

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.0914

考虑厚跨比的基桩下伏溶洞顶板冲切特性试验研究

赵明华, 唐咸力, 肖 尧, 杨超炜

(湖南大学 岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082)

摘 要: 根据相似理论, 设计并完成了 4 组厚跨比条件下基桩下伏溶洞顶板冲切特性大比例室内模型试验, 得到了基桩和顶板的荷载-位移曲线、顶板底面的应变-位移曲线, 并分析了桩-溶洞体系冲切特性承载机制。结果表明, 基桩荷载-位移曲线在加载过程中出现了两个较为明显的弹性区; 顶板表面荷载-位移曲线中, 厚跨比 $\xi = 0.125$ 和 $\xi = 0.200$ 时的位移在加载过程中出现回弹。与此同时, 试验板底面应变变化与底面裂缝的发展趋势相吻合。试验板的冲切破坏是剪切效应和弯曲效应综合作用的结果, 随着厚跨比的增大, 桩-溶洞体系的极限承载力有所增大, 位移量有所减小, 剪切效应趋于明显, 弯曲效应逐渐消失。冲切锥台的形状随着厚跨比变化显著, 厚跨比 $\xi > 0.250$ 时, 冲切锥台较为厚实, 且沿边界破坏; 厚跨比 $\xi < 0.200$ 时, 冲切锥台则不受限制。最后, 通过分析 4 组厚跨比条件下试验板冲切锥台, 拟合了冲切锥台破坏母线与厚跨比 ξ 和基桩直径 d 的关系曲线, 为岩溶区基桩溶洞顶板的理论研究和工程实践提供了依据。

关 键 词: 岩溶区; 桩-溶洞体系; 室内试验; 冲切破坏

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)04-1159-09

Model tests on punching properties of karst cave roof under pile tip considering different thick-span ratios

ZHAO Ming-hua, TANG Xian-li, XIAO Yao, YANG Chao-wei

(Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: According to the similarity theory, punching properties of karst cave roof under pile tip were investigated through four series of large-scale laboratory model tests under different thick-span ratios. The load-displacement curves of pile foundation and roof and the strain displacement curves of roof bottom were obtained, and the bearing mechanism of punching feature in the pile-cave system was analysed. The experimental results show that there are two elastic-plastic zones in the pile curve during the loading process. According to the load-displacement curve of the roof, the displacement rebounds at thick-span ratios of 0.125 and 0.200 during the loading process. Meanwhile, the strain change is consistent with the development of cracks at the bottom surface. Punching failure of the test plate is the result of the combined action of the shear effect and bending effect. With the increase of thick-span ratio, the ultimate bearing capacity of the pile-cave system increases slightly, whereas the displacement distance decreases. Shear effect becomes more apparent, while bending effect gradually disappears. The shapes of the punching cones change significantly with varying the thick-span ratio. When the thick-span ratio is higher than 0.250, the punching cone is relatively thick and destruct along the boundary. While with the thick-span ratio less than 0.200, the punching cone is not restricted. Finally, the relationships among the punching cone generatrix, the thick-span ratio ξ and the pile diameter d are established through analysing the punching cones under four different thick-span ratios. Therefore, this study provides the basis for the theoretical research and engineering practices of karst caves under pile tip in the karst area.

Keywords: karst area; pile-cave system; model test; punching failure

1 引 言

我国西部地区岩溶地质条件极为复杂, 桩基础在岩溶区中应用广泛。由于基桩下伏溶洞的存在,

加大了基桩设计与施工难度, 容易造成工程质量及安全问题, 严重制约岩溶区基础设施建设。因此, 有必要开展岩溶区基桩-溶洞体系承载特性与破坏机制研究。

收稿日期: 2016-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51278187)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51278187).

第一作者简介: 赵明华, 男, 1956 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事桩基础及特殊土地基处理方面的教学与研究工作。

E-mail: mhzhao@21cn.com

当桩下存在溶洞时,基础常发生冲切破坏^[1-2]。国内外对冲切破坏和桩-溶洞体系承载机制有着较为深入的研究。Jiang 等^[3]基于塑性理论和 Mohr-Coulomb 抛物包络线研究混凝土圆板冲切破坏,得到了厚板冲切承载力解析解,并认为冲切破坏面是以指数曲线为母线形成的旋转体;Menetrey^[4]通过模型试验和数值模拟,重点讨论了冲切破坏时抗拉强度的影响,并得到了厚板冲切破坏的预测模型;赵明华等^[5]结合工程实践,提出了桩端持力岩层抗冲切计算模型,建立了较完善的溶洞顶板最小安全厚度和承载力计算方法;柏华军^[6]通过简化溶洞顶板持力层模型,提出了可以考虑有效宽度、自重等影响因素的单向板、双向板抗拉弯破坏溶洞顶板持力层厚度公式;曹文贵等^[7]通过数值流形方法,引入强度折减技术研究了路基下岩溶顶板的最小安全厚度;曹文贵等^[8]运用 Information-Gap 理论建立基桩下伏岩溶顶板稳定性的不确定性分析的可靠度分析模型,分析了溶洞顶板稳定性;蒋冲等^[9]引入突变理论和模糊理论,建立出符合其工程特点的岩溶区桩端溶洞顶板稳定性评判层次结构模型和突变评判新方法。

由于理论分析中各种假定条件的约束,其结论与实际情况存在不可避免的偏差。为取得更深一步进展,众多学者同时进行了一系列试验研究。早期钢筋混凝土板的冲切试验中,Richard^[10]通过钢筋混凝土柱基试验,认为柱下基础冲切破坏是由弯曲裂缝引起的,破坏锥与水平面的夹角为 45°;Moe^[11]通过块方板冲切试验,认为试件的破坏为剪压区的剪压破坏。为研究桩-溶洞体系破坏机制,国内学者基于混凝土试验开展了符合岩溶地区的模型试验。刘铁雄^[12]采用砂、水泥和石膏混合物模拟基岩,将溶洞顶板简化为矩形试验板,由此提出了顶板和桩的竖向荷载的半经验半理论公式和顶板安全厚度验算公式,然而其模型边界条件的设置与工程实际有所出入;张慧乐^[13]和张智浩^[14]等将溶洞假定成圆形,考虑了溶洞直径、赤道半径和极半径等因素的影响,完成了竖向平面溶洞顶板模型试验,并认为桩-溶洞体系主要有冲切破坏、冒落区塌落、扇形塑性区破坏和撕裂破坏 4 种破坏模式,但其结论只适用于二维模型。

鉴于此,本文基于相似理论^[15],在上述室内模型试验的基础上改进模型边界条件,拟通过建立一套更符合工程实践的室内模型试验方案,得到基桩和顶板的荷载-位移曲线、顶板底面的应变-位移曲线,对比分析不同厚跨比条件下的桩-溶洞体系冲切

特性承载机制。

2 试验设计与方法

2.1 模型试验概况

本试验基于赵明华等^[5]提出的抗冲切破坏计算模型,设计如图 1 所示的基桩下伏溶洞室内试验模型,模型支座由混凝土浇筑而成,通过预埋螺杆与预制试验板锚固。加载设备由加载反力架、液压千斤顶、传力杆等组成。

2.2 试验设计

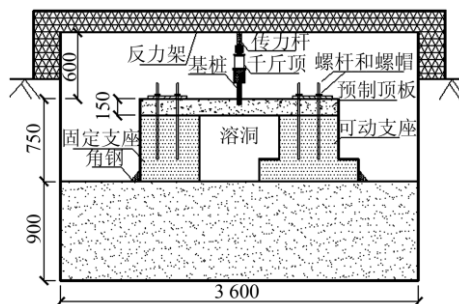
本次试验考虑岩溶顶板厚跨比 ξ 对桩-岩溶体系竖向承载力及破坏模式的影响,试验基桩几何尺寸取桩长 $l = 200 \text{ mm}$,其中嵌入板内 50 mm ,桩径 $d = 50 \text{ mm}$,顶板宽度取 600 mm ,模型试验设计如表 1 所示。

表 1 模型试验设计表
Table 1 Model test design

编号	顶板有效厚/mm	顶板跨度/mm	厚跨比 ξ
C1	100	800	0.125
C2	100	500	0.200
C4	100	400	0.250
C4	100	333	0.300



(a) 地槽



(b) 试验模型 (单位: mm)

图 1 地槽及试验模型

Fig.1 Laboratory and test model

2.2.1 试验材料

基桩采用刚性桩模拟,不考虑其变形。岩溶地基为白云质石灰岩,本文不考虑节理裂隙,由文献

[12]知,采用水泥、砂、石膏可以模拟岩溶区地质情况,取应力相似比 C_σ 为 1:26,重度相似比 C_γ 为 1:1.3,几何相似比 C_l 为 1:20,经测试取配合比为 1:5.6:0.5。原型和模型材料力学参数如表 2 所示。

表 2 原型和模型材料力学参数
Table 2 Mechanical parameters of prototype and model materials

材料参数	抗拉强度 /MPa	抗压强度 /MPa	抗弯强度 /MPa	弹性模量 /10 ⁴ MPa	泊松比 μ
白云质石灰岩	2.66~2.72	50~200	7.5~30.0	6.0~20.0	0.10~0.35
模型材料	0.20	5	0.9	0.6	0.22

2.2.2 边界条件

当基桩下伏溶洞时,桩-溶洞体系中顶板与周围材质相同并连接为整体,边界条件较为稳定。模型试验顶板简化为两边固支、两边简支板^[12]。实现方法如图 2 所示:两边简支用角钢模拟;固定支座内嵌四根直径 $\phi=16$ mm 的螺栓模拟固支。

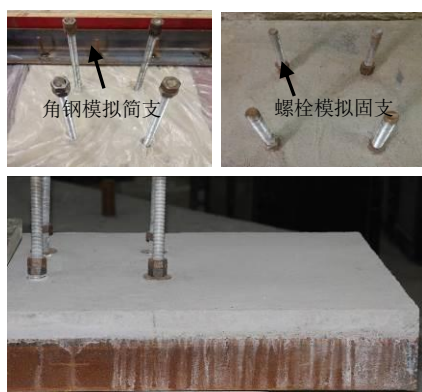


图 2 边界条件

Fig.2 The boundary conditions

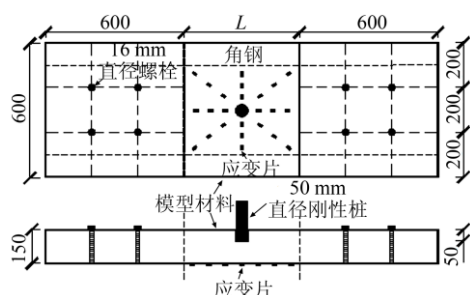


图 3 模型试验板及应变片布置 (单位: mm)

Fig.3 Details of model test plate and strain gauges (unit: mm)

3 试验过程

本试验采用慢速维持荷载法,竖向分级加载开展破坏性试验。每级加载不超过 5 kN,百分表每 5 min 读一次,当每级荷载下桩顶位移变化小于

0.01 mm/5 min 或者累计不超过 0.1 mm/h 方可进行下一级加载,直至破坏。4 组试验中,不同厚跨比试验板在加载时的破坏过程各不相同。

厚跨比 $\xi=0.125$ 时,冲切锥台及破坏后顶板如图 4 所示。加载至破坏前一级荷载时,仅 D 处发现轻微裂缝,继续加载时冲切锥台瞬间形成,造成的巨大声响并快速冲出,俯视形状类似直角梯形,锥台底面跨中处并未出现弯曲裂缝。由破坏后顶板仰视图可以看出,冲切锥台沿跨度方向未到达支座边界。

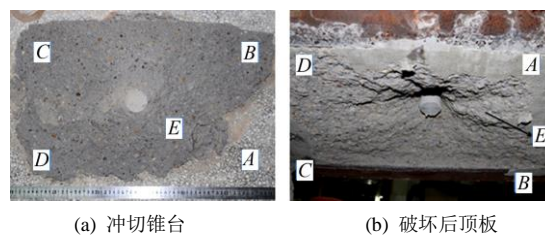


图 4 厚跨比 $\xi=0.125$ 时冲切锥台及破坏后顶板
Fig.4 Punching cone and the destroyed roof($\xi=0.125$)

厚跨比 $\xi=0.200$ 时,试验板在加载过程中发出轻微的声响后,CD 处最先出现裂缝,并向 DA 和 CE 方向发展,最后瞬间冲出,在 BE 和 BF 处,分别出现两条断痕并剥落,此处应变片也在破坏时出现溢出。冲切锥台影响区域囊括整个溶洞但未受到支座约束,锥台底面完好未见明显裂缝,俯视形状大致为圆形。

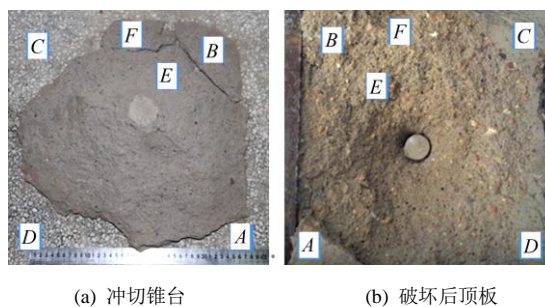
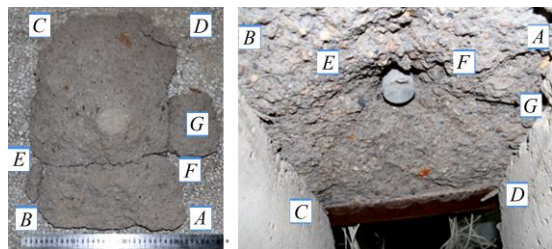


图 5 厚跨比 $\xi=0.200$ 时冲切锥台及破坏后顶板
Fig.5 Punching cone and the destroyed roof($\xi=0.200$)

厚跨比 $\xi=0.250$ 时,加载过程中在距桩中心约 1.5 倍桩径处,首先产生裂缝并沿 EF 连线贯通,使顶板材料受力分散,裂缝贯通处个别应变片出现溢出,随着荷载持续增加,冲切锥台 DGF 处出现断痕,模型材料呈碎石状剥落,未能与锥台拼接成完整体,最后由于支座的约束冲出矩形台,如图 6 所示。

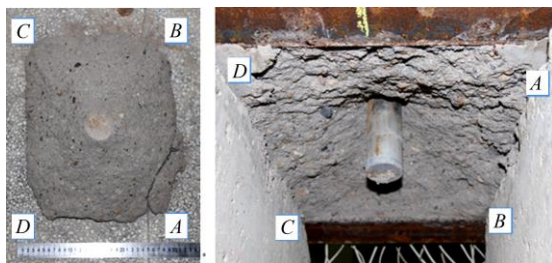
厚跨比 $\xi=0.300$ 时,在加载至破坏过程中,底面未出现明显裂缝,冲切锥台形成后在支座摩擦力

的作用下沿 $ABCD$ 连线整体脱出并缓慢滑落, 冲切锥台受限于边界条件, 形状为矩形台, 如图 7 所示。顶板底面 $ABCD$ 延边界附近的应变值变化也最为显著, 周边点有应变有溢出。



(a) 冲切锥台

(b) 破坏后顶板

图 6 厚跨比 $\xi = 0.250$ 时冲切锥台及破坏后顶板Fig.6 Punching cone and the destroyed roof($\xi = 0.250$)

(a) 冲切锥台

(b) 破坏后顶板

图 7 厚跨比 $\xi = 0.300$ 时冲切锥台及破坏后顶板Fig.7 Punching cone and the destroyed roof($\xi = 0.300$)

4 组试验中, 试验板冲切锥台侧面如图 8 所示, 试验板在基桩荷载作用下, 沿不同冲切角度, 被冲陷一定深度, 试验板与冲切台出现上下错动, 并在冲切锥台边缘出现掉块现象。破坏后, 由于侧摩阻力的作用, 基桩仍停留在试验板中, 桩侧接近桩端处黏结有 5~10 mm 的碎屑, 冲切锥台形成后, 碎屑与锥台一并冲出。随着厚跨比的增大, 冲切锥台母线变陡, 冲切角度增大, 影响范围减小。

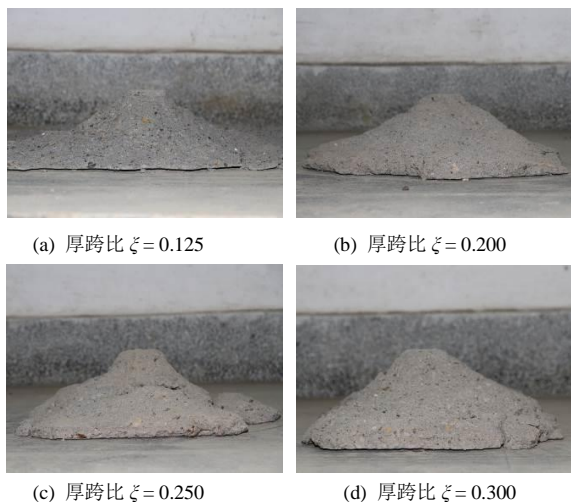
(a) 厚跨比 $\xi = 0.125$ (b) 厚跨比 $\xi = 0.200$ (c) 厚跨比 $\xi = 0.250$ (d) 厚跨比 $\xi = 0.300$

图 8 冲切锥台侧面图

Fig.8 Side view of the punching cones

4 试验结果

4.1 荷载-位移曲线

图 9 为试验顶板底面的荷载-位移曲线。荷载维持较小时, 试验板处于弹性工作阶段。随着竖向荷载持续增加, 试验板变形开始加大, 达到极限荷载的 80% 左右时, 曲线斜率陡增; 继续加载至破坏阶段, 冲切锥台形成, 试验板的承载力几乎消失; 冲切锥台迅速发展, 直至冲出。

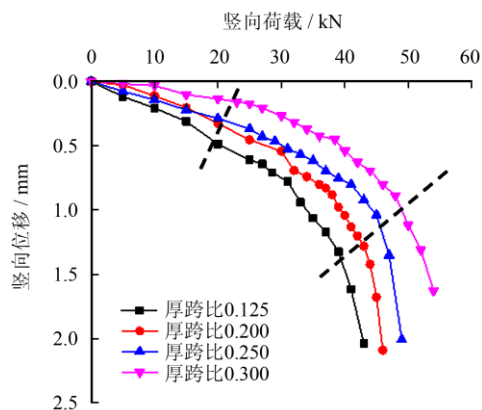


图 9 试验顶板底面荷载-位移曲线

Fig.9 Load-displacement curves of the roof underside

基桩荷载-位移曲线中, 有 3 个试验板均出现了一个较为明显的台阶, 如图 10 所示。即随着荷载增大, 基桩荷载-位移曲线在顶板出现斜裂缝后, 由于错动裂缝再次压密, 基桩与顶板重新咬合。

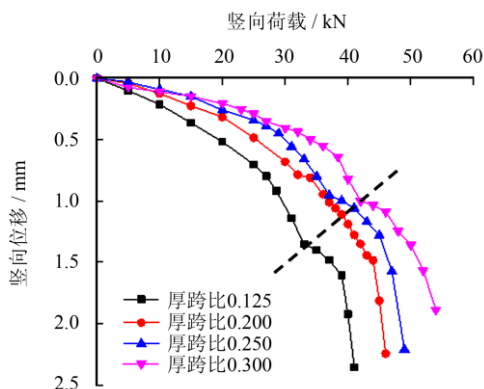


图 10 基桩荷载-位移曲线

Fig.10 Load-displacement curves of the pile

由图 11 所示, 试验顶板表面荷载位移-曲线随着厚跨比的增加变化明显。厚跨比 $\xi = 0.125$ 和 $\xi = 0.200$ 时, 试验板跨中由于弯曲效应产生的挠度较大, 位移随荷载的增大而增加; 当厚跨比 $\xi = 0.250$ 和 $\xi = 0.300$ 时, 顶面位移在首条裂缝出现前, 随着荷载增加而缓慢增加, 顶板裂缝发育贯穿时, 位移先保持不变后出现回弹, 并且有残余变形。

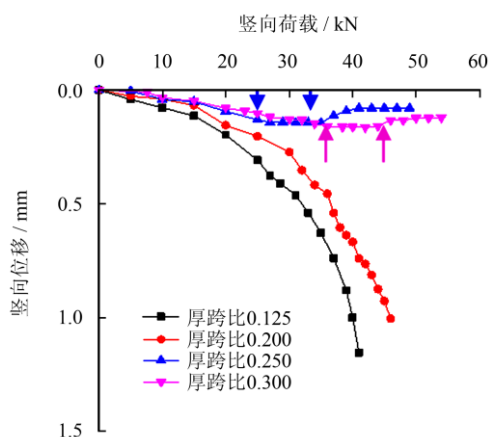


图 11 试验顶板表面荷载-位移曲线

Fig.11 Load-displacement curves of the roof surface

4.2 试验破坏小结

通过 4 组厚跨比试验板的加载，试验冲切破坏可大致归纳为以下 3 个阶段：

第 1 阶段为压密和弹性工作阶段，荷载-位移曲线大致呈线性分布。首条裂缝出现时，其竖向荷载为极限承载力的 43%~51%。

第 2 阶段为裂缝发展阶段，随着荷载增大，内部裂缝不断发育，竖向位移较第 1 阶段有明显增大，少量在裂缝上的应变片出现溢出。

第 3 阶段为破坏阶段，当荷载达到极限荷载的 81%~100%时，破坏阶段的形式根据厚跨比的不同而有所差异，厚跨比为 0.123 和 0.200 时，裂缝迅速贯穿并带有短暂爆裂声，基桩及其以下模型材料共同形成一个冲切锥台，竖向位移陡增，试验板失去承载力突然下陷甚至冲出；厚跨比为 0.250 和 0.300 时，裂缝贯穿较慢，没有发出爆裂声，且冲切锥台在边界的约束下缓慢冲出。

由表 3 可知，4 组厚跨比试验极限荷载分别为 41、46、49、54 kN，表明随着厚跨比的增大，试验板的受冲切承载力相应提高。相对于厚跨比 $\xi = 0.125$ 时，增大幅度分别为 12.2%、19.5%、31.7%。裂缝出现时，所占极限荷载百分比分别为 48.8%、43.5%、51.0%和 46.3%。曲线曲率最大时，试验板进入塑性，其占极限荷载的百分比为 95.1%、93.5%、91.8%和 92.6%。

表 3 试验板冲切荷载

Table 3 Punching failure load in the tests

厚跨比 ξ	极限荷载 /kN	初裂荷载 /kN	初裂百分比 %	塑性荷载 /kN	塑性百分比 %
0.125	41	20	48.8	39	95.1
0.200	46	20	43.5	43	93.5
0.250	49	25	51.0	45	91.8
0.300	54	25	46.3	50	92.6

进一步分析可知，试验板在加载过程中，出现裂缝时，所占极限荷载百分比为 43.5%~51.0%；进入塑性破坏时，所占荷载百分比为 91.8%~95.1%。相比于钢筋混凝土板，本试验板脆性较大，裂缝较少，破坏时的极限荷载也较小，总位移较小，初裂荷载和进入塑性时荷载百分比均较大，但由于本试验荷载采用分级加载法，因此，初裂荷载和塑性荷载未必是准确的试验板开裂时的荷载和进入塑性区的荷载。

由表 4 可知，4 组试验中总位移均较小，厚跨比增大，基桩和试验板的位移减小，破坏时未见明显变形，体现出一定的脆性。最后一级荷载中，桩体位移为 2.357~1.888 mm，试验板底面位移为 2.041~1.629 mm，错动范围为 0.155~0.316 mm；说明顶板内部有裂缝或空隙，加载后被压密。厚跨比 $\xi = 0.125$ 和 $\xi = 0.200$ 时，试验板顶面位移随荷载增加而增加，加载至最后一级时，位移分别为 1.151 mm 和 1.002 mm；在 $\xi = 0.250$ 和 $\xi = 0.300$ 时，位移在裂缝发育后出现回弹，最终稳定在 0.079 mm 和 0.120 mm。

表 4 试验板冲切位移

Table 4 Punching failure displacement in the tests

厚跨比 ξ	桩体位移 /mm	底面位移 /mm	错动位移 /mm	顶面位移 /mm
0.125	2.357	2.041	0.316	1.151
0.200	2.245	2.090	0.155	1.002
0.250	2.213	2.007	0.206	0.079
0.300	1.888	1.629	0.259	0.120

5 试验结果分析

5.1 应变数据分析

图 12 为试验板底面各点荷载-应变曲线及相对应的应变片布置图，通过分析应变数据可知，在试验板加载过程中，4 组试验板底面呈大范围拉应变，只有少量压应变。应变变化可分为 4 类：第 1 类应变值随荷载增大而增大，此类应变片多数集中在冲切锥台影响范围内，弹性阶段应变值随荷载增加较为平缓，达到塑性荷载时，曲线斜率开始陡增，在试验板发生破坏时达到最大值，所占比重为 60%~80%；第 2 类应变值先增加后减小，出现在冲切锥台底面轮廓附近，应变变化表现为随着荷载增加先增大再减小，约占总应变数量的 5%；第 3 类应变值先增大之后突然拉裂出现溢出，此类应变片恰好出现在底面裂缝处，约占 3%；第 4 类应变值始终变化较小，且少量因受压出现了负值，多数分布在

试验板边界和支座附近, 约占 10%~20%。

在同一级荷载下, 试验板底面在板中处受拉, 在靠近支座附近处受压。以冲切锥台的轮廓为界限, 应变在冲切锥台影响范围内数值均较大, 在基桩荷载附近所受拉应力最大; 在冲切锥台范围外, 随远

离基桩而逐渐减小, 应变与基桩距离成反比, 在靠近支座处由于薄膜效应产生的压应力, 少量应变值为负, 越接近支座越明显。结合试验板底面裂缝情况可知, 试验板底面应变分布与底面裂缝的发展趋势相吻合。

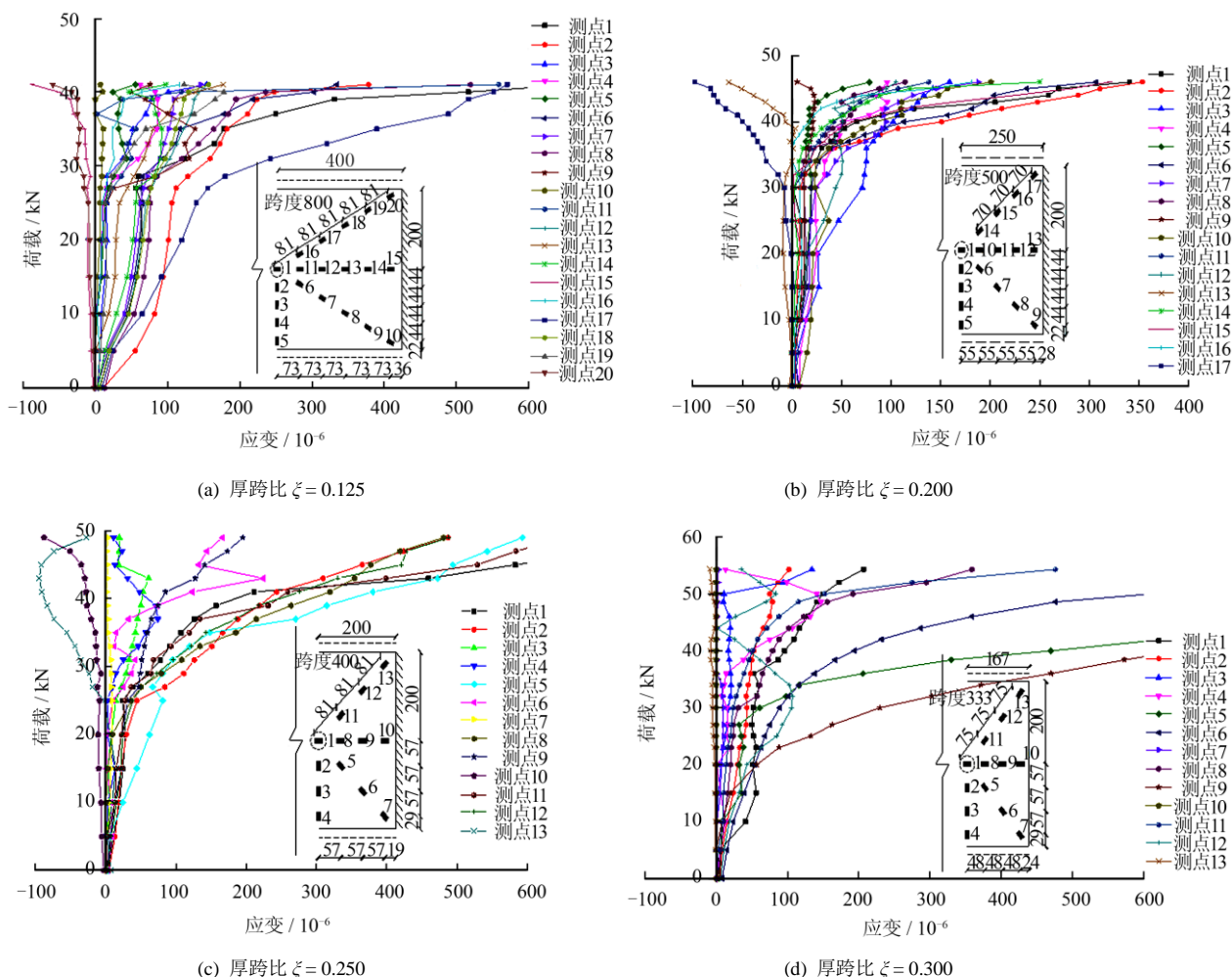


图 12 试验板底面荷载-应变曲线
Fig.12 Load-strain curves of the roof underside

5.2 冲切破坏机制分析

试验过程中, 试验板在丧失承载能力的瞬间, 板内形成破坏锥台连同基桩从试验板中冲出。4 组试验板破坏均呈脆性, 并伴随不同程度的爆裂声。

通过进一步分析, 试验板在竖向集中荷载作用下的冲切破坏是剪切效应和弯曲效应共同作用下的结果。由于剪切效应的作用, 试验板在加载过程中, 以中性面为界限, 上部为剪压区域, 下部为剪拉区域。如图 13(a)所示, 随着荷载的增加, 斜裂缝在中性面附近出现后逐渐向上下发展; 在荷载加载到一定程度时, 板中性面下方的剪拉区由于拉应力作用首先达到极限拉应变而产生斜裂缝; 并开始向剪拉

区扩散, 由此剪拉区受力面积减小, 锥台截面上的剪应力大部分转为由中性面以上的剪压区承担, 随着荷载持续增加, 剪压区应力达到极限抗剪强度而产生滑移, 裂缝向上下发展, 贯通基桩和试验板底面, 最后发生冲切破坏。厚跨比越大剪切效应越明显, 锥台母线斜率变化越小。

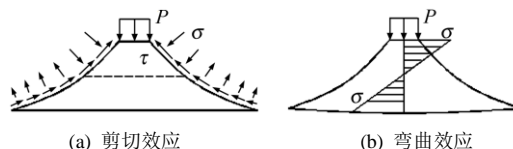


图 13 冲切锥台剪切效应和弯曲效应分析
Fig.13 Analysis of shear effect and bending effect

与此同时,如图13(b)所示,试验板在基桩荷载作用下产生弯曲应力,由于弯曲效应的作用,试验过程中,厚跨比 $\xi = 0.125$ 和 $\xi = 0.200$ 时顶面位移随荷载持续增加,弯曲能不断积累,中心挠度较大,但由于试验板为明显脆性破坏,限制了弯曲效应的发挥,在跨中底面处尚未出现弯曲裂缝时,试验板即瞬间发生破坏,并发出较大的爆裂声。厚跨比越小,跨度越大时,试验板挠度越大,弯曲效应越明显。厚跨比 $\xi = 0.250$ 和 $\xi = 0.300$ 时,由试验板顶面荷载-位移曲线出现回弹可知,弯曲效应在裂缝出现时开始消散,弯曲能已经提前释放,剪切效应较为明显。

综上所述,4组试验板在剪切效应和弯曲效应的综合影响下,随着荷载的增加,首先在基桩荷载附近某些点出现较大弯曲应力,而后在板中部的某些点由于拉应力超过抗拉强度而产生了斜裂缝,继续施加荷载试验板裂缝不断扩展。板内斜裂缝的发展和试验板弯曲变形相互影响,板内斜裂缝的出现和发育减小了试验板的刚度,试验板的弯曲变形又促进了斜裂缝发展,最终形成的如图8所示的冲切锥台。

5.3 冲切锥台分析

本试验中,厚跨比是唯一考虑的主要影响因素,在一定程度上反映了试验板冲切锥台的破坏形式。由于试验板的厚度不变,所以厚跨比越小则跨度越大。在4组不同厚跨比试验中,厚跨比小时不

受边界约束,厚跨比大则受支座限制,冲切破坏后的锥台形状各不相同。

如表5所示,冲切锥台的影响范围为 $R = (1.4 \sim 3.8)h$,最小冲切角度的变化范围为 $14.7^\circ \sim 26.6^\circ$,最大冲切角变化范围为 $24.4^\circ \sim 35.6^\circ$,厚跨比越大,最大冲切台影响范围越小,最大冲切角越大。厚跨比 $\xi = 0.125$ 时,冲切锥台从俯视角度观察为直角梯形,沿跨度方向充分延展,但由于黏结力的差异和加载时不可避免的偏心,出现了不对称现象,使得冲切锥台一角范围偏小;厚跨比 $\xi = 0.200$ 时,冲切锥台则类似圆形,冲切范围相差不大;厚跨比 $\xi = 0.250$ 和 $\xi = 0.300$ 时,底面形状与溶洞相同,俯视类似长方形。

表5 冲切破坏后锥台参数

Table 5 The parameters of cone after punching failure

厚跨比 ξ	俯视形状	冲切范围 /cm	冲切角度范围 /($^\circ$)
0.125	直角梯形	17~38	14.74~30.47
0.200	圆形	22~24	22.62~24.44
0.250	长方形	20~22	24.44~26.57
0.300	长方形	14~20	26.57~35.54

从冲切锥台侧面观察,4组试验中,当厚跨比较小时,冲切锥台不受约束充分沿跨度方向发展,破坏母线较为平缓;厚跨比达到临界值时,冲切锥台正好沿边界破坏;厚跨比较大时,锥台受到边界约束,其破坏母线较陡,破坏示意图如图14所示。

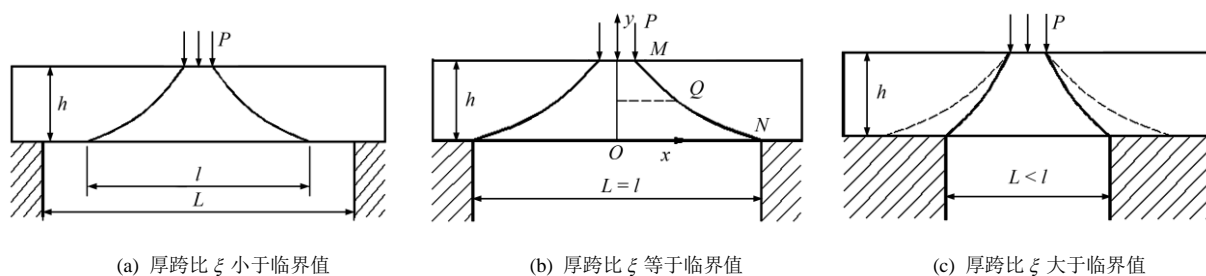


图14 不同厚跨比条件试验板破坏母线

Fig.14 Generatrix of roof failure at difference thick-span ratio

试验板冲切锥台母线均凹向板的受拉面,可知冲切锥台的破坏母线并非沿着某一角度线性破坏,而是其母线与竖直方向的夹角随顶板高度变化而变化,沿高度方向至上而下先陡后缓。母线斜率在厚跨比较小时,随高度变化较大,在接近试验板底面处斜率接近为0;在厚跨比较大时,由于受到支座边界的约束,破坏母线斜率较大,但是随高度变化较小。

5.4 冲切锥台破坏母线拟合

由上述分析可知,不同厚跨比试验板锥台破坏母线并非直线。为得到冲切锥台破坏母线与基桩直径 d 、试验板厚度 h 以及试验板跨度 L 或锥台影响范围 l 之间的确切关系式,对实测的冲切锥台数据进行回归分析。以冲切锥台底部中心为原点,建立直角坐标系如图14(b)所示,为了适用工程实践,将锥台母线方程拟合为二次多项式,设方程形式为

$$y = Ax^2 + Bx + C \quad (1)$$

式中: A 、 B 、 C 为待定系数; x 的取值范围为 $x \in [d/2, L/2]$, 为将锥台母线拟合统一形式, 锥台曲线左右两侧横坐标相反。

由边界条件可知, 当试验板跨度 $L \leq l$ 时, 母线方程过两个定点 $M(d/2, h)$ 和 $N(l/2, 0)$; 取锥台中性面上一点 Q , 根据各组试验实测数据, 并采用线性差值法取 $y_Q = h/2$ 处平均值可得, $x_Q = 0.235h + 0.419L$, 将 M 、 N 、 Q 三点代入式 (1) 得

$$\left. \begin{aligned} h &= A \frac{d^2}{4} + B \frac{d}{2} + C \\ 0 &= A \frac{L^2}{4} + B \frac{L}{2} + C \\ \frac{h}{2} &= A(0.235h + 0.419L)^2 + B(0.235h + 0.419L) + C \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由式 (2) 解得

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{4(81Lh + 500dh - 235h^2)}{(L-d)(243.439L^2 - 581Ld + 380.7Lh + 235dh - 552.25h^2)} \\ B &= \frac{2(-324.439L^2 + 196.93Lh - 500d^2 + 552.25h^2)h}{(L-d)(243.439L^2 - 581Ld + 380.7Lh + 235dh - 552.25h^2)} \\ C &= \frac{(243.439L^2 - 500Ld + 380.7Lh + 500d^2 - 552.25h^2)Lh}{(L-d)(243.439L^2 - 581Ld + 380.7Lh + 235dh - 552.25h^2)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

把厚跨比 $\xi = h/L$ 代入式 (1) 和式 (3) 可以得到冲切锥台母线与厚跨比 ξ 和基桩直径 d 的关系式, 但上述关系式只适合 $L \leq l$ 的情况。当 $L > l$ 时, 冲切锥台不受跨度的影响, 其破坏母线方程固定, 可取 $L=l$ 即可得出厚跨比较小时的锥台母线方程。

应用 MATLAB 软件对图 8 锥台侧面照片进行二值化处理, 读取锥台跨度方向上母线点的坐标并拟合, 得到母线拟合曲线及其示意图如表 6 和图 15 所示。最后通过实测数据与拟合的母线公式对比可知, 二者吻合较好。

表 6 冲切锥台破坏母线拟合

Table 6 Generatrix fitting of punching failure cone

厚跨比	母线拟合曲线
$\xi = 0.125$	左侧 $y = 0.000\,478x^2 - 0.470\,085x + 112.060\,308$
	右侧 $y = 0.000\,402x^2 - 0.430\,326x + 106.466\,331$
$\xi = 0.200$	左侧 $y = 0.000\,764x^2 - 0.653\,232x + 115.580\,230$
	右侧 $y = 0.001\,018x^2 - 0.752\,472x + 117.688\,072$
$\xi = 0.250$	左侧 $y = 0.000\,177x^2 - 0.586\,665x + 106.310\,990$
	右侧 $y = 0.001\,708x^2 - 0.894\,898x + 116.455\,589$
$\xi = 0.300$	左侧 $y = 0.002\,449x^2 - 1.237\,851x + 126.941\,965$
	右侧 $y = 0.000\,835x^2 - 0.469\,831x + 108.427\,095$

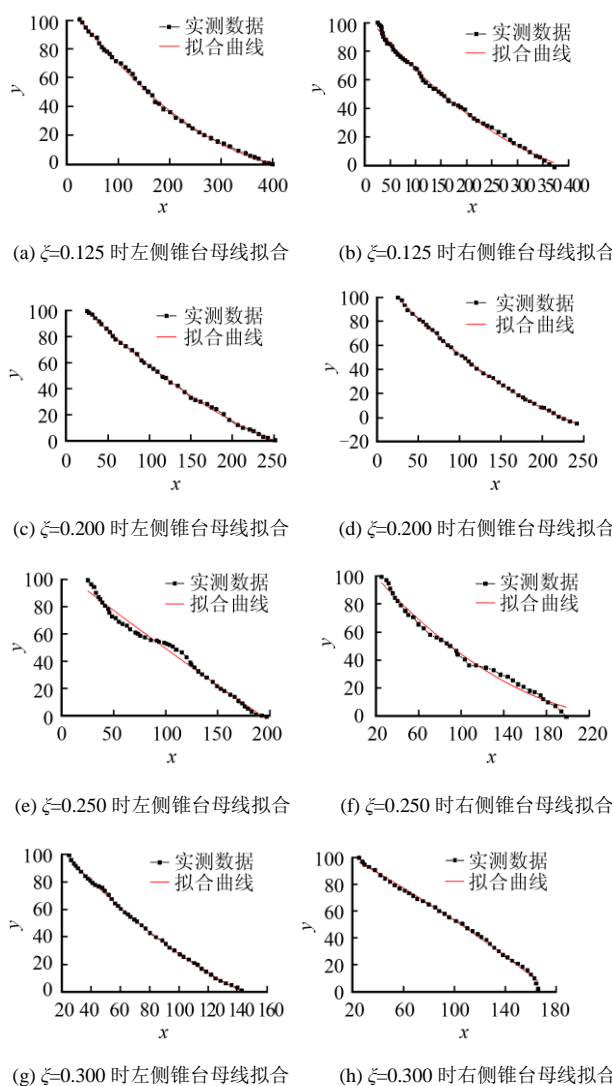


图 15 拟合曲线与实测对比

Fig.15 Comparison of fitting and monitoring curves

6 结 论

本文基于相似理论, 设计并开展了 4 组不同厚跨比条件下, 岩溶区基桩下伏溶洞顶板冲切特性室内模型试验, 通过对试验荷载-位移曲线、荷载-应变曲线和破坏后冲切锥台的分析, 得到初步结论如下:

(1) 随着厚跨比的增大, 桩-溶洞体系极限承载力增大, 基桩和顶板底面的总位移量减小; 基桩荷载-位移曲线出现两个弹塑性阶段; 顶板荷载-位移曲线在 $\xi = 0.125$ 和 $\xi = 0.200$ 时, 位移随荷载增大而增大, 在 $\xi = 0.250$ 和 $\xi = 0.300$ 时, 位移先增大后稳定再回弹。

(2) 试验板的破坏是剪切效应和弯曲效应共同作用的结果, 在 $\xi = 0.125$ 和 $\xi = 0.200$ 时, 弯曲效应较为明显; 在 $\xi = 0.250$ 和 $\xi = 0.300$ 时, 剪切效应较

为明显。

(3) 4 组试验板冲切破坏后锥台形状各异, 厚跨比较小时, 冲切锥台充分扩张; 厚跨比较大时, 冲切锥台形状与溶洞相同; 通过实测数据拟合了锥台破坏母线, 并将试验板厚跨比 $\xi=h/L$ 和基桩直径 d 与母线整合, 得到了冲切锥台破坏母线的拟合关系曲线, 为工程实践提供了一定的理论依据。

参考文献

- [1] JAEGER J C, COOK N G W. Fundamentals of rock mechanics (Third edition) [M]. London: Chapman and Hall, 1979.
- [2] WYLLIE D C. Foundations on rock[M]. London: Chapman and Hall, 1992.
- [3] JIANG D H, SHEN J H. Strength of concrete slabs in punching shear[J]. **Journal of Structural Engineering**, 1986, 112(12): 2578—2591.
- [4] MENETREY P. Synthesis of punching failure in reinforced concrete[J]. **Cement & Concrete Composites**, 2002, (24): 497—507.
- [5] 赵明华, 雷勇, 张锐. 岩溶区桩基冲切破坏模式及安全厚度研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 524—530.
ZHAO Ming-hua, LEI Yong, ZHANG Rui. Study of punching failure mode and safe thickness of pile foundation in karst region[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(2): 524—530.
- [6] 柏华军. 考虑溶洞顶板自重时桩端持力岩层安全厚度计算方法[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2945—2952.
BAI Hua-jun. A method for calculating the safety rock thickness of pile bearing strata with considering deadweight of karst cave roof [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(10): 2945—2952.
- [7] 曹文贵, 程晔, 赵明华. 公路路基岩溶顶板安全厚度确定的数值流形方法研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 621—625.
CAO Wen-gui, CHENG Ye, ZHAO Ming-hua. Studies on numerical manifold method for determination of safe thickness of karst roof in roadbed[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(6): 621—625.
- [8] 曹文贵, 李媛, 翟友成. 基于 Info-Gap 理论的基桩下伏岩溶顶板稳定性的主动分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 393—400.
CAO Wen-gui, LI Yuan, ZHAI You-cheng. Active analysis method for stability of karst roof under foundation pile based on info-gap theory[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(2): 393—400.
- [9] 蒋冲, 赵明华, 曹文贵, 等. 基于模糊和突变理论的岩溶区桩端溶洞顶板稳定性分析方法研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(12): 49—53.
JIANG Chong, ZHAO Ming-hua, CAO Wen-gui, et al. Research on stability evaluation method for cave roof under pile tip in karst region based on fuzzy theory and catastrophe theory[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2008, 25(12): 49—53.
- [10] RICHARD F E. Reinforced concrete wall and column footings[J]. **ACI Journal**, 1948, (45): 211—219.
- [11] MOE J. Shearing strength of reinforced concrete slabs and footings under concentrated loads[M]. Skokie: Portland Cement Association, Research and Development Laboratories, 1961: 166—179.
- [12] 刘铁雄. 岩溶顶板与桩基作用机理分析与模拟试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2003.
LIU Tie-xiong. Study on the mechanism analysis and simulation test of karst roof and pile foundation[D]. Changsha: Central South University, 2003.
- [13] 张慧乐, 马凛, 张智浩, 等. 岩溶区嵌岩桩承载特性影响因素试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 92—100.
ZHANG Hui-le, MA Lin, ZHANG Zhi-hao, et al. Test research on factors influencing bearing capacity of rock-socketed piles in karst area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(1): 92—100.
- [14] 张智浩, 张慧乐, 马凛, 等. 岩溶区嵌岩桩的破坏模式与工程设计探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 2): 4130—4138.
ZHANG Zhi-hao, ZHANG Hui-le, MA Lin, et al. Discussion on Failure mode and engineering design of rock-socketed pile in karst area[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(Supp.2): 4130—4138.
- [15] 徐挺. 相似理论与模型试验[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1982.
XU Ting. Similarity theory and model test[M]. Beijing: Chinese Agricultural Machine Press, 1982.