

大悬挑圆板基础计算方法探讨

金 昕
(土建系)

摘 要 本文通过试验,研究了大悬挑圆板基础的破坏图形及破坏机理,并对此类板的极限承载力的计算方法进行了探讨.发现板的实测极限荷载比按极限平衡法计算求得的极限荷载约低28%左右,且随着板的 r_1/r_2 的增大,其差值越大,从而认为目前对烟囱、筒体水塔的圆板基础的承载力计算普遍采用的极限平衡法不适用于大悬挑圆板基础,偏于不安全.对于大悬挑圆板基础,仍以采用弹性理论计算为宜.

关键词 倒锥壳水塔; 圆板; 计算方法

0 前言

筒体支承的钢筋混凝土倒锥壳水塔以其独具一格的造型、施工方便(可采用滑模施工)和工期短等优点获得了使用单位和工程界的青睐.由于其支承筒壁的直径较小(图1),除了风荷载产生的弯矩外,在水平荷载、施工偏差、日照不均匀及基础倾斜等影响下产生的水平位移相对较大,故使结构自重引起的附加弯矩也较大,这样,其基础底板的悬挑尺寸都比较大,为“大悬挑”型圆板基础.国内对这种形式的基础研究尚少.目前,对于筒体水塔和烟囱的钢筋混凝土圆板基础大多采用“极限平衡法”进行设计,这种方法具有公式简单、运算方便、配筋均匀等优点,但是否适用于这种“大悬挑”型圆板基础,以及其破坏机理等,尚需通过试验研究进行探讨.



图1 倒锥壳水塔实照

1 试验装置及试验方法

试件外型尺寸按照实际工程中的基础尺寸关系确定,其数据及配筋见表1和图2.

试件分三组,每组均为2个.第一组试件(CB_1, CB_2),基础外伸的悬挑部分的高跨

比为 $\frac{(r_1 - r_2)}{h} = \frac{375}{130} = 2.885$,圆板内外直径比为 $\frac{r_1}{r_2} = \frac{0.625m}{0.11m} = 5.68$.第二组试件(CB_3 ,

本文1992年5月4日收到

CB_4), 基础外伸的悬挑部分的高跨比为 $\frac{(r_1 - r_2)}{h} = \frac{375}{170} = 2.206$, 圆板内外直径比为 $\frac{r_1}{r_3} = 5.68$. 第三组试件 (CB_5, CB_6), 基础外伸的悬挑部分的高跨比为 $\frac{(r_1 - r_2)}{h} = \frac{402}{134} = 3$, 圆板内外直径比为 $\frac{r_1}{r_3} = \frac{0.625m}{0.10m} = 6.25$. 故三组试件均属“大悬挑”型圆板.

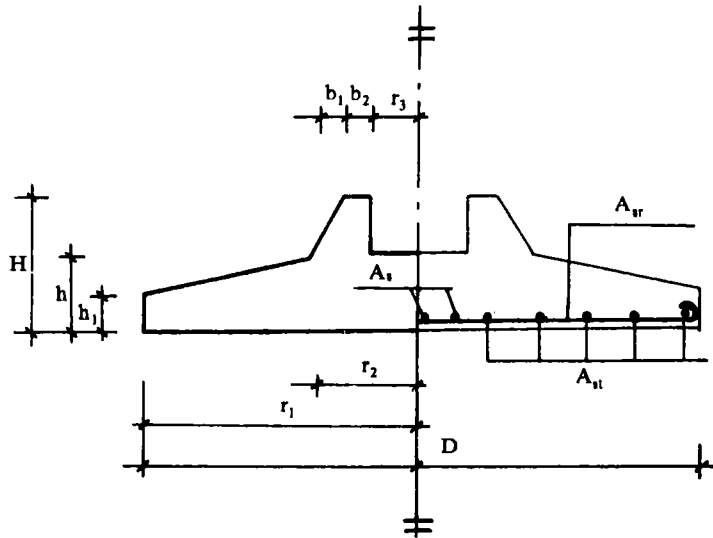


图2 基础底板尺寸及配筋

表1 试件尺寸及配筋 (单位: mm)

组别	试件号	D	r ₁	r ₂	r ₃	b ₁	b ₂	H	h	h ₁	A _{tr}	A _{tr}	A _s
1	CB ₁ CB ₂	1250	625	250	110	70	70	290	130	65	12φ8	7φ8	2φ65
2	CB ₃ CB ₄	1250	625	250	110	60	80	290	170	85	12φ6.5	5φ6.5	2φ6.5
3	CB ₅ CB ₆	1250	625	223	100	56	67	280	134	67	14φ6.5	6φ8	2φ8

试验采用两种加载方法, 即气压加载(图3)和油压千斤顶分配梁多点加载(图4). 气压加载是将气袋置于有活动边框的封闭承力台座中, 试验前将试件的周边用环氧树脂补平并磨制与台座边框相贴合, 使气袋不致从空隙处挤出胀破, 气袋可用薄生胶或薄橡皮由热压或胶贴制成. 为观察试件上表面的裂缝情况以及安装测定挠度、应变的仪表, 另设一传力架, 传力架两端为环形板, 中间用钢杆连接, 下环形板加上钢珠构成试件的滚动支座. 将空气压入气袋中, 则可对构件施加荷载. 这种加载方法能对试件产生垂直于板面的均匀荷载, 较接近于

基础圆板的实际受力情况，且便于观察板顶面的裂缝开展过程，但无法观察板底面(受荷面)的裂缝出现及开展的全过程。为此，部分试件采用油压千斤顶加载，并采用分配梁以多点加载代替均布荷载，用 8 个液压同步千斤顶联合加载，然后用二层分配梁将每个千斤顶的集中力分成四个相等的分力总共 32 个相等的力均匀作用在 8 块面积相等的扇形面积上，加载时，基础板底面(受荷面)向上。

试验时，采用逐级加载的方式，每级持荷 10min，用电阻应变仪测量钢筋和混凝土应变，用百分表测定板中点挠度。

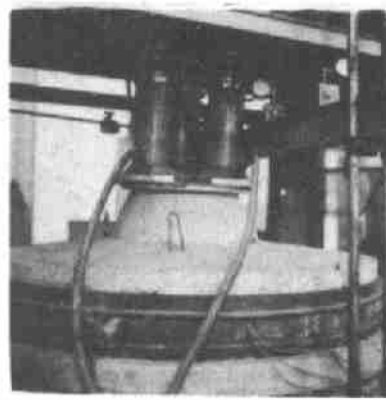


图 3 气压加载试验实照

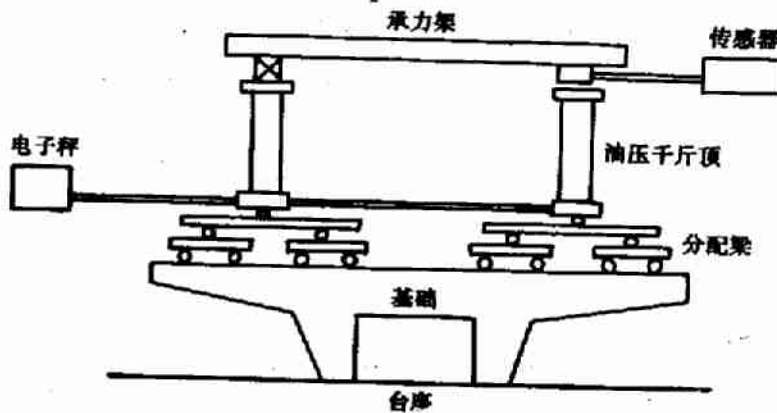


图 4 加载荷示意图

2 试验结果

三组试件均为弯曲破坏。

在荷载作用下先在板底面悬挑部分出现放射状径向裂缝，随着径向裂缝的发展，在板底面环梁外边缘出现一闭合的环向裂缝。荷载逐渐增加，裂缝的宽度和深度亦不断增加，环向裂缝的开展比径向裂缝快得多。最后，由于此环向裂缝的开展，基础板丧失承载能力。破坏时，环梁内的板(内板)顶面未出现径向和环向裂缝。内板的底面有一些微细的不规则裂缝。在板底面，环梁内边缘始终未出现环向裂缝。

板的裂缝分布及破坏图形见图 5。

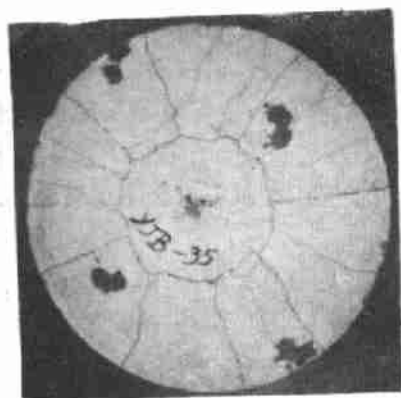


图5 板的裂缝分布及破坏图形

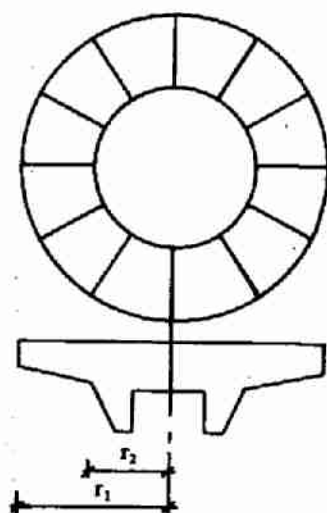


图6 塑性铰线理论假设的板的破坏机构

4 试验结果分析

(1) 大悬挑圆板的破坏图形及破坏机理

从图5板的破坏图形可看出, 板的弯曲破坏形式与塑性铰线理论中假设的板的破坏机构(图6)是一致的。

但实际上, 破坏时, 板悬挑部分的径向裂缝截面处并未全部形成塑性铰线。图7为板端环向钢筋在受荷过程中的应变曲线。从图中可看出, 三组试件在破坏时, 其自由端附近的环向钢筋应力均达不到屈服强度。板CB₅的板端环向钢筋应变为1320 $\mu\epsilon$, 钢筋的实测弹模 $E_s = 1.93 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, 测试件被破坏时, 钢筋的应力 $\sigma_s = 1320 \times 10^{-6} \times 1.93 \times 10^5 = 254.76 \text{ N/mm}^2$, 小于 $\phi 8$ 钢筋的实测屈服强度 $f_y = 298.5 \text{ N/mm}^2$ 。其余5块板在破坏时, 其板端环向钢筋的应变值更小, 平均为1050 $\mu\epsilon$, 其平均应力仅为 202.7 N/mm^2 , 远小于钢筋的屈服强度 ($f_y = 298.5 \text{ N/mm}^2$ 或 $f_y = 346 \text{ N/mm}^2$)。

由此可见, 在大悬挑圆板中, 当板达到极限承载能力而破坏时, 板边缘处的受拉钢筋应力

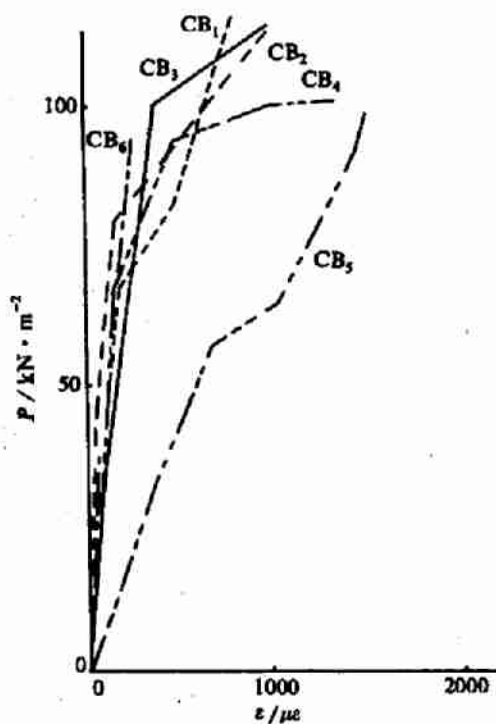


图7 板端环向筋应变

达不到其屈服强度，受压混凝土应力也达不到其抗压极限强度。这表明，板中的内力重分布不足以使径向塑性铰线延伸到板的自由端时，板已由于环梁外边缘处的环向截面破坏而丧失了承载能力，所以，在大悬挑圆板中是不可能实现完全的内力重分布的。

(2) 内板的配筋问题

试验的三组试件在破坏时，内板的顶面未出现径向和环向裂缝，内板底面仅出现一些微细裂缝，说明在大悬挑圆基础板中，由于 r_1/r_2 较大，在内板截面中不可能出现正弯矩(使内板顶面受拉的弯矩)，故无需在内板顶面配置受力钢筋。在内板底面，根据环梁外边缘的截面弯矩所配置的钢筋，只要延伸至内板不切断，则在内板底面中就不可能出现破坏裂缝。

(3) 大悬挑圆板弯曲破坏的计算方法探讨

水塔、烟囱的钢筋混凝土板基础设计有两种方法，一种是用弹性理论计算板的内力，根据内力配筋；另一种是用塑性铰线理论，即根据塑性分析的上限定理取各种机动可能的破坏机构，用极限平衡法求其承载力，将求得的板的承载力极小值作为结构的极限承载力。

目前，计算水塔、烟囱的钢筋混凝土圆板基础的极限承载力，一般采用塑性铰线理论。对于图 6 所示的悬挑圆板的外板破坏机构，其极限承载力可由虚功方程求得，令板在环梁外边缘截面处产生单位位移，由产生单位位移过程中板的内力虚功等于外力虚功，得：

$$q = \frac{6[M_r r_2 + (r_1 - r_2)M_l]}{2r_1^3 - 3r_1^2 r_2 + r_2^3} \tag{1}$$

式中： q 为外板破坏机构相应的极限均布荷载； r_1 、 r_2 为板的外、内径，见图 6； M_r 为支承环梁外边缘环向截面上的径向极限力矩； M_l 为外环板径向截面上的环向极限力矩。

表 2 试件实测值、理论计算值及其比较 (单位: kN/m^2)

试件号	混凝土			q_p	q	q_e	q_c	$\frac{q}{q_p}$	$\frac{q_e}{q_p}$	破坏型式
	强度等级	f_{cm}	f_t							
CB ₁	C24	13000	1260	119.36	153.98	110.11	149.51	1.290	0.923	弯曲
CB ₂	C30.5	16850	1515	122.30	154.10	110.74	179.77	1.260	0.905	弯曲
CB ₃	C44.2	23180	1884	118.96	141.32	119.82	369.92	1.188	1.007	弯曲
CB ₄	C36.2	19600	1686	113.50	140.12	119.80	331.04	1.235	1.056	弯曲
CB ₅	C27.3	14880	1392	87.00	120.97	79.17	148.08	1.390	0.910	弯曲
CB ₆	C28.1	15360	1424	89.55	121.00	78.88	151.48	1.351	0.880	弯曲

注: 1. q_p 为实测破坏荷载; q 为按极限平衡法计算的弯曲破坏极限荷载标准值; q_e 为按弹性理论计算的弯曲破坏荷载标准值; q_c 为按《GBJ10-89》的冲切承载力计算的荷载标准值。

2. 钢筋实测强度: $\phi 6.5$ $f_y = 346\text{N}/\text{mm}^2$; $\phi 8$ $f_y = 298.5\text{N}/\text{mm}^2$

3. 荷载系数: 取 $r_q = 1.3$

表 2 中列出了三组试件的极限荷载 q 值。可以看出，板的实测极限荷载比用塑性铰线理论求得的极限荷载约低 28%，且随着板的外悬挑的增加即 r_1/r_2 的增大，二者的差值亦越大(从二、三组试件的对比可看出)，这说明对于大悬挑圆板基础，用极限平衡法求得的板的极限承载力偏于不安全，且误差相当可观。产生这种误差的原因是塑性铰线理论对于悬挑圆

板外板破坏机构(图 6)的假定与大悬挑圆板基础破坏时实际的受力情况不符. 所以, 对小悬挑圆板基础用极限平衡法进行设计是可行的, 但对大悬挑圆板基础并不合适.

对于试验的三组试件, 笔者按弹性理论的方法, 计算了各块板的极限荷载标准值 q_e (见表 2), 与实测破坏荷载 q_p 比较接近, 其比值 q_e/q_p 约 0.9.

4 结论

(1) 倒锥壳水塔圆板基础由于其悬挑大, 当板由于环梁外边缘的环向截面破坏而丧失承载力时, 板底面悬挑部分的径向塑性铰线的发展未能延伸至板的自由端, 与塑性铰线理论所假设的外板破坏机构不符, 板中的内力重分布是不完全的.

(2) 倒锥壳水塔由于其支承圆筒直径小, 其圆板基础的悬挑大, 直至破坏时, 内板截面中不可能出现使内板顶面受拉的正弯矩, 内板的负弯矩也小于环梁外边缘截面处的负弯矩. 所以, 内板顶面不必配置受力钢筋, 内板底面的受力筋只需将环梁外边缘截面的受力筋延伸至内板, 不宜切断.

(3) 三组试件的实测极限荷载值 q_p 分别与用塑性铰线理论的公式(1)计算的荷载标准值 q 和按弹性理论计算的荷载标准值 q_e 比较, q/q_p 约为 1.28, q_e/q_p 约为 0.94, 故对于大悬挑圆板基础, 采用极限平衡法进行设计偏于不安全, 仍宜采用弹性理论设计.

参考文献

- 1 蔡绍怀. 用极限平衡法计算钢筋混凝土圆板的强度. 建筑学报, 1961, 9~11: 18~24
- 2 郑作樵. 钢筋混凝土圆、环形板式基础极限承载力探讨. 福州大学学报(自然科学版). 1988, 16(2): 85
- 3 GBJ51-83, 烟囱设计规范. 北京: 冶金工业出版社, 1984

The Calculation on Circular Plate Foundations of Reversed Conical Shell Water Tower

Jin Xin

(Department of Civil and Architectural Engineering)

Abstract In this paper the tests were made to study the failure scheme and the mechanism of circular plate foundations of reversed conical shell water tower, and to inquire into the calculating methods on the ultimate bearing resistance of the circular plate foundations mentioned above. It was found that the practical ultimate load was about 28 per cent lower than the one calculated with the method of limit equilibrium and the difference between the two increased with the increment of the ratio r_1/r_3 in the plate. So the method of limit equilibrium, that is adopted generally to calculate the load-carrying capacity of circular plate foundations of water tower or chimney at present, is not applicable to the circular plate foundations with large cantilever of reversed conical shell water tower, because the result from this method is not safe. Therefore the calculation on elastic theory is still suitable for the foundations of reversed conical shell water tower.

Keywords reversed conical shell water tower; circular plate; calculating method