

## 竖铰接式生态直挡墙破坏机理数值分析

苏 慧<sup>1</sup>, 毛昆明<sup>1\*</sup>, 颜 建<sup>2</sup>, 黄奕钧<sup>3</sup>

(1. 金陵科技学院, 江苏 南京 211196; 2. 连云港市水工程管理处, 江苏 连云港 222003,  
3. 河南大学, 河南 开封 475000)

**摘要:** 竖铰接式生态直挡墙在中小河流中应用较广, 为探明其破坏失稳机理, 以 Abaqus 软件为平台, 建立土坡—竖铰接式生态直挡墙有限元模型, 得到的结论和建议: 由于竖铰接式生态直挡墙一般用于浅基坑或边坡, 几乎不会发生直接滑移或倾覆失稳; 其主要破坏形式是砌块受土压力作用而产生位移, 连接上下砌块的纤维棒受到剪力过大从而断裂, 砌块之间失去连接整体性下降, 最后砌块逐个掉落导致土坡无支护而失稳。可采用抗剪强度高的材质如碳纤维棒代替玻璃纤维棒, 并采取措施增加相邻砌块之间摩擦力。

**关键词:** 竖铰接式; 直挡墙; 破坏机理; 数值分析; 生态

**中图分类号:** X522      **文献标识码:** B      **文章编号:** 1007-7839 (2018) 05-0018-04

### Numerical analysis of failure mechanism of vertical articulated ecological straight retaining wall

SU Hui<sup>1</sup>, MAO Kunming<sup>1\*</sup>, YAN Jian<sup>2</sup>, HUANG Yijun<sup>3</sup>

( 1. Jinling Institute of Science and Technology, Nanjing 211196, Jiangsu;  
2. Lianyungang Urban Area Water Engineering Management Department, Lianyungang 222003, Jiangsu;  
3. Henan University, Kaifeng 475000, Henan )

**Abstract:** Vertical articulated ecological straight retaining wall is widely used in the middle and small rivers, in order to study its failure mechanism, based on Abaqus software platform, earth slope-vertical articulated ecological straight retaining wall FEM is established, and the following conclusions and suggestions are obtained: Because vertical articulated ecological straight retaining wall is generally used in shallow foundation pit or slope, there is nearly no direct slip or overturning instability. Its main damaging form is the block produces displacement by earth pressure, fiber rods connecting up and down blocks are broken when the shearing force is too large, then the blocks overall fall down due to the connection between the blocks is lost. Finally, the block drops one by one, resulting in soil slopes have no supports and become unstable. Materials with high resisting shear strength such as carbon fiber rods can be used to replace glass fiber rods, and some measures are took to increase the friction between adjacent blocks.

**Key words:** vertical articulated; straight retaining wall; failure mechanism; numerical analysis

收稿日期: 2017-12-02

基金项目: 江苏省水利厅科技项目(2016038); 江苏省科技厅自然科学基金面上资助项目(BK20141090); 南京市科委社会发展项目(201505018)

作者简介: 苏慧(1968-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为结构振动控制、节能环保、生态护坡。

通信作者: 毛昆明(1985-), 男, 讲师, 博士。

## 0 引言

近年来,随着人们环保意识的加强,越来越多的生态型护坡被用于水利工程<sup>[1-5]</sup>,它们可全面解决挡土、反滤、排水、生态、景观、防护、耐久、人性化等许多在结构上互为制约、对立的难题,是一种有效防止水侵蚀堤坝岸坡土壤的防治系统,使河道护坡具有更坚固稳定的防护作用。但是这些只能运用在斜坡和河堤上,而大部分河堤和河面几乎都是成 $90^\circ$ 角,这些生态护坡的适用范围受到了很大的局限。

因此,竖铰接式生态直挡墙护坡结构(图1)作为一种新型柔性挡墙结构体系应运而生,它将生态护坡和维护工程安全二者有机结合在一起,墙面体内部通过铰接扣和纤维棒或销钉连接,连接器的加设使得上下层砌块共同作用形成高强度的稳定结构。生态直挡墙结构具有透水不透土的特点,从而实现了生态学上的易于植物生长性和工程学上的力学稳定性。它克服了传统的条石、干砌块石、现浇混凝土等重力式挡土结构体积大、对地基承载力要求高、外观呆板等缺点。该结构外观漂亮、柔性好,对地基承载力要求低,工厂生产、现场安装,具有很好的生态效应,近十余年来在美国、澳大利亚、欧洲广泛流行,其广泛用于园林景观、高速公路、立交桥护坡、小区水岸等。

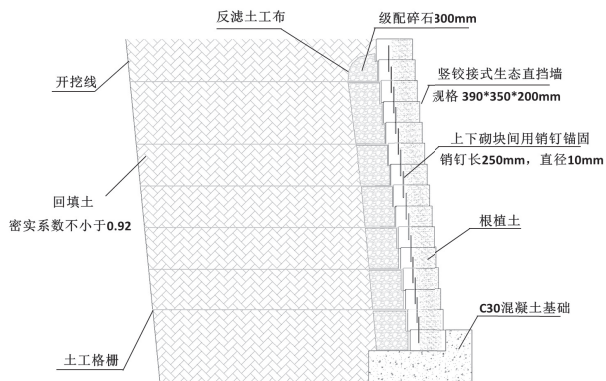


图1 竖铰接式生态直挡墙构造

图2为南京市溧水区经济河综合整治工程中生态直挡墙的具体应用。可以看出,整片挡墙是由很多个砌块堆放而成,能够在工厂预制单个砌块,直接运到工程现场拼接施工,不但能节省工期和预算,而且美观、耐久,利于环保,更能重复利用,节约资源,如有必要,还可以在砌块中种植植物,利用活性植物与工程材料的组合,在坡面上构建一个具有生长能力的

功能系统,增加边坡稳定以达到护坡和美化自然环境目的。



图2 竖铰接式生态直挡墙的具体应用

但是,竖铰接式直挡墙的应用是套用传统加筋土挡墙的设计方法,虽取得了不少经验,但是相应理论研究严重滞后,对生态型加筋土挡墙的工作机理、破坏机理、稳定性分析缺乏深入的研究;对于如何将支挡结构的稳定性与植被防护有机结合,形成有效的综合防护体系的研究正在逐步地受到重视,而相应的设计理论方法和施工技术体系的研究尚处于起步阶段,工程应用缺乏必要的理论依据和规范指导。

本文以Abaqus有限元软件为计算平台,建立了土坡-竖铰接式生态直挡墙有限元模型。分析了生态直挡墙及纤维棒的水平位移、剪力以及墙后土体的变形和应力分布规律,对竖铰接式生态直挡墙的破坏失稳机理进行了深入研究,为实际工程的应用提供参考和依据。

## 1 三维有限元数值建模及分析

图3为砌块及纤维棒有限元模型图。中间的方孔在实际工程中为填土及植物,在数值模型中忽略植被效应,并将填土自重转化为均布荷载,以减少计算量。4个留孔为纤维棒位置,纤维棒长度为2个砌块高度,上下砌块通过纤维棒相连,并且采用错砌形式,一是可以使墙后土体保持轻微倾斜减小土压力;二是可以避免纤维棒过长从而抗弯及抗剪性能不足的缺点。

图4为土坡-竖铰接式生态直挡墙有限元模型图,通过墙体砌块逐层退台,使砌块与墙后填土形成整体结构,共5层砌块,总高度1m。由于相邻2层

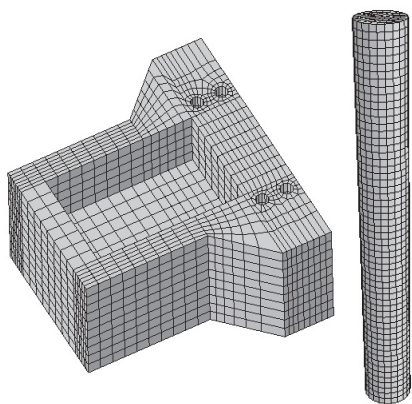


图3 砌块及纤维棒有限元模型网格图

砌块采用错砌形式,最边缘处为阶梯形状并且在土坡之外。但由于实际工程中的土坡长度远大于土坡之外砌块长度,因此这部分砌块长度可以忽略不计。但有限元建模时,限于计算机性能和计算时间的限制,土坡长度不可能无限长,本文土坡2个方向的长度均为1 m,均约束侧向位移,与实际情况相符。相邻砌块法向采用硬接触,切向采用罚函数摩擦接触,砌块与纤维棒之间采用绑定约束。从图1可以看出,直挡墙底部有1个混凝土基础,前端向上凸起,其作用是约束最底层砌块的位移,减小直挡墙滑移和倾覆的风险。在本文的数值模拟中,为减小计算量,并未建立混凝土基础模型,而采用了对底层砌块进行位移约束的方法,但二者的效果是一样的。在实际工程中,为了更好地护坡,还会采用土工格栅,但本文仅是研究破坏机理而不是指导实际工程,因此忽略。

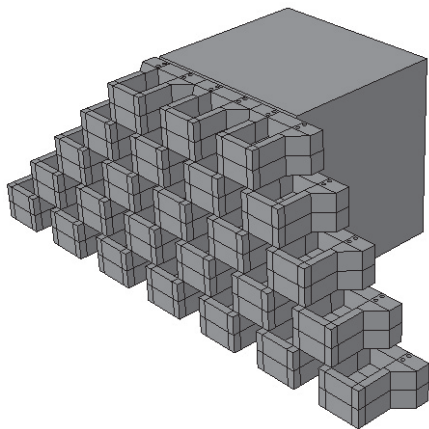


图4 土坡-竖铰接式生态直挡墙有限元模型

采用摩尔库伦本构模拟土壤性质,内摩擦角 $20^\circ$ ,粘聚力10 kPa,为了能更明显看出直挡墙的破坏机理,在土层顶部逐级施加10 kPa的均布荷载。

混凝土砌块采用线弹性本构,而纤维棒采用玻璃材质属性, $E=75\text{ GPa}$ , $\mu=0.25$ , $\rho=2600\text{ kg/m}^3$ ,并采用Drucker-Prager损伤本构定义纤维棒的断裂准则属性, $\sigma_{\max}=40\text{ MPa}$ , $G_I=1.5\text{ N/mm}$ , $G_{II}=G_{III}=1\text{ N/mm}$ 。

## 2 有限元计算结果分析

### 2.1 土坡失稳分析

图5是墙后土体的塑形应变云图和位移趋势云图。可以发现,土坡的位移趋势为突破下角。塑形应变其实为土坡的滑动面,土坡高度只有1 m,因此未形成整体滑动面。这2个图清楚地表明了土坡失稳的过程,即一开始是土坡坡脚出现屈服,然后向上延伸,直到出现塑性区的贯通现象,即滑动面位置,呈大致的圆弧状,并且通过坡角点。

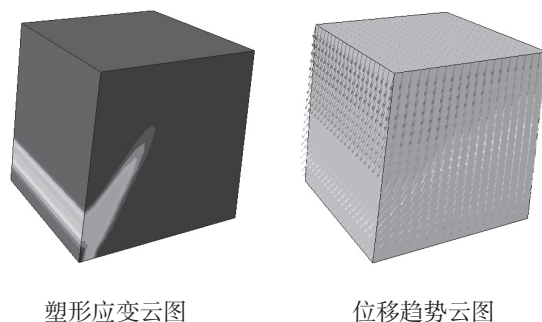


图5 土体结果云图

### 2.2 直挡墙失稳分析

图6为直挡墙失稳云图。一般重力式挡土墙的破坏方式为整体滑移或倾覆,有时是墙身强度不足而破坏。但竖铰接式生态直挡墙的破坏形式则比较特殊。可以看出:最上层的砌块已脱离直挡墙,而其他几层砌块(除最下面一层位移已被约束)也背离土体位移。前文已介绍,上下相邻砌块之间是用纤维棒连接,砌块仍然在土压力作用下产生位移甚至脱离直挡墙的原因只能是纤维棒未能发挥作用,因此接下来对纤维棒进行受力分析。

### 2.3 纤维棒受力分析

图7为纤维棒应力及变形云图。当上层砌块在土压力作用下产生的位移大于下层砌块的位移,相当于在连接两者的纤维棒的中间施加了剪力,纤维棒在上下相邻砌块处出现应力集中,当剪力逐渐增加直到超过纤维棒的极限抗剪强度时,纤维棒被剪断。

### 2.4 竖铰接式生态直挡墙破坏机理分析



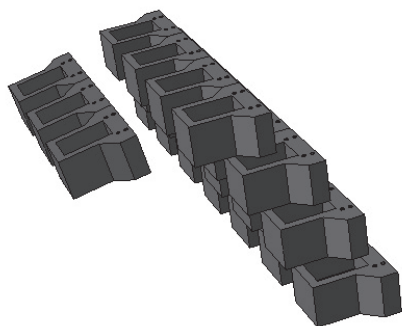


图6 直挡墙失稳云图

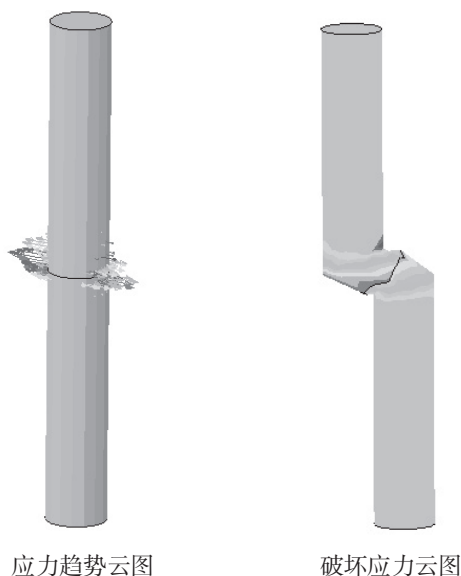


图7 纤维棒应力及变形云图

竖铰接式生态直挡墙一般用于中小河流或农村灌溉沟渠的边坡稳定,土坡不高,土压力较小,因此挡土墙直接滑移或倾覆的可能性较低。主要的破坏形式是相邻砌块之间的错动形成的位移,对纤维棒造成剪力。随着剪力逐渐增大直到超过纤维棒的抗剪强度造成纤维棒折断,砌块之间失去连接整体性下降,最后砌块逐个掉落导致土坡无支护而失稳。

因此,改良竖铰接式生态直挡墙的关键方法是提高纤维棒的抗剪强度或减小其受的剪力。可采用碳纤维棒或销钉代替玻璃纤维棒。

除此之外,不应完全由纤维棒承受剪力,应加强相邻砌块之间的摩擦力,例如可以将砌块表面做得凹凸不平以增加相互摩擦,或者在砌块边缘做成类似木结构的榫卯连接,使得砌块与纤维棒共同承受

剪力,以防止纤维棒断裂导致直挡墙失稳。

### 3 结论及建议

本文通过 Abaqus 软件建立了土坡-竖铰接式生态直挡墙有限元模型,分析了生态直挡墙及纤维棒的水平位移、剪力以及墙后土体的变形和应力分布规律,对竖铰接式生态直挡墙的破坏失稳机理进行了深入研究,得到以下结论和建议:

(1) 由于竖铰接式生态直挡墙一般用于浅基坑或边坡,所以一般不会发生直接滑移或倾覆失稳;土坡坡脚出现屈服,然后向上延伸,直到出现塑性区的贯通现象,呈大致的圆弧状,通过坡角点,但并未形成整体滑动面。

(2) 竖铰接式生态直挡墙的主要破坏形式是砌块受土压力作用而产生位移,连接上下砌块的纤维棒受到剪力过大从而断裂,使砌块之间失去棒连接整体性下降,最后砌块逐个掉落导致土坡无支护而失稳。

(3) 可采用抗剪强度高的材质如碳纤维或销钉代替玻璃纤维棒;同时采取措施增加相邻砌块之间摩擦力,使砌块与纤维棒共同承受剪力,以防止纤维棒断裂导致直挡墙失稳。

(4) 竖铰接式生态直挡墙在实际工程中的应用更为复杂,包括排水管的安放、拉接网片的安装及挡土区回填、土壤生态修复及景观建设等,还需要进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 全道斌,宋力,薛松,等.铰接式生态护坡块在水环境护岸工程中的应用[J].人民黄河,2012(02):12-16.
- [2] 曹裁宏.生态连锁式护坡技术在河道护坡工程中的应用[J].水利规划与设计,2014(01):51-53.
- [3] 高翠云.连锁式生态护坡砖在河道护岸工程中的应用[J].水利规划与设计,2017(09):95-97.
- [4] 苏慧.铰链式混凝土砌块生态护坡技术在工程中的应用研究[J].水利与建筑工程学报,2013,11(3):70-72.
- [5] 刘明辉,陶宇君.生态护坡在城市河道防护工程中的应用[J].江苏水利,2008,5(5):42-44.