

文章编号: 1673-9469(2017)04-0010-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2017.04.003

750 kV 变电架构隔震性能的有限元分析

罗柯镕, 张富有, 余海强, 贺梦瑶
(河海大学土木与交通学院, 江苏南京 210098)

摘要: 针对 750 kV 变电架构在地震中易损性问题。基于 ANSYS 有限元软件, 分别建立了 750 kV 构架隔震前后的有限元模型, 输入地震波进行动力时程响应分析。结果表明, 采用合适的隔震支座后电力架构基频降低, 顶端位移响应、杆件应力以及倾覆力矩较隔震前都有不同程度的减小, 验证了隔震系统的有效性。

关键词: 750 kV; 变电构架; 隔震; 有限元; 时程分析

中图分类号: TU32

文献标识码: A

Finite element analysis of isolation performance for 750 kV structure gantry

LUO Kerong, ZHANG Fuyou, YU Haiqiang, HE Mengyao
(College of Civil And Transportation Engineering, Ho Hai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The 750 kV structural gantry is a high and heavy load steel latticed structure, which is of vital importance in the 750 kV electric substation. It has high vulnerability during earthquakes. In this work, finite element models of 750 kV structural gantry with and without isolation layer are established by ANSYS. Dynamic time-history analysis are carried out by inputting seismic waves for these two models. The results show that by adopting suitable isolation bearing the structure gantry with base isolation has lower frequency. Apart from this, its top displacement response and pole stress have different degrees of reduction compared to those of gantry without base isolation. These conclusions indicate that it is effective to use isolation system, which has provided a basis for practical application of isolation technology in power tower.

Key words: gantry; isolation; finite element; time-history analysis

近年来, 随着我国经济的迅速发展, 各行业对电力的需求量越来越大, 新建输电线路的电气设备也逐渐向高、大、重方向发展。另一方面, 我国是地震多发国家, 部分发电厂、输电线路以及变电站将不可避免地建在中高烈度区, 在地震中极易损坏, 对当地的生产生活及之后的抗震救灾工作产生严重影响^[1]。结构隔震技术可以隔离地震对结构的作用^[2], 各种规范^[3]主要是针对建筑房屋结构, 对于电气构架的抗震设计, 所涉及的深度仍很浅, 远没有到达可操作的程度。目前国内外对高压电气设备动力反应机理已有了一些研究^[4-6], 但对于高压构架的研究成果较少。本课题通过对 750 kV 架构隔震体系

的研究, 以期得到一些有益的结论, 为后续的构架抗震提供指导。

1 隔震结构的力学模型和运动方程

目前, 基础隔震结构的计算简化模型主要由单质点模型、双自由度模型和多自由度模型^[7-8]。双自由度模型是将上部结构和隔震层分别等效成一个单自由度, 然后确定上部结构与隔震层的地震反应, 为大多数工程所应用, 如图 1 所示, 以双自由度模型为例, 基础隔震体系的运动微分方程为

$$[M]\{X(t)\}+[C]\{\dot{X}(t)\}+[K]\{X(t)\}=-[M]\{\ddot{X}_g(t)\} \quad (1)$$

收稿日期: 2017-08-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51479052)

作者简介: 罗柯镕(1993-), 男, 江苏常州人, 硕士, 从事工程抗震及隔震减震研究。

$$[M] = \begin{bmatrix} M_1 & \\ & M_2 \end{bmatrix}, [K] = \begin{bmatrix} K_1 + K_2 & -K_2 \\ -K_2 & K_2 \end{bmatrix}$$

其中， M_1 为隔震层的质量； K_1 、 C_1 分别为隔震层橡胶支座的总水平刚度和阻尼； M_2 、 K_2 、 C_2 为上部结构的总质量、总水平刚度和总层间阻尼。

2 隔震单元介绍

在 ANSYS 软件中没有现成的单元得以直接模拟隔震支座，但由于 ANSYS 单元库非常丰富，有线性弹簧单元及非线性粘滞阻尼-弹簧单元，故可以由这两种单元组合来拟隔震支座^[9]。水平隔震单元可采用 COMBINE40 单元(图 2)，该单元通过指定的两个节点弹簧常数、阻尼系数和屈服力，来模拟隔震支座水平方向的力学性能。竖向隔震单元可以通过设定竖向刚度 COMBINE14 单元(图 3)来进行模拟。铅芯橡胶支座水平方向的力学参数为： K_u 、 K_d 、 Q_d 。COMBINE40 单元有实常数 K_1 、 K_2 、 C_h 、FSLIDE、GAP，容易得到各个参数对应取值如下： $K_2=K_d$ ， $K_1=K_u-K_d$ ， $FSLIDE=Q_d$ ， $GAP=0$ ， C_h 为阻尼^[10]。竖向隔震单元 COMBINE14 的输入参数 k 和阻尼系数可由橡胶支座参数直接获得。以下列出了 4 种常用铅芯橡胶支座的力学参数，见表 1，参数直接来源于生产厂家。

3 有限元模型建立

计算分析的 750 kV 构架高 50.3 m，柱主杆为 $\Phi 351 \times 10$ (单位 mm，以下尺寸单位同)，横撑为 $\Phi 83 \times 5$ ，斜杆为 $\Phi 146 \times 5$ ，腹杆为 $\Phi 83 \times 5$ ，缀条为 $\Phi 83 \times 5$ ，梁上下弦杆为 $\Phi 168 \times 8$ ，立面斜杆为 L80 \times 8，立面立杆为 L70 \times 8，底面斜杆 L80 \times 8，底面立杆 L70 \times 8，连接腹杆为 L56 \times 5。采用 ANSYS 软件分析时，柱、梁主材采用 Beam188 单元，其余杆件采用 Link180 单元。有限元模型如图 4 所示。

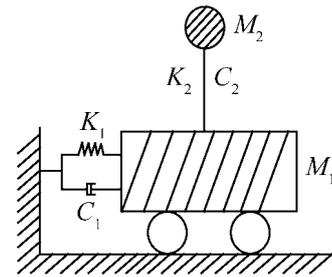


图 1 基础隔震结构简化模型
Fig.1 Simplified model of base-isolation

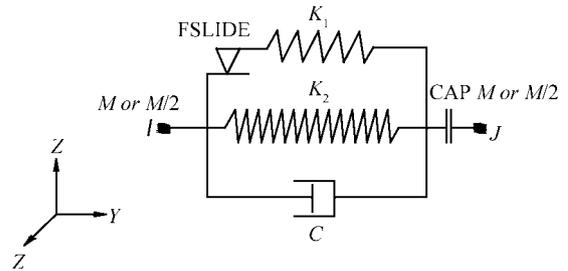


图 2 COMBINE40 单元
Fig.2 COMBINE40 Element

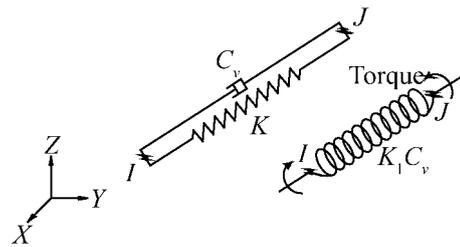


图 3 COMBINE14 单元
Fig.3 COMBINE14 Element

4 模态分析及结构自振特性

将上述隔震支座分别引入脚柱底下，采用分块 Lanczos 方法分别计算了有无隔震支座下的构架自振频率，如表 2 所示。取前 6 阶模态分析结果，从表 2 可以看出，隔震前构架一阶频率为 1.2，隔震后频率都有不同程度的影响，其中添加支座 LRB300 后频率减少幅度最大，达到了 20.92%。隔震后，相当于使整个结构变柔了，延长了构架的自振周期，一定程度上能避开场地自振周期，减小地震反应。

表 1 隔震支座参数表
Tab.1 Lead rubber bearings parameters

支座	1 次形状系数	2 次形状系数	屈服前刚度 (/kN·m ⁻¹)	屈服后刚度 (/kN·m ⁻¹)	等效阻尼比	竖向刚度 (/kN·mm ⁻¹)
LRB300	19.9	5.3	4 539	453.9	0.275	645.5
LRB350	24.3	5.7	5 497	549.7	0.233	1 026
LRB400	22.6	4.8	7 179	717.9	0.233	1 221
LRB500	26.0	5.2	8 014	801.4	0.275	1 634

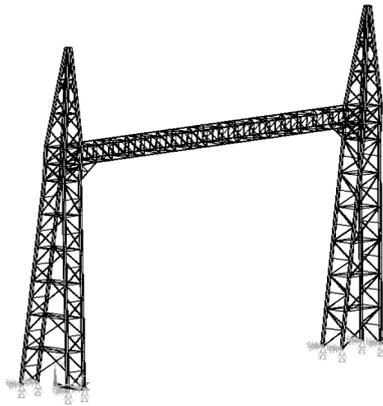


图 4 750 kV 构架有限元模型
Fig.4 Finite element model of 750 kV structural gantry

隔震前构架的前两阶频率分别为 x 方向和 y 方向的弯曲变形, 第三阶振型为整体扭转振动。隔震后变形主要集中在隔震层, 构架前两阶阵型仍以弯曲变形为主, 但幅度有所减少, 第三阶阵型变为了反向弯曲。

5 动力时程分析

5.1 地震波选取

本文选用两条天然地震波和一条人工波调整至 8 度设防对应的地震水平 (0.20 g), 在垂直于构架的方向即 x 方向激励进行动力时程分析。天然地震波

表 2 隔震前后自振频率 (单位: Hz)

振型号	普通结构	LRB300 支座	LRB350 支座	LRB400 支座	LRB500 支座
1	1.200	0.949	0.985	1.002	1.017
2	1.804	1.536	1.592	1.628	1.652
3	2.005	1.742	1.801	1.839	1.863
4	3.823	3.752	3.763	3.774	3.779
5	4.530	4.210	4.263	4.320	4.341
6	6.096	4.849	5.010	5.192	5.270

选取具有代表性的 EL centro 波和 Northridge 波, 人工波基于建筑抗震设计规范进行合成。

5.2 隔震前后各层构架根部应力及顶端位移对比

在高压电气设备的设计和计算分析中, 需要控制结构设备的顶端位移和弯曲应力。规范^[11]中规定在地震荷载短时作用下, 设备对应破坏应力的安全系数不应小于 1.67, 此变电构架采用 Q235 钢材, 屈服应力为 235 MPa, 因此, 在设计中构架容许应力值为 140 MPa。8 度设防对应的地震作用下, 普通结构和不同支座布置方案的隔震结构的 x 向最大根部应力和位移分别列于表 3 和表 4, 表中数值均为三条地震波激励的最大响应的平均值。考虑到此 750 kV 变电构架结构形式与房屋建筑相比具有一定的特殊性, 故将此构架由下往上划分为 6 层, 每层由 2 段组成。表 3 中还给出了各层水平向减震系数, 水平向减震系数即采用隔震技术的结构受到水平地震作用结构动力反应降低的程度, 能够直观反映减震效果, 是评价隔震效果的重要指标之一。表中水平向减震系数计算公式为

$$\text{水平向减震系数} = \frac{\text{采用隔震支座构架根部应力} - \text{未隔震构架根部应力}}{\text{未隔震构架根部应力}} \times 100\% \quad (2)$$

从表 3 中数据可以看出在 8 度设防地震下, 电气构架最大应力为 131.22 MPa, 小于考虑了安全系数后对应的容许应力值 140 MPa, 构架整体是偏于安全的。所有构架模型各层杆件根部应力的变化规律也是一致的, 随着构架高度的降低应力越来越大, 最底部构架应力达到最大。引入隔震支座后, 四种不同隔震支座布置方案的水平向减震系数最大值分别为 22.69%、19.25%、16.21%、13.24%, 隔震效果明显, 其中 LRB300 支座的隔震效果最为明显, 达到了 22.69%。此外, 减震系数也呈现随高度降低

表 3 各模型构架各层最大根部应力

Tab.3 The maximum bending stress in each floor of gantry in each model

构架位置	未隔震模型	LRB400 支座		LRB500 支座		LRB350 支座		LRB300 支座	
	根部应力 /MPa	根部应力 /MPa	减震系数 /%						
第六层	45.33	41.11	9.31	42.38	6.51	42.66	5.90	43.00	5.13
第五层	67.59	60.43	10.59	61.97	8.31	62.26	7.89	63.17	6.54
第四层	88.42	77.23	12.66	80.67	8.76	81.24	8.12	81.82	7.47
第三层	105.31	89.56	14.96	91.22	13.38	93.46	11.25	95.62	9.20
第二层	119.51	97.37	18.53	100.29	16.08	102.13	14.54	106.21	11.13
第一层	131.22	101.45	22.69	105.96	19.25	109.95	16.21	113.85	13.24

而增大的趋势,原因可能是底部设置隔震支座后直接耗散了底部输入的地震能量,而对上部影响较小。

由表4可以看出,引入隔震支座后,位移主要发生在隔震层,原因在于橡胶支座的抗侧刚度于构架而言相对较小,隔震支座的设置改变了整个体系的动力特性,支座发生较大位移后能耗散部分向上部结构输入的地震能量。随着构架高度的上升,位移也表现为不断增大的趋势,但引入隔震支座后,上部位移增幅较小,结构接近于平动,这与建筑隔震的规律是一致的^[12]。此外,LRB300及LRB350隔震支座虽然对于杆件应力起着减少的作用,但是由于支座刚度过小,最顶端位移反而增大,这对构架的抗震设计显然是不利的。而LRB400和LRB500支座对于应力和位移都起着减小的作用,最顶端位移减小率分别为10.0%和16.8%。综合考虑隔震支座对应力和位移的影响,在常用的四种隔震支座中,宜采用LRB400和LRB500。

5.3 隔震前后各层构架根部倾覆力矩对比

引入隔震支座后,倾覆力矩的变化趋势(表5)与应力的变化趋势是一致的,但是减小幅度比应力小。在高层建筑隔震中,过大的倾覆力矩是阻碍隔

震技术发展的一个不利方面,因为倾覆力矩的产生必然导致隔震支座部分受拉,而橡胶支座的抗拉能力是极为有限的,虽然引入隔震支座后倾覆力矩有所减小,但此时的拉力是由于隔震支座所承担,而原模型是由基础所承担。因此,对于此构架进行隔震设计时,可仿照建筑隔震采取限位等措施来进一步减小倾覆力矩。

6 结论

1) 在8度设防地震作用下,未隔震前变电构架最大应力为131.22 MPa,小于考虑了安全系数后对应的容许应力值140 MPa,构架整体是偏于安全的。而采用隔震支座后,应力都有不同幅度的减小,结构安全富余度更高。

2) 地震作用下,未隔震前构架最大位移为131.37 mm,而隔震后对于采用LRB300和LRB350支座的模型位移反而增大了,原因在于底部抗侧刚度过小,综合考虑隔震支座对于应力和位移的影响,对于750 kV变电构架隔震设计时宜采用LRB400和LRB500。

3) 若要进一步提高该变电构架的抗震性能,应

表4 各模型构架各层最大位移
Tab.4 The maximum displacement in each floor of gantry in each model

构架位置	未隔震模型	LRB350 支座	LRB400 支座	LRB500 支座	LRB300 支座
	位移幅值/mm	位移幅值/mm	位移幅值/mm	位移幅值/mm	位移幅值/mm
第六层	131.37	144.32	138.12	118.27	109.29
第五段	116.24	142.38	136.32	114.35	106.34
第四层	104.87	140.22	134.22	111.43	103.78
第三层	96.43	139.89	131.71	108.24	99.67
第二层	90.27	137.21	128.32	106.41	97.29
第一层	87.43	135.33	126.24	103.22	96.31
隔震层		123.34	115.73	93.11	87.45

表5 各模型构架各层最大倾覆力矩
Tab.5 The maximum overturning moment in each floor of gantry in each model

构架位置	未隔震模型			LRB350 支座		LRB500 支座		LRB400 支座		LRB300 支座	
	倾覆力矩/(kN·m)	倾覆力矩/(kN·m)	减震系数/%								
第六层	422.31	398.11	5.73	402.16	4.77	404.32	4.26	407.40	3.53		
第五层	463.62	429.43	7.37	433.57	6.48	435.29	6.11	440.72	4.94		
第四层	493.24	445.23	9.73	454.67	7.82	459.35	6.87	465.27	5.67		
第三层	522.49	468.56	10.32	478.73	8.38	484.40	7.29	489.73	6.27		
第二层	578.37	512.32	11.42	520.79	9.96	528.98	8.54	537.13	7.13		
第一层	637.46	544.21	14.63	556.28	12.73	572.38	10.21	582.38	8.64		

在采取隔震技术的基础上考虑加大侧向约束来减小构架的位移、倾覆力矩,进一步对其加固处理。

参考文献:

- [1] 程永锋, 全军, 卢智成. 变电站电力设施抗震措施研究现状与发展趋势 [J]. 电网技术, 2008, 32(2): 84-89.
- [2] 武田寿一. 构造物的免震防震制振 [M]. 东京: 技报堂出版, 1988.
- [3] GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范 [S].
- [4] MAENO Y, HANADA K, SAKAMOTO Y. Dynamic properties of UHV power transmission towers: full-scale tests and numerical investigation [C] // 8th WCEE. San Francisco, USA: [s.n.], 1984: 12-34.
- [5] GHOBARAH A, AZIZ T S, EL-ATTAR M. Response of transmission lines to multiple support excitations [J].

Engineering Structures, 1996, 18(12): 936-946.

- [6] 朱海维, 马永杰, 吴伟康. 1 000 kV 构架风振系数的计算研究 [J]. 电力建设, 2013, 34(2): 28-34.
- [7] 李爱群. 工程结构减振控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [8] 张富有, 贺梦瑶, 王舒珊, 等. IV类场地土与结构相互作用的隔震分析 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2017, 34(3): 6-9.
- [9] 李慧, 王亚楠, 杜永峰. 土-结构动力相互作用对基础隔震结构的影响 [J]. 工程抗震与加固改造, 2012, 34(1): 37-41.
- [10] 周兆静. 山区倾斜基岩上土-隔震框架结构相互作用研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [11] GB 50260—96, 电力设施抗震设计规范 [S].
- [12] 周福霖. 工程结构减震控制 [M]. 北京: 地震出版社, 1997.

(上接第4页)

6 结论

1) 半无限体矩形隧洞开挖问题复变函数法的难点在于保角映射函数的求取。采用本文提出的先将含矩形隧洞的半无限域映射为中间域,再将中间域映射为同心圆环域的“两步走”的求解方法可较方便地求解出该函数,且便于应用现有研究成果。

2) 从本文解法与有限元解的对比来看,在大部分点处本文结果与有限元结果相差不大,误差在2%左右。本文给出的求解方法求解过程步骤清晰、收敛快、精度高,易于编程实现,有很强的可操作性。

3) 对于类似本文的工程,矩形顶管开挖引起的地层位移近似呈正态分布,反弯点大致位于1.5倍的开挖深度处,地表沉降主要发生在4倍的开挖深度范围内;顶管施工引起的地表变形约为洞室边界位移的70%左右。

4) 对 σ_x 而言,最大的压应力发生在顶板与侧帮的角点处,最大压应力值约为40 kPa,最大拉应力发生在侧帮与底板的角点处,最大拉应力约为35 kPa;对 σ_y 而言,最大的压应力发生在顶板与侧帮的角点处,最大压应力值约为30 kPa,最大拉应力发生在侧帮与顶板的角点处,最大拉应力约为25 kPa。

参考文献:

- [1] 陈子荫. 围岩力学分析中的解析方法 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994: 46-73.
- [2] VERRUIJT A. A complex variable solution for a deforming circular tunnel in an elastic half-plane [J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 1997, 21(21): 77-89.
- [3] STRACK O E, VERRUIJT A. A complex variable solution for a deforming buoyant tunnel in a heavy elastic half-plane [J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2002, 26(12): 1235-1252.
- [4] 童磊, 谢康和, 卢萌盟, 等. 盾构任意衬砌变形边界条件下复变函数弹性解 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2010(9): 1825-1830.
- [5] 江学良, 杨慧, 曹平. 边坡下伏地下圆形洞室的弹性应力解析 [J]. 计算力学学报, 2012, 29(1): 62-68.
- [6] LU Aizhong, ZENG Xiantai, XU Zhen. Solution for a circular cavity in an elastic half plane under gravity and arbitrary lateral stress [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2016, 89: 34-42.
- [7] 陈行威, 宋振森. 加劲十字形轴压杆考虑初始扭转缺陷的扭转位移函数 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2016, 33(3): 8-12.
- [8] SCHINZINGER R, LAURA PAA. Conformal mapping: methods and applications [M]. New York City: Dover Publications, 2003.