

地震工况下兰州南绕城高速公路 路堑高边坡格构支护效果评价

王江荣, 刘 硕, 蒲晓妮, 赵 睿, 赵振学, 王庆岭
(兰州石化职业技术学院信息处理与控制工程学院, 甘肃 兰州 730060)

摘要:以兰州南绕城高速公路已加固典型路堑高边坡为研究对象,利用 AutoCAD 及 ANSYS 软件建立所选典型边坡的三维数值模型,在此基础上运用有限差分软件 FLAC^{3D} 对其在地震工况下的稳定性进行科学评价,目的是为黄土类高边坡工程防护及安全设计提供参考。得出的结论为:当水平向地震加速度为 0.1g 和 0.2g 时边坡处于稳定状态,水平向地震加速度为 0.3g 时边坡处于基本稳定状态,水平向地震加速度为 0.4g 时边坡处于不稳定状态。研究表明,格构锚杆支护承受了大量拉张应力及剪应变增量等,效果显著,对边坡稳定性发挥了重要作用。因该公路建设区抗震设防烈度为 8 度,地震加速度设计为 0.2g,所以地震工况下的所选格构支护边坡处于稳定(稳定系数为 1.15)状态,能够满足规范要求。

关键词:路堑高边坡;格构锚杆支护;水平地震加速度;边坡稳定性;FLAC^{3D}

中图分类号:U418.5⁺2 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)10-0053-08

Evaluation on the lattice support performance for the high cutting slope along Lanzhou South Ring Expressway under the earthquake condition

WANG Jiangrong, LIU Shuo, PU Xiaoni, ZHAO Rui, ZHAO Zhenxue, WANG Qingling

(College of Information Processing and Control Engineering, Lanzhou Petrochemical Polytechnic,
Lanzhou Gansu 730060, China)

Abstract: Taking the reinforced typical high cutting slope along Lanzhou South Ring Expressway as the research object, a three-dimensional numerical model is established for the selected typical slope by using AutoCAD and ANSYS software. On this basis, the finite differential software FLAC^{3D} is used to evaluate the stability of the slope under the earthquake condition, so as to provide reference for the protection and safety design of loess-like high slope works. It is concluded that the slope is stable when the horizontal earthquake acceleration is 0.1g and 0.2g; the slope is basically stable when the horizontal earthquake acceleration is 0.3g; and the slope is unstable when the horizontal earthquake acceleration is 0.4g. The lattice bolt support bears large part of the tensile stress and shear strain increment, et al., with remarkable effect, and it plays an important role in slope stability. The specified seismic intensity for the highway construction region is 8 degrees with the designed seismic acceleration of 0.2g; thus, the selected lattice-supported slope is in a stable state (the stability coefficient is 1.15) under earthquake conditions, which can meet the specification.

Key words: high cutting slope; lattice bolt support; horizontal seismic acceleration; slope stability; FLAC^{3D}

收稿日期:2020-04-24 **修回日期:**2020-06-23 **DOI:**10.12143/j.tkgc.2020.10.010

基金项目:兰州市科学技术局计划项目“兰州南绕城高速公路已加固高边坡稳定可靠性分析研究”(编号:兰财建发[2019]62号);兰州市西固区科学技术局计划项目“黄土地区高边坡稳定性分析研究”(编号:西科发[2017]29号)

作者简介:王江荣,男,汉族,1966年生,教授,硕士,主要从事边坡稳定性分析、控制理论与应用方面的研究,甘肃省兰州市西固区山丹街1号, lzshwj@163.com。

引用格式:王江荣,刘硕,蒲晓妮,等.地震工况下兰州南绕城高速公路路堑高边坡格构支护效果评价[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(10):53-60.

WANG Jiangrong, LIU Shuo, PU Xiaoni, et al. Evaluation on the lattice support performance for the high cutting slope along Lanzhou South Ring Expressway under the earthquake condition[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(10):53-60.

0 引言

兰州南绕城高速公路是兰州市“一横三环九纵”骨干路网体系中的重要一环,对缓解城市交通压力,促进区域经济发展具有重要意义。兰州南绕城高速公路位于青藏高原向黄土高原过渡的陇西黄土高原上,地形地貌总体为南北高(黄土沟梁区),中间低(河谷盆地区),多丘陵沟壑,黄土覆盖厚度较大,公路建设中出现了大量深挖路堑高边坡,主要集中于ZK2+520~ZK2+800、YK2+502~YK2+800和YK38+903~YK40+060、ZK38+900~ZK39+300,边坡处最大挖方深度为46.34 m,呈多级放坡形式,而高边坡是否安全稳定具有重大工程意义、经济意义和社会意义。格构锚杆支护被工程实践证明能够显著提高边坡的稳定性和减小边坡变形^[1-3],因其制作简单、施工方便、工期短、成本低等优点被广泛运用到兰州南绕城路堑边坡防护中。考虑到该公路段(连霍国家高速公路的组成部分)所在区地震动峰值加速度为0.20g,地震反应谱特征周期为0.40 s,且相对应全国地震烈度区划为8度区(《中国地震动峰值加速度区划图》),因此非常有必要对地震工况下已实施格构锚杆支护的路堑边坡进行安

全稳定性评价。为此,本文选择具有代表性的YK39+010工程地质剖面(如图1a所示)左侧高边坡为研究对象,采用具有强大完全非线性动力分析功能的三维拉格朗日元程序FLAC^{3D}软件^[4-6],按4个等级(地震加速度设为0.1g、0.2g、0.3g和0.4g)从位移、应力应变、塑性变形、支护结构受力及变形等方面对该路堑高边坡稳定性进行综合评价。得出的结论供工程安全管理部门及工程建设部门参考。

1 工程概况

1.1 边坡几何参数

所选边坡(见图1b)采用放坡开挖,挖方段主要为厚层风积(位居上层)及冲洪积黄土,中桩最大挖方深43.69 m,边坡处最大挖方深度46.34 m,共分5级开挖。自下而上第一级坡率1:1,坡高8 m,平台宽2 m;第二级坡率1:0.75,坡高8 m,平台宽2 m;第三级坡率1:0.75,坡高8 m,平台宽8 m;第四级坡率1:0.75,坡高8 m,平台宽4 m;第五级坡率1:0.75,坡高约4 m。

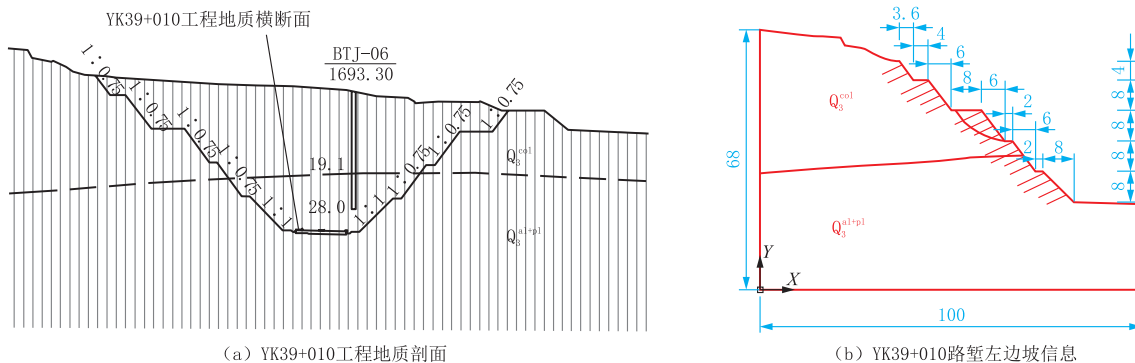


图1 YK39+010路堑工程信息(单位:m)

Fig.1 YK39+010 road cutting engineering information chart

1.2 地层岩性

通过工程地质钻探、槽探等勘探手段,同时在探井中现场采集原状土样进行室内试验,得到了较为齐全、准确的物理力学参数。其中工程地质特征详细描述如下:

①风积黄土(Q_3^{col}):浅黄色,干燥—稍湿,硬塑,土质较均匀,主要由粉粒组成,大孔隙发育,含砂量较高。该层黄土为黄土梁上部主要地层,具湿陷性,厚度一般大于20 m。

②冲洪积黄土(Q_3^{al+pl}):浅黄色,稍湿,硬塑,土质较均匀,主要为粉粒状,含砂量较高,较密实,局部显层理。深挖路堑主要地层之一,厚度15~40 m。

1.3 格构锚杆方案设计

图1(a)中左侧边坡自下而上第一级、第二级、第三级及第四级边坡均布设4级格构,上两排锚杆长8 m,下两排锚杆长6 m(因上排处滑移面较深,且位移较大,故应将上排锚杆长度设置大一些,锚杆分布如图1b所示;另外,锚杆的长度取决于计算出

来的滑移面,一般要求锚杆能穿过滑移面至少 2~3 m);第五级边坡布设 2 级格构,格构交叉部位锚杆长 6 m。锚杆采用 $\text{O}25 \text{ mm}$ HRB335 钢筋且全长灌浆(粘结)。框架格构尺寸为 $2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$,格构梁尺寸为 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$,采用 C30 混凝土浇筑,锚固角为 25° ,拱形格构+锚杆支护局部示意图 2。对于格构采用 FLAC^{3D} 的实体单元模拟^[7],对于锚杆采用 FLAC^{3D} 自带的 Cable 结构单元进行模拟,且通常采用弹簧-滑块系统描述轴向上锚杆(索)与岩土体界面间的相互作用(如图 3 所示)^[8]。

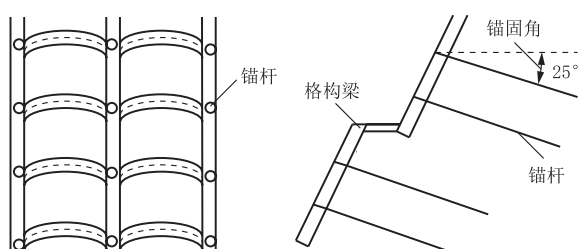


图 2 拱形格构锚杆支护局部示意

Fig.2 Partial schematic of the lattice bolt support

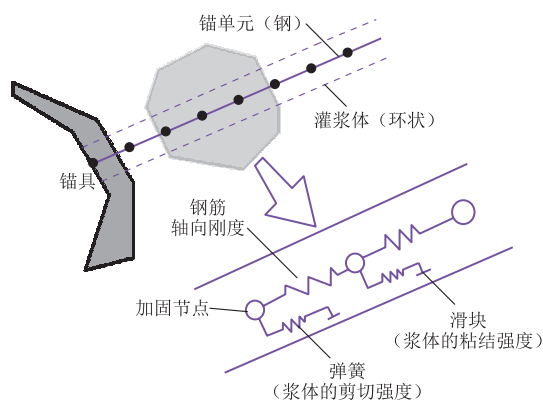


图 3 锚杆单元

Fig.3 Bolt unit

锚杆设置参数为:钻孔直径 150 mm、钢筋横截面积 0.0004906 m^2 、弹性模量 $2.0 \times 10^{10} \text{ Pa}$ 、水泥摩擦角 35.0° 、水泥刚度 $2.0 \times 10^6 \text{ Pa}$ 、水泥浆外圈周长 7.85 cm、抗拉强度 $1.26 \times 10^5 \text{ N}$ 。

这里指出 FLAC^{3D} 软件可以很好地模拟支护结构与边坡土体间的相互作用以及土体在受力作用下的屈服、塑性流动、软化变形等问题^[9-10],使得模拟结果尽可能贴近实际。

2 有限元模型建立

2.1 基本假设

(1)将土体视为理想弹塑性体,且满足弹塑性应

力-应变关系;锚杆为线弹性体,按弹性受力分析^[11]。

(2)假设各土层为均质体,其变形为各向同性。

(3)不考虑边坡土体中构造应力的作用,对于初始应力场分析仅考虑岩土体自重应力。

(4)假设所有锚杆均胶结良好,沿全长与周围土体紧密连接成为一个整体。

(5)由于竖向地震波对边坡影响较小,故在模拟中只考虑水平向地震波影响。

(6)模拟中水平向加速度设为恒定加速度,通过计算时间来模拟地震效果,震动持续时间取 20 s。

2.2 几何模型

利用 AutoCAD 从 YK39+010 路堑工程剖面图(图 1a)中提取左侧边坡,建立三维几何模型,再将其导入 ANSYS 软件进行网格划分,之后导入 FLAC^{3D} 软件。全局网格单元尺寸最小为 0.15 m,共生成 26919 个单元,124936 个节点。为了避免边界对模型计算准确度的影响,模型厚度设置为 10 m,模型 X 方向长 100 m,Y 方向(模型厚度)长 10 m,Z 方向(高度)约 68 m,位于剖面后部。在边坡稳定性分析时采用 FLAC^{3D} 内置的 Drucker-Prager 本构模型^[12]。设置初始条件时,施加自重初始应力场,以保证模型的计算精度和使模型不平衡力能快速收敛;允许土体产生大变形,并模拟土体产生的塑性变形。另外,模型底部平面、左右边界完全固定。

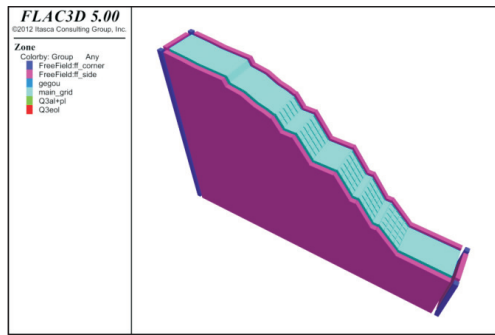
2.3 动力分析边界条件

在有地震波作用的动力分析中,为了减少地震波在模型边界上的反射,在已有静力边界约束的基础上再采用自由场边界(在模型的法向和切向分别设置自由阻尼器)^[13],其优势是可以模拟真实无限场地,能较好地吸收入射波,减少界面反射,且波在边界不扭曲^[14]。取岩土体的临界 Rayleigh 阻尼比经验值为 0.05。按上述要求利用 FLAC^{3D} 建立的路堑边坡动力响应分析模型及格构锚杆支护结构如图 4 所示。

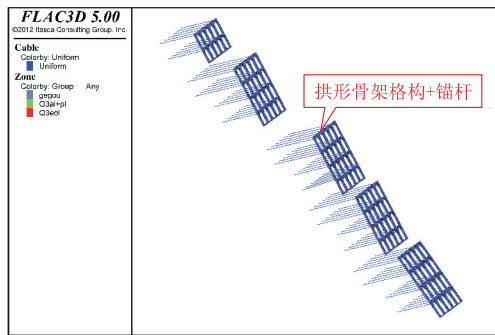
2.4 岩土体物理力学参数

在工程地质调查测绘的基础上进行了以工程地质钻探、槽探等勘探手段^[15],同时在探井中现场采集原状土样进行有关室内试验,取得了较为齐全、准确的物理力学参数。试验获得的主要参数有杨氏模量 E 、材料的泊松比 μ 、粘聚力 c 、内摩擦角 φ 等,具

体试验值见表1。



(a) 边坡动力响应分析模型



(b) 格构锚杆模型

图4 格构锚杆支护的边坡动力响应分析模型

Fig.4 Analysis model for dynamic response of the slope supported by lattice anchor

3 地震响应结果分析

在边坡动力响应分析模型中施加 0.1g、0.2g、0.3g 和 0.4g 四个级别的水平向加速度,模拟分析不同级别的地震波对边坡稳定性的影响,主要从水平位移、应力应变、塑性变形、结构受力及变形 4 个方面进行讨论分析。

3.1 位移响应分析

从计算得到的水平位移云图(仅给出加速度 0.1g 和 0.4g 的水平位移云图,如图 5a、图 5c 所示)可看出,最大水平位移发生在坡脚处,加速度 0.1g、0.2g、0.3g 和 0.4g 对应的最大水平位移分别为 3.90、6.01、8.02 和 10.92 cm。表明随着地震加速度的增大,最大水平位移明显增大。为了比对,求得天然支护工况下未施加水平向地震加速度的最大水平位移为 2.37 cm(计算云图略),显然水平向地震加速度增大了边坡的位移,但从位移云图来看,其位移变化趋势基本不变,表明边坡结构未完全变化。另外,用矢量图来展示边坡总位移,不仅可以看到总位移大小,还可以看到各单元的位移方向,显得更为直观。从 4 个水平加速度等级对应的总位移矢量图(这里仅给出 0.1g 和 0.4g 对应的总位移矢量图,如图 5b 和图 5d 所示)可知,水平向地震加速度

表 1 岩土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock and soil

土层	状态	重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	压缩模量 E_s / MPa	泊松比 μ	体积模量 / kPa	剪切模量 / kPa	粘聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / ($^\circ$)
Q ₄ ^{pl} 黄土	天然	14.5	3.1	0.3	2.58E+06	1.19E+06	30	25
Q ₄ ^{pl+pl} 黄土	天然	15.0	4.6	0.3	2.83E+06	1.77E+06	35	26

0.1g、0.2g、0.3g 和 0.4g 对应的最大位移依次为 10.58、14.59、19.09 和 25.49 cm。其中最大位移部位发生在坡顶,其次位于边坡表层。

综观位移云图,坡内无贯通滑动面,边坡顶部位移方向垂直向下,坡体表面位移方向为顺坡向下及向外。受格构锚杆阻挡,变形未进一步扩大,与天然支护工况相比,地震支护工况下的 X 向水平位移明显增大;同时总位移也逐渐增大,结构逐渐由稳定状态转为不稳定状态。

3.2 应力应变分析

由应力应变云图(这里仅给出加速度 0.2g 和 0.4g 的应力应变云图,如图 6a、图 6c 所示)可看出,最大主应力主要存在于模型底部,加速度 0.1g、0.2g、0.3g 和 0.4g 对应的最大主应力依次为 5.87

$\times 10^5$ 、 5.77×10^5 、 5.67×10^5 和 5.65×10^5 Pa,最大主应力与模型高度呈正比,受地震加速度影响较小。另外,由于水平向加速度的作用,边坡土体顺坡向外挤出,导致格构表面产生拉张应力,加速度 0.1g、0.2g、0.3g 和 0.4g 对应的拉张应力分别为 2.76×10^5 、 5.63×10^5 、 7.38×10^5 和 1.04×10^6 Pa,显然随着水平向地震加速度的增大,格构承受的拉张应力明显增强,0.4g 工况下的拉张应力是 0.1g 工况的 3.76 倍。

从最大剪应变增量云图(图 6b、图 6d)可看出,最大剪应变增量主要发生在支护结构上,加速度 0.1g、0.2g、0.3g 和 0.4g 对应的最大剪应变增量分别为 6.45%、8.80%、11.22% 和 15.04%,最大剪应变随着加速度的增大呈非线性增长,说明水平加

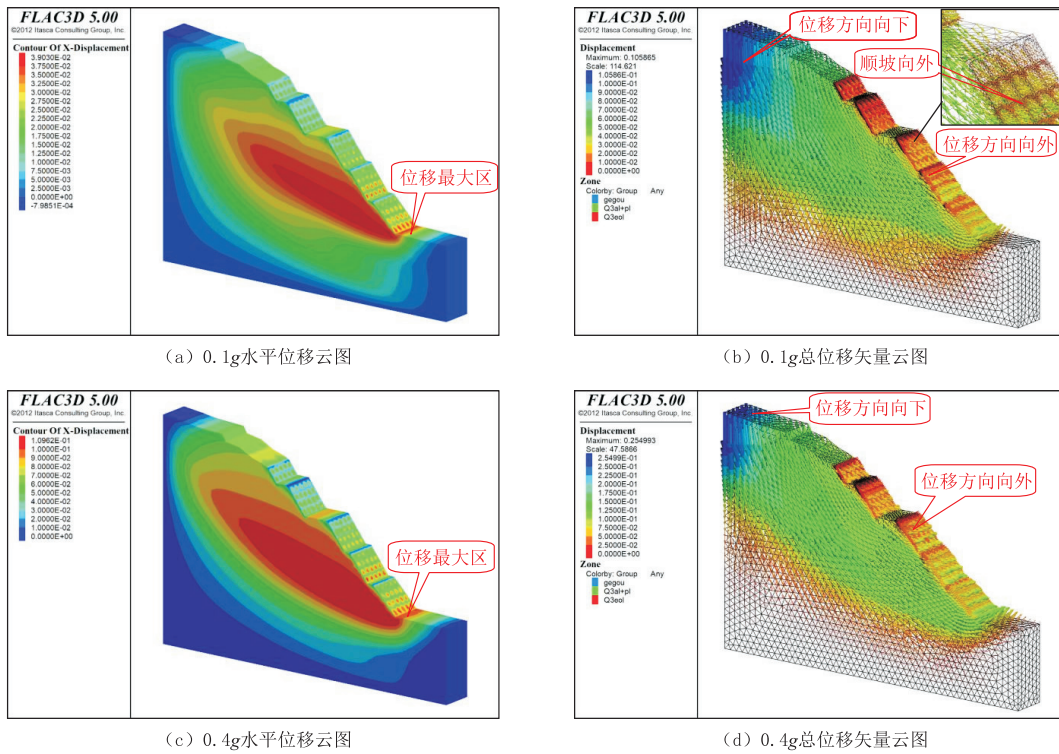


图 5 模型在不同地震加速度下的位移云图及总位移矢量图

Fig.5 Displacement nephogram and total displacement vector diagram of the model at different earthquake accelerations

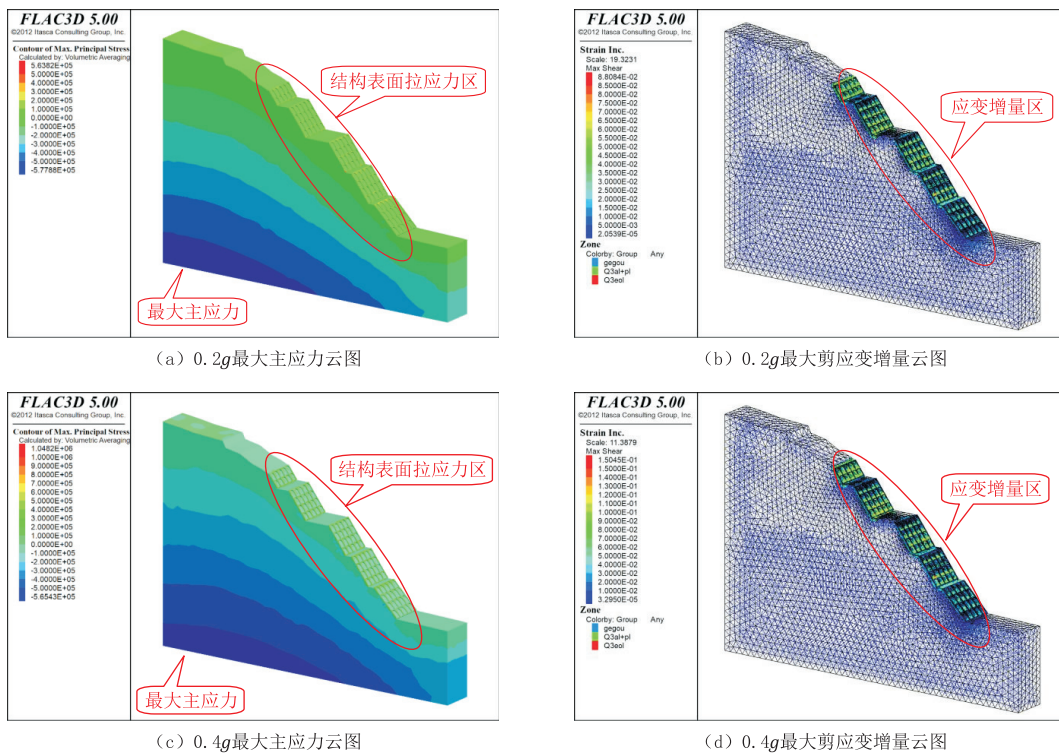


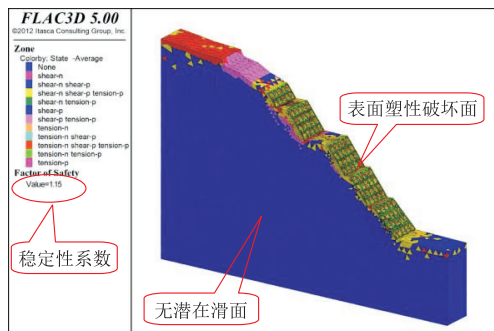
图 6 不同地震加速度下的支护边坡应力应变分析

Fig.6 Stress-strain analysis of the supported slope at different earthquake accelerations

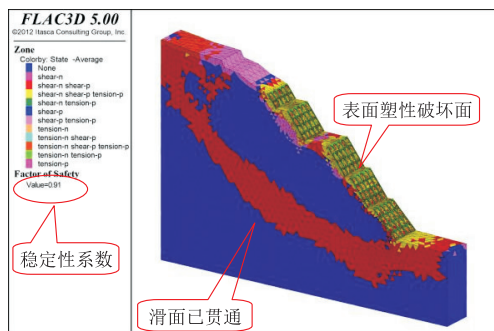
速度越大,边坡受加速度影响越明显。同时也表明格构和锚杆支护结构分担了大部分应力,起到了良好的支护效果。

3.3 塑性变形分析

从塑性区分布(这里仅给出加速度 $0.2g$ 和 $0.4g$ 的塑性区分布,如图 7a 和图 7b 所示)可看出,塑性变形主要集中在边坡表面,结合正在发生塑性变形的区域可知,随着水平向地震加速度的增大,塑性变形区范围逐渐增大。该边坡在 $0.1g$ 、 $0.2g$ 和 $0.3g$ 工况下变形主要存在于坡体表面,无明显的滑动面,坡体内塑性变形不明显,仅有零星的塑性变形网格。但当水平向加速度达到 $0.4g$ 时,边坡破坏,塑性区开始贯通。地震波水平向加速度 $0.1g$ 、 $0.2g$ 、 $0.3g$ 和 $0.4g$ 对应的格构支护边坡整体稳定性系数分别为 1.24 、 1.15 、 1.08 和 0.91 。可以看出随着水平向地震加速度的增大,稳定性系数明显减小。当水平向地震加速度为 $0.1g$ 、 $0.2g$ 和 $0.3g$ 时,稳定性系数大于 1 ,整体处于稳定状态到基本稳定状态;当水平向地震加速度达到 $0.4g$ 时,稳定性系数明显下降至低于 1 ,边坡将失稳。支护结构为提高边坡整体稳定性发挥了主要的作用。



(a) $0.2g$ 塑性区分布云图



(b) $0.4g$ 塑性区分布云图

图 7 支护边坡在不同地震加速度下的塑性变形
Fig.7 Plastic deformation of the supported slope at different earthquake accelerations

3.4 结构受力及变形分析

由结构应力分析图(这里仅给出加速度 $0.2g$ 和 $0.4g$ 的结构应力应变图,如图 8a 和图 8c 所示)可知,加速度 $0.1g$ 、 $0.2g$ 、 $0.3g$ 和 $0.4g$ 对应的格构主应力分别为 18.7 、 22.05 、 28.45 和 36.48 MPa,主应力主要集中在坡脚部位,说明格构起到了明显支护效果。锚杆剪切应力最大为 0.28 MPa,结合结构变形图及支护结构位移图(图 8b 和图 8d),格构最大位移发生在坡脚部位。水平向加速度 $0.1g$ 、 $0.2g$ 、 $0.3g$ 和 $0.4g$ 对应的格构最大水平位移分别为 3.49 、 5.26 、 6.97 和 9.53 cm,锚杆最大位移均为 7.18 mm,结构变形较小,表明锚杆结构的稳定性较好,未发生明显破坏。

4 结论

选择兰州南绕城高速公路具有代表性的 YK39+010 路堑工程边坡为研究对象。鉴于公路建设区抗震设防烈度为 8 度,地震加速度为 $0.2g$,地震反应谱特征周期为 0.40 s,因此有必要对公路边坡在地震工况下的稳定性进行评估。本文采用具有强大完全非线性动力分析功能的 FLAC^{3D} 软件,从水平向地震加速度的 4 个等级(加速度按 $0.1g$ 、 $0.2g$ 、 $0.3g$ 和 $0.4g$ 划分成 4 个等级)对格构锚杆支护下的路堑边坡稳定性及支护效果进行评价,得到如下结论:

(1)天然支护+地震工况模拟结果显示水平位移最大发生在坡脚,水平向地震加速度 $0.1g$ 、 $0.2g$ 、 $0.3g$ 和 $0.4g$ 对应的最大水平位移分别为 3.90 、 6.01 、 8.02 和 10.92 cm,对应的最大总位移分别为 10.58 、 14.59 、 19.09 和 25.49 cm。最大总位移发生在坡顶,其次为边坡表层,坡内无贯通滑动面;边坡顶部位移方向垂直向下,坡体表面位移方向为顺坡向下及向外。受格构锚杆阻挡,边坡变形未进一步扩大,但结构逐渐由稳定状态转为不稳定状态。

(2)由于水平向地震加速度的作用,边坡土体顺坡向外挤出,导致格构表面产生拉张应力,水平向加速度 $0.1g$ 、 $0.2g$ 、 $0.3g$ 和 $0.4g$ 对应的拉张应力分别为 2.76×10^5 、 5.63×10^5 、 7.38×10^5 和 1.04×10^6 Pa, $0.4g$ 工况下的拉张应力是 $0.1g$ 工况的 3.76 倍。

(3)最大剪应变增量主要发生在支护结构上,水

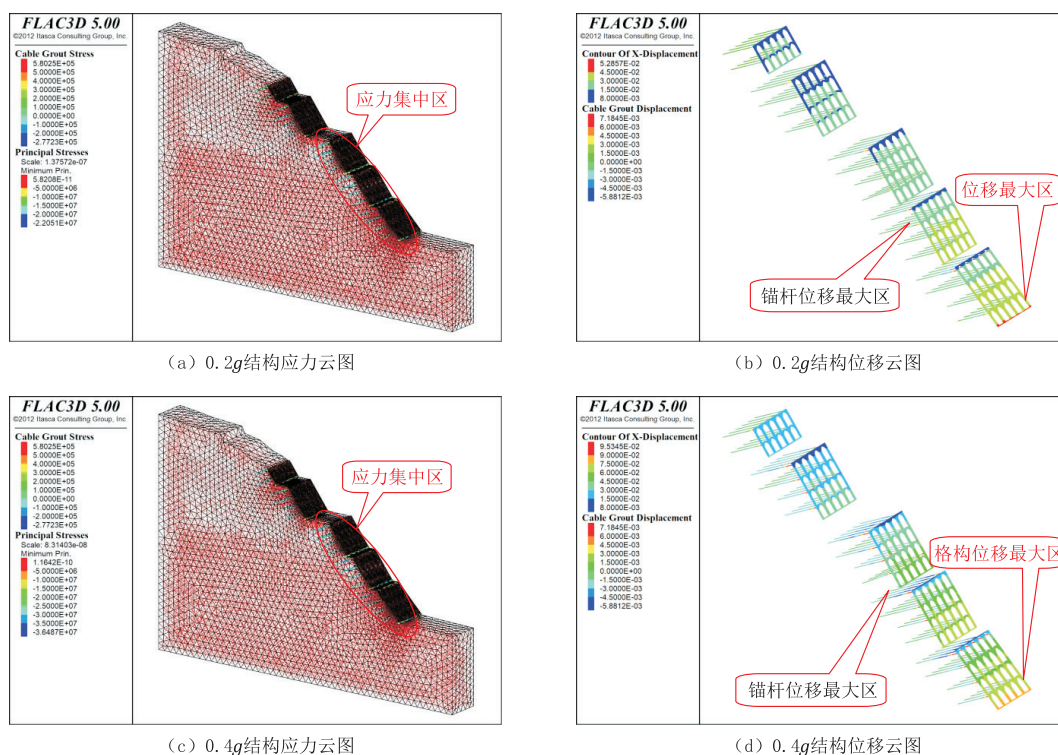


图 8 支护边坡在不同地震加速度下的结构应力应变分析

Fig.8 Structural stress-strain analysis of the supported slope at different earthquake accelerations

平向加速度 $0.1g$ 、 $0.2g$ 、 $0.3g$ 和 $0.4g$ 对应的最大剪应变增量分别为 6.45% 、 8.80% 、 11.22% 和 15.04% ，表明格构和锚杆支护结构分担了大部分的应力，起到了良好的支护效果。

(4) 边坡塑性变形主要集中在边坡表面，结合正在发生的塑性变形区域可知，随着加速度的增大，塑性变形区范围逐渐增大。水平向地震加速度为 $0.1g$ 、 $0.2g$ 、 $0.3g$ 时变形主要存在于坡体表面，无明显滑动面，坡体内塑性变形也不明显，仅有零星塑性变形网格；当水平向加速度达到 $0.4g$ 时，边坡破坏，塑性区开始贯通。

(5) 水平向加速度 $0.1g$ 、 $0.2g$ 、 $0.3g$ 和 $0.4g$ 对应的格构主应力分别为 18.7 、 22.05 、 28.45 和 36.48 MPa，主应力主要集中在坡脚部位，说明格构起到了明显的支护效果；对应的格构最大水平位移分别为 3.49 、 5.26 、 6.97 和 9.53 cm，且发生在坡脚部位处。锚杆最大剪切应力为 0.28 MPa，最大位移均为 7.18 mm，结构变形较小，表明锚杆结构稳定性较好，未发生明显的破坏。

综上所述，采取格构加锚杆支护后，天然+地震工况下，水平向地震加速度为 $0.1g$ 和 $0.2g$ 时边坡处于稳定状态，水平向加速度为 $0.3g$ 时边坡处于

基本稳定，水平向加速度为 $0.4g$ 时边坡处于不稳定状态。根据规范，研究区抗震设防烈度为 8 度，设计地震加速度为 $0.2g$ ，在该地震加速度下，若采用格构+锚杆的支护措施，该边坡处于基本稳定状态，满足规范要求。

参考文献 (References):

- [1] 黎泽芝. 锚杆支护在公路边坡加固中的应用[J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2017, 13(10): 111-113.
LI Zezhi. Application of bolt support in highway slope reinforcement[J]. Technology of Highway and Transport (Applied Technology Edition), 2017, 13 (10): 111-113.
- [2] 刘振华. 框架锚杆加固黄土边坡的模型试验及数值模拟分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
LIU Zhenhua. Model test and numerical simulation analysis of loess slope strengthened by frame anchor [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018.
- [3] 张焱. 边坡稳定性分析及支护设计研究[J]. 河南水利与南水北调, 2017(2): 56-58.
ZHANG Yan. Slope stability analysis and support design[J]. Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion, 2017(2): 56-58.
- [4] 王涛, 韩焱, 赵先宇, 等. FLAC3D 数值模拟方法及工程应用深入剖析 FLAC3D 5.0[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
WANG Tao, HAN Xuan, ZHAO Xianyu, et al. FLAC3D numerical simulation method and engineering application—in-

- depth analysis of FLAC3D 5.0[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [5] 黄士奎,赵杰,刘道勇.基于 FLAC^{3D} 预应力锚杆抗滑桩支护边坡地震响应分析[J].地震研究,2016,39(1):74-78.
HUANG Shikui, ZHAO Jie, LIU Daoyong. Seismic response analysis for the prestressed anchor anti-slide pile supporting slope based on FLAC^{3D}[J]. Journal of Seismological Research, 2016,39(1):74-78.
- [6] 庞训鹏,曹日跃.基于 FLAC3D 的锚杆支护边坡地震稳定性分析[J].兰州工业学院学报,2016,23(4):21-24.
PANG Xunpeng, CAO Riyue. Seismic stability analysis of side slopes with bolt support based on FLAC3D[J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2016, 23(4): 21-24.
- [7] 马小斐,李海平,徐建强.基于 FLAC^{3D} 的深挖边坡锚杆支护探讨[J].公路交通科技,2019,35(4):14-20,27.
MA Xiaofei, LI Haiping, XU Jianqiang. Discussion on design of deep excavation slope anchor support based on FLAC^{3D}[J]. Technology of Highway and Transport, 2019,35(4):14-20, 27.
- [8] 袁东进.基于 FLAC^{3D} 的边坡锚固效果及锚杆受力分析[J].人民黄河,2016,38(1):102-104,108.
YUAN Dongjin. Slope stability analysis and anchor bolt stress study based on FLAC^{3D}[J]. Yellow River, 2016,38(1):102-104,108.
- [9] 张卢明,郑明新,何敏,等.深基坑开挖与锚杆支护 FLAC^{3D} 数值模拟分析[J].华东交通大学学报,2007,24(5):9-12.
ZHANG Luming, ZHENG Mingxin, HE Min, et al. FLAC^{3D} numerical simulation analysis of foundation excavation and bolting[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2007, 24(5):9-12.
- [10] 张红涛.北京中关村科技园区丰台园东区基坑工程支护设计与施工[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(3):64-68, 74.
ZHANG Hongtao. Design and construction of foundation pit support in Fengtaiyuan east area of Zhongguancun Science and Technology Park, Beijing[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(3):64-68, 74.
- [11] 王谊.桩板抗滑结构中预应力锚索锚固段受力动态响应特性研究[J].路基工程,2012(3):137-140.
WANG Yi. Research on dynamic force response of anchorage segment of prestressed anchor cable in pile-board anti-sliding structure[J]. Subgrade Engineering, 2012(3): 137-140.
- [12] 刘金龙,栾茂田,许成顺,等. Drucker-Prager 准则参数特性分析[J].岩石力学与工程学报,2006,25(S2):4009-4015.
LIU Jinlong, LUAN Maotian, XU Chengshun, et al. Study on parametric characters of Drucker-Prager criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(S2):4009-4015.
- [13] 张颖,陈晨,王或佼,等.基于 FLAC^{3D} 对大连某工程桩基承载力数值模拟研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(5):65-71,85.
ZHANG Ying, CHEN Chen, WANG Yujiao, et al. FLAC^{3D} based numerical simulation of bearing capacity of pile foundation in Dalian[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(5):65-71,85.
- [14] 吴德成,李永旗,陈燕,等.运用 FLAC^{3D} 分析澜沧江某边坡地震稳定性[J].安全与环境工程,2011,18(6):15-19.
WU Decheng, LI Yongqi, CHEN Yan, et al. FLAC^{3D} analysis on the slope seismic stability of Lancang River[J]. Safety and Environmental Engineering, 2011,18(6):15-19.
- [15] 杨芳,陈师逊.深部地质钻探钻孔结构设计与施工分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(11):21-26.
YANG Fang, CHEN Shixun. Analysis of design and construction of deep geo-drilling boreholes[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(11):21-26.

(编辑 王建华)

(上接第 42 页)

- [13] 王宗明,王瑞和.中浅井钻机固控设备应用效果研究[J].石油矿场机械,2009(6):1-3.
WANG Zongming, WANG Ruihe. Study on effect of solid control equipment on shallow and mid-deep well rig[J]. Oil Field Equipment, 2009(6):1-3.
- [14] 许锦华,陈龙,柴占文,等.圆形罐钻井液固控系统的研制与应用[J].石油机械,2009,37(5):41-42.
XU Jinhua, CHEN Long, CHAI Zhanwen, et al. Research and application of the drilling fluid solid control system of the round tank[J]. China Petroleum Machinery, 2009,37(5):41-42.
- [15] 张晓东,何石,苟如意,等.超深井钻井液固控系统配套合理性探讨[J].石油钻采工艺,2013,35(6):52-54.
ZHANG Xiaodong, HE Shi, GOU Ruyi, et al. Matching rationality discussion of ultra-deep well drilling fluid solid control system[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(6):52-54.
- [16] 雷先革,牟长清,涂志威,等.钻井固控环保一体化装备的研制与应用[J].石油机械,2017,45(12):28-31.
LEI Xiange, MOU Changqing, TU Zhiwei, et al. Development and application of integrated drilling solid control and environmental protection equipment[J]. China Petroleum Machinery, 2017,45(12):28-31.

(编辑 韩丽丽)