

DOI: 10.11779/CJGE201611019

# 桥梁逆作承台-群桩复合基础应用与现场实测研究

过超<sup>1,2</sup>, 付佰勇<sup>1,2</sup>, 袁洪<sup>1</sup>, 龚维明<sup>3</sup>

(1. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088; 2. 公路长大桥建设国家工程研究中心, 北京 100088; 3. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:**为进一步研究逆作复合基础在桥梁工程中的适用性,开展了桥梁逆作承台-群桩复合基础的实桥应用研究,针对有水和无水的施工环境,分别提出了桩与承台间预留孔采用带剪力连接键的钢护筒和收口网模板的构造设计与连接施工工艺,并通过 12 组接头承载性能试验验证了工艺方案的可靠性。通过现场实测,揭示了桥梁逆作承台-群桩复合基础受力机理,测试结果表明:采用逆作方案,先施工桩基和预留桩孔的承台,待盖梁施工完成后再封桩,使桩与承台形成整体共同参与受力,能够使封桩前承台底土承担上部荷载,有效发挥浅层地基土的承载能力;封桩后,基础沉降增量和承台底土压力增量均明显减缓,继续增加的上部荷载主要由桩基承担,能够有效控制封桩后桥梁沉降。

**关键词:**现场实测;逆作;承台-群桩复合基础;承载性能

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)11-2085-08

**作者简介:**过超(1984-),男,高级工程师,主要从事桥梁基础工程等方面的设计和科研。E-mail: guochao@hpdi.com.cn。

## Application and field tests of cap-pile combined foundation with reversed construction

GUO Chao<sup>1,2</sup>, FU Bai-yong<sup>1,2</sup>, YUAN Hong<sup>1</sup>, GONG Wei-ming<sup>3</sup>

(1. China Communication Highway Planning and Design Institute, Beijing 100088, China; 2. Bridge National Engineering Research Centre, Beijing 100088, China; 3. School of Civil Engineering Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** To further study the applicability of the cap-pile combined foundation in bridge engineering, the application of the cap-pile combined foundation with reversed construction in bridges is carried out. For water and dry construction environments, the structural design and construction technology of the closing net template and steel tube with shear connectors of pile cap prepared hole are proposed, and the reliability of the technological scheme is verified through 12 groups of model tests. The load bearing behavior of the cap-pile combined foundation with reversed construction is revealed by the field tests. The results indicate that the combined foundation, which first constructs piles and the cap with prepared hole, and then make connection between piles and pile cap to shear upper load together after bent cap finished, can make the subsoil of pile cap bear the upper load and take full advantage of the bearing capacity of shallow soil. The increments of foundation settlement and soil pressure significantly decrease after pile connection, and then the increasing upper load is mainly borne by the piles, which can effectively control the settlement of bridges.

**Key words:** field test; reversed construction; cap-pile combined foundation; load bearing behavior

## 0 引言

传统的桥梁桩基础一般采用先打桩后施工承台和桥墩的施工工艺,设计中认为上部荷载全部由桩承担而不考虑承台底土的承载能力,因此需要较多的桩数来满足承载力和沉降要求。为充分发挥地基承载力,工程界常采用复合桩基<sup>[1-5]</sup>,通过采用大桩距、使桩先进入极限状态等方式来提高地基土承担荷载的比例。

桥梁逆作复合基础由扩大基础(如承台、预制沉箱等)与桩(如钻孔桩、打入桩等)组成。施工时,当采用沉桩(钢管桩、预应力混凝土桩等)方案时,

首先在桥位处开挖基槽,抛石形成防冲碎石垫层,然后在垫层上施工扩大基础,基础中预留有沉桩孔,待基础完成后,施工桥墩(或桥塔),在主梁合龙前的适当阶段进行桩的施工,并通过在预留孔中灌注混凝土等措施使基础与桩连成一体,共同受力;当采用钻孔桩方案时,首先进行钻孔桩施工,成桩后再施工扩大

基金项目:“十二五”交通运输重大科技专项项目(2011318494160);  
交通运输部建设科技项目(2014318494020);中国交建科技研发项目  
(2013-ZJKJ-08)

收稿日期:2015-09-28

基础,基础中桩位处预留封桩孔(桩与扩大基础先不连接),待基础完成后,施工桥墩(或桥塔),在主梁合龙前的适当阶段进行封桩施工,并通过在预留孔中灌注混凝土等措施使基础与桩连成一体,共同受力。该类型基础适用于基底土为具有一定承载能力的土层(黏性土、粉土、砂土等)、桩基为摩擦桩的设计条件。所采用的“桩与扩大基础后连接”的施工工艺称为“逆作”施工工艺,通过合理选择封桩时间能较大幅度地发挥基础底土体的承载特性,从而降低桩基规模,并使基础在施工期完成大部分沉降,减少工后沉降。此外,复合基础的构件(如承台、沉箱、桩)可考虑工厂预制、现场安装,具有节能环保的特点,为环境友好、资源节约型桥梁工程建设提供了新的技术思路。

文献[6]以琼州海峡跨海通道工程为背景,提出了一种带有预留孔的预制沉箱与后打入钢管桩连接的沉箱+桩逆作复合基础方案。文献[7,8]针对该类基础型式开展了室内模型试验、设计计算方法等系列研究。但对于逆作复合基础应用于桥梁工程中量大面广的承台-桩基础并未涉及。

本文在上述研究的基础上,开展了承台-桩的桥梁逆作复合基础应用研究,并结合依托工程开展承载性能现场实测,拓展了逆作复合基础的应用范围,为桥梁逆作复合基础在实际工程中的推广应用积累经验。

## 1 应用工程介绍

选取内蒙古沿黄一级公路大路至树林召段大路新区公铁立交桥作为依托工程。岩土体的物理力学指标如表1所示,地下水位一般在地表以下20 m左右。场地表层为细砂,基本容许承载力可达160 kPa,表层以下主要为不同风化程度的砂岩,可通过逆作施工工艺,先施工承台及部分上部结构,再完成桩与承台的连接来实现浅层地基土承载力的有效利用,从而减小桩分担的荷载,减少桩长和桩径。

表1 岩土体的物理力学指标

Table 1 Parameters of rock and soil

岩土名称	天然重度	压缩模量	基本容许承载力	桩周摩阻力标准值	桩端承载力标准值
	/(kN·m <sup>-3</sup> )	/MPa	/kPa	/kPa	/kPa
细砂	14.5	5.8	160	25	
粉砂	18.2	11.8	160	45	400
细砂	18.8	13.4	180	50	600
全风化砂岩	19.5	16.2	240	45	800
强风化砂岩	22.6	27.8	500	60	1800

选取#3墩基础采用承台-群桩复合基础方案进行设计和施工。#3墩采用直径1.8 m的双柱墩,墩底承台尺寸(长×宽×高=9.97 m×7.2 m×2.5 m),承台底

为4根直径1.2 m的钻孔桩基础,设计桩长为42 m,桩端持力层为强风化砂岩。

## 2 逆作复合基础的构造设计与施工

### 2.1 逆作复合基础的构造设计

逆作复合基础的承载力、沉降计算方法在文献[3]中已有详细推导,本文不再赘述。由于承台-群桩逆作复合基础采用在承台上预留桩孔(图1),桩与承台通过二次浇筑形成连接,因此二者之间连接的可靠性是保证能否实现设计意图的关键,将预留孔构造设计详述如下。

当承台-群桩逆作复合基础处于水中,可采用比桩径更大的钢护筒(具体尺寸根据施工及受力要求确定)作为预留孔的施工模板,浇筑成型预留孔,后期向钢护筒内填充微膨胀细骨料混凝土完成封桩。因此钢护筒不仅作为预留孔成型时的围护支撑结构,而且作为受力构件在封桩后直接参与受力,需进行专门的构造设计及验算。关于剪力连接键与钢管和混凝土的连接性能,可参照组合结构的设计方法进行设计。参照美国石油协会编写的《海上固定平台的规划、设计和建设——应力设计手册》给出的关于钢管桩与桩芯混凝土的计算方法<sup>[9]</sup>,有剪力连接键时,计算钢管与内壁混凝土的黏结强度采用如下公式:

$$f_{pc,d} = 0.184 + 0.67 f_{cu} \times \frac{h}{s} \quad (1)$$

式中  $f_{cu}$  为混凝土无侧限抗压强度设计值(MPa);  $h$  为剪力键突出的尺寸(mm);  $s$  为剪力键间距(mm)。

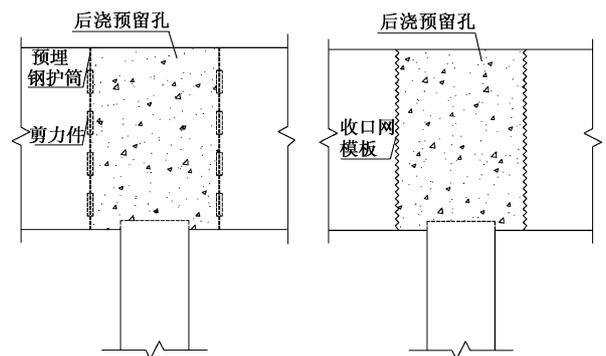


图1 预留孔构造示意图

Fig. 1 Configuration of prepared hole

当逆作复合基础处于陆上环境中时,对于预留孔的施工是有利的。可采用收口网模板作为预留孔的施工模板,浇筑成型预留孔(为便于施工可将预留孔设置为方孔),后期向收口网模内填充微膨胀细骨料混凝土完成封桩。收口网模板亦不仅作为预留孔成型时的围护支撑结构,而且也作为受力构件在封桩后直接参与力的传递。在预留孔浇筑时,因本身的特殊网孔,可直接观察浇注过程,降低孔隙和蜂巢出现的风险。

浇注时砂浆通过网眼格孔渗透到界面而成一种抗剪性能非常理想的粗粒界面。收口网所形成楔形界面的黏结及剪切强度与人工清凿处理效果相同, 可以严格控制接缝的质量要求。因此采用收口网模板施工的后浇预留孔施工方便, 界面黏结有保障, 且可方便地预留受力及构造钢筋, 结构受力可靠。

根据传统习惯, 建筑物桩基础顶嵌入承台的长度只需 5~10 cm, 桩顶主筋锚入承台 30 d 可形成介于铰接与刚接之间的连接方式, 即可传递剪力, 也可传递一部分弯矩。对于采用灌注桩的逆作复合基础, 可将桩顶主筋伸入承台保证两者之间的连接; 采用预制桩时, 承台的钢筋可与带剪力键的钢护筒外壁焊接, 预制桩桩头可采用插筋并与钢护筒内壁进行焊接。

由于本依托工程承台底面位于地下水位以上, 为便于施工操作, 根据承台尺寸及群桩布置, 将承台四角桩位处 2.4 m×2.4 m 正方形区域作为预留孔区, 每个预留孔外角两边采用常规钢模板支护, 与先浇承台相连部分的两边采用收口网模板支护。其他关于承台和桩基验算及配筋计算按现有规范执行即可, 本文不详细列出。最终形成的桩与承台连接构造如图 2 所示。

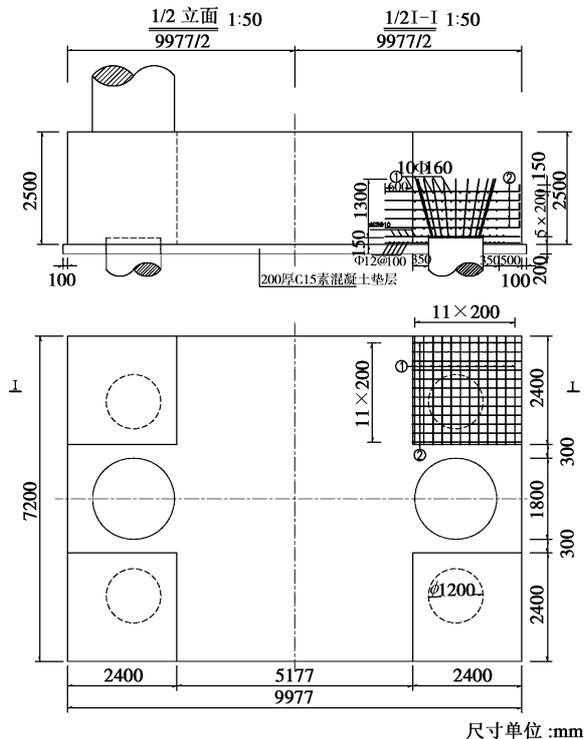


图 2 桩与承台连接构造图

Fig. 2 Configuration of connection between pile and cap

### 2.2 逆作复合基础的施工

逆作复合基础的桩基采用预制桩和灌注桩均可。由于沿黄一级公路大路至树林召段所有桥梁基础均采用钻孔灌注桩, 具备钻孔灌注桩的各类施工装备, 施

工人员具有丰富的施工经验, 因此结合沿线工程的特点, 本依托工程逆作复合基础亦采用钻孔灌注桩。

承台-群桩逆作复合基础的一大特点在于桩基与承台的后连接, 前期施工的承台及上部结构荷载全部由承台底地基土承担, 当达到预定的封桩时机时完成承台与桩之间的连接, 实现逆作的理念, 封桩后继续增加的荷载根据刚度在桩与地基土之间进行分配。考虑到地基土承担外部荷载将存在一定的附加应力, 如果先施工承台, 再进行钻孔, 容易引起孔壁不稳定, 故采取先施工钻孔灌注桩, 再浇筑承台并预留桩与承台间连接孔的构造, 使封桩前荷载均由承台底土承担。

封桩的具体时机有两种, 一种为桩基施工完成后立即封桩, 另一种则为延后封桩, 一般采用延后封桩。封桩越晚, 则土体承受荷载增加, 封桩后原来由土体承受的荷载向桩体的转移量将减少, 这种作法可以更明确控制桩土荷载分担比例。沉桩后迅速封桩, 则在封桩前施加荷载作用下的固结沉降尚未完成, 将有更多荷载发生转移, 增加了桩体受力, 相应对桩数和桩长的要求也会有所提高。当然, 如果前期荷载下测得的基础沉降值偏大, 则可以沉桩后立即封桩, 使桩体刚度提前介入以减少沉降。具体原则如下: ①封桩时要求基底压力平均值不应大于地基承载力容许值的一半, 如监测发现基础的沉降及差异沉降超过预估值, 应及时封桩; ②封桩应采用高于承台混凝土强度等级的微膨胀早强混凝土; ③封桩施工应严格按照设计及监控要求进行, 施工临时机具布置应按照对称原则布置。

计算得到不同封桩时间点对应的封桩时和成桥后基底平均压应力值如表 2 所示, 从表 2 中可看出, 选择盖梁浇筑完成后且基础沉降稳定时进行封桩地基土承载性能发挥最充分, 因此综合考虑施工工期及工序的安排, 选择盖梁浇筑完成后开始箱梁施工前完成封桩。

表 2 逆作复合基础不同封桩时机分析

Table 2 Analysis of different connections between pile and cap

封桩时间点	承台施工完成	浇筑双墩完成	浇筑盖梁完成	成桥
封桩时的基底平均压应力 /kPa	62.5< [f <sub>a0</sub> ]	88.2< [f <sub>a0</sub> ]	106.8< [f <sub>a0</sub> ]	345.8> [f <sub>a0</sub> ]
成桥后的基底平均压应力 /kPa	73.9< [f <sub>a0</sub> ]	98.6< [f <sub>a0</sub> ]	116.4< [f <sub>a0</sub> ]	345.8> [f <sub>a0</sub> ]

当盖梁浇筑完成后, 再进行承台预留孔的浇筑, 实现桩与承台的可靠连接, 继续施工的箱梁及桥面荷载由桩与承台底土共同承担。部分现场施工过程如图 3, 4 所示。



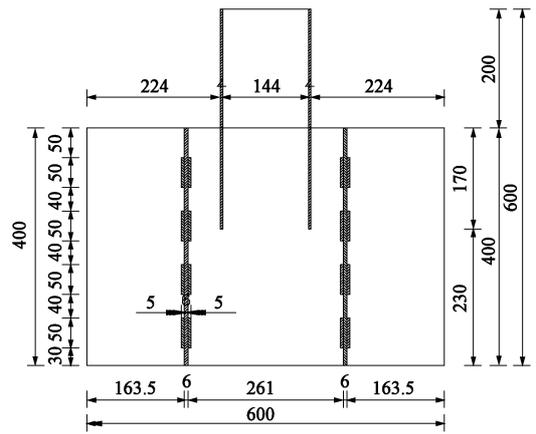
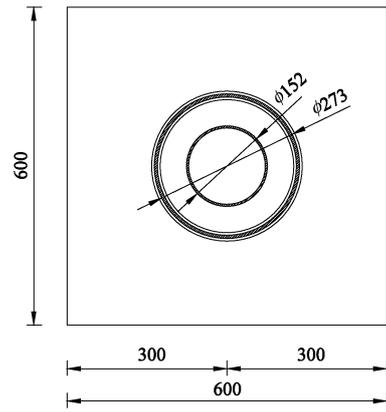
图3 封桩前承台外观

Fig. 3 Appearance of pile cap before connection



图4 收口网模板及预留孔钢筋布置

Fig. 4 Closing net template and reinforcement of prepared hole



尺寸单位: mm

(a) 带剪力键的钢护筒施工预留孔模型图

### 3 预留孔接头握裹力试验研究

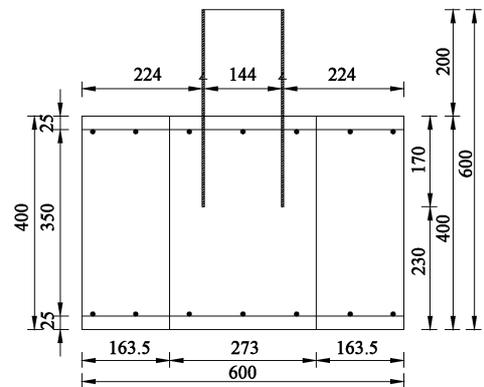
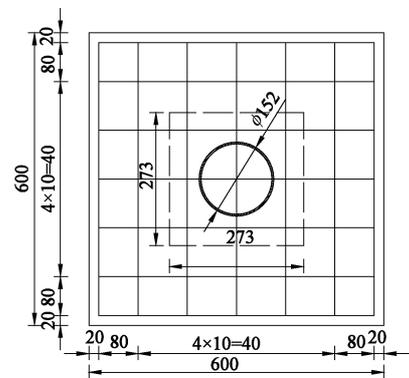
#### 3.1 试验方案

为验证以上两种构造形式的接头受力可靠性, 按 1:8 的比例制作了试验模型, 钢护筒采用  $\phi 273 \times 6$  mm 钢管模拟, 桩采用  $\phi 152 \times 4$  mm 钢管模拟, 剪力键采用  $\delta=5$  mm 厚钢板, 材质均为 Q235, 整个模型尺寸为  $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ , 分别考虑采用有剪力键钢护筒、无剪力键钢护筒、收口网模板(预留孔内有配筋)、收口网模板(预留孔内无配筋) 4 种。模型制作时, 每种类型设置相同的 3 组模型(共 12 个模型)。混凝土施工时先立模浇筑套筒外(或收口网模板外)普通 C30 混凝土, 达到设计强度后再浇筑预留孔内的微膨胀 C30 细骨料混凝土。试验模型图如图 5 所示。

加载试验机采用全自动微机控制 YJW-10000 型压剪试验机, 为了保证测力的准确性, 在受力构件的顶部增加安装 0.3 级精度, 量程为 1000 kN 的测力环。加载试验总体布置如图 6 所示。

加载的总原则: 初期加载每级采用预估极限承载力的 1/10 进行加载, 接近初始滑移时采用 1/20 一级加载直至破坏, 每级荷载持荷时间为 120 s, 加载过程中采用精确压力传感器检验加载荷载的准确性。

承载力理论控制: 按最大裂缝宽度控制, 根据《钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 (JTG D62—2004)》<sup>[10]</sup> 规定, 钢筋混凝土构件, 其计算的最大裂



尺寸单位: mm

(b) 收口网模板施工预留孔模型图

图5 模型试件图

Fig. 5 Configuration of test models

缝宽度 I 类和 II 类环境不应超过 0.2 mm, III 类和 IV 类环境不应超过 0.15 mm。取试块桩基与承台之间最大裂缝宽度为 0.15 mm (相对位移) 时的荷载作为试件的极限承载力。试验时可根据应变计读数配合千分表读数判断。

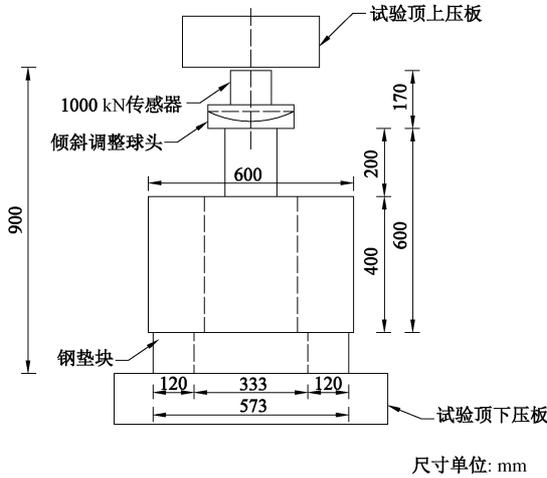


图 6 加载试验方案

Fig. 6 Scheme of loading tests

### 3.2 试验结果

根据以上试验原则, 对各类模型加载破坏荷载值、桩基与承台发生最大相对位移为 0.15 mm 时的荷载进行归纳汇总, 如表 3 所示。

表 3 试验结果汇总表

Table 3 Summary of test results

测试结果	破坏荷载值/kN	0.15 mm 对应的荷载值/kN	0.15 mm 对应的预留孔混凝土握裹力/kPa
无剪力键	500	400	1166
带 50 mm 剪力键	760	625	1822
收口网 (无配筋)	640	525	1202
收口网 (有配筋)	900	620	1419

在使用钢护筒的模型中, 钢护筒与承台之间无剪力键的模型承载能力最小, 破坏状态时, 荷载值为 500 kN, 此时桩基与承台之间位移值为 0.75 mm; 带 50 mm 剪力键模型承载能力最大, 破坏荷载为 760 kN, 此时桩基与承台相对位移为 0.175 mm; 使用收口网模板且预留孔内设置配筋的模型承载能力较大, 破坏时荷载为 900 kN, 桩基与承台相对位移为 0.26 mm。

由表 3 计算结果可见, 钢护筒 (收口网模板) 与承台混凝土之间握裹力值均在 1000 kPa 以上, 对于钢护筒与混凝土之间的黏结力, 以往桥梁工程握裹力值通常取 150 kPa, 具有较大富余系数。本试验也验证了承台-群桩逆作复合基础的桩与承台之间采用钢护筒

或收口网模板作为预留孔的连接方式的可靠性。

## 4 现场实测研究

### 4.1 基础沉降观测

以承台顶面四边中点的沉降平均值作为基础平均沉降, 基础平均沉降随时间变化规律如图 7 所示。从图 7 中可看出, 基础沉降在每个阶段荷载增加后立即发生, 长期沉降很小。在承台浇筑完 6 h 后, 即发生 12 mm 沉降, 主要是对承台底表层土压密而产生的, 7 d 左右已达到稳定; 墩柱浇筑完发生 4 mm 沉降, 盖梁浇筑完增加 2 mm 沉降, 均为浇筑后当天完成; 通过调整支座垫石的标高, 使封桩前发生的 24 mm 承台沉降对箱梁施工后结构受力及构造不产生影响。封桩后至桥面铺装完成, 沉降增加 6 mm; 从开始施工承台至成桥, 基础总沉降为 30 mm, 且沉降已基本稳定。

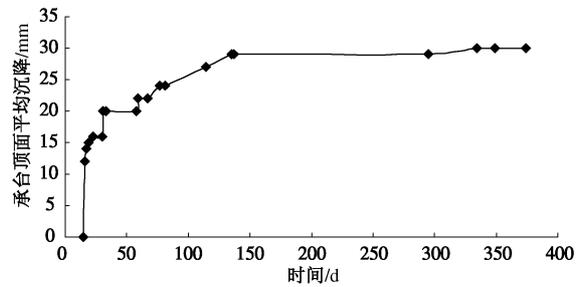


图 7 施工过程中承台顶面平均沉降随时间变化曲线

Fig. 7 Curve of settlement with time at top of pile cap during construction

图 8 为逆作复合基础荷载 - 位移曲线。从图 8 可以看出, 基础封桩前, 由于荷载全部由承台底地土承担, 对应的受力阶段类似于浅基础受力阶段, 地基土产生压缩变形引起的沉降较大, 且随着上部荷载的增大而增大。承台自重荷载引起的沉降达 16 mm, 但由图 7 可知其中的 12 mm 是在承台浇筑完后 6 h 内发生, 主要是由于承台底表层土体经过基坑开挖后人工回填至设计标高, 虽然采用水坠沙法及人工夯实使砂土密实, 但表层土与原状土相比仍有一定强度降低, 因此产生了较大的压密沉降, 后期仅发生 4 mm 沉降, 并在墩柱浇筑前沉降已达到稳定。封桩后, 盖梁施工前, 增加的荷载为承台 4 个预留孔的混凝土自重 1230 kN, 荷载少部分直接作用于承台底土, 大部分由桩承担; 封桩后至成桥上部荷载增加 8420 kN, 沉降仅增加 6 mm, 相对于封桩前 5570 kN 荷载引起的 24 mm 沉降, 沉降明显减小, 这是由于承台与桩形成了可靠的连接, 承台、桩、地基土处于共同作用阶段, 此后增加的上部荷载由桩和承台底土共同承担, 基础竖向支承刚度增加, 沉降减小。

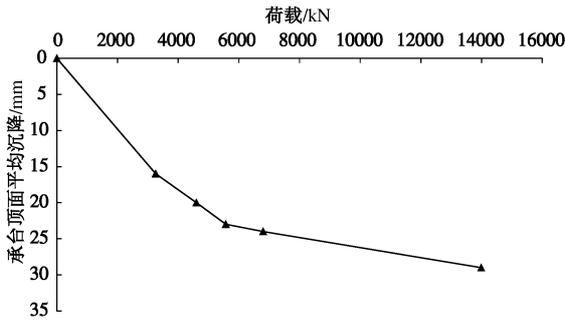


图8 逆作复合基础实测荷载 - 位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves for cap-pile combined foundation with reversed construction

### 4.2 承台底土压力观测

为了测试逆作复合基础受力过程中，承台底土压力的变化情况，按图9的布置方式埋设了土压力盒。

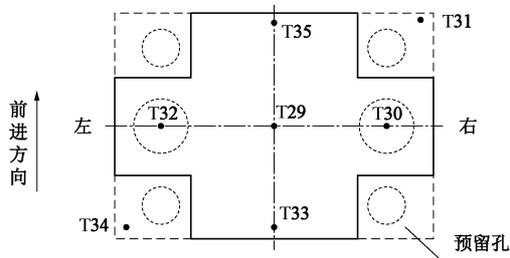


图9 承台底土压力盒布置方案

Fig. 9 Layout of soil pressure boxes under pile cap

图10给出了试验实测土压力分布曲线。从图10中土压力分布规律可以看出，承台底土压力呈不均匀分布，封桩前，承台边角处测点的土压力分布曲线基本都位于计算的平均土压力分布曲线之上，在荷载作用下，承台底土压力增长很快，但在封桩后形成复合桩基后，土压力盒数据增长速率立即减缓，曲线斜率较之前变得平缓，表明此时增加的上部荷载很大一部分由桩承担，分配给承台底土的压力较少。

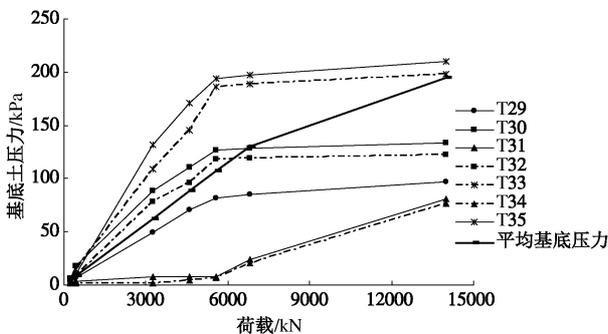


图10 逆作法复合基础承台底土压力变化曲线

Fig. 10 Variation of soil pressure under pile cap

传统桩基础及复合桩基必须使桩处于极限承载力状态下工作，之后土体的承载力才能被充分发挥<sup>[3-4]</sup>。而逆作复合基础通过承台与桩的后连接，无需使桩

到达极限状态，可通过封桩时间的选择来人为地控制桩土荷载分担比例，即充分发挥地基土的承载潜力，又能使得基础的安全度得到保障。

从图11, 12中的横桥向及纵桥向承台底土压力分布曲线可看出，承台底土压力呈“马鞍形”分布，这表明承台呈刚性基础的受力特性，有足够的架越作用，在调整基底沉降使之趋于均匀的同时，也使得基础在上部荷载作用下，基底压力发生了由中部向边缘的转移。封桩以后，由于桩的存在，其周围的土压力分布受到一定的影响，但整个基底土压力呈“马鞍形”分布的形态没有改变。封桩后，所有逆作复合基础的土压力随荷载增长曲线均出现一个明显的减缓阶段，这说明土压力分布情况不仅与土性、承台刚度有关，还与桩刚度有关，这一阶段的荷载主要由桩承担，导致土压力增长都很缓慢，可以推测：随着桩刚度的增大，这一阶段的基底土压力的增幅将越小。

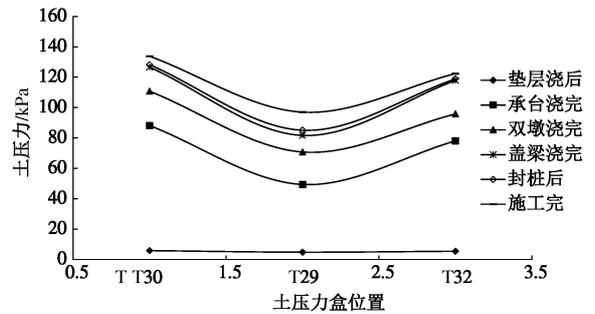


图11 横桥向承台底土压力分布曲线

Fig. 11 Distribution of soil pressure under pile cap in transverse direction of bridge

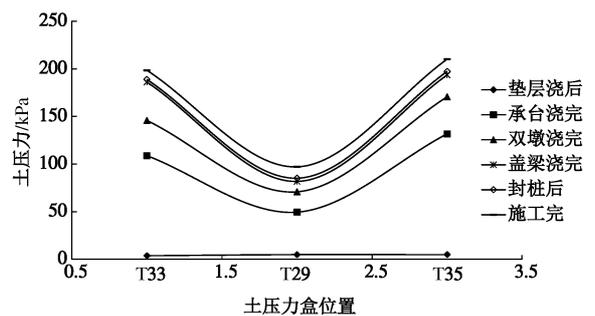


图12 纵桥向承台底土压力分布曲线

Fig. 12 Distribution of soil pressure under pile cap in longitudinal direction of bridge

### 4.3 桩基受力特性

取对角线上的两根桩进行测试。采用振弦式混凝土应变计观测，观测断面分别选取桩顶20 cm以下断面、桩中断面、桩底断面。封桩前，由于桩与承台还未进行连接，桩顶是自由的，桩不直接承受上部荷载，此阶段所有上部荷载仍由承台直接传递给与承台底相

接触的地基土, 为了研究这一阶段桩体的受力特性, 通过现场观测发现, 此阶段桩顶发生相对于承台向上的刺入变形, 对桩身应变测试数据整理可以得到封桩前桩身轴力。由于封桩前, 承台底土受力而桩顶并不受力, 土下沉而桩不下沉(相对), 因而在桩身将产生一拽着桩下沉的力, 即负摩阻力。由图 13 可看出, 封桩前的桩身轴力从桩顶沿深度逐渐由 0 增至最大值, 此后轴力又逐渐沿深度减小, 由于桩身应力计埋设截面数量有限, 不能判断桩身中性点位置。封桩后, 桩直接参与受力工作, 桩身轴力由上至下从大到小逐渐减小。

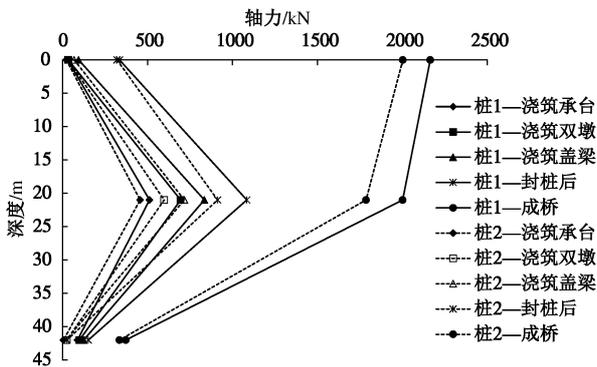


图 13 实测桩身轴力图

Fig. 13 Measured axial forces of pile shaft

成桥后桩 1 的桩顶反力大于桩 2, 取其平均值 2084 kN 作为基桩的桩顶反力, 可推算得成桥后桩分担的荷载为 8336 kN。封桩前, 桩身 1/2 桩长处轴力大于桩顶轴力, 表明桩身上部存在负摩阻力; 封桩后, 桩顶直接承担上部荷载, 轴力沿深度逐渐衰减。从测试结果看, 桩端轴力仅占桩顶荷载的 17% 左右, 荷载大部分由桩侧摩阻力承担。

#### 4.4 逆作复合基础桩土荷载分配规律

由前述的逆作复合基础依托工程的施工顺序可知, 封桩前受力阶段, 上部荷载全部由地基土承担, 桩并不直接参与荷载分担, 荷载在桩与土之间分配仅发生在封桩后的受力阶段。

表 4 给出了逆作复合基础依托工程封桩前后在每级荷载作用下的桩土荷载分担量及分担比例。本依托工程的封桩荷载为 5570 kN, 封桩前, 荷载全部由地基土承担; 封桩后, 桩分担荷载的比例由 0 逐渐递增至最大值 58.2%, 由表 4 可看出, 封桩后阶段增加的上部荷载 95% 以上分配给桩, 分配给承台底土的荷载较少, 基础发生的沉降量很小, 桩发挥了明显的承载和控制沉降的效果, 这是由于封桩后, 桩与承台形成一个整体, 根据位移协调原理可知, 桩顶的沉降增量等于承台的沉降增量, 在一定的基础沉降量下, 刚度越大的部分分配的荷载也越多。

表 4 逆作复合基础各施工阶段桩土荷载分担值

Table 4 Load distribution between pile and soil under construction

总荷载 /kN	封桩后荷载增量/kN	桩分担的荷载/kN	土分担的荷载/kN	桩分担荷载比/%	桩分担荷载增量比/%
3259.4	—	0	3259.4	0	0
4600	—	0	4600	0	0
5570	—	0	5570	0	0
6800	1230	984	5816	14.5	80
14320	8750	8336	5984	58.2	95.2

## 5 结论与建议

本文通过开展承台-群桩逆作复合基础在桥梁工程中的设计、施工及现场实测, 研究了其构造及施工要点及承载性能, 结论与建议如下:

(1) 本依托工程采用桥梁承台-群桩逆作复合基础, 封桩前, 上部荷载全部由承台底地基土承担, 封桩后, 增加的上部荷载在桩、土之间按刚度进行分配, 由于桩的竖向支撑刚度远大于承台底土, 桩体分担的荷载占荷载增量的 95% 以上, 实测桩与承台底土分担总荷载的比例分别为 58.2% 和 41.8%; 其中桩端轴力占桩顶分担荷载的 17%, 通过减小桩径和桩端进入持力层深度, 降低了钻孔深度, 桩基呈摩擦桩的受力特点。此外, 封桩后能够有效控制沉降, 且可以通过支座垫石高度微调, 消除封桩前承台沉降对箱梁施工后结构受力及构造的影响。

(2) 采用逆作复合基础结构, 承台与桩的连接至关重要。针对水中和陆上两类建设条件, 可分别采用内外壁带剪力连接键的钢护筒或收口网模板来保证预留孔后浇混凝土与桩和承台之间的可靠连接, 通过对微膨胀细骨料混凝土黏结握裹性能测试, 钢护筒(收口网模板)与承台混凝土之间握裹力值均在 1000 kPa 以上, 验证了上述连接的可靠性。

(3) 逆作复合基础依托工程封桩前沉降 24 mm 为承台底地基土的压缩变形引起, 箱梁施工前完成封桩, 封桩后桩与承台形成整体共同受力, 能有效控制封桩后沉降及工后沉降, 基础沉降增量为 6 mm。承台边角处的土压力在整个加载过程中均大于中心处土压力, 呈“马鞍形”分布, 但封桩后, 随着基础沉降增量的减小土压力增长速率明显减缓。

(4) 本文首次开展了桥梁逆作法承台-群桩复合基础实桥应用及承载性能实测, 验证了设计方法和施工工艺的合理可靠。设计中应控制封桩时基底压力平均值不大于地基承载力容许值的一半, 以控制封桩前的基础沉降; 在施工过程中, 应进行基础的沉降观测,

如监测发现基础的沉降及差异沉降超过预估值,应及时封桩。

#### 参考文献:

- [1] BURLAND J B, BROMS B B, DE MELLO V H B. Behaviour of foundations and structures[C]// Proc 9th Int Conf S M F E. Tokyo, 1977: 495 - 546.
- [2] 宰金珉. 复合桩基理论与应用[M]. 北京: 知识产权出版社, 2004. (ZAI Jin-ming. Theory and application of composite pile foundation[M]. Beijing: Intellectual Property Press, 2004. (in Chinese))
- [3] 宰金珉, 蒋刚, 王旭东, 等. 极限荷载下桩筏基础共同作用性状的室内模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(11): 1597 - 1603. (ZAI Jin-min, JIANG Gang, WANG Xu-dong, et al. Model test on pile-raft foundation interaction under ultimate load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(11): 1597 - 1603. (in Chinese))
- [4] 杨敏. 减少沉降桩基础的设计理论和工程应用[C]// 岩土工程青年专家学术论坛论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 129 - 136. (YANG Min. Design method and engineering practice of reducing-settlement piled foundation[C]// Symposium of Geotechnical Young Experts. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998: 129 - 136. (in Chinese))
- [5] 王浩. 变刚度调平布桩模式下筏底地基土承载性状研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(7): 1014 - 1021. (WANG Hao. Bearing capacity behaviors of subsoil under optimal design mode of pile foundation stiffness to reduce differential settlement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(7): 1014 - 1021. (in Chinese))
- [6] 徐国平, 龚维明, 付佰勇, 等. 桩基逆作法在桥梁深水基础中的应用[J]. 公路, 2009(10): 6 - 11. (XU Guo-ping, GONG Wei-ming, FU Bai-yong et al. Application of pile foundation constructed in reverse order to deep water foundation of bridge[J]. Highway, 2009(10): 6 - 11. (in Chinese))
- [7] 过超. 深厚软基桥梁逆作法复合基础承载性能试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2010. (GUO Chao. Experimental study on load-carrying properties of bridge composite foundation constructed by top-down method in deep soft soil[D]. Nanjing: Southeast University, 2010. (in Chinese))
- [8] 过超, 龚维明, 徐国平, 等. 逆作复合基础承载性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(6): 843 - 849. (GUO Chao, GONG Wei-ming, XU Guo-ping, et al. Experimental research on load-carrying properties of composite foundation in top-down order[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(6): 843 - 849. (in Chinese))
- [9] RP 2A-WSD American Petroleum Institute. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design[S]. 2000.
- [10] JTG D62—2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 2004. (JTG D62—2004 Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts[S]. 2004. (in Chinese))