

悬臂式挡土墙结构的整体计算

唐金忠 姜 涛

(上海友为工程设计有限公司,上海 200333)

摘要 按照共同作用的机理,采用弹簧支座模拟弹性地基,以此建立悬臂式挡土墙的结构计算模型;将挡土墙的立墙、底板和地基作整体结构计算,计算模型完整,无须拆分,避免了拆分计算的繁琐和计算结果的不准确。整体计算模型采用共同作用和地基基础弹性力学分析,最为接近挡土墙结构的真实受力情况,从而使悬臂式挡土墙的结构计算更为准确、方便。

关键词 悬臂式挡土墙;整体计算;弹簧支座;内力;新技术

中图分类号 :TV314 **文献标识码** :B **文章编号** :1006-7647(2009)S1-0097-04

挡土墙结构计算的理论和方法目前已有专著^[1],而对悬臂式挡土墙的结构计算少数学者和设计人员也有专门的研究,提出了一些不同的计算方法^[2],概括起来主要有结构力学法、弹性地基梁法和有限元法。因弹性地基梁法和有限元方法,工程设计中用起来多有不便,因此,目前工程设计中广泛应用的还是结构力学法。但是挡土墙搁置在弹性地基上,常规的结构力学法计算内力误差较大,而且节点内力也不平衡,对工程不安全。因此,笔者按照共同作用的机理和地基弹性力学分析,建立悬臂式挡土墙结构的计算模型,整体计算其内力和变形,以探索更加接近实际受力情况的结构计算模型,更好地为工程设计服务。

1 问题的提出

悬臂式挡土墙指的是由直立的悬臂墙和水平底板组成,工程上通常称立墙、趾板、踵板 3 个钢筋混凝土悬臂构件组成的挡土墙。该类挡土墙具有断面简单、施工方便等优点,是目前工程中常用的轻型挡土墙之一。在水利、市政等工程中应用较多。尤其是在城市防洪、河道整治等工程中,常为首选的结构形式,其设计直接影响到工程方案的安全可靠性及经济合理性。目前工程设计中常采用结构力学法和弹性地基梁法进行结构计算,但这 2 种方法都存在一些问题,结构力学法是假设基底反力按直线形分布,没有考虑地基的弹性变形,其结果是立墙与底板相交的节点内力不平衡;而弹性地基梁法虽然考虑了地基、基础的弹性变形,但是存在地基参数不便确

定的问题,且 2 个计算模型中都没考虑结构的共同作用。因此,都不能真正反映结构的实际受力情况。要解决这些问题,需要在计算模型上进行创新。

关于悬臂式挡土墙结构计算的理论研究不多。虽然其结构比较简单,但如果要考虑共同作用分析计算和地基的弹性变形,计算尚显复杂,目前在工程设计的计算中,尚未同时考虑这 2 方面的因素,有关设计规范^[3]和设计手册都未提及。

笔者将近年来在工程设计中用于悬臂式挡土墙结构计算的一种新方法加以总结,以倡导科技创新、促进科技进步,为丰富基础应用的研究做一次有益的探讨。

2 计算模型的分析比较

2.1 一般的计算方法

悬臂式挡土墙的结构计算前,其设计首先要满足基础设计与稳定性计算的规定。在计算荷载确定后,再完成结构内力和变形计算。目前结构计算的方法主要有结构力学法、弹性地基梁法和有限元法;但工程设计中广泛采用的是结构力学法,其次是弹性地基梁法。

根据悬臂式挡土墙的受力特点,结构力学法和弹性地基梁法都是将其简化为平面结构,取单宽横断面为计算单元。结构力学法是先拆分,将立墙按底部固定在底板的悬臂梁上,踵板和前趾板均为一端固定的悬臂梁,基底反力按直线形分布,3 部分都是按悬臂梁计算内力。弹性地基梁法是将其拆分为立墙和基础板,然后分别计算。它先把基础作为立

作者简介:唐金忠(1956—),男,安徽安庆人,高级工程师,从事水工结构设计工作。E-mail:jinzhongtang@163.com

墙的固定支座,在荷载的作用下,求出立墙的内力和墙脚固定处的反力,然后把该反力作用于基础上,按弹性地基梁方法计算底板内力和变形。

有限元法是将挡土墙结构与周围土层看作是有机的整体,墙体、基础与周围介质相互共同作用,其适用性较广。但有限元法计算工作量较大,且和弹性地基梁法一样缺乏合理的土性参数确定方法,制约了它在工程设计中的广泛应用。所以这两种方法并没有很好地被广大设计人员所接受,目前在工程设计中应用较多的还是结构力学法。

2.2 新的计算模型

鉴于目前工程设计中常用结构力学法和弹性地基梁法,都存在不足。因此,笔者提出了新的计算模型的思路,即要在计算中解决杆件的共同作用、地基和基础的弹性变形这两方面的问题,这样,结构计算的结果才能和结构真实的受力情况相吻合。

2.2.1 计算单元

水工结构内力分析时,为了减少计算工作量,一般可以不对整个结构进行分析,而是从实际结构中选取有代表性的一部分作为计算的对象。悬臂式挡土墙的纵向刚度较大,因此纵向变形是很小的,一般采用截条法取横向截面按平面结构计算。整体计算的计算单元与结构力学法和弹性地基梁法一样,截取单宽横剖面为计算单元。

2.2.2 计算简图

取挡土墙横剖面中各杆件中部截面形心引出的平行于外皮的横竖直线为计算简图,根据地基、基础的受力特点,将地基模拟为一个个弹簧,根据基底的附加应力和沉降,计算弹簧支座的刚度^[4]。这样地基可简化为一个个弹簧支座,从而将地基、基础的弹性力学分析转化为力学问题求解,同时将立墙、基础和地基作整体计算。加上弹簧支座后,其整体结构的计算模型为超静定结构,可用力法、位移法或有限元编程求解。

2.2.3 计算荷载

整体计算的模型中,荷载计算与其他2种计算

方法基本相同,都是按规范要求计算,不同的是作用在挡土墙上的荷载须另计底板和地基间的摩擦力。因为在超静定结构中,力和位移是相辅相成的,变形必须符合原结构的联结条件和支撑条件。整体计算中地基简化为一个个弹簧支座,但底板与地基间为滑动接触,计算模型未模拟其结合面的接触刚度。所以需对其简化,在荷载中计入底板和地基间的摩擦力。摩擦力在底板上的分布与地基反力成正比,可按常规的方法计算:

$$F = f \sum G \quad (1)$$

式中: F 为摩擦力,kN; f 为挡土墙基底面与地基之间的摩擦系数; G 为作用在挡土墙上的全部竖向荷载,kN。

根据上述的计算原则和计算方法,将作用在挡土墙上的荷载确定后,即可按整体计算模型进行内力和变形计算。

2.3 计算方法的对比

2.3.1 计算模型的比较

综上所述,结构力学法和弹性地基梁法是目前悬臂式挡土墙结构计算常用的方法,这2种方法都需要将挡土墙结构拆分后分别计算,前者需要分3个杆件计算,立墙、趾板、踵板分别按悬臂梁计算。后者需要分2个构件计算,立墙按悬臂梁计算,底板按弹性地基梁计算,该项计算需先确定地基的有关计算参数。这2种计算方法都未考虑立墙和底板的相互约束,即未考虑共同作用。整体计算法则解决了这2种方法的不足,以弹簧支座模拟各种不同的地基,按共同作用机理将结构与地基作整体计算,计算方便、直观。为了便于比较,下面将这3种计算方法以图示展开,以便更直观,一目了然。计算图示见图1、图2、图3。

从上述计算模型的比较可以看出,整体算法为工程设计提供了一种新的计算模型和求解方法,以弹簧支座模拟地基,并将各杆件作整体计算,可直接得出立墙、趾板和踵板的内力和变形。该方法避

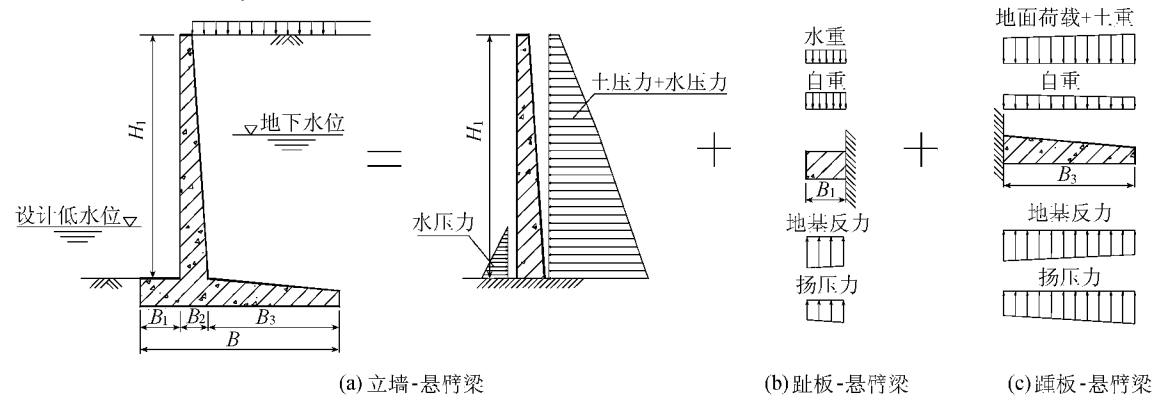


图1 结构力学法计算图示

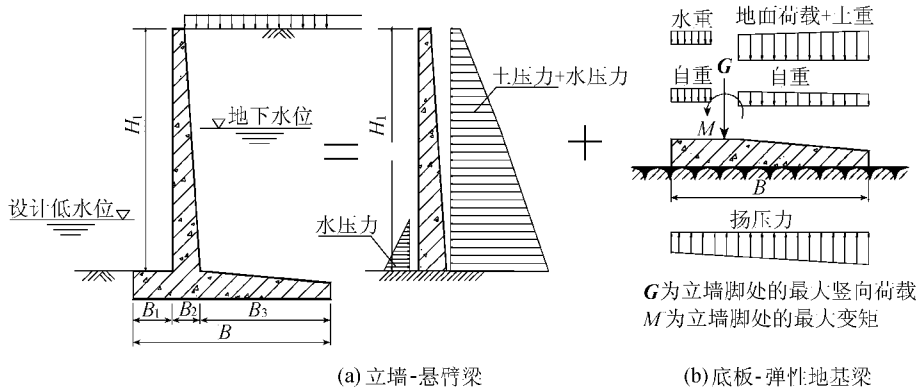


图 2 弹性地基梁法计算图示

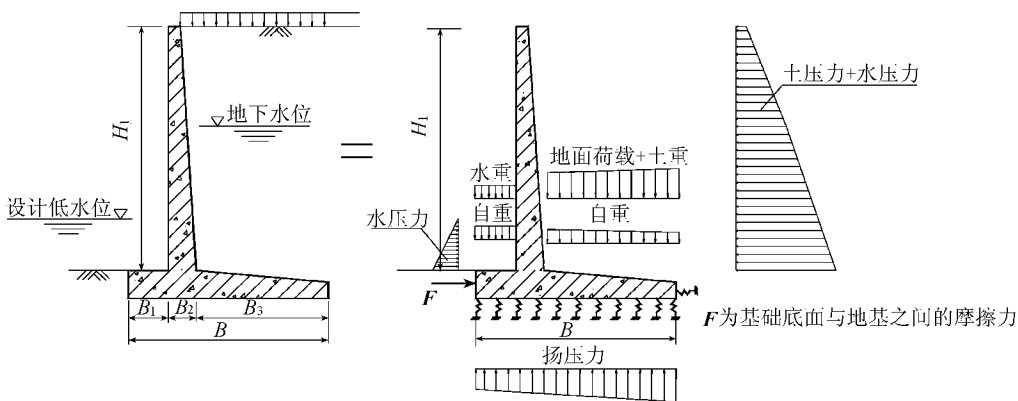


图 3 整体计算法计算图示

免了拆分后按单个杆件计算的繁琐,荷载可直接调整,直观方便,容易修改,操作方便灵活,计算模型完整,无须拆分,且结构的受力和变形比其他计算方法更符合实际情况。

2.3.2 对比计算

以上海市某水闸工程中的悬臂式挡土墙为例,通过采取结构力学法、弹性地基梁法和整体计算法,进行结构的对比计算。该工程护岸挡土高度为 4.3 m,设计经比较后选用悬臂式挡土墙,其截面尺寸根据挡土高度拟定,墙后荷载取 5.0 kPa,基础板厚 0.7 m,混凝土均为 C30,地基为软土地基,经计算整体稳定、地基承载力和沉降都不能满足规范要求。因此,工程设计采用水泥搅拌桩进行地基处理,桩径 0.5 m,1.2 m × 1.2 m 正方形布置,桩长 6.0 m,桩土面积置换率为 14%,复合地基承载力设计值为 106.7 kPa。

在不同的运用工况下,悬臂式挡土墙各部分构件的内力也不相同,结构计算要完整地进行每种工况下的内力计算,按内力包络图配筋,并进行裂缝验算。完建期设计采用分步回填墙后的回填土以控制结构的内力,经分析最不利工况是墙前为最低水位的运行工况。为了说明问题,本文以墙前最低水位为计算工况,按 3 种不同的计算方法进行内力和变形的对比计算。不同的计算方法其作用分项系数、计算断面均相同。

悬臂式挡土墙的结构计算是在整体稳定、地基承载力、地基沉降都完成后进行的,这方面的计算这里不再赘述,仅对结构内力和变形进行对比计算。对比计算中,结构力学法将立墙、趾板、踵板分别按悬臂梁计算,地基反力按直线分布。弹性地基梁法中,立墙按悬臂梁计算,底板按弹性地基梁计算,采用工程中常用的郭氏表法,底板截面高度为 0.7 m, C30 钢筋混凝土的弹性模量 $E_h = 3.0 \times 10^7 \text{ kPa}$,地基为水泥搅拌桩复合地基,参照双向权重系数法^[5]计算其综合地基变形模量 $E_0 = 20080 \text{ kN/m}^2$,按公式计算梁的柔性指数为

$$t = 10 \frac{E_0}{E_h} \left(\frac{l}{h} \right)^3 \quad (2)$$

式中: t 为柔性指数; l 为地基梁的半梁长, m; h 为梁的高度, m, 即底板厚度。

整体计算法中,基础设置 10 个弹簧支座,先利用基础设计的计算结果计算弹簧支座的刚度^[4]

$$k_i = \frac{\bar{p}}{s_i} \quad (3)$$

式中: k_i 为弹簧支座的刚度, kN/m; s_i 为该点处的沉降值, m; $\bar{p}$ 为作用于弹簧支座上的平均反力, kN, $\bar{p} = p_0 \times A_i$, 其中 A_i 是弹簧支座的计算面积, m^2 , p_0 为基底处的附加应力, kPa。

经计算,弹簧支座的刚度最大值为 16 900 kN/m,

最小值为 5 004 kN/m ;底板和地基间的摩擦力为 87.2 kN。在运行工况下 ,3 种计算方法的计算结果见表 1。应当指出 ,表 1 中整体计算是取各构件的轴线为计算简图 ,考虑到节点处支座宽度的影响 ,控制截面应在支座边缘处。整体算法可以一次性完成内力和变形计算。

表 1 运行工况下 3 种不同计算方法的计算结果比较				
计算方法	计算位置	最大弯矩/ (kN·m·m ⁻¹)	最大剪力/ (kN·m ⁻¹)	地基反力/ (kN·m ⁻¹)
结构力学法	立墙	100.72	- 74.83	91.46
	趾板	- 37.83	- 65.53	29.94
	踵板	- 74.83	73.02	
弹性地基梁法	立墙	100.72	- 64.52	113.70
	趾板	- 56.35	- 65.53	
	踵板	- 64.52	64.00	104.60
整体算法	立墙	125.20	- 46.70	74.90
	趾板	- 78.50	- 66.80	27.10
	踵板	- 46.70	78.80	

注 杆端弯矩以顺时针为正 ,反之则为负 ,表中值均为标准值 ,计算位置均在趾板端部及踵板端部。

2.3.3 分析比较

上述 3 种计算方法的计算内容相同 ,地基沉降、地基承载力、抗渗、抗滑、抗倾和整体稳定、荷载计算均相同 ,不同的是结构的计算模型。从 3 种不同计算方法的综合比较可以看出 ,整体算法采用的是整体的结构图形 ,只需作一次计算 ,计算的构件个数最少 ,而计算精度最为理想 ,简单方便。上述实例中 ,整体算法的基础最大变形为 0.78 cm ,与按规范计算的地基沉降量基本吻合 ,立墙与底板相交的节点内力相平衡 ,这也说明整体计算模型的合理、简便。

以上计算结果显示 ,不同的计算模型 ,其计算结果有较大的差别。这主要是因为计算方法的性质截然不同。

a. 弹性地基梁法和整体算法采用的是弹性地基 ,基础内力的大小受地基弹性的影响 ,而结构力学法模型中的基础只是普通的钢筋混凝土梁 ,其内力的大小只与传递给它的荷载有关 ,而与地基弹性无关。

b. 弹性地基梁法和整体算法模型 ,都考虑了基础整体弯曲变形的影响 ,而结构力学法模型的基础只是一块刚性板 ,不受基础整体弯曲变形的影响 ,由此计算得到的立墙与底板相交的节点内力则无法相平衡 ,而整体算法模型计算出来的节点内力是相平衡的。

c. 弹性地基梁法和整体算法的计算模型也有差别 ,前者没有考虑结构的共同作用 ,后者是整体结构模型 ,整个结构受力平衡 ,变形协调。

综上所述 ,常规的结构力学法和弹性地基梁法 ,因为都没有考虑杆件间的共同作用^[6-7] ,忽略了杆件之间的相互制约。因此 ,导致立墙和趾板计算弯矩

偏小 ,而踵板计算弯矩偏大。整体算法 ,立墙支座边缘的弯矩标准值为 105.16 kN·m/m ,趾板支座边缘的弯矩标准值为 - 54.86 kN·m/m ,比结构力学法计算的结果都大。结构力学法由于低估了部分杆件的内力 ,而且内力误差较大 ,已超过了工程设计中一般允许误差在 5% 左右的范围 ,部分计算结果是偏于不安全的。

3 结 语

a. 悬臂式挡土墙结构的整体计算 ,计算简图符合原结构的整体图形 ,将立墙、底板和地基进行联合受力分析 ,这样可以比较准确地求得内力和变形 ,计算模型引入了立墙对基础的约束作用 ,考虑了地基和结构的相互影响 ,力的传递明确 ,变形可相互协调。

b. 悬臂式挡土墙的整体计算是一种新的计算模型 ,提出了结构计算的新思路、新技术。所做的工作具有一定的理论与实践意义 ,实用性强。近年来 ,已用于水利、市政等多个工程设计中 ,取得了令人满意的效果。

c. 对复合地基及桩基的挡土墙 ,现有的计算方法难以解决此类地基的弹性力学问题。整体计算模型可利用弹簧支座来解算此类问题 ,桩、土可以分别模拟为弹簧支座 ,在计算方法上进行了合理的转换 ,使得计算得以简化 ,而且能获得满意的计算结果。既为工程设计提供了解决问题的方法 ,也有利于理论上的不断完善。

d. 悬臂式挡土墙的整体计算模型 ,目前只是计算结构的内力和变形 ,下一步可嵌入配套的其他计算模块 ,如荷载计算、稳定计算等 ,进一步丰富整体计算模型的计算内容。

参考文献 :

[1] 管枫年 ,薛广瑞 ,王殿印 . 水工挡土墙设计[M]. 北京 :中国水利水电出版社 ,1996.

[2] 梁学文 ,刘倩 . 悬臂式挡土墙的有限元分析[J]. 华中科技大学学报 城市科学版 ,2003 ,20(2) :99-102.

[3] SL 379—2007 水工挡土墙设计规范[S].

[4] 唐金忠 ,印超 ,杨波 . 弹性地基上的框架结构计算初探[EB/OL].[2009-03-12]. http://highlights.paper.educn/page_detail.php?id=342

[5] 季永兴 ,吴睿 ,费忠 . 软土复合地基变形模量确定及对结构内力影响[EB/OL].[2006-02-10]. <http://www.studa.net/shuili/060219/15140089.html>.

[6] 陈希哲 . 土力学地基基础[M]. 北京 :清华大学出版社 ,2004.

[7] 刘子慧 ,李翰卿 . 悬臂式挡土墙底板结构计算方法探讨[J]. 人民长江 ,2001 ,32(2) :42-44.

(收稿日期 2008-10-27 编辑 :方宇彤)