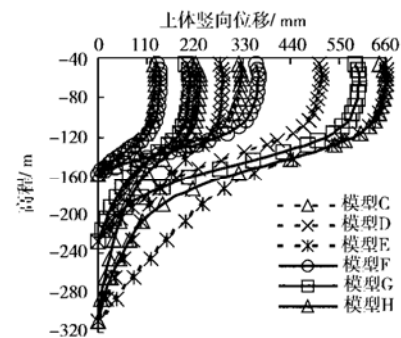


图 15 成桥阶段和两倍设计荷载时哑铃型承台一端中心位置处土体竖向位移沿深度的分布

Fig. 15 Vertical displacement of soil versus elevation at the center of dumbbell shaped pile-cap

从土体竖向变形沿深度的变化规律、承台沉降与桩端土体压缩层厚度关系曲线、以及桩端整体压缩变形比与桩端土体压缩层厚度关系曲线等方面说明，桩端土体压缩层达到一定厚度后，因群桩基础桩端的附加应力传递到该深度以下非常小使得其压缩变形较小，承台沉降量增加很小。桩端土体整体压缩变形在承台沉降占大部分，而桩端刺入变形与桩身压缩变形

之和只占小部分。因而,根据承台群桩基础桩端土体实际压缩层厚度,可利用数值模拟分析成果来深入分析离心模型试验成果,修正离心模型试验的承台沉降和桩端整体压缩变形比等方面的物理量。

3 结 语

(1) 在荷载作用位置、荷载作用方式、群桩几何尺寸及土体特性等一定下,当群桩基础周围外侧土体水平范围大小和桩端土体压缩层厚度满足一定值后,其值继续增大对群桩基础承载变形特性影响不大。

(2) 对于置于 300 m 深厚覆盖土层中的大型哑铃型承台群桩基础,当群桩基础外侧土体水平范围和桩端土体压缩层厚度,分别为 1/3 承台宽度(横桥向)和 1/4 桩入土长度,其范围与深度继续增大对成桥阶段时桩身轴力的大小与分布的影响不大;从承台沉降、群桩基础外侧土体竖向变形及桩端整体压缩变形比等变形特性,成桥阶段时大型哑铃型承台群桩基础外侧土体竖向变形影响范围和桩端土体压缩层影响深度,分别为一倍横桥向承台宽度大小和一倍桩长长度。

(3) 群桩基础边界大小由群桩基础变形特性控制,设计的离心模型试验边界对成桥阶段时大型哑铃型承台群桩基础桩身受力大小与分布影响不大,而对承台沉降和桩端土体整体压缩变形比等变形特性影响较大。

参考文献:

[1] 刘金砺,黄强,李华,高文生. 竖向荷载下群桩变形性状及沉降计算[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(6): 1 - 13. (LIU Jin-li, HUANG Qiang, LI Hua, GAO Wen-sheng. Deformation behaviour and settlement calculation of pile

group under vertical load [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(6): 1 - 13. (in Chinese))

- [2] 曾友金,章为民,王年香,郑澄锋. 桩基模型试验研究现状[J]. 岩土力学, 2003, 24(增 2): 674 - 680. (ZENG You-jin, ZHANG Wei-min, WANG Nian-xiang, ZHENG Cheng-feng. Review on the state-of-the-art of model test of pile foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(S2): 674 - 680. (in Chinese))
- [3] 曾友金,章为民,王年香,徐光明. 某大型哑铃型承台群桩基础与土体共同作用竖向承载变形特性数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(10): 1129 - 1135. (ZENG You-jin, ZHANG Wei-min, WANG Nian-xiang, XU Guang-ming. Numerical analysis of interaction between dumbbell shaped pile-cap and group piles in a super large bridge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(10): 1129 - 1135. (in Chinese))
- [4] 王年香,章为民. 苏通长江公路大桥主桥索塔群桩基础与土体共同作用离心模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2004: 1 - 49. (WANG Nian-xiang, ZHANG Wei-ming. Centrifuge modeling of interaction between dumbbell shaped pile-cap and group piles in Sutong bridge[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2004: 1 - 49. (in Chinese))
- [5] 曾友金,章为民,王年香,徐光明. 运营期船桥碰撞时大型哑铃型承台群桩基础承载变形特性[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(5): 575 - 581. (ZENG You-jin, ZHANG Wei-min, WANG Nian-xiang, XU Guang-ming. Characteristic of dumbbell shaped pile-cap and group piles during collision of ship and bridge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(4): 575 - 581. (in Chinese))