

受剪状态下化学锚栓群锚系统承载力

苏磊, 李杰, 陆洲导

(同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092, sulei0518@sina.com)

摘要: 为了研究化学植筋式后锚固群锚系统抗剪承载力的影响因素, 通过4组化学锚栓群锚系统受剪破坏性试验, 研究在不同边距、不同间距下系统抗剪承载力情况. 通过观察试件的破坏形式、测试破坏荷载以及有限元分析, 结果表明: 边距大小影响化学锚栓群锚系统破坏形式和锚栓位移, 边距小会发生脆性破坏而边距大则发生延性破坏; 植筋间距大小会影响群锚系统锚栓之间相互作用. 间距小时, 同一排锚栓产生的应力相互影响, 裂缝会向锚栓深度方向上扩展, 间距大时同一排锚栓的产生应力相互独立, 开裂后混凝土形成两个独立楔形体. 通过对比规范计算结果、有限元分析结果和试验结果, 验证了现行规范关于抗剪承载力设计的可靠性.

关键词: 化学锚栓; 群锚系统; 影响因素; 抗剪承载力

中图分类号: TU746.3

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)04-0612-05

Chemical anchor bolt anchorage group subjected to shearing strength

SU Lei, LI Jie, LU Zhou-dao

(Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China, sulei0518@sina.com)

Abstract: A total of four specimens have been tested with different edge distances and spacings in order to study the failure of chemical anchor bolt anchorage group subjected to shearing strength. The influence of different edge distances and spacings on the failure form, shearing strength and ultimate displacement is taken into account by the whole variety test of failure load and the results of finite element. The results indicate that the edge distance has impact on the failure form and displacement of chemical anchor bolt anchorage group under load. Brittle fracture may occur under the condition of small edge distance while ductile fracture may occur under the condition of large edge distance. In addition, the spacing has impact on the interaction of chemical anchor bolts. The test indicates that the stress generated by the interaction of anchors with small spacing will result in the propagation of crack along the depth of anchor. When the stress generated with the row of anchor bolts is independent of each other under the condition of large spacing, cracks form two separate concrete wedges. Comparison of the test data with finite element analysis result shows that the equation provided by the related code is reliable in shearing strength.

Key words: chemical anchor bolt; anchor group; influence factors; shearing strength

在过去几年中, 化学锚栓作为一种施工简便、效果可靠的新型材料, 具有施工速度快、锚固力强、性能可靠、应用范围广等优点, 在加固、改建、装潢等建筑领域中得到大量运用. 目前国内外对

后锚固系统的研究成果表明: 后锚固构件的受力性能与整浇构件接近, 能够满足相应的规范要求. 而对于化学锚栓与混凝土的连接受力性能研究却相对较少, 该类连接一般可归结为化学锚栓群锚的复合受力问题. 国外诸多学者对复合受力情况下群锚承载力计算方法进行了研究^[1-3], 国内熊学玉等^[4]进行了化学植筋拉拔试验研究, 阎锋等^[5]进行钢筋混凝土基材上植筋的拉拔试验研究, 袁廷朋等^[6]进行了后锚固化学植筋受拉承载

收稿日期: 2009-01-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50778134); 土木工程防灾国家重点实验室基金资助项目(SLDRCE09-D-02).

作者简介: 苏磊(1984—), 男, 博士研究生;

陆洲导(1957—), 男, 教授, 博士生导师.

力计算及设计,何勇等^[7]进行混凝土结构的双筋粘结锚固性能试验研究,胡克旭等^[8]进行混凝土结构化学植筋安装钢梁节点板受力性能试验研究,张曙光等^[9]对建筑用化学锚栓拉伸性能进行测试,其研究多在受拉状态,对群锚其他受力状态下的性能掌握不足,实际工程中通常是多根锚栓处于多种复合受力状态,因此,本文对后锚固粘结型化学锚栓连接件纯剪受力性能进行深入研究,通过试验确定4根粘结型化学锚栓共同工作时抗剪承载力,并对目前应用较多的群锚抗剪承载力计算方法进行比较分析。

1 化学锚栓群锚受剪试验研究

1.1 试验概况

试验选取混凝土基材块尺寸为长×宽×高=1 000 mm×600 mm×600 mm,混凝土设计强度等级C30,配筋采用直径16 mm,HPB335钢筋,箍筋直径10 mm,HPB235级钢筋,保护层厚度为25 mm。化学锚栓慧鱼高强化学锚栓螺杆RGM,直径16 mm,锚板为Q235B钢材,尺寸为长×宽×高=300 mm×350 mm×15 mm和340 mm×390 mm×15 mm,采用慧鱼植筋胶粘剂、FIS V360S化学粘合剂。试件设计如表1所示,试验为保证群锚试件尽可能保持纯剪受力状态,制作了加载板,使剪力作用在锚板的中心位置。

本试验为静力受剪破坏性试验,轴向剪力由一个千斤顶提供,千斤顶采用电动油泵加载,反力由试件顶部的千斤顶提供,试验采用分级加载,初期每级荷载增量为10 kN,临界屈服前及屈服后每级荷载增量为5 kN,加载装置如图1所示^[10-11]。

表1 试件设计

试件编号	锚栓数量/根	锚栓间距/mm	锚栓边距/mm	植入深度/mm
SS1	4	200(12.5d)	80(5d)	125
SS2	4	240(15d)	80(5d)	125
SS3	4	200(12.5d)	128(8d)	125
SS4	4	240(15d)	128(8d)	125

1.2 试验结果

边距较小的SS1、SS2均产生混凝土楔形体裂缝,直至加载到锚栓剪断或破坏,但此时混凝土的裂缝已经相当宽,混凝土已经提前破坏,形成以锚栓为中心的倒锥体混凝土基材破坏形式,破坏时表现出较大的脆性,是脆性破坏;边距较大的SS3、SS4混凝土裂缝均未充分开展,锚栓直接被剪断,这是由于锚栓材质强度低或者有效截面偏小,破坏时具有明显的塑性变形,是延性破坏;各试件破坏形式见图2。由于4个试件都以锚栓被剪断或剪弯为依据,因此,破坏荷载都很接近,荷载-位移曲线见图3,主要试验结果见表2。

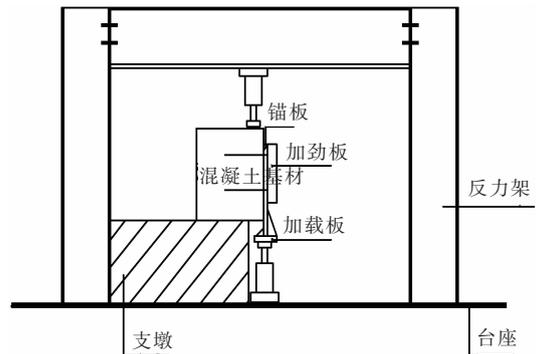


图1 试验加载装置



(a) 试件 SS1 破坏

(b) 试件 SS2 破坏

(c) 试件 SS3 破坏

(d) 试件 SS4 破坏

图2 试件破坏模式

2 化学锚栓群锚系统有限元分析计算

2.1 有限元模型的创建与参数选择

分析模型的试件尺寸、边界条件以及加载制度同试件的实际试验情况完全相同。针对试件模型和加载对称性,取试件一半进行分析以节省计算资源。混凝土单轴抗拉强度取 5.31 N/mm^2 ,混凝土弹性模量取 $3.25 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$,泊松比取

0.167。裂缝张开剪力传递系数取0.3,裂缝闭合剪力传递系数取0.9,混凝土本构关系采用过镇海模型,化学锚栓材性定义采用 von-mises 屈服准则。锚栓与混凝土之间作用采用接触单元 CONT-AC 173 和 TARGET170 单元来模拟。基材混凝土底部约束 z 方向位移及侧面约束3个方向位移,荷载与试验所加部位一致,直接施加在锚板侧面。

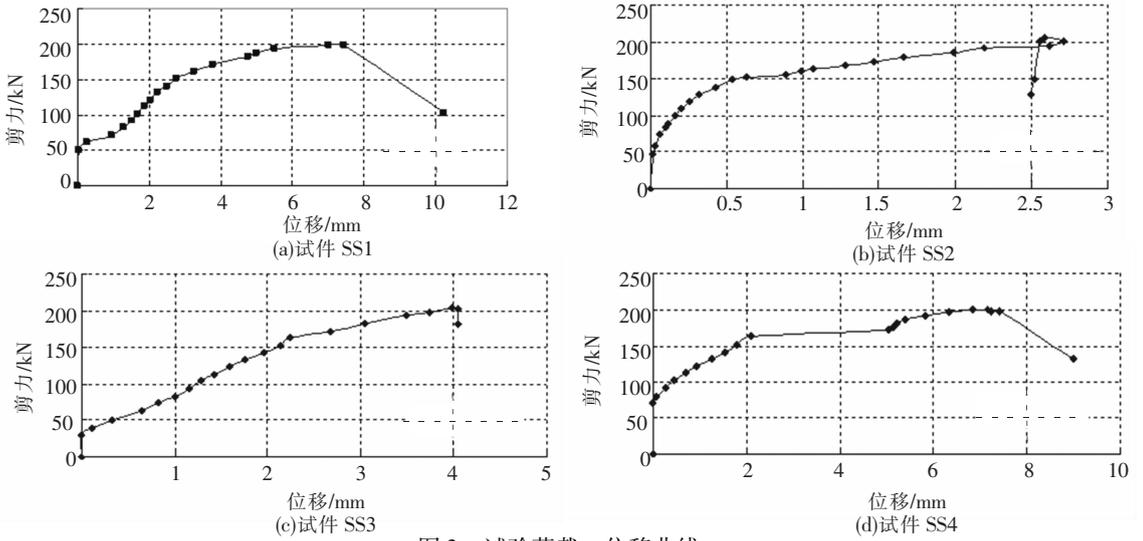


图 3 试验荷载 - 位移曲线

2.2 有限元分析结果

对小边距小间距 SS1 的前排锚栓处混凝土应力近似 35° 沿边缘扩散, 在混凝土边缘形成一个 $1/4$ 半椭球体应力区, 由于距离试件边缘较远, 后排锚栓处混凝土应力很难扩散, 只是在锚栓周围引起高应力. 从混凝土等效应变图上看, 最大极限应变达到 0.006 8, 大大超过混凝土最大极限应变, 锚栓周围混凝土被压碎, 位移均不到 1 mm; 对小边距间距稍大 SS2 的前排锚栓处混凝土应力以 35° 向边缘扩散成两个独立混凝土楔形体应力区, 后排锚栓处混凝土应力只在锚栓周围引起高应力, 应变与应力趋势基本一致, 形成两个相互独立的 35° 应变区, 最大极限应变达到 0.017, 超过了

定义的混凝土最大极限应变. 对于大边距 SS3 和 SS4, 其应力和应变云图非常相似, 四个锚栓周围的应力应变几乎接近均匀分布, 但向边距方向上扩展有限, 小间距同排锚栓的应力云图会有部分重叠, 大间距的应力云图基本独立, 说明 SS4 间距是相互影响临界间距. 四个试件后排锚栓混凝土几乎同时达到峰值应力, 前排锚栓混凝土应力会相对滞后. 这是由于后排锚栓靠近加载端, 传力路径较短, 受力较大. 裂缝开展充分的试件, 前排锚栓应力得到一定释放, 达到峰值应力时荷载最大, 滞后最厉害. 有限元分析得到的平均等效应力图、等效应变图、开裂状态矢量图、荷载 - 锚板位移、荷载 - 应力曲线分析结果如图 4 ~ 8 所示.

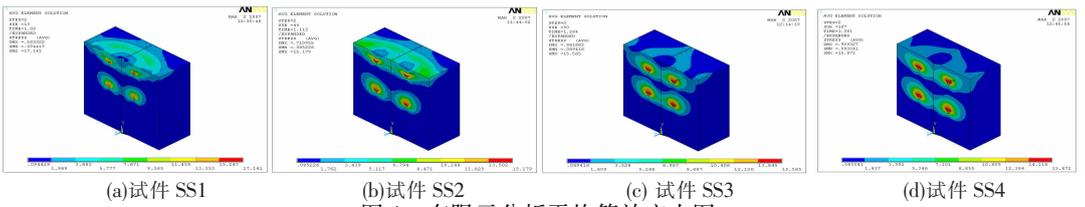


图 4 有限元分析平均等效应力图

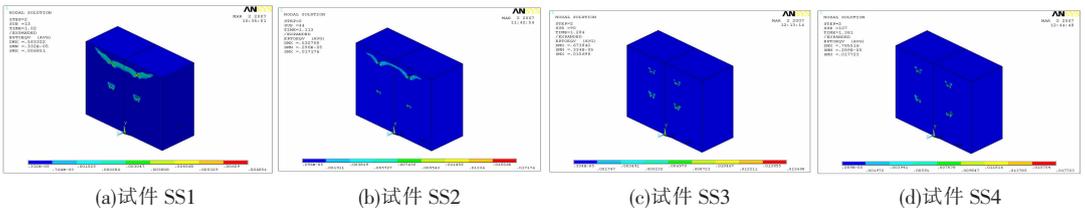


图 5 有限元分析等效应变图

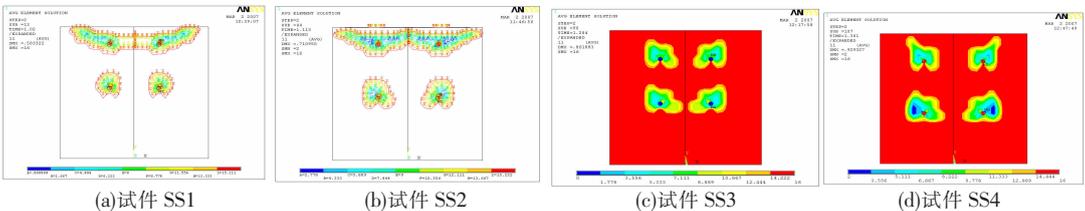


图 6 有限元分析开裂状态矢量图

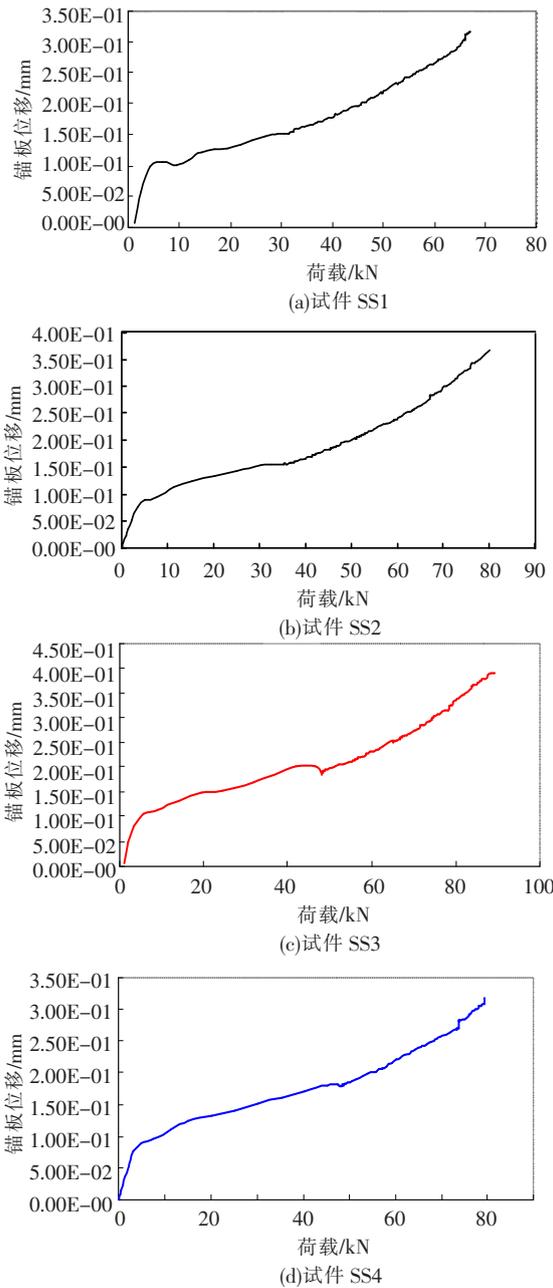


图7 有限元分析荷载-锚板位移曲线

3 化学锚栓群锚系统抗剪承载力分析

对试件进行承载力计算,分别采用喜利得^[12]平均值、慧鱼^[13]建议公式标准值、我国混凝土结构后锚固技术规程^[14]标准值与有限元结果进行比较,计算结果如表2所示。

由表3看出,当锚栓边距较小时,群锚系统为混凝土楔形体破坏的脆性破坏;当锚栓边距较大时,为锚栓剪断破坏的延性破坏。虽然其破坏荷载接近,但边距较小时,在锚栓破坏前混凝土的裂缝已经相当宽,混凝土已经提前破坏,小边距的群锚系统极限承载力更低。小边距系统混凝土边缘裂缝开展的比较充分,当间距较小时前排两个锚栓之间的裂缝会连通,形成垂直与剪力方向上劈裂

裂缝。大边距系统锚栓几乎均匀受力,裂缝基本只存在于锚栓周围很难开展。在荷载作用下某个锚栓或者某排锚栓被剪断,但位移较小。锚栓基材配置了一定数量的纵筋或箍筋,使系统在外荷载作用时,通过胶体的粘结作用传递到锚栓周围的混凝土中,有效限制混凝土的横向变形,混凝土处于双向甚至三向受压状态,有效降低劈裂应力的,延缓混凝土开裂,避免发生混凝土剪撬破坏,提高群锚系统的极限承载力。

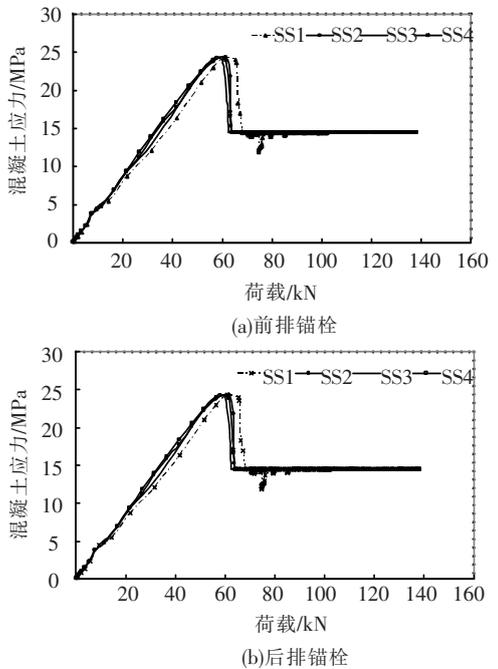


图8 有限元分析前、后排锚栓荷载-应力曲线

有限元计算结果远远大于其他推荐公式计算结果,这是因为有限元计算结果能够考虑各锚栓之间协同受力作用,此时前排锚栓应力变小,后排锚栓受力变大,使得混凝土开裂时间滞后,构件抗剪承载力提高。有限元可以模拟混凝土部分破坏后的应力重分布,考虑钢材的塑性和强化阶段,这是普通公式不能考虑的。3种推荐公式以混凝土楔形体裂缝破坏为控制条件,只是考虑了边缘锚栓受力,以此脆性破坏为控制条件,就必须预留足够的安全储备。我国现行设计规程是基于可靠度理论以一定保证率的概率理论为基础的极限状态设计法,采用喜利得推荐公式设计值比我国现行规范设计值大了近一倍,而慧鱼推荐公式设计值十分接近。有限元的结果和试验结果前期吻合比较好,后期结果就会有一定偏差,有限元结果比破坏荷载偏小。这是因为局部混凝土压碎严重,开裂明显,后期混凝土的损伤形式、裂缝开展都比较难以模拟。锚栓屈服后,锚栓应变随着荷载的增加而增加,且应变的增加要明显快于荷载的增长,但锚

栓承载力不会提高,锚栓出现大变形,达到强度极限后出现颈缩,至最终破坏是有一个较明显的塑性变形过程,经过反复试算可能超过有限元极限阶段. 试验结果是试件的破坏荷载,而有限元结果

大于推荐公式结果. 由此可以看出,依据我国现行规范公式和慧鱼推荐公式进行设计具有足够安全储备.

表 2 试件试验和计算结果

编号	间距/mm	边距/mm	开裂荷载/kN	破坏荷载/kN	喜利得法	慧鱼法	我国规范设计	有限元结果	主要破坏模式
SS1	200	5d	约 80	199.01	43.40	28.38	27.34	102	混凝土楔形体破坏,锚栓剪断
SS2	240	5d	约 160	204.93	47.34	30.96	29.82	111	混凝土楔形体破坏,锚栓剪弯
SS3	200	8d	未开裂	203.95	72.85	47.58	45.90	128	锚栓剪断
SS4	240	8d	未开裂	200.33	77.86	50.88	49.04	138	锚栓剪断

4 结 论

1) 边距大小影响化学锚栓群锚系统破坏形式. 对于本群锚系统来说,小边距群锚系统破坏表现为混凝土楔形体的脆性破坏,承载力低,离散性大;大边距群锚系统破坏为锚栓剪断的延性破坏,承载力高.

2) 边距大小影响化学锚栓的位移. 出现上述两种破坏的试件,在其失效前位移均很小,失效后,边距越小,锚栓位移越大. 当存在各种施工误差及偶然偏心时,会出现剪力方向上锚栓受力不均匀现象,锚栓受力越大,开裂越早,破坏越大.

3) 间距大小影响群锚系统锚栓之间相互作用. 当间距较小时,同排锚栓的云图会有部分重叠,应力会往锚杆深度方向上扩展的较多,前排锚栓之间的裂缝会连通形成垂直与剪力方向上的劈裂裂缝,相反,当间距较大时,同排锚栓的应力云图相互独立,会形成两个独立混凝土楔形体应力区. 当锚栓引起的应力云图基本独立每个裂缝独立开展时,可以认为处于临界间距状态.

4) 由于我国现行规范公式、喜利得公式和慧鱼公式以混凝土楔形体裂缝的脆性破坏为控制条件,而有限元可以考虑锚栓之间协同受力作用、混凝土部分破坏后的应力重分布等方面影响,因此,有限元结果远大于现行推荐计算公式. 对于粘结型化学锚栓群锚系统,锚栓与混凝土之间的空隙有粘结剂,能够比较好的传递剪力,使锚栓之间能够协同工作,更加符合有限元模拟的模型,因此,依据我国现行设计规范公式和慧鱼推荐公式进行设计具有足够安全储备.

参 考 文 献:

[1] ZHANG Yong yang, KLINGNER R E, GRAVES H L. Seismic response of multiple - anchor connections to concrete

[J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(6):811 - 822.
 [2] LOTZE D, KLINGNER R E, GRAVES H L. Static behavior of anchors under combinations of tension and shear loading [J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(4): 525 - 536.
 [3] OLUOKUN F A, BURDETTE E G. Behavior of channel anchors in thin slabs under combined shear and tension (pullout) loads [J]. ACI Structural Journal, 1993, 90(4):407 - 413.
 [4] 熊学玉,许立新,胡家智. 化学植筋的拉拔试验研究[J]. 建筑技术, 2001, 31(6): 383 - 384.
 [5] 阎锋,张惠英. 在钢筋混凝土基材上植筋的拉拔试验研究[J]. 建筑技术,2003, 33(6): 442 - 444.
 [6] 袁廷朋,陆洲导,邴涛. 后锚固化学植筋受拉承载力计算及设计[J]. 结构工程师, 2007, 23(2): 97 - 100.
 [7] 何勇,徐远杰,林涛. 混凝土结构的双筋粘结锚固性能试验研究[J]. 武汉大学学报:工学版, 2003, 36(2): 88 - 91.
 [8] 胡克旭,陈晓翔,芮明卓,等. 混凝土结构化学植筋安装钢梁节点板受力性能试验研究[J]. 结构工程师, 2008, 23(3):70 - 72.
 [9] 张曙光,邹超英. 混凝土用建筑锚栓(膨胀型)拉伸性能分析[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2000, 33(5): 67 - 71.
 [10] 李杰. 混凝土结构后锚固群锚抗剪试验研究[D]. 上海:同济大学, 2007.
 [11] 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.
 [12] HILIT 集团. 喜利得紧固技术手册[R]. 中国:喜利得(中国)有限公司, 2007.
 [13] Fischer. Technical handbook of fixing systems [R]. Germany: Fischerwerke Artur Fischer GmbH & Co. KG, 2001.
 [14] 中华人民共和国建设部. JGJ 145 - 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.

(编辑 赵丽莹)