

DOI: 10.11779/CJGE2017S2041

与上部建筑结合的地下变电站转换结构分析与设计

苏银君^{1, 2}, 姜 波³, 翁其平^{1, 2}

(1. 华东建筑设计研究院有限公司上海地下空间与工程设计研究院, 上海 200002; 2. 上海基坑工程环境安全控制工程技术研究中心, 上海 200002;
3. 上海电力设计院有限公司, 上海 200025)

摘要: 虹杨变电站是与上部建筑结合的深埋地下变电站, 能够很好地解决城市用电问题和土地使用紧张问题之间的矛盾, 但其在电力系统的应用及研究较少, 面临新的挑战, 包括上下建筑的协调与转换、转换结构的抗震与防连续倒塌等安全性问题。对比了各种转换结构类型, 选择了厚板转换形式, 并采用有限元软件对其受力和变形进行了精细化分析。在抗震方面, 采用振型分解反应谱法, 建立了虹杨变电站地上、地下结构的整体三维有限元模型, 考虑土的弹性约束影响, 考虑水平和竖向地震力, 进行了抗震性能设计, 得到了地震作用下上下结构的共同作用及转换厚板的应力变形规律, 指导了本工程转换厚板的抗震设计。

关键词: 地下变电站; 上部建筑; 转换; 抗震; 防连续倒塌

中图分类号: TU463 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2017)S2-0166-05

作者简介: 苏银君 (1984-), 男, 江苏南通人, 本科, 主要从事建筑结构的设计与研究工作。E-mail: suyinjun163@sina.com。

Analysis and design of conversion structure of an underground substation combined with superstructure

SU Yin-jun^{1, 2}, JIANG Bo³, WENG Qi-ping^{1, 2}

(1. Shanghai Underground Space Engineering Design & Research Institute, East China Architecture Design & Research Institute Co., Ltd.,
Shanghai 200002, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Safety Control for Facilities Adjacent to Deep Excavations,
Shanghai 200002, China; 3. Shanghai Electric Power Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200025, China)

Abstract: Hongyang Substation is combined with the upper part of the building of deep buried underground substation, and it can well solve the contradictions between urban electricity and land use tension. However, in power system application, there are fewer researches, and new challenges occur, including coordination and conversion of upper and lower structures, seismic resistance of conversion structure and anti-progressive collapse and other security issues. Various kinds of structure types are compared, and the form of thick plate is selected. The stress and deformation are analyzed by using the finite element software. The whole three-dimensional finite element model of the ground and underground structure of the substation is established by using the mode decomposition response spectrum method. Considering the influences of elastic constraint, horizontal and vertical seismic forces, the seismic performance is designed, and the joint action of the upper and lower structures and the stress and deformation rules of the plate are obtained.

Key words: underground substation; superstructure; conversion; resistance; anti-progressive collapse

0 引言

近年来, 随着中国城市化建设的加快, 城市用电量快速增长与城市土地面积的日益紧张, 越来越多的地下变电站将与上部建筑相结合进行建造。但是相比于地上变电站或纯地下变电站, 有上部结构的地下变电站的受力性能变得更加复杂: ①由于上下的使用功能不同, 地下变电站的柱网通常很大, 而上部结构的柱网普遍较小, 上下结构的柱网无法很好的协调一致,

所以必须选择合适的转换形式, 才能较好的协调上下结构的受力和变形; ②在地震作用下, 上部结构所受地震力通常较大, 而地下室受地震作用较小, 一般不受地震作用控制, 但是本工程属于重要建筑, 对安全要求很高, 尤其是转换层作为上部结构的嵌固端, 其抗震能力关系到上下结构的安全, 所以应对地震作用对转换结构的影响加强分析计算。

1 工程概况

虹杨 500 kV 变电站工程位于上海市区东北部逸仙路以东、小吉浦河以西、三门路以南、政立路以北的一块典型软土基地上。工程结构形式为地下三层框架—剪力墙结构变电站，地下建筑边长为 $68.4\text{ m} \times 166\text{ m}$ ，埋置深度约 24 m，地上为三栋六层（含 $\pm 0.0\text{ m}$ 标高以下夹层）框架结构生产管理用房，总高约 24 m。上下结构需在-2.1 m 标高通过转换层结构过渡（图 1）。

地下室框支柱为与逆作阶段钢管混凝土芯柱相结合的外包钢筋混凝土方柱，截面宽度由轴压比控制，为 1000, 1350, 1600 mm；地上框架柱为钢筋混凝土矩形柱，截面宽度约为 800 mm。地下室周边采用 1200 mm 厚“两墙合一”地下连续墙，作为基坑逆作阶段围护墙，内设 1000 mm 钢筋混凝土内衬墙，二者共同作为正常使用阶段的地下室外墙。

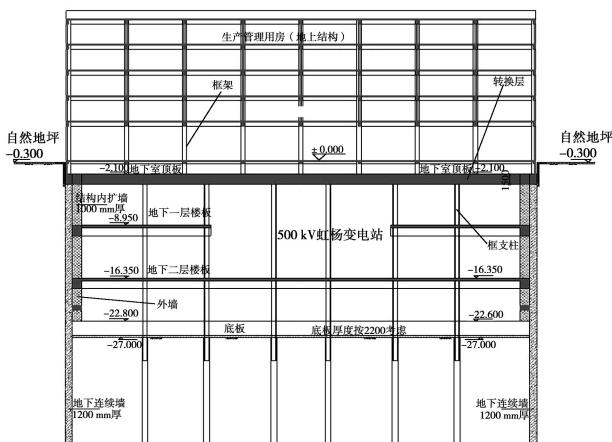


图 1 虹杨 500 kV 变电站结构剖面图

Fig. 1 Structural profile of Hongyang 500 kV Substation

2 转换层结构选型

从图 1 可知，上下结构的柱网均无法连续，所以必须在地下室顶板进行转换，目前较为常见的转换形式有梁式转换、桁架转换、厚板转换等。

梁式转换受力性能较好、自重较轻、构造简单、施工较方便，最为常用。但当跨度较大，上部结构荷载较大时，将导致梁截面很大，占用太多建筑净空。且上部柱网布置与地下室柱网不对齐，转换梁布置困难，存在二次或三次转换，增加了力的传递途径和节点构造难度。桁架转换利用转换层上下楼盖处的结构梁作为上下弦杆，附以转换层内腹杆，从而形成刚接桁架，能提供很大的刚度来进行结构转换，能充分利用构件的截面承载力和材料特性，适用于转换跨度较

大的情况。但转换桁架的布置也会受到上下结构柱网的限制，且上下弦杆和节点的设计和施工比较复杂。结合本工程上下柱网错位较多的实际情况，以上几种转换类型均不太适用。

厚板转换可不受上下结构柱网错开或布置不规则的限制，同时，厚板本身的抗剪切、抗冲切承载力较高，其平面内外刚度较大，可较好地控制变形。①因地下室有足够的数量和刚度的混凝土内外墙，对转换层可能产生的薄弱层效应有很好的控制作用；②转换厚板相对于梁式转换刚度更大，对上部结构的嵌固作用更强；③转换厚板的重量增加对地震效应的影响，也因转换位于地下室顶板，受到地下室外墙及土体的约束，而使其不利影响变得有限；④因桩以抗浮为主，转换厚板重量的增加有利于减少抗拔桩的数量；⑤有利于上下部框架柱在转换层的锚固构造简化及施工便利；⑥有利于逆作法作为水平支撑体系控制基坑的变形；⑦有利于降低支模难度，提高施工工效；⑧有利于增加地下建筑的净高；⑨有利于增加结构的冗余度，防止地下结构在地震及偶然荷载作用下的连续倒塌。

综合考虑上述各转换结构的优缺点，并结合本工程自身特点，最终决定采用厚板转换形式。

3 转换厚板分析模型

本工程采用高层建筑结构空间有限元分析与设计软件 PKPM 及 YJK 程序建立整体分析模型进行计算（图 2），并互相校核，采用 SLABCAD 及 YJK 厚板有限元分析进行厚板局部计算。

梁、柱采用空间杆单元，剪力墙采用墙元（壳元）模型，地下室楼板采用弹性板单元模拟。考虑土体对地下室的弹性约束。考虑厚板面外的变形，转换厚板定义为弹性板 3，这样才能把上部结构、厚板、下部结构的变形、传力等计算合理。

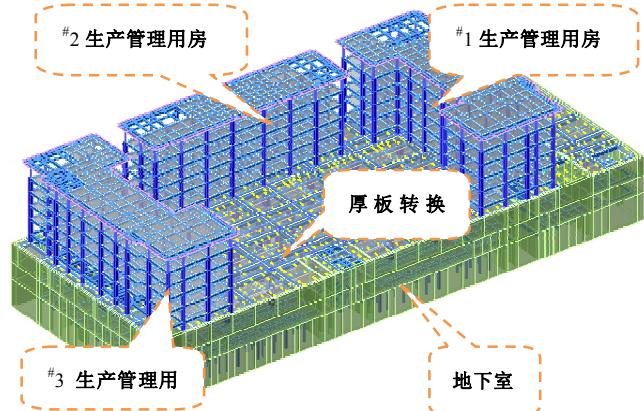


图 2 虹杨 500 kV 变电站结构模型图

Fig. 2 Structural model for Hongyang 500 kV Substation

地震工况：抗震设防类别乙类，设计使用年限 100 年，抗震设防烈度为 7 度（0.10g），IV 类场地，场地特征周期 T_g 为 0.9 s，阻尼比为 0.05。地下结构多遇地震下抗震等级：转换板柱二级、墙一级。转换厚板为大跨度结构，计入竖向地震作用。结构竖向地震作用效应标准值采用振型分解反应谱法进行计算，竖向地震影响系数按上部结构水平地震影响系数最大值的 65% 采用。

地下室顶板室外区域考虑 1.8 m 厚覆土，20 kN/m² 的消防车荷载及 10 kN/m² 的绿化荷载，室内考虑 5 kN/m² 的使用活载。混凝土强度等级取 C40，钢筋取 HRB400 级。

由于转换结构是复杂的三维空间受力体系，在竖向荷载、风荷载、水平及竖向地震作用下受力复杂。所以本工程结构分析应满足以下要求：

(1) 结构分两步走，即三维空间整体计算及采用有限元法补充局部计算。整体分析采用转换层设置虚梁或暗梁的分析方法，局部补充计算采用连续体有限元法对转换厚板进行精细化分析。

(2) 由经验及实际计算过程可知，每一个软件都有一些局限性，所以对于复杂结构应采用多个不同计算模型的软件分析，以避免单一模型带来的差错。

(3) 地震作用计算时宜同时考虑双向水平地震、竖向地震、偶然偏心及扭转耦连。

(4) 由于本工程厚板转换结构属于超限结构，在多遇地震（小震）作用下按结构弹性状态下计算得到的结果可能不满足罕遇地震作用下的弹塑性变形要求，所以需对变电站地下结构进行设防地震（中震）和罕遇地震（大震）下的性能设计（表 1），验算其构件承载力及结构变形，以使其在设防地震下可安全使用，在罕遇地震下能满足抗震变形验算的要求。

(5) 采用等效线性方法或弹塑性静力分析方法验算大震下薄弱层弹塑性层间位移角不超过 1/250。由于篇幅限制，本文不做详述。

表 1 地下室结构抗震性能目标

Table 1 Sesmic performance objectives of basement structures

结构抗震性能水准	宏观损坏程度	损坏部位		层间位移角限值
		关键构件、普通竖向构件	无损坏（抗剪、抗弯弹性）	
小震 1	完好	无损坏（抗剪、抗弯弹性）	远小于 1/1000	
中震 2	基本完好	无损坏（抗剪、抗弯弹性）	1/1000	
大震 4	中度损坏	转换板柱轻度损坏（抗剪、抗弯不屈）	1/250	

4 整体分析及转换厚板承载力分析

4.1 模型整体指标

本工程分别采用 PKPM-SATWE 及 YJK 计算的整体指标详见表 2，对比可知，两个软件计算结果较接近。根据计算结果，地上框架结构位移角均小于 1/550，满足规范要求。剪重比满足规范大于 2.2 的要求。

表 2 整体 SATWE 与 YJK 结果比较

Table 2 Comparison of overall results between SATWE and YJK

整体 SATWE 与 YJK 结果比较	SATWE		YJK	
	转换板厚 1200 mm	x 向 y 向	x 向 y 向	y 向
最大层间位移角 (地上)	地震作用	1/630	1/653	1/625
	风荷载	1/3125	1/3759	1/3124
	总剪力/kN	154796	169112	136148
	剪重比/%	6.82	7.45	6.00
	地震作用 总弯矩 (kN·m)	2746256	2940811	2584923
	总重量/kN	2269420		2267170

对于地下室能否作为上部结构的嵌固端，最重要的指标就是上下层的剪切刚度比，按《抗规》6.1.14 条规定，结构地上一层的侧向刚度，不宜大于相关范围地下一层侧向刚度的 0.5 倍。刚度计算方法因转换层设置在首层，所以按《高规》附录 E.0.1 等效剪切刚度比计算：

$$\gamma_{el} = \frac{G_1 A_1}{G_2 A_2} \times \frac{h_2}{h_1} \quad . \quad (1)$$

本工程因上部结构有 3 栋，3 栋地上结构和地下室整体建模的模型中，刚度比结果为上面某个单体与全部地下室的比值，没有参考价值，所以必须按分拆的模型进行计算，仅考虑上部结构投影范围以外 2 跨之内的地下室刚度。以 #1 为例，因地下室墙柱截面较大，地上柱截面相对较小，所以此刚度比最大为 0.0824 < 0.5，满足规范要求，且有充分的安全度。

4.2 厚板抗冲切计算确定板厚

一般情况下，无梁楼板的厚度由抗冲切承载力控制，本工程作为托柱转换板结构，也需重点复核其抗冲切承载力是否满足要求。

转换厚板的抗冲切按下式计算：

$$\tau_{max} = \frac{F_1}{u_m h_0} + \frac{\alpha_s M_{unb} c_{AB}}{I_s} \quad , \quad (2)$$

$$\tau_{max} \leqslant 0.7 \left(0.4 + \frac{1.2}{\beta_s} \right) \beta_{hp} f_t \quad . \quad (3)$$

式中 τ_{max} 为冲切临界截面上最大剪应力 (kPa)， F_1 为相应于作用的基本组合时的冲切力 (kN)， u_m 为距柱边缘不小于 $h_0/2$ 处冲切临界截面的最小周长 (m)； h_0 为筏板的有效高度 (m)， M_{unb} 为作用在冲切临界截面重心上的不平衡弯矩设计值 (kN·m)， c_{AB} 为沿弯矩作用方向，冲切临界截面重心至冲切临界截面最大剪应力点的距离 (m)， I_s 为冲切临界截面对其重心的极

惯性矩 (m^4), β_s 为柱截面长边与短边的比值, 当 $\beta_s < 2$ 时, β_s 取 2, 当 $\beta_s > 4$ 时; β_s 取 4; β_{hp} 为受冲切承载力截面高度影响系数, 当 $h \leq 800 \text{ mm}$ 时, 取 $\beta_{hp}=1.0$; 当 $h \geq 2000 \text{ mm}$ 时, $\beta_{hp}=0.9$; f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值 (kPa); α_s 为不平衡弯矩通过冲切临界截面上的偏心剪力来传递的分配系数。

从整体模型中选出地上结构最大柱底轴力对应的 #2 楼 44 号柱, 柱底组合内力设计值为: 弯矩 $M_x = 1000 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 弯矩 $M_y = 640 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 轴力 $N = 9458 \text{ kN}$ 。楼板厚度取 1200 mm , 混凝土等级 C40, 保护层厚度取 30 mm , 上柱截面取 $750 \text{ mm} \times 750 \text{ mm}$ 。

转换厚板混凝土抗冲切承载力为 1157.10 kPa 。

冲切临界截面上的剪应力最大值 τ_{\max} 为 $1115.2 \text{ kPa} \leq 1157.1 \text{ kPa}$

由以上验算结果, 板厚 1200 mm 可满足冲切要求。

4.3 转换厚板有限元内力及配筋计算

采用 SLABCAD 及 YJK 软件对转换厚板进行有限元内力分析。转换厚板在组合荷载工况下的内力计算结果详见图 3、4。

基本组合作用下, 考虑对应力集中的削峰处理, 1200 厚转换厚板中最大弯矩设计值达 $7336.7 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}$, 此弯矩位于柱节点处, 计算得该处的暗梁配筋为 14205 mm^2 , 每米实配 2432 (配筋值为 19296 mm^2), 满足要求。

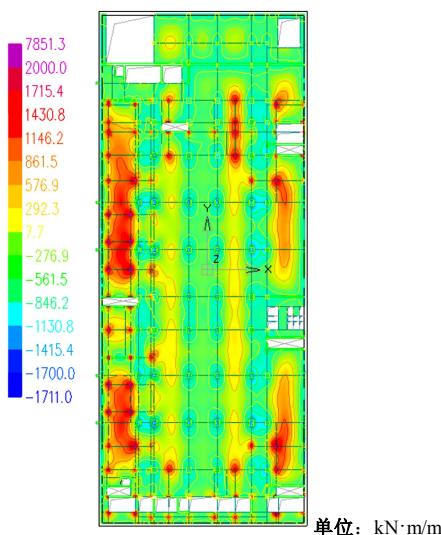


图 3 组合荷载顶板弯矩 M_x

Fig. 3 Bending moment of basement roof under combined load M_x

4.4 转换厚板防连续倒塌验算复核暗梁配筋

为防止厚板转换层连续倒塌, 应加大贯通中柱的暗梁纵筋截面面积、加大配箍率及加强暗梁钢筋锚固。

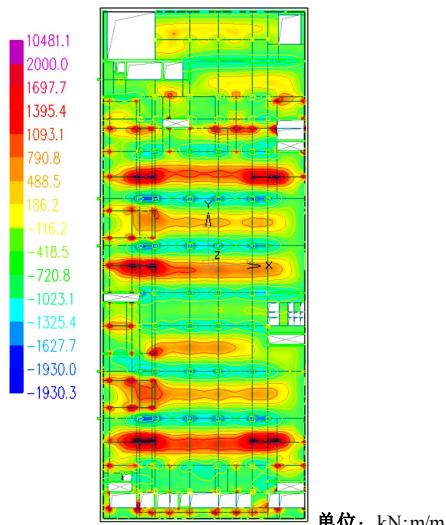


图 4 组合荷载顶板弯矩 M_y

Fig. 4 Bending moment of basement roof under combined load M_y

为防止无柱帽时楼板在柱边开裂后楼板的脱落, 沿两个主轴方向通过柱截面的板底连续钢筋的总面积, 应符合下列要求:

$$A_s \geq N_G/f_y \quad (4)$$

式中 N_G 为在本层楼板重力荷载代表值 (8 度时尚宜计入竖向地震) 作用下的柱轴压力设计值; f_y 为梁纵筋抗拉强度设计值; A_s 为板底连续钢筋总截面面积。

通过柱截面的厚板暗梁钢筋验算结果: 板上恒载: $36 \text{ kN}/\text{m}^2$, 板自重: $30 \text{ kN}/\text{m}^2$, 使用荷载: $10 \text{ kN}/\text{m}^2$, 在本层楼板重力荷载代表值作用下柱轴力设计值: 10650 kN , 通过柱截面板底连续钢筋单侧截面面积(式 4): 9861 mm^2 。

5 结语

本文首先针对虹杨 500 kV 地下变电站上下柱网不对齐的主要特点, 对多种转换形式受力性能进行了比较, 确定出最合适本工程的厚板转换类型。其次, 采用有限元软件建立整体模型, 考虑各种不利工况, 对地下转换结构进行抗震性能设计, 分析了整体结构变形及内力指标、验算了作为上部结构嵌固端的厚板承载力和变形、楼板对上柱抗冲切承载力等方面, 确定了转换层最合适板厚及配筋。最后, 对厚板的防连续倒塌性能进行了验算。计算表明, 本工程厚板转换的选型和受力是安全的。

转换厚板运用于变电站工程还不太常见, 但其独特的优势可以很好解决上下结合地下变电站的转换问题, 只要充分考虑各种不利因素, 同时在构造上加强措施, 完全能够保证整体结构的受力安全, 可为后续类似的上下结合的变电站工程的设计应用提供参考。

参考文献:

- [1] 李 钧. 地下变电站与上部建筑相结合的结构设计[J]. 现代物业新建设, 2012, 11(5): 64 - 65. (LI Feng. Structural design of underground substation combined with superstructure[J]. Modern Property Management, 2012, 11(5): 64 - 65. (in Chinese))
- [2] 杨宏钦. 地下变电站与上部建筑相结合建造的转换层结构设计[J]. 上海建设科技, 2011(2): 8 - 9. (YANG Hong-qin. Design of transfer floor structure constructed by underground
- substation and superstructure[J]. Shanghai Construction Science & Technology, 2011(2): 8 - 9. (in Chinese))
- [3] 文 波. 西安地铁 330 kV 地下变电站结构设计及施工方法研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(7): 65 - 68. (WEN Bo. Study on structural design and construction of 330 kV underground substation in Xi'an metro[J]. Building Structure, 2013, 43(7): 65 - 68. (in Chinese))
- [4] 扶长生. 钢筋混凝土转换厚板的抗震设计[J]. 建筑结构, 2010, 40(8): 57 - 63. (FU Chang-sheng. Seismic design of reinforced concrete flat slab-type transfer structure[J]. Building Structure, 2010, 40(8): 57 - 63. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)