

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201801010



# 扶壁式挡土墙在坡地建筑中的应用

林强, 曾志兴, 余文茂, 刘祥

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 采用 PKPM 2010 软件对实际在建的坡地建筑进行模型分析. 根据挡土墙的类型、建筑的层数分别建立 6 个不同的坡地建筑模型, 并进行整体指标分析. 结果表明: 带扶壁式挡土墙的模型在周期、位移、抗倾覆和抗滑移上都比带一般挡土墙的模型更能满足规范的要求. 因此, 建议单层坡地建筑宜优先采用扶壁式挡土墙作为其挡土外墙, 同时, 在外墙有土一侧做好排水的措施.

**关键词:** 坡地建筑; 建筑模型; 整体指标; 扶壁式挡土墙; 一般挡土墙

**中图分类号:** TU 375.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2018)04-0532-06

## Application of Counterfort Retaining Wall in Slope Building

LIN Qiang, ZENG Zhixing, YU Wenmao, LIU Xiang

(Collage of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** PKPM 2010 software is used to analyze the model of actual buildings of the slope. According to the type of retaining wall and the storey number of buildings, six different slope building models are set up respectively and the overall indexes are analyzed. The results show that the model of counterfort retaining wall can better meet the requirements of the standard than common retaining wall in period, displacement, anti-overturning and anti-slip. Therefore, it is suggested that the counterfort retaining wall is preferential forms in single-storey slope building. Meanwhile, the benign measures for drainage on the side of the wall would be taken.

**Keywords:** slope building; building model; overall index; counterfort retaining wall; common retaining wall

我国是多山国家,很多大中城市用地紧张,多种因素促使一些坡地用于开发,出现了很多坡地建筑<sup>[1]</sup>. 在工程中,保障坡地建筑物安全的方法主要有两种:一是采用主体结构与挡土墙脱开处理的方法,然而,挡土墙单独设置会增加岩石的开挖量,延长工期并增加工程造价,使底层的建筑空间变小,不符合业主要求;二是采用主体结构与挡土墙联合处理的方法,将挡土墙与相应部位主体结构联合设计,采用柱下条形基础或筏板基础,可避免上述缺点,但必须采取有效措施保证挡土墙的刚度及稳定,尽量减少土压力对主体结构产生的附加内力<sup>[2]</sup>. 国内坡地建筑关于适用、坚固与美观等方面的设计管理还处于初级阶段,并缺乏系统和严格地监督,坡地建筑存在很多安全隐患<sup>[3]</sup>. 因此,坡地建筑的结构设计重点是对山体边坡的处理与维护,挡土墙的设计是保障山体稳定的重要方法<sup>[4]</sup>. 刘良林等<sup>[5]</sup>分析地震作用下结构进入弹塑性阶段后的不同自振周期,简化计算方法,并建立结构刚度与周期的关系. 陈荣淋等<sup>[6]</sup>提出围岩稳定性综合评价的熵权系数方法,可应用于地下工程围岩稳定性的评价. 刘立平等<sup>[7]</sup>建立不等高坡地建筑的简化计算模型,采用有限元法研究边坡变形对坡地建筑抗震性能的影响. 张诚江等<sup>[8]</sup>对坡地建

**收稿日期:** 2018-01-03

**通信作者:** 曾志兴(1967-),男,教授,博士,主要从事混凝土结构的研究. E-mail:zhixing@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(11572131);福建省自然科学基金资助项目(2017J01095);华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(1611304020);中央高校基本科研业务资金资助项目(JB-ZR1121)

筑嵌固条件进行研究,表明单面敞开非全埋地下室可选取地下室顶板作为嵌固端. 龚立琼等<sup>[9]</sup>研究坡地建筑上部结构嵌固部位的确定和坡地挡土墙的设计,并提出坡地建筑挡土墙相关设计方法. 王博<sup>[10]</sup>根据在建工程的实际情况,阐述坡地建筑地震影响系数放大系数如何确定、挡土墙设计及建模时柱底嵌固端如何设置等问题. 本文对结合主体结构设置扶壁式挡土墙<sup>[11]</sup>的结构形式进行分析.

## 1 工程实例

工程位于福建省三明市明溪县,地貌单元属于剥蚀丘陵地. 该地区设防烈度为 6 度(0.05 g),场地类别 II 类,设计地震分组为第一组,基本风压为 0.35 kPa. 本项目为消防部队消防站建设,属于重点设防类别;依据 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》<sup>[12]</sup>(下文简称《抗规》)规定,其抗震等级为 3 级.

工程左边为单层框架结构,右边为 6 层框架结构,中间设置 100 mm 宽的沉降缝,其建筑平面示意图,如图 1 所示. 项目北侧无土,西侧和东侧有逐渐变缓的土坡,南侧土坡较高. 左边底层框架计算高度为 6.05 m;右边底层框架计算高度为 6.50 m. 挡土外墙为 250 mm 厚钢筋混凝土墙,基础埋深范围内无地下水.

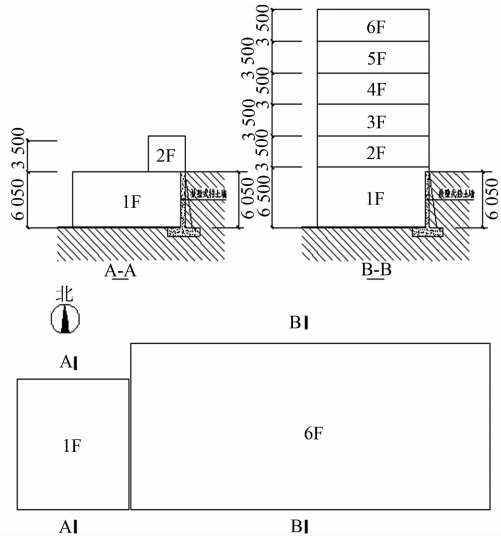


图 1 建筑平面示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic plan of building (unit: mm)

## 2 计算模型

对于半地下室结构,将地下室顶板作为上部结构的嵌固部位是不合适的. 半地下室对上部结构的约束非常有限,因此,结构嵌固端必须取在基础顶部<sup>[13]</sup>. 在建筑的结构计算中,半地下室与上部结构必须整体考虑,因此,半地下室的结构选型对整个结构的计算影响不可忽略<sup>[14]</sup>.

工程的结构整体计算采用 PKPM 2010 软件进行弹性分析,地下室外墙采用理正结构设计软件进行计算. 工程采用扶壁肋挡土墙进行设计,同时,在主体结构框架柱对应位置设置扶壁肋,控制肋间距小于 4.5 m.

计算模型的柱网布置,如图 2 所示. 图 2 中:一、二层柱截面尺寸为 500 mm×500 mm,其余各层尺寸均为 400 mm×400 mm;框架梁截面尺寸为 250 mm×600 mm;次梁截面尺寸为 200 mm×500 mm;梁板混凝土强度等级均为 C25,首层柱混凝土采用 C30,其余各层均为 C25.

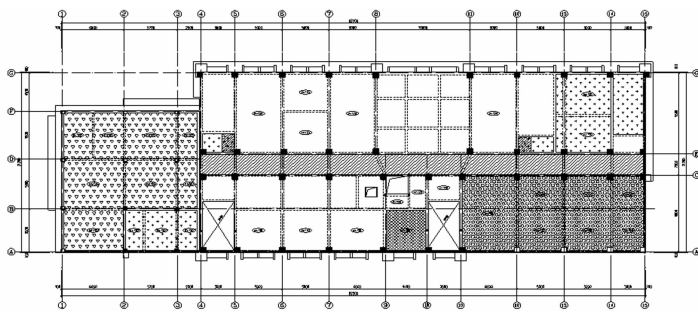
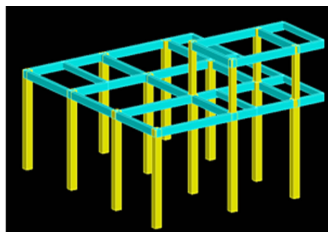


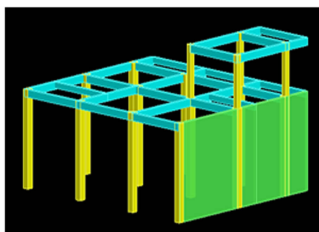
图 2 结构的平面布置

Fig. 2 Layout of structure

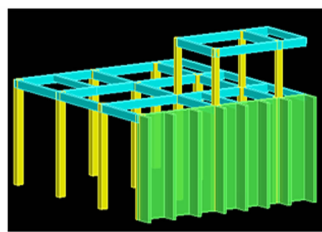
为了便于分析比较,采用 PKPM 2010 软件建立 6 个模型,如图 3 所示. 图 3 中:模型 A~F 分别为单层纯框架结构、带挡土墙的单层框架结构、带扶壁式挡土墙的单层框架结构、6 层纯框架结构、带挡土



(a) 模型 A



(b) 模型 B



(c) 模型 C

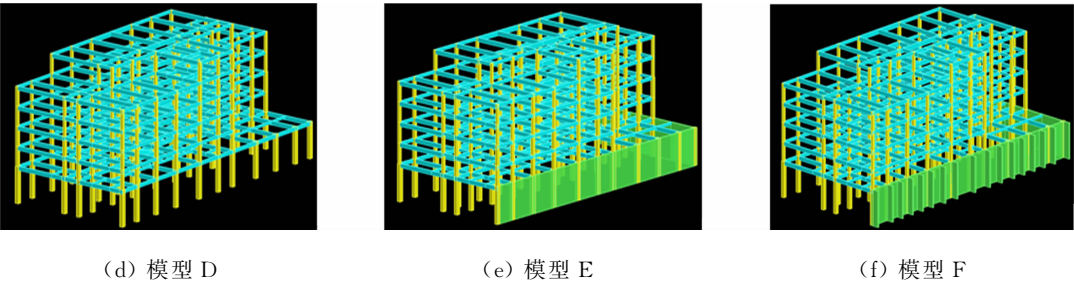


图 3 结构模型

Fig. 3 Structure model

墙的 6 层框架结构和带扶壁式挡土墙的 6 层框架结构. 其中,扶壁式挡土墙的肋墙建模按肋墙水平投影长度,在 PMCAD 中输入钢筋混凝土墙代替.

3 结构计算

3.1 土压力计算

由于地下室外墙的刚度较大,在土压力作用下,通常达不到产生主动土压力所需的位移,因此,土压力按静止土压力取值. 依据《建筑地基基础设计规范》<sup>[15]</sup>,取静止土压力系数  $K_0=0.5$ ,地面堆载  $P=10$  Pa,土的重度  $\gamma=18\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ,计算土压力高度  $H=6.05\text{ m}$ . 工程地下水位标高远低于基础底面,且在挡土墙后采取良好的排水措施,故可不考虑水压力,只计算土压力的作用. 此时,每延米的土压力为三角形荷载,依据《挡土墙土压力计算手册》<sup>[16]</sup>,作用在单位长度挡土墙的静止土压力  $q_1=0, q_2=0.5\times 18\times 6.05=54.45\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ,活荷载  $q_{\text{活}}=0.5\times 10=5\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ .

3.2 整体计算分析

对模型 B,E 来说,框架柱的刚度不足以近似成挡土墙的支座,因此,挡土墙可以看成两侧自由、上端简支、下端固支的板. 对模型 C,F 来说,挡土墙两侧的框架柱均设置了肋墙,增加了框架柱的刚度,使框架柱的刚度足以近似成挡土墙两侧的支座,所以,对扶壁式挡土墙可以看成两侧固支、上端简支、下端固支的板. 为了简化挡土墙的计算量,按最不利的情况,取计算模型为上端简支、下端固定的受弯杆件. 单层框架和 6 层框架挡土墙力学模型,如图 4 所示. 依据图 4 的简化模型,可计算出每延米挡土墙上下端的支座反力  $R_{11}=55.412\text{ kN}, R_{12}=184.591\text{ kN}, R_{21}=48.915\text{ kN}, R_{22}=191.088\text{ kN}$ .

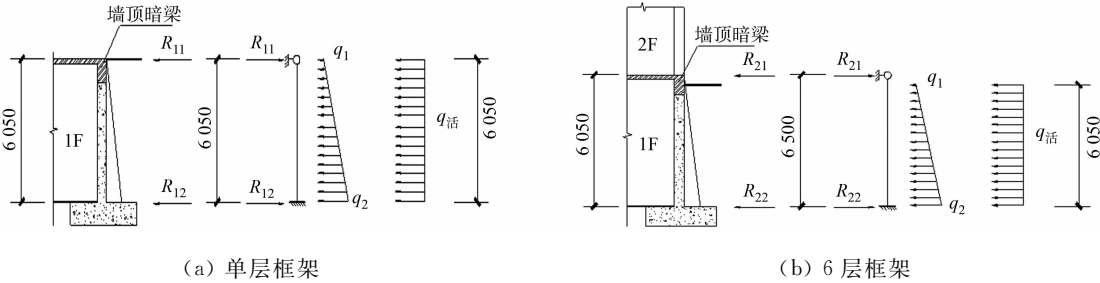


图 4 单层框架和 6 层框架挡土墙力学模型(单位:mm)

Fig. 4 Mechanical model of retaining wall of single-story and 6-story frames (unit: mm)

采用 PKPM 2010 软件进行整体分析时,严谨的做法是把土压力按恒荷载输入到模型中相对应的挡土侧墙上,鉴于该软件暂无此功能,因此,把传至顶板上的荷载按水平线荷载输入到墙顶或折算为节点荷载,在框架柱柱顶输入集中力进行计算. 除模型 A,D 外,其余 4 种模型均在一层框架柱顶部输入水平集中力:左边单层框架柱顶按每延米水平线荷载  $R_{11}$  考虑,右边 6 层框架柱顶按每延米水平线荷载  $R_{21}$  考虑;然后,分别乘以所计算的框架柱相邻两侧柱距的一半,所得集中力就是该柱柱顶需要输入的集中力. 而  $R_{12}$  和  $R_{22}$  是作用在基础顶面的,由土体抵消这部分力,故可不考虑输入到模型中.

3.2.1 梁柱配筋结果 经过 PKPM 2010 软件的 Satwe 模块分析计算后,得出的抗侧力构件配筋较不计入土压力计算时的大很多,挡墙附近部分梁配筋也增大很多. 由配筋计算结果可知,柱的配筋较不输入土压力计算时的大很多,配筋最大能增加 2~3 倍. 主要原因是:框架柱为主要抗侧力构件,承担回填

土传来的水平推力, 而此水平推力会引起框架柱的弯矩和剪力变大, 从而使柱配筋增加. 此方向框架梁的配筋也有较大的变化, 主要是因为此水平推力引起框架梁的轴力和弯矩变大, 所以与挡墙连接处梁端的负筋会增加, 另一端负筋会减小.

3.2.2 自振周期与振型模态 左边单层框架和右边 6 层框架的自振周期与阵型模态, 如表 1, 2 所示. 由表 1, 2 可知: 考虑了挡土墙模型整体刚度明显增加, 其中, 扶壁式挡土墙对结构整体刚度的贡献比一般挡土墙要更多. 考虑挡土墙之后, 模型的平动系数、扭转系数、周期比很难满足《抗规》要求, 主要是因为挡土墙是在有土一侧考虑, 使该侧的刚度相比其他部位更大, 在地震作用下容易造成结构扭转效应; 而带扶壁式挡土墙 6 层框架的周期比、平动系数、扭转系数比带一般挡土墙的 6 层框架更能满足《抗规》要求, 且结构两个主轴方向的侧向刚度较带一般挡土墙的 6 层框架更相近.

表 1 左边单层框架的自振周期与振型

Tab. 1 Natural vibration period and mode of single-story frame on left

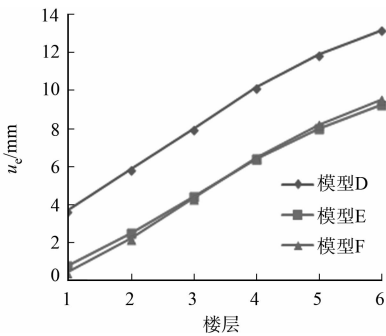
模型编号	阵型阶数	周期/s	X 向平动系数	Y 向平动系数	扭转系数	周期比
模型 A	1	0.576 3	0.57	0.25	0.18	0.83
	2	0.548 6	0.41	0.55	0.04	
	3	0.477 1	0.14	0.23	0.63	
模型 B	1	0.533 3	0.12	0.74	0.14	0.41
	2	0.487 2	0.34	0.28	0.38	
	3	0.221 3	0.03	0.27	0.70	
模型 C	1	0.366 2	0.37	0.05	0.58	1.41
	2	0.260 3	0.02	0.92	0.06	
	3	0.215 6	0.95	0.00	0.05	

表 2 右边 6 层框架的自振周期与振型

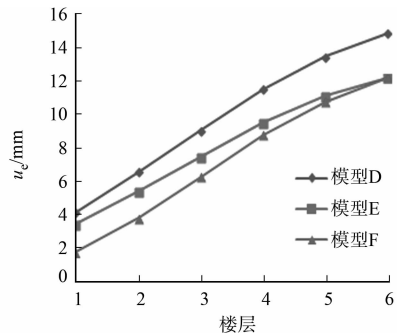
Tab. 2 Natural vibration period and mode of 6-story frame on right

模型编号	阵型阶数	周期/s	X 向平动系数	Y 向平动系数	扭转系数	周期比
模型 D	1	1.226 3	0.02	0.96	0.01	0.86
	2	1.197 9	0.91	0.03	0.06	
	3	1.055 5	0.07	0.01	0.92	
模型 E	1	1.186 7	0.15	0.73	0.12	0.73
	2	0.955 3	0.67	0.24	0.08	
	3	0.863 3	0.18	0.04	0.78	
模型 F	1	1.045 1	0.14	0.82	0.04	0.82
	2	0.953 7	0.74	0.18	0.08	
	3	0.854 1	0.12	0.01	0.86	

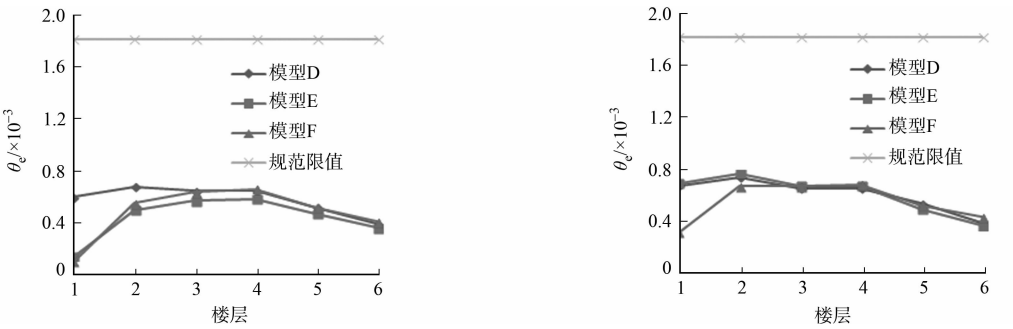
3.2.3 侧向位移与层间位移角 左边单层框架的侧向位移与层间位移角不能反映上下楼层之间的关系, 因此, 采用右边 6 层框架模型进行分析. 在水平地震作用下, 模型 D, E, F 的侧向位移( $u_e$ )和层间位移角( $\theta_e$ ), 如图 5 所示. 由图 5 可知: 模型 F 在 Y 向的侧向位移和层间位移角明显小于模型 D, E, 而两层及以上各层的层间位移角都比较接近. 主要原因是扶壁式挡土墙相比一般挡土墙的刚度更大, 因此, 模型 F 的侧向位移明显小于模型 D 和模型 E.



(a) X 向地震作用下的楼层侧向位移



(b) Y 向地震作用下的楼层侧向位移



(c) X 向地震作用下的楼层层间位移角 (d) Y 向地震作用下的楼层层间位移角

图 5 计算模型在地震作用下的侧向位移与层间位移角

Fig. 5 Calculation of lateral displacement and story drift angle under seismic action

3.3 整体倾覆、滑移计算

以上只是局部的计算过程,项目还需要复核整体的稳定性,因此,取土压力作用最不利方向进行分析.由于 Satwe 整体计算中没有考虑土压力产生的倾覆力矩,所以,还需附加土压力产生的倾覆力矩进行整体倾覆计算.可把建筑物看成嵌在土里的一根悬臂杆,计算简图如图 6 所示.对左边单层框架, $q_1=0,q_2=54.45\times14.7=800.415\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1},q_{\text{活}}=5\times14.7=73.5\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ,由此计算出附加倾覆弯矩  $M_{\text{ov}}=7\,910.11\text{ kN}\cdot\text{m}$ ;对右边 6 层框架, $q_1=0,q_2=54.45\times47.4=2\,580.93\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1},q_{\text{活}}=5\times47.4=237\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ,计算出附加倾覆弯矩  $M_{\text{ov}}=25\,506.06\text{ kN}\cdot\text{m}$ ;单层框架和 6 层框架在建筑物南侧设置的挡墙宽度分别为 14.7,47.4 m.整体抗倾覆验算结果,如表 3 所示.表 3 中: $M_r$  为抗倾覆力矩.

表 3 框架的整体抗倾覆验算

Tab. 3 Overall anti-overturn check calculation of frame

荷载类型	左边单层框架				右边 6 层框架			
	模型	$M_r/\text{kN}\cdot\text{m}$	$M_{\text{ov}}/\text{kN}\cdot\text{m}$	$M_r/M_{\text{ov}}$	模型	$M_r/\text{kN}\cdot\text{m}$	$M_{\text{ov}}/\text{kN}\cdot\text{m}$	$M_r/M_{\text{ov}}$
Y 向风荷载作用下	模型 A	34 777.4	569.0	61.12	模型 D	712 658.9	12 647.9	56.35
	模型 B	39 417.0	569.0	69.27	模型 E	744 647.5	12 626.2	58.98
	模型 C	46 594.7	572.6	81.37	模型 F	802 440.1	12 552.5	63.93
Y 向地震力作用下	模型 A	33 875.7	1 181.5	28.67	模型 D	687 850.9	23 662.7	29.07
	模型 B	38 515.0	1 494.9	25.76	模型 E	719 628.6	19 799.4	36.35
	模型 C	45 620.4	1 438.6	31.71	模型 F	775 841.8	22 708.6	34.17
土压力作用下	模型 A	33 875.7	—	—	模型 D	687 850.9	—	—
	模型 B	38 515.0	7 910.1	4.87	模型 E	719 628.6	25 506.1	28.21
	模型 C	45 620.4	7 910.1	5.77	模型 F	775 841.8	25 506.1	30.42

考虑土压力与地震作用组合时,经计算分析可知,显然满足式  $M_r/\sum M_{\text{ov}}\geq1.6$ ,因此,整体抗倾覆验算满足要求.此外,还需进行抗滑移验算,由于左边单层框架自质量较轻,对抗滑移验算更不利,故取左边单层框架进行抗滑移验算.采用一般挡土墙时,总静止土压力  $E_a=0.5\times(0+800.415)\times6.05+73.5\times6.05=2\,865.93\text{ kN}$ .根据 Satwe 的计算结果,查得本栋楼横载产生的总质量为 698.635 t;基底持力层为泥岩残积粘性土,根据《建筑地基基础设计规范》的要求,取摩擦系数  $U=0.5$ ,由此可得  $G_k\cdot U/E_a=6\,986.35\times0.5/2\,865.93=1.22<1.30$ ,不满足要求,所以采用扶壁式挡墙进行抗滑移验算,先不考虑土对扶壁式挡墙抗滑移的有利分担部分,仍取  $E_a=2\,865.93\text{ kN}$ .此时,本栋楼横载产生的总质量为 753.69 t, $G_k\cdot U/E_a=7\,536.9\cdot0.5/2\,865.93=1.31>1.30$ ,满足整体抗滑移验算.

4 结论

通过对 6 种模型的整体分析,可以得出以下 5 点结论.

1) 不带挡墙的纯框架结构的整体分析指标最容易满足规范要求,而其余4种模型带了挡土墙进行计算,扭转位移比指标很难满足规范要求,但是带扶壁式挡土墙的框架结构在周期、位移、抗倾覆、抗滑移等指标上要比带一般挡土墙的框架结构更能满足规范要求,且结构两个主轴方向的侧向刚度较带一般挡土墙的框架结构更相近。

2) 单层框架结构的整体抗倾覆和抗滑移比多层框架结构更弱,设计时,要特别注意单层框架结构的整体倾覆和滑移验算。由于扶壁式挡土墙自质量较一般挡土墙大,再加上扶壁式挡土墙的翼板对抗倾覆和抗滑移更有利,建议单层框架结构尽量按扶壁式挡土墙进行外墙设计,若工程造价允许,单层框架结构的基础尽量采取整体性较好的基础,如钢筋混凝土条形基础、筏板基础等。

3) 对坡地建筑外墙设计时,采取一般挡土墙的设计方法,挡土墙下端要注意采取增加刚度的措施使其近似固支设计。而扶壁式挡土墙的底板本身刚度就很大,可以直接近似成下端固支,因此,采用扶壁式挡土墙更容易满足这个要求。

4) 基槽开挖有造成山坡土体失稳的可能,有必要在基槽开挖前采取必要的措施,加强上部建筑和山坡的整体性和稳定性。

5) 由于外墙受力较复杂,在实际施工时,尽量采取良好的排水措施,减少水对外墙的作用,保证外墙的耐久性。

## 参考文献:

- [1] 姜莉. 坡地建筑形态构成与空间风貌研究[D]. 重庆:重庆大学,2001. DOI:10.7666/d.y458375.
- [2] 郑冬菁. 坡地建筑中挡土墙的设计[J]. 福建建设科技,2002(4):14-15. DOI:10.3969/j.issn.1006-3943.2002.04.006.
- [3] 黄振堂. 坡地建筑设计问题思考[J]. 文摘版:工程技术,2015(5):32.
- [4] 彭玉萍. 浅析坡地建筑结构设计问题与相应防护措施[J]. 科技创新与应用,2012(21):249.
- [5] 刘良林,王全凤,林煌斌. 基于周期的结构整体地震损伤评价方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2013,34(3):313-315. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2013.03.0313.
- [6] 陈荣淋,曾志兴. 地下工程围岩稳定性评价的熵权系数法[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2008,29(3):443-446. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2008.03.0443.
- [7] 刘立平,李英民,罗建,等. 边坡变形作用下坡地建筑结构的力学行为探讨[J]. 土木工程学报,2013(增刊2):63-67.
- [8] 张诚江,肖常安. 带非全埋地下室的高层建筑嵌固端的选取研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版),2013,30(2):95-98. DOI:10.3969/j.issn.1000-5269.2013.02.021.
- [9] 龚立琼,赵亮. 坡地建筑嵌固端与挡土墙的结构设计[J]. 建材发展导向:上,2017,15(9):182-183.
- [10] 王博. 某在建坡地建筑结构设计分析[J]. 福建建筑,2015(7):46-47.
- [11] 陈梁,陶胜. 扶壁式挡土墙的设计探讨[J]. 四川建材,2016,42(2):115-116. DOI:10.3969/j.issn.1672-4011.2016.02.056.
- [12] 中华人民共和国国家标准. 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京:建筑工业出版社,2010.
- [13] 黄昆,张宪江,黄福标. 半地下室框架结构的简化计算及设计方法[J]. 浙江建筑,2008,25(9):18-20. DOI:10.3969/j.issn.1008-3707.2008.09.006.
- [14] 刘鹏程,刘士锋. 框架结构中半地下室设计探讨[J]. 山西建筑,2013,39(2):34-36. DOI:10.3969/j.issn.1009-6825.2013.02.018.
- [15] 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[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [16] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算手册[M]. 北京:中国建材工业出版社,2005.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)