

# 扩底桩横向受荷下不同破坏模式的承载性状\*

张蕾,张瑞,程大伟,周帆

(昆明理工大学 建筑工程学院,昆明 650500)

**摘要:**根据扩底桩的横向加载模型试验,分析研究扩底桩基础在横向荷载作用下出现不同破坏模式时的受力承载性状。试验结果表明,扩底桩出现弯曲破坏形式的受力承载性状为:在横向荷载作用下,加载一侧桩身受拉,另一侧桩身受压,最大拉应力出现在桩身中上部位置。桩身土压力分布为两端小,中部大。扩大头可为桩身提供嵌固作用。扩底桩出现剪切破坏时的受力承载性状为:在横向荷载作用下,桩身上部两侧均为受拉,桩身中下部加载一侧受拉,另一侧受压。桩身土压力分布呈波浪形,出现两处峰值和两处近似零点,扩大头基本不提供嵌固作用。研究结果表明,在相同的横向荷载作用下,出现弯曲破坏的桩比出现剪切破坏的桩具有更大的延性,扩大头的嵌固作用发挥的更好,具有更高的承载性能。

**关键词:**模型试验;扩底桩;横向加载;破坏模式;

中图分类号:TU413.4

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)04-1016-08

## Bearing Behavior of Different Failure Modes of Belled Pile under Transverse Load

Zhang Lei, Zhang Rui, Cheng Dayi, Zhou Fan

(Department of Civil Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, P.R.China)

**Abstract:** According to the lateral loading model test of belled pile, the load bearing behavior of the pile foundation under lateral load in different failure modes was analyzed. The test results show that the bearing properties of the pile in the form of bending failure as follows: under the lateral load, load side of the pile is pulled, the other side of the pile is pressed, and the maximum tensile stress appears in the middle-upper part of the pile. The earth pressure distribution of pile body is small at both ends and is large in the middle. The enlarged head can provide the fixed effect for pile body. The load bearing properties of shear failure of belled pile as follows: under the same lateral load, both sides of the upper part of the pile body are pulled, the middle and lower part is pulled on load side and the other side is pressed. The distribution of soil pressure in pile body is wavy, and two peaks and two approximate zeros appear. The enlarged head does not provide the fixed effect for pile body. The results show that: under the same transverse load, the pile foundation which is under bending failure could increase the ductility of pile foundation, could make belled pile bottom to be more built in the ground firmly, and could allow pile to take more loading than the pile under shear failure.

**Keywords:** model test; belled pile; transverse load; failure pattern;

\* 收稿日期:2017-12-23(修改稿)

作者简介:张蕾(1979-),女,黑龙江哈尔滨人,博士,讲师,主要从事桩基础及地基处理方面的研究。

E-mail:zl5359@163.com

基金项目:国家自然科学基金(51408283)

0 引言

扩底桩因其承载力大、沉降低,被越来越多地应用于各种工业、民用、交通工程中。然而,相比于飞速发展的施工技术,扩底桩在理论基础方面的研究还存在许多的不足,理论基础不足以全面系统地支撑施工技术的运用。为此,众多学者专家对扩底桩的各种受力性能进行研究。这些扩底桩的成果多集中于竖向承载性状方面<sup>[1-7]</sup>,而横向承载性状的研究成果较少<sup>[8-12]</sup>。事实上,由于工程性质的不同,桩基础在实际中基本上多处于多向复杂受力状态<sup>[13]</sup>。基于此,本文研究扩底桩横向承载性状,通过研究成果,补充完善扩底桩基础在横向加载作用下的承载受力机理。

由于岩土工程的性质,桩基础极限状态的控制标准基本采用“强度”、“变形”双控指标,承受竖向荷载时,“变形”是主要的控制因素。而对于承受横向荷载的桩基础,应更重视“强度”指标,因为实际工程中,复杂多变的外界环境往往非人力所能控制。混凝土材料的弱抗拉、抗剪强度使得桩基础出现强度破坏的情况比出现变形极限状态更常见且破坏的影响更大。

本文通过缩尺寸、等强度混凝土扩底桩横向加载模型试验,研究扩底桩在出现不同强度破坏模式时的承载受力机理,对比分析扩底桩出现弯曲破坏及剪切破坏时的承载性能。两种破坏模式下,扩底桩的桩身应力分布、土压力分布、桩底扩大头的嵌固作用均有较大的不同,出现弯曲破坏的桩可承受更大的横向荷载,具有更好的延性。

1 扩底桩横向加荷模型试验

1.1 试验方案

模型桩基尺寸:有效桩长 1.3 m(实际桩长 1.4 m,顶部增长部分为加载使用,以下均按有效桩长计),桩径 0.1 m,扩底直径 0.2 m,扩底高 0.15 m。该尺寸的选择参考文献[14]的建议,扩底桩桩长 12~20 m 时可获得较好的经济效益。2 根模型桩制作方法、材料强度、配筋设计、埋设条件、加载方式等均相同,模型桩缩放比例 1:10,设计参数如表 1 所示。模型箱尺寸为 2 m×2 m×1.5 m,如图 1 所示。模型试验地基土选择云南代表性的红黏土,通过土工试验测得的土质参数如表 2 所示。

表 1 扩底桩模型参数

Table 1 Parameters of belled pile

项目	模型桩	相似比
混凝土	C30	1
主筋	4φ6	1/100
箍筋	φ4@200	1/100
截面尺寸	1.3m×φ0.1m	1/10
理论极限荷载	10kN	1/100

表 2 地基土参数

Table 2 Parameters of soil

项目	参数
重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	17.5
粘结力 $c/\text{kPa}$	66.5
摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	29.2
压缩模量 $E/\text{MPa}$	6.4
天然孔隙比 $e_0$	0.962
含水量 $\omega/\%$	25.8



图 1 模型箱

Fig. 1 Test box

1.2 试验加载

本次试验使用的是型号为 BE120-3AA(11)-X 的电阻应变片,电阻为  $119.9 \pm 0.2 \Omega$ 。电阻式微型土压力盒,型号为 XH-TY02 A,各传感器标定检测后采用。应变片设置在横向荷载作用轴线上对称的钢筋上,土压力盒设置在土受压一侧,钢筋应变片、土压力传感器的粘贴位置如图 2、图 3 所示。

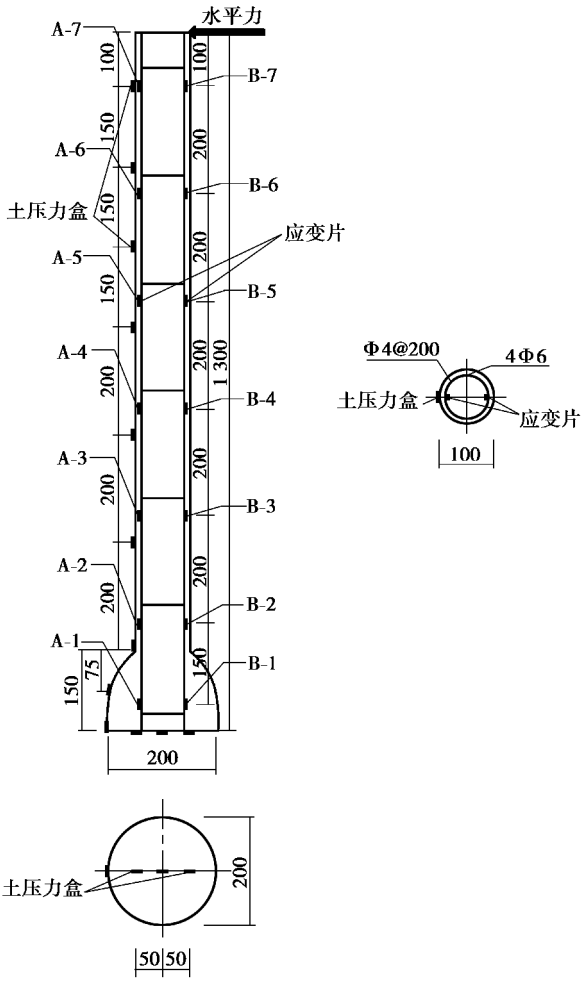


图 2 传感器安装位置示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematics of sensor installation position(unit:mm)



图 3 扩底模型桩

Fig. 3 Model of belled piles

模型试验加载采用单向加载试验,2 根试验桩的加卸载方式相同。通过理论计算确定模型桩的最大加载量为 10 kN。加载分级进行,最大加载量为 12 kN(1.2 倍最大计算加载量),逐级等量加载;荷载分十二级施加,每级荷载为 1 kN,每级荷载持荷 5 min。加载时荷载传递均匀、连续、无冲击,每级荷载在维持过程中的变化幅度不超过分级荷载的 $\pm 10\%$ 。

2 根试验桩除桩端保护措施不同外,其他试验条件均相同。桩 1 加载时,桩端采用橡胶材质进行保护,桩 2 加载时桩端未采用该措施,如图 4、图 5 所示。

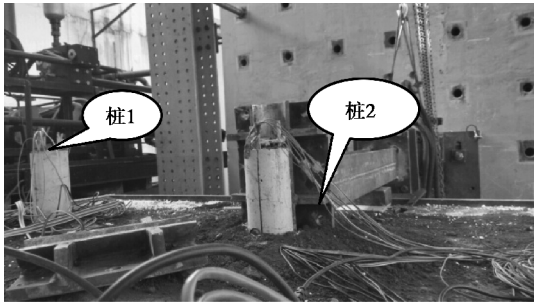


图 4 桩 1 加载试验现场

Fig. 4 Test on site for pile 1

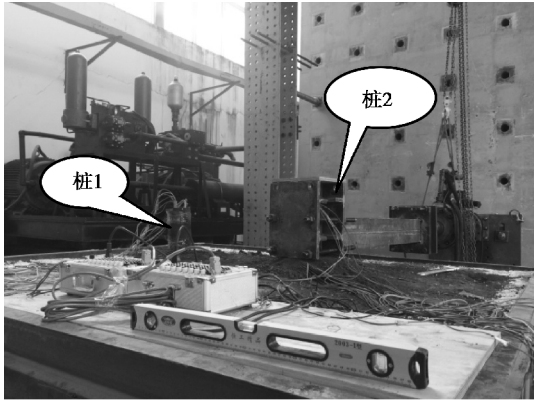


图 5 桩 2 家宅试验现场

Fig. 5 Test on site for pile 2

## 2 试验数据分析

### 2.1 桩 1 试验结果

图 6 为横向荷载作用下桩顶水平位移变化曲线。由图可知,随着水平力的增大,桩 1 的桩顶水平位移逐渐增加,每级荷载下的水平位移增幅比较平缓,在前 11 级荷载作用下,桩顶水平力与桩顶位移近似线性关系变化。在最大荷载 12 kN 作用下桩顶水平位移约为 52 mm。

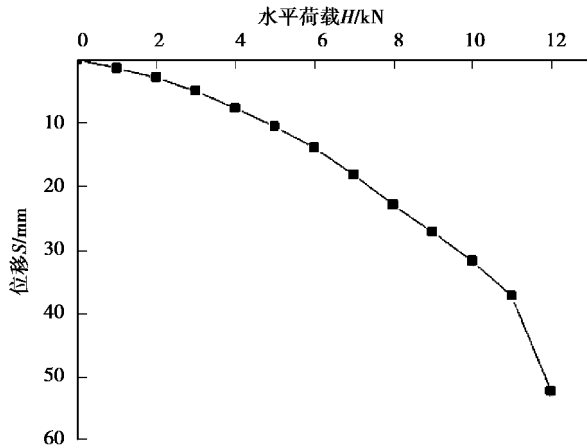


图6 桩顶水平荷载位移曲线(桩1)

Fig. 6 Curves of lateral load vs. displacement of pile top(pile 1)

桩顶水平荷载自右向左施加,桩身左、右两侧分别布置应变片,换算后桩身应力分别如图7、图8所示。

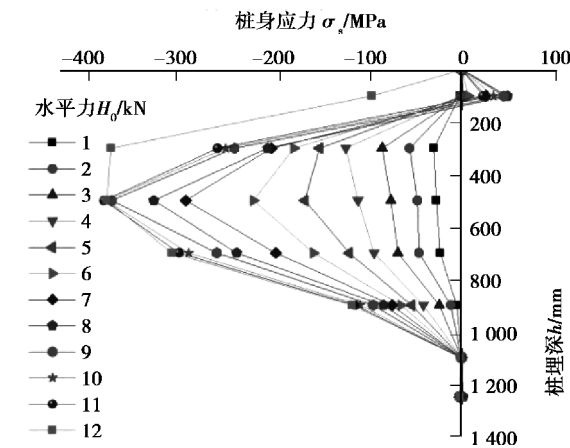


图7 A侧(左侧)桩身应力-桩深变化分布曲线(桩1)

Fig. 7 Curves of pile stress(A side) vs. depth(pile 1)

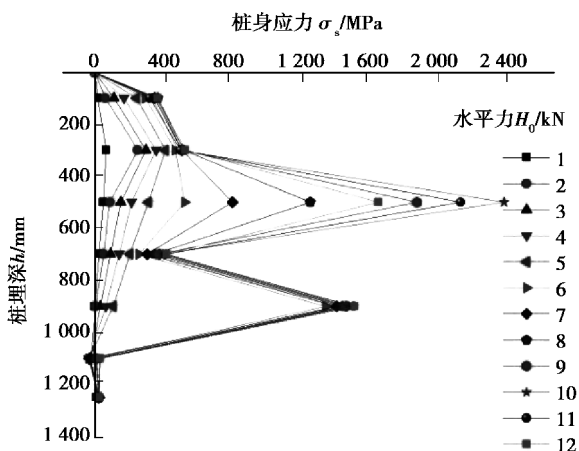


图8 B侧(右侧)桩身应力-桩深变化分布曲线(桩1)

Fig. 8 Curves of pile stress(B side) vs. depth(pile 1)

由图7可知,A侧(左侧)桩身应力主要表现为压应力,仅在第一个应变片位置(桩深100 mm)出现较小拉应力。在桩埋深500 mm处达到最大压应力,其下沿着桩深度方向压应力逐渐减小。

由图可知,B侧(右侧)桩身应力主要表现为拉应力。当水平力 $H \leq 5$  kN时,B侧桩身拉应力变化均匀,在桩深为300 mm处达到最大拉应力,后沿着桩身深度方向均匀减小。当水平力 $H$ 超过6 kN以后,最大拉应力位置突变下移,在桩深约为500 mm处拉应力激增,并在桩身约900 mm处再次发生突变,拉应力相对较大。

发生上述情况,是由于当水平力较小时水平荷载主要由混凝土承担,而随着水平力的不断增加,桩身混凝土受拉区出现裂缝,外荷载转由钢筋承担,钢筋应力随着混凝土裂缝的增大而得到有效发挥;同时随着水平力及裂缝的增大,桩身荷载出现应力重分布,桩身强度降低,钢筋应力急剧增大。

从A、B两侧桩身应力变化可以发现,桩顶水平荷载自右向左施加,桩身左侧受压,右侧受拉,最大拉应力出现在桩身中上部位置。

图9为在横向荷载作用下土压力随桩深度分布曲线。由图可知,在水平荷载作用下,桩身土压力分布形式为两端压力较小,中部压力较大。桩深在100~950 mm范围内,土压力变化较大,桩深400~550 mm处土压力最大,当水平荷载小于6 kN时,最大位置分布与桩身应力分布相近。在桩深为950 mm处,土压力近似为零,在扩大头(桩深1150 mm)处土压力明显增大,随着荷载增加,扩大头处土压力增加显著,扩大头为桩身提供嵌固反力。

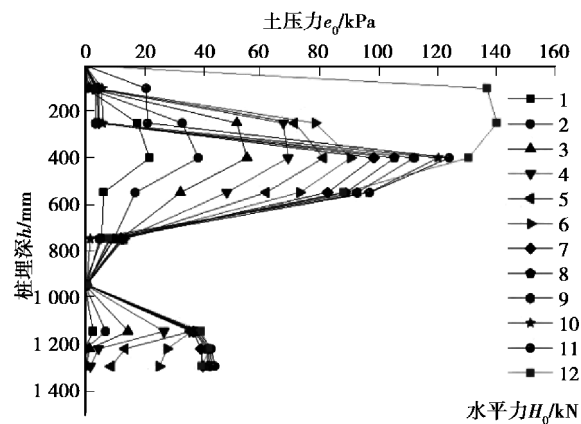


图9 土压力-桩深变化分布曲线(桩1)

Fig. 9 Curves of soil pressure vs. depth(pile 1)

图10、图11为桩1试验结束后开挖出的现



场照片。从照片可以看出,桩 1 桩身中部有明显的弯曲,桩身受拉一侧开裂,裂缝呈垂直贯通形式,最大裂缝位置在桩顶以下第 3 个土压力盒附近,近似为距有效桩顶长度约 450~500 mm 处,即图 11 所示裂缝。该裂缝位置与桩身最大土压力、桩身最大拉应力位置吻合。通过现场照片及桩身应力、土压力分布可以判断,桩 1 属于桩身的弯曲破坏形式。



图 10 桩 1 破坏形式

Fig. 10 Failure pattern of pile 1



图 11 桩 1 桩身破坏最大裂缝处

Fig. 11 Largest fracture of pile 1

## 2.2 桩 2 试验结果

从桩顶位移随水平加载变化曲线可以看出,桩 2 在水平荷载作用下桩顶位移变化比较平缓。在最大荷载 12 kN 作用下桩 2 的桩顶水平位移约为 25 mm,比桩 1 的最大位移小很多,如图 12 所示。

桩顶水平荷载自右向左施加,桩身左、右两侧分别布置应变片,换算后桩身应力分别如图 13、图 14 所示。

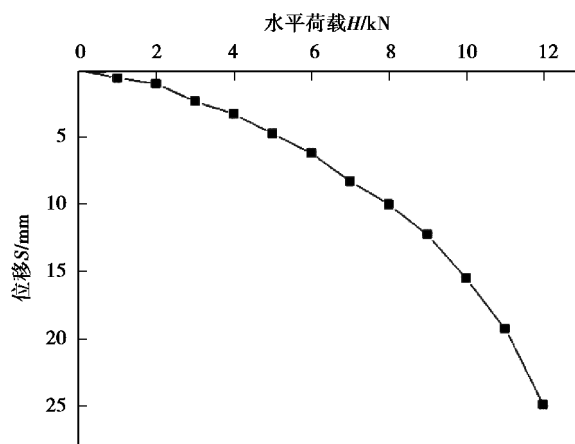


图 12 桩顶水平荷载位移曲线(桩 2)

Fig. 12 Curves of lateral load vs. displacement of pile top (pile 2)

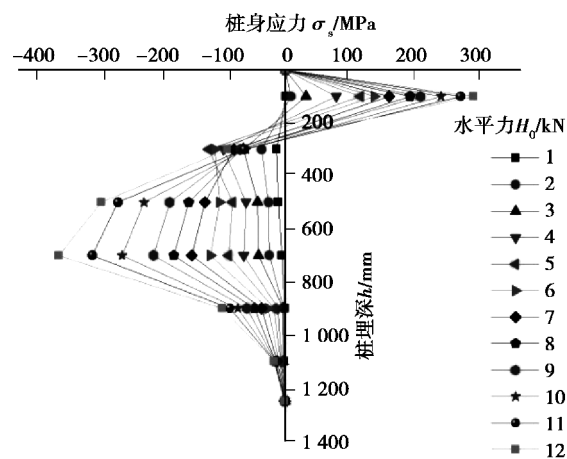


图 13 A 侧(左侧)桩身应力-桩深变化分布曲线(桩 2)

Fig. 13 Curves of pile stress (A side) vs. depth (pile 1)

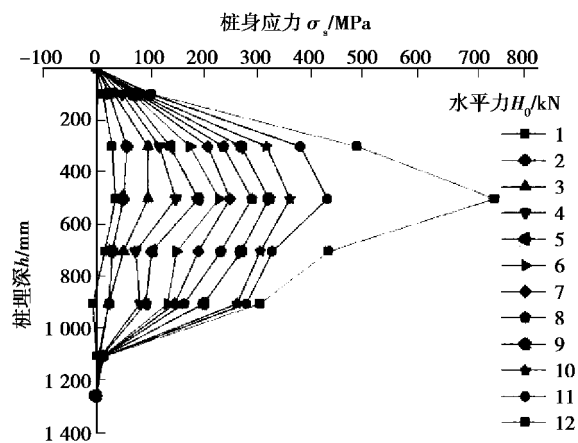


图 14 B 侧(右侧)桩身应力-桩深变化分布曲线(桩 2)

Fig. 14 Curves of pile stress (B side) vs. depth (pile 2)

由图 13 可知,桩 2 左侧(A 侧)桩身应力在桩身上部 0~250 mm 深度处为拉应力,且拉应力随着加载的增加逐渐增大。桩深 250~1 300 mm 段桩身应力为压应力,最大压应力分布在 500~700 mm 深度段,随荷载增加均匀增大。

由图 14 可知,桩 2 右侧(B 侧)均为拉应力,变化较均匀,最大拉应力分布在 300~900 mm 深度处。

对比图 13、图 14 可以发现,桩 2 在水平荷载作用下,桩顶部(0~250 mm 段)两侧钢筋均受拉,桩左侧出现较大拉应变,不符合弯曲破坏的形式。桩身下部(250~1 300 mm 段)一侧受拉、一侧受压。

由图 15 可知,桩 2 桩身土压力分布呈波浪形,出现两处峰值和两处近似零点,峰值为距桩顶 250 mm 处和 550 mm 处;零点为距桩顶 400 mm 和 950 mm 处。扩大头处土压力较小,即扩大头提供的嵌固反力较小。

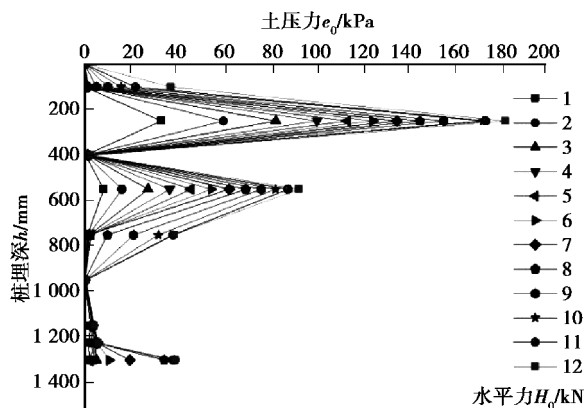


图 15 土压力-桩深变化分布曲线(桩 2)

Fig.15 Curves of soil pressure vs. depth (pile 2)

图 16、图 17 为桩 2 试验后开挖的现场照片。从照片可以发现,桩 2 的破坏集中在桩顶(100~250 mm 段),桩身呈斜向拉裂。由于加载时未采用保护措施,故混凝土破碎,钢筋斜向变形严重。从现场破坏情况可判断,桩头出现强度剪切破坏。

结合图 13、图 14 桩身应力分布曲线分析图 15 中桩 2 出现土压力双峰现象的原因:由于桩 2 在加载时桩头未设置橡胶材料保护措施,桩头材料强度较低,在横向荷载作用下,土压力未能有效地向下传递,在桩头处形成应力集中现象,从图 15 上看,

在桩头处(250 mm)出现一次峰值。土压力集中造成桩头处承受较大的拉应力,从图 13、图 14 可知,桩头两侧钢筋均出现拉应力,桩头被剪坏,即出现剪切强度破坏。

由于桩身埋置在土中,虽然桩头已经破坏,但钢筋未被拉断,外荷载在应力重分布后仍然可以继续向下传递。桩身下部在外荷载作用下仍表现为弯曲受力,一侧受拉、一侧受压。重分布后的荷载在桩身下部从新形成土压力二次峰值(550 mm)。由于重分布的荷载较小,桩身基本未变形,如图 16 所示,且扩大头处的土压力较小,基本未起到嵌固作用。



图 16 桩 2 破坏形式

Fig. 16 Failure pattern of pile 2



图 17 桩 2 桩头破坏最大裂缝处

Fig. 17 The largest fracture of pile 2

### 2.3 桩 1、桩 2 对比分析

本试验采用的 2 根试验桩的模型设计参数、试验条件、加载条件均相同,仅桩 1 在加载时对桩头采用保护措施,桩 2 未采用该措施(图 4、图 5)。试验结果显示,2 根试验桩的桩身应力分布、桩身土压力分布、破坏模式等完全不同,采用了桩头保护措施的桩 1 属于弯曲破坏,未采用该措施的桩 2 属

于剪切破坏。



图 18 桩 1、桩 2 破坏形式对比

Fig. 18 Contrast of failure pattern between pile 1 and pile 2

根据混凝土设计原理可知,桩 1 采用的桩头保护措施,可视为增强桩头部位的有效强度。这样处理后可增强桩头部位抵抗横向荷载的能力,避免桩头部位在横向荷载作用下过早地出现剪切强度破坏,使外荷载得以沿桩身向下传递,从而发挥扩大头处的嵌固作用,以此增加扩底桩基础的横向承载受力性能。桩头未采用保护措施加固时,桩头部位不足以抵抗较大的外荷载,该部位先出现剪切强度破坏,外荷载无法沿桩身向下传递,扩大头不能发挥嵌固作用,扩底桩基础过早出现桩头破坏,不能抵抗较大的横向荷载。

在相同的最大荷载作用下,出现弯曲破坏的桩 1 的桩顶最大位移是出现剪切破坏的桩 2 的 2 倍;桩 1 的桩身混凝土开裂,钢筋变形比桩 2 小很多;桩 2 的桩身混凝土破碎,钢筋出现较大变形。从对比结果可以发现,出现弯曲破坏形式的桩比出现的剪切破坏形式的桩更具有更多的延性。相比于剪切破坏,扩底桩基础出现弯曲破坏形式可为上部结构提供更多的安全储备。从概念设计的角度,扩底桩横向承载受力时应按弯曲破坏设计,避免出现剪切破坏。

对于如何控制扩底桩基础的破坏形式,这是一个复杂的课题,普通直身桩的横向受力破坏形式与土质条件、桩的换算深度、桩的截面刚度、桩顶约束等多项因素有关<sup>[15]</sup>。本文基于试验条件及论文的篇幅未能做更深入的分析研究,这将是今后的研究

方向之一。

另外,由于本论文仅就模型试验进行定量分析,未考虑数值模拟计算结果,故无法准确获得桩土耦合及相互影响的程度,故本文未进行这方面的分析,这也将是今后的研究方向之一。

### 3 结论

根据 2 根扩底桩的模型试验,研究在横向荷载作用下扩底桩基础出现不同破坏模式的受力变形机理,主要研究结果如下:

(1)扩底桩出现桩身弯曲破坏形式时,其受力变形机理为:在横向荷载作用下,桩身两侧应力表现为加载一侧桩身受拉,另一侧桩身受压,最大拉应力出现在桩身中上部位置;在水平荷载作用下,桩身土压力分布形式为两端压力较小、中部压力较大;在桩深部接近扩大头位置,土压力近似为零;在扩大头处土压力明显增大,扩大头为桩身提供嵌固作用。

(2)扩底桩出现桩头剪切破坏时其受力变形机理为:在横向荷载作用下,桩身两侧应力表现为,在桩身上部接近桩头处均为拉应力,桩身中下部加载一侧受拉,另一侧受压;桩身土压力分布呈波浪形,出现两处峰值和两处近似零点;扩大头处土压力较小,扩大头的嵌固作用不明显。

(3)在相同的横向荷载作用下,出现弯曲破坏的桩,其桩顶最大位移是出现剪切破坏桩的 2 倍。出现弯曲破坏的桩比出现剪切破坏的桩具有更多的延性,可提供更大的安全储备。对于扩底桩基础,在考虑横向荷载作用时,应避免出现剪切破坏。

### 参考文献 (References)

- [1] 何颐华,王铁宏.大直径扩底桩承载力及沉降变形的计算[J]. 建筑结构学报,1993,14(2): 63-71. (He Yihua, Wang Tiehong. Calculations for bearing capacity and settlement of large diameter belled pile[J]. Journal of Building Structure, 1993, 14 (2): 63-71. (in Chinese))
- [2] 张荣祥,顾宝和,汪敏,等.大直径扩底桩承载力和沉降变形分析[J]. 工程勘察,1998(4): 18-23. (Zhang Rongxiang, Gu Baohe, Wang Ming, et al. Analysis of bearing capacity and settlement of large diameter belled pile [J]. Journal of Geotechnical Investigation &



- Surveying, 1998(4): 18-23. (in Chinese))
- [3] 方焘,刘新荣,耿大新,等.大直径变径桩竖向承载特性模型试验研究(I)[J].岩土力学,2012,33(10): 2947-2952.(Fang Tao, Liu Xinrong, Geng Daxin, et al. Model Testing Study of Vertical Bearing Behaviors for Large Diameter Pile with Variable Cross-section(I)[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 2947-2952. (in Chinese))
- [4] 孙洋波,朱光裕.软土地区恒载作用下单桩和群桩的抗拔试验分析[J].地下空间与工程学报,2010,6(1):75-79,188.(Sun Yangbo, Zhu Guangyu. Field Tests on Uplift Behavior of Bored Cast-in-place Single or Group Piles Under Constant Load in Soft Ground[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(1): 75-79, 188. (in Chinese))
- [5] 黄广龙,惠刚,梅国雄.钻孔扩底桩原型对比试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(9):1922-1926.(Huang Guanglong, Hui Gang, Mei Guoxiong. Comparative experiment study on pedestal piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1922-1926. (in Chinese))
- [6] 胡庆红,张土桥,谢新宇.深厚软土中大直径灌注扩底桩受力性状试验研究[J].土木工程学报,2007,40(4):87-91.(Hu Qinghong, Zhang Tuqiao, Xie Xinyu. Experimental study on the bearing capacity of large diameter cast-in-place under-reamed pile in deep soft soils[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(4): 87-91. (in Chinese))
- [7] 高盟,高广运,顾宝和,等.一种大直径扩底桩的沉降计算实用方法[J],岩土工程学报,2012,34(8): 1448-1453.(Gao Meng, Gao Guangyun, Gu Baohe, et al. Practical method for settlement calculation of large-diameter belled piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(8): 1448-1453. (in Chinese))
- [8] 刘新荣,方焘,耿大新,等.大直径变径桩横向承载特性模型试验[J].中国公路学报,2013,26(6):80-86, 190.(Liu Xinrong, Fang Tao, Geng Daxin, et al. Model Test on Lateral Bearing Behaviors of Large Diameter Pile with Variable Cross Section[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(6): 80-86, 190. (in Chinese))
- [9] 任连伟,王俊林.大直径扩底桩水平承载性能影响因素分析[J].岩土工程学报,2011,33(增2):299-303. (Ren Lianwei, Wang Junlin. Factors for Horizontal bearing capacity of large-diameter belled piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(Supp.2): 299-303. (in Chinese))
- [10] 王俊林.大直径扩底桩单桩水平荷载试验研究[D].郑州:郑州大学,2011.(Wang Junlin. Analysis and research on horizontal static load tests on single large diameter under-reamed pile[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2011. (in Chinese))
- [11] 王俊林,王复明,任连伟,等.大直径扩底桩单桩水平静载试验与数值模拟[J].岩土工程学报,2010,32(9):1046-1411.(Wang Junlin, Wang Fuming, Ren Lianwei, et al. Horizontal static load tests and numerical simulation of single large diameter under-reamed pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1046-1411. (in Chinese))
- [12] 孔纲强,曹兆虎,周航,等.水平荷载下扩底楔形桩承载力特性透明土模型试验[J].土木工程学报,2015, 48(5):83-89.(Kong Gangqiang, Cao Zhaohe, Zhou Hang, et al. Experimental study on lateral bearing capacity of enlarged wedge-shaped pile using transparent soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(5): 83-89. (in Chinese))
- [13] 文松霖.铅直、水平荷载作用下扩底桩的承载机理[J].长江科学院院报,2004,21(5):24-27,31.(Wen Songlin. Resistance behaviors of pile with enlarged base under axial and lateral loads[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2004, 21(5): 24-27, 31. (in Chinese))
- [14] 张蕾,高广运.扩底桩深度效应及临界桩长分析[J].地下空间与工程学报,2013,9(1):48-54.(Zhang Lei, Gao Guangyun. Study on depth effect and critical pile length for belled pile[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1): 48-54. (in Chinese))
- [15] 周景星,李广信,虞石民,等.基础工程(第2版)[M].北京:清华大学出版社,2006.(Zhou Jingxing, Li Guangxin, Yu Shimin, et al. Foundation engineering (Second Version)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese))