

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.05.019

# 变电站装配式柱下独立基础设计方法

陈城<sup>1</sup>, 敖斌<sup>2</sup>, 关新鹏<sup>3</sup>, 于飞<sup>4,5</sup>, 朱东<sup>4</sup>

(1. 国网内蒙古东部电力有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010010; 2. 安徽华电工程咨询设计有限公司, 安徽 合肥 230061; 3. 国网通辽供电公司, 内蒙古 通辽 028000; 4. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 5. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

**摘要:**为进一步推动变电站模块化建设,文章以变电站工程中现浇混凝土柱下独立基础为原型,分析其受力特点和基础形式,进行基础装配式分块和连接设计,并通过 ABAQUS 有限元模拟和相关规范公式验证所设计装配式基础是否满足承载力和抗裂要求。研究表明:分块设计方案较为合理,可以满足工厂制作方便、运输及吊装要求;预应力-抗剪键的连接方式适用于装配式基础,所设计的预应力筋和抗剪键满足基础接缝面的抗弯、抗剪承载力和抗裂要求,并且具有一定的安全储备。

**关键词:**变电站;独立基础;装配式;预应力;抗剪键

**中图分类号:**TU378 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)05-0696-07

## Design method of substation assembled concrete independent foundation

CHEN Cheng<sup>1</sup>, AO Bin<sup>2</sup>, GUAN Xinpeng<sup>3</sup>, YU Fei<sup>4,5</sup>, ZHU Dong<sup>4</sup>

(1. State Grid East Inner Mongolia Electric Power Co., Ltd., Hohhot 010010, China; 2. Anhui Huadian Engineering Consulting and Design Co., Ltd., Hefei 230061, China; 3. State Grid Tongliao Power Supply Company, Tongliao 028000, China; 4. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 5. Xinjiang Key Laboratory of Water Conservancy Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi 830052, China)

**Abstract:** To further promote the modular construction of substation, the cast-in-place concrete independent foundation in substation project is used as a prototype to analyze its force characteristics and foundation form, and the assembled block and connection design of the foundation is carried out, and the bearing capacity and crack resistance of the designed assembled foundation is verified through ABAQUS finite element simulation and relevant specification formula. The results show that the design of the blocks is reasonable and can meet the requirements of factory fabrication, transportation and lifting; the prestress-shear key connection method is suitable for the assembled concrete foundation, and the designed prestressed tendons and shear keys meet the requirements of bending and shear bearing capacity and crack resistance of the foundation joint surface, and have a certain safety reserve.

**Key words:** substation; independent foundation; assembled; prestressed; shear key

## 0 引言

近年来,电力工程的快速发展对工程施工效率、建设周期和工程投资提出更高的要求。采用传统现浇混凝土的方式进行变电站施工,将制约电力工程的建设,因此模块化建设技术被广泛应

用于变电站<sup>[1]</sup>。

目前,国家电网公司的模块化建设主要对建构物的地上部分采用装配式技术,如钢结构建筑物、钢构支架等。地下建构物基础装配式设计多运用输电线路基础,文献[2-4]通过试验研究输电线路装配式基础的共同工作性能和抗拔性

收稿日期:2022-09-07;修回日期:2022-10-19

基金项目:2022年新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室研究资助项目(ZDSYS-YJS-2022-11)

作者简介:陈城(1990—),男,内蒙古呼和浩特人,国网内蒙古东部电力有限公司高级工程师。

能,得到水平荷载会降低扩展基础的抗拔承载性能;文献[5]设计一种由若干个方钢管焊接而成的装配式电力偏心基础,该基础能显著削弱水平荷载作用的不利影响;文献[6]设计一种由槽钢、工字钢、角钢组成的装配式型钢基础,并探究基础的变形特性;文献[7]针对冻土地区输电线路提出一种锥台形装配式基础,通过模型试验证明该基础具有良好的抗冻及承载特性;文献[8]设计一种含有十字形连接梁的装配式扩展基础。尽管众多学者对输电线路装配式基础形式、连接方式和受力性能开展了研究,但目前对变电站地下建构筑物基础装配式设计的研究较少。

本文针对变电站基础形式之一的柱下独立基础的受力特点和基础形式,参照节段预制预应力拼装梁桥,提出采用后张预应力拼装技术的预制混凝土基础形式。以某实际柱下独立基础为例,对其进行分块设计和连接设计,并通过 Abaqus 有限元模拟和相关规范公式验证所设计装配式基础是否满足承载力和抗裂要求。

### 1 工程概况与柱下独立基础介绍

工程项目为蒙东赤峰打粮沟 66~220 kV 模块化变电站项目,该项目建构筑物基础主要有柱下独立基础、构架基础、设备支架基础、主变场地基础等。本文主要针对柱下独立基础开展研究。现浇柱下独立基础相关参数如图 1 所示。

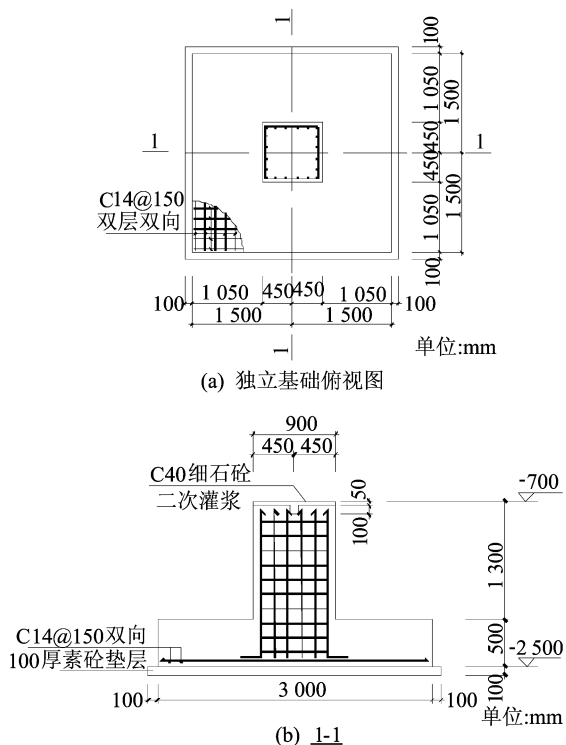


图 1 现浇柱下独立基础示意图

基础顶面标高为 -700 mm、基础埋深为 -2 500 mm,基础高度为 1 800 mm(基础柱高为 1 300 mm,基础底板高为 500 mm)。基础底面尺寸为 3 000 mm×3 000 mm,基础混凝土强度 C30,底板配筋为双层双向 C14@150。

### 2 装配式独立基础方案设计

#### 2.1 装配式独立基础分块设计

本文在不改变原基础尺寸和形式的前提下,对现浇柱下独立基础进行装配式分块设计。分块设计考虑的主要因素如下:①方便工厂大规模预制生产,分块单元应尽量遵循模块化设计;②分块单元的尺寸和质量不宜过大,便于货车运输和施工现场吊装。

装配式独立基础分块设计如图 2 所示,本文将独立基础底板沿基础柱边缘进行水平分块。分块后的基础由左、中、右 3 个部分组成,其中:左、右 2 个部分完全相同,编号为 GJ-1;中间部分为 GJ-2。

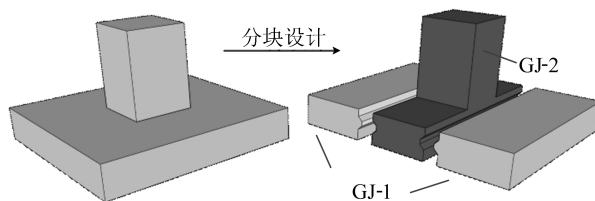


图 2 装配式独立基础分块设计

#### 2.2 装配式独立基础受力分析

装配式独立基础受力示意图如图 3 所示。

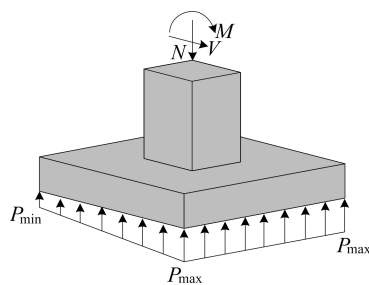


图 3 装配式独立基础受力示意图

图 3 中,基础柱顶所受剪力、轴力和弯矩的取值方法参照文献[9]中 3.0.5 节相关规定,即在进行装配式基础正常使用极限状态下的裂缝宽度计算时,采用荷载标准组合的效应设计值;在进行装配式基础承载能力极限状态下的强度计算时,采用荷载基本组合的效应设计值。该结构 PKPM

分析模型中,柱顶在荷载标准组合下的效应设计值  $M_k=220.037 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,  $V_k=50.256 \text{ kN}$ ,  $N_k=1107 \text{ kN}$ ;柱顶在荷载基本组合下的效应设计值  $M_d=248.054 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,  $V_d=77.192 \text{ kN}$ ,  $N_d=1503 \text{ kN}$ 。基础底板所受基底反力参考文献[9],计算公式为:

$$\begin{aligned} P_{\max} &= \frac{N_{\text{底}}}{A_{\text{底}}} + \frac{M_{\text{底}}}{W_{\text{底}}}, \\ P_{\min} &= \frac{N_{\text{底}}}{A_{\text{底}}} - \frac{M_{\text{底}}}{W_{\text{底}}} \end{aligned} \quad (1)$$

其中:  $P_{\max}$ 、 $P_{\min}$  为基础底面的最大、最小压应力值;  $A_{\text{底}}$  为基础底面面积;  $W_{\text{底}}$  为基础底面的抵抗矩;  $N_{\text{底}}$  为基础柱顶竖向力值、基础自重和基础上覆土压力合力;  $M_{\text{底}}$  为基础底板所受弯矩。

通过式(1)计算得出在荷载标准组合和荷载基本组合作用下的基础底板所受基底反力、相应的分块单元接缝面最大弯矩和剪力值,计算结果见表 1 所列。

表 1 基础受力情况

荷载标准组合作用下				荷载基本组合作用下			
$P_{\max,k}/P_{\min,k}/$ kPa	$M_k/$ kPa	$V_k/$ (kN·m)	kN	$P_{\max,d}/P_{\min,d}/$ kPa	$M_d/$ kPa	$V_d/$ (kN·m)	kN
192	54	291.1	529.2	253	81	381.4	702.5

表 1 中:  $P_{\max,k}$ 、 $P_{\min,k}$  为荷载标准组合作用下基础底面的最大、最小压力值;  $M_k$  为荷载标准组合作用下接缝面最大弯矩值;  $V_k$  为荷载标准组合作用下接缝面最大剪力值;  $P_{\max,d}$ 、 $P_{\min,d}$  为荷载基本组合作用下基础底面的最大、最小压力值;  $M_d$  为荷载基本组合作用下接缝面最大弯矩值;  $V_d$  为荷载基本组合作用下接缝面最大剪力值。

### 2.3 装配式独立基础连接设计

为保证被拆分基础板的抗弯、抗剪承载力以及抗裂能满足设计要求,本文采用预应力-抗剪键的连接方式进行基础拆分单元的连接,即抗剪键被设置于分块单元间的接缝面上,预应力筋采用有黏结后张法施工,通过预留的预应力孔道垂直穿过接缝,在张拉后对接缝面提供预压力。该方式常用于预应力拼接式桥梁结构中,是一种成熟安全的装配式连接方式<sup>[10-11]</sup>。

#### 2.3.1 装配式基础材料、尺寸、配筋设计

基础材料、尺寸、普通钢筋配筋与现浇原型基础相同,其中基础底板高为 500 mm,由基础的抗冲切承载力确定。混凝土强度为 C30,普通钢筋

强度为 HRB400。由于基础底板尺寸较小,为减少因锚具变形引起的预应力损失,预应力筋选择预应力螺纹钢筋,锚具选择螺母锚具。同时考虑防腐要求,采用有黏结预应力筋,在张拉完成后对预应力筋孔道进行灌浆。

#### 2.3.2 预应力筋位置设计

装配式基础分块单元依靠预应力筋提供预压力成为整体,在接缝面处由预应力筋和受压区混凝土共同抵抗截面弯矩。因此,预应力筋应布置在接缝面受拉区。同时在施工阶段,预应力筋张拉完毕后,上部结构产生的基底反力还未作用在基础底面上。此时接缝面上仅作用有偏心布置的预应力筋产生的压力  $N_{pe}$ ,其受力情况如图 4 所示。

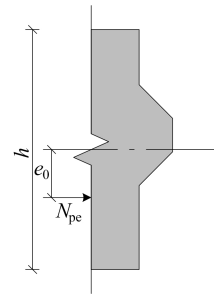


图 4 施工阶段拼缝接触面受力示意图

在仅有预应力作用下接缝面边缘应力为:

$$\sigma = \frac{N_{pe}}{A} - \frac{N_{pe}e_0}{W} \quad (2)$$

将  $A=bh$ 、 $W=bh^2/6$  代入式(2)中,可得:

$$\sigma = \frac{6N_{pe}}{bh^2} \left( \frac{h}{6} - e_0 \right) \quad (3)$$

其中:  $N_{pe}$  为预应力筋的总有效预压力;  $A$  为接缝面面积;  $e$  为预应力筋偏心距;  $W$  为接缝面的抵抗矩;  $h$  为接缝面高度;  $b$  为接缝面宽度。

由式(3)可知:在施加预应力时,当预应力筋偏心距  $e \leq h/6$ ,接缝面上部受拉边缘应力大于 0,此时接缝面处于全截面受压状态。本文在进行装配式基础设计时,为避免在施工阶段张拉预应力后接缝面上部张开宽度过大,同时考虑预应力筋需要具有足够的保护层厚度,防止发生黏结、滑移破坏。取预应力筋偏心距  $e$  为 100 mm,略大于  $h/6$  (83 mm)。

#### 2.3.3 预应力筋面积和张拉控制应力设计

预应力筋的面积和张拉控制应力由拼缝截面的受弯承载力和抗裂要求共同确定。现浇混凝土受弯构件最大裂缝宽度计算方法无法适用于装配

式基础拼缝接触面的开裂宽度计算。因此,本文参照文献[12]控制构件(裂缝控制等级为一级、二级)受拉边缘混凝土应力的方法,进行拼缝处的裂缝宽度控制。拼缝接触面之间一般采用环氧树脂胶接的方式,而环氧树脂胶与混凝土的黏结强度取决于环氧树脂胶的性能、涂抹均匀程度以及所处环境条件等,其黏结强度无法准确估算。为结构安全考虑,在进行拼缝接触面裂缝控制时,忽略环氧树脂胶与混凝土的黏结强度,仅考虑荷载标准组合和预应力筋有效应力的共同作用。荷载标准组合作用下拼缝接触面受力如图 5 所示。

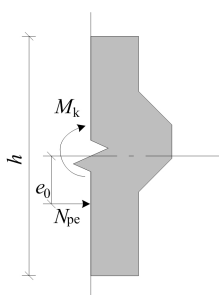


图 5 荷载标准组合作用下拼缝接触面受力示意图

荷载标准组合作用下拼缝接触面下侧受拉边缘应力满足:

$$\sigma = \frac{N_{pe}}{A} - \frac{M_k - N_{pe}e_0}{W} \geq 0 \quad (4)$$

预应力筋在基础板接缝面上主要充当抗弯纵筋的作用,因此需要根据基础底板弯矩设计值确定预应力筋面积。有黏结预应力筋在接缝面提供的抗弯承载力参照文献[12],满足:

$$M_u = \alpha_1 f_c b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) \geq M_d \quad (5)$$

$$x = \frac{f_{py} A_p}{\alpha_1 f_c b} \quad (6)$$

其中: $M_u$  为构件拼缝截面受弯承载力; $f_c$  为混凝土轴心抗压强度设计值; $x$  为混凝土受压区高度; $h$  为接缝面有效高度; $M_d$  为构件拼缝截面弯矩设计值; $f_{py}$  为预应力筋抗拉强度设计值; $A_p$  为受拉区纵向预应力筋的截面积。

根据式(4)、式(5),预应力筋选择配置 4 根直径为 32 mm 的 PSB930 预应力螺纹钢筋,张拉控制应力为 790 MPa,预应力损失为 229 MPa,有效预应力为 561 MPa。具体预应力损失计算结果见表 2 所列。同时验算在基础自重作用下拼缝面压应力均大于 0,说明基础接缝面在施工工况和正常使用工况下接缝面均未开裂。

需要说明的是,预应力筋的面积由于抗裂要求

起到了控制作用。采用上述配筋结果计算得到接缝面的实际受弯承载力设计值为 794.7 kN·m。从表 1 可以看出,基本组合下截面弯矩设计值为 381.4 kN·m,富裕程度较大。

表 2 施加预应力参数 单位:MPa

$\sigma_{con}$	预应力损失				$\sigma_{pe}$
	$\sigma_{11}$	$\sigma_{12}$	$\sigma_{14}$	$\sigma_{15}$	
790	133	4	24	68	561

表 2 中: $\sigma_{11}$  为由于张拉端锚具变形和预应力筋内缩引起的预应力损失值; $\sigma_{12}$  为预应力筋与孔道壁之间的摩擦引起的预应力损失值; $\sigma_{14}$  为预应力筋的应力松弛引起的预应力损失值; $\sigma_{15}$  为混凝土收缩、徐变引起受拉区和受压区纵向预应力筋的预应力损失值<sup>[12]</sup>; $\sigma_{con}$  为预应力筋张拉控制应力; $\sigma_{pe}$  为预应力筋有效预应力。

### 2.3.4 抗剪键设计

装配式基础设计在接缝面上设置抗剪键,抗剪键尺寸设计参照文献[13-14]的相关规定。抗剪键键齿根部高为 210 mm,键齿厚度为 70 mm。由于预应力筋设计在距基础板底面 150 mm 处,为避免预应力筋穿过抗剪键齿,将抗剪键设置在接缝中线上移 30 mm 位置以避开预应力孔道。

接缝面抗剪承载力计算公式参照文献[15],满足:

$$V_u = 0.1 f_c A_k + 0.05 N_{pe} + 1.65 A_{sd} \sqrt{f_c f_{py}} \geq V_d \quad (7)$$

其中: $V_u$  为构件拼缝接触面受剪承载力; $A_k$  为抗剪键键齿根部面积; $A_{sd}$  为穿过拼缝有黏结钢筋面积; $V_d$  为截面剪力设计值。

按照式(7)计算得到装配式基础接缝面抗剪承载力为 1 539.3 kN,大于表 1 基本组合下的剪力设计值 702.5 kN,表明接缝面具有足够的抗剪承载力。根据上述设计方案,所设计装配式基础正视图如图 6 所示,装配式基础配筋大样如图 7 所示,基础设计如图 8 所示。

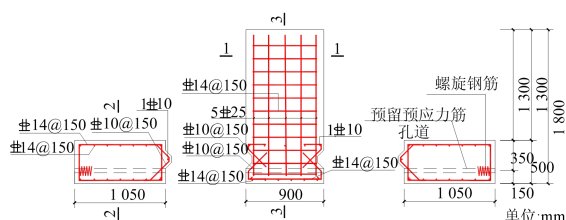


图 6 基础正视图

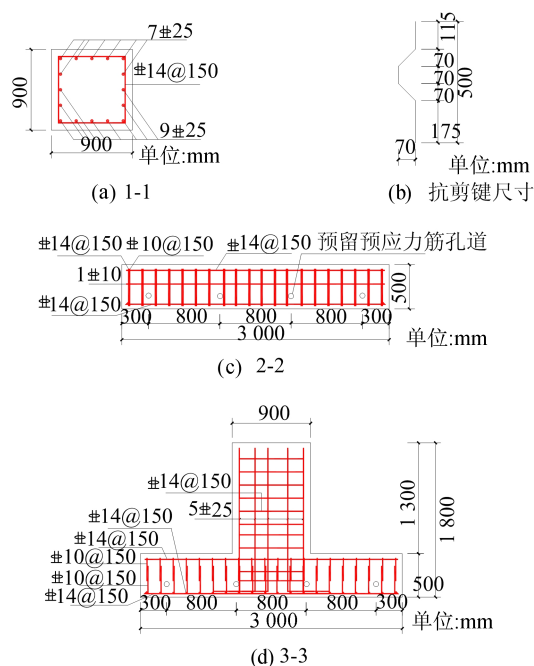


图 7 装配式基础配筋大样图

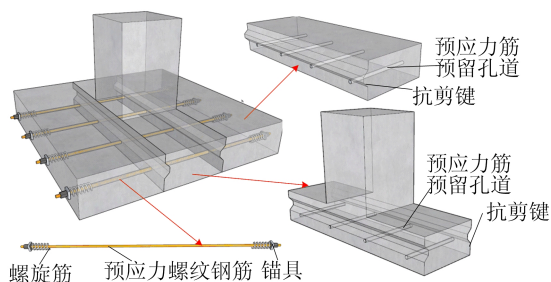


图 8 装配式基础设计

### 3 数值模拟分析

#### 3.1 模型建立

本文通过 ABAQUS 有限元模拟软件对设计的装配式基础进行数值分析,研究装配式基础在施工工况、正常使用工况和极限荷载工况的受力状态。装配式基础有限元模型如图 9 所示。

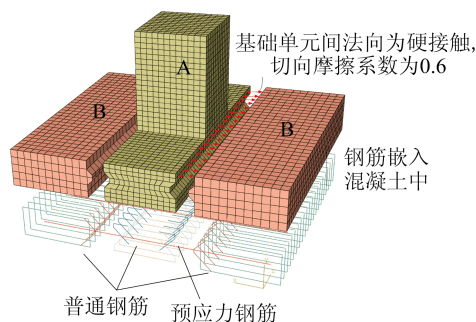


图 9 装配式基础有限元模型

混凝土采用 8 节点实体单元(C3D8R),本构

采用混凝土损伤塑性模型。

HRB400 普通钢筋和 PSB930 预应力螺纹钢筋采用两结点线性三维桁架单元(T3D2)建模,本构采用双折线模型。接缝面之间接触选用面面接触,摩擦系数取 0.6。

预应力筋锚垫板与构件之间简化选用绑定约束。普通钢筋、有黏结预应力筋与混凝土之间选用嵌入约束来模拟黏结作用,预应力筋与锚具的相互作用也选用嵌入约束。

因为 ABAQUS 软件中嵌入约束必须在初始分析步进行,在有黏结预应力构件建模中,通过降温法施加预应力无法模拟出预应力筋先张拉产生预应力后嵌入到混凝土中的过程,所以本文采用等效荷载法施加预应力筋的预应力,即直接将施加预应力所产生的预压力等效转化为表面荷载施加在锚垫板上。

采用此方法建模,ABAQUS 软件无法显示预应力筋张拉产生的有效预应力,因此所模拟 PSB930 的应力达到 369、519 MPa 时,分别对应于实际情况下 PSB930 的屈服强度和抗拉强度(扣除有效预应力 561 MPa)。本文在第 1 个分析步中施加预压力,在第 2 个分析步中施加荷载,基础底面采用均布荷载以模拟基础受力,并将柱顶面平动自由度固定。加载方式如图 10 所示。

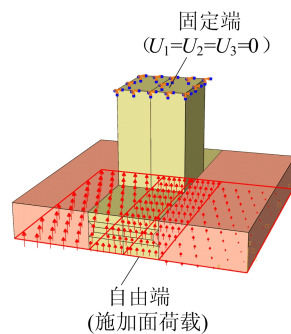


图 10 加载方式示意图

#### 3.2 施工工况分析结果

对装配式基础施工工况,即仅有基础自重作用下工况进行受力分析。

施工工况下基础应力分布如图 11 所示。从图 11a 可以看出,施加预应力后,基础单元接缝面的接触应力大于 0,处于全截面受压状态,表明基础接缝面并未张开。从图 11b 可以看出,基础混凝土最大压应力为 15.33 MPa,集中在局部受压的预应力筋锚固部位,其余部位受力较小,满足设计要求。

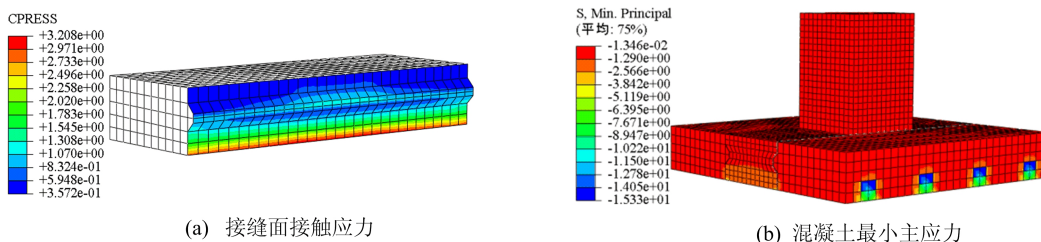


图 11 施工工况下基础应力云图

### 3.3 正常使用工况分析结果

对装配式基础正常使用工况,即在基础底面施加荷载标准组合基底反力工况进行受力分析,正常使用工况下基础应力分布如图 12 所示。从图 12a 可以看出,荷载标准组合作用下,基础单元接缝面的接触应力仍大于 0,处于全截面受压状

态,表明基础接缝面并未张开。

从图 12b 可以看出,混凝土最大压应力为 15.34 MPa,主要集中在局部受压的预应力筋锚固部位,受力较大一侧接缝面受压部位混凝土最大压应力约为 10 MPa,其余部位受力较小,基础未发生破坏。

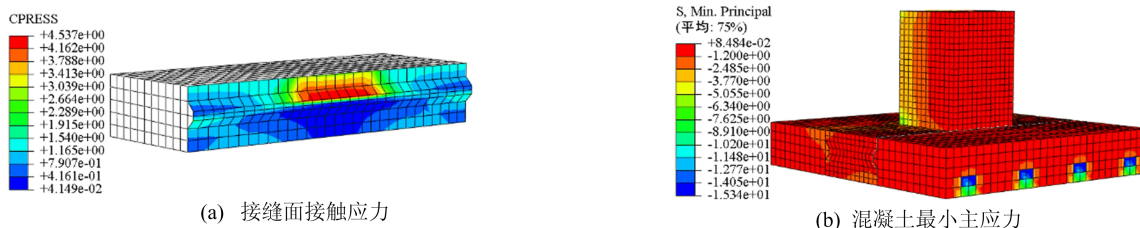


图 12 正常使用工况下基础应力云图

### 3.4 极限荷载工况分析结果

拆分单元间的接缝面是基础板的薄弱截面,有必要研究基础破坏发生在接缝面处的破坏特征。因此在基础底面施加从小到大的均布荷载,直至构件破坏。为了避免基础板沿另一方向发生破坏,在建模时增强另一方向的纵筋,使得拼缝处最先发生破坏。分析得到构件破坏时,基础底面所需施加的均布荷载值约为 590 kPa,相应的拼缝截面弯矩为 975 kN·m,为荷载标准组合下弯矩的 2.5 倍,可见装配式基础具有较大的安全

储备。

极限荷载工况下基础应力分布如图 13 所示。从图 13a 可以看出,等效荷载法下预应力钢筋 Mises 应力最高已达 370 MPa(对应预应力筋实际 Mises 应力 931 MPa),此时预应力筋已经屈服,屈服位置在拆分单元间的接缝面处,位于基础单元内部的预应力钢筋应力相对较小,未达到预应力钢筋的屈服强度。从图 13b 可以看出,拼缝面混凝土压应力主要出现在顶部受压区域,且以柱脚处较为严重。

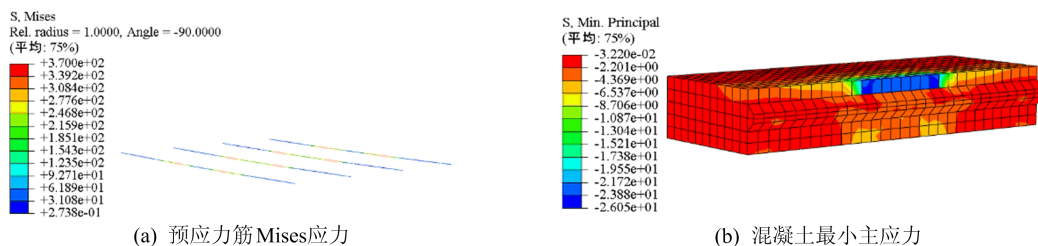


图 13 极限荷载工况下基础应力云图

上述分析结果表明,所设计装配式基础在施工工况和正常使用工况下基础接缝面未开裂,基础未发生破坏,在极限荷载作用下,拼缝面处破坏为预应力筋屈服,接缝面受压部位混凝土被压碎。

## 4 结 论

本文基于变电站工程项目的柱下独立基础设计预应力筋抗剪键装配式独立基础,并采用有限

元软件分析了基础在 3 种工况下的受力性能,主要结论如下。

1) 预应力抗剪键连接方式可增强装配式基础的整体性和刚度,为接缝面提供抗弯和抗剪承载力,该方式可被用于装配式基础的连接设计。

2) 通过相关规范公式计算和有限元模拟分析表明,所设计装配式基础满足设计要求,即从施工至正常使用阶段,基础不发生破坏,接缝面不开裂。

3) 变电站基础采用装配式设计施工,可进一步推动变电站模块化建设。对不同的变电站基础形式提出装配化设计是未来研究的主要方向。

### [参 考 文 献]

- [1] 张群. 模块化智能变电站在电力工程设计中的应用[J]. 珠江水运, 2021(23): 109-110.
- [2] 鲁先龙, 乾增珍, 童瑞铭. 混凝土预制装配式扩展基础抗拔试验[J]. 工程力学, 2013, 30(1): 215-220.
- [3] 乾增珍, 鲁先龙, 丁士君. 塔克拉玛干沙漠输电线塔装配式基础试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2359-2364.
- [4] 乾增珍, 鲁先龙, 童瑞铭. 上拔水平力组合荷载作用下混凝土扩展基础承载性能试验[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(5): 573-578.
- [5] 查晓雄, 范佳琪, 肖世奎, 等. 一种装配式电力偏心基础的抗拔性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(12): 167-171.
- [6] 张大长, 蒋刚, 林致添, 等. 装配式型钢基础抗压抗拔承载力的试验及计算[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2096-2100, 2118.
- [7] 王卫东, 崔强, 韩杨春, 等. 锥台型装配式基础冻拔与抗压承载性能模型试验[J]. 人民长江, 2021, 52(1): 196-203.
- [8] LI T, WANG Y M, CHAI L J, et al. Research on design of the prefabricated foundation in substations[J]. Journal of Physics(Conference Series), 2021, 1904: 1-4.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 9-12.
- [10] 石玉师. 桥梁拼接施工中横向预应力施工技术研究[J]. 安徽建筑, 2011, 18(5): 145-146.
- [11] 彭华春, 张康康, 时松, 等. 节段预制拼装桥梁研究综述[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(10): 75-83.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构设计规范: 2015 年版: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 151.
- [13] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018: 121.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 装配式混凝土结构技术规程: JGJ 1—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 19-21.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 预应力混凝土结构抗震设计标准: JGJ/T 140—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019: 37.

(责任编辑 张 镛)

### (上接第 641 页)

- [15] WU Z, SHEN C, HENGEL A. Wider or deeper: revisiting the ResNet model for visual recognition[J]. Pattern Recognition, 2019, 90: 119-133.
- [16] SZEGEDY C, IOFFE S, VANHOUCHE V, et al. Inception-v4, inception-ResNet and the impact of residual connections on learning[C]//Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. [S. l.]: AAAI, 2016: 4278-4284.
- [17] LIAO M, WAN Z, YAO C, et al. Real-time scene text detection with differentiable binarization[C]//Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. [S. l.]: AAAI, 2020: 11474-11481.
- [18] WANG G B, ZHANG W Q. An RNN and CRNN based approach to robust voice activity detection[C]//2019 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC). [S. l.]: s. n., 2019: 1347-1350.
- [19] 骆健, 蒋旻, 刘星, 等. 多尺度卷积递归神经网络的 RGB-D 物体识别[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(9): 2834-2837, 2870.
- [20] NICAUD C, ROTONDO P. Random regular expression over huge alphabets[J]. International Journal of Foundations of Computer Science, 2021, 32(5): 419-438.

(责任编辑 吴 亮)