

文章编号: 1000-7598-(2006) 增-0670-05

角钢插入式基础抗拔破坏机理研究

彭立才^{1,2}, 陈土胜², 张楚勇²

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 珠海市建设工程质检站, 珠海 519015)

摘 要: 通过对角钢插入式基础抗拔试验, 分析了角钢与混凝土之间的黏结性能及应力分布特点, 探讨了角钢插入式基础抗拔破坏的影响因素, 重点研究了插入式基础角钢与混凝土之间的摩擦系数的变化规律, 给出了一个比较符合实际且又方便设计的平均摩擦系数。

关 键 词: 插入式基础; 应力分布; 抗拔破坏试验; 平均摩擦系数

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Study on pullout failure mechanism of inserted foundation

PENG Li cai^{1,2}, CHEN Tu sheng², ZHANG Chu yong²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092, China;

2. Zhuhai Supervision and Inspection Station of Construction Quality, Zhuhai, 519015, China)

Abstract: Based on the pullout test of angle steel inserted foundation, the bond performance and stress distribution between the angle steel and concrete are discussed. The influence on the pullout failure of inserted foundation is analyzed. The variation law of coefficient of friction of inserted foundation is emphatically investigated; and the average friction coefficient which is up to practice and design is presented.

Key words: inserted foundation; stress distribution; pullout failure test; average coefficient of friction

1 引 言

在输电线路的基础设计中, 插入式基础被广泛采用, 可以承受下压、水平、上拔 3 种荷载的作用。目前, 我国的送电线路中在强风化岩地区使用插入式基础虽然已取得了一定的施工和设计经验, 但是由于各地地质岩性的分布情况及其风化程度的差异, 影响承载力的因素很多, 破坏机理^[1]尚不明确, 因此, 对在角钢从混凝土基础中拔出时, 以及在破坏的瞬间内力的变化过程和基础抗拔破坏的机理进行研究具有很强的实际意义。

本文针对插入式基础设计中的角钢埋入深度、种类和锚固等设计问题^[2-4], 对插入式基础进行了抗拔破坏试验, 分析了插入式基础抗拔破坏的几个影响因素, 同时, 还重点研究了插入式基础角钢与混凝土之间的摩擦系数的变化规律, 为该基础设计提供依据。

2 试验概况

2.1 试验方法

本次试验采用轴心受拉。试验加载采用快速维持荷载法加卸载^[3, 4]。快速荷载法用于短期荷载下的基础试验, 如直线和耐张(以最大风荷载占主要部分)的塔基。

加载方式采用液压千斤顶对试件施加外力, 千斤顶通过高压油管与高压油泵相连, 由对高压油泵的操作来实现千斤顶对试件施加荷载, 并用拉力传感器计力。整个试验装置如图 1 所示。

加载分级: 每级加载为预估极限荷载的 1/10~1/15, 达到预估极限荷载的 85% 以后, 每级加载降为极限荷载的 1/20~1/40。第 1 级可按 2 倍分级荷载加荷。

每级加载的相隔时间以变形相对稳定为准。根据本试验的特点, 采取双控的方法, 即所测数据(应变或位移)相对稳定, 变化量不超过其值的 5%, 同

时还要保证间隔时间在 5min 以上。试件达到破坏后，按每级 2 倍的加荷量卸荷到 0。

2.1 试件形式、数量及编号

选取了普通 A₃ 钢 L100×8 和 16Mn 钢 L125×10 两种截面形式的埋入角钢；混凝土柱子截面选取了 400 mm×400 mm²、600 mm×600 mm² 两种形式的柱子；在 400 mm×400 mm 试件中又分别进行了不同配筋率(0.2%，0.3%，0.4%，0.5%，0.6%，0.8%)、不同混凝土强度等级(C25、C15)的设计，试件形式、数量及编号详见文献[5]。

3 试验结果分析

3.1 插入式角钢应力沿埋深的分布

插入角钢的应力是通过该点所测的应变计算得出。为了分析应力的传递，把应力沿角钢埋深绘在图中，得到应力沿角钢埋深的分布。

在较小的同一荷载作用下，应力沿角钢的深度逐渐减小，后 1~2 个应变片的读数为 0，或极小，没有应力作用，也就是说角钢与混凝土间的摩擦力主要是由前端部分承受；随着荷载的逐渐加大，同一深度的应力也在加大，摩擦力也逐渐向深处传递，由更多的角钢与混凝土间的摩擦来承担对外力的平衡，此时，有的试件在这中间将要屈服破坏，达到极限承载力；当荷载达到一定的程度后，前部分的应变片开始破坏，角钢与混凝土间的黏着摩擦已转变为滑动摩擦，角钢与混凝土间的相对位移明显加大；随着荷载的继续增加，连续几个应变片发生破坏，前部的握裹效应已消失，摩擦主要是由角钢深处的部位承担，因而角钢深部的应力继续增大。

图 2(a)~图 2(d)是几个不同角钢插入深度试件的应力沿角钢埋深的分布曲线。图中 ▲ 线是在此荷载作用下，试件开始发生屈服，达到极限承载力，▲ 线以上部分是在达到极限承载力之前，这时没有应变片坏的现象，均是斜线（图 2(d)表示插入角钢

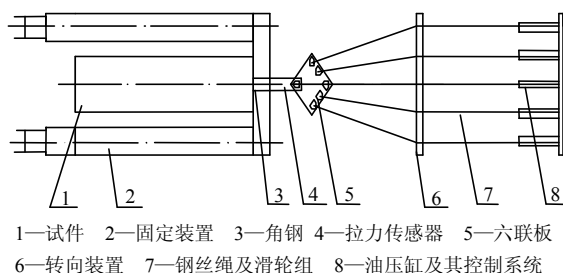
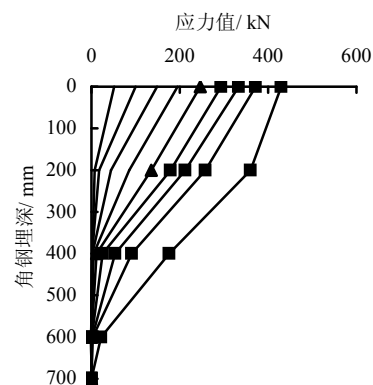
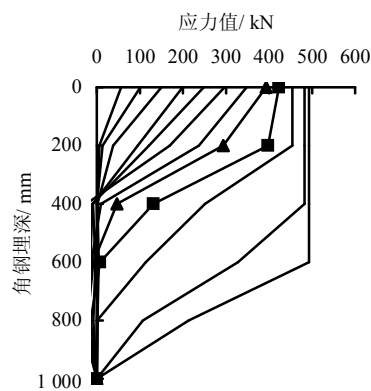


图 1 试验装置工作原理

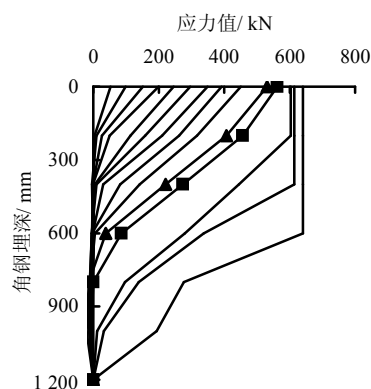
Fig.1 Sketch of testing equipment



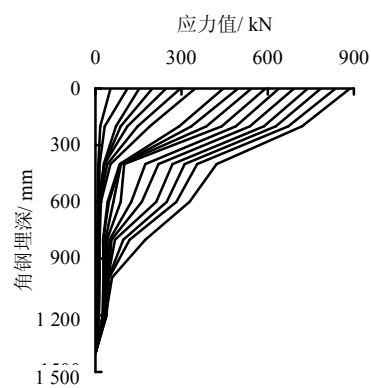
(a) 角钢埋深-应力变化曲线图(10.7W)



(b) 角钢埋深-应力变化曲线图(11.0W)



(c) 角钢埋深-应力变化曲线图(11.2W-1)



(d) 角钢埋深-应力变化曲线图(11.4W)

图 2 不同角钢埋深应力-埋深变化曲线图
Fig.2 Stress-depth curves of angle steel in different embedding depths angle steel

没有拔到极限荷载); ■线表示在试件发生屈服后, 各应变片尚无破坏现象出现, 仍是斜线, ■线以下表示上部有应变片发生破坏, 角钢与混凝土之间在这段已经不存在摩擦作用, 荷载直接向下传递, 在图中用直线段表示, 直至下一个应变片指示出的应力值。

3.2 插入角钢拔出的最终破坏荷载

选择了典型的几种试件进行了拔出角钢的最终破坏试验, 其荷载值及角钢被拔出混凝土的相对位

移值列入表 1 中。

表中第 1 列是角钢埋深相同(0.7 m)但插入角钢从普通 A3 钢 $L100 \times 8$ 变为 16Mn 钢的 $L125 \times 10$, 则最终破坏荷载值由 447 kN 提高到 738 kN, 提高了 1.6 倍, 接近 16Mn 钢与普通 A3 钢的屈服强度的比。这说明插入角钢的种类直接影响着插入基础的抗拔力, 插入角钢一旦屈服, 角钢与混凝土间的摩擦迅速减小, 基础很快达到极限荷载, 并向最终破坏发展。

表 1 角钢拔出的最终破坏荷载值

Table 1 The pullout failure loading of angle steel in different depths

试件类别	荷载及其拔出量	角钢埋深/(m)			
		0.7 无锚固	1.0 无锚固	1.2	
				无锚固	双层角钢
I	破坏荷载值/kN	447	640	642	
类试件	角钢拔出量/mm	143	157	40	
II	破坏荷载值/kN	738			
类试件	角钢拔出量/mm	15			
III	破坏荷载值/kN			410	457
类试件	角钢拔出量/mm			74	94
					571
					183

II 类试件在角钢拔出后的位移量很小, 在拔出后角钢仍是弹性变化, 所以卸荷后的残余变形很小。

表 1 中第 1 行是 I 类试件随埋深增加最终破坏荷载值的变化情况。从数值的变化来看, 由埋深 0.7 m 加深到 1.0 m, 最终破坏荷载值明显增加(由 447 kN 提高到 640 kN), 但继续加深到 1.2 m, 最终破坏荷载值却几乎不再增加, 说明插入角钢的埋深对插入基础的抗拔力是有影响的, 但其影响并不是无限的, 当埋深增加到一定程度后, 抗拔力不会再有明显的提高。

对 I 类试件, 曾试图对锚固试件进行拔出试验, 但直至角钢被拉断, 角钢也没有彻底拔出, 说明锚固件在荷载增加到极限后的作用很大。

在 III 类试件中, 进行了角钢锚固件的试验, 在这类试件中由于没有压力传感器的埋设, 锚固件的作用发挥的比较好。无锚固件的最终破坏荷载是 410 kN, 单层锚固件的最终破坏荷载是 457 kN, 双层锚固件的最终破坏荷载是 571 kN。被拔角钢由于锚固件的锚固作用, 角钢在不断的被拉伸, 但却延缓了彻底地拔出, 所以角钢被拔出的残余位移量随锚固件的作用而逐步加大, 试验结束后, 把混凝土柱子砸开, 看到锚固角钢已被挤压弯曲成几乎一个平面, 说明锚固件在破坏试验中起到了很大的作用。

对于同种截面面积、同种插入角钢, 但混凝土强度及配筋率不同的 I 类和 III 类试件, 在同一埋深

的情况下, 最终破坏荷载随混凝土强度的降低(由 C25 降到 C15)及配筋率的降低(由 0.8 %降到 0.5)而明显下降, 从 640 kN 降到 410 kN, 角钢拔出量由 40 mm 增加到 74 mm, 说明了混凝土强度对插入基础最终破坏荷载的影响较大。

3.3 角钢与混凝土之间的摩擦系数、摩阻力

插入式基础角钢与混凝土之间的摩擦系数是设计中的一个重要参数, 一直是人们所关注的问题, 为此, 在此次试验中也同样对摩擦系数及相应的摩阻力进行了重点研究。

摩阻力除以受摩擦的面积即是摩擦系数。但摩阻力在插入式基础中不是一个常量, 因而摩擦系数也不是一个定数。图 3 是一个典型的摩擦系数与角钢和混凝土间相对位移间的关系曲线。该图是 I 类试件, 角钢插入深度为 1.2 m, 无锚固, 荷载加到角钢几乎拔出的程度, 这样能充分反应出摩擦系数与角钢和混凝土间相对位移的关系。

图中 5 条不同曲线, 分别代表不同深度处的摩擦系数。从图中可看到, 5 条曲线均随相对位移的变化而变化, 并且它们间的相互规律不同。最开始, 埋深浅(0~200 mm)的 ◆ 线最高, 说明其摩擦系数最大, 其次分别是埋深 200~400 mm 的 ■ 线、400~600 mm 的 ▲ 线, 而埋深在 600~800 mm 的 ● 线和 800~1 000 mm 的 — 线均几乎是 0, 说明在外拉力较小、相对位移不大时, 摩擦主要是由角钢前部分承受,

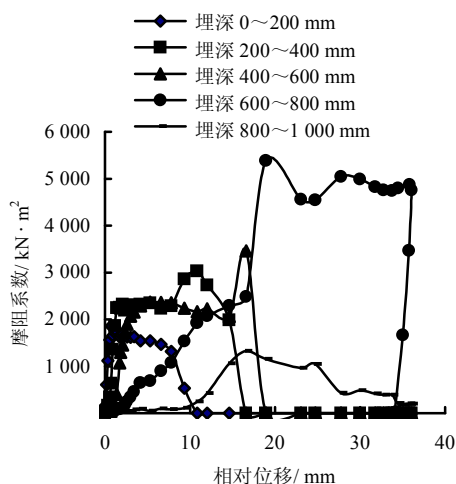


图3 摩擦系数与角钢和混凝土间相对位移间的关系曲线
Fig.3 The curves of friction coefficient-relative displacement

摩擦尚未传到角钢深处；随着荷载的增加，角钢与混凝土间的相对位移加大，埋深浅的摩擦系数逐渐

减小，渐渐地由■线和▲线所代替，而此时埋深大的●线和—线也开始上升，说明随着荷载的增加，摩擦开始向角钢深处传递，前端的摩擦力渐渐减小，后端的摩擦力渐渐加大；当荷载继续加大时，角钢前端的摩擦彻底消失，◆线趋近于0，■线也渐渐地下降，中部的▲线占主导地位，但后部分的●线迅速上升，直至最后出现埋深200~400 mm的■线、400~600 mm的▲线也趋近于0，埋深在600~800 mm的●线占主导，最深处的一线在最后破坏前也没有像其他曲线那样上升到较高，说明摩擦力没有全部传递到角钢最深处，就将发生角钢拔出的破坏。

通过以上的分析，认为角钢与混凝土间的摩擦力是在不同深度随角钢与混凝土间的相对位移（外荷载）变化的，但在设计中只能取一个常量进行设计，因此，应以平均摩擦系数为准。为此，把每种试件进行了不同深度在极限荷载下的平均，得出一个比较符合实际又方便设计的平均摩擦系数(见表2)。

表2 各类试件的摩擦系数
Table 2 friction coefficients of samples

试件分类 (配筋率%)	(Unit:kN/m ²)						
	插入深度/m						
	0.7 无锚固 件	1.0 无锚固 件	1.2				
			无锚固件	单层角钢	双层角钢	单层螺栓	双层螺栓
I(0.8)	530	598	612	507	476	446	580
II(0.8)	825	675	616	556	942	584	768
(0.2)				497	473		
(0.3)				486	428		
(0.4)			599	301	461		
III (0.5)			489		489		
(0.6)			599		519		

表中的II类试件的摩擦系数明显比I类各试件的大，说明摩擦系数与角钢的种类、断面有较大的关系，并与混凝土强度也有一定的关系；从埋深大小、有无锚固件、锚固件形式、混凝土的配筋率上分析，摩擦系数的规律性不强。为此，在设计中应只按插入角钢的种类及混凝土强度取不同的摩擦系数，其他条件不予考虑。通过表中试验结果，建议：混凝土强度等级取为C15、插入角钢为普通A3钢时，摩擦系数取485 kN/m²；混凝土为C25、插入角钢为普通A3钢时，摩擦系数取540 kN/m²；混凝土为C25时，插入角钢为16Mn钢，摩擦系数取710 kN/m²。

4 结 论

通过以上试验及结果分析，得出以下结论，供

设计参考。

(1)插入式基础应力沿埋深的分布

在较小的同一荷载作用下，角钢与混凝土间的摩擦力主要是由前端部分承受；随着荷载的逐渐加大，同一深度的应力也在加大，摩擦力也逐渐向深处传递，由更多的角钢与混凝土间的摩擦来承担对外力的平衡，达到极限承载力；当荷载达到一定的程度后，前部分的应变片开始破坏，角钢与混凝土间的黏着摩擦已转变为滑动摩擦，角钢与混凝土间的相对位移明显加大；随着荷载的继续增加，连续几个应变片发生破坏，前部的握裹效应已消失，摩擦主要是由角钢深处的部位承担，因而角钢深部的应力继续增大。

(2)插入式基础抗拔破坏荷载

插入角钢的种类直接影响着插入基础的抗拔

力, 插入角钢一旦屈服, 角钢与混凝土间的摩擦迅速减小, 基础很快达到极限荷载, 并向最终破坏发展; 插入角钢的埋深对插入基础的抗拔力是有影响的, 但其影响并不是无限的, 当埋深增加到一定程度后, 抗拔力不会再有明显的提高; 锚固件在破坏试验中起到了很大的作用; 混凝土强度对插入基础最终破坏荷载的影响较大。

(3) 角钢与混凝土之间的摩擦系数、摩阻力与角钢的种类、断面有较大的关系, 并与混凝土强度也有一定的关系; 从埋深大小、有无锚固件、锚固件形式、混凝土的配筋率上分析, 摩擦系数的规律性不强。在设计中只按插入角钢的种类及混凝土强度取不同的摩擦系数, 其他条件不予考虑。通过试验结果建议: 混凝土为强度等级取为 C15、插入角钢为普通 A3 钢时, 摩擦系数取 485 kN/m^2 ; 混凝土强度等级取为 C25、插入角钢为普通 A3 钢时, 摩擦系数取 540 kN/m^2 ; 混凝土为 C25 时, 插入角钢为 16Mn 钢, 摩擦系数取 710 kN/m^2 。

参考文献

- [1] P .M Ferguson, J.E.Breen and J.N Thompson. Pullout tests on high strength reinforcing bars. Part1[J]. Journal ACI August 1965, 62 8: 933—950.
 - [2] 滕智明, 朱金铨. 混凝土结构及砌体结构(上)[M]. 中国建筑工业出版社, 1995.
 - [3] 中华人民共和国建设部. 建筑地基基础设计规范 GB50007—2002[S]. 2002.
 - [4] 中华人民共和国建设部. 建筑桩基技术规范 JGJ94-94[S]. 1995.
 - [5] 高玉峰, 彭立才, 程永锋, 等. 插入式基础抗拔性能真型试验装置的设计及试验方案介绍[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, (4): 460—463.
- GAO Yu-feng, PENG Li-cai, CHENG Yong-feng, et al. Model experiment of pullout behavior of inserted Foundation[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, 24(4): 460—463.