

送电线路岩石锚杆基础试验研究

宋永发

(东北电力学院建工系, 吉林, 132012)

文 摘 本文根据原型试验结果, 分析了强风化地区岩石锚杆基础中锚筋滑移与屈服、砂浆柱体抗拔、岩体剪切破坏机理及破坏形式、锚筋内力分布、水平力对直锚式群锚和承台式群锚的影响以及影响承载力的因素, 计算了相应地粘结应力, 提出了因内力分配导致锚杆基础薄弱环节最先破坏的观点, 并为工程设计提供了依据。

关键词 岩石锚杆, 破坏机理, 承载力, 粘结应力, 影响因素。

1 引 言

岩石锚固技术在许多领域内得到了广泛的应用。目前, 我国的送电线路中在强风化地区使用锚杆基础虽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, 影响承载力的因素较多, 破坏机理尚不明确, 特别是 500kV 送电使用锚杆基础国内尚无先例, 为了更好的发挥岩石锚杆基础的优势, 完善设计理论, 有必要对锚杆的受力机理和影响承载力的因素进行系统研究, 为今后工程设计提供理论依据。该项研究填补了国内空白。

2 设计及试验方案

2.1 试件设计

本文试验共设计单锚基础 12 座, 直锚式群锚 3 座, 承台式群锚 2 座, 1[#], 2[#] 单锚主要测定锚筋与砂浆间的粘结应力; 3[#] 单锚测定砂浆柱体抗拔破坏时岩体的剪切强度; 6[#] 单锚与 2[#] 单锚进行对比试验, 6[#] 锚筋底部加防滑托 (即锚固件), 检验其对锚筋基础的影响程度; 4[#] 承台式群锚和 5[#] 直锚式群锚则检验水平力对其承载力的影响。试件尺寸及埋深见表 1。

2.2 测点布置

应变点的位置主要集中在锚筋中上部, 间距 200mm, 中下部间距为 300mm~500mm, 由于在浇筑砂浆时有可能损坏应变片, 或者在加载过程中不可避免地出现偏心受力, 影响试验结果, 所有应变点至少贴 2 片应变片。

2.3 试验方案

每个基础试验荷载从零加至 50%, 75% 直到 100%, 然后卸荷为零。第二次加载从零加至 50%, 直到 100%, 以后每次以递增 20%, 直至破坏为止, 同时测定每级荷载下锚筋应变。当出现下列情况之一时: ①基础产生突发性位移或不停的位移; ②加载设备已达到最大量程; ③基础或地面有明显破坏特征; ④锚筋发生滑移等, 则认为基础已达到破坏荷载。

表 1

锚筋规格与锚孔尺寸

型式	编号	锚筋直径 (mm)	锚筋长度 (mm)	锚孔直径 (mm)	锚孔深度 (mm)	备 注
单 锚	101~103	32	2000	100	1800	地面下有 1050mm 长与砂浆不粘接
	201~203	32	2000	100	1800	地面下 600mm 深不灌砂浆
	301~303	30	1200	100	1000	
	601~603	32	2000	100	1800	根部加锚固
群 锚	401~402	32	2750	100	1600	锚筋 4 根
	501~503	36	2730	100	1700	上端螺扣长 150mm

3 试验结果分析

3.1 破坏机理分析

试验结果表明：1[#]锚杆基础发生锚筋滑移破坏，锚筋上部应变较大，下部应变较小。随着荷载的增加，上部应变较下部应变增加为快。当卸载后，锚筋应变不能完全恢复，有残余变形存在。这说明在外力消失后，由于周围砂浆和岩体的作用，在锚筋内残余一定的应力。当荷载再次增加后，其变化规律与第一次加载相似。随着荷载的增加，当某个环节达到屈服状态时，将引起锚筋内力重分配。1[#]单锚，由于锚筋与砂浆仅在上部 750mm 的粘结，当锚筋内力达到屈服时，外力主要由粘结应力承担，最终由于粘结应力的不足，造成锚筋滑移破坏。2[#]单锚发生锚筋屈服砂浆柱拉断破坏，其加荷初期的变化规律同 1[#]单锚，当锚筋屈服后，荷载逐渐向粘结应力方面转化，但由于 2[#]单锚埋深较大，在荷载向下传递过程中，即内重分配时，锚筋本身局部变形过大，拉断砂浆柱体，锚筋先于粘结应力发生屈服破坏。

由 1[#]和 2[#]单锚破坏特征来看：锚筋的埋深、粘结应力对破坏特征影响较大，在内力重分配时，哪个因素最为薄弱，就会发生哪种破坏形式；破坏具有突发性，周边岩体无较大变形。

3[#]单锚，埋深 1000mm，在外力作用下，砂浆柱与周边岩体的粘结应力增长较快，砂浆柱和周边岩体变形较大，而锚筋中的应变较小。在锚杆基础发生破坏时，砂浆柱明显高出岩体一段，锚筋内力远小于其屈服强度，锚筋在砂浆中无任何滑动，周边岩体出现放射状裂缝或局部隆起。特别是 302[#]单锚，由于岩体中有一段软土夹层，砂浆柱与周边岩体的粘结应力明显下降，在设计荷载刚达到 75% 时，砂浆柱就出现较大位移，周边岩体出现裂缝，由于 3[#]单锚埋深较浅，在外力增加时，砂浆柱与周边岩体的粘结应力将最为薄弱发生浆柱整体破坏，使其承载力大大下降，这充分说明，锚筋埋深对破坏形式及承载力有较大的影响。

6[#]单锚，与 2[#]单锚对比试验，6[#]锚筋底部加锚固件。在加载初期，内力变化规律与 2[#]单锚相似。当锚筋屈服时，内力将重分配，6[#]单锚的外部荷载向下传递，从应变测试结果可以看出，其受力状态比较合理，内力分布比较平均，上、中、下各段的应变相差较小，这说明，加上底托改变了锚筋的受力状态，大大缓解了上部内力集中的不利因素，同时锚筋底部加防滑托，避免了锚筋滑移破坏，最终锚筋屈服局部变形过大，拉断砂浆柱，但周边岩体变形较小，没有裂缝，只局部隆起。

4# 承台式群锚基础, 当荷载较小时, 地脚螺栓和锚筋内应变均较小, 承台和周边岩体变形也较小。当荷载增加时 (水平力与垂直力同时施加), 地脚螺栓和锚筋内力增加较小, 由于施加水平力, 其承台侧向位移增加较快。当荷载足够大时, 锚筋内力远小于其屈服强度, 而且应变主要集中在与承台混凝土交界附近。由于水平力的作用, 承台侧向位移变大, 挤压周边岩体, 引起岩体开裂, 同时, 由于垂直荷载作用, 岩体出现剪切裂缝, 随着荷载的增加, 裂缝在延长、宽度加大、试验结果表明, 水平力对地脚螺栓和锚筋内力影响很小, 因为水平力仅对基础整体作用产生侧向位移, 在锚筋内不会产生较大的弯矩, 因此忽略水平力对基础内力的影响, 仅对侧向位移影响较大。

5# 直锚式群锚基础, 在加载初期, 锚筋内应变较小, 其变化规律与单锚相似, 周边岩体的变形也较小。当外力增加时, 锚筋内力增加较小, 而周边岩体变形较大, 这说明通过锚筋将绝大部分荷载传给了周边岩体、由于水平力的作用, 使基础发生侧向位移, 但水平力并不影响锚筋内力变化。在岩体发生剪切破坏时, 锚筋内力远小于其屈服强度, 周边岩体出现一条或几条裂缝或岩体局部隆起, 对承载力而言, 岩体将起决定性作用。

从上述几种破坏形式和受力机理分析来看: 锚筋底部加锚固件可以改变受力特征及破坏形式; 直锚式比承台式群锚基础受力更合理, 而且施工也方便; 锚筋埋深对承载力和破坏形式影响较大; 水平力对群锚内力影响较小, 仅对侧向位移有一定程度的影响。

3.2 影响承载力和破坏形式的因素

锚筋的直径、等级、埋深、表面特征等对锚杆基础的破坏形式及承载力都有较大的影响。试验结果表明: 增加锚筋埋深对提高承载力有利, 同时可以防止由于粘结应力不足发生滑移破坏; 锚筋埋深太浅, 易发生整体拔出或滑移破坏, 影响承载力的正常发挥; 锚筋等级高, 不易发生锚筋屈服, 砂浆柱断裂破坏, 增加锚筋直径或采用变形筋或底部加防滑托, 均可以避免出现滑移破坏, 同时还可以提高承载力。另外岩体的风化程度、地下水位、夹层、孔壁特征、砂浆标号、施工质量等许多因素对承载力和破坏特征均有较大影响。

3.3 粘结应力计算

(1) 锚筋与砂浆间的粘结应力 τ_a

在锚筋上取 ΔL 段隔离体, P_1 和 P_2 为锚筋内力, τ_a 为该段的粘结应力, 假定 τ_a 的分布形式为均匀, 见图 1。由外力平衡得

$$P_1 - P_2 = \pi d \Delta L \tau_a \quad (1)$$

式中 $P_1 = \pi d^2 E_s \epsilon_1 / 4$; $P_2 = \pi d^2 E_s \epsilon_2 / 4$; d 为锚筋直径, mm; E_s 为锚筋弹性模量, MPa; ϵ 为锚筋实测应变。

(2) 砂浆与周边岩体的粘结应力 τ_b

取 ΔL 段砂浆柱为隔离体, P_1 和 P_2 为锚筋内力, 假定砂浆柱与周边岩体的粘结分布均匀, 并不考虑砂浆柱的内力影响。见图 2。

由外力平衡得

$$P_1 - P_2 = \pi D \Delta L \tau_b \quad (2)$$

式中 D 为孔径, mm; P_1 , P_2 的意义同式 (1)。

(3) 岩石抗剪强度 τ_s

单锚计算公式为

$$T = \pi h_0 (D + h_0) \tau_s \quad (3)$$

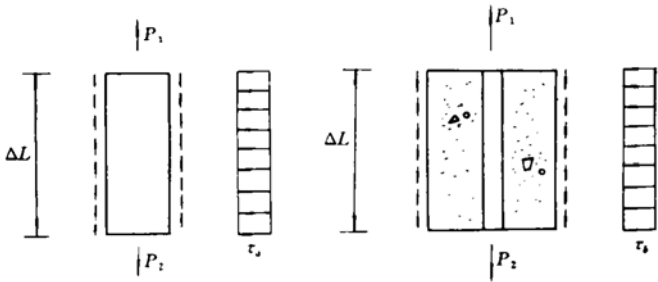


图 1

图 2

群锚计算公式为

$$T = \pi h_0 (D + \sqrt{2}b + h_0) \tau_s \tag{4}$$

τ_a, τ_b, τ_s 计算结果列于表 2, 表 3, 表 4。

表 2 τ_a (MPa) 计算结果

编号	加 载 百 分 数								
	50	75	100	50	100	120	140	160	180
101	1.072	1.611	2.040	1.056	2.180	2.655	3.231	—	—
102	1.090	1.583	1.892	1.144	1.872	2.440	2.817	3.033	—
103	1.026	1.763	2.000	1.166	2.354	2.753	2.625	—	—
201	1.376	2.031	2.628	1.296	2.660	3.160	3.637	4.140	—
202	1.044	1.497	1.926	1.062	2.034	2.356	2.649	2.900	3.222
203	1.346	1.913	2.468	1.158	2.386	2.860	3.295	3.680	—
301	0.956	1.250	1.639	0.998	1.845	2.172	2.464	—	—
302	1.000	1.488	2.071	0.846	1.929	—	—	—	—
303	1.094	1.530	1.915	1.026	1.889	2.270	2.518	—	—
401（地）	0.454	0.748	1.036	0.400	0.950	1.159	1.316	—	—
401（锚）	1.560	1.764	2.262	2.202	3.894	4.866	4.830	—	—
402（地）	0.408	0.618	0.860	0.532	0.830	0.917	1.058	—	—
402（锚）	1.908	2.330	2.602	1.662	4.026	4.962	3.798	—	—
501	0.411	1.115	1.268	0.449	1.500	1.400	1.328	—	—
502	0.491	0.929	1.666	0.477	1.534	—	—	—	—
503	1.085	1.337	1.258	0.409	0.874	1.021	1.109	1.337	—
601	1.228	1.945	2.256	1.492	1.732	2.240	3.049	3.172	—
602	1.180	1.625	1.886	1.338	2.514	3.006	3.167	3.490	—
603	1.242	2.007	2.696	1.384	2.696	3.172	3.697	4.224	—

表 3 τ_b (kPa) 计算结果

编号	加 载 百 分 数								
	50	75	100	50	100	120	140	160	180
101	441	737	966	443	955	1143	1323	—	—
102	440	739	978	465	980	1182	1356	1565	—
103	445	725	970	434	941	1135	1371	—	—
201	254	383	515	258	513	621	724	826	—
202	272	411	552	271	546	663	776	892	1008
203	256	389	523	266	528	636	742	851	—
301	323	492	661	319	642	780	912	—	—
302	318	469	620	333	634	—	—	—	—
303	309	465	635	316	638	771	907	—	—
401 (地)	293	433	573	299	583	699	817	—	—
401 (锚)	86	97	124	120	214	267	265	—	—
402 (地)	298	447	592	304	614	735	844	—	—
402 (锚)	105	182	253	91	221	272	208	—	—
501	139	220	321	138	294	346	400	—	—
502	143	217	297	136	295	—	—	—	—
503	152	224	290	139	284	341	392	445	—
601	308	473	648	313	562	669	755	877	—
602	265	404	554	256	521	629	749	861	—
603	261	384	511	254	511	620	721	822	—

表 4 τ_s (kPa) 计算结果

编号	极限荷载 (kN)	埋深 (mm)	τ_s
101	210	1800	19.6
102	240	1800	22.3
103	210	1800	19.6
201	211	1800	19.6
202	238	1800	22.2
203	211	1800	19.6
301	122	1000	35.3
302	87	1000	25.2
303	122	1000	35.3
401	399	1600	36.6
402	399	1600	36.6
501	424.3	1900	28.8
502	303	1900	20.6
503	484.8	1900	33.0
601	211	1800	19.6
602	211	1800	19.6
603	211	1800	19.6

4 结 论

- (1) 锚筋的埋深对承载力和破坏形式影响较大, 不同的破坏形式受力机理有所差异。
- (2) 在内力重分配时, 最薄弱环节最先破坏。锚筋底部加锚固件可以改变受力特征, 减少内力集中。
- (3) 水平力对群锚内力影响较小, 直锚式群锚比承台式群锚受力更合理。
- (4) 粘结应力的大小与破坏形式有关。
- (5) 本试验对锚杆基础破坏机理和传力方式, 承载力的影响因素的分析, 有待今后大量试验加以验证, 设计理论将进一步完善。

The Experimental Research on the Base of Rock Bolt of the Power Transmission Line

Song Yong - fa

(The North - East Electric Power Engineering Institute, Jilin)

Abstract Based on the prototype test result, this paper systematically analyzes the sliding and yielding of the steel bar, and the pull - out of the mortar column as a whole, as well as the mechanism of the shear failure of the rock, and the distribution of the internal force. The transverse force affecting the group of bolts is also analyzed in this paper. This paper concerns about the factors which affect the loading force, and calculates the corresponding bonding force. Thus, this paper points out that the redistributing internal force in the rock bolt causes the weakest point to damage first, and that the transverse force has less effect on the internal force in the group of bolts. Meanwhile, the paper gives valuable data to the engineering project design.

Key words rock bolt, mechanism of damage loading force, bearing capacity, bonded stress, affecting factors.

勘 误

1995 年第 3 期英文目录短文第 2 篇中 “effection” 应为 “Effect”, 并向读者与作者致歉。