

既有建筑改造中后锚固在工程中的运用与技术分析

熊保兴

贵阳市建筑设计院有限公司

摘要：后锚固连接已大量运用于既有建筑的改造领域，由于后锚连接节点对新增结构整体的安全性是至关重要，其次锚固节点的验算与理解也相对复杂繁琐。工程实践中容易忽略或者遗漏考虑一些关键的因素，从而造成计算分析的不合理，本文以规范、规程、图集等资料为依据，结合实际工程对新增夹层布置方案以及连接节点的计算加以分析讨论，可为今后类似的工程项目提供参[1]。

关键词：后锚固；锚栓；承载力；规范对比；工程应用；建筑改造

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.13.021

一、引言

随着近些年来房地产的发展，过去的几十年里建造了大量的建筑。随着市场的变化，很多建筑的功能已经无法满足现在业主的需求，对既有建筑进行升级改造已成为很多业主的主要选择，也是未来的一大趋势。改造中经常会出现新增夹层结构的情况，而对于此类改造，大部分工程均需要采用到后锚固技术，后锚固连接的可靠性变得至关重要，连接节点一旦失效，会造成很大的经济损失，甚至可能造成人员伤亡。故本文将结合实际工程，对新增结构的方案布置以及后锚固连接节点的验算加以计算分析讨论和对比，为以后类似项目提供参[2]。

二、后锚固连接简要介绍

后锚固主要分为锚栓锚固和植筋锚固，可用于结构构件和非结构构件的连接，对于不同抗震等级和受力情况下的连接对锚栓的选择有不同的要求。同时对基材的厚度，混凝土等级，锚栓间距、边距、埋深也有相关的要求，具体详见《混凝土结构后锚固技术规程》和《混凝土结构加固设计规范》，此处不做赘述[3]。

三、锚栓选择

实际工程中，新增构件多采用钢梁与原主体铰接连接，其受力多为受拉，受剪和拉剪复合受力。特殊倒锥形化学螺栓能有效的满足这些要求，工程中也常使用此类锚栓作为结构构件的接连材料，本项目也均选择此类锚栓。故以下仅对特殊倒锥形化学锚栓进行分析，其他类型的锚栓要求，可参见相关规程和规范[4]。

四、特殊倒锥形化学螺栓连接节点验算

特殊倒锥形化学锚栓对于结构构件连接的计算主要分为连接钢材和基材的验算，现整理后锚固技术规程和加固设计规范中主要的验算项目进行对比分析：

	《混凝土结构后锚固技术规程》JGJ 145-2013	《混凝土结构加固设计规范》GB 50367-2013	
钢材验算	锚栓钢材的受拉承载力	$N_{Rk,s} = f_{t,k} A_s / 1.3$	$N_t^c = \psi_{E,s} f_{td,s} A_s$
	锚栓钢材的受剪承载力 (无拉杆臂的纯剪)	$V_{Rk,s} = 0.5 f_{v,k} A_s / 1.3$	$V^c = \psi_{E,s} f_{vd,s} A_s$
	锚栓钢材的拉剪复合承载力	$(N_{Rk,s} / N_{Rk,s}^c)^2 + (V_{Rk,s} / V_{Rk,s}^c)^2$	$(N_t^c / N_t^c)^2 + (V^c / V^c)^2$
基材验算	混凝土锥体受拉承载力	开裂混凝土: $N_{Rk,c} = 7.0 \sqrt{f_{c,k}} h_{ef}^{1.5} (A_{t,N} / A_{c,N}^0) \psi_{E,s} \psi_{E,c} \psi_{E,N} \psi_{E,c} / 3.0$	$N_t^c = 2.4 \psi_{E,s} \psi_{E,N} \sqrt{f_{c,k}} h_{ef}^{1.5}$
		不开裂混凝土: $N_{Rk,c} = 9.8 \sqrt{f_{c,k}} h_{ef}^{1.5} (A_{t,N} / A_{c,N}^0) \psi_{E,s} \psi_{E,c} \psi_{E,N} \psi_{E,c} / 3.0$	
	混凝土边缘受剪承载力	开裂混凝土 $V_{Rk,c} = 1.35 d^2 h_{ef}^0 \sqrt{f_{c,k}} c_1^{1.5} (A_{t,V} / A_{c,V}^0) \psi_{E,s} \psi_{E,c} \psi_{E,N} \psi_{E,c} \psi_{E,V} / 2.5$	$V^c = 0.18 \sqrt{f_{c,k}} c_1^{1.5} d_0^{0.5} h_{ef}^{0.2}$
		不开裂混凝土 $V_{Rk,c} = 1.9 d^2 h_{ef}^0 \sqrt{f_{c,k}} c_1^{1.5} (A_{t,V} / A_{c,V}^0) \psi_{E,s} \psi_{E,c} \psi_{E,N} \psi_{E,c} \psi_{E,V} / 2.5$	
混凝土剪撬受剪承载力	$V_{Rk,sp} = 2 N_{Rk,s} / 2.5$	通过采取构造措施予以防止，不验算	
混凝土劈裂承载力	$N_{Rk,sp} = (h / h_{min})^{2/3} N_{Rk,s} / 3.0$	通过采取构造措施予以防止，不验算	

以上公式中各字母含义详见《混凝土结构后锚固技术规程》和《混凝土结构加固设计规范》。

需注意的是，加固规范认为非开裂混凝土对锚栓承载力提高的作用，其只有理论意义，无甚工程应用的实际价值，采用了开裂混凝土的计算假定，这一点与后锚固规程区别较大[5]。其次对于混凝土的剪撬破坏和混凝土的劈裂破坏要求不同，加固规范认为应通过采取构造措施来予以防止。

五、后锚固实际工程中的运用

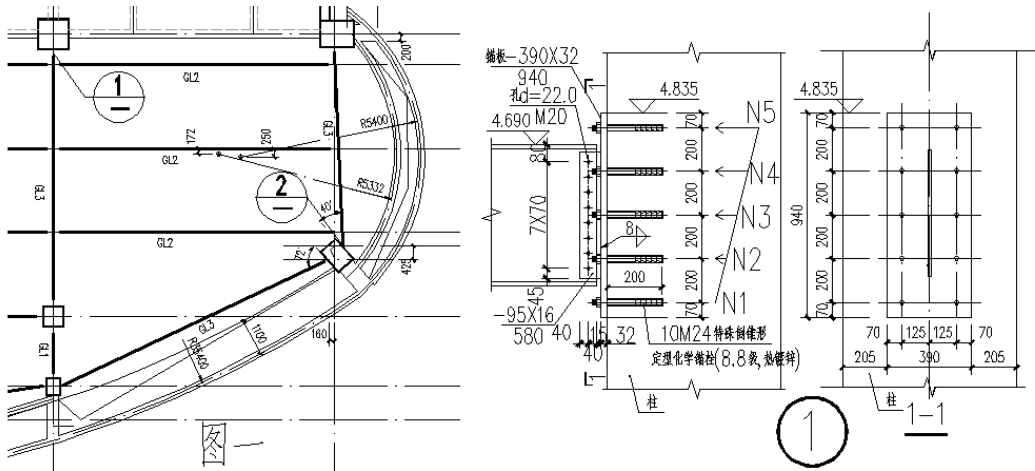
(一) 项目概况

原建筑为酒店，酒店中庭大堂区域一层顶镂空，于2014年竣工使用至今。现业由于经营需要，需对酒店进行改造升级，原酒店中庭一层顶镂空部分需新增结构板，改造为餐厅使用，一层柱混凝土等级均为C45。

(二) 方案分析

原结构均按非抗震进行设计，按现行规范，该地区已调整为6度抗震区。若新增部分的梁与原柱采用钢连接，则需对该层及地下室的相关区域做抗震验算并进行加固，不经济[6]。未避免抗震作用，采用钢梁(H型钢)与原柱进行铰接的方案，梁端采用混凝土现浇板，局部平面布置图详见下图一：

根据计算结果及布局等因素，选取典型的节点①和节点②进行分析。由于采用现浇混凝土板，可认为满足刚性楼板假定，梁端主要受到剪力V的作用，轴力可以忽略不计。节点①和节点②受剪设计值分别为V1=390kN；V2=390kN；均不受弯矩和扭矩作用[7]。



(三) 节点①分析

钢梁螺栓与群锚基材之间存在偏心距离 $e=87\text{mm}$ ，而群栓与混凝土的连接为刚性连接，故钢梁剪力对群锚产生的偏心弯矩不能被螺栓自身所平衡，弯矩应由锚栓承受，所受弯矩为 $M=Ve=33.93\text{kN}\cdot\text{m}$ 。锚板厚度 $t>\max(0.6d, s/8)=31.25$ ，取 $t=32\text{mm}$ ，锚板上锚栓的开孔按标准孔设置 $d_0=26\text{mm}$ ，锚栓有效锚固深度 $h_{ef}=200\text{mm}$ ，原柱截面为 $800\text{mm}\times 800\text{mm}$ 。

各单锚栓所受拉力 N 的计算： $\sum y_2 i=2.4\times 10^6$ ， $N/n-M_y/\sum y_2 i=-11.31\text{kN}<0$ ，根据公式 $N_i=M_y i/\sum y_2 i$ 得： $N_1=0\text{kN}$ ； $N_2=2.83\text{kN}$ ； $N_3=5.66\text{kN}$ ； $N_4=8.48\text{kN}$ ； $N_5=11.31\text{kN}$ ；群锚总合力 $N_g\text{sd}=\sum N_i=56.6\text{kN}$ ；受拉锚栓合力点相对于群锚受拉锚栓重心的偏心距 e_N 计算如下： $e_N=(N_3\times 200+N_4\times 400+N_5\times 600)/\sum N_i-300=100\text{mm}$ 。每个锚栓所受剪力为 $V_i=V_g\text{sd}/n=39\text{kN}$

根据后锚固规程，本项目后锚固连接重要性系数 γ_0 取1.1；又根据《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068-2018)的规定，本结构安全等级同主体，为二级，结构重要性系数 γ_0 取1.0；对于加固规范，连接的重要性系数取值同《建筑结构可靠性设计统一标准》，对单个锚栓承载力的验算如下：a) 加固规范： $N_a t=173\text{kN}>N_5$ ； $V^a=102.4\text{kN}>V_i$ ； $(N_{sd}/N_a t)^2+(V_{sd}/V^a)^2=0.15<1.0$ ；均满足。b) 后锚固技术规程： $N_{Rd, s}/\gamma_0=158\text{kN}>N_5$ ； $V_{Rd, s}/\gamma_0=79\text{kN}>V_i$ ； $(N_{sd}/N_{Rd, s}/\gamma_0)^2+(V_{sd}/V_{Rd, s}/\gamma_0)^2=0.250.15<1.0$ ；均满足。

按加固规范进行混凝土锥体受拉承载力验算：锚栓直径为24mm， $\psi_b=0.8$ ； $\psi_{s, h}=0.95$ ；

$\psi_{e, N}=\min(1/(1+2\times 100/(3\times 200)), 1.0)=0.75$ ； $A_{cN}/A_0 c, N=9.6\times 10^5/3.6\times 10^5=2.67$ ； $N_c t=69.2\text{kN}>N_g\text{sd}$ ，满足。

根据后锚固规范，基材为受压柱，属不开裂混凝土。由于群锚存在3个以上边缘且锚栓最大边距不大于 $C_{cr, N}$ ，故 $h_{ef, s_{cr, N}}$ ， $c_{cr, N}$ 应由以下计算值替代：

$h'_{ef}=\max(c_{\max}h_{ef}/c_{cr, N}, s_{\max}h_{ef}/s_{cr, N})=183\text{mm}$ ； $s'_{cr, N}=h'_{ef}s_{cr, N}/h_{ef}=549\text{mm}$ ； $c'_{cr, N}=0.5s'_{cr, N}=274\text{mm}$ ；经计算， $\psi_{ec, N}=0.73$ ； $\psi_{s, N}=1.0$ ； $\psi_{re, N}=1.0$ 混凝土锥体受拉承载力： $N_{Rd, c}/\gamma_0=106.9\text{kN}>N_g\text{sd}$ ，满足^[8]。

由于该节点所受剪力 V 并无混凝土的剪切破坏面，混凝土边缘受剪破坏不进行验算。对于剪撬和劈裂破坏仅后锚固规程给出计算公式，验算如下，均按非开裂混凝土考虑：混凝土抗剪撬承载力 $V_{Rd, cp}/\gamma_0=233.3\text{kN}<V_g\text{sd}$ 。混凝土抗劈裂承载力： $V_{Rd, cp}/\gamma_0=163.6>N_g\text{sd}$ 。

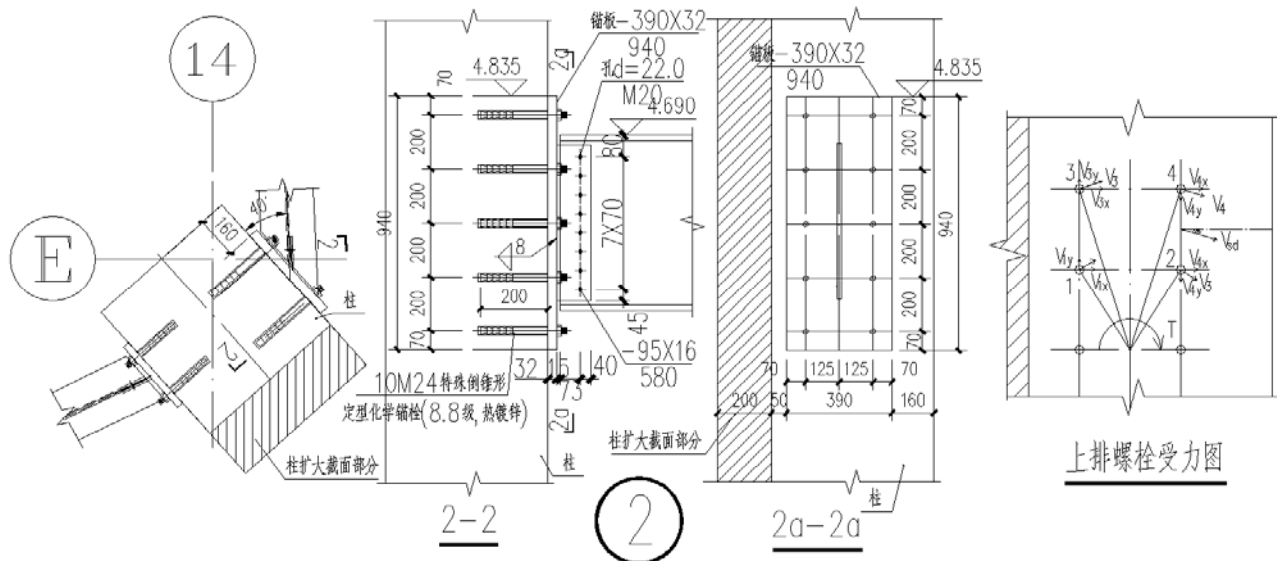
后锚固规程条文说明6.1.2条，可知基材混凝土的剪撬破坏主要发生在中心受剪之短粗锚栓埋深较浅的情况，其计算公式参考了ETAG；而ETAG中的锚固承载力分项系数 γ 对于混凝土基材破坏是比国内规程低36%~44%的。根据《混凝土结构加固设计规范》16.3.1条可知，对于混凝土的剪撬破坏、劈裂破坏，应通过采取构造措施予以防止，不参与验算。该节点均满足加固设计规范第16.4章的构造规定，加之原柱均配有箍筋和纵筋，非素混凝土，对抗剪撬都是有利的。结合以往工程经验，本项目中的锚栓锚固长度已相对比较长，不属于埋深较浅的情况，且锚栓的布置满足构造要求，该节点是可以满足工程使用的。

(四) 节点②的分析

详见图二

节点②中柱截面为 $600\text{mm}\times 800\text{mm}$ ，混凝土等级为C45，梁与柱锚固面存在40度的夹角，梁端剪力 V 对锚板产生的偏心弯矩存在两个分量，一个是垂直于锚板高度方向的弯矩 M ，另一个为对群锚栓的扭矩 T 。弯矩 M 对锚栓的验算，计算过程参考节点①^[9]。基材受剪最不利区域为锚栓2和4的一侧，以下仅对扭矩引起的剪力对基材的抗剪破坏进行验算：

$\sum(x_2 i+y_2 i)=925\times 10^3\text{mm}^2$ ；扭矩 $T=201\times 0.12\cos 40^\circ=18.5\text{kN}\cdot\text{m}$ ； $V_{2x}=4\text{kN}$ ， $V_{2y}=22.6\text{kN}$ ，



图二

$V_{4x}=8\text{kN}$, $V_{4y}=22.6\text{kN}$; 经计算, $V_{sd}=46.8\text{kN}$; $\alpha_v=75.1^\circ$; $V_{4sd}=24.0\text{kN}$; $\alpha_{4v}=70.5^\circ$; 剪力合力点至受力锚栓中心点的距离 $e_v=8\times 400/12-200=66.7\text{mm}$;

1. 按加固规范计算:

对2号和4号引起的边缘受剪验算: $\psi_{s,v}=1.0$; $\psi_{h,v}=1.0$; $A_{c,v}/A_0 c, v=1.29$; $\psi_{a,v}=1.35$; $\psi_{e,v}=0.84$; $\psi_{u,v}=1.2$. $V^c=55.3\text{kN}>V_{sd}$, 满足。

对4号引起的边缘受剪验算如下: $\psi_{s,v}=1.0$; $\psi_{h,v}=1.0$; $A_{c,v}/A_0 c, v=1.0$; $\psi_{a,v}=1.24$; $\psi_{e,v}=1.0$; $\psi_{u,v}=1.2$. $V^c=46.9\text{kN}>V_{4sd}$, 满足。

2. 按后锚固规程不开裂混凝土计算:

$\psi_{s,v}=1.0$; $\psi_{h,v}=1.0$; $\psi_{re,v}=1.0$; $\alpha=0.093$; $\beta=0.064$;

对2号和4号引起的边缘受剪验算: $\psi_{ec,v}=0.84$; $\psi_{a,v}=2.15$; $A_{c,v}/A_0 c, v=1.29$; $V_{Rd,c}/\gamma_0=177.6\text{kN}>V_{sd}$, 满足。

对4号引起的边缘受剪验算如下: $A_{c,v}/A_0 c, v=1.0$; $\psi_{a,v}=1.99$; $\psi_{ec,v}=1.0$; $V_{Rd,c}/\gamma_0=127.5\text{kN}>V_{4sd}$, 满足。

由以上对比计算可知, 即使后锚固规程采用开裂混凝土计算, 加固规范计算的抗剪承载力也低于后锚固规程。

结语

通过以上计算对比分析, 《混凝土结构加固设计规范》与《混凝土结构后锚固技术规程》对于后锚固计算中的锚栓和基材的承载力验算及要求不尽相同, 但其基本原理是类似的。后锚固规程描述相对详细, 计算公式内容相对丰富; 加固规范相对便捷, 对基材的验算相对更保守。建议计算时以加固规范为主, 受力复杂节点进行包络设计^[10]。后锚固节点的验算应作为连接的重点内容进行验算, 同时由于施工工艺对后锚固的影响较大,

对施工人员的经验和技能有较大依赖, 故设计时应应对后锚固的承载力留有足够的富裕量。其次还需注意, 施工时需严禁先安装锚板, 再焊接连接板, 施工次序应明确交代, 以免破坏黏结胶水, 降低锚固件的承载力。

参考文献

[1] 混凝土结构后锚固技术规程JGJ145-2013[D]. 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2013.06
 [2] 混凝土结构加固设计规范GB 50367-2013[D]. 中华人民共和国住房和城乡建设部、中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2013.11
 [3] 混凝土后锚固连接14G308[D]. 中国建筑标准设计研究院, 2014
 [4] 既有建筑鉴定与加固通用规范GB 55021-2021[D]. 中华人民共和国住房和城乡建设部、中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2022.04
 [5] 混凝土结构设计规范(2015年版)GB 50010-2010[D]. 中华人民共和国住房和城乡建设部、中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2010.07
 [6] 建筑结构可靠性设计统一标准GB 50068-2018[D]. 中华人民共和国住房和城乡建设部、中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2018.11
 [7] 万墨林、韩继云. 《混凝土结构后锚固技术规程》简介[J]. 第七届全国建筑物鉴定与加固改造学术会议. 2004: 50-56
 [8] 沈天丽. 既有建筑后锚固连接补强加固技术[J]. 房建工程. 2017(12): 104-106
 [9] 杜海强、蒋青青. 结构后锚固机理分析和破坏特征[J]. 山西建筑. 2006(16): 8-9
 [10] 丁百湛, 孙明, 金岭. 关于JGJ145-2013《混凝土后锚固技术规程》的问题探讨[J]. 砖瓦. 2015(9): 52-57