

# 混凝土空洞对剪力钉抗拔和抗剪性能的影响研究

张柳煜<sup>1</sup>, 黄乐州<sup>2</sup>, 苏举<sup>3</sup>, 金鑫<sup>1</sup>, 解斌<sup>4</sup>

(1. 长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610084;  
3. 中设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014; 4. 云南武倘寻高速公路有限责任公司, 云南 昆明 651599)

**摘要:**通过有限元仿真,分析空洞体积和空洞所处位置对剪力钉抗拔和抗剪性能的影响,为剪力钉施工误差控制范围的制定提供科学依据。以既有试验结果为基础,建立有限元分析模型,最终结果表明:处于剪力钉头部周围的空洞,随着空洞体积的增加,剪力钉极限抗拔承载力基本保持不变;同一体积的空洞,其位置从钉头沿着钉长方向向下移动时,抗拔承载力均会减小且空洞位置处于距剪力钉头部 1/3 剪力钉长度范围内,抗拔承载力减小幅度最为明显;当同一大小的空洞,其位置从钉头沿着钉长方向移动至钉长 1/6 左右时,剪力钉抗剪承载力逐渐增大,从 1/6 到钉尾时,抗剪承载力稳定不变;因此对剪力钉浇筑区域混凝土浇筑工艺的质量检验标准应更加具有针对性。

**关键词:**空洞;钢-混组合梁;剪力钉;模型试验;Abaqus

**中图分类号:** U441

**文献标志码:** A

剪力钉作为钢-混组合梁中的重要连接件,不仅能够抵抗钢梁与混凝土板间的纵向剪力,并约束二者之间的滑移作用,还可防止混凝土板与钢梁脱离,其工作状态直接影响组合结构的工作性能。

以往很多学者对剪力钉做了大量研究,Lam 等<sup>[1]</sup>通过有限元法模拟剪力钉推出试验,验证了有限元法的可靠性;文献[2—9]分别研究了混凝土破坏面与水平面的角度以及栓钉埋置深度等因素对剪力钉的抗拉承载力的影响,并提出了相应的抗拉承载力计算公式;Smith A<sup>[10]</sup>通过对组合梁进行推出试验,得出剪力连接件的横向间距对剪力连接件的抗力影响不大;聂建国等<sup>[11]</sup>通过抗拔不抗剪栓钉试件的拉拔试验,得出了栓钉尺寸是影响其抗拔性能的主要因素;丁敏等<sup>[12]</sup>通过对连接件在单调荷载下的推出试验,得出高性能混凝土中剪力钉抗剪承载力与在普通混凝土中相近;汪炳等<sup>[13]</sup>采用 Abaqus 研究了剪力钉连接件的直径和长度对剪力钉承载能力的影响,并得出了剪力钉长度与直径比小于 4 时,剪力钉极易发生拔出破坏;张金等<sup>[14]</sup>采用 Ansys 得出了剪力键的布置形式对钢-混混凝土组合连续梁的力学性能会产生重大影响;刘永健等<sup>[15]</sup>通过剪力钉推出试验与有限元模拟计算相结合的方法得出了混凝土浇筑不密实对剪力钉抗剪承载能力影响最大;李成君等<sup>[16]</sup>通过对纵向荷载作用下剪力钉连接件的抗剪性能和极限承载力试验研究发现,剪

力钉周围混凝土的包裹作用能明显提高剪力钉纵向抗剪承载力和延性;李慧等<sup>[17]</sup>通过对剪力钉连接件进行推出试验得出:剪力钉经受的冻融循环次数越多,剪力钉和混凝土试块损伤越大;谢宜琨<sup>[18]</sup>通过对剪力钉连接件在低温下的推出试验,得出剪力钉的抗剪刚度随温度降低而提高,且直径越大,提升幅度越小。

综上所述,对于剪力钉自身的因素对剪力钉拔出和剪切影响的研究已经较为完善,但由于剪力钉周围的混凝土不密实等引起的空洞对剪力钉的抗拔性和抗剪性的影响的研究很少,特别是关于空洞对剪力钉抗拔性的影响研究更少。

该文以有限元分析为基础,研究混凝土空洞对剪力钉抗拔和抗剪性能的影响,为提出钢-混组合梁施工误差的控制范围提供科学依据。

## 1 有限元模型的建立

采用 Abaqus 有限元软件进行仿真分析,选用材料本构关系时,混凝土采用塑性损伤模型,钢板采用理想弹塑性模型。剪力钉本构模型选用考虑强化阶段的双折线模型,各种材料特性如表 1 所示。

文中所有部件均采用 C3D8R 实体单元,网格划分采用扫掠技术及中性轴算法,单元均为六面体。

收稿日期:2021-08-24

基金项目:云南省交通运输厅科技项目(编号:云交科教[2018]11号)

作者简介:张柳煜,男,博士,副教授, E-mail: zly@chd.edu.cn

表 1 模型材料参数

材料	$E/\text{GPa}$	$\nu$	$f_y/\text{MPa}$	$f_u/\text{MPa}$
混凝土	34.5	0.20	32.4	—
剪力钉	206.0	0.31	420.0	519
钢板	206.0	0.31	345.0	—

2 模型验证

为检验有限元模型的精确度,采用文献[19—20]得到的拉拔试验结果和文献[15]得到的推出试验结果,进行抗拔有限元模型和抗剪有限元模型的验证,如图 1 所示(图中①表示刚体,②表示钢板,③表示混凝土)。

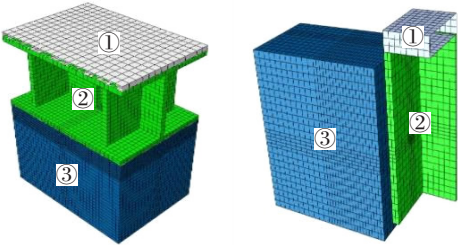


图 1 抗拔有限元模型和抗剪有限元模型

2.1 拉拔试验

周伟翔<sup>[19]</sup>、蔺钊飞等<sup>[20]</sup>曾对剪力钉在不同长度和钢板有无开孔的情况下,进行过拉拔试验,该文只将试验中剪力钉直径为 22 mm、长度为 100 mm 的试验结果作为有限元模型验证的依据,采用对刚体施加 3 cm 的位移加载模拟试验加载的方式。在不考虑摩擦作用的情况下,剪力钉与混凝土采用硬接触的方式。

图 2 中的试验曲线由文献[19]的 3 次试验中最大值绘制而成,模型与试验的荷载—剥离曲线基本重合,剪力钉最大抗拔承载能力在模型中为 161.7 kN,试验结果为 155.3 kN,相对误差为 4.12%。

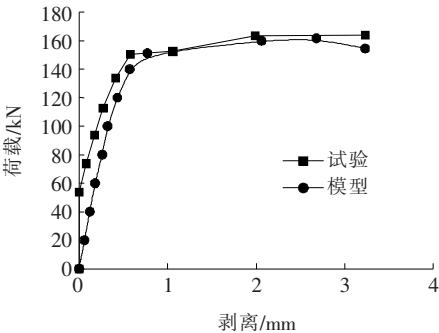


图 2 剪力钉荷载—剥离曲线对比图

2.2 推出试验

刘永健等<sup>[15]</sup>曾通过静载推出试验对直径为 22 mm、长度 200 mm 的剪力钉进行抗剪承载力研究,该文以静载试验模型作为分析的基础。同样地,采用位移加载来模拟试验加载,即对刚体施加 1.2 cm 的强制位移。

由于剪力钉本构模型选用考虑强化阶段的双折线模型,剪力钉荷载—滑移曲线的下降段在模型中难以实现,所以在模型和试验结果比对时未考虑试验结果中的荷载—滑移曲线的下降段(图 3)。

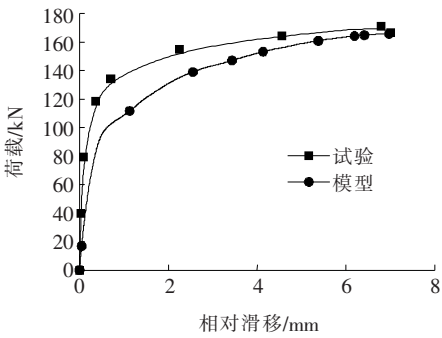


图 3 剪力钉荷载—滑移曲线对比图

由图 3 可知:模型与试验的荷载—滑移曲线规律基本相同,模型中剪力钉最大抗剪承载力为 166.07 kN,试验结果为 171.7 kN,相对误差为一 3.28%。

整体结果表明:该文所采用的有限元模型参数和模拟方法是正确的。

3 抗拔性能

3.1 空洞大小

由剪力钉拉拔试验结果发现,钉头下方 1 cm 范围内的混凝土承受较大的压应力,与此同时,钉头周围的空洞对剪力钉的影响尚未可知。为此分开研究剪力钉钉头周围和剪力钉钉头下方混凝土空洞大小对剪力钉抗拔性能的影响。

(1) 钉头周围空洞的影响

空洞工况及其编号如表 2 所示。

表 2 钉头周围空洞工况

工况	空洞体积/ $\text{cm}^3$	工况	空洞体积/ $\text{cm}^3$
1	0	4	7.7
2	1.6	5	11.5
3	3.9	6	15.4

剪力钉拉拔承载力及对应的剥离量与空洞体积的关系曲线见图 4。

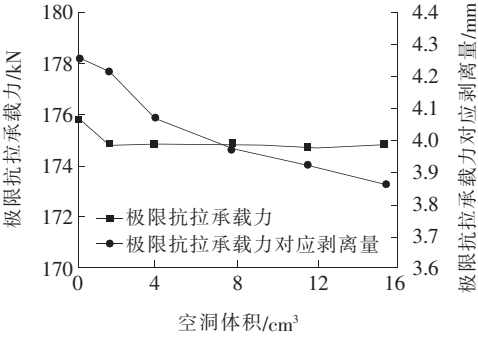


图 4 剪力钉抗拔承载力及对应的剥离量折线图

由图 4 可知：① 与基本工况 1 相比，工况 2~6 承载力降低幅度分别为 0.5%、0.5%、0.5%、0.6%、0.5%。显然，钉头周围的空洞与刚度相对较大的剪力钉钉头相比，对剪力钉抗拔承载力影响较小；② 与基本工况 1 相比，工况 2~6 剥离量降低幅度分别为 1.0%、4.4%、6.6%、7.8%、9.2%。钉头周围空洞的增大与剪力钉抗拔承载力对应的剥离量呈现相反的变化趋势。

由以上分析可知，体积为 15.4 cm³ 的空洞（顶头无混凝土包裹）使剥离量减小 9.2%，而极限抗拔承载力降低幅度在 1% 以内。钉头周围混凝土空洞对剪力钉极限抗拔承载能力的影响较小，对剪力钉极限抗拔承载力对应的剥离量有一定的影响。

(2) 钉头下方 1 cm 内的空洞

空洞工况及其编号见表 3。

表 3 剪力钉下方空洞工况参数

工况	空洞体积/cm³	工况	空洞体积/cm³
1	0	4	2.9
2	0.7	5	4.4
3	1.5		

剪力钉抗拔承载力及对应剥离量与空洞体积的关系曲线见图 5。

由图 5 可知：剪力钉抗拔承载力随着钉头下方空洞增大，大幅度降低，与此同时，剥离量先减小后增大。

由以上分析可知：钉头下方 1 cm 内的混凝土空洞对剪力钉抗拔性能影响较大。钉头下部 4.4 cm³ 的空洞（剪力钉周围仅有 1/3 混凝土包裹）可使剪力钉抗拔承载力降低 37.4%。

3.2 空洞位置

由于剪力钉钉头下方不同位置混凝土的空洞对剪

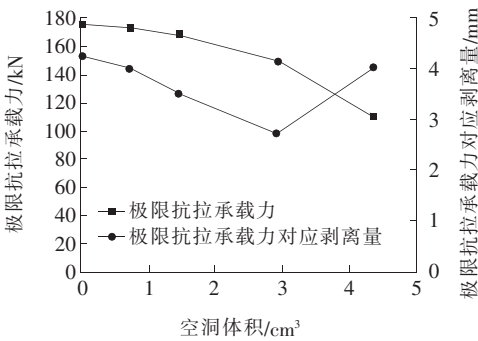


图 5 剪力钉抗拔承载力及对应剥离量折线图

力钉抗拔性能影响较大，为此该文取大小为 2.9 cm³（剪力钉周围有一半混凝土包裹）和 5.8 cm³（剪力钉周围无混凝土包裹）的空洞沿着钉长方向不同位置进行研究。

(1) 空洞体积为 2.9 cm³（剪力钉周围有一半混凝土包裹）

空洞中心距钉头底部的距离  $h$ ，对应的各个工况编号及空洞位置见表 4。

表 4 剪力钉下方空洞 (2.9 cm³) 工况

工况	$h$ /cm	工况	$h$ /cm
1	0.5	4	3.5
2	1.5	5	4.5
3	2.5		

剪力钉抗拔承载力及对应剥离量与空洞中心距钉头下表面的距离变化关系见图 6。

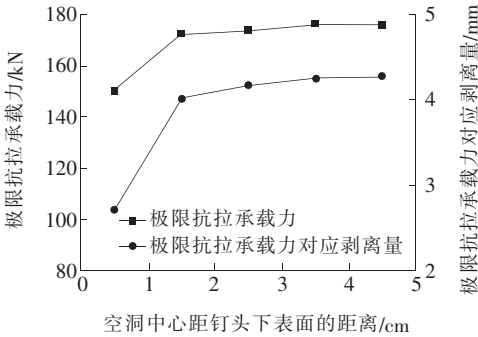


图 6 剪力钉抗拔承载力及对应剥离量折线图

由图 6 可知：在钉头下方 1.5 cm（占钉长 1/3 左右）范围内体积为 2.9 cm³ 的空洞对剪力钉抗拔性能有一定的影响。

(2) 空洞体积为 5.8 cm³（剪力钉周围无混凝土包裹）

根据空洞中心距钉头底部的距离  $h$ ，对应的各个工况编号及空洞位置见表 5。

表 5 剪力钉下方空洞(5.8 cm<sup>3</sup>)工况

工况	<i>h</i> /cm	工况	<i>h</i> /cm
1	1.5	4	4.5
2	2.5	5	5.5
3	3.5		

剪力钉拉拔承载力与对应剥离量的关系见图 7。

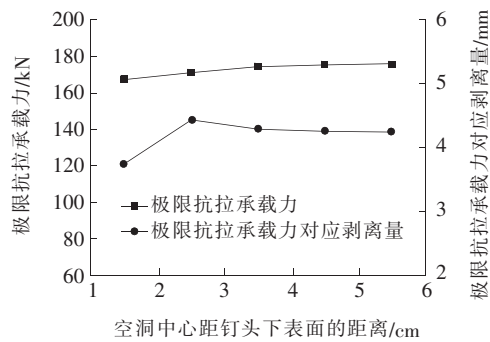


图 7 剪力钉抗拔承载力和对应剥离量折线图

由图 7 可知:钉头下方 4 cm(占钉长 1/3 左右)范

表 6 剪力钉高度方向的空洞工况参数

工况	<i>h</i> /cm	工况	<i>h</i> /cm	工况	<i>h</i> /cm	工况	<i>h</i> /cm	工况	<i>h</i> /cm
1	0.5	4	3.5	7	6.5	10	9.5	13	12.5
2	1.5	5	4.5	8	7.5	11	10.5	14	13.5
3	2.5	6	5.5	9	8.5	12	11.5		

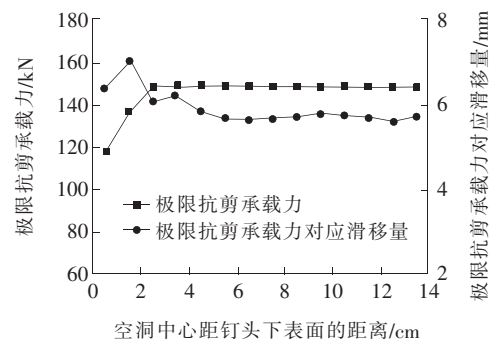


图 8 剪力钉极限抗剪承载力和对应滑移量折线图

表 7 剪力钉抗剪承载能力与承载力降低幅度

工况	承载力降低幅度/%	滑移量降低幅度/%	工况	承载力降低幅度/%	滑移量降低幅度/%
1	21.1	11.0	8	0.3	-1.1
2	8.1	22.3	9	0.1	-0.4
3	0.2	5.6	10	0.1	0.7
4	0.2	8.1	11	0.1	0.1
5	0.1	1.7	12	0.1	-0.6
6	0.3	-1.3	13	0.2	-2.6
7	0.3	-1.4	14	0.3	-0.1

围内的体积为 5.8 cm<sup>3</sup> 的空洞对剪力钉抗拔性能有一定影响。

4 抗剪性能

由基本推出试验数值计算结果发现,推出试验破坏阶段剪力钉根部受到较大的压应力,在剪力钉中部和钉头处有较大的拉应力。因此,通过有限元仿真模拟,研究上述应力较大(或者破坏严重)位置的混凝土空洞对剪力钉抗剪性能的影响。

4.1 空洞位置

(1) 沿剪力钉高度方向的空洞

沿剪力钉高度方向,研究每个区域处剪力钉仅有 3/4 混凝土包裹,即空洞体积为 3.05 cm<sup>3</sup> 时,空洞对剪力钉受剪性能的影响以及其影响范围。空洞中心距钉头底部的距离用 *h* 表示,工况编号顺序及位置见表 6。试验结果见图 8。剪力钉抗剪承载能力与承载力降低幅度见表 7。

由图 8 可知:空洞越接近剪力钉底部,承载能力降低越大。从表 7 中不难发现,距剪力钉头部垂直距离在 3 cm(占剪力钉长度 1/6 左右)以内的空洞对剪力钉承载能力影响较大。工况 7 和工况 14 的剪力钉抗剪承载能力降低了 0.3%左右,顶头受压处的混凝土空洞对剪力钉抗剪承载能力的影响较小。

由图 8 及表 7 可知:由于空洞的存在,使单钉抗剪刚度降低,导致滑移量增大,随着空洞距离的增加,对滑移量的影响逐渐变小,从而表现出剪力钉极限抗剪承载力对应界面滑移量呈现先增大后随着空洞对剪力钉抗剪性能影响的降低而逐渐收敛的趋势。

(2) 沿剪力钉推出方向的空洞

工况 1~6 主要研究沿剪力钉推出方向不同位置的 3 cm<sup>3</sup> 的空洞对剪力钉抗剪性能的影响。空洞中心距剪力钉头外表面的距离用 *h* 表示,工况编号及空洞位置见表 8,试验结果见图 9。

由图 9 可知:沿剪力钉推出方向 4 cm 以内的空洞对剪力钉承载能力影响较大。并且沿剪力钉推出方向

表 8 沿剪力钉推出方向的空洞工况参数

工况	$h/\text{cm}$	工况	$h/\text{cm}$
1	0	4	2.4
2	0.4	5	3.4
3	1.4	6	4.4

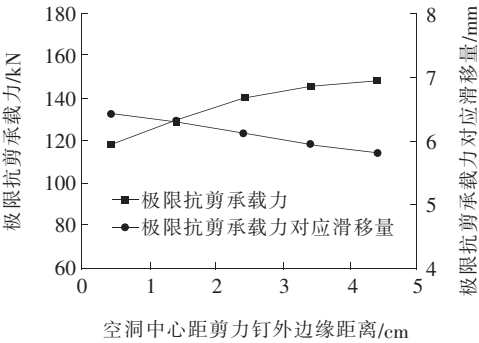


图 9 剪力钉极限抗剪承载力和对应滑移量折线图

由以上分析可知:在沿钉长方向 3 cm(占剪力钉长度 1/6),沿推出方向 4 cm(占剪力钉长度 1/5)范围内的 3 cm<sup>3</sup> 空洞,对剪力钉抗剪性能有一定影响。

4.2 空洞大小

通过上述空洞位置对剪力钉抗剪性能的影响研究发现,剪力钉头部混凝土的空洞对其影响最为显著,因此通过改变剪力钉头部混凝土的空洞体积大小,分析其对剪力钉抗剪性能的影响。工况编号及体积如表 9 所示,计算结果如图 10 所示。

表 9 不同体积大小的空洞工况

工况	空洞体积/cm <sup>3</sup>	工况	空洞体积/cm <sup>3</sup>
1	0	4	1.5
2	0.1	5	3.1
3	0.5	6	6.1

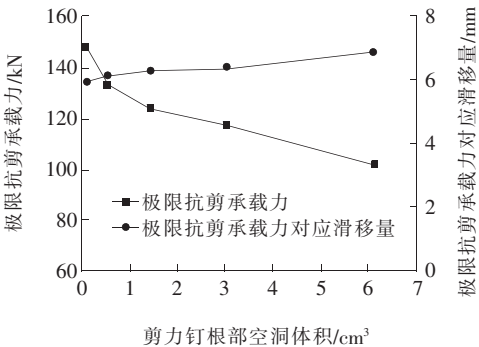


图 10 剪力钉极限抗剪承载力和对应滑移量折线图

由图 10 可知:剪力钉抗剪承载力对钉头空洞体积的变化较为敏感,空洞不仅会降低单钉使用阶段抗剪刚度,也会大幅度降低单钉抗剪承载力,增加界面滑移量。

5 结论

- (1) 由空洞对剪力钉抗拔性能的影响可知,随着空洞体积的增加,顶头周围的空洞,剪力钉极限抗拔承载力基本保持不变;钉头下方 1 cm 内,剪力钉极限抗拔承载力大幅度降低;当同一大小的空洞,其位置从钉头沿着钉长方向向下移动时,抗拔承载力均会减小。
- (2) 由空洞对剪力钉抗剪性能的影响可知,当同一大小的空洞,其位置从钉头沿着钉长方向移动时,剪力钉抗剪承载力先增大,后稳定不变,当同一大小的空洞,其位置从钉头沿着剪力钉推出方向移动时,剪力钉抗剪承载力减小;当空洞处于顶头周围时,随着空洞体积的增加,剪力钉极限抗剪承载力显著减小。
- (3) 由空洞对剪力钉抗拉和抗剪性能的影响可知,混凝土空洞对剪力钉力学性能影响不一,体积较小时,产生的影响也较大。因此对焊钉浇筑区域混凝土的浇筑工艺的质量检验标准应更加严格。

参考文献:

[1] LAM D, EL-LOBOY E. Behavior of Headed Stud Shear Connect-Ors in Composite Beam[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(1): 96—107.

[2] STEINBERG E P. Reliability of Tensile Loaded Cast-in-Place Headed-Stud Anchors for Concrete[J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(3): 430—436.

[3] PALLARES L, HAJJAR J F. Headed Steel Stud Anchors in Composite Structures, Part I: Shear[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 66(2): 198—212.

[4] ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318—08) and Commentary [S]. USA: American Concrete Institute, 2008.

[5] ACI Committee 349. Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures (ACI 349—90) and Commentary (349R—90)[S]. USA: American Concrete Institute, 1990.

[6] AISC. Specification for Structural Steel Buildings [S]. USA: American Institute of Steel Construction, 2005.

[7] FUCHSW W, ELIGEHAUSENR R, BREEN J E. Concrete Capacity Design(CCD) Approach for Fastening to Concrete[J]. ACI Structural Journal, 1995, 92(1): 73—94.