

柱下筏板基础冲切承载力的试验研究

石金龙, 滕延京

(中国建筑科学研究院地基基础研究所, 北京 100013)

摘要: 通过大比例室内模型试验, 对天然地基土上两块完全相同的筏板分别进行了单独加荷和同步加荷破坏试验, 对表现出来的冲切性状进行了研究, 得出了集中柱荷载作用下角柱、边柱下筏板冲切破坏实测承载力值, 并与规范计算值做了对比。试验表明, 类似试验条件下的筏板破坏, 验算时的控制截面是冲切破坏截面。增加上部结构刚度和基础刚度及减少筏板差异沉降可使筏板冲切破坏荷载大大提高, 从而提高筏板冲切设计安全度。

关键词: 筏板基础; 集中柱荷载; 冲切破坏; 差异沉降

中图分类号: TU471

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)05-0743-07

作者简介: 石金龙(1976-), 男, 河北衡水人, 博士研究生, 从事地基-基础-上部结构共同作用研究。E-mail: shijinlong207@163.com。

Punching failure test study on raft foundation under column load

SHI Jin-long, TENG Yan-jing

(Institute of Foundation Engineering, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: The punching failure of corner columns and border columns under vertical concentrated columns load is studied through large-scale model tests in the laboratory. On the basis of crude soil, two identical raft foundations are tested under different loads. Different punching failure values of the corner columns, border columns are obtained under the vertical concentrated column load, and these values are compared with the code's values. The study shows the control failure section of the raft foundation is the punching failure section, and that the increase of the rigidity of foundation and upper structure and the reduction of the differential settlement of the raft foundation can greatly improve its carrying capacity and enhance the degree of safety in designing raft foundation.

Key words: raft foundation; concentrated column load; punching failure; differential settlement

0 引言

筏板冲切问题是相当复杂的, 在目前条件下尚不能给出精确解析解, 一般以经验公式或半经验半理论方法导出计算公式。国内外的文献中关于筏板基础或其它连续板式基础的冲切试验数据很少, 还不足以用来进行统计分析。因此, 在目前筏基应用日益广泛的情况下, 开展对筏基冲切有关课题的研究很有必要。

本文通过大比例模型试验, 对柱下筏板基础角柱、边柱和中柱冲切性状进行了研究, 得到有一定应用价值的试验结果。

1 试验模型和冲切破坏锥体

1.1 试验模型

模型试验是在中国建筑科学研究院地基所试验室的大型试验基坑内进行的, 坑内为人工换填的均匀粉土, 深 2.5 m, 其下为天然地基老土层。筛土过程中

喷水加湿至最优含水率(手握成团, 自由落地后散开), 同时保证回填土含水率均匀。

地基土回填时每层虚铺厚度为 300 mm, 用蛙式夯机夯 2 遍, 夯至 200 mm。根据土工试验测试结果做相应调整, 达到试验要求后再铺下一层土, 直至预定标高。由载荷板试验 $p-s$ 曲线得到地基土的承载力特征值为 120 kN, 极限承载力为 280 kN。

按实际结构尺寸进行模型设计^[1], 采用相似理论, 用量纲分析法推导出相似准数。取模型比 $i=20/3$, 模型 1 和模型 2 完全一致, 模型具体尺寸见图 1。筏板混凝土等级为 C25, 柱子混凝土等级为 C30。模型配筋见图 2。

1.2 模型试验加载

模型 1 采用角柱、边柱和中柱先后独立加荷的方

基金项目: 科技部科研院所专项课题基金项目(2003EG231017)

收稿日期: 2007-12-03

式。模型 2 采用角柱、边柱和中柱 3 套独立加载系统，综合比较各种共同作用计算程序分析结果，最终采用中柱：边柱：角柱=1：0.8：0.6 的加荷比例同步加荷。试验采用分级加载的方法，模拟逐层增加的荷载。

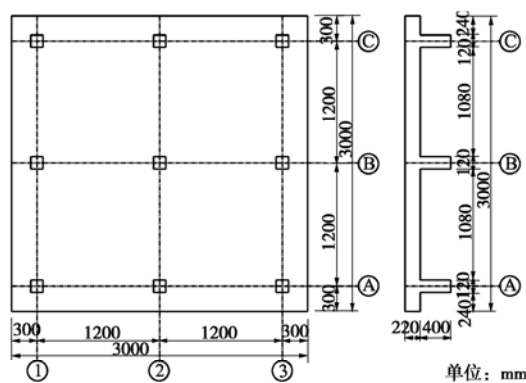


图 1 模型尺寸示意图

Fig. 1 The sketch of model dimension

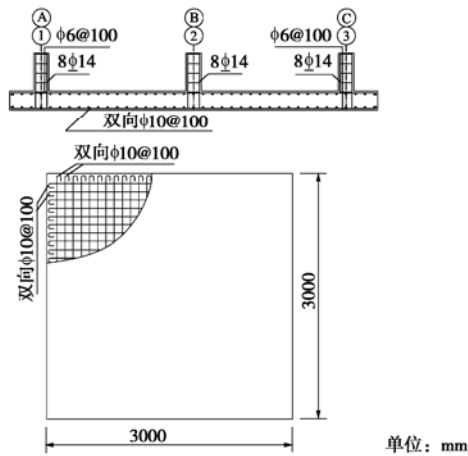


图 2 模型柱、筏板配筋图

Fig. 2 The rebars in columns and raft foundation

1.3 测试内容与测试方法

为了能够比较方便且准确地测量模型筏板混凝土底面冲切裂缝的位置，制作模型时在柱下筏板可能冲切破坏区域内上下两层钢筋表面粘贴钢筋应变片，如图 3 所示。根据应变片数值的突变可以确定筏板底部冲切裂缝的出现位置，模型应变片的具体粘贴位置如图 4 所示。

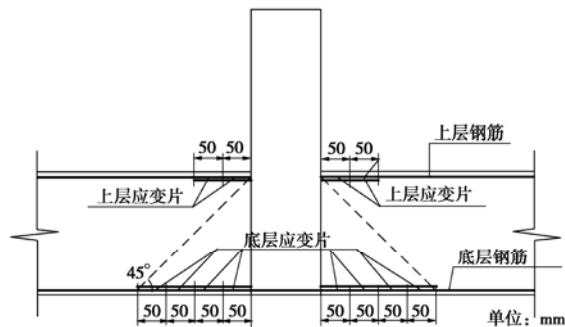


图 3 应变片布置图

Fig. 3 The sketch of strain gauges position

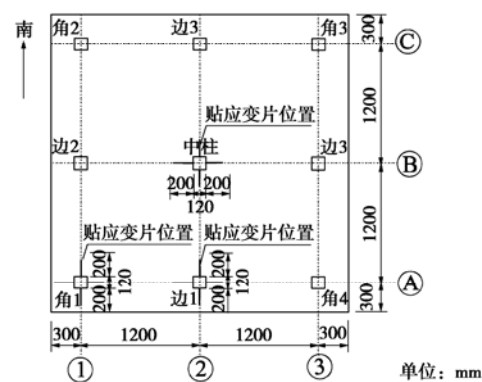


图 4 模型应变片粘贴位置图

Fig. 4 The position sketch of strain gauges in the model

1.4 冲切破坏锥体

试验结束后观察各角柱、边柱下筏板侧面冲切裂缝，实测得出模型角柱处筏板侧面 2 条冲切裂缝与水平面的夹角以及对角线方向底面冲切裂缝夹角，如表 1~4 所示。由于模型 1 角柱 4、模型 2 边柱 2 荷载偏心导致柱体破坏严重，两柱下筏板未能冲切破坏，故不考虑其冲切破坏角。

表 1 模型 1 角柱实测冲切角

Table 1 The punching angles of corner columns in Model 1			
角柱号	筏板侧面冲切角 1/(°)	筏板侧面冲切角 2/(°)	筏板底面对角线方向冲切角/(°)
角柱 1	32.0	39.8	54
角柱 2	39.8	39.8	55
角柱 3	26.6	32.8	58
角柱 4	—	—	—

表 2 模型 1 边柱实测冲切角

Table 2 The punching angles of border columns in Model 1		
边柱号	筏板侧面冲切角/(°)	筏板底面中线方向冲切角/(°)
边柱 1	32.8	53
边柱 2	33.7	54
边柱 3	33.7	53
边柱 4	39.8	55

表 3 模型 2 角柱实测冲切角

Table 3 The punching angles of corner columns in Model 2			
角柱号	筏板侧面冲切角 1/(°)	筏板侧面冲切角 2/(°)	筏板底面对角线方向冲切角/(°)
角柱 1	26.7	33.7	53
角柱 2	33.7	33.7	53
角柱 3	32.0	32.8	54
角柱 4	29.0	32.0	55

表 4 模型 2 边柱实测冲切角

Table 4 The punching angles of border columns in Model 2		
边柱号	筏板侧面冲切角/(°)	筏板底面中线方向冲切角/(°)
边柱 1	29.7	53
边柱 2	—	—
边柱 3	38.7	45
边柱 4	39.8	55

模型试验角柱和边柱外侧筏板侧面冲切角的实测角度为 $26.6^{\circ}\sim39.8^{\circ}$, 筏板内冲切锥体的冲切角的实测角度为 $53^{\circ}\sim58^{\circ}$ 。中柱冲切破坏锥体角度为 53° , 各柱冲切锥体如图 5 所示。

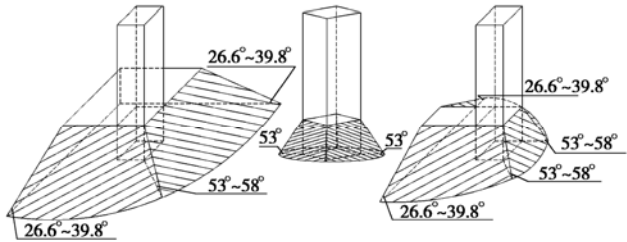


图 5 模型各柱冲切破坏锥体图

Fig. 5 The sketch of punching cones

由试验得到的实际冲切破坏锥体可以看出, 筏板破坏均是沿柱边向下向外扩展一定角度形成冲切锥体, 而不是沿柱边剪切面破坏。同时, 角柱、边柱下筏板连同柱外侧筏板一起冲切破坏, 筏板外伸尺寸大小与冲切破坏性状的关系尚需进一步研究。

1.5 冲切锥体底面计算简图

冲切角度大小对筏板的冲切验算尤为重要, 因为在计算冲切荷载时, 要根据锥底面积来确定锥底地基反力值。由本次试验角柱、边柱和中柱冲切破坏锥体可以得出锥体底面计算简图如图 6 所示。

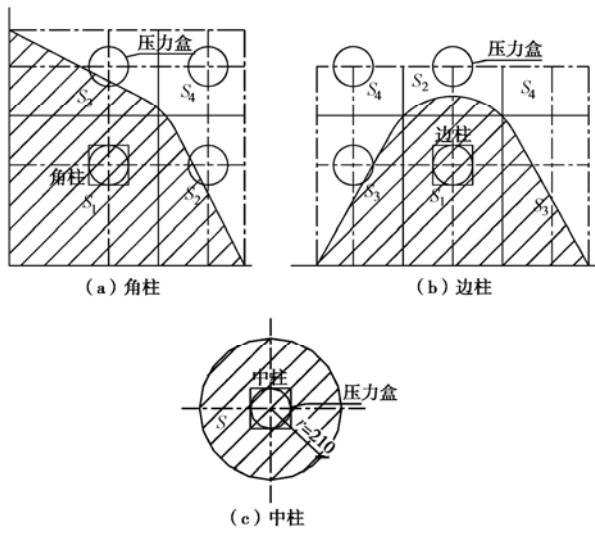


图 6 模型各柱冲切锥体底面计算简图

Fig. 6 The sketch of punching cones bottom

2 模型 1 冲切承载力计算分析和比较

2.1 角柱部分

模型 1 角柱加荷试验加载至第 11 级(440 kN)时, 角柱 1 柱下筏板首先发生冲切破坏, 按照规范^[2]规定将第 10 级(400 kN)荷载作为筏板的冲切极限荷载。此时角柱 1 柱下筏板 S_1 范围内的地基反力平均值为 0.41 MPa, 远大于地基土的承载力极限值 0.28 MPa。

继续加荷至第 12 级(480 kN)时, 角柱 3 柱下筏板冲切破坏; 加荷至第 13 级(520 kN)时, 角柱 2 柱下筏板冲切破坏; 由于角柱 4 偏心受压使柱体损坏严重, 柱下筏板未能冲切破坏。

以模型 1 角柱 1 为例, 按照模型试验实测冲切破坏锥体计算冲切承载力。角柱 1 实际冲切锥体底面计算简图如图 7 所示。

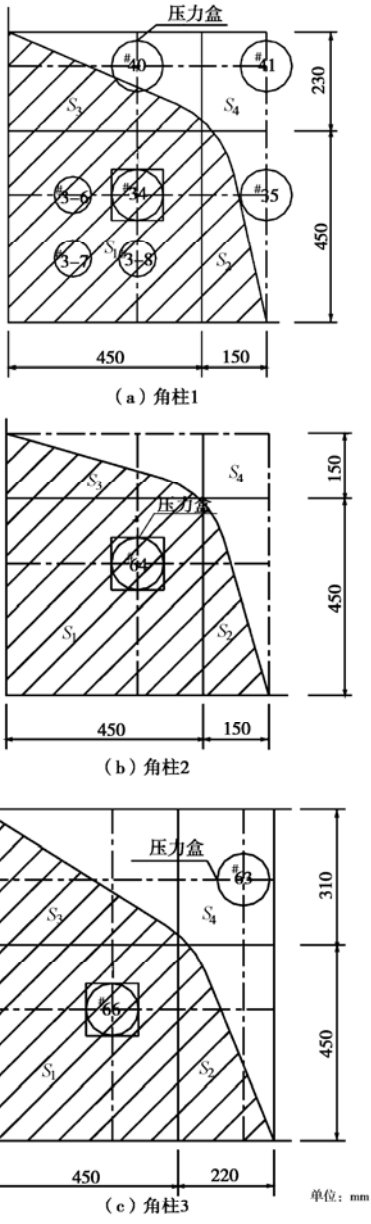


图 7 角柱冲切锥体底面计算简图

Fig. 7 The sketch of punching cone bottom of corner columns in Model 1

冲切锥体锥底地基反力 F_g = 柱下平均地基反力值 $\times S_1 + \#35$ 压力盒值 $\times S_2/2 + \#40$ 压力盒值 $\times S_3/2 = 0.4127 \times 0.45 \times 0.45 + 0.2994 \times 0.45 \times 0.15/2 + 0.2686 \times 0.45 \times 0.23/2 = 0.1076 \text{ MN} = 107.6 \text{ kN}$ 。

角柱 1 柱下筏板承受的实际冲切荷载 $F_R = 400$

$\text{kN}-F_g=400-107.6=292.4\text{ kN}$ 。

按《建筑地基基础设计规范》GB50007—2002 冲切公式计算得出角柱 1 的抗冲切承载力标准值 $F_L=0.7\cdot\beta_{hp}\cdot f_{tk}\cdot u_m\cdot h_0$ (采用 f_{tk} 而非 f_t) $=0.7\times 1\times 1.78\times 920\times 200\times 10^{-3}=229.3\text{ kN}$ 。则有 $F_R/F_L=292.4/229.3=1.28$ 即角柱 1 实际冲切破坏荷载约为筏板抗冲切承载力标准值的 1.28 倍。

模型 1 角柱冲切承载力计算结果见表 5。

由于基底反力合力重心与柱竖向荷载不重合,破坏截面还存在弯矩作用的不平衡剪力作用,上述计算未计入。

2.2 边柱部分

模型 1 边柱加荷试验加载至第 12 级 (480 kN) 时,

表 5 模型 1 角柱实测冲切承载力

Table 5 The punching forces of corner columns in Model 1					
角柱	极限冲切破坏荷载/kN	冲切锥底地基反力/kN	实际冲切破坏荷载/kN	规范公式计算破坏荷载/kN	比值
1	400	107.6	292.4	229.3	1.28
2	480	137.9	342.1	229.3	1.49
3	440	128.6	311.4	229.3	1.36
4	—	—	—	—	—

边柱 1 柱下筏板首先发生冲切破坏,按照规范^[2]规定第 11 级 (440 kN) 荷载作为筏板的冲切极限荷载。此时边柱 1 柱下筏板 S_1 范围内地基反力的平均值为 0.31 MPa,大于地基土的承载力极限值 0.28 MPa。继续加荷至第 13 级 (520 kN) 时,边柱 2,边柱 4,边柱 3 柱下筏板依次冲切破坏。模型 1 边柱实际冲切锥体底面计算简图如图 8 所示。筏板冲切承载力计算结果见表 6。

2.3 中柱部分

模型 1 中柱试验加载至第 15 级 (600 kN) 时,中柱下筏板发生冲切破坏,按照规范^[2]规定把第 14 级 (560 kN) 荷载作为筏板的冲切极限荷载。模型 1 中柱实际冲切锥体底面计算简图如图 9 所示。筏板冲切承载力计算结果见表 7。

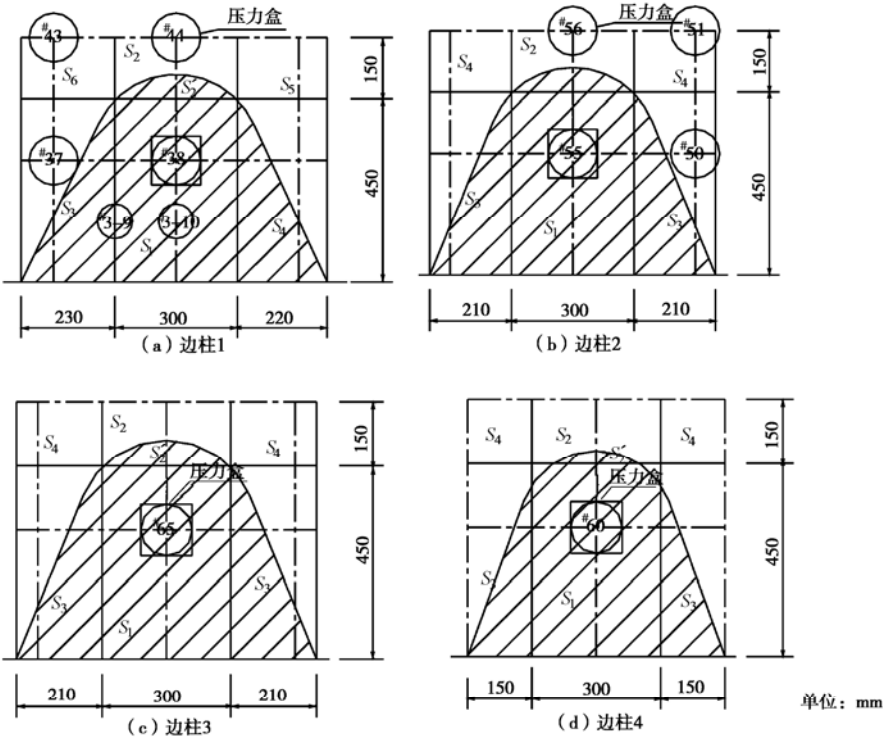


图 8 模型 1 边柱冲切锥体底面计算简图

Fig. 8 The sketch of punching cone bottom of corner columns in Model 1

表 6 模型 1 边柱实测冲切承载力

Table 6 The punching force of border columns in Model 1					
边柱	极限冲切破坏荷载/kN	冲切锥底地基反力/kN	实际冲切破坏荷载/kN	规范公式计算破坏荷载/kN	比值
1	440	77.6	362.4	309	1.17
2	480	101.5	378.5	309	1.25
3	480	101.5	378.5	309	1.25
4	480	79.3	400.7	309	1.30

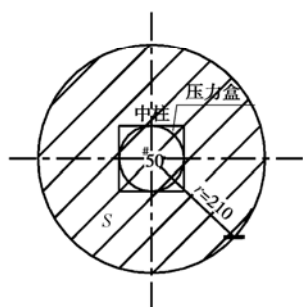


图 9 模型 1 中柱冲切锥体底面计算简图

Fig. 9 The sketch of punching cone bottom of middle column in Model 1

3 模型 2 冲切承载力计算分析和比较

3.1 角柱部分

模型 2 加载至第 20 级时,角柱 2 柱下筏板发生冲切破坏,此时角柱单柱荷载为原加荷等级的第 24 级 (576 kN),按规范^[2]规定将角柱的原加荷第 23 级(552 kN)荷载作为筏板的冲切极限荷载。此时角柱 2 冲切破坏锥体下的地基反力为 0.81 MPa,远大于地基土的

承载力极限值 0.28 MPa。
继续加荷至第 26 级 (624 kN),角柱 4,角柱 1 柱下筏板先后冲切破坏;加荷至第 28 级 (672 kN),角柱 3 柱下筏板冲切破坏。

模型 2 角柱实际冲切锥体底面计算简图如图 10 所示,筏板冲切承载力计算结果见表 8。

3.2 边柱部分

模型 2 试验加载至第 23 级 (736 kN) 时,边柱 3 下筏板首先发生冲切破坏,按照规范^[2]规定第 22 级 (704 kN) 荷载作为筏板的冲切极限荷载。此时边柱 3 柱下 S_1 范围内地基反力的平均值为 0.71 MPa,大于地基土的承载力极限值 0.28 MPa。

重新加荷至第 19 级 (608 kN) 时,边柱 4 柱下筏板发生冲切破坏。加荷至第 23 级 (736 kN) 时,边柱 1 柱下筏板发生冲切破坏。因边柱 2 柱体损坏严重,柱下筏板没有完全冲切破坏。

模型 2 边柱实际冲切锥体底面计算简图如图 11 所示,筏板冲切承载力计算结果见表 9。

表 7 模型 1 中柱实测冲切承载力

Table 7 The punching force of middle column in Model 1

极限冲切破坏荷载/kN	冲切锥底地基反力/kN	实际冲切破坏荷载/kN	规范公式计算破坏荷载/kN	比值
560	38.3	521.7	319	1.64

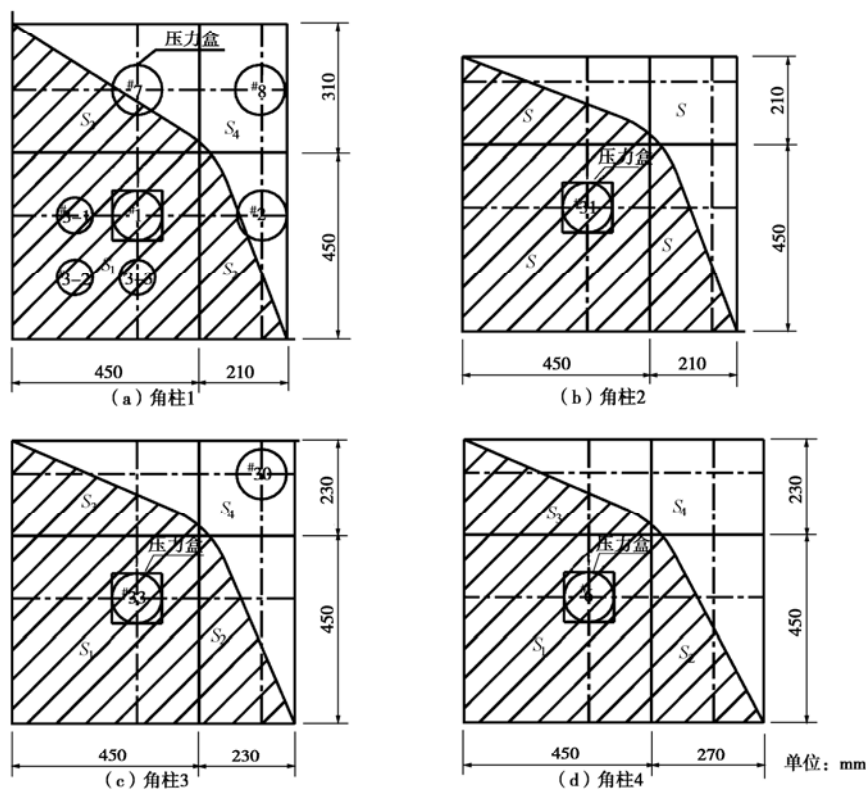


图 10 模型 2 角柱冲切锥体底面计算简图

Fig. 10 The sketch of punching cone bottom of corner columns in Model 2

表 8 模型 2 角柱实测冲切承载力

Table 8 The punching force of corner columns in Model 2					
角柱	极限冲切破坏荷载/kN	冲切锥底地基反力/kN	实际冲切破坏荷载/kN	规范公式计算破坏荷载/kN	比值
1	576	243.9	332.1	229.3	1.45
2	528	231.7	296.3	229.3	1.29
3	624	261.0	363.0	229.3	1.58
4	576	241.7	334.3	229.3	1.46

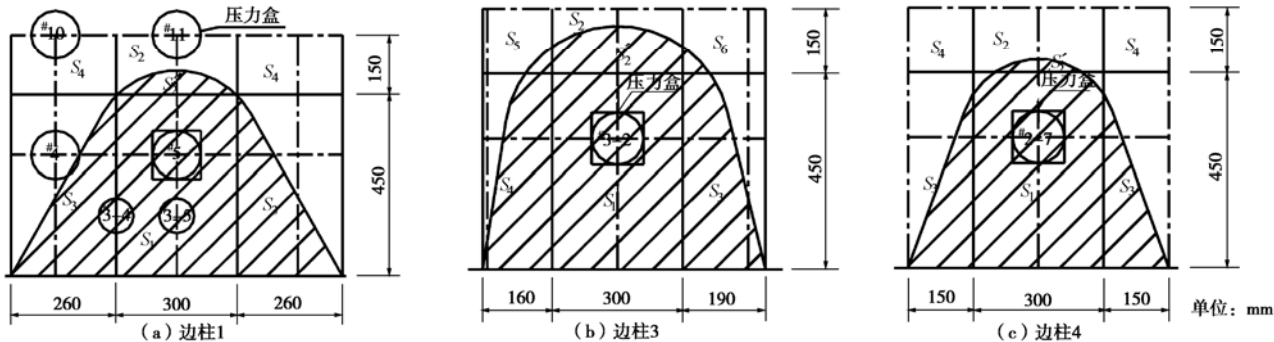


图 11 模型 2 边柱冲切锥体底面计算简图

Fig. 11 The sketch of punching cone bottom of corner columns in Model 2

表 9 模型 2 边柱实测冲切承载力

Table 9 The punching force of border columns in Model 2					
边柱	极限冲切破坏荷载/kN	冲切锥底地基反力/kN	实际冲切破坏荷载/kN	规范公式计算破坏荷载/kN	比值
1	704	175.9	528.1	309	1.71
2	—	—	—	—	—
3	704	163.9	540.1	309	1.75
4	576	150.7	425.3	309	1.38

3.3 中柱部分

模型 2 加载至第 23 级 (920 kN) 时,中柱下筏板发生冲切破坏,按照规范规定第 22 级 (880 kN) 荷载作为筏板的冲切极限荷载。此时中柱冲切破坏锥体下的地基反力为 0.89 MPa,远大于地基土的承载力极限值 0.28 MPa。模型 2 中柱实际冲切锥体底面计算简图如图 12 所示。

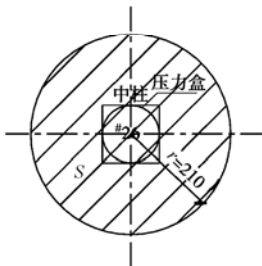


图 12 模型 2 中柱冲切锥体底面计算简图

Fig. 12 The sketch of punching cone bottom of middle column in Model 2

筏板冲切承载力计算结果见表 10。

对比筏板实测冲切承载力与规范计算标准值的比值可以看出,角柱、边柱和中柱下筏板的抗冲承载力具有很大安全储备。同时可以得出同等竖向集中荷载作用下的筏板基础,角柱下筏板的抗冲承载力最低,导致最先冲切破坏,边柱次之,中柱最高。因此,在

实际工程设计中,必须采取有效措施保证角柱、边柱区域筏板的安全。

表 10 模型 2 中柱实测冲切承载力

Table 10 The punching force of middle column in Model 2				
极限冲切破坏荷载/kN	冲切锥底地基反力/kN	实际冲切破坏荷载/kN	规范公式计算破坏荷载/kN	比值
880	123	757	319	2.37

4 模型 1 与模型 2 比较分析

4.1 冲切承载力比较

由表 11 可以看出,无论是筏板极限冲切破坏荷载还是冲切锥底地基反力,整体同步加荷的模型 2 中各柱的冲切指标都要比单独加荷条件下的模型 1 各柱对应值大得多。

通过上述计算分析,可以看出制作材料和试验环境完全相同的模型 1 和模型 2 筏板抗冲承载力相差很大,主要原因在于加载方式的不同使得地基反力差别很大。模型 1 为单独加载,筏板冲切仅考虑了一定范围内地基反力分布与筏板冲切承载力的关系。而模型 2 由于采用了同步加荷,地基反力分布形态发生变化,地基土同步压缩,使地基承受荷载能力随变形增大而增加,实际冲切破坏荷载相应增加。

表 11 模型 1 和模型 2 冲切承载力指标

Table 11 Punching forces of border columns in Model 1 and Model 2

柱子	极限冲切破坏荷载/kN			冲切锥底地基反力/kN		
	模型 1	模型 2	比值	模型 1	模型 2	比值
角柱 1	400	576	1.4	107.6	243.9	2.3
角柱 2	480	528	1.1	137.9	231.7	1.7
角柱 3	440	624	1.4	128.6	261.0	2.0
角柱 4	—	576	—	—	241.7	—
边柱 1	440	704	1.6	77.6	175.9	2.3
边柱 2	480	—	—	101.5	—	—
边柱 3	480	704	1.5	101.5	163.9	1.6
边柱 4	480	576	1.2	79.3	150.7	1.9
中柱	560	880	1.6	38.3	123.0	3.2

4.2 沉降值比较

由表 12 可以看到,模型 2 绝对沉降值远大于模型 1 的绝对沉降值,但是差异沉降值却小得多。

表 12 模型 1 和模型 2 沉降值

Table 12 The settlement of Model 1 and Model 2

模型	最大沉降值/mm	差异沉降值/mm
模型 1	49.95	34.5
模型 2	146.80	11.3

在整体同步加荷条件下的筏板绝对沉降量使得地基土最大程度上被压缩密实,地基土的承载力随着变形的增加而不断提高,使得在同等荷载水平作用下的筏板冲切破坏荷载提高。同时由于筏板的相对位移量得到较好地调整,相对弯曲值得到很好的控制,使得筏板的抗冲切承载力大大增加。

因此,在实际工程中为了防止筏板基础的局部冲切破坏,应严格控制筏板的差异沉降,尤其是集中荷载作用的筏板区域,应当采取综合措施来保证筏板满足冲切承载力要求。

5 结 论

(1) 当筏板发生冲切破坏时,角柱冲切破坏锥体

近似 1/4 圆台体,边柱冲切破坏锥体近似 1/2 圆台体,中柱冲切破坏锥体为一个完整的圆台体。角柱、边柱和中柱下约束条件相同筏板的冲切破坏角介于 53°~60°;角柱和边柱外侧筏板的冲切破坏角介于 30°~40°。

(2) 在类似试验条件下的筏板破坏,验算时控制截面是冲切破坏截面,而非剪切破坏截面。

(3) 增加上部结构刚度和基础刚度,减少筏板相对变形,可使筏板冲切破坏荷载大大提高,从而提高筏板冲切设计安全度。

参考文献:

[1] 滕延京. 地基基础按变形控制设计的理论与实践[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2001. (TENG Yan-jing. The theory and practice of the subgrade and foundation according to deformation-control design[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2001. (in Chinese))

[2] GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (GB50007—2002 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002. (in Chinese))