

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S1.027

## 粘结型锚栓群锚弯剪受力计算方法与设计建议

谢 群<sup>1,2</sup>, 王 欣<sup>2</sup>, 鞠好学<sup>3</sup>

(1. 济南大学 土木建筑学院, 济南 250022; 2. 山东建筑大学 山东省建筑结构鉴定加固与改造重点实验室, 济南 250101;  
3. 山东商业职业技术学院, 济南 250103)

**摘 要:** 粘结型锚栓是土木工程领域应用广泛的后锚固连接件, 其具有代表性的使用情况为多个锚栓处于弯剪复合受力状态。在对比分析当前理论成果基础上, 设计时可采用椭圆型拉剪计算公式并假定所有锚栓均参与受剪, 将群锚弯剪受力问题转化为受拉最大那排锚栓的拉剪承载力计算。为保证连接安全并充分发挥锚栓强度, 后锚固连接应控制为锚栓钢材破坏。为实现该目标, 设计时可由剪跨比作为控制参数, 通过公式推导和研究数据分析, 在满足相关锚固要求前提下, 当剪跨比大于 0.6 时可初步判断为锚栓钢材破坏, 最后给出了后锚固群锚连接的设计建议和构造措施, 以供工程应用参考。

**关键词:** 后锚固; 弯剪受力; 群锚; 剪跨比; 构造措施

**中图分类号:** TU375    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2013)S1-0121-04

## Design Method and Proposals of Adhesive Anchors Group Under Combinations of Moment and Shear Loading

Xie Qun<sup>1,2</sup>, Wang Xin<sup>2</sup>, Ju Haoxue<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, University of Jinan, Jinan 250022, P. R. China;  
2. Shandong Provincial Key Lab of Appraisal and Retrofitting in Building Structures, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, P. R. China;  
3. Shandong Institute of Commerce and Technology, Jinan 2500103, P. R. China)

**Abstract:** Adhesive anchors are widely used as post-installed fasteners in civil engineering. A typical steel-to-concrete connection includes multiple anchors which are commonly subjected to combined moment and shear loading. Based on the assumption that all anchors take up shear load, a revised method is developed for the design of ductile anchors, which considers that only the row of most stressed anchors in the tension zone are needed to meet the elliptical interaction of tension and shear capacity requirement during the design process of anchorage group under combined shear and moment loading. The ultimate strength of post-installed fastenings should be controlled by the strength of anchor steel for the purpose of connection safety and full utilization of anchor capacity. For the objective of ductile design in anchor group, the ratio of shear span could be used as an evaluation parameter in the process of strength prediction. According to the theoretical analysis and results comparison, the ductile failure of anchor steel in post-installed fastenings can be guaranteed when the ratio of shear span is greater than 0.6 and other anchorage requirement is met. In the end, design proposals and construction specification of anchor group are given for practice.

**Key words:** post-installed fastenings; combinations of moment and shear loading; anchor group; ratio of shear span; construction specifications

后锚固连接是目前应用较广泛的一种技术, 它通过在已有混凝土结构中钻孔, 依靠锚栓的机械自锁作用或化学粘结作用使新增构件与原结构有效连接, 按照锚固机理锚栓可分为机械式锚栓和粘结型锚栓, 粘结型锚栓以施工方便、性能可靠等特点在国内土木工程领域应用广泛, 常见的有化学锚栓和化学植筋(螺杆)。按照连接方式可分为新旧混凝土连接和钢-混凝土连接, 前者常用于建筑物改造扩建中的楼板洞口修复、植筋式搭接梁或悬臂梁、梁墙连接以及增层中植

筋柱等, 后者则多为设备基础锚固、新增钢牛腿与原混凝土结构连接、钢柱脚在混凝土中锚固等情况<sup>[1]</sup>。

后锚固连接的破坏形态大致分为基材混凝土破坏、粘结破坏、混凝土锥体-粘结复合型破坏和锚栓钢材破坏 4 种, 前 3 种破坏均具有一定的突然性, 破坏前无明显征兆, 且锚栓承载力未充分发挥, 因此在设计中应避免发生该类破坏, 国内外的相关规范均规定, 对于结构构件的锚固连接, 应控制为锚栓钢材破坏, 不应发生混凝土基材破坏或粘结拔出破

收稿日期: 2009-04-23

基金项目: 山东省建筑结构鉴定加固与改造重点实验室开放课题(JG01)

作者简介: 谢群(1979-), 男, 副教授, 博士, 主要从事结构加固及后锚固技术研究, (E-mail) xq307@163.com。

坏<sup>[2]</sup>。实际应用中后锚固连接多为群锚的压(拉)、弯、剪等复合受力状态,但目前国内对后锚固的研究多为单根锚栓的拉拔受力分析,对复杂受力下群锚钢材破坏研究较少,以下以粘结型锚栓为对象,分析实际应用中常见的弯剪作用下群锚受力性能和理论计算方法,并提出相关设计建议和构造措施。

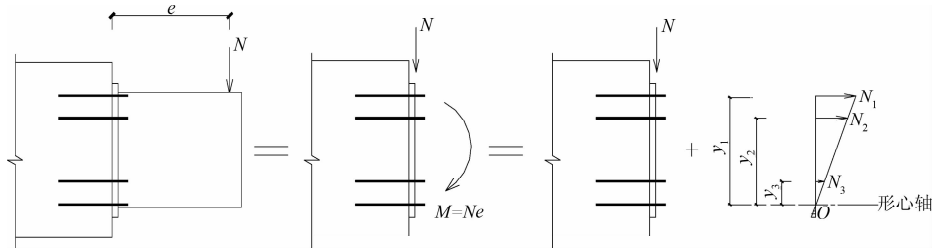


图 1 群锚受弯示意图

受拉最大锚栓的拉力设计值可按下式计算:

$$N_d^s = Ne \cdot y_1 / \sum y_i^2 \quad (1)$$

式中:  $N$  为外荷载,  $N$ ;  $e$  为外荷载至基材表面的距离, mm;  $N_d^s$  为受拉区拉力最大的一排锚栓的拉力设计值,  $N$ ;  $y_1$  为拉力最大锚栓至受压区最外排锚栓的距离, mm;  $y_i$  为第  $i$  排锚栓至受压区最外排锚栓的距离, mm。

考虑所有锚栓均参与受剪,且忽略锚板与基材表面的摩擦<sup>[3]</sup>。则拉力最大那排锚栓的剪力设计值按下式计算:

$$V_d^s = Pb/a \quad (2)$$

式中:  $V_d^s$  为剪力设计值,  $N$ ;  $a$  为锚栓总数;  $b$  为拉力最大那排的锚栓数量。

目前拉剪复合受力下钢材破坏锚栓承载力的一般表达式如下<sup>[4]</sup>:

$$\left(\frac{N_d^s}{N_R^s}\right)^\xi + \left(\frac{V_d^s/V_R^s}{V_R^s/N_R^s}\right)^\xi \leq 1 \quad (3)$$

式中:  $N_R^s$  为受拉区拉力最大锚栓的受拉承载力设计值,  $N$ ;  $V_R^s$  为受拉区拉力最大锚栓的受剪承载力设计值,  $N$ 。

公式(3)中的指数  $\xi$  一般在 1~2 之间变化,国外的研究结果对  $\xi$  的取值并不统一,综合来看主要有 3 种形式:直线型(A)、三折线型(B)和椭圆型(C),如图 2 所示。从图中可以看出,直线型计算出的结果最简单,但偏于保守,而国外的研究表明椭圆型曲线较符合实际受力情况。

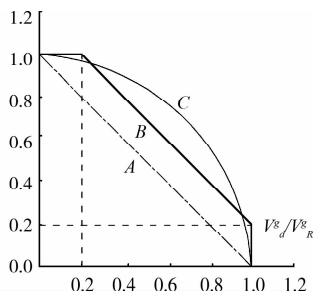


图 2 拉剪复合受力计算曲线

美国 ACI318-08 采用三折线型计算公式,规定当  $V_d^s \leq 0.2V_R^s$  时,不考虑剪力的影响,拉剪承载力完全由受拉承载力控制,只需按受拉计算<sup>[5]</sup>:

## 1 理论分析

弯剪受力可视为受弯与受剪两种受力状况的叠加,而在弯矩作用下锚栓群实际处于拉(压)状态,如图 1 所示,显然受拉区拉力最大的一排锚栓对受弯承载力起控制作用,这样群锚的弯剪受力问题就转变成受拉最大那排锚栓的拉剪复合受力问题。

$$N_d^s \leq N_R^s \quad (4)$$

当  $N_d^s \leq 0.2N_R^s$  时,不考虑拉力影响,拉剪承载力完全由受剪承载力控制,即只需按受剪计算:

$$V_d^s \leq V_R^s \quad (5)$$

当  $V_d^s > 0.2V_R^s$ ,  $N_d^s > 0.2N_R^s$  时,拉剪承载力按下列公式计算:

$$\frac{N_d^s}{N_R^s} + \frac{V_d^s}{V_R^s} \leq 1.2 \quad (6)$$

ETAG 规定拉剪复合受力下锚栓钢材破坏时的承载力计算如下<sup>[6]</sup>:

$$\left(\frac{N_d^s}{N_R^s}\right)^2 + \left(\frac{V_d^s}{V_R^s}\right)^2 \leq 1 \quad (7)$$

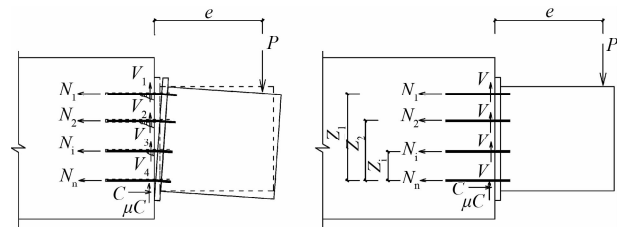


图 3 弯剪受力计算简图

目前我国《混凝土结构后锚固技术规程》(JGJ 145-2004)(以下简称《后锚固规程》)采用 ETAG 中的计算方法。接下来对弯剪受力下群锚计算做进一步分析,其力学模型见图 3,左图为弯剪受力下后锚固连接件的实际受力情况,假设有  $n$  排锚栓,为简化计算,假设锚栓等间距布置,每排锚栓为两个。弯矩引起的锚板下端压力  $C$  完全由基材混凝土承担,即受压区锚栓不参与受压,弯矩产生的拉力主要由上部锚栓承受,剪力则由所有锚栓平均承担。右图为简化后计算模型。锚板与基材混凝土的摩擦系数为  $\mu$ ,该值通常在 0.3~0.5 之间,可偏安全取 0.3。假设压力作用点在最下排锚栓处,最上排锚栓到压力  $C$  作用点的距离为  $z_1$ 。设最上排锚栓破坏时的拉力为  $N_d^s$ ,剪力为  $V_d^s$ ,抗拉承载力为  $N_R^s$ ,抗剪承载力为  $V_R^s$ ,并根据国内外的研究成果,取  $V_R^s = \gamma N_R^s$  ( $\gamma$  一般可取 0.58)<sup>[7]</sup>。

在下面的分析中采用三折线型拉剪计算公式,根据力的

平衡可得以下公式:

$$P = \mu C + nV_d^s \tag{8}$$

$$Pe = N_d^s z_1 \left[ 1 + \sum_2^n \left( \frac{i-2}{n-1} \right)^2 \right] = N_d^s z_1 \cdot \alpha$$

$$\alpha = \left[ 1 + \sum_2^n \left( \frac{i-2}{n-1} \right)^2 \right] \tag{9}$$

$$C = N_d^s \left( 1 + \sum_2^n \frac{i-2}{n-1} \right) = N_d^s \cdot \beta$$

$$\beta = \left( 1 + \sum_2^n \frac{i-2}{n-1} \right) \tag{10}$$

$$\left( \frac{N_d^s}{N_R^s} \right) + \left( \frac{V_d^s}{\gamma N_R^s} \right) = 1.2 \tag{11}$$

在已知锚栓的数量和排列、外荷载作用点位置、锚栓承载力等条件的前提下,上述公式(8)~(11)中仅有  $P$ 、 $C$ 、 $N_d^s$ 、 $V_d^s$  4 个未知量,并令  $z = z_1$ ,可解出后锚固连接所能承受的最大荷载:

$$P = \frac{1.2\gamma m}{1 + \frac{e}{z} \times \frac{1}{\alpha} (n\gamma - \mu\beta)} \times N_R^s \tag{12}$$

上式即为弯剪受剪力下群锚承载力计算公式,可以看出承载力与  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $n$ 、 $e/z$ 、 $N_R^s$  几个参数有关,其中  $\alpha$ 、 $\beta$  均与锚栓的数量和排列间距有关,二者随着锚栓排数  $n$  的增加而增加,从公式(12)中可知  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $n$  越大,承载力越高,此外承载力与锚栓受拉承载力  $N_R^s$  成正比关系,而与参数  $e/z$  则成反比,其中  $e$  为外荷载至基材表面的水平距离,  $z$  为受拉最大排锚栓距中和轴的距离,因此参数  $e/z$  可称为剪跨比,该参数对锚栓群的受力性能和破坏形态影响较大,在相同大小的竖向荷载作用下,如果剪跨比值较大,则受拉锚栓承担的最大拉力也较大,锚栓承载力基本由弯矩控制,即锚栓的受拉性能可充分发挥,最终的破坏也易控制为钢材延性破坏。若剪跨比较小,则拉剪共同作用的特点明显,而且剪力在锚栓内产生胶体与混凝土粘结界面的法向剥离作用,易造成胶体的粘结性能退化而发生粘结破坏,甚至混凝土锥体破坏。因此有必要对剪跨比的取值进行探讨以确保达到理想的破坏形态。

从公式(8)~(11)中可推导出剪跨比的表达式如下:

$$\frac{e}{z} = \frac{\alpha}{\mu\beta + n\gamma \left( \frac{1.2N_R^s}{N_d^s} - 1 \right)} \tag{13}$$

一般来说弯剪作用下钢材延性破坏时受拉最大那排锚栓的内力以轴向拉力为主,大量试验结果表明,破坏时锚栓所受拉力约达到其抗拉承载力的 60%~80%,即  $N_R^s/N_d^s = 1.25 \sim 1.67$ 。考虑到实际工程中基材混凝土尺寸和锚栓边距、间距的限制,通常锚栓排数不超过 4 排,根据锚栓排数和  $N_R^s/N_d^s$  的不同,分别按公式(13)计算出剪跨比,见表 1 所示。从计算结果来看,剪跨比的范围为 0.53~1.14,即控制为钢材破坏时的最小剪跨比为 0.53,考虑到随着锚栓数量的增加以及剪力在复合受剪力下比例增加时的不利影响,建议为控制为钢材破坏,后锚固设计时剪跨比应在 0.6 以上。

表 1 不同锚栓数量下剪跨比对比

$N_R^s/N_d^s$	2 排锚栓	3 排锚栓	4 排锚栓
1.67	0.68	0.57	0.53
1.43	0.89	0.74	0.69
1.25	1.14	0.95	0.88

表 2 中汇总了弯剪受剪力下群锚研究的一些试验数据和结果,对比发现发生钢材破坏的剪跨比取值在 0.67~2 之间,与上文中建议的结果基本吻合。许多预埋件研究成果表明,两排钢筋的情况下,当剪跨比  $e/z \geq 0.7$ ,破坏时锚筋达到抗拉强度,并有明显的颈缩现象甚至拉断,受拉钢筋的内力基本为拉应力,而受压区钢筋则表现为纯剪受力状态;当剪跨比  $e/z \leq 0.4$ ,则多为混凝土受压破坏,具有纯剪破坏特征;当剪跨比  $0.4 < e/z < 0.7$  时,有的发生混凝土破坏,有的为钢筋拉断<sup>[8]</sup>,预埋件的受力机理与后锚固连接有相近之处,该结论对后锚固具有借鉴意义。综上所述,选择剪跨比大于 0.6 作为钢材破坏控制参数是较合理的。

表 2 剪跨比值比较

数据来源	锚栓布置 $m \times n$	锚栓直径/mm	埋深/mm	$z$ /mm	$e$ /mm	$e/z$	破坏形态
文献[7]	2×2	16	240	254	305	0.75	钢材破坏
	2×2	16	240	254	457	1.13	钢材破坏
	2×3	16	240	254	305	0.75	钢材破坏
	2×3	16	240	254	457	1.13	钢材破坏
文献[9]	2×3	12	300	300	400	1.33	钢材破坏
	2×3	12	300	300	300	1.00	钢材破坏
文献[10]	2×3	12	300	300	200	0.67	钢材破坏
	2×2	16	240	200	400	2.00	钢材破坏
	2×2	16	240	200	200	1.00	钢材破坏
	3×2	16	240	233	200	0.86	钢材破坏

注:  $n$  为锚栓的排数;  $m$  为每排锚栓的个数。

## 2 设计建议和构造措施

以上讨论了后锚固钢材破坏的计算方法和剪跨比的取值,而实际上影响后锚固连接性能和破坏形态的因素很多,下面结合目前国内外的相关研究成果,对粘结型锚栓设计中需要满足的规定和构造措施作简要介绍:

1) 中国《后锚固规程》中规定:基材混凝土强度不应低于 C20,亦不宜大于 C40。美国 ACI318、UBC、欧洲规范 ETAG 也均对基材混凝土强度做了限制,此规定的意义在于保证基材混凝土有一定的强度承担锚栓传递来的荷载,又不致因强度高引起基材混凝土脆性破坏。

2) 基材内配筋可对混凝土产生有效约束作用,防止混凝土劈裂破坏,延缓基材内部裂缝的发展。研究表明,相同受力情况下配筋基材的锚固承载力比无筋基材要高 30% 以上,因此,后锚固连接的基材应为钢筋混凝土构件,若为无钢筋混凝土时则需要考虑承载力折减<sup>[11]</sup>。

3) 由于相当一部分混凝土构件在使用过程中为带裂缝工作,同时后锚固钻孔施工中也容易在孔壁周围混凝土中产生微裂缝,裂缝的出现会减小锚栓周围参与受力混凝土的范围,使荷载传递路径不连续,对锚固性能造成不利影响,应避免基材混凝土出现过大开裂,而现行的后锚固计算公式均针对基材开裂情况,若确保锚固前基材无开裂,也无需考虑承载力的提高,将其作为安全储备即可。

4) 锚栓埋置深度应保证在 15d(d 为锚栓直径)以上,这

样既可以保证充分发挥钢材强度,又能避免群锚受力不均,在抗震设防烈度较高、受力复杂、使用环境恶劣的情况下,还应适当增加埋置深度以确保锚固性能。另外,为避免基材底部发生混凝土劈裂破坏,埋置深度不应超过基材厚度的 2/3。

5) 锚栓边距和间距是影响锚固性能的重要因素,锚栓间距过小易造成锚栓间混凝土劈裂破坏甚至联体混凝土锥体破坏;锚栓边距过小则可能发生边缘混凝土破坏,尤其在受剪情况下。目前各国对临界边距和间距的规定不尽相同,建议锚栓的最小边距取  $8d$ ,最小间距取  $16d$ <sup>[12]</sup>。

6) 为满足弹性理论中刚性锚板假定,锚板的厚度建议取  $\max(s/8, 0.6d, 6\text{ mm})$ ,  $s$  为锚栓间距,锚栓中心至锚板边缘的距离不小于  $50\text{ mm}$ <sup>[13]</sup>。

7) 研究表明,动力荷载作用下锚栓承载力较静力时有所降低,建议抗震设计时考虑承载力折减系数取  $0.8$ <sup>[14-15]</sup>。

### 3 结 论

1) 弯剪作用下后锚固群锚受力分析可转变成受拉最大那排锚栓的拉剪复合受力问题,当采用三折线型曲线时,可按公式(12)来计算钢材破坏下的后锚固承载力。

2) 参数剪跨比  $e/z$  对锚固性能影响较大,设计前可将其作为控制参数,在满足其它锚固条件的前提下,取值在  $0.6$  以上时一般可充分发挥锚栓钢材强度。

3) 最后结合国内外的研究成果,对后锚固连接中需满足的一些设计要求和构造措施做了分析,以供工程应用参考。

#### 参考文献:

- [1] Fuchs W, Eligehausen R. Actual tendencies in structural fastening technology [J]. Advances in Construction Materials, 2007, 98(6): 23-30.
- [2] JGJ145-2004. 混凝土结构后锚固技术规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [3] 项凯, 陆洲导, 李杰. 混凝土结构后锚固群锚的抗剪承载力试验. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2008, 24(6): 985-988. Xiang K, Lu Z D, Li J. Experimental study on the shear bearing capacity of post-installed anchor group in concrete structures [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2008, 24(6): 985-988.
- [4] Dieter L, Richard E K, Herman L G. Static behavior of anchors under combinations of tension and shear loading [J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(4): 525-536.
- [5] ACI 318. Building code requirements for reinforced concrete and commentary [S]. Michigan: American Concrete Institute, 2008.
- [6] ETAG No. 001. Guideline for european technical approval of metal anchors for use in concrete annex C: design methods for anchorages [S]. Brussels: EOTA, 2001.
- [7] Ronald A C, Richard E K. Ductile multiple-anchor steel-to-concrete connections [J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(6): 1645-1665.
- [8] 预埋件专题研究组. 预埋件的受力性能及设计方法 [J]. 建筑结构学报, 1987, 3: 36-50. Research group on embedded elements. Load-bearing capacity and design method of embedded elements [J]. Journal of Building Structures, 1987, 3: 36-50.
- [9] Joseph J K, Sekhar K C. Experimental investigation of embedded steel plates in reinforced concrete structures. Engineering Structures, 1998, 20(1): 105-112.
- [10] 谢群. 化学植筋式后锚固连接群锚受力性能试验研究 [D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [11] Cook R A, Eligehausen R. Behavior and design of adhesive bonded anchors [J]. ACI Structural Journal, 2006, 11(6): 822-831.
- [12] Jennifer lynn burtz. Behavior and design of grouted anchors loaded in tension including edge and group effects and qualification of engineered group products [D]. University of Florida, Miami, America, 2003.
- [13] 喻纯诚, 陈家坤, 李光 编著. 钢筋混凝土结构中预埋件设计 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1992.
- [14] AC308: Acceptance criteria for post-Installed adhesive anchors in concrete elements [S]. ICC-ES Evaluation Committee, 2005.
- [15] Eligehausen R. Behavior and testing of anchors in simulated seismic cracks. ACI Structural Journal, 2008, 105(3): 348-357.

(编辑 胡 玲)