

文章编号: 1001-1986(2010)03-0046-05

基于强度折减和容重增加法的三维边坡稳定性分析

曹云¹, 肖武²

(1. 南京工程学院建筑工程学院, 江苏 南京 211167;
2. 中南勘测设计研究院, 湖南 长沙 410014)

摘要: 利用以变形变化趋势为边坡破坏判别标准的强度折减法和容重增加法, 对某水电站高边坡进行了三维稳定分析, 得到了三维最危险潜在滑动块体及相应的安全系数。同时与广义楔形体法二维计算结果进行了比较。计算结果表明, 以边坡变形变化趋势为破坏判别标准, 基于强度折减法和容重增加法的三维边坡稳定分析是合理可行的。

关键词: 边坡稳定分析; 强度折减法; 容重增加法

中图分类号: P642.22 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.03.011

Application of strength reduction and gravity increase method in three dimensional slope stability analysis

CAO Yun¹, XIAO Wu²

(1. Department of Architecture, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;
2. Mid-South Design and Research Institute for Hydroelectric Projects, Changsha 410014, China)

Abstract: By applying strength reduction method and gravity increase method with the destructive criterion of the slope deformation variation tendency to stability analysis in 3D high slope of the hydroelectric station, the potential failure of 3D-sliding block and the corresponding factor of safety are obtained. Compared with the results of the generalized wedge method, the stability of the slope is evaluated. The result indicates that with the destructive criterion of the slope deformation variation tendency, the stability analysis of 3D slope with strength reduction method and gravity increase method is rational and feasible.

Key words: slope stability analysis; strength reduction method; gravity increase method

边坡稳定分析方法种类繁多, 各种分析方法都有其特点和适用范围。刚体极限平衡法历史悠久, 已被证明是分析边坡稳定有用且相对比较可靠的方法之一, 但仍有不少缺陷。随着计算机技术的不断发展, 数值计算方法, 如有限单元法、有限差分法已成为边坡稳定分析的有力工具。数值分析方法能较好地模拟边坡真实的地形地质情况, 并能考虑岩土体的非线性本构关系, 适用任意复杂边界条件, 但它需事先假定各安全系数对应的滑裂面。强度折减法和容重增加法则无需假定滑裂面, 可直接求解出工程所需的安全系数及滑裂面的几何形状和位置, 其中边坡破坏判别标准研究一直是热点问题。本文提出基于变形变化趋势的边坡破坏判别标准, 并应用强度折减法和容重增加法, 对某水电站高边坡进行了三维稳定分析, 以期探索两种分析方法的可行性和稳定性。

1 工程实例

1.1 工程概况

某水电站地处云南省西北部长江上游金沙江中游河段, 是集发电、供水、防洪、旅游和库区航运等于一体的综合水利枢纽工程。预可行性研究的参选坝址阶段拟建双曲拱坝, 建基面高程 1 740 m, 正常蓄水位 2 010 m, 坝顶高程 2 016 m, 最大坝高 276 m。坝址边坡地势陡峭, 坡度在 60~75°, 地质条件较复杂, 岩体内存在多组节理, 并有 3 条区域性断层穿过。本文以某水电站拱坝坝址上游 500 m 范围内的左岸岩石高边坡为研究对象。研究范围内边坡主要有以下几种岩层组成: 碳酸盐化变质玄武岩 P_{β}^J 、变角砾玄武岩 P_{β}^R 、泥盆系深灰至灰黑色大理岩 D_3^2 、灰白大理岩 D_3^1 、第四系冲积及崩积层 Q^{dl+col} 和 F_{10} 、 F_{11} 、 F_{20} 3 条断层。

本文采用楔形体稳定分析法分析该边坡典型断

收稿日期: 2009-11-16

作者简介: 曹云(1975—), 女, 江苏盐城人, 硕士, 讲师, 主要从事岩土工程方向教学与研究。

面的稳定性, 并利用强度折减法和容重增加法进行有限差分边坡稳定分析。各岩层材料物理力学指标参数见表 1。

表 1 边坡岩土材料物理力学指标参数
Table 1 Mechanics parameters for the slope

岩土类别	容重 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	粘聚力 C/MPa	摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ
P_{β}^J	28.8	2.0	52.4	18	0.23
P_{β}^R	28.2	1.8	52.4	18	0.23
D_3^2	27.5	1.6	50.2	16	0.25
D_3^1	27.2	1.5	48	15	0.26
$Q^{\text{dl+col}}$	23.2	0.3	35	1	0.3
断层		0.25	21.8		

1.2 广义楔形体法边坡稳定分析

广义楔形体法(The Generalized Wedge Method)是一种边坡刚体极限平衡分析方法, 它不仅考虑滑动面上的剪切平衡, 而且能考虑各楔形体滑块之间的相互摩擦, 边坡剖面中各楔形体的划分可以充分模拟岩石边坡中的节理、裂隙和断层等结构面对边坡稳定性的影响, 这使预测的滑动面及安全系数更符合实际。本文采用澳大利亚 MONASH 大学开发的广义楔形体法程序——GWDEGEM 程序。

根据边坡地形地质条件, 选择坝址上游 200 m 处的边坡断面 A—A 为广义楔形体法边坡计算断面。考虑 7 种不同岩层和 F_{10} 、 F_{11} 两条断层, 分析在自重作用下的自然边坡的稳定性。计算断面概化地质模型图见图 1。由于河水水位相对较低, 对高边坡稳定性的影响较小, 因此不计河水渗流对边坡的影响。采用 GWDEGEM 程序对 A—A 断面进行稳定计算, 通过对滑动面优化组合, 得到最危险滑动面, 为一浅层滑动面, 在 F_{10} 断层形成张拉裂缝, 以此为起点, 在坡脚处发生剪切破坏滑出, 此时边坡相应的安全系数为 1.35。边坡在自然状态下处于稳定状态。

边坡处于高地震区, 坝区地震基本烈度为 VIII 度, 设计烈度为 IX 度, 水平向地震系数取 0.408。采用拟静力法考虑地震荷载对边坡稳定的影响, 利用 GWDEGEM 程序对边坡进行稳定分析, 得到与自然状态基本一致的最危险滑动面, 相应的安全系数为 1.05。这说明边坡在地震条件下能基本维持稳定状态, 但安全储备不高, 需采取适当的加固措施处理。

1.3 强度折减法和容重增加法边坡有限差分分析

1.3.1 强度折减法和容重增加法基本原理

Duncan(1996)^[1]指出边坡安全系数可以定义为使边坡刚好达到临界破坏状态时, 对土的剪切强度

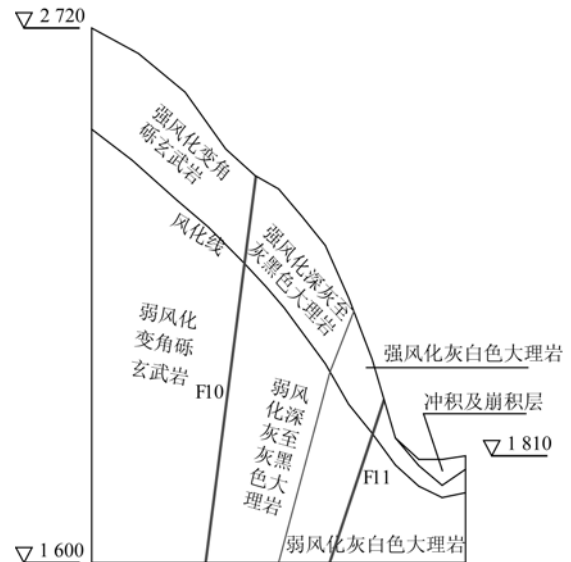


图 1 典型断面 A—A 概化地质模型示意图

Fig. 1 Generalized geological model for the typical section A-A

进行折减的程度。赵尚毅、郑颖人等^[2]通过比较毕肖普法和强度折减法的安全系数定义, 认为两者安全系数具有相同的物理意义。强度折减法在本质上与传统方法是一致的。强度折减法应用到有限差分中可以表述为^[3]: 保持岩土体的重力加速度为常数, 通过逐步减小抗剪强度指标, 将 C 、 φ 值同时除以折减系数 F_{sr} , 得到一组新的强度指标 C' 、 φ' , 进行有限差分分析, 反复计算直至边坡达到临界破坏状态。此时采用的强度指标与岩土体原具有的强度指标之比即为该边坡的安全系数 F_S 。公式如下:

$$C' = C/F_{sr}, \quad (1)$$

$$\varphi' = \arctan(\tan\varphi/F_{sr}). \quad (2)$$

容重增加法原理^[4-5]与强度折减法原理正好相反, 可以表述为保持岩土体的抗剪强度指标 C 、 φ 为常数, 通过逐步增加重力加速度 G 的方式, 反复进行有限元分析, 直至边坡达到临界破坏状态, 此时采用的重力加速度 G_{limit} 与实际重力加速度 G_0 之比即为该边坡的安全系数, 即:

$$F_S = G_{limit}/G_0. \quad (3)$$

增大重力加速度实际上可以等同于增加岩土体的容重, 因此可称之为容重增加法, 其中容重增加系数 $F_{gi} = G/G_0$, G_0 通常取值为 9.81 m/s^2 。

1.3.2 破坏标准定义

边坡滑动破坏是边坡最常见的一种破坏形式, 而滑动是由于剪应变和位移造成的一种运动^[6]。本文采用坡内某点(在滑坡体内)水平位移增量与强度折减系数增量(或与容重增加系数增量)的关系曲线来确定安全系数。当水平位移增量与强度折减系数增量之比 $\Delta\delta/\Delta F_{sr}$ (或水平位移增量与容重增加系

数增量之比 $\Delta\delta/\Delta F_{sr}$)急剧变化时,则认为边坡处于临界破坏状态,此时的强度折减系数(或容重增加系数)即为边坡的安全系数。然后利用此时边坡的剪应变增量图形来确定相应的潜在滑动面位置,连接剪应变增量等值线带状区域的最大幅值点,即可得到潜在滑动面的形状和位置。虽然用有限差分法计算土体位移的精度相对较低,但仍能反映土体破坏的基本趋势,也可满足工程精度要求。

1.3.3 计算模型及边界条件

本文选取某水电站拱坝坝址上游 500 m 范围内的左岸岩石高边坡为研究对象,根据边坡地形及地质资料,考虑碳酸盐化变质玄武岩、变角砾玄武岩、深灰至灰黑色大理岩、灰白大理岩、第四系冲积及崩积层等不同岩层的强弱风化带和 F₁₀、F₁₁、F₂₀ 断层等材料分区,共分 10 种材料,断层采用弱化实体单元模拟。利用 ANSYS 软件建立一个长 900 m、宽 500 m、高 1 120 m 的三维高边坡计算模型,共生成 29 620 个节点,37 132 个单元,材料分区及计算模型如图 2 所示。

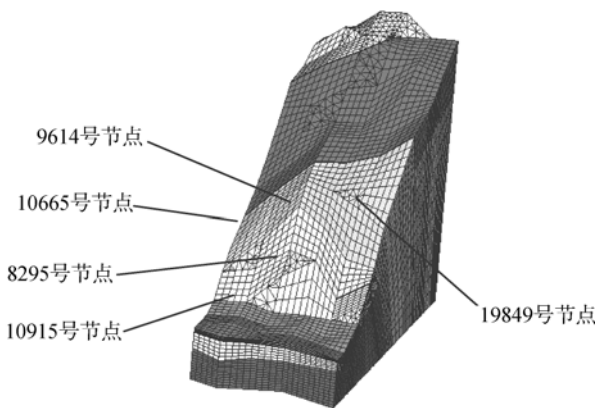


图 2 三维高边坡有限差分计算模型

Fig. 2 Finite difference mesh of the 3D high slope

利用 FLAC^{3D} 软件的 FISH 语言将在 ANSYS 软件建立的三维计算模型导入 FLAC^{3D} 中。岩土体采用 FLAC^{3D} 软件中带抗拉强度的 Mohr-Coulomb 本构关系,物理力学参数见表 1。其剪切屈服准则为:

$$F = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2C\sqrt{N_\varphi} \quad (4)$$

其中 σ_1 、 σ_3 为第一、第三主应力; C 为材料粘聚力; N_φ 是与摩擦角 φ 有关的参数,可表述为:

$$N_\varphi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (5)$$

边坡水平底面边界采用固定约束,四周垂直侧面边界均采用法向约束,坡面边界无约束。

1.3.4 强度折减有限差分边坡稳定分析

根据上述强度折减法计算原理和边坡破坏判别

标准,逐渐调整边坡岩土体的强度参数,进行弹性有限差分分析。由于三维边坡地形地质条件较复杂,判断滑动的位置比较困难,因此需要研究处于边坡不同位置的多个节点位移变化规律。本文选择节点号为 8295、9614、10665、10915、19849 的 5 个位于边坡表面的节点,节点位置如图 2 所示。分析各节点在不同强度折减系数时的水平位移,可以得到如图 3 所示的各节点的水平位移增量与强度折减系数增量之比值 $\Delta\delta/\Delta F_{sr}$ 和强度折减系数 F_{sr} 的关系曲线。从图 3 可知,强度折减系数从 1.2 开始不断增加,10915 号节点的 $\Delta\delta/\Delta F_{sr}$ 值一直以很缓慢的趋势增长,基本为一水平直线;而其余 4 个节点的 $\Delta\delta/\Delta F_{sr}$ 值随 F_{sr} 的变化趋势基本一致。这是因为 10915 号节点不在滑动块体上,其所在区域能保持稳定。因此水平位移较小,而且水平位移变化趋势也很平缓。而其他 4 个节点均处于滑动块体上,因而水平位移随 F_{sr} 的变化趋势基本一致。当强度折减系数增加到 1.4 后, $\Delta\delta/\Delta F_{sr}$ 值突然急剧增加,此时岩土体的剪应变增量坡面浅层出现局部集中,典型剖面剪应变增量分布如图 4 所示,三维边坡剪应变增量分布如图 5 所示。因此可以认为边坡处于临界破坏状态,此时的强度折减系数 1.4 即为强度折减法计算的边坡安全系数。连接图 4、图 5 中剪应变增量局部集中区域的中心线,即可得到潜在滑动面和三维滑动块体的位置。这与广义楔形体法分析的潜在滑动面基本一致,安全系数比广义楔形体法计算结果大 3.7%。

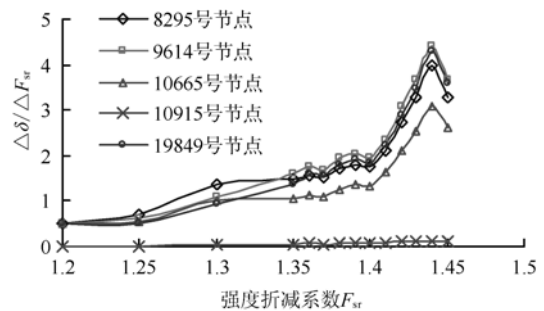


图 3 强度折减法 $\Delta\delta/\Delta F_{sr}-F_{sr}$ 关系曲线

Fig. 3 The curve of $\delta/ F_{sr}-F_{sr}$ by strength reduction method

根据边坡的破坏模式来分析。首先由于 F₁₀ 断层强度较低,在坡面断层揭露处产生拉裂缝,处于 F₁₀ 和 F₁₁ 之间的岩体有下滑的趋势,逐渐在强风化岩层内形成潜在滑动面。此前 F₁₁ 下部岩体能独立保持稳定,在上部岩体下滑趋势的推动下,坡脚处出现剪应力集中,逐渐达到临界破坏状态,最后和上部岩体一起下滑,这是一个牵引——推动的破坏过程。以

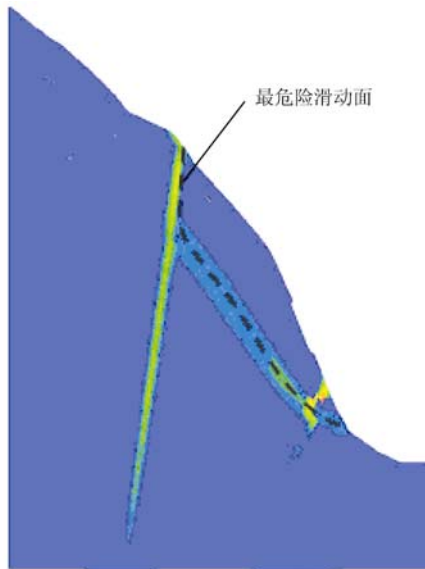


图 4 强度折减法典型剖面剪应变增量分布图

Fig. 4 Shear strain increment distribution of the slope on the typical section by strength reduction method

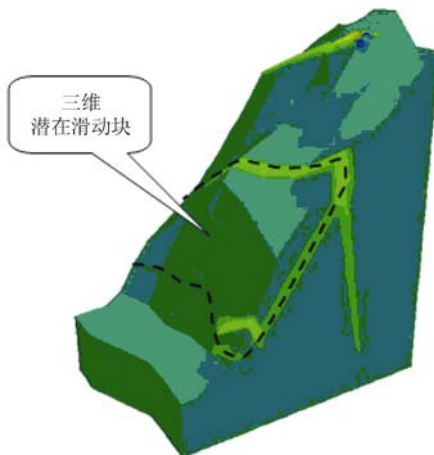


图 5 强度折减法三维高边坡剪应变增量分布图

Fig. 5 Shear strain increment distribution of the 3D high slope by strength reduction method

这种模式破坏的边坡加固时应注重上部滑块的处理，应特别注意防止地表水从坡面断层揭露处下渗，以免造成断层强度降低和水压力增大而引起边坡失稳。

1.3.5 容重增加有限差分边坡稳定分析

根据容重增加法计算原理，逐渐调整边坡岩土体的容重，改变边坡的自重荷载，进行弹塑性有限差分分析。分析 5 个位于边坡表面的 8295 号、9614 号、10665 号、10915 号和 19849 号节点在不同容重下的水平位移，可以得到如图 6 所示的各节点的水平位移增量与容重增加系数增量之比值 $\Delta\delta/\Delta F_{gi}$ 和容重增加系数 F_{gi} 的关系曲线。从图 6 可知，10915 号节点水平位移增量与容重增加系数增量之比 $\Delta\delta/\Delta F_{gi}$ 值很小， F_{gi} 的变化对其影响也很小。而其余 4 个节点的 $\Delta\delta/\Delta F_{gi}$ 值随 F_{gi} 的变化趋势较明显且基本一

致。说明这 4 个节点均在滑块体上，而 10915 号节点不在滑块体上。当容重增加系数增加到 2.35 后，在滑块体上的 4 个节点的 $\Delta\delta/\Delta F_{gi}$ 值同时突然急剧增加，因此可以认为此时边坡处于临界破坏状态，容重增加系数 2.35 即为容重增加法计算的边坡稳定安全系数。典型剖面的滑动面位置如图 7 所示。图 8 为容重增加法三维边坡剪应变增量图和三维边坡潜在滑块体形状及位置。

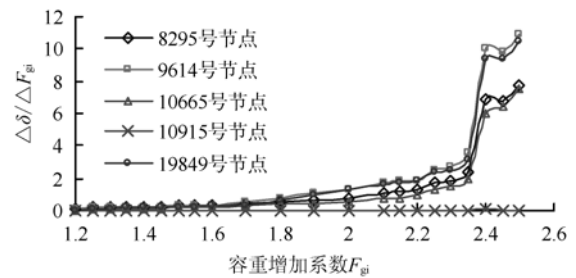


图 6 容重增加法 $\Delta\delta/\Delta F_{gi}-F_{gi}$ 关系曲线

Fig. 6 The curve of $\delta/ F_{gi}-F_{gi}$ by gravity increase method

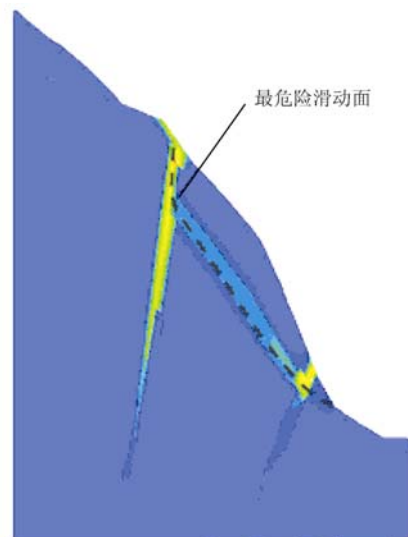


图 7 容重增加法典型剖面剪应变增量分布图

Fig. 7 Shear strain increment distribution of the slope on the typical section by gravity increase method

容重增加法计算的边坡安全系数较上述广义楔形体法和强度折减法的计算结果偏大，潜在滑动面形状及位置大致相同。造成容重增加法计算的安全系数偏大的主要是容重增加过程中必将使边坡岩土体的正应力增大，采用 M-C 屈服准则且岩土体摩擦角较大时，岩土体抗剪强度随正应力的增加而增大的程度较大，因而计算的安全系数偏大。解决这一问题的方法还有待进一步研究。

2 结论

- a. 采用广义楔形体法 GWDEGEM 程序分析高

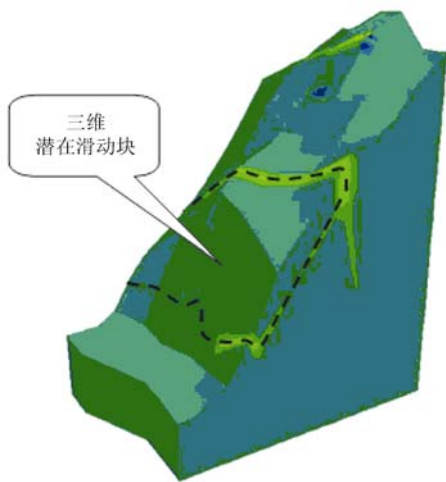


图 8 容重增加法三维高边坡剪应变增量分布图

Fig. 8 Shear strain increment distribution of the 3D high slope by gravity increase method

边坡典型断面自然状态和地震荷载作用下的稳定性。分析结果表明，该边坡在自然状态下安全系数为 1.35，地震作用下安全系数为 1.05；地震条件下边坡的安全性尚难得到保证，需要加固处理。

b. 根据边坡地形及地质资料，考虑多种不同岩层和断层等，利用 ANSYS 软件建立三维高边坡计

算模型，并利用 FLAC^{3D} 软件的 FISH 语言实现三维计算模型在 ANSYS 与 FLAC^{3D} 两软件间的转换。

c. 分别采用强度折减法 and 容重增加法分析三维自然边坡的稳定性，得到三维潜在滑动块体和典型断面的滑动面。计算结果与广义楔形体法比较，强度折减法计算结果相差不大；容重增加法的计算结果相对偏大，其计算精度有待进一步提高。

参考文献

- [1] DUNCAN J M. State of the art:Limit equilibrium and finite element analysis of slopes[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996, 122(7) : 577-596.
- [2] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民. 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3) : 333-336.
- [3] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique, 1999, 49(3) : 387-403.
- [4] SWAN C C, SEO Y K. Limit state analysis of earthen slopes using dual continuum/FEM approaches[J]. Int.J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 1999, 23 : 1359 -1371.
- [5] SEO Y K. Computational methods for elasto-plastic slope stability analysis with seepage[D]. The University of Iowa, 1998.
- [6] HUANG Y H, 包承钢. 土坡稳定分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988 : 1-8.

ZDY6000LD 定向钻机使用经验现场交流会在贺西煤矿举行

2010 年 4 月 20 日，山西焦煤公司在山西汾西矿业(集团)有限责任公司贺西煤矿召开了“ ZDY6000LD 水平钻机使用经验现场交流会”，钻机使用方和生产方的领导及相关技术人员参加了会议。与会人员参观了钻机试用现场，并就 ZDY6000LD 履带式定向钻机及随钻测量系统性能和现场使用情况等进行了交流。本次会议为完善和推广定向钻进设备提供了平台。

煤炭科学研究总院西安研究院研制生产的 ZDY6000LD 履带式定向钻机及随钻测量系统，在贺西煤矿试用期间，整套设备及随钻测量系统运行良好，性能稳定可靠。共定向施工主孔 2 个、分支孔 4 个，总进尺 1 497 m，主孔最大孔深达到 555 m，

分支孔最大孔深达到 111 m。在厚度约 1.8 m、坚固性系数 f 值为 0.7~1.0、局部褶曲发育的煤层中实施定向钻进，单班(8 h)最大进尺达到 105 m，且保证所钻钻孔全部在煤层中延伸，煤层中纯钻进时效达到 25 m/h 以上，不但成功地进行了本煤层定向主孔和分支孔的施工，还成功地进行了穿层定向孔的施工。施工过程中出现瓦斯喷孔数十次，孔内瓦斯浓度高达 63%以上，较回转钻进施工的瓦斯抽放孔浓度高出 2 倍，充分体现了该钻机在本煤层定向施工瓦斯抽放孔的优越性。目前贺西煤矿正在使用该套设备进行区域预抽瓦斯孔的施工，效果良好。

(梅新)