



中国公路学报
China Journal of Highway and Transport
ISSN 1001-7372, CN 61-1313/U

《中国公路学报》网络首发论文

题目： 上拔、水平联合荷载对桩基承载性能影响的现场试验及数值模拟研究
作者： 周俊鹏，黄雪峰，张吉禄，韦林辉，袁俊，王学明，刘永红
收稿日期： 2019-11-26
网络首发日期： 2020-09-22
引用格式： 周俊鹏，黄雪峰，张吉禄，韦林辉，袁俊，王学明，刘永红. 上拔、水平联合荷载对桩基承载性能影响的现场试验及数值模拟研究. 中国公路学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20200921.1750.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基金项目：重庆市研究生创新基金、根键桩基础力学特性研究（CYB18126）

西北电力设计院有限公司科技项目、输电线路根键式掏挖类基础试验及数值分析（XB1-TM05-2017）

作者简介：周俊鹏（1991—），男，山西忻州人，博士研究生，E-mail: 540453784@qq.com。

***通讯作者：**黄雪峰（1960—），男，甘肃兰州人，博导，工学博士，E-mail: hxfen60@163.com。

Funding: Graduate Research and Innovation Foundation of Chongqing, China, Study on Mechanical Properties of Root Piles (Grant No. CYB18126)

Science and Technology Project of Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Experimental and Numerical Investigation on the Excavated Root Foundations of Transmission Lines (No. XB1-TM05-2017)

* *Corresponding author. E-mail address: hxfen60@163.com.*

上拔、水平联合荷载对桩基承载性能影响的现场试验及数值模拟研究

周俊鹏^{1,2}, 黄雪峰^{*1,3}, 张吉禄⁴, 韦林辉⁴, 袁俊⁵, 王学明⁵,
刘永红⁶

(1. 陆军勤务学院 军事设施系,重庆 401311; 2. 岩土力学与地质环境保护重庆市重点实验室,重庆 401311; 3. 重庆交通大学 河海学院,重庆 400074; 4. 兰州理工大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730050; 5.西北电力设计院有限公司,陕西 西安 710075; 6. 96784 部队,河南 洛阳 471300)

摘要: 通常桩基受力作用分别确定上拔、水平两个方向的承载力, 不考虑其相互影响, 不能准确反映桩基的真实受力状况。为研究桩基上拔、水平荷载的耦合作用对桩基上拔、水平向承载性能的影响, 开展了大型现场试验及数值模拟研究, 结果表明: 上拔、水平联合荷载对桩基承载性能的影响与上拔、水平向荷载的比例有较大关系, 就本文桩基来说, 当该比例小于 2 时, 联合荷载作用对桩基水平承载能力影响较小, 不小于 2 时, 桩基的水平承载能力明显被削弱, 且被削弱的程度随着该比例的增大而提高; 联合荷载下桩基的上拔荷载位移曲线与单独上拔时基本重合, 但在加载比例较小时, 桩基在水平方向会先达到破坏标准, 会导致桩基上拔承载能力不能充分发挥。联合荷载下, 水平承载能力被削弱的的原因在于桩基带动桩周土体的一起上拔导致了地基土抗力系数比例系数的减小和桩身弯矩的增大; 联合荷载下, 由于水平荷载的作用, 桩基上部受压侧垂直方向的土压力会由于土体被挤密而变大, 上部受拉侧土压力则会由于桩与土的分离而变小; 桩基下部则由于桩基的刚性转动表现出相反的趋势。联合荷载下桩基破坏时, 破坏区域的土体裂缝呈扇形分布, 其分布形式、范围及破坏机理均与单独上拔、水平荷载时有较大差别。总体来说, 联合荷载对桩基承载性能的影响是客观存在且不可忽视。

关键词: 道路工程; 联合荷载; 现场试验; 数值模拟; 桩基承载性能

Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Uplift and Lateral Combined Loading on Bearing Capacity of Piles

ZHOU Jun-peng^{1,2}, HUANG Xue-feng^{*1,3}, ZHANG Ji-lu⁴, WEI Lin-hui⁴, YUAN Jun⁵,
WANG Xue-ming⁵, LIU Yong-hong⁶

(1. Department of Military Installations, Army Logistical University of PLA, Chongqing 401311, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Geomechanics & Geoenvironment Protection, Chongqing 401311, China; 3. College of Hohai, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 4. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; 5. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China; 6. PLA, No. 96784, Luoyang, Henan 471300, China)

Abstract: It was a common to determine the uplift and lateral bearing capacity respectively and regardless of the interactions in pile practice, however, it would certainly not reflect the reality of piles. The bearing capacity of piles under uplift and lateral combined loading was studied through the field experiments and numerical simulation. The results show that the influence of the combined loading on the bearing

capacity of piles is closely related to the ratio of uplift to lateral load. As for the piles in this paper, the combined loading has little influence on the lateral bearing capacity when the ratio is less than 2, however, the lateral bearing capacity would be obviously weakened when the ratio is not less than 2, and the degree of weakening increases with the increase of the ratio. The uplift load displacement curve under the combined loading basically coincides with that under the uplift load. However, when the loading ratio is relatively small, the piles would reach the failure standard earlier in lateral direction, which would lead to the failure of fully exerting the uplift bearing capacity. The reason why the lateral bearing capacity is weakened under the combined loading is that the pile would drive the soil around the pile to pull up together, which lead to the decrease of proportion coefficient of soil resistance coefficient and the increase of pile bending moment. Under the combined loading, the vertical earth pressure of the compression side would increase due to the compaction of soil and of the tensile side will decrease due to the separation of pile and soil for the upper part of pile due to the lateral load. However, the vertical earth pressure of lower part of the pile shows the opposite trend due to the rigid rotation of the pile. The soil cracks in the failure area are distributed in a fan shape under combined loading, whose range and distribution and failure mechanism are quite different from that under uplift and lateral load, respectively. The influence of combined loading on the bearing capacity of piles is objective and cannot be ignored.

Keywords: road engineering; combined loading; field experiment; numerical simulation; bearing capacity of piles

Received 26 11 2019

中图分类号: TU473

文献标志码: A

0 引言

随着工程建设的发展,桩基的应用场合更加多样化,受力状况也越趋复杂,即桩基不再单独的承受轴向荷载的作用,同时还可能承受水平向、弯矩等荷载的作用;此外,不同方向的荷载还会产生相互影响,而这种影响尚难以用理论进行明确的解答。然而,在实际工程中,为了简化桩基多向受荷时分析承载力的复杂性,目前的做法是不考虑各方向荷载的相互影响,而是分别计算桩基在各个方向的承载变形特性,最后按小变形原理将各荷载分量对桩基的内力、变形进行叠加^[1],这显然与桩基的实际受力状态有所区别。

现场试验是检验桩基承载变形特性的一个重要手段,但目前一方面由于对多向荷载作用下的桩基进行现场试验存在一定的难度,另一方面由于现场试验高昂的花费,故国内外学者大多是通过模型试验、理论分析或数值模拟的途径来试图对该问题进行分析,且桩基受荷的方向大多是轴向受压和水平向的两种荷载。在研究的过程中,对于竖向受压荷载和水平荷载具体影响如何,不同的学者得出了不同的结论,甚至有的相互冲突。皇甫明等^[2-3]通过室内模型试验和数值模拟,给出水平荷载可以提高桩的竖向承载力,而竖向荷载对水平承载能力的影响较小等结论。郑刚等^[4-6]通过数值模拟和模型试验,得出竖向荷载可以提高桩基的水

平承载能力，且郑刚^[4,7]指出，竖向荷载对桩基水平承载能力的提高与竖向荷载的大小及其加载顺序有关。Zhang 等^[8]则通过理论分析指出，竖向荷载的作用会降低桩基的水平承载能力，增大水平向的位移。Karthigeyan 等^[9]通过有限元对不同土质条件下混凝土方桩的下压荷载对水平承载力的影响进行了研究，得出了在黏土中下压荷载可以提高方桩水平承载能力，而在砂土中的情况却相反的结论。赵春风等^[10]通过模型试验指出，预先施加的竖向荷载有利于单桩水平承载力的提高和水平位移的减小。此外，周立朵^[11]通过对倾斜荷载下群桩承载特性的理论分析，建立了倾斜荷载下桩基的计算方法。

对于上拔、水平荷载联合作用对桩基承载性状的研究，Patra 和 Pise^[12]通过开展不同长径比模型桩的倾斜上拔加载试验，指出不论对于单桩还是群桩，水平荷载分量均能够提高其上拔承载能力，且对桩壁光滑桩基提高的程度要大于桩壁粗糙的桩基。Achmus 和 Thieken^[13]通过数值模拟指出，上拔、水平联合荷载作用下砂土中桩基的水平、上拔承载能力会由于上拔荷载的摩阻力和水平荷载调动的土压力相互影响而有所降低。杨明辉^[14]通过开展黏土中抗拔桩倾斜荷载试验，分析了倾斜荷载作用下抗拔桩的破坏模式，并推导了倾斜荷载作用下抗拔桩的极限承载力计算公式。

为进一步认识桩基在多向荷载下的承载特性，还有学者^[15-16]通过模型试验对桩基在竖向、水平向和扭矩共同作用下的承载特性进行了研究，并对各方向荷载对桩基承载能力的影响进行了分析。

总体来说，一方面，现有的研究并没有对上拔与水平向联合荷载作用对桩承载性状的影响给出清晰的认识；另一方面，上述学者基本未采用大型的现场试验对该问题进行研究，而现场试验为检验桩基承载能力最准确、重要的手段；故本文依托特高压输电线路基础的受荷特点（水平荷载为上拔荷载的 12%~20%），通过两组试桩的大型现场试验对上拔、水平联合荷载对试桩承载能力的影响进行了研究，由此得到了单独及联合荷载作用下桩身的位移、内力以及破坏模式，据此对上拔、水平荷载作用的相互影响进行了研究。另外，一方面由于现场试验联合荷载的比例较为单一，另一方面为了验证试验结果的可靠性；在与现场试验结果

吻合的基础上，还通过数值模拟研究了上拔、水平荷载在不同比例情况下对桩基承载性能的影响。

1 试验概况

1.1 场地地层概况

试验场地位于兰州市中川机场附近，场地属于大厚度黄土地区，土壤剖面主要特征为：表层覆盖较浅的素填土（试验过程中已挖除），其下即为大厚度黄土；该场地典型土层物理力学性质见表 1。

表 1 土层物理力学性质参数

Table 1 Physical and Mechanical Parameters of Soils

含水量 $w/\%$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/^\circ$
13	16	26	16.5	20	22

1.2 试验方案

为比较上拔、水平联合荷载作用对桩基承载性能的影响，采用人工挖孔灌注的方式浇筑二组尺寸相同的试验用桩；第一组为两根等截面桩 s1、s2，第二组为两根扩底桩 s3、s4，扩底桩扩底部分直径 1.8m，高 1m，各桩长 10m，桩径 1.2m；试验采用反力桩提供支座反力，反力桩距试桩中心 3m，桩长 5m，桩径 1.2m，为方便水平荷载试验加载，同时为了提高反力桩的水平承载能力，桩顶设有 1.2m×1.2m×0.7m（长×宽×高）的方形承台；桩身混凝土均为 C30。

为方便比较试验结果，试桩的单独、联合加载试验均采用建筑基桩检测技术规范规定的慢速维持荷载法，单独上拔、水平静载试验荷载分级分别为 300、100kN，联合荷载静载试验上拔、水平向的比例为 6:1，荷载分级分别为 300、50kN，均采用油压千斤顶进行加载。试桩 s1、s3 先进行了上拔荷载静载试验，为减小对桩基水平静载试验结果的影响，上拔静载试验只加载到 300kN，休止一段时间后，进行水平荷载的静载试验；s2、s4 进行了上拔、水平联合荷载作用下的静载试验。联合荷载试验过程中，加载到桩基水平、上拔其中任一方向破坏为止；不管是联合加载还是单独加载，规定上拔以突变或者 60mm（即 0.05D，D 为桩身直径）位移中先达到者为破坏标准，水平以位移达到 30mm 为破坏标准。

试验加载装置简图、现场布置图及试桩平面图如图 1 所示，为保证联合荷载作用下上拔、水平荷载的独立施加，在反力桩与反力梁之间安置钢筋滚动支撑，以达到反力桩在发生水平位移的情况下不影响上拔荷载的施加。

1.3 量测装置

(1) 位移量测装置：采用电子位移传感器对位移进行量测，在进行上拔荷载试验时，在桩顶均匀布置 4 只传感器；在进行水平荷载试验时，在试桩水平力作用点的反向对称布置 2 只传感器；进行联合荷载试验时，除去水平位移的 2 只传感器外，还在试桩垂直于水平力作用方向的轴上对称布置 2 只传感器。

(2) 应力量测装置：为测量桩基的轴力、侧摩阻力、弯矩分布，在试桩不同埋深的截面各对称布设 2 只钢筋应力计。钢筋应力计首层截面埋深 1.3m，其下各截面间距 1.2m，钢筋计截面标高具体位置如图 2 所示。

(3) 土压力量测装置：土压力盒垂直于桩侧埋设，测试加载过程中桩周土竖直方向的压力变化；土压力盒首层埋深 2m，间距 2m，距桩周 150mm，对称布置在试桩两侧，各截

面标高具体位置如图 2 所示。

(4) 采集装置：采用 60 通道静态应变箱对位移、桩身内力和桩周土压力进行采集。

由于试验经费的限制，只在等截面桩试验过程中布置了钢筋应力计与土压力盒。

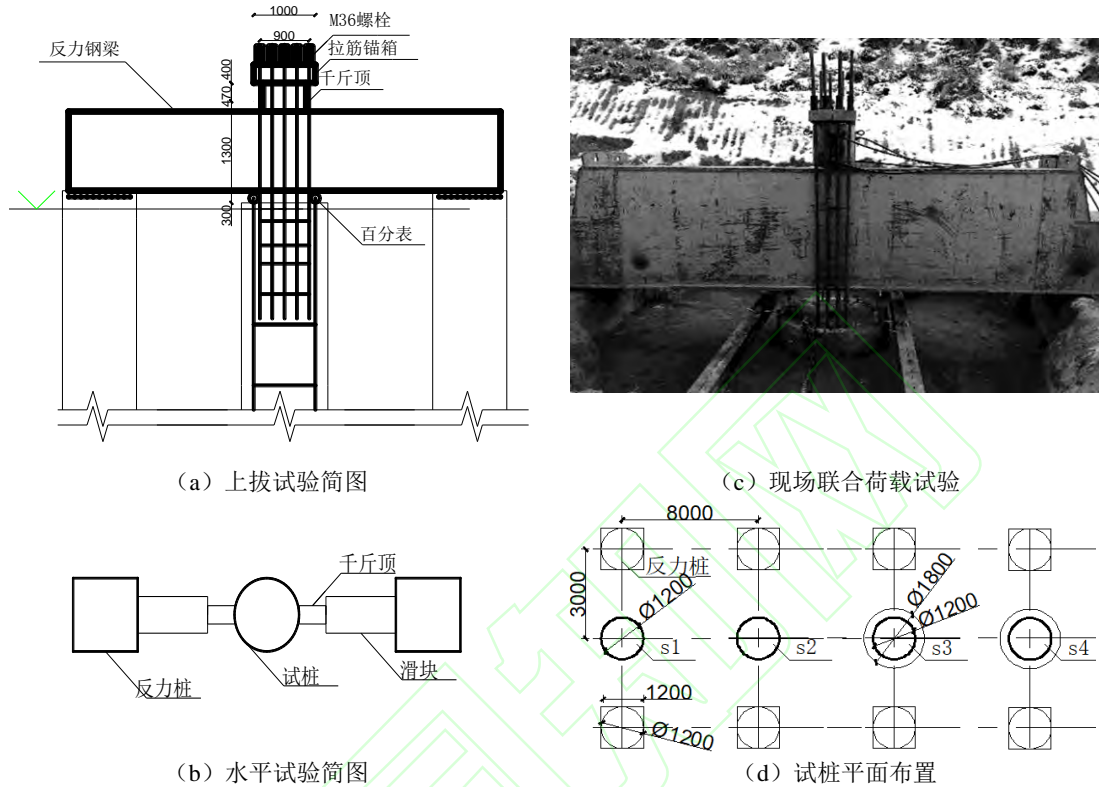


图 1 加载装置布置

Fig.1 Layout of Loading Device

2 试验结果及其分析

2.1 试桩上拔承载能力分析

2.1.1 上拔荷载位移曲线比较

如图 3 所示，为四根试桩的上拔荷载-位移 ($U-\delta$) 关系曲线，由于下文还进行了数值模拟方面的研究，为节约篇幅以及便于对比试验和模拟结果，将模拟结果也绘制在了图 3 中(图 7 同理)。由图可知，不论是试验还是模拟结果，等截面桩 s1 和 s2、扩底桩 s3 和 s4 二组试桩的 $U-\delta$ 曲线均基本重合，即在上拔与水平荷载比例为 6:1 的情况下，联合荷载作用对试桩的上拔承载能力基本没有影响。等截面桩 s1、s2 的荷载位移曲线均为突变型，取突变前一级荷载 2700kN 为两试桩的极限承载力，对应的上拔位移分别为 27.42、28.56mm；扩底桩 s3、s4 的荷载位移曲线均为缓变型，取 60mm 对应的位移为两试桩的极限承载力，均为 4000kN 左右。联合荷载作用下，水平荷载的引入会使桩体产生水平位移，在受压侧土体由于挤密作用侧摩阻力有所提高，在受拉侧，一定深度范围内土体与桩脱离，这在一定程度上削弱了桩的抗拔承载力；目前，对于这两种作用的理论分析还较少，但已有试验及模拟结果^[2,4,10]表明，水平荷载的作用对桩的抗压承载能力影响较小或具有有利作用，对桩的抗拔承载能力有利作用^[12]。对于本次试验来说，这两种作用总体表现为相互抵消，即对抗拔承载能力影响较小。

2.1.2 轴力、侧摩阻力分析

联合荷载作用下，由于 s2 试桩两侧的钢筋计受力状态不同，故无法对其轴力、侧摩阻力进行分析，如图 4、5 所示为 s1 试桩的轴力、侧摩阻力随埋深分布图。由图 4 可知，当荷载较小时，桩身轴力分布均较为均匀；随着荷载的增大，桩身上部轴力的衰减变化较小，桩身下部轴力衰减较快，且这种趋势随着荷载的增大逐渐向桩身下部传递。桩身轴力的变化反映了侧阻的发挥过程，由图 5 可知，当荷载较小时，桩身侧阻发挥较为均匀；随着荷载的增大，侧阻出现先增大后减下的峰值效应，且峰值在不断增大的同时逐渐往桩身下部传递，如在上拔荷载为 1200kN 时，侧阻最大值出现在 -6m 处，大小为 40kPa，而荷载为 3000kN 时，侧阻最大值出现在 -8.5m 处，大小为 130kPa；此外，上部侧阻在达到极限后基本保持不变，而是由下部侧阻逐渐发挥来抵抗上部荷载的增加。总体来说，侧阻的发挥是一个从上到下、从小到大逐渐变化的过程。

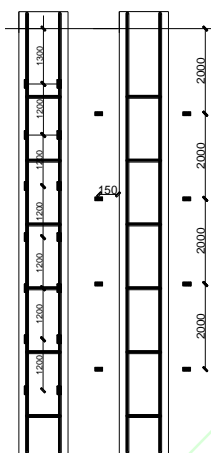


图 2 传感器位置

Fig.2 Testing Sensors Distribution of Piles

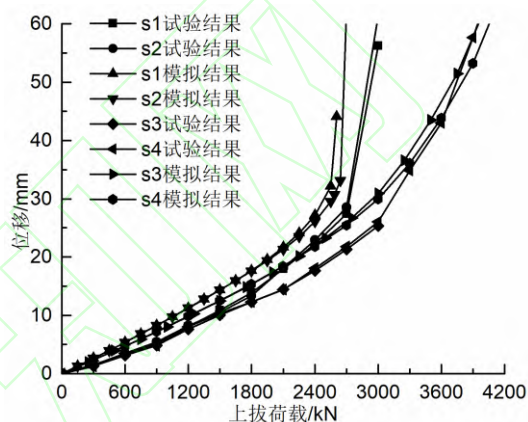


图 3 四根试桩的上拔荷载-位移($U-\delta$)关系曲线

Fig.3 Uplift Load-Displacement ($U-\delta$) Curves of Piles

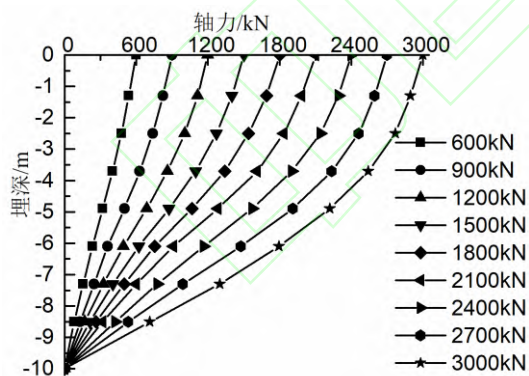


图 4 轴力随埋深分布

Fig.4 Axial Force of Piles with the Depth

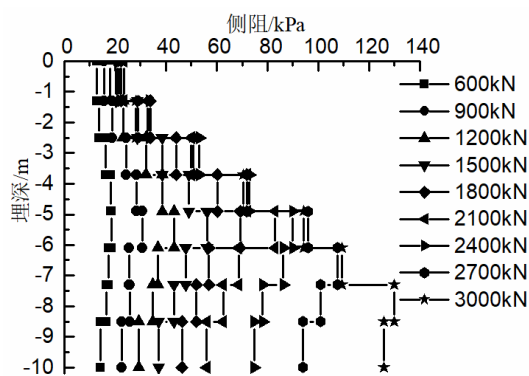


图 5 s1 试桩侧阻随埋深分布

Fig.5 Side Resistance of Piles with the Depth

2.1.3 土压力比较分析

如图 6 所示为等截面桩 s1、s2 桩周土压力随埋深分布曲线，在联合荷载作用下，试桩 s2 上部两侧土体受力状态将有所不同，特此将土体受到挤压一侧称为受压侧，另一侧称为受拉侧；为了更直观的比较不同荷载、工况下土压力的区别，将两根试桩上拔荷载为 900、1800、2700kN 的土压力作图进行比较，如图 6 (c) 所示。总体来看，即便有水平荷载的影响，两根试桩的桩周土压力均随着上拔荷载的增加而增加；土压力的发展规律与侧摩阻力较

为相似，其最大值介于-6m~-8m 之间，随着荷载的增大逐渐下移，但从数值大小来看，土压力较小于侧阻；这表明试桩在带动周围土体一起上拔的过程中，竖直方向的受力较为符合剪切位移法^[17]的传递规律，土压力随着侧阻发挥逐渐增大，距桩基较远的土体不会受到影响，对于本次试验来说，土压力盒埋设在距离桩身 0.15m 的位置，其大小约为侧阻的 60%。

对于试桩 s2 桩身上部来说，由于水平荷载的作用，受压侧土体被挤密，受拉侧土体则有与桩脱离的趋势，且随着荷载的增大，这两种作用越来越强；表现在图 6 (a) ~ (c) 上，即为受拉侧土压力较小于单独上拔时桩周的土压力，而受压侧则较单独上拔时大；且随着荷载的增大，受拉侧上部土压力在荷载较小时便达到极限，而受压侧土压力则在荷载较大时才保持不变，也即桩身上部拉压侧的土压力在荷载较大时差别越来越大。对于桩身中下部来说，受水平荷载影响较小，拉压侧土压力只有在水平荷载较大的情况下才显现出差距；对于图 6 (c) 中 2700kN 荷载作用下-8m 处的土压力来说，其大小规律与桩身上部相反，分析原因，可能是由于桩身刚度较大，在上拔的同时由于水平荷载作用产生转动，使受拉侧土体发生挤密作用（也即桩身下部的拉压侧与桩身上部相反），从而表现出与桩身上部土压力不一样的大小规律。进一步由拉压侧土压力的大小规律分析，桩身转动位置约在-7~-7.5m 之间。

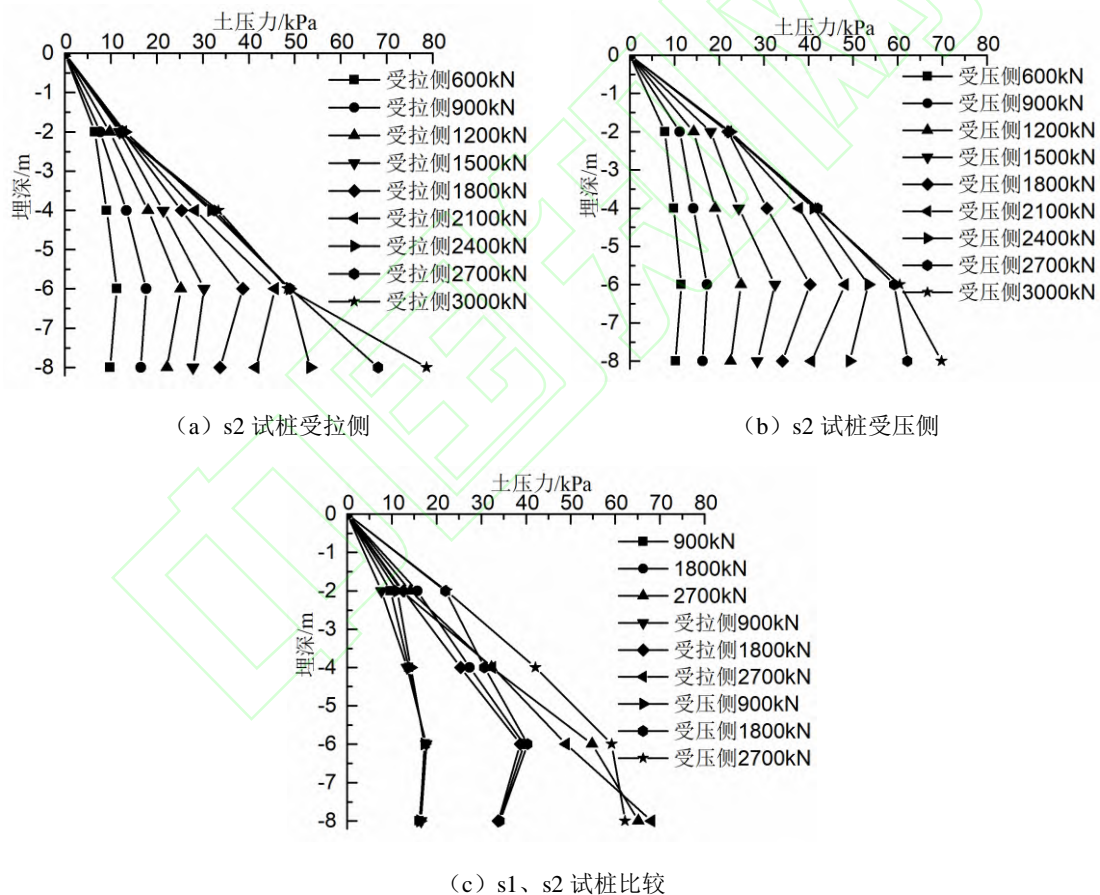


图 6 s1、s2 试桩土压力随埋深分布曲线

Fig.6 Earth Pressure of Piles with the Depth

2.2 试桩水平承载能力分析

2.2.1 水平荷载位移曲线比较

如图 7 所示，为四根试桩的水平荷载-位移 ($H-Y_0$) 关系曲线，由图可知，联合加载 s2、s4 试桩的水平位移在较小荷载作用下就已大于单独水平加载的 s1、s3 试桩；且随着荷载的增大，联合加载工况下的水平位移越来越大于单独水平加载的；总体来说，上拔与水平荷载

比例为 6:1 时, 联合荷载作用对试桩的水平承载能力有较大削弱; 如对于 s1、s2 试桩, 20mm 位移时对应的荷载分别为 800、500kN, s3、s4 试桩, 30mm 位移时对应的荷载分别为 1000、650kN。

对于下压荷载对试桩水平承载能力的影响, 由于同时有 $P-\Delta$ (P 为桩顶下压荷载, Δ 为下压荷载导致的桩身水平偏移) 效应不利影响和下压荷载对桩周土体挤密的有利影响, 不同学者得出了不同的结论; 对上拔荷载对桩基水平承载能力的影响, Achmus 和 Thieken^[13]通过数值模拟指出, 联合荷载作用会削弱桩基的水平承载能力, 本次试验得到了与其相同的结果。

2.2.2 水平抗力系数的比例系数比较

对于水平受荷桩来说, 地基土水平抗力系数的比例系数 m (kN m^4) 是其设计的重要参数, 而现场试验是确定 m 最为可靠的方法。目前, m 法在我国应用最为广泛, 其计算式为:

$$m = \frac{(v_y \cdot H)^{\frac{5}{3}}}{b_0 Y_0^{\frac{2}{3}} (EI)^{\frac{1}{3}}} \quad (1)$$

式中: v_y 为桩顶水平位移系数, 可根据建筑桩基技术规范查得; EI 桩身抗弯刚度 (kN m^2), 其中 E 为桩身材料弹性模量, I 为桩身换算截面惯性矩; b_0 桩身计算宽度 (m), 对于本次试验桩: 当桩径 $D > 1\text{m}$ 时, $b_0 = 0.9(D+1)$ 。

两组试桩的 Y_0-m 曲线如图 8 所示, 由图可知, 联合荷载作用下试桩的 Y_0-m 曲线趋势同单独水平加载相同, 当水平位移较小时, m 随位移的增大快速衰减, 位移越小, m 值衰减越快; 当水平位移较大时, m 值随位移增大而逐渐趋于平缓, 可以取 Y_0 为 7.5mm 作为分界点, 当位移小于该值时, m 值衰减迅速, 当位移大于该值时, m 值基本趋于平缓。

更为重要的是, 联合加载作用下两组试桩的 m 均小于单独水平加载的; m 值的大小表征了地基水平抗力系数的大小, 由以上可知, 联合加载的耦合作用削弱了地基水平抗力系数, 从而导致了试桩水平承载能力的削弱。分析原因, 是由于联合荷载作用时, 试桩在带动桩周土体一起上拔的过程中, 削弱了桩周土对水平荷载的抵抗作用, 减小了桩周的土抗力。

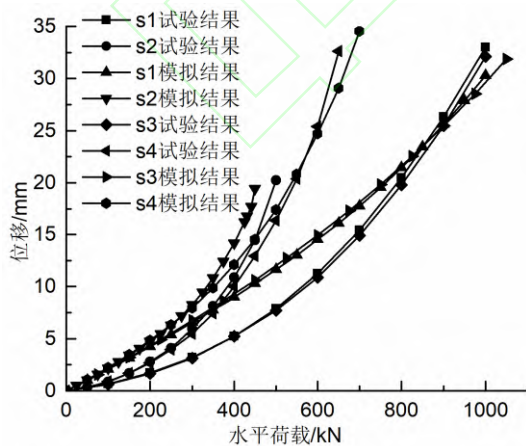


图 7 四根试桩的水平荷载-位移($H-Y_0$)关系曲线

Fig.7 Lateral Load-Displacement Curves of Piles

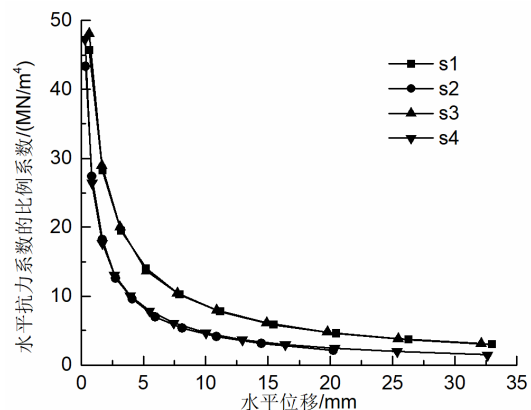


图 8 四根试桩的 Y_0-m 曲线

Fig.8 m Variation with Displacement

2.2.3 弯矩分析

对水平受荷桩来说, 桩身弯矩的大小将直接影响到其截面配筋。通过在等截面桩 s1、s2

桩身不同截面布设钢筋应力计，可以计算出在各级荷载作用下桩身弯矩分布，桩身弯矩采用文[18]的方法进行计算，图 9 为两根试桩在水平荷载为 100、300、500kN 下桩身弯矩比较图。

由图 9 可知，两根试桩弯矩的发展规律相同，同一位置处的弯矩随荷载的增加而增加，且在中部的增大趋势较上下部明显；不同位置处的弯矩随埋深的增大呈先增大后减小的趋势，桩身最大弯矩出现位置也大致相同，均在埋深 3.5~4.5m 左右。由图可知，在各级荷载下，s2 试桩的弯矩均大于 s1 试桩，随着荷载的增大，这种效应越来越明显；其原因和 m 值减小的原因一致，都是由于上拔造成了对桩周土体抗水平能力的削弱。

理论上来看，上拔与水平联合荷载作用下，桩身弯矩应该减小，而下压与水平荷载联合时弯矩应该增大，而试验却得出了相反的结果。分析原因，是由于虽然上拔荷载在与 $p-\Delta$ 相反的作用下，可以减小桩身弯矩；但却忽视了上拔荷载对桩侧土抗力的削弱，也即忽视了竖向与水平向荷载的耦合作用。郑刚文章^[4]对下压与水平联合作用下的弯矩也进行了探讨，同样得出了下压荷载可以减小桩身弯矩的结果。

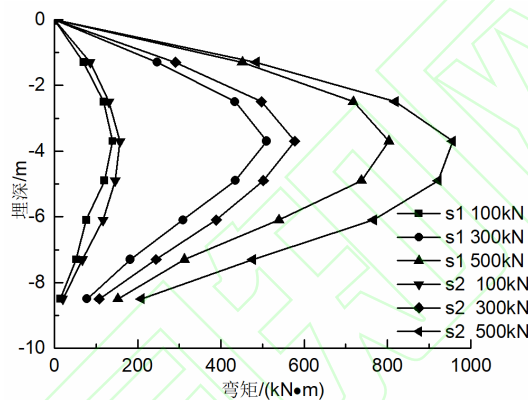


图 9 s1、s2 试桩弯矩

Fig.9 Bending Moment Distribution of Piles

2.3 桩周土体裂缝及破坏模式分析

在试验过程中，对两组试桩在加载时候出现的裂缝进行了详细的记录，由此可分析其破坏模式；两组试桩的裂缝规律相差不多，为节约篇幅，只取等截面桩 s1、s2 进行分析。试桩 s1 在上拔、水平加载过程中的裂缝发展如图 10、11 所示，试桩 s2 在联合加载过程中的裂缝发展如图 12 所示。

由图 10 可知，s1 试桩在 1200kN 上拔荷载作用下开始出明显裂缝，此时裂缝主要沿桩周径向发展，最大延伸长度和宽度分别为 330、1mm；随着荷载的增大，原有裂缝不断向长、向宽发展，同时还沿径向发展出新的裂缝；当上拔荷载为 3000kN 时，试桩已破坏，此时桩周裂缝沿径向发展最大达到 1 倍桩径的长度（1200mm），宽度为 3mm。此外，通过对试验过程的观察，发现裂缝发展过程中不仅桩周土体从桩身开始向外一定距离均有隆起，隆起量随距离的增大逐渐减小；还伴随着许多毛细裂缝的出现，由于毛细裂缝过于破碎，在图中并未示出。

前人对抗拔桩破坏模式的研究已取得一定的成果，如刘祖德、何思明^[19-20]对抗拔桩的破坏模式进行了总结，总体可以分为①沿桩土界面的剪切破坏，②与桩长等高的倒圆锥形破坏，③复合剪切面破坏，即桩身下部呈现桩土界面剪切破坏，上部为倒圆锥形破坏。上述研究对桩基破坏模式的分类均是按照抗拔桩的剖面破坏形态进行的，并未对地基表面的裂缝发展进行阐述；结合图 10 的裂缝发展及抗拔桩的破坏模式进行分析，s1 试桩的破坏模式为上述②或③。②或③破坏模式下，桩基带动桩周土体一起扩张隆起过程中，会在土体中产生环向的

拉应力，从而导致径向裂缝的产生。

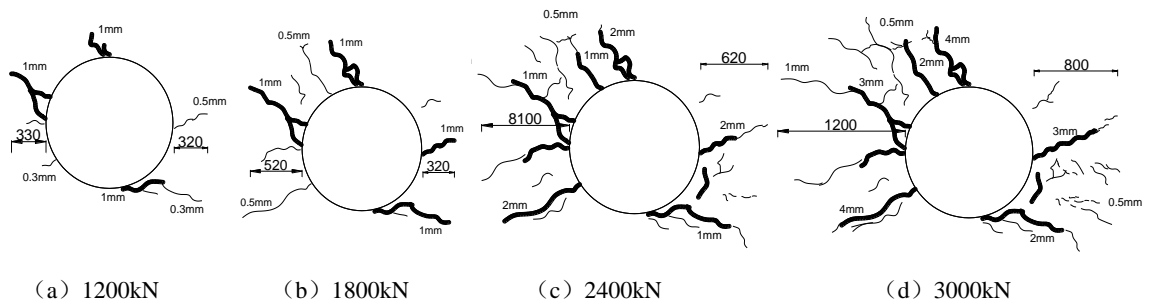


图 10 s1 试桩上拔荷载作用下裂缝发展

Fig.10 Cracks Development of s1 under Uplift Load

图 11 中，水平荷载位于桩的左侧，由图可知，s1 试桩在 200kN 水平荷载作用下开始出明显裂缝，此时裂缝主要集中于桩的右侧，最大延伸长度和宽度均较小；水平荷载作用下，裂隙多始于桩中心与水平力垂直的方向，且该方向裂缝发展最为充分，分析原因，是因为桩体在受到水平荷载时，带动桩中心与水平力垂直方向迎土侧的土体运动，使得在该方向上的土体承受拉力所致。除去由拉力所致的裂缝以外，其他部分裂缝的出现主要是由于水平荷载作用下，试桩以辐射的型式对其右侧土体的挤压所致。

总体来看，试桩在水平荷载作用下破坏时，裂缝集中在以桩中心为原点半径约为 500mm 的扇形区域内，该扇形圆形角约为 180°；与此同时，还伴随着该区域土体的明显隆起，以及背土侧桩与土的脱离。

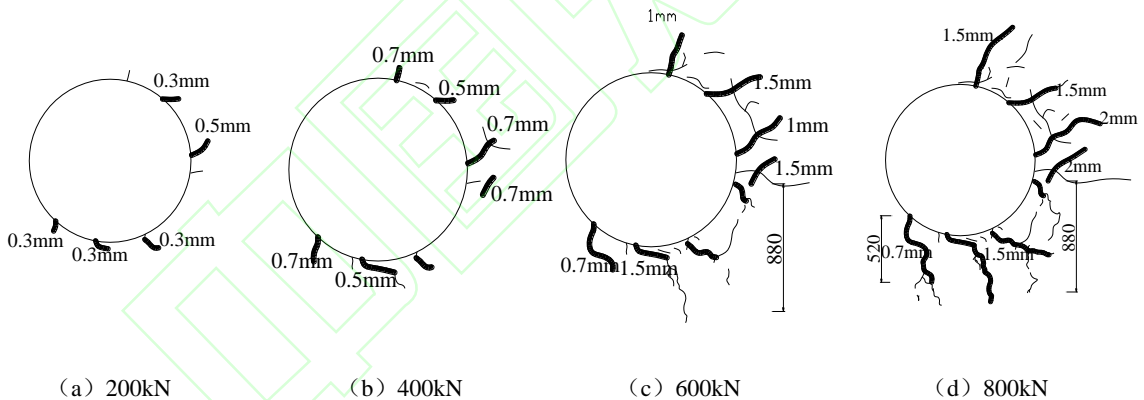


图 11 s1 试桩水平荷载作用下裂缝发展

Fig.11 Cracks Development of s1 under Lateral Load

图 12 为联合荷载作用下试桩裂缝发展图，水平荷载位于桩的左侧，左侧桩身与周围土体出现分离，从而导致左侧桩土界面没有力的传递，土体表面无裂缝产生；故裂缝发展总体与 s1 试桩水平荷载作用下裂缝相差不多，即裂缝集中在土体被挤压一侧。但由于上拔、水平荷载的同时作用，故在相同的荷载大小下，与 s1 试桩单独承受上拔、水平荷载作用的裂缝相比，s2 试桩的裂缝不论长度、宽度、范围，都要较单独荷载时大，且更为破碎；此外，s2 试桩受压侧土体的隆起位移也更大，裂缝发展过程还伴随些许切向裂缝的产生。

杨明辉^[13]通过模型试验研究了倾斜荷载下抗拔桩的破坏模式，他同样指出，倾斜荷载作用下，土体的裂缝及破坏区域集中在以试桩为中心的扇形区域内，该扇形角度在 160°左右，本次试验得到了与其相似的结果；另外，杨还通过对破坏土体侧面的开挖指出土体破坏仅发生在桩顶以下一定深度范围内，遗憾的是，本次试验未对破坏土体进行开挖，未能确定

破坏土体的具体范围。

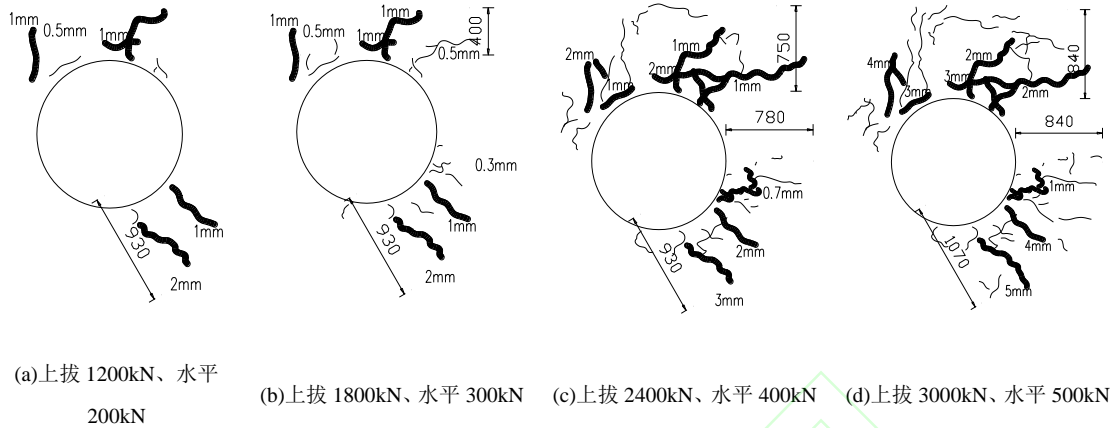


图 12 s2 试桩联合荷载作用下裂缝发展
 Fig.12 Cracks Development of s2 under Combined Loading

3 联合荷载作用对桩基承载性能影响的数值模拟研究

上述现场试验研究了上拔、水平荷载比例为 6:1 的联合荷载作用对桩基承载性能的影响，但工程实际中，竖向与水平向的荷载比例并不局限于此，且为了验证上述试验结果的可靠性；因此，本节通过数值模拟在能够与现场试验结果吻合的基础上，研究竖向与水平向荷载在不同比例情况下对桩基承载性能的影响。

3.1 数值模型和模型验证

采用有限元软件 ABAQUS 对上述问题建模分析，地基采用弹性-摩尔库伦塑性模型，桩基采用弹性模型，参数见表 2。地基与桩基之间的接触面采用库伦摩擦模型，由于试验桩基由人工挖孔而成，侧壁较为粗糙，故模拟过程中接触面摩擦角取与地基内摩擦角一致，相应的摩擦系数 μ 取 0.40。有限元模型地基为直径 30m 埋深 20m 的圆柱体，其径、轴向尺寸分别为桩基的 25、2 倍，s1、s2 桩基模型网格见图 13。

表 2 模型材料参数

Table 2 Material Parameters Used in Models

类别	重度 $\gamma/\text{kN/m}^3$	弹模 E/MPa	泊松比 ν	粘聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/^\circ$	剪胀角 $\phi/^\circ$
土体	16	15	0.3	20	22	2.2
桩体	24.5	30000	0.2	-	-	-

数值计算首先需要进行地应力的平衡，该过程需对初始地应力场和水平地应力系数 k 进行定义。需指出的是， k 的大小决定了侧阻的大小，即其对计算结果有较大影响； k 的大小与建筑物的安全等级及土层应力历史等有关，其可在主、被动土压力系数 k_a 与 k_p 之间取值。通过多次试算，决定采用 $k=k_p=2.20$ ，此时计算结果能够最大程度吻合试验结果。

对前述四根试桩进行验证，试验和模拟结果对比见图 3 图 7。由图可知，模拟的位移稍大于试验结果，原因在于模拟过程中接触面的刚度在弹性阶段保持不变，而试验过程中，刚度则是逐渐减小的。由于 s1、s3 试桩首先开展了上拔试验，桩身存在裂缝，导致 s1、s3 的试验水平位移增长幅度在加载后期较模拟结果大。总体来说，模拟与试验结果趋势较为吻合，模拟结果能够真实的反映实际情况。

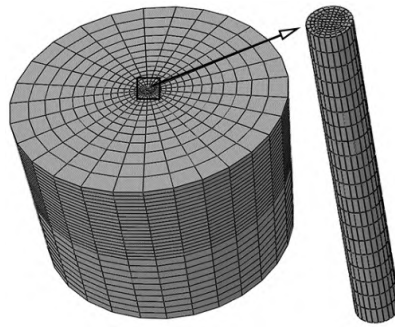


图 13 有限元网格

Fig. 13 Finite Element Model

竖向与水平向荷载在不同比例情况下对桩基承载性能影响的加载比例见表 3。

3.2 联合荷载对桩基承载能力影响分析

联合加载下两组试桩的破坏荷载见表 3，由于联合加载对两组试桩承载性能的影响相似，故只取 s3、s4 试桩的上拔和 s1、s2 试桩的水平数值计算荷载位移曲线进行分析，不同加载比例情况下上拔、水平荷载位移曲线见图 14。

表 3 联合荷载加载比例及破坏荷载
Table 3 Ratio of Uplift and Lateral Load and the Ultimate Load

桩号	s1		s2					
上拔与水平荷载比例	—	1:2	1:1	2:1	3:1	5:1	10:1	
破坏荷载/kN	上拔	2550*	555	981	1824	2484	2700*	2645*
	水平	—	994*	1010*	981*	912*	828*	540
桩号	s3		s4					
上拔与水平荷载比例	—	1:2	1:1	2:1	3:1	5:1	10:1	
破坏荷载/kN	上拔	3952*	494	963	1812	2520	3520	4012*
	水平	—	1008*	988*	963*	906*	840*	704*

注：表中加*号的荷载为桩基在该方向已达破坏标准时的荷载，不加*号的荷载为按照比例对应的荷载。

由图 14 (a) 结合表 3 可知，对于桩基的上拔承载性能，联合荷载作用下，桩基在破坏荷载之前的荷载位移曲线均与单独上拔加载时的保持基本重合；但由于联合荷载的作用，当上拔与水平加载的比例不大于 5 时（对于 s2 桩，该比例为 3），也即水平荷载在联合荷载中比例较大时，桩基首先在水平方向达到破坏标准，此时桩基在上拔方向的承载能力不能充分发挥，表现在表 3 中即为此时的上拔破坏荷载小于单独上拔加载的破坏荷载。

由图 14 (b) 结合表 3 可知，当联合荷载上拔与水平加载的比例小于 2 时，桩基在水平方向的承载能力基本与单独加载时相同；当该比例不小于 2 时，桩基的水平承载能力明显被削弱，且被削弱的程度随着该比例的增大而提高；如 s3 桩单独水平加载时，30mm 对应的水平承载力为 1008kN，s4 桩 1:1 和 5:1 联合加载时，对应的水平承载力分别为 963、704kN。对于 s2 桩。当上拔与水平加载的比例不小于 5 时，也即上拔荷载在联合荷载中比例较大时，桩基首先在上拔方向达到破坏标准，此时桩基在水平方向的承载能力不能充分发挥，表现在表 3 中即为此时的水平破坏荷载大幅小于单独水平加载的破坏荷载。结合表 3 中 s2 桩的破坏荷载，推测对于 s2 桩来说要想使上拔、水平承载力均能充分发挥，联合荷载的比例为 4:1 左右。

由上述可知，上拔、水平联合加载比例不同，对上拔、水平向的影响也不同，且此时上拔、水平向的承载能力也不一定能够充分发挥；上拔、水平联合加载比例较大时，桩基水平

承载力被大幅削弱，且不能充分发挥；反之，桩基上拔承载能力不能充分发挥，但上拔位移不会增大。

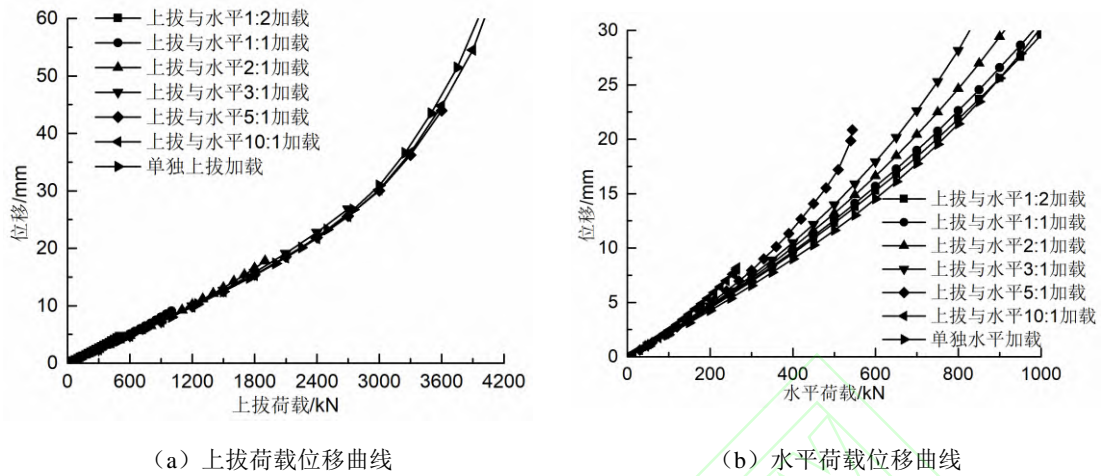


图 14 联合荷载不同加载比例桩基荷载位移曲线

Fig. 14 Load Displacement Curve with Different Loading Ratio under Combined Loading

4 结语

通过现场试验及数值模拟对上拔、水平联合荷载作用对桩基承载性能的影响进行了研究，得到了以下几条结论：

1) 上拔、水平联合荷载作用对桩基承载性能的影响与上拔、水平向荷载的比例有较大关系。就本文的等截面桩和扩底桩来说，当该比例小于 2 时，联合荷载作用对桩基水平承载能力影响较小；不小于 2 时，桩基的水平承载能力明显被削弱，且被削弱的程度随着该比例的增大而提高。联合荷载作用下桩基的上拔荷载位移曲线与单独上拔时基本重合，但在加载比例较小时，如对于等截面桩不超过 3，扩底桩不超过 5 时，由于桩基在水平方向先达到破坏标准，会导致桩基上拔承载能力不能充分发挥。

2) 联合荷载作用时，由于上拔荷载的作用，桩基会带动桩周土体的一起上拔，减小地基土抗力系数的比例系数 m ，增大桩身的弯矩（且联合荷载越大，弯矩较单独水平加载时增大程度越多）。由于水平荷载的作用，桩基上部受压侧垂直方向的土压力会由于土体被挤密而变大，上部受拉侧土压力则会由于桩与土的分离而变小；桩基下部则由于桩基的刚性转动表现出相反的趋势。

3) 联合荷载作用下，桩基的破坏模式为靠荷载一侧桩周土体破坏，周围土体的裂缝集中在以试桩为中心的扇形区域内，裂缝不论长度、宽度、范围，都要较单独荷载时大，且更为破碎。

一方面，联合荷载对桩基承载性能的影响是客观存在且不可忽视；另一方面，联合荷载下桩基各个方向的承载能力并不一定均能充分发挥，势必会造成桩基设计的不合理，如何设计桩基使得桩基不同方向的承载力均能充分发挥有待进一步的研究。

参考文献：

References:

- [1] ANAGNOSTOPOULOS C, GEORGIADIS M. Interaction of Axial and Lateral Pile Responses[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, 119 (4): 793—798.
- [2] 皇甫明, 王幼青, 王梦恕. 水平力对竖直桩沉降和承载力影响的研究[J]. *岩土工程学报*, 2003, 25(4): 511—513.
HUANG Fu-ming, WANG You-qing, WANG Meng-shu. Study of Effects of Lateral Loads on the Settlement and Bearing Capacity of Pile[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, 25 (4): 511—513.
- [3] 皇甫明, 王幼青, 张军. 纵横向荷载作用下桩的工作性状研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2003, 35(6): 743—746.
HUANG Fu-ming, WANG You-qing, ZHANG Jun. Behavior of Pile under Combined Axial and Lateral Loading[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2003, 35 (6): 743—746.
- [4] 郑刚, 王丽. 竖向及水平荷载加载水平、顺序对单桩承载力的影响[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(12): 1796—1804.
ZHENG Gang, WANG Li. Effect of Loading Level and Sequence of Vertical and Lateral Load on Bearing Capacity of Single Pile[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30 (12): 1796—1804.
- [5] 郑刚, 王丽. 成层土中倾斜荷载作用下桩承载力有限元分析[J]. *岩土力学*, 2009, 30(3): 680—687.
ZHENG Gang, WANG LI. Finite Element Analysis of Bearing Capacity of Pile under Inclined Load in Layered Soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30 (3): 680—687.
- [6] 张建伟, 韩一, 李荣翔, 等. 组合荷载作用下斜坡上桩基础水平承载特性研究[J]. *建筑结构*, 2020, 50(13): 128—133.
ZHANG Jian-wei, HAN Yi, LI Rong-xiang, et al. Study on Horizontal Bearing Characteristics of Pile Foundation on Slope under Combined Load[J]. *Building Structure*, 2020, 50 (13): 128—133.
- [7] KARTHIGEYAN S, RAMAKRISHNA V V G S T, RAJAGOPAL K. Influence of vertical load on the lateral response of piles in sand[J]. *Computers and Geotechnics*, 2006 33(2): 121—131.
- [8] ZHANG L, GONG X N, YANG Z X, et al. Elastoplastic Solutions for Single Piles under Combined Vertical and Lateral Loads[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2011, 18 (1): 216—222.
- [9] KARTHIGEYAN S, RAMAKRISHNA V V G S T, RAJAGOPAL K. Numerical Investigation of the Effect of Vertical Load on the Lateral Response of Piles[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133 (5): 512—521.
- [10] 赵春风, 刘丰铭, 邱志雄. 等. 砂土中竖向和水平荷载共同作用下的单桩承载特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(1): 183—190.
ZHAO Chun-feng, LIU Feng-ming, QIU Zhi-xiong, et al. Study on Bearing Behavior of a Single Pile under Combined Vertical and Lateral Loads in Sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37 (1): 183—190.
- [11] 周立朵, 孔纲强, 彭怀风, 等. 倾斜荷载下群桩承载特性理论分析[J]. *岩土力学*, 2017, 38(9): 2647—2654.
ZHOU Li-duo, KONG Gang-qiang, PENG Huai-feng, et al. Theoretical Analysis of Bearing Capacities of Pile Group under Oblique Load[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38 (9): 2647—2654.
- [12] PATRA N R, PISE P J. Model Pile Groups under Oblique Pullout Loads—An Investigation[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2006, 24 (2): 265—282.
- [13] ACHMUS M, THIEKEN K. On the Behavior of Piles in Non-cohesive Soil under Combined Horizontal and Vertical Loading[J]. *Acta Geotechnica*, 2010, 5 (3): 199—210.
- [14] 杨明辉, 杨学文, 赵明华. 黏性土中倾斜荷载下抗拔桩的模型试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(11): 13—19.
YANG Ming-hui, YANG Xue-wen, Zhao Ming-hua. Study on Model Experiments on Uplift Piles in Clay

- under Oblique Loads[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43 (11): 13—19.
- [15] 郭沛翰, 邹新军. 均质砂土地基中竖向力-水平力-桩顶扭矩共同作用下单桩承载特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(11): 2593-2600.
- GUO Pei-han, ZOU Xin-jun. Bearing Capacity of A Single Pile in Sand under Combined Vertical Force-Horizontal Force-Torque Load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(11): 2593-2600.
- [16] 邹新军, 丁仕进, 徐洞斌. 中密砂土地基中 H-T 组合作用下单桩承载特性研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(11): 107-114.
- ZOU Xin-jun, DING Shi-jin, XU Dong-bin. Bearing Behavior of A Single Pile under Combined H-T Loads in Medium-dense Sand Subsoil[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(11): 107-114.
- [17] RANDOLPH M F, WORTH C P. An Analysis of the Vertical Deformation of Pile Groups[J]. Géotechnique, 1979, 29(4):423—439.
- [18] 李洪江, 童立元, 刘松玉, 等. 后注浆超长灌注桩水平承载特性现场试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(6): 209—216.
- LI Hong-jiang, TONG Li-yuan, LIU Song-yu, et al. Experimental Study on Lateral Bearing Behavior of Post-grouting Super-long Bored pile[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37 (6): 209—216.
- [19] 刘祖德. 抗拔桩基础[J]. 地基处理, 1995, 6(4): 51—55.
- LIU Zu-de. Foundation of Uplift Pile[J]. Foundation Treatment, 1995, 6(4): 51—55.
- [20] 何思明. 抗拔桩破坏特性及承载力研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 308—310.
- HE Si-ming. Study on the Bearing Capacity and Failure of Uplift Pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(3): 308—310.

序号	参数	含义
1	w	土体含水量
2	γ	土体天然重度
3	w_L	土体液限
4	w_P	土体塑限
5	c	土体粘聚力
6	φ	土体内摩擦角
7	D	桩身直径
8	U	上拔荷载
9	δ	上拔位移
10	H	水平荷载
11	Y_0	水平位移
12	P	桩顶下压荷载
13	A	下压荷载导致的桩身水平偏移

14	m	地基土水平抗力系数的比例系数
15	ν_y	桩顶水平位移系数
16	E	桩身材料弹性模量
17	I	桩身换算截面惯性矩
18	b_0	桩身计算宽度
19	μ	桩土摩擦系数
20	ϕ	剪胀角
21	k	水平地应力系数
22	k_a	主动土压力系数
23	k_p	被动土压力系数