

AP1000 核电厂 OLP 型预埋件有限元分析方法研究

李 成 李韶平 刘建卫

(上海核工程研究设计院 上海 200233)

摘要 作为世界上最先进的第三代核电技术, AP1000 首堆正在中国建造。AP1000 核电站厂房的一大特点是模块化程度高, 以钢板混凝土模块墙结构取代传统的钢筋混凝土结构, 模块墙上需要布置大量的 OLP(Overlay Plate)型预埋件以连接其它结构构件, 比如支撑工艺管道、设备支架、操作平台、预制构件等, 因此预埋件的设计是 AP1000 结构设计中十分重要的环节。本文介绍了预埋件的有限元分析方法, 将开发的 GTStrudl 命令流模板和基于 Microsoft Excel 环境下的 VBA 宏处理程序应用于预埋件的设计, 显著提高了工作效率, 对工程设计具有一定的帮助和借鉴意义。

关键词 AP1000, OLP 型预埋件, GTStrudl 有限元软件, VBA 宏处理程序

中图分类号 TU311.41

安全是核电站的生命线。AP1000 是较为成熟的第三代核电技术, 其优点是厂房建造采用模块化技术, 即以模块墙(钢板混凝土墙结构)取代传统的混凝土墙, 系统得到大幅简化。基于模块墙的特点, 模块墙上需要使用大量的 OLP(Overlay Plate)型预埋件来连接其它结构构件, 比如连接并支撑工艺管道、设备支架、预制板、钢楼梯等。OLP 型预埋件属于抗震 I 类构件, 因此, 预埋件的设计在模块设计中尤为重要, 需要十分重视。AP1000 模块墙中的预埋件应该根据核安全相关混凝土规范进行设计。

本文介绍了预埋件的有限元分析方法, 使用 GTStrudl^[1]命令流建立 OLP 型预埋件有限元模型并

对其进行分析, 得到应力变形情况, 根据自行编制的 Excel VBA^[2]宏处理程序, 对结果进行处理, 得到预埋件的承载力, 采用规范规定的荷载组合对承载力进行验算。

1 分析方法

OLP 型预埋件是一种特殊的预埋件, 专门应用于钢板厚度为 0.5"(14 mm)的模块墙中, 由预埋板、机械套筒和变形锚筋三部分组成(见图 1)。由于模块墙钢板和预埋板之间有一定间隙, 导致机械套筒除了受轴向应力外, 还受剪应力和弯曲应力的影响。

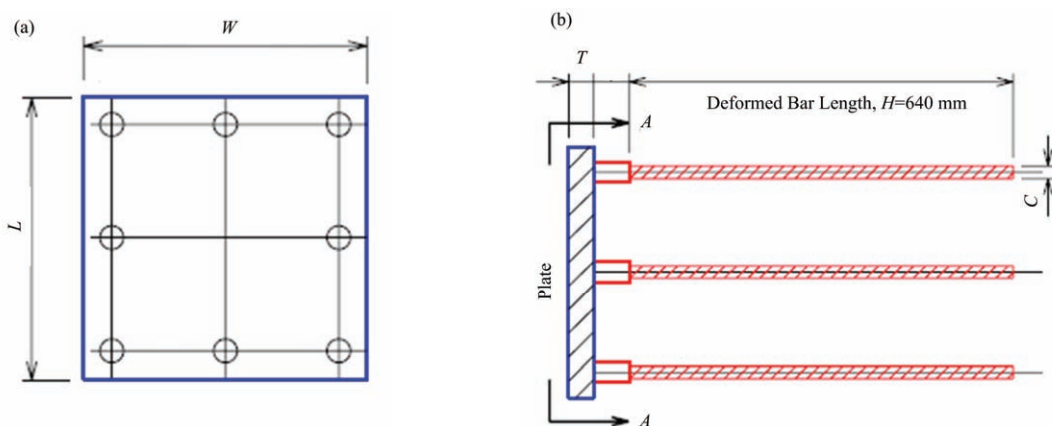


图 1 OLP 型预埋件 (a) 平面图; (b) 侧视图
Fig.1 OLP embedment. (a) plan view; (b) lateral view

第一作者: 李成, 男, 1984 年出生, 2009 年于河海大学获硕士学位, 现为上海核工程研究设计院工程师。主要研究领域为核电厂模块化技术
收稿日期: 2012-10-30, 修回日期: 2012-12-20

OLP 预埋件的设计程序如下: 首先根据预埋件实际尺寸, 使用自编的 GTStrudl 命令流建模模板建立有限元模型, 考虑不同荷载工况的作用, 得到 GTStrudl 计算的应力变形结果, 然后使用 Excel VBA 宏处理程序对结果进行处理, 基于线性的假定计算板和锚筋的承载力设计值。得到预埋板和锚筋的承载力以后, 根据下列公式对预埋板和锚筋的强度分别进行验算。

对于预埋板, 须满足以下方程:

$$\frac{T}{T_p} + \sqrt{\left(\frac{M_x}{M_{xp}}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{M_{yp}}\right)^2} \leq 1.0 \quad (1)$$

对于锚筋, 须同时满足以下三个组合方程:

$$\frac{T}{T_s} + \frac{M_x}{M_{xs}} + \frac{M_y}{M_{ys}} \leq 1.0 \quad (2)$$

$$\frac{V}{V_s} + \frac{M_z}{M_{zs}} \leq 1.0 \quad (3)$$

$$\left(\frac{T}{T_s} + \frac{M_x}{M_{xs}} + \frac{M_y}{M_{ys}}\right) + \left(\frac{V}{V_s} + \frac{M_z}{M_{zs}}\right) \leq 1.2 \quad (4)$$

其中, T , M_x , M_y , V , M_z 代表预埋件上的外荷载 (考虑荷载组合系数); T_p , M_{xp} , M_{yp} 代表预埋板的抗拉和抗弯承载力; T_s , M_{xs} , M_{ys} 代表锚筋的抗拉和抗弯承载力。

2 程序介绍

为提高计算效率, 按照 GTStrudl 命令流格式编写了预埋件建模及计算的命令流模板, 便于修改模型, 通用性强。下面给出部分命令流:

```
UNITS INCH KIPS RAD FAH
PRINT GENERATE OFF
$===== 创建节点
JOINT COORDINATES CAR
GENERATE 33 JOINTS ID 'J1' 1 X DIFF 0,
32 AT 0.5 Y 24 Z 0
REPEAT 48 TIMES ID INCR
33 Y INCR -0.5
$===== 创建单元
GENERATE 32 ELEMENTS ID 'E1' 1 FROM 'J1' 1 TO 'J2' 1
TO 'J35' 1 TO 'J34' 1
```

```
REPEAT 47 TIMES ID INCR 32 FROM INCR 33
TO INCR 33
MATERIAL STEEL ALL ELEMENTS
ELEMENT PROPERTIES
'E1' TO 'E1536' TYPE 'SBHQ6' THICK 1.000
```

在 Microsoft Excel 环境下使用 VBA 脚本语言编制的宏处理程序包括以下功能: 对 GTStrudl 计算的结果进行读取、处理, 并计算出预埋件的承载力和刚度; 对于预埋件距离混凝土自由边距离较小的情况, 需要根据规范 ACI 349^[3] 的规定考虑混凝土可能发生剪切破坏并计算锚筋的抗剪承载力, 该宏处理程序也包括了这部分的计算, 然后取较小值作为锚筋的抗剪承载力; 对外荷载进行最后自动变换坐标系, 并根据规范要求进行各种工况的荷载组合; 最后验算预埋件的承载力是否满足要求。

下面给出该程序对有限元结果进行处理的部分 VBA 代码:

```
.....
Do While Not Mid(txtCard, 12, 9) = "CALCULATE"
Line Input #1, txtCard
If Mid(txtCard, 9, 7) = "LOADING" Then
LName = Mid(txtCard, 9, 40)
For j = 1 To 9: Line Input #1, txtCard: Next j
For j = 1 To NOA * 2
Line Input #1, txtCard
Vx(j) = CSng(Mid(txtCard, 26, 11)) !
读取锚筋端点的剪力
Vy(j) = CSng(Mid(txtCard, 42, 11))
T(j) = Mid(txtCard, 58, 11)
If T(j) = "" Then T(j) = 0# Else T(j) =
CSng(T(j))
Next j
.....
End If
Loop
.....
```

该程序的部分窗口见图 2。

(a)												
LC	Member Force of Coupler					Member Stress of Coupler						
	V_x	V_y	T	M_y	M_z	Axial	S_Y	S_Z	B_Y	B_Z	N_{max}	N_{min}
LC1	2.11	1.07	4.05	-2.42	1.24	3.39	-1.12	-2.21	12.63	-6.48	17.58	-10.81
LC1	2.11	1.07	4.05	2.42	1.24	3.39	-1.12	2.21	-12.63	-6.48	17.58	-10.81
LC1	2.82	0.43	15.76	-3.22	0.51	13.18	-0.45	-2.95	16.82	-2.68	30.21	-3.85
LC1	2.82	0.43	15.76	3.22	0.51	13.18	-0.45	2.95	-16.82	-2.68	30.21	-3.85
LC1	2.92	0.36	21.14	-3.35	0.42	17.68	-0.38	-3.07	17.46	-2.21	35.28	0.08
LC1	2.92	0.36	21.14	3.35	0.42	17.68	-0.38	3.07	-17.46	-2.21	35.28	0.08
LC1	2.58	1.86	9.06	-2.96	-2.12	7.57	1.95	-2.71	15.47	11.06	26.59	-11.44
LC1	2.58	1.86	9.06	2.96	-2.12	7.57	1.95	2.71	-15.47	11.06	26.59	-11.44
LC2	1.43	0.66	4.76	1.64	-0.72	-3.98	0.69	1.50	-8.56	3.76	5.37	-13.34
LC2	1.43	0.66	4.76	-1.64	-0.72	-3.98	0.69	-1.50	8.56	3.76	5.37	-13.34
LC2	0.92	0.52	6.07	1.06	0.63	-5.08	-0.55	0.97	-5.51	-3.27	1.33	-11.49
LC2	0.92	0.52	6.07	-1.06	0.63	-5.08	-0.55	-0.97	5.51	-3.27	1.33	-11.49
LC2	0.48	0.79	5.02	-0.55	0.94	4.20	-0.83	-0.51	2.88	-4.89	9.87	-1.48
LC2	0.48	0.79	5.02	0.55	0.94	4.20	-0.83	0.51	-2.88	-4.89	9.87	-1.48
LC2	1.25	0.66	5.82	-1.43	-0.72	4.86	0.69	-1.31	7.49	3.74	13.23	-3.51
LC2	1.25	0.66	5.82	1.43	-0.72	4.86	0.69	1.31	-7.49	3.74	13.23	-3.51
LC3	0.05	0.51	2.03	-0.03	0.59	1.70	-0.53	0.05	0.15	-3.06	4.76	-1.36
LC3	0.05	0.51	2.03	0.03	-0.59	-1.70	0.53	0.05	0.15	3.06	1.36	-4.76

(b)						
LC	Displacement			Rotation		
	D_x	D_y	D_z	R_x	R_y	R_z
LC1	0.000000	-0.000060	0.036580	0.000580	0.000000	0.000000
LC2	0.000000	-0.000120	0.001740	0.002850	0.000000	0.000000
LC3	-0.000390	0.000000	0.000000	0.000000	0.002770	0.000000
LC4	0.000000	-0.000120	0.073160	0.001160	0.000000	0.000000
LC5	0.000000	0.000120	-0.001740	-0.002850	0.000000	0.000000
LC6	0.000390	0.000000	0.000000	0.000000	-0.002770	0.000000
LC7	0.011280	0.000000	0.000000	0.000000	-0.000060	-0.000150
LC8	0.000000	0.010850	-0.000030	-0.000020	0.000000	0.000000
LC9	-0.001210	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000920
LC10	0.000000	0.000060	-0.036580	-0.000580	0.000000	0.000000

(c)					
Data	LC				
	LC1	LC10	LC2	LC3	LC4
Max of V_x	2.923999786	2.923999786	1.425999999	0.107000001	5.847000122
Max of V_y	1.861999989	1.861999989	0.791999996	0.736000001	3.724000216
Max of T	21.13999939	21.13999939	6.072000027	9.565999985	42.27899933
Max of N_{max}	35.27944946	11.44058037	13.23383999	8.83425808	70.5588913
Min of N_{min}	-11.44058037	-35.27944946	-13.33553028	-8.83425808	-22.88116074
Max of Stress	130.8930054	130.8930054	54.47949982	62.63679886	261.7869873

图 2 基于 Microsoft Excel 的 VBA 宏处理程序

(a) 读取 GTStrudl 计算的內力和应力结果; (b) 读取 GTStrudl 计算的位移结果; (c) 计算结果的分析处理

Fig.2 VBA macro procedure based on Microsoft Excel.

(a) reading of member force and stress results; (b) reading of displacement results; (c) analysis for calculation results

3 有限元分析^[4,5]

3.1 计算模型

本文以 CA01 模块墙上某一 OLP 型预埋件 A 为例计算并验算其承载力。该预埋件的尺寸为 16"×24"×1"(406 mm×610 mm×26 mm), 板上有 8 根直径 d 为 0.75"(19 mm) 的锚筋, 预埋件 A 距离混凝土自由边的距离充足, 不考虑混凝土的剪切破坏。预埋件所支撑的工字梁通过连接件(牛腿)与预埋件连接, 如图 3 所示。

根据 GTStrudl 命令流模板文件建立计算模型, 如图 4 所示。预埋板由板单元模拟, 单元尺寸为 0.5"×0.5"(13 mm×13 mm), 机械套筒和锚筋由杆单元(构件)模拟。计算中, 外荷载传递到连接件上之后, 通过焊缝传递到预埋板上。在此, 将焊缝视为一组刚节点, 并为其定义形心 C1。锚筋端部设为固端约束。为了更好地模拟锚筋实际的工作状态, 有限元模型中锚筋的长度取为实际长度的一半进行分析。使用弹簧模拟混凝土与锚板以及锚筋的相互作用。

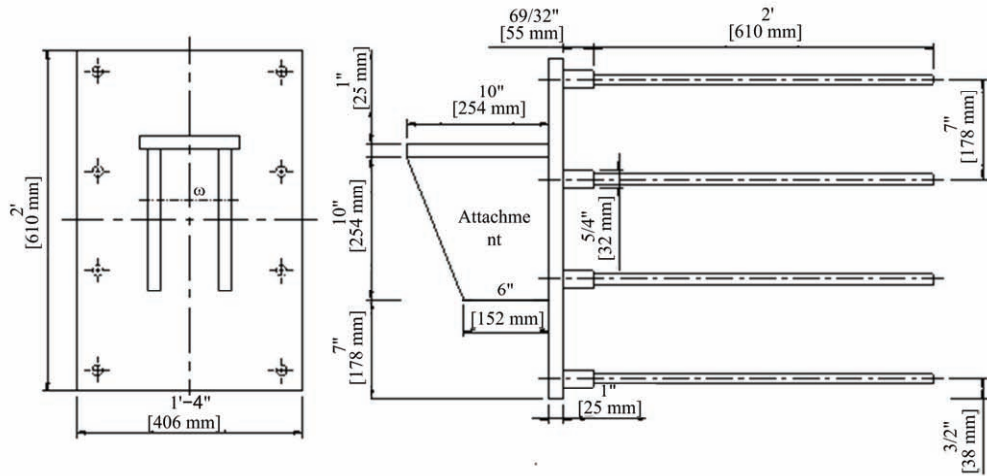


图 3 预埋件 A 示意图
Fig.3 Sketch for embedment A.

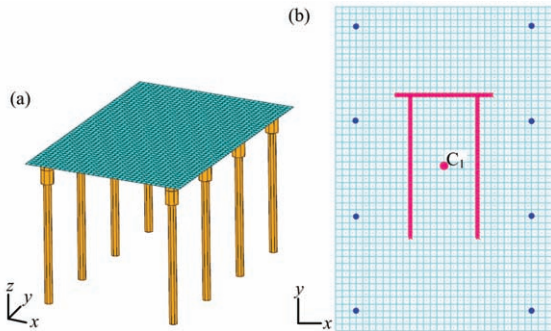


图 4 计算模型 (a) 轴测图; (b) 平面图
Fig.4 Isometric view(a) and plan view(b) of FEM model.

3.2 混凝土承压刚度

为更好地模拟实际情况, 使用线性受压弹簧模拟模块墙中的混凝土, 垂直作用在板单元的节点上。根据文献[6], 混凝土的弹性模量和承压刚度可以表示为:

$$E_c = 4731 \cdot \sqrt{f'_c} = 4731 \cdot \sqrt{27.6} = 24856 \text{ MPa}$$

$$K_c = \frac{E_c}{m(1-\nu^2)\sqrt{A}}$$

其中, $f'_c=27.6 \text{ MPa}$, 表示混凝土抗压强度值^[2]; m 表示板的形状系数 (正方形时为 0.95); ν 表示泊松比 (对于混凝土, 取为 0.17); A 表示板的面积。

考虑到预埋板和模块钢板之间的间距 (最大为 0.75" (19 mm)) 影响, OLP 型预埋件的弹簧承压刚度曲线见图 5 所示, 该曲线的命令流在第 2 节中已经给出。

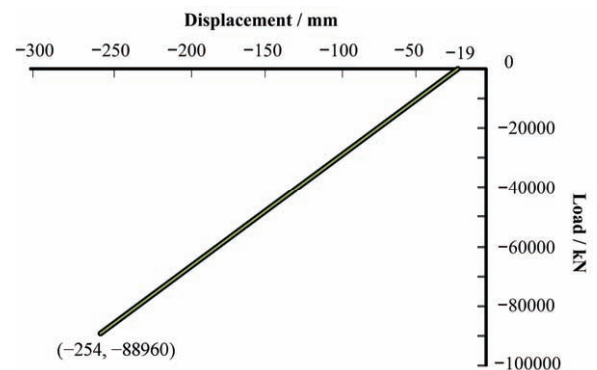


图 5 OLP 型预埋件的混凝土弹簧刚度曲线
Fig.5 Concrete spring stiffness curve.

3.3 计算结果

经过 GTStrudl 的计算分析, 并运用 VBA 宏处理程序, 得到该预埋件的承载力, 见表 1。预埋件 A 的最大荷载如表 2 所示。

按照公式(1)-(4)校核预埋件 A 的强度值, 结果符合要求, 如表 3 所示。

表 1 预埋件 A 的承载力
Table 1 Capacity for embedment A.

OLP 预埋件 OLP type embedment	板的承载力 Capacity of embedment plate			锚筋承载力 Capacity of embedment rebar					
	抗拉 Kips T_p /kN	抗弯 Kip-in M_{xp} /kN·m	抗弯 Kip-in M_{yp} /kN·m	抗拉 Kips T_s /kN	抗弯 Kip-in M_{xs} /kN·m	抗弯 Kip-in M_{ys} /kN·m	抗剪 Kips V_{xs} /kN	抗剪 Kips V_{ys} /kN	抗扭 Kip-in M_{zs} /kN·m
A	30.9	223.0	194.0	105.3	991.3	698.3	82.2	87.8	785.3
	(137.6)	(25.2)	(21.9)	(468.5)	(112.0)	(78.9)	(365.6)	(390.3)	(88.7)

表 2 预埋件 A 控制性外荷载
Table 2 Controlling design loads for embedment A.

OLP 预埋件 OLP type embedment	剪力 Kips F_x /kN	剪力 Kips F_y /kN	拉力 Kips F_z /kN	弯矩 Kips-in M_x /kN·m	弯矩 Kips-in M_y /kN·m	扭矩 Kips-in M_z /kN·m
A	16.5 (73.4)	25.8 (114.8)	20.2 (89.8)	14.1 (1.6)	20.4 (2.3)	7.7 (0.9)

表 3 预埋件 A 强度校核结果
Table 3 Interaction ratio for embedment A.

OLP 预埋件 OLP type embedment	预埋板 Embedment plate	锚筋 Embedment rebar			
	公式(1)Equation (1) (max=1)	公式(2)Equation (2) (max=1)	公式(3)Equation (3) (max=1)	公式(4)Equation (4) (max=1.2)	
A	0.78	0.24	0.37	0.61	

4 结语

本文介绍了 OLP 型预埋件的设计方法以及自编的基于 VBA 宏处理技术的有限元设计程序,得到如下结论:

根据相关规范总结的设计方法,结合 GTStrudl 有限元分析程序,得到的应力、变形和内力结果更为精确。

使用自编的 GTStrudl 命令流建模模板进行建模和计算,并通过自编的 Excel 宏处理程序对计算结果进行处理,可以快速得到预埋板和锚筋的抗拉、抗弯、抗剪和抗扭承载力,并进行强度验算。该方法简便、通用性强,大大提高了计算效率。

针对预埋件距离混凝土自由边距离较小的情况,还应根据规范 ACI 349 的规定计算锚筋的抗剪承载力,并和 GTStrudl 计算得到的承载力进行比较,取其较小值作为锚筋的抗剪承载力。如果承载力不足,可以通过增大预埋件尺寸或者在模块墙中增加锚固钢筋的方式来处理。

本文针对 OLP 预埋件的分析方法,同样适用于核电厂中传统的钢筋混凝土结构预埋件,文中提及的建模程序和 Excel 宏处理程序也同样适用,只需做一些必要的修改即可,工程应用价值高。

参考文献

- “GTStrudl”[CP], Version 29, by Georgia Tech Research Corporation
- 伍远高. Excel VBA 开发技术大全[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009
WU Yuangao. Excel VBA Development Skill Summary[M]. Beijing: Tsinghua University press, 2009
- ACI 349-01, Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures[S]. American Concrete Institute, 2001
- 马臣杰, 钟玉柏, 许璇. 幕墙预埋件承载力非线性有限元分析[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 94-96
MA Chenjie, ZHONG Yubo, XU Xuan. Nonlinear finite element analysis of bearing capacity of embedded part in curtain wall[J]. Building Structure, 2011, 41(2): 94-96
- 李佳佳. 硬质 PVC 预埋件力学性能试验与研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007
LI Jiajia. Experimental Study and Research on Mechanical Properties of Rigid Polyvinyl Chloride Embedded Part[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007
- Timoshenko S P. 弹性理论[S]. 北京: 清华大学出版社, 2004
Timoshenko S P. Theory of Elasticity[S]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004

OLP embedment design method research for AP1000 nuclear plant

LI Cheng LI Shaoping LIU Jianwei

(Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute, Shanghai 200233, China)

Abstract Background: One of the most advanced nuclear power technology, the first AP1000 reactor is under construction in China. Modularization is one of the main characteristics for AP1000 nuclear plant building. Module wall with steel face plate is used instead of reinforced concrete structure wall. A number of OLP embedments need to be installed into the module wall to connect other structures such as pipes, equipments, operation platforms and any other component attached to the module wall. Therefore, the design of embedment is very important in AP1000 structural design. **Purpose:** A finite element analysis method and tool for embedment design is needed for convenience. **Methods:** This paper applies the self-developed GTStrudl command template and VBA macro program for embedment capacity calculation and evaluation based on Microsoft Excel to the embedment design. **Results:** A Microsoft Excel template for embedment design is developed. **Conclusions:** The analysis method and template brings reasonable results and may provide some help and use for reference for the engineering practice.

Key words AP1000, OLP embedment, GTStrudl finite element analysis software, VBA macro program

CLC TU311.41