

# 兰州南绕城高速公路路堑高边坡框架锚杆支护效果评价<sup>\*</sup>

王江荣, 梁永平, 赵睿, 蒲晓妮, 刘硕, 靳存程

(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深挖路堑边坡工程 ZK38+960 为研究对象, 采用 GeoStudio 软件对无支护、腰梁锚杆支护、全坡框架梁锚杆支护的效果进行对比分析。结果表明, 框架梁锚杆支护效果最优, 且在锚固角为  $20^\circ$  时安全稳定性系数最大; 锚固角为  $10^\circ \sim 40^\circ$  时, 3 种锚固方式均能取得理想的锚固效果。

**关键词:** 公路; 黄土深挖路堑边坡; 框架锚杆; 边坡稳定性; 支护效果

**中图分类号:** U416.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2020)06-0076-06

兰州南绕城高速公路途经黄土高原丘陵沟壑区(黄土覆盖厚度较大), 全长约 58.74 km, 设计速度 80 km/h。受黄土高原山区特殊地形的限制和经济、技术的局限, 设计采用许多深挖路堑人工高边坡。路堑高边坡失稳会造成严重的经济损失、生态环境破坏, 需对欠稳定且已采取加固措施的深挖路堑高边坡进行安全稳定性评估, 并提出支护结构优化建议。现有边坡稳定性定量分析法主要有刚体极限平衡法、滑移线场法、数值分析法(有限差分法、有限元分析等)、现场监测法及物理模型法等, 常用边坡支护结构有框架梁锚杆支护、腰梁锚杆支护、锚喷、锚墙、重力挡土墙、钢筋稳固挡墙和土钉墙支护等。工程实践表明, 框架锚杆支护对湿陷性黄土高边坡具有很好的支护效果, 不仅能改善土体的应力状态和稳定性, 还能节约工程材料、提升施工进度。该文以兰州南绕城高速公路典型深挖路堑高边坡 ZK38+960 为研究对象, 采用 GeoStudio 软件分析不同腰梁锚固位置对边坡安全稳定性的影响及不同锚杆倾角(锚固角)下框架锚杆全坡支护的效果, 确定最优锚固方案。

## 1 工程概述

兰州南绕城高速公路位于陇西黄土高原西部, 属于青藏高原向黄土高原的过渡带。地形地貌总体为南北高(黄土沟梁区)、中间低(河谷盆地区), 大部分为海拔 1 500~2 000 m 的黄土覆盖丘陵、盆地, 黄土覆盖厚度较大。深路堑主要位于黄土沟梁区,

地形起伏较大(相对高差一般达 80~180 m), 挖方深路堑较多, 高边坡主要分布于 ZK38+900—ZK39+300、YK38+903—YK39+240, 中桩最大挖方深度 43.69 m, 边坡处最大挖方深度 46.34 m。选取典型深挖路堑工程 ZK38+960 右侧边坡为研究对象(见图 1), 该边坡采用分级放坡, 每级坡高 8 m; 挖方坡率, 从下到上第 1 级为 1:1, 第 2~5 级为 1:0.75; 第 1、2 级平台宽 2 m, 第 3、4 级平台宽分别为 8、4 m; 边坡总高度约 40 m(以路面为基准)。

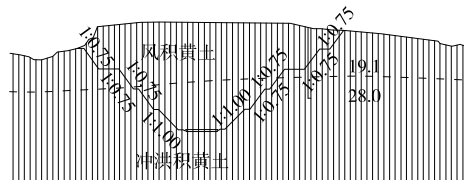


图 1 ZK38+960 工程地质横断面(单位:m)

### 1.1 工程地质条件

根据 ZK38+960 工程地段地质调绘, 深挖路堑地层按其时代及成因可分为上更新统风积黄土( $Q_3^{eol}$ )和上更新统冲洪积黄土、中更新统冲洪积黄土( $Q_3^{al+pl}$ )。工程地质特征描述如下:

(1) 风积黄土( $Q_3^{eol}$ )。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。其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; 主要由粉粒组成, 含砂量较高, 较密实,

<sup>\*</sup> 基金项目: 兰州市科学技术局计划项目(兰财建发[2019]62 号); 兰州市西固区科学技术局计划项目(西科发[2017]29 号)

局部显层理。为黄土深挖路堑主要地层之一,厚度 15~40 m。

该挖方段落揭露岩土层中未见地下水,故研究中不考虑地下水。

### 1.2 自然地理条件

该挖方段落所在黄土山梁沟谷位于黄河谷地之南,南部石质山地以北。该地带黄土梁基底多为下白垩统河口群,黄土层随山梁海拔高度降低而逐渐增厚,基底岩层仅在局部沟谷中出露。另外,该地带地表形态破碎,植被稀疏,梁峁为旱作农业区和荒山荒坡。

### 1.3 气象水文

该挖方段落所在区域平均海拔高度 1 520 m。属中温带大陆性气候,降雨稀少,冬无严寒、夏无酷暑,气候温和,年均气温 11.2 °C,年均降水量 327 mm,全年日照时数平均 2 446 h,无霜期 180 d。

该挖方段落处于陇西中部黄土丘陵中径流区,植被覆盖度大部分在 10% 以下,年径流深 5~10 m,地表水贫乏,多为间歇性河沟,只有暴雨时有水通过,沟道流域面积较小。

综上,将计算工况设为天然状况(仅考虑滑体自重)。另外,因该挖方段落内无全新世活动断裂,不考虑断裂及地震对路堑边坡工程的影响。

## 2 数值模型及土体参数

利用 AutoCAD 软件按图 1 中路堑右侧各级坡率、各级坡高及平台宽度建立二维几何模型并导入 GeoStudio 软件中。采用 SIGMA/W 模块进行网格划分,全局单元尺寸为 1.5 m,节点数为 9 859 个,单元数为 3 206 个。模型底边长 125 m,纵向高约 62 m,坡角处有一条排水沟。土层自上而下依次为风积黄土和冲洪积黄土(见图 2)。

表 1 路堑边坡岩土体的物理力学参数

地层	状态	重度 $\gamma$ / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	杨氏模量 $E_s/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$	体积模量 $K/\text{MPa}$	剪切模量 $G/\text{MPa}$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
$Q_3^{\text{eol}}$	天然	14.5	3.1	0.3	2.58	1.19	30	25
$Q_3^{\text{al+pl}}$	天然	15.0	4.6	0.3	2.83	1.77	35	26

利用 GeoStudio 进行数值模拟时,选用摩尔—库伦准则作为弹塑性屈服条件,忽略边坡土体的膨胀角及抗拉强度。

### 2.3 无支护条件下边坡数值模拟分析

在 GeoStudio 2018 软件中的 SIGMA/W 和 SLOPE/W 材料窗口输入材料参数,并加载到数值

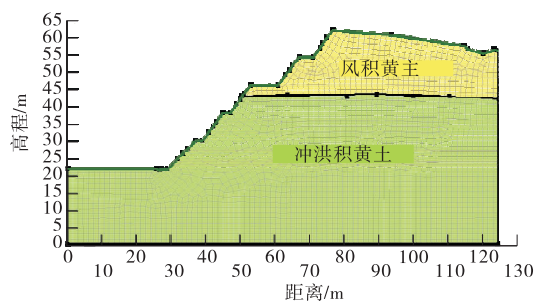


图 2 ZK38+960 工程典型深挖路堑高边坡几何模型及土体结构

以模型左下方直角顶点为坐标原点  $O$ 、模型底边所在直线为  $X$  轴、路堑边坡剖面为坐标平面建立平面直角坐标系。模型边界条件为不允许左右两侧有水平方向位移、底边界有水平和垂直方向位移。

### 2.1 基本假设

作如下假设:1) 将岩土体视为理想弹塑性体,即受力及应变均为弹塑性;2) 将边坡土体受力和变形视为平面应力应变问题;3) 各土层为均质体,其变形为各向同性;4) 不考虑边坡土体的构造应力作用,初始应力场仅考虑土体自重应力;5) 不考虑土体变形的时间效应及地下水作用;6) 边坡开挖和削坡一次完成;7) 所有锚杆均胶结良好,全长与周围土体紧密连接形成一个整体。

### 2.2 计算参数

取黄土原状土样及扰动土样进行室内试验,试验结果见表 1。其中抗剪强度参数采用快剪方式获得,体积模量  $K$  和剪切模量  $G$  通过杨氏模量  $E_s$  和泊松比  $\mu$  按以下公式计算:

$$K = \frac{E_s}{3(1-2\mu)} \quad (1)$$

$$G = \frac{E_s}{2(1+\mu)} \quad (2)$$

模型相应的土层中。执行 SIGMA/W 运算并将所得应力(单元或节点处的应力  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  及剪应力  $\sigma_{xy}$ )导入 SLOPE/W 模块进行耦合计算,得到各土条块底部中点的  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  及  $\sigma_{xy}$ ,进而计算各土条底部的正应力和剪应力,再由各正应力计算相应土条的抗剪强度和抗剪力,依土条底倾角及土条重力计算各土

条的下滑力,输出边坡应力等值分布云图、最危险潜在滑裂面和稳定性系数(见图3)。

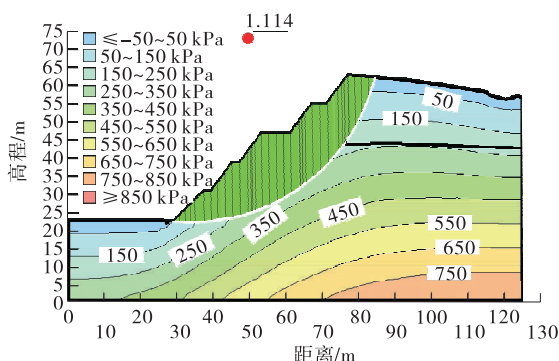


图3 天然工况下路堑边坡应力等值分布云图及潜在滑裂面

由图3可知:天然工况下,路堑边坡的应力等值线非水平,说明竖向应力受到上覆自重和剪应力的复合影响,其中坡脚处因剪应力相对集中而影响较大;路堑高边坡的安全稳定系数仅为1.114,边坡处于基本稳定状态。但考虑到兰州南绕城高速公路的性质与级别,路堑边坡的最小安全稳定系数应不小于1.25甚至更高,故需采取支护加固措施。

### 3 边坡支护方案设计及效果分析

由于黄土具有大孔隙、弱胶结、垂直节理发育、遇水易湿陷、遇震易液化等特点,对于黄土高边坡,锚杆布置要充分考虑潜在滑移面(通过模型计算预判),要求锚杆长度较大。根据ZK38+960路堑边坡工程实际及安全等级要求(安全稳定系数 $F_s \geq 1.25$ ),结合易施工性、经济性、锚固力强及GB 50330—2013《建筑边坡工程技术规范》的要求,选择预应力锚杆(钢绞线)作为支护结构。采用 $4\phi 15.2$  mm钢绞线锚杆,长度30 m,锚固段长度12 m,锚固段钻孔直径150 mm;每孔施加500 kN预应力,锚杆与水平面俯角(即锚固角)为 $40^\circ$ 。

坡面采用钢筋砼梁,锚杆水平距离为3.4 m,沿坡面的竖向距离为3.33 m,腰梁框架与框架梁全坡支护的有效梁宽均为40 cm,梁厚均为50 cm,其中全坡支护框架梁呈长方形布置,尺寸为 $3.4 \text{ m} \times 3.33 \text{ m}$ 。框架梁采用C30砼浇筑,为使注浆密实,防止锚杆锚固力损失,水泥砂浆应具备较好的和易性,做好防锈处理并加入适量膨胀剂。当框架梁或腰梁锚固在锚杆时,锚杆产生的锚固力(在黄土边坡土体中使用锚杆,锚固力主要来自砂浆与孔壁之间的摩擦力)可增强边坡各土条块的抗剪力,提高边坡的安全稳定性。

按不同锚固角度( $15^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $25^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $35^\circ$ 、 $40^\circ$ )设计支护方案:1) 每级边坡坡顶处采用腰梁锚杆支护;2) 每级边坡2/3坡高处采用腰梁锚杆支护;3) 每级边坡1/2坡高处采用腰梁锚杆支护;4) 每级边坡1/3坡高处采用腰梁锚杆支护;5) 每级边坡1/3坡高、2/3坡高处同时采用腰梁锚杆支护;6) 框架锚杆全坡支护。

#### 3.1 无支护时位移分析

路堑开挖过程全部完成后,在无支护条件下利用有限元软件计算边坡的水平位移和竖向位移,结果见图4。

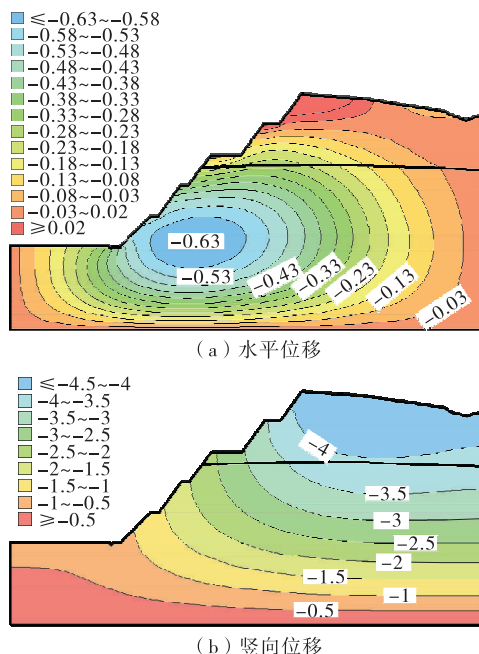


图4 无支护时开挖完成后位移等值云图(单位:m)

从图4可以看出:1) 向坡外的最大水平位移为0.632 09 m,向坡内的最大水平位移为0.228 36 m,向坡外的水平位移均大于向坡内的水平位移,最大水平位移出现在剪应力较集中的第一级边坡上,与实际相符。另外,水平位移对边坡稳定性影响较大,潜在滑裂面通常出现在等值线的密集区。2) 路堑边坡顶部以“水平”位移为主,伴有“竖向”位移变形,因工程区湿陷性黄土普遍发育,具有Ⅲ~Ⅳ级自重湿陷性,开挖完成后顶部(削顶,植被遭到破坏)竖向最大位移为-4.448 3 m。综上,无支护时边坡开挖存在失稳风险,不满足工程需求,需采取加固措施。

#### 3.2 不同支护方案下边坡稳定性分析

按不同腰梁锚杆位置分别计算边坡的安全稳定系数。锚杆自由段采用杆单元模拟,弹性模量为2.0



$\times 10^8$  kPa,截面面积为  $0.000\ 560\ \text{m}^2$ ;锚固段采用梁单元模拟,等效弹性模量为  $2.9 \times 10^7$  kPa,截面面积为  $0.006\ 63\ \text{m}^2$ ,惯性矩为  $7.0 \times 10^{-6}\ \text{m}^4$ 。砼框架梁(腰梁)产生的土体抗剪强度忽略不计。

3.2.1 不同锚固位置的边坡稳定性分析

仅分析锚固角为  $40^\circ$  的情形,分别计算每级边

坡坡顶处腰梁锚杆支护、每级边坡 2/3 坡高处腰梁锚杆支护、每级边坡 1/2 坡高处腰梁锚杆支护、每级边坡 1/3 坡高处腰梁锚杆支护、每级边坡 1/3 与 2/3 坡高处同时腰梁锚杆支护、框架锚杆全坡支护下边坡安全稳定性系数,结果见图 5 和表 2。

从图 5 可看出:剪应力自上而下递增,最大剪应

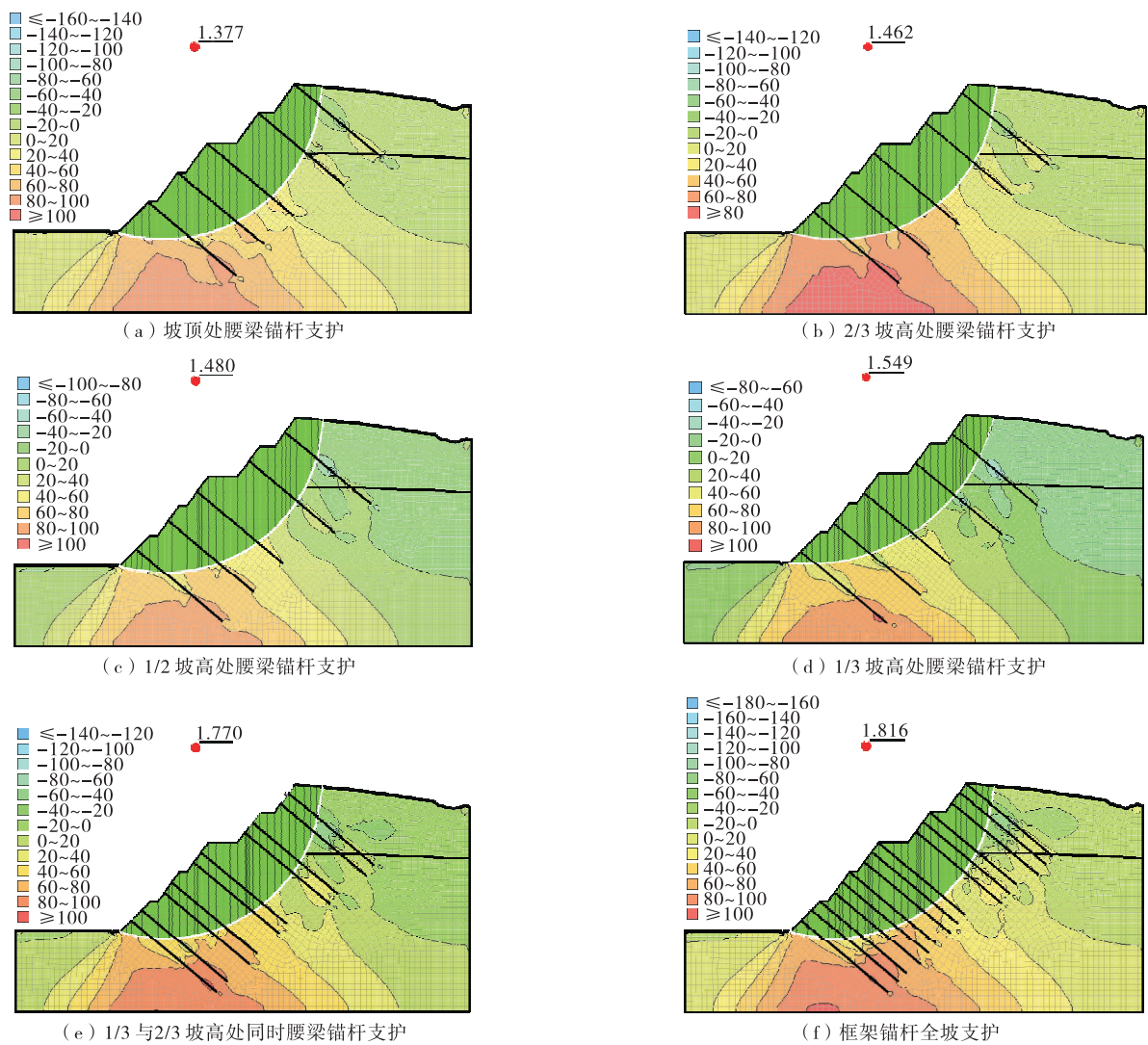


图 5 腰梁锚杆不同锚固位置和框架梁锚杆全坡支护下边坡稳定系数及平面剪应力等值云图(单位:kPa)

表 2 腰梁锚杆不同锚固位置及框架梁锚杆全坡支护下路堑边坡安全稳定性系数

支护方案	稳定系数
坡顶处腰梁锚杆支护	1.377
2/3 坡高处腰梁锚杆支护	1.462
1/2 坡高处腰梁锚杆支护	1.480
1/3 坡高处腰梁锚杆支护	1.549
1/3 与 2/3 坡高处腰梁锚杆同时支护	1.770
框架梁全坡支护	1.816

力集中在边坡底部,并向坡脚偏移,虽未形成贯通剪

切带,但对边坡稳定性影响较大。

由表 2 可知:6 种支护方案均能满足工程需要,安全稳定性系数均大于 1.35,达到 GB 50330—2013《建筑边坡工程技术规范》中一级安全边坡的要求。采用单腰梁锚固支护时,边坡安全稳定性系数随腰梁锚固位置变化而变化,腰梁锚固位置从每级边坡坡顶向坡脚位置转移时,边坡安全稳定性系数呈递增趋势,由 1.377 增长到 1.549,说明各级边坡坡脚处平面剪切应力相对较集中,如果在靠近坡脚处采

取锚固措施,其锚固效果优于其他位置(远离坡脚)特别是坡顶处;每级边坡在1/3与2/3坡高处同时实施腰梁锚固支护时,稳定性安全系数比1/3坡高处单腰梁支护提高14.3%,锚固效果优于单腰梁支护,表明增加腰梁锚杆支护数量能显著提高边坡的锚固效果。而框架梁锚杆(锚杆数量进一步增加)全坡支护方案优于以上所有腰梁锚固支护方案,边坡

安全稳定性系数达到1.816。兰州南绕城高速公路路堑边坡大多采用这一方案。

### 3.2.2 不同锚固角对边坡稳定性安全系数的影响

在其他条件不变的情况下,计算框架锚杆全坡支护下锚杆倾角为15°、20°、25°、30°、35°、40°时边坡的安全稳定性系数,结果见图6、表3。

从图6可看出:剪应力自上而下递增,最大剪应

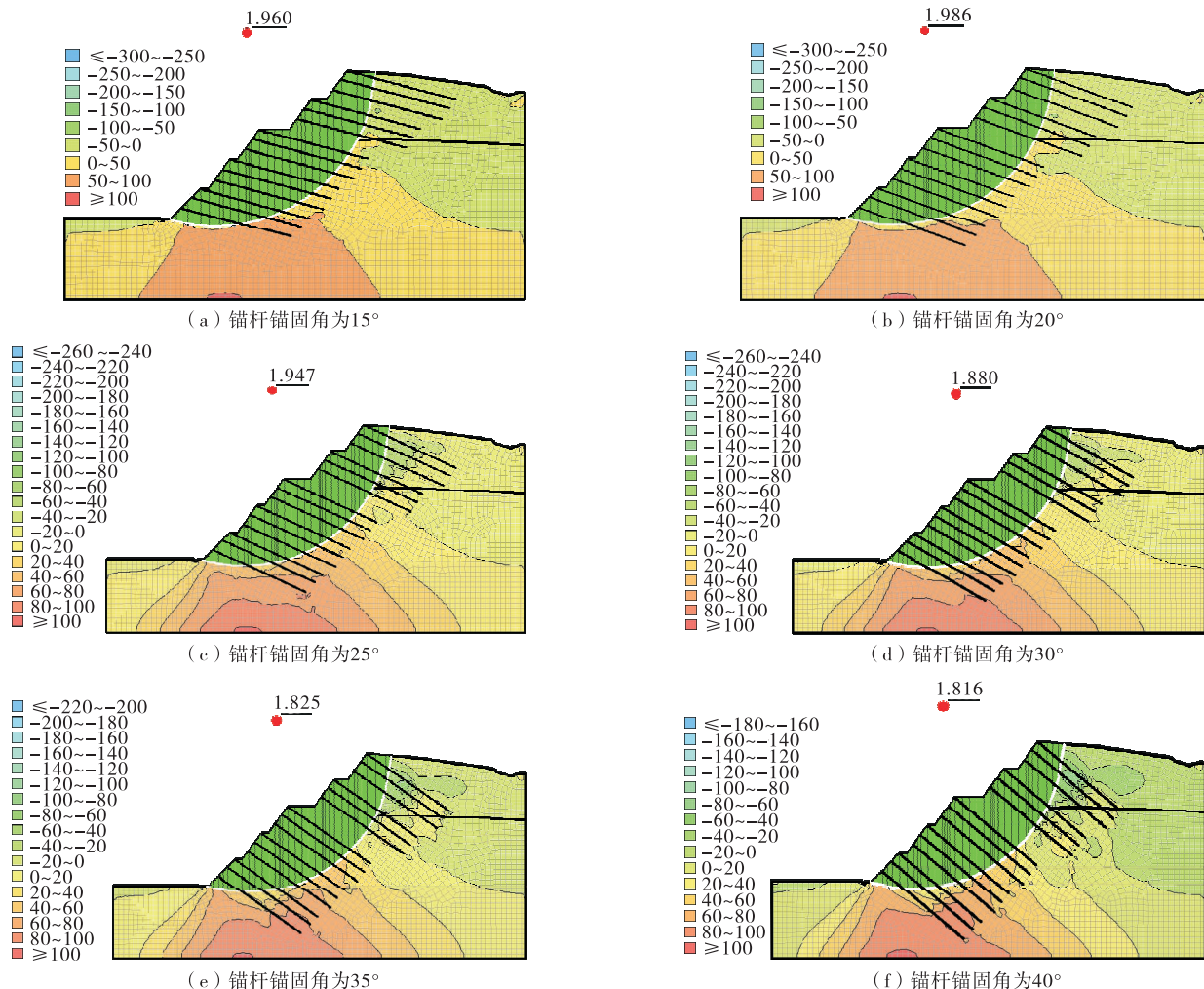


图6 不同锚固角对应的边坡稳定性安全系数及剪切应力等值云图(单位:kPa)

表3 不同锚固角框架锚杆全坡支护下  
边坡安全稳定性系数

锚固角度/(°)	稳定系数	锚固角度/(°)	稳定系数
10	1.920	30	1.880
15	1.960	35	1.825
20	1.986	40	1.816
25	1.947		

力集中在边坡底部,并向坡脚偏移,但未形成贯通剪切带。

从位移等值线云图(限于篇幅,略)来看,水平位

移和垂直位移保持了支护前的状态,几乎无增量,说明支护措施起到了良好效果。

由表3可知:锚杆锚固角变化时,框架锚杆全坡支护下边坡安全稳定性系数产生变化。锚固角由20°变到40°时安全稳定性系数呈递减趋势,由10°变到20°时安全稳定性系数呈递增趋势,锚固角为20°时边坡安全稳定性系数最大,为1.986,说明框架锚杆全坡支护的最佳锚固角为20°。考虑到具体施工,只要锚固角在10°~40°范围内均能满足边坡安全规范要求,从而增强锚杆支护的灵活性,有利于从经济性、

易施工性、安全性等方面优化支护方案。对于其他腰梁锚杆支护,锚固角同样可在  $10^{\circ}\sim 40^{\circ}$  灵活选择。

#### 4 结论与展望

根据兰州南绕城高速公路深挖路堑边坡工程 ZK38+960 横断面图建立路堑边坡几何模型,对边坡在不同支护条件下的安全稳定性进行有限元分析,比较不同腰梁锚固位置对边坡安全稳定性的影响,分析不同锚杆锚固角下框架锚杆全坡支护对坡体的支护效果。主要结论如下:1) 无支护条件下边坡稳定性系数为 1.114,开挖完成后边坡处于基本稳定状态,但与工程安全等级规范要求(稳定性系数 $\geq 1.25$ )有不少差距,需采用支护加固措施。2) 支护位置沿坡面从坡顶变至坡脚时,单根腰梁锚杆支护效果呈递增趋势(由弱变强),且离坡脚越近支护效果越明显;采用双腰梁锚杆支护即在 1/3、2/3 坡高位置同时支护的效果优于单根腰梁锚杆支护。3) 全坡框架锚杆支护效果优于任何腰梁支护。框架锚杆全坡支护效果与锚杆锚固角成非线性关系,在  $10^{\circ}\sim 40^{\circ}$  范围内随锚固角的增大安全稳定系数先增后减,最佳锚固角为  $20^{\circ}$ 。在实际施工中,锚固角可在  $10^{\circ}\sim 40^{\circ}$  灵活选取(均能满足安全规范要求)。

该文仅从安全稳定系数角度对不同支护方式的支护效果进行分析,限于篇幅未涉及支护条件下的水平变形、竖向变形、剪切应变、隆起变形等,也没有考虑地震、降雨等因素。另外,文中在假设路堑边坡一次性开挖完成的基础上讨论支护问题,与实际边坡开挖支护存在一定偏差。后续研究将加以完善。

#### 参考文献:

[1] 孙世国,杨宏,冉启发,等.典型排土场边坡稳定性控制

技术[M].北京:冶金工业出版社,2011.

[2] 方宏伟.边坡稳定性极限曲线法[M].北京:科学出版社,2017.

[3] 李飞,王贵君.土力学与基础工程[M].武汉:武汉理工大学出版社,2015.

[4] 韩建刚.土力学与基础工程[M].重庆:重庆大学出版社,2015.

[5] 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.

[6] 魏来泽.锚杆支护边坡稳定性分析[D].兰州:兰州理工大学,2019.

[7] 中仿科技公司.边坡稳定性分析软件 SLOPE/W 用户指南[M].北京:冶金工业出版社,2011.

[8] 王江荣,梁永平,欧国海.地震和暴雨工况下石头坪景区高边坡稳定性的数值模拟分析[J].安全与环境工程,2018,25(5):29-35.

[9] 王江荣,欧国海,梁永平.石头坪景区高边坡稳定性有限元分析及支护措施优化研究[J].工业安全与环保,2019,45(3):8-11+20.

[10] 王荣鲁,薛凯喜,赵妍,等.土体强度与边坡稳定性分析[M].北京:中国水利水电出版社,2016.

[11] 孙春艳.大型高边坡支护处理设计方案比选研究[J].中国水运,2019,19(6):213-215.

[12] 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(10):111-113.

[13] 宋词.预应力锚杆加固高陡边坡的数值模拟与现场实测分析[D].大连:大连交通大学,2016.

[14] 邓国新.格构锚杆支护在道路工程高挖方边坡中的应用[J].交通世界,2017(20):65-66.

[15] 王召磊,杨志银,张俊.基于 GeoStudio 的预应力锚索复合土钉墙稳定性分析[J].工业建筑,2011,41(增刊):437-440+448.

收稿日期:2020-05-11

(上接第 68 页)

路用性能及应用技术[J].公路交通科技,2016,25(4):29-35.

[9] 徐翠,王鹏,李华.橡胶沥青胶结料微观分析研究[J].交通运输研究,2012(8):87-90.

[10] 史思强.胶粉粒径与级配类型对橡胶沥青及其混合料性能影响研究[J].中外公路,2014,34(4):331-334.

[11] 宋云连,吕鹏,张扬.温拌沥青混合料高温性能试验研究[J].公路工程,2018,43(5):73-77.

[12] 徐东,王新宽,陈博.橡胶沥青混合料老化再生及其路用性能研究[J].武汉理工大学学报,2012,34(10):48

-52.

[13] 刘克非,邓林飞,郑佳宇.不同沥青结合料水损害的纳米尺度研究[J].材料研究学报,2016,30(10):773-780.

[14] 王岚,王利强,冯蕾,等.温拌胶粉改性沥青混合料疲劳性能[J].建筑材料学报,2018,21(3):497-502.

[15] 陈瑞璞,崔亚楠,冯蕾.老化作用下沥青混合料的疲劳及自愈性能[J].建筑材料学报,2019,22(3):487-492.

收稿日期:2019-12-21