

# 地震作用下土工格栅加筋土边坡路堤动力分析

段彦福<sup>1,2</sup>, 宋玲<sup>1\*</sup>, 刘杰<sup>2</sup>, 郭铭倍<sup>1,2</sup>

(1.石河子大学, 新疆 石河子 832003; 2.新疆维吾尔自治区交通规划勘察设计研究院)

**摘要:** 结合 S101 线沙湾项目试验段, 建立边坡二维地震动力分析模型。利用 Midas GTX NX 有限元软件研究高烈度区土工格栅加筋土边坡路堤的动态特征, 分析边坡外部和内部在地震加速度下的位移响应、加速度响应、应力响应。研究表明: 在地震加速度不同时刻, 结构各处加速度值、位移值、应力值不同, 坡顶部坡面加速度有明显的放大现象。地震响应加速和位移敏感部位都在坡顶部坡面, 土工格栅应力最大部位在坡体的  $H/3$  处, 且坡脚更容易发生剪切破坏。

**关键词:** 边坡; 地震加速度; 加速度; 位移; 应力

土工格栅加筋结构由于其施工方法简单、造价低, 在工程领域广泛应用。加筋土结构方面的研究主要分为静力作用和动力作用两类, 目前加筋土结构在静荷载作用下稳定问题的研究已逐渐成熟, 各国都制定了相应的技术规范用于工程实践; 而由于在地震荷载作用下破坏机理的复杂性以及其变化的随机性、非线性, 导致目前的研究还不成熟, 在抗震设计方面也没有为业界所接受的合理规范。因此, 有必要对加筋土结构复杂的动力特性和抗震机理展开深入研究。

目前中国学者大多通过振动台试验和数值模拟来分析加筋土结构在地震荷载作用下的动力响应。在振动台试验方面, Srilatha 等通过振动台试验对比加筋前后边坡的稳定性, 发现加筋后边坡的稳定性明显比未加筋好; 王丽艳等通过振动台试验研究, 揭示了柔性挡土墙上受力分布规律。但是, 振动台试验模型制作难度大、周期长、成本高, 再加上由于土体具有非线性的特点, 所以采用振动台模型试验对加筋土进行动力特性研究具有一定的局限性。在数值模拟方面, 刘华北应用动力弹性有限元法, 研究地震作用下不同参数土工格栅加筋土挡墙的动力响应, 发现不同设计参数下的土工格栅加筋土挡墙动力响应不一样; 赵鹤晖等通过试验, 发现土工格栅的蠕变是影响加筋土结构安全的重要因素; 李广信通过对地震时加筋土结构稳定

性的调查研究, 发现近年来世界上发生的著名大地震中, 柔性的加筋土结构物没有发生整体失稳的案例; 冯复兴等研究了面板厚度不同情况下双级加筋挡墙的地震反应, 发现面板厚度对结构稳定性也有一定的影响; 杨广庆等忽略上下级挡墙之间的互相作用来研究地震作用下挡墙的稳定性; 程亚男等通过拟动力法分析加筋土坡的稳定性, 得到在动力作用下加筋土坡有很好的抗震性。

综观上述研究成果, 大多数学者的研究集中在加筋土挡墙的动力特性方面, 而对土工格栅加筋土边坡路堤的研究较少。随着计算机技术的不断进步, 商用数值分析软件已经成为加筋土结构动力特性研究的主要手段, 它具有真实性高, 节约成本, 计算方便等优点。该文结合 S101 线沙湾段加筋陡坡路堤试验段工程, 借助有限元软件 Midas GTX NX, 研究地震作用下土工格栅加筋土边坡路堤的位移、加速度、填土剪切应力、坡脚处土工格栅的拉力等响应, 为土工格栅加筋土边坡路堤的优化设计提供参考依据。

## 1 工程概况

S101 线沙湾段公路工程位于新疆维吾尔自治区塔城地区沙湾县境内, 路线起点位于沙湾县石场镇, 终

收稿日期: 2019-06-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51669031); 安徽省自然科学基金资助项目(编号: KJ2014A092); 新疆维吾尔自治区交通运输厅科技项目(编号: 2013(19))

作者简介: 段彦福, 男, 硕士研究生, E-mail: 2934098809@qq.com

\* 通信作者: 宋玲, 女, 博士, 教授, E-mail: xjsdsl0514@163.com

点位于鹿角湾,全长 59.864 km。公路等级为三级公路。路基宽度 8.5 m,路面宽度 7.0 m。路面为沥青混凝土路面,标准轴载: BZZ-100。路线区为国家重点地震监测区,属新疆中部地震区、北天山地震亚区,沿线活动断裂的地震十分活跃,1900 年以来共发生  $M_s \geq 4.7$  级的中强地震 30 余次,有地震记录以来发生 8 级地震 1 次(1906 年)。项目全部处于  $a=0.3g$  区,地震设防烈度为Ⅷ度。该项目 K226+600~K226+702 段为土工格栅加筋陡坡路堤试验段,边坡坡率为 1:1 的加筋土陡坡路基,主筋格栅层间距 60 cm,主筋格栅层铺筋长均为 4.0 m,共铺 14 层,主筋和辅筋规格均为 TGDG80HDPE 单向土工格栅。坡面采用混凝土骨架方格网防护。加筋路堤土工格栅布置见表 1。

表 1 加筋路堤土工格栅布置

土工格栅层位 (自上而下编号)	层间距/ m	铺设/ m	反包长 度/m	总长度/ m
第 6~14 层		9		11.1
第 3~5 层	0.6	7.5	2.1	9.6
第 1~2 层		4		6.1

## 2 计算模型动力数值分析

### 2.1 模型建立

采用 Midas GTX NX 建立的数值模型与实体工程的比例为 1:1,模型分别由土工格栅、填土、石笼防护、自然地基组成。模型最高处为 10 m,宽 10 m。根据文献[9]划分网格尺寸不得大于输入地震波最短波长的 1/10~1/8,该文采用 1940, EI Centro Site, 270° 地震波,所以划分网格尺寸不得大于 12 m,该文模型网格尺寸约为 2 m,网格类型为混合网格。生成数值二维模型如图 1 所示。

为了监测在地震加速度下土工格栅应力、填土的剪切应力、内部填土位移变化情况,分别在堤第 4、7、10、13 层土工格栅中点设置监测点 A、B、C、D,其中内部填土剪切应力测点和土工格栅为同一组测点。为了监测填土边坡处地震加速度下的剪切应力大小,加速度大小,分别在第 3、6、10、13 层填土的边坡坡面设置监测点 H、G、F、E,见图 1。

### 2.2 边界及约束条件确定

在输入地震波前对地面边界施加约束,地面以上结构为自由边界,地面与结构接触部分由软件自动耦合,这两部分不需要施加约束。自然土层部分除与结

构接触部分外,其余 3 个面建立地面弹簧约束。

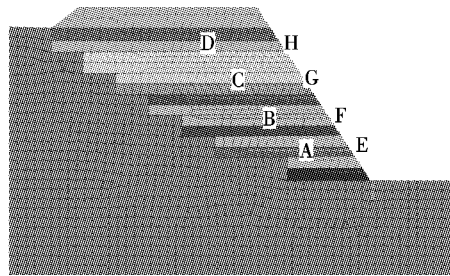


图 1 二维数值模型

### 2.3 模型材料的本构关系

土工格栅的本构模型采用沿轴向变形的一维线弹性单元,其特点是只受拉,不受压,不具有抗弯刚度特性,所以数值模拟时节点之间也受拉,受拉的表现形式为位移,其单元节点与节点的位移关系式如式(1)所示:

$$\begin{Bmatrix} p_i \\ p_j \end{Bmatrix} = \frac{AE_A}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $p_i$ 、 $p_j$  为节点力;  $u_i$ 、 $u_j$  为节点位移;  $A$  为横截面积;  $L$  为单元长度;  $E_A$  为轴拉伸刚度。

填土的模型采用力学弹塑性 Mohr-Coulomb 模型,屈服准则采用 Mohr-Coulomb 强度准则,屈服函数如式(2)、(3),其中  $N_\varphi$  由式(4)算得。因为填土一般发生剪切破坏,所以填土任意点  $f_s < 0$ 。

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2c \sqrt{N_\varphi} \quad (2)$$

$$f_s = \sigma_3 - \sigma'_t \quad (3)$$

$$N_\varphi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (4)$$

式中:  $\sigma_1$  为最大主应力;  $\sigma_3$  为最小主应力;  $\varphi$  为摩擦角;  $c$  为黏聚力;  $\sigma'_t$  为土体抗拉强度。

### 2.4 材料的参数确定

从设计和施工前的材料相关试验,可得出材料属性参数。因为土工格栅满铺后要进行分层碾压,随着填土高度的增加,底部填土碾压次数逐步积累,所以施工现场填土实际强度参数要比试验强度参数大,因此在设置弹性模量时要偏大,材料属性如表 2 所示。

## 3 动力分析

为了得到土工格栅加筋粗粒土双面陡坡的固有模态、固有周期,得到地震时变形的模态,共分析了 10 种模态。从分析的特征数据中可得两个较大的振动周期,分别为 8.037、6.407 s,此数据用于时程分析中定义阻尼方法。

表 2 材料属性参数

材料名称	$E/$ kPa	$\nu$	$\gamma/$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$c/$ kPa	$\varphi/$ ( $^{\circ}$ )	类型	本构关系
填土层	$1.2 \times 10^3$	0.35	18	5	20	2D	摩尔-库仑
自然土层	$4.0 \times 10^5$	0.30	24	—	—	2D	摩尔-库仑
土工格栅 90	$3.0 \times 10^7$	0.33	24	—	—	1D	弹性

该地区地震设防烈度为Ⅷ级,设计基本地面加速度值为  $0.3g$ ,为了使结构抗震更可靠,数值分析时所取加速度值比设计基本地面加速度值大。该文采用的时程荷载函数为 1940, EI Centro Site,  $270^{\circ}$ 地震波,加速度峰值为  $0.3569g$ ,地震波从水平方向、竖直方向施加,时程荷载函数为无量纲速度。在设置时间步骤中,总持续时间为  $53\text{ s}$ ,时间增量为  $1\text{ s}$ ,总时间步数为  $53$  步,取阻尼比系数  $\lambda=0.05$ ,输入的地震波加速度时程曲线如图 2 所示。

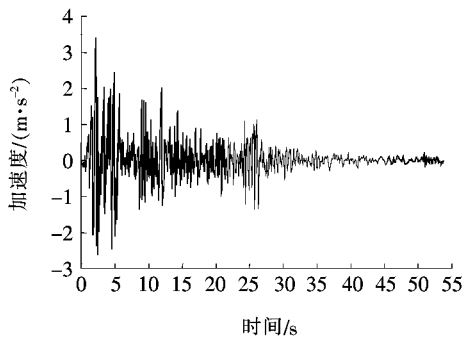


图 2 地震波加速度时程曲线

## 4 时程分析结果

### 4.1 土工格栅受力分析

土工格栅的拉力是加筋土边坡力学性能的重要评价指标,是土工格栅与周围土体相互作用的结果。数值模型中监测了所有结构单元的动力时程,在此选取典型结构单元对其拉力特征进行分析(图 3、4)。

从图 3 可知:地震加速度下测点 A 土工格栅应力较大,从下到上土工格栅应力呈逐渐减小的趋势,土工格栅的位置和长度均能影响路堤的位移,由此可知格栅位置、长度不同应力分布也不同。

由图 4 可知:地震前测点 A、B、C、D 土工格栅应力较大,但是地震后应力明显减小,这是因为在地震加速度作用下筋土之间产生相互滑移,填土与土工格栅之间的摩擦力减小,土工格栅的拉力变小。从曲线走向来看,在  $2.5\text{ s}$  时在原有静力的作用下,产生的地震水

平惯性力使土工格栅应力达到最大,进而逐渐消散,  $25\text{ s}$  后逐渐变小,土工格栅应力重新分布、重新保持平衡。总体来看地震荷载作用下,土工格栅最大应力未超过极限抗拉强度,说明土工格栅加筋土路堤具有很好的抗震性能。

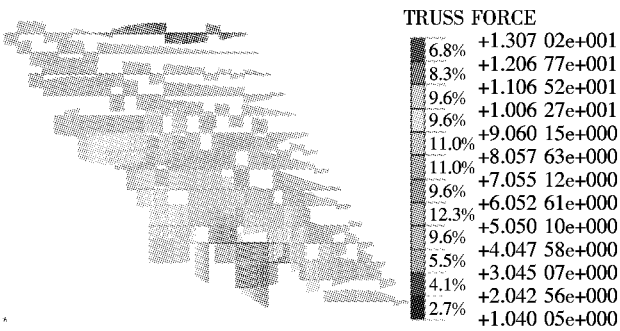


图 3 土工格栅应力云图(单位:kN)

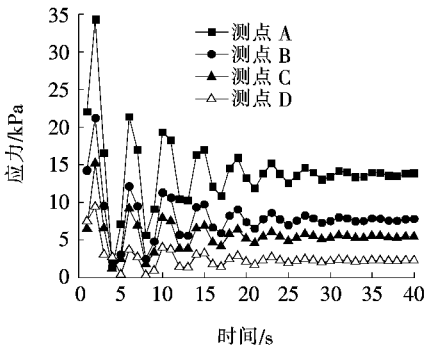


图 4 土工格栅应力曲线

### 4.2 填土加速度分析

因为 Y 轴地震加速度最大,所以选取 Y 轴地震加速度云图进行响应分析,结果如图 5 所示。从图 5 可以看出:结构在各部位加速度不同,整体加速度最大部位位于坡顶部坡面,从坡体底部到顶部加速度逐渐增大,符合随着边坡高度的增加加速度增大这一地震响应规律。图 6 为水平加速度曲线,从图 6 可看出:从  $1 \sim 20\text{ s}$  加速度大小变化最大,  $20\text{ s}$  以后逐渐变小。坡体外部测点 H 水平加速度峰值最大,地震放大倍数约为实际地震加速度的 4 倍,测点 E 水平加速度峰值最小,测点 H 在  $3.75\text{ s}$  时刻的加速度是测点 E 的 6 倍,

该比值也与两点垂直高度比 5.7 接近。

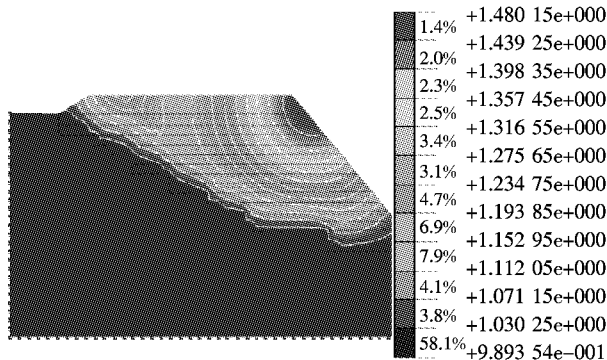


图 5 加速度云图(单位:  $\text{m/s}^2$ )

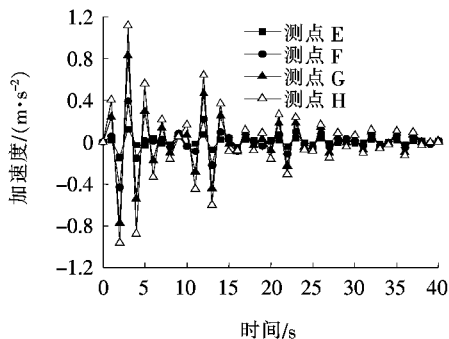


图 6 填土水平加速度曲线

#### 4.3 填土剪切应力分析

在地震加速度作用下结构中产生的地震加速度水平推力、水平方向惯性力,会使填土在原有剪切应力平衡状态随地震持续发生变化。其中坡顶部坡面填土因为加速度大,引起的惯性力也大,而静止土压力小,下部情况相反,所以底部静止土压力大于惯性力,因此底部坡脚处最容易发生剪切破坏,从图 7 内部剪切应力曲线和图 8 外部剪切应力曲线中也可以得到,内部测点 A 和外部测点 F 在地震过后剪切应力比其他测点大,但是相比地震前的剪切应力变小,其原因是填土发生剪切变化时结构自身重力和静止土压力发生一定程度的偏移。所以通过数值模拟可以发现,地震时在地震加速度的作用下剪切作用容易导致土工格栅加筋陡坡路堤坡面防护滑落,坡脚处填土发生塑性破坏,因此为了更好地抵抗地震荷载作用,土工格栅加筋土边坡设计时应采用上疏下密的布筋方式。

#### 4.4 位移分析

在地震加速度下坡体在水平方向主要受到 3 种力的作用,分别为水平方向静止土压力、地震水平推力、水平方向地震惯性力,这些力是坡体产生水平位移的直接原因。图 9、10 分别为外部测点水平相对位移曲

线和内部测点水平相对位移曲线。

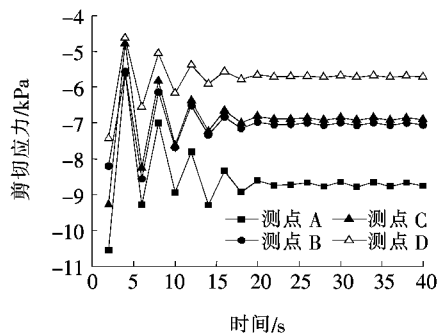


图 7 内部剪切应力曲线

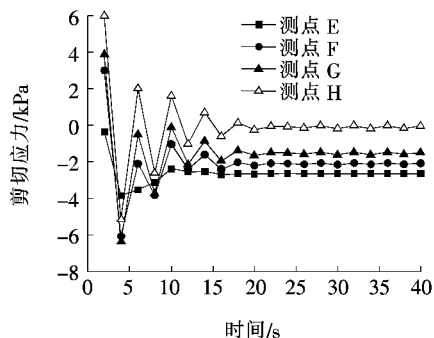


图 8 外部剪切应力曲线

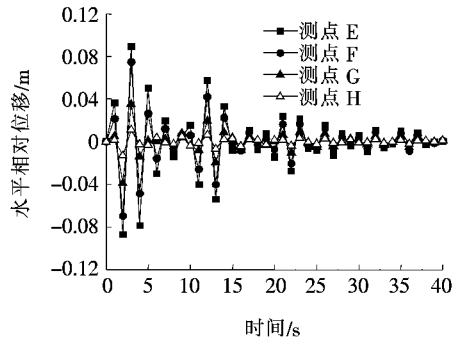


图 9 外部测点水平相对位移曲线

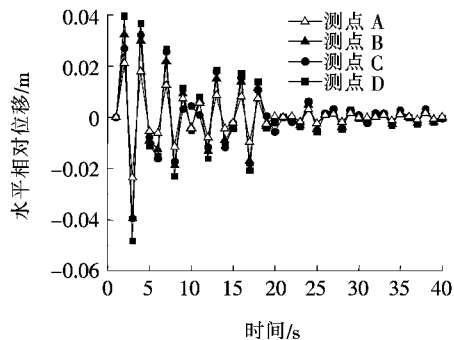


图 10 内部测点水平相对位移曲线

从图 9、10 可看出:在地震前 20 s 填土地震波位移变化速率快,之后逐渐趋于稳定,说明地震结束后

位移会复位。内部测点和外部测点相比较,外部最小测点位移比内部最大测点位移大,这是因为外部坡面是一个自由面,没有约束,加速度大,而内部填土体任何方向都有约束,加速度小,所以位移也小。

图 11、12 分别为竖直方向和水平方向相对位移云图。

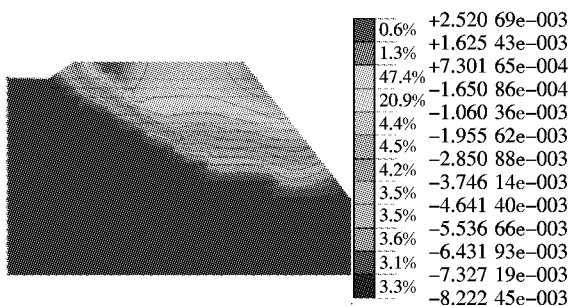


图 11 竖向相对位移云图(单位:m)

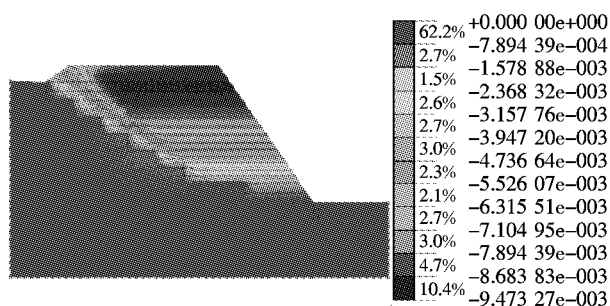


图 12 水平相对位移云图(单位:m)

由图 11、12 可得出:坡体顶部位移比坡体下部大,水平位移比竖向位移大,进一步可知坡脚填土的剪切变量增量较大。因此在设计时坡脚处的土工格栅强度要适当增大,同时为了填土与地基土更好地过渡,应将土工格栅尽量穿过滑移面铺设至地基土台阶处。

## 5 结论

(1) 土工格栅加筋陡坡路堤在地震作用下抗变形能力强,土体在发生塑性变形的同时土工格栅的应力

会达到最大然后变小到趋于稳定,说明土工格栅加筋能有效抵抗地震作用下的边坡变形。

(2) 坡脚和  $H/3$  高度处作为承载上部重力和静止土压力部分,在地震作用下容易超出极限承载力,发生剪切破坏。因此为了更好地抵抗地震荷载作用,土工格栅加筋土边坡设计时应采用上疏下密的布筋方式。

(3) 发生地震时,由于地震加速度在结构中的放大作用,结构响应加速度和位移反应敏感区在坡顶部坡面,所以在工程设计中应注意坡面防护与边坡之间的有效连接,防止坡面防护发生滑移。

(4) 通过位移响应云图发现填土区存在滑裂的危险,所以土工格栅铺设时不宜太短,尽量铺设至开挖的地基土台阶处。

## 参考文献:

- [1] Srilatha N, Latha G Madhavi, Puttapa C G. Effect of Frequency on Seismic Response of Reinforced Soil Slopes in Shaking Table Tests[J]. Geotextiles and Gomebranes, 2013, (36): 27—32.
- [2] 王丽艳,孙田,陈苏.近远场地震中土工格栅加筋土挡墙抗震特性的振动台试验研究[J].土木工程学报,2015(2).
- [3] 刘华北.水平与竖向地震作用下土工格栅加筋土挡墙的动力分析[J].岩土工程学报,2006(5).
- [4] 赵鹤晖,袁惠,等.土工格栅蠕变后拉伸性能试验研究[J].中外公路,2017(1).
- [5] 李广信.地震与加筋土结构[J].土木工程学报 2016(7).
- [6] 冯复兴.地震作用下面板对加筋土挡墙稳定性影响研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2014(S1).
- [7] 杨广庆,刘华北,吴连海,等.台阶宽度对加筋土挡墙垂直应力的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2016(1).
- [8] 程亚男,孙树林.加筋土坡地震稳定性的拟动力分析[J].西华大学学报(自然科学版),2014(2).
- [9] 董士杰,魏红卫.地震作用下土工合成材料加筋土边坡动力分析[J].铁道科学与工程学报,2015(5).
- [10] 胡卫国,何娇敏.土工格栅在填方路堤中的加筋作用试验研究[J].中外公路,2018(1).