doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.01.014

门架式抗滑桩结构模型试验研究

赵波[1,2],王运生[1],王羽[3],王富强[3],翟永超[4],申通[1]

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,成都 610059;
2. 重庆建工集团股份有限公司设计研究院 重庆 400050;3. 重庆交通大学 土木工程学院,重庆 400074;4. 中交第一公路工程局有限公司 北京 10002)

摘　要:为了对门架式抗滑桩的结构特性有进一步的认识和提升,进行了门架式抗滑桩三维地质力学模型试验与门架式抗滑桩结构模型试验。通过在桩身内部贴置应变片以及桩身的关键位置处放置千分表,来测量在推力荷载施加过程中,门架式抗滑桩的桩身应力变化特点及关键位置点的位移变化特征。试验结果表明:门架式抗滑桩桩前、后排桩桩顶位移大于滑动面处位移,后排桩桩身位移大于前排桩桩身位移;前、后排桩桩身内力均呈现明显的"s"型分布,桩顶应力不为零,其数值随着推力荷载的增大的而增大。

关键词:门架式抗滑桩;三维地质力学试验;结构模型试验;结构特性

中图分类号:TU473　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1674-4764(2017)01-0101-05

Model test of the structure of portal anti-sliding piles

Zhao Bo[1,2], *Wang Yunsheng*[1], *Wang Yu*[3], *Wang Fuqiang*[3], *Zhai Yongchao*[4], *Shen Tong*[1]

(1. State key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, P. R. China; 2. Design and Research Institute of Chongqing Construction Engineering Group Company Limited, Chongqing 400050, P. R. China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China; 4. China First Highway Engineering Co., Ltd, Beijing 100024, P. R. China)

Abstract: The geomechanical model testing based on pile-soil interaction and structure model test of portal anti-sliding piles are conducted to study its stress mechanism. Strain gauges are pasted in internal of piles to discuss its stress features, and dial indicators are placed at key positions to analysis its displacement features. The results showed that the displacement of rear pile is larger than front pile, and the displacement of pile top is larger than the position of sliding surfaces. The stress distribution of rear pile and front pile both present the "s" distribution and the stress value of top rear pile and front pile is not null whose value increases with the growth of thrust load.

Keywords: portal anti-sliding piles; geomechanical model testing; structure model test; structural characteristics

---

收稿日期:2015-07-13

基金项目:国家自然科学基金(41521002、51408086);国家重点实验室基金(SKLGP2015Z001)

作者简介:赵波(1989-),男,博士生,主要从事地质灾害防治研究,(E-mail)goodman_zhao@163.com.

Received:2016-07-13

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 41521002, 51408086); Opening Fund of State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (No. SKLGP2015Z001)

Author brief: Zhao Bo (1989-), PhD candidate, main research interest: geological disaster prevention, (E-mail)goodman_zhao@163.com.

门架式抗滑桩是由前、后两根相距一定间距的钢筋混凝土抗滑桩以及一根连系横梁组成，连系横梁把前、后排桩在桩顶刚性连接起来，形成一个刚性整体支挡结构。门架式抗滑桩作为一种较为典型的组合式支挡结构，由于具有桩身刚度大，桩顶位移小，具有较好的支挡性能和收坡功能[1-5]。

众多学者围绕着门架式抗滑桩展开了多方面的研究：首先门架式抗滑桩的计算方法和模型被不断提出，如：土压力法、结构变形法、有限元法和考虑桩-土相互作用下的结构计算方法[6-13]，这些方法实现了门架式抗滑桩结构计算由定性向定量的转变。其次大量的结构模型试验和数值模拟也从另外一个角度对门架式抗滑桩结构优越性进行了较为细致的分析和研究[14-17]，以上这些研究均极大的促进了门架式抗滑桩的推广应用[18]。

但目前仍有部分问题还需要明晰，如：传统的结构模型试验是否能够真实反映桩-土相互作用下门架式抗滑桩的结构特性。为此，课题组进行了考虑实际桩-土相互作用下的门架式抗滑桩试验和传统的结构模型试验，来进行相互验证分析，验证得到数据或规律的准确性和科学性，以期可以提高对门架式抗滑桩的科学认知。

1 试验设计

1.1 三维地质力学试验

实验采用室外钢架焊接模型，模型的具体组成及其尺寸见图1。此模型长250 cm，宽170 cm。滑带位于与水平夹角为10°左右的斜面。

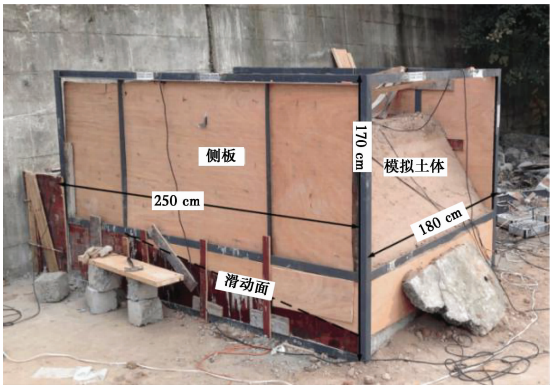

图1 地质力学试验模型

Fig. 1 Physical model of portal pile

门架式模型桩为钢筋混凝土桩，此模型桩各部分的横截面积（前排桩、后排桩、连系梁）均为8 cm×10 cm，前、后排桩桩高均为96 cm，前后排桩间距为68 cm，前、后排桩的锚固深度分别为：15、20 cm，此模型桩的配筋为Φ6的光面钢筋，混凝土强度为C7.5，并在桩身内部贴置应变片，桩顶设置位移计来测量加载过程中的相关力学参数的变化。

滑带土体采用砂土、粘土、水泥质量比为6∶4∶0.5的比例来进行配比，同时每100 kg配合土中加入5 kg水进行均匀搅拌，然后均匀摊铺压实。滑床采用了C25的混凝土进行浇筑。同时，考虑模型桩的强度（C7.5），不能等到滑床混凝土达到龄期后在进行试验，根据相关试验，在滑床混凝土浇筑11 d左右开始进行试验。同时为了减少滑床与滑体之间的摩擦，在滑床上铺设一层聚乙烯薄膜来模拟滑带。

1.2 门架式抗滑桩结构模型试验

如图2所示为门架式抗滑桩结构模型试验图。此结构模型为钢筋混凝土桩，前、后排桩桩高均为140 cm，其中锚固段深度为50 cm，抗滑段为90 cm，前、后排桩横截面积均为12 cm×18 cm，模型桩的配筋为Φ8钢筋，混凝土强度为C20。

在桩身内部贴置应变片和在桩身C点（后排桩桩顶）、D点（前排桩桩顶）、K点（后排桩滑动面）、J点（前排桩滑动面），设置4个位移计来测量加载过程中桩身内力变化和变形规律，见图2。

图2 结构模型试验图

Fig. 2 Structure model of portal pile

2 结果分析

2.1 桩身位移分析

2.1.1 三维地质力学模型试验 图3所示为门架式抗滑桩后排桩桩顶位移随着推力荷载变化图。

由图3可知，在滑坡推力较小时（推力荷载＜100 kN），后排桩桩顶位移很小，且变化不大；滑坡推力＞100 kN后，门架式抗滑后排桩桩顶开始迅速增大，并且其增长速率随着推力荷载的增大而逐渐增

大，并在推力荷载＝150 kN 时，桩顶位移达到了 5.95 mm。这主要是因为：1）由于土体有“吸收”推力系统产生的推力来时自身变得“密实”的特点，故当滑坡推力小于一定的值时，大部分的推力被桩后土体“吸收”，造成传递到门架式抗滑桩上的力较小，使得桩身形变小；当推力荷载大于一定值后，桩后土体“吸收”的能量达到饱和，这时传递推力的效率就会增加，门架式抗滑桩所受的推力荷载值也就会迅速增加；2）门架式抗滑桩作为一种超静定结构，本身具有自我内力调节的功能，当承受推力荷载在一定范围内时，门架式抗滑可以通过自身的调节来降低门架式抗滑桩的桩身位移，这也可能是导致位移变化不大的原因，当推力荷载大于一定值后，门架式抗滑桩就需要产生一定的形变来来抵抗额外产生的滑坡推力，当推力荷载大于一定值后，门架式抗滑桩开始产生快速变形。

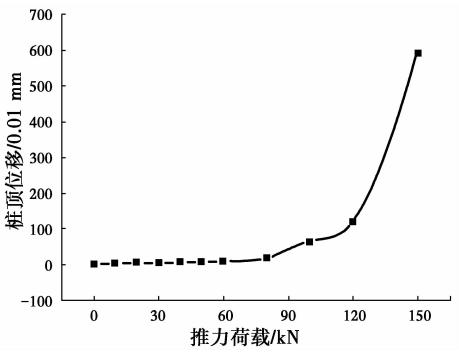

图 3　门架式抗滑桩后排桩桩顶位移变化图

Fig. 3　The displacement distribution of rear pile head

2.1.2　门架式抗滑桩结构模型试验　图 4(a)、(b)所示为前、后排桩桩顶和滑动面处的桩身位移随推力荷载变化图。从图 4(a)、(b)可知，他们曲线的分布形式均大致相同，均呈现桩顶处的位移较大（*C* 点、*D* 点），滑动面处较小（*K* 点、*J* 点）；同时，随着推力荷载的增大，桩顶处的位移值持续增大，滑动面处的位移值增长十分缓慢，两者的位移差随着推力的增大而增大。

图 4(c)、(d)所示为前、后排桩桩顶处的位移变化图和滑动面处的桩身位移变化图。从 4(c)可知，在前后排桩桩顶处后排桩的在滑坡推力＜1 000 kg 时差距不大，但当推力荷载＞1 000 kg 后，前、后排桩桩顶位移开始快速增大，同时，后排桩的增大速率比前排桩要大，导致前、后排桩桩顶位移呈现后排桩位移大于前排桩位移，并且随着滑坡推力的增大，两者的差距呈现缓慢增大的趋势。从图 4(d)可知，前、后排桩滑动面处的桩身位移变化不大。

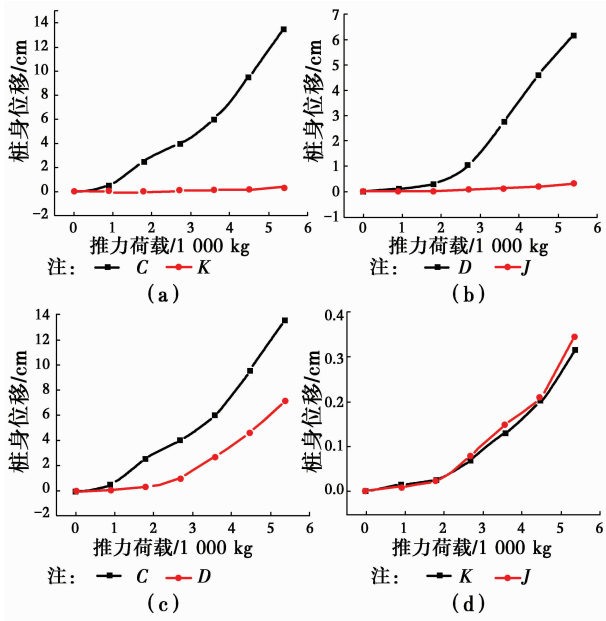

图 4　门架式抗滑桩桩身位移图

Fig. 4　The displacement of pile body

2.2　桩身内力分析

2.2.1　三维地质力学试验　图 5 为不同荷载推力作用下门架式抗滑桩后排桩的应力分布图，由图 5 可知，门架式抗滑的应力分布形式与传统抗滑桩的内力分布形式大致相同，均呈现典型的“s”形分布，但门架式抗滑桩桩顶弯矩值并不为零，而是呈现一个非零值，并且这个非零值随着推力荷载的增大而增大。同时，随着推力荷载的增大，其弯矩分布形式没有发生变化，只是数值产生了变化。笔者认为造成其桩顶内力不为零的主要原因是由于桩顶连系梁的作用，连系横梁将前、后排桩刚性连接在一起，前、后排桩的桩身内力可以通过连系梁进行传递，实现内力的重新分配，由于推力荷载会首先作用于后排桩，引起后排桩将部分内力通过连系梁传递给前排桩，根据作用力与反作用力，后排桩受到一个反向的内力，由此造成了后排桩桩顶内力不为零。推力荷载越大，后排桩传递给前排桩的内力也就越大，导致后排桩所受到的反向内力也就越大，引起桩顶内力越大。

图 6 所示为门架式抗滑桩前排桩桩身弯矩分布图。从图 6 可知，前排桩的弯矩分布形式与后排桩大致相同，呈现典型的“s”形分布。同时其桩顶弯矩也不为零，并且这个非零值随着推力荷载的增大而增大。造成这种现象主要是由于，后排桩通过连系梁把内力传递给前排桩，使得前排桩桩顶的内力并

不为零，同时推力荷载越大，后排桩通过连系梁传递给前排桩的内力也就越大，导致桩顶应力值也就越大。

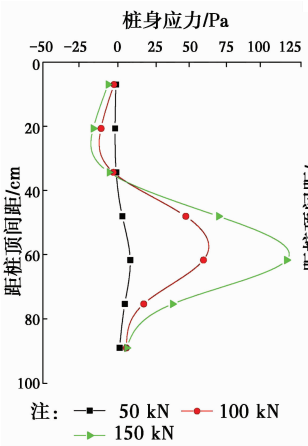

图5 门架式抗滑桩后排桩桩身弯矩图

Fig. 5 The bending moment distribution of rear pile

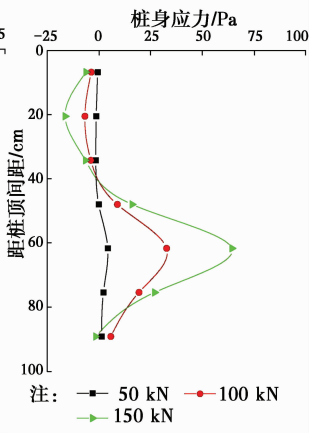

图6 门架式抗滑桩前排桩桩身弯矩图

Fig. 6 The bending moment distribution of front pile

2.2.2 结构模型试验 图7为不同推力荷载作用下门架式抗滑桩后排桩桩身应力分布图。由图7可知，门架式抗滑桩后排桩的桩身应力同样呈现典型的“s”形分布。只是上部的曲线相对于下部变得不是特别明显，同时其桩顶的应力也并不为零，这个非零值随着滑坡推力的增大而增大，其原因见前述分析。

图8为门架式抗滑桩不同推力荷载作用下前排桩桩身应力分布图，可以发现前排桩桩身应力分布形式同前排桩极为相似，也是呈现“s”形分布，同时其桩顶内力也不为零。

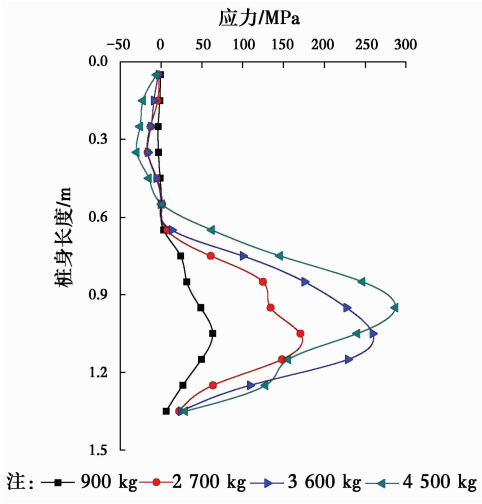

图7 门架式抗滑桩后排桩桩身应力图

Fig. 7 The pile stress distribution of rear pile

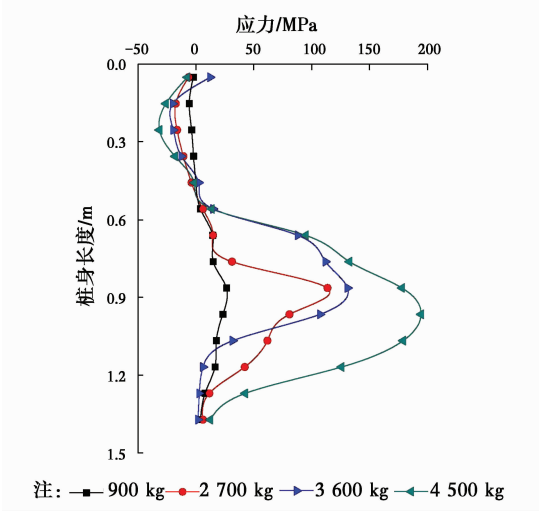

图8 门架式抗滑桩前排桩桩身应力图

Fig. 8 The pile stress distribution of front pile

3 两组试验共性与差异性分析

三维地质力学试验和结构模型试验均表明：门架式抗滑桩的桩身应力分布呈现典型的“s”型分布，出现两处反弯点，同时由于连系梁的存在，前、后排桩的桩顶应力为非零值，并随着滑坡推力的增大而增大。不难发现，门架式抗滑桩前后排桩由于桩顶连系梁的作用，使得前排桩可以通过连系梁进行桩身内力的传递，使得前后排桩可以进行相互协调，可以明显的提高整体的支挡的效果，这是组合式支挡结构比传统抗滑桩所具有的优势所在。

但在结构模型试验中，由于加载系统的局限性，使其不能像地质力学试验一样通过桩-土的相互作用来真实的模拟滑坡推力，致使滑动面以上的桩身应力分布并没有与地质模型试验一样呈现较为明显、平滑的变化。

4 结论

1)由于土体“吸能”和桩身自我协调的作用，导致在推力荷载较小时，桩身位移变化不大，只要当推力荷载大于一定程度后，桩身才会产生形变来抵抗额外的推力荷载。

2)门架式抗滑桩桩顶处的位移大于滑动面处的位移，前排桩桩顶位移小于后排桩桩顶位移，前后排桩在滑动面处的位移大致相等。

3)门架式抗滑桩前排桩的桩身内力呈现典型的“s”形分布，这个分布与传统抗滑桩相差不大。但是由于桩顶连系梁的作用，门架式抗滑桩前、后排桩桩

顶处的内力并不为零，并且这个非零值随着推力荷载的增大而增大。

参考文献：

[1] 李小兵. 边(滑)坡中门型抗滑桩计算分析方法研究[D]. 成都：西南交通大学，2007.
LI X B. Study on analysis method of gate-type anti-sliding piles in engineered slope or large-scale landslide control [D]. Chengdu：Southwest Jiaotong University，2007. (in Chinese)

[2] 胡松，杨明辉. 双排抗滑桩桩土作用分析模型及其应用[J]. 公路工程，2012，37(1)：7-12.
HU S，YANG M H. The analysis model of pile-soil interaction for the double-row anti-sliding piles structure and its application [J]. Highway Engineering，2012，37(1)：7-12. (in Chinese)

[3] 刘鸿. 双排抗滑桩计算方法研究[D]. 成都：西南交通大学，2007.
LIU H. Investigation on double-row anti-sliding piles [D]. Chengdu：Southwest Jiaotong University，2007. (in Chinese)

[4] 邓飚. 门架式双排抗滑桩模型试验及计算方法研究[D]. 长沙：中南大学，2014.
DENG B. Model test and calculation method research on portal double-row anti-sliding piles [D]. Changsha：Central South University，2014. (in Chinese)

[5] 张明瑞. 门型抗滑桩支护滑坡时受力特性的数值模拟研究[D]. 南京：南京大学，2011.
ZHANG M R. Numerical modeling study on portal structure anti-sliding piles reinforcing landslide [D]. Nanjing：Nanjing University，2011. (in Chinese)

[6] HEYMAN L. Measurement of the influene of lateral earth pressure on pile foundation [C]// Proc. 6th ICSMFE，Montreal，1965：257-260.

[7] NICU N D，ANTES D R，KESSLER R S. Field measurements on instrumented piles under an overpass abutment [M]. Highway Research Record，1971：88-92.

[8] OTEO C S. Discussion to poulos [M]. JSMFD，ASCE，1974：365-372.

[9] STEWART D P，JEWELL R J，RANDOLPH M F. Design of piled bridge abutments on soft clay for loading from lateral soil movements [J]. Geotechnique，1994，44(2)：176-179.

[10] OTEO C S. Horizontally loaded piles-deformation influence [C]// Proc，9th ICSMFE，Tokyo，1997：121-129.

[11] MANA A I. Finite element analysis of deep excavation behavior [D]. Stanford University，1997.

[12] 何颐华，杨斌，金宝森. 双排护坡桩试验与计算的研究[J]. 建筑结构学报，1996，(2)：43-49.
HE Y H，YANG B，JIN B S. A study on the test and calculation of double-row fender piles [J]. Journal of Building Structures，1996，17(2)：58-66. (in Chinese)

[13] YING H W，CHU Z H. Finite element analysis of deep excavation with braced retaining structure of double-row piles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2007(Sup2)：4325-4331.

[14] 钱同辉，唐辉明. 双排门式抗滑桩的空间计算模型[J]. 岩土力学，2009，30(4)：1137-1142.
QIAN T H，TANG H M. Spatial calculation model for portal double row anti-slide piles [J]. Rock and Soil Mechanics，2009，30(4)：1137-1141. (in Chinese)

[15] 周翠英，刘祚秋，尚伟，等. 门架式双排抗滑桩设计计算新模式[J]. 岩土力学，2005，26(3)：441-446.
ZHOU C Y，LIU Z Q，SHANG W，et al. A new mode for calculation of portal double row anti-sliding piles [J]. Rock and Soil Mechanics，2005，26(3)：441-446. (in Chinese)

[16] 申永江，邓飚，杨明，等. 门架式双排抗滑桩的弹塑性模型与计算分析[J]. 岩土力学，2014，35(6)：149-156.
SHEN Y J，DENG B，YANG M. Elastoplastic models and calculation analysis of portal double-row anti-slide piles [J]. Rock and Soil Mechanics，2014，35(6)：149-156. (in Chinese)

[17] 于洋，孙红月，尚岳全. 基于桩周土体位移的双排抗滑桩计算模型[J]. 岩石力学与工程学报，2014，33(1)：172-178.
YU Y，SUN H Y，SHANG Y Y. Calculation model of double-row stabilizing piles based on displacement of soil around piles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2014，33(1)：172-178. (in Chinese)

[18] DUNCAN J M. Analysis of soil movement around a deep excavation [J]. Journal of Soil Mech and Found，ASCE，1970，96(5)：58-62.

（编辑　王秀玲）