

岩质高边坡开挖变形的三维离散单元法分析

孟国涛¹, 徐卫亚¹, 郑文棠¹, 石安池²

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要 对一典型的反倾向层状结构岩质高边坡进行了非连续非线性三维数值模拟. 数值模型中考虑了复杂的地质条件, 同时模拟了进水口高边坡的控制性结构面和陡倾节理组, 实现了边坡、引水隧洞的分步开挖及锚固. 运用三维离散单元法(3DEC)进行了混合不连续和蜕化连续 2 种方式的求解, 在比较不同求解方式所得计算位移的基础上, 探讨了结构面对计算结果的影响, 分析了进水口边坡在开挖、加固作用下的变形状况和稳定性.

关键词 岩石力学; 边坡工程; 开挖; 变形; 三维离散单元法(3DEC)

中图分类号 :TU457 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2007)04-0393-05

岩体是经历过变形, 遭受过破坏, 并赋存于一定地质环境中的地质体, 其属性与人工材料有着根本的不同. 因此, 岩体的固有特性可以概况为“DIANE”^[1], 即非连续性、各向异性、非均质性和非线性.

通常条件下, 高边坡工程中的卸荷松弛低应力区在总体范围上占主导地位, 岩体赋存于应力水平不高的地质环境中, 结构面对岩体的潜在破坏方式起到决定性作用. 此类边坡问题常表现为结构控制型问题. 此外, 边坡岩体结构面为成岩建造、构造改造、表生演化的产物, 其特征与地质历史有关, 多条结构面的几何特征通常存在统计意义上的“优势性”. 当此优势性相对显著时, 岩体的各向异性特征是不可忽略的. 因此, 从充分尊重研究对象的基本属性出发, 非连续力学数值分析方法就成了解决此类问题的正确途径^[2].

三维离散元程序 3DEC 是处理结构控制型岩体工程问题最为成熟的技术之一^[3]. 该程序不但允许有限位移和离散体的转动及脱离, 而且在计算过程中可以自动判别块体之间可能出现的新的接触关系, 因此它可以方便地实现对复杂结构体变形破坏的模拟. 3DEC 针对问题的性质提供了 3 种求解方式: 蜕化成连续力学解法(类似于 FLAC^{3D})、完全不连续解法和混合不连续解法. 本文借助 3DEC 内嵌语言 FISH, 采用混合不连续解法对白鹤滩水电站进水口边坡开挖变形进行了离散单元法计算, 并将计算结果与蜕化连续力学解进行了比较.

1 工程地质条件及工程作用

1.1 边坡工程地质条件

拟建金沙江白鹤滩水电站位于金沙江下游攀枝花至宜宾河段. 河谷的深切侵蚀在坝区右岸形成了高差达 600 m 级的连续边坡(图 1). 地层产状总体平缓, 层面反坡内倾. 地层为二迭系上统峨眉山玄武岩组, 以块状玄武岩、杏仁状玄武岩和斑状玄武岩为主. 上覆三叠系下统飞仙关组(T_1f), 为一套紫红色河湖相沉积的砂岩、泥岩及砾岩, 与下伏二迭系呈微角度不整合接触. 岸坡高陡, 组成工程边坡的岩石主要为玄武岩和层间错动带之凝灰岩.

进水口边坡无区域性控制性结构面通过, 主要构造类型为层间错动带、断层、层内错动带和大量的构造裂隙组. 其中, 区内控制性构造结构面主要为层间错动带及断层, 此类结构面贯通性好, 延伸贯穿整个坝区, 构成坝区构造及岩体结构的基本构架, 如图 1、2 所示. 层间错动带 $C_2 \sim C_{11}$ 为凝灰质(岩)建造, 产状 $N30^\circ \sim 50^\circ E, SE \angle 15^\circ \sim 25^\circ$, 具有一定厚度, 发育于玄武岩各岩流层之间, 凝灰岩易于破碎风化崩解. 控制性断层有 F_{16} 和 F_4 , 结构面泥化、潮湿.

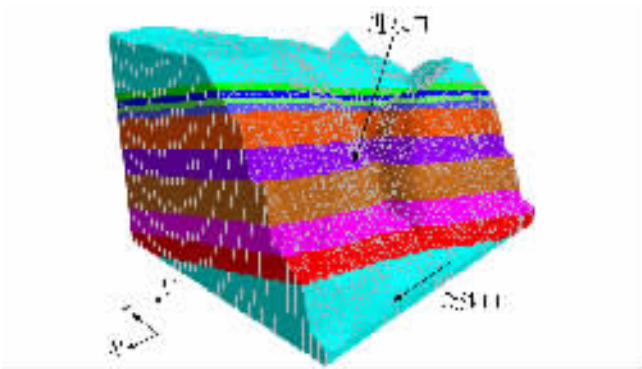


图 1 进水口边坡整体模型
Fig.1 Integral model of inlet slope

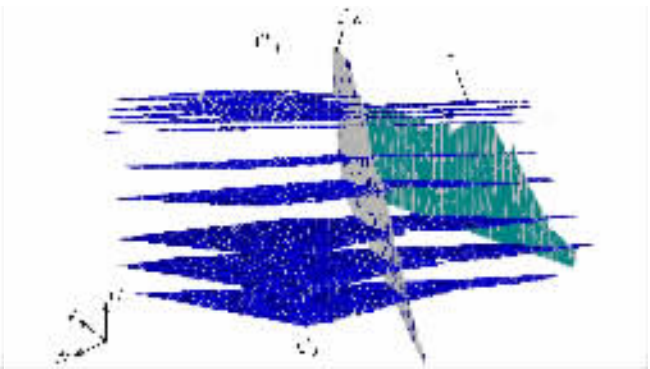


图 2 主要地质结构面
Fig.2 Main geological structural plane

进水口边坡岩体统计优势结构面为 1 组层内错动带和 2 组陡倾裂隙组,层内错动带的产状为 $N30^{\circ} \sim 54^{\circ} E, SE \angle 6^{\circ} \sim 18^{\circ}$,陡倾裂隙组的产状分别为 $N15^{\circ} \sim 40^{\circ} E, NW \angle 70^{\circ} \sim 86^{\circ}$ 和 $N30^{\circ} \sim 50^{\circ} W, SW \angle 83^{\circ} \sim 90^{\circ}$. 其产状“优势性”明显,岩体各向异性特征显著.

1.2 进水口边坡开挖

进水口布置于大寨沟口,自然边坡地形高陡,坡度多在 $65^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 之间.进水口位于该陡壁中下部,底板高程约 735 m,分 11 级开挖,开挖高度 294 m,如图 3 所示.由于层间、层内错动带发育,NE 和 NW 向断层和节理与层间、层内错动带的组合对边坡稳定不利.此外,大寨沟距坝址较近,对右岸进水口有不利影响,存在高边坡稳定问题.开挖后反倾向岩体的变形特征、陡倾裂隙组的影响以及加固支护方案的合理性是工程建设的重大技术问题.

该水电站进水口边坡是一典型的结构控制性问题,应运用非连续力学数值分析方法进行分析.因此,本文应用 3DEC 程序建立了进水口开挖高边坡以及引水洞组的联合三维数值模型,并通过此三维数值模型来研究坡、洞在开挖过程中的变形和稳定性问题^[4-5].

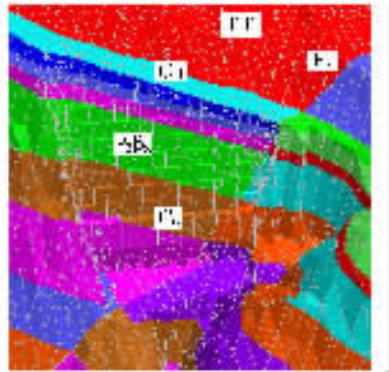


图 3 开挖模型
Fig.3 Excavation model

2 计算模型和计算参数

重视地质结构面对边坡稳定性的影响,考虑结构面的作用是岩质高边坡分析的一个基本思想.由于工程问题的大型混合不连续求解对硬件配置要求太高,出于计算效率的考虑,本文仅取进水口段进行非连续数值分析.

2.1 计算模型的建立

进水口高边坡的三维计算区域包括了进水口开挖边坡的主要部分.引水隧洞考虑 1 号~9 号机的 9 个引水洞的进水段.计算范围长 840 m,宽 240 m,最高点高程为 1 158 m,底面高程为 550 m,模型如图 4 所示.

由于离散元中的结构面有明确的地质意义,即每一条节理都对应于节理地质编录过程中的一个采样参数,因此,节理编录资料可以直接移植到模型中.3DEC 程序对节理的处理是按条进行的,需要指定每一条节理的倾向、倾角、节理面任一点的坐标和节理的连通率.

本次研究开展了现场平硐节理详细地质编录,根据测线法原理求得了节理采样的倾向、倾角和位置等关键参数^[3].利用 3DEC 的隐藏(HIDE)功能,按区域生成长大节理,进而根据已经形成的模型块体尺寸和一般节理的长度,选择合适的连通率参数值,实现对迹长的模拟.生成的 1 组层内错动带和 2 组陡倾裂隙组如图 4(c)所示.

2.2 本构与参数

计算中岩体采用 Mohr-Coulomb 准则弹塑性本构方程,层间错动带及控制性断层等结构面采用 Coulomb-slip 模型.

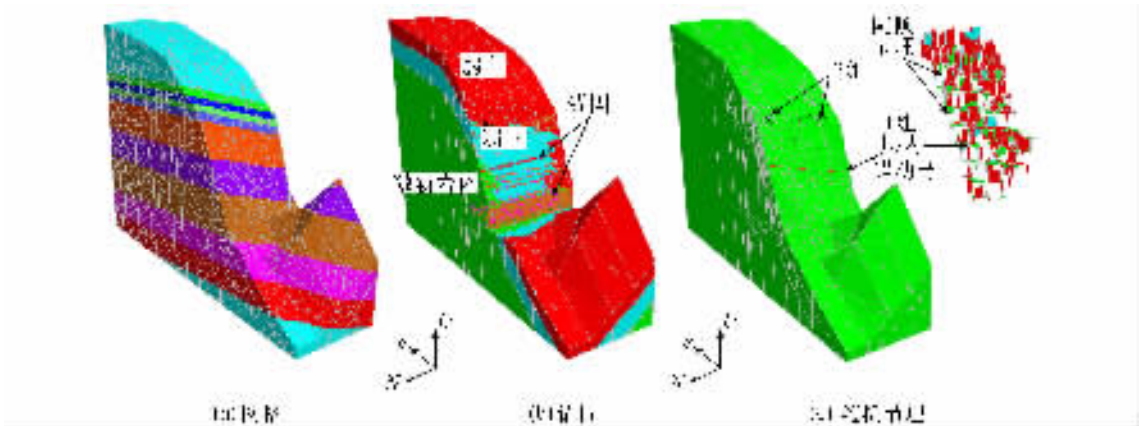


图 4 3DEC 计算模型

Fig.4 Three-dimensional discrete element calculation model

按照蜕化连续力学求解方式进行边坡变形、稳定计算时,岩体中的非控制次要结构面(节理)通过岩体的宏观力学参数来反映,因此在进行边坡岩体分层概化时,主要考虑了平硐勘测所得结构面线密度特征^[6]。如图 4(b)所示 0~40 m 为弱风化上段,岩体多为碎裂~镶嵌结构;40~100 m 为弱风化下段,岩体多为次块状~块状结构;≥100 m 为微新岩体,岩体多为块状~整体结构。计算参数见表 1、2。

表 1 岩体物理力学参数

表 2 结构面参数取值

Table 1 Physio-mechanical parameters of rock mass						
岩体类型	变形模量/ GPa	泊松比	密度/ (g·cm ⁻³)	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	抗拉强度/ MPa
玄武岩弱上	6	0.27	2.4	0.5	38.7	0.5
玄武岩弱下	10	0.25	2.5	0.8	47.7	1.0
微新	15	0.22	2.7	1.5	53.5	1.5
粉砂岩	4	0.30	2.4	0.4	35.0	0.8
凝灰岩	1	0.35	2.2	0.1	26.6	0.0

Table 2 Parameters of structural plane				
类型	法向刚度/ (MPa·m ⁻¹)	切向刚度/ (MPa·m ⁻¹)	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)
层间带	500	60	0.1	24.2
F ₁₆	500	100	0.08	26.6
F ₄	600	150	0.15	28.8
层内错动带	1200	400	0.18	35.0
陡倾节理组 1	1200	450	0.15	38.0
陡倾节理组 2	1500	600	0.18	38.0

考虑与不考虑节理条件的计算模型,其岩体完整程度不同,力学参数也不同。若模型中考虑了陡倾裂隙组,则应适当提高节理切割块体的岩体力学参数值,即岩体的参数值应大于岩体质量分级及参数估计得到的参数值,小于完整岩块的参数值。譬如:将Ⅳ级结构面作为单独地质单元模拟时,岩体的参数即为岩块与Ⅴ级结构面组合的岩体等效参数;而仅将Ⅲ级结构面进行单独模拟时,岩体的参数应该是岩块及Ⅳ级、Ⅴ级结构面组合的等效参数。对于复杂结构岩体,可以采用岩石力学试验与数值方法相结合的直接分析法来获取不同尺度下的宏观岩体力学等效参数^[7-8],而对于简单的结构岩体,可采用式(1)(2)估算岩体力学参数,且这种估算可通过编写的 FISH 命令流来实现。

$$E_r = \frac{E_m K_n s}{K_n s - E_m}$$

(1)

$$G_r = \frac{G_m K_s s}{K_s s - G_m}$$

(2)

式中: E_m 、 E_r ——岩体、岩块的弹性模量; G_m 、 G_r ——岩体、岩块的剪切模量; K_n 、 K_s ——结构面的法向、切向刚度; s ——节理的平均间距。

3 计算结果

3.1 位移特征

由图 5 可知:无节理条件下,计算位移的一致性、连续性较好,最大位移为 36.6 mm。节理条件下,计算位移不连续特征明显,最大位移为 49.6 mm,位移量级较无节理情况普遍增大。

二者的位移特征亦有所差异。无节理条件下,开挖引起的变形深度较大;节理条件下,影响深度较小。无节理条件下,最大位移发生在下部;节理条件下,最大位移发生在中上部位。其原因为:节理条件下,位移特征

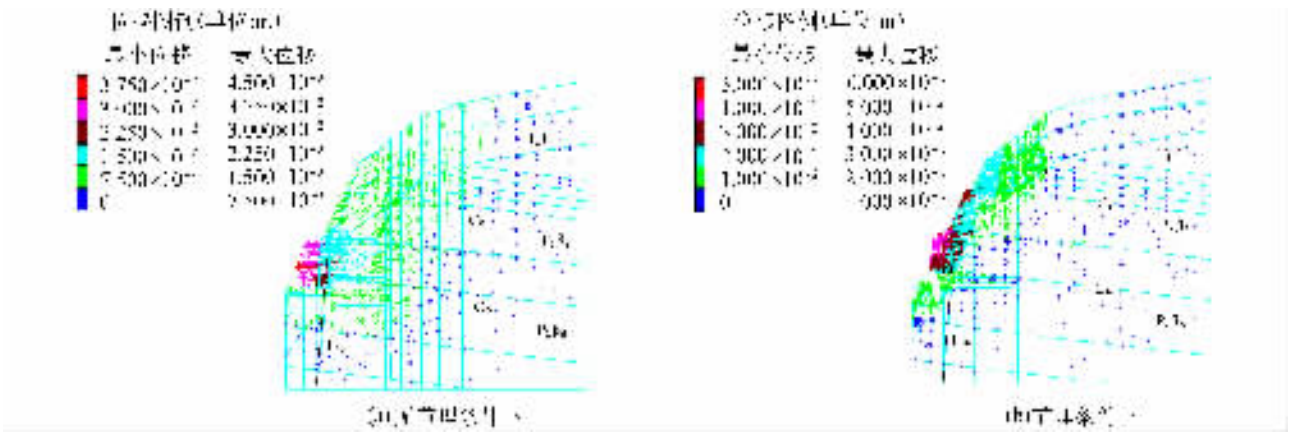


图 5 计算位移矢量图

Fig.5 Vector diagram of calculated displacement

更多地受控于结构面的分布,而陡倾角裂隙在边坡中上部的密度更大,其各向异性特征致使中上部岩体下滑趋势更加明显。

3.2 结构面影响

区内控制性结构面 F_{16} 断层和层间错动带共同切割形成的断块,具备倾倒—滑塌破坏的边界条件。但由图 5 可知,该块体未表现出破坏的变形趋势,可视为潜在的不稳定块体。

作为次一级结构面,陡倾角裂隙组在边坡开挖的中上部所起的作用相对突出,主要原因是该部位开挖深度不大,浅层破裂岩体未被挖除,结构面的切割有利于个别块体的失稳。

总体上,结构面的作用还没有改变边坡的总体变形状态,各断块岩体尚未出现破坏、滑离的位移特点,边坡的总体变形趋势尚保持在正常状态。

3.3 锚固效果

锚索的主要作用是限制由非连续结构面切割而成的不稳定块体的局部变形,在蜕化近似连续模型中,锚索的作用不明显。

在含节理模型中,锚固的作用相对显著。加锚使得水平向最大位移有所降低,同时使塑性区减小。在下部锚索为主的强力加固区,由于锚索水平施加,与近似水平的层间(内)错动带交角很小,进而造成部分锚索置于软弱的层间带中,因此施加的效果不甚明显。中上部浅部加固兼柔性支护区,由于模型中多采用锚杆单元,其长度小,且未设置预应力,所以锚杆单元对岩体变形的约束作用不明显,中上部断块岩体依然表现出较大位移特征。

总之,依据节理条件下的计算结果,针对中上部岩体的实际地质条件,在开挖过程中有针对性地调整加固方案,及时实施锚索支护以限制结构面张开,对维持边坡稳定有重要作用。

4 结 束 语

本文应用三维离散单元法对白鹤滩水电站右岸进水口高边坡进行了非连续非线性数值模拟。模拟结果表明,考虑节理的不连续和各向异性分布特征的计算位移比不考虑节理条件时的计算位移大,中上部岩体的下滑趋势也更明显,结构面尚未改变边坡总体变形状态,边坡整体稳定,锚固作用明显,但尚需针对实际地质条件进行中上部岩体的加固,以保证局部岩体的稳定。

本文还将蜕化连续与混合不连续 2 种求解方法的计算结果进行了对比分析。结果表明:在低应力条件下,结构控制性边坡问题中,节理网络几何特征的大量简化模拟会使计算结果出现显著偏差^[9];考虑岩体的非连续性和各向异性,用三维离散单元法进行非连续力学数值分析,能够准确地评价节理条件下工程作用造成的岩体变形与破坏,进而正确评价高边坡的整体稳定与局部稳定。

参考文献:

[1] HARRISON J P, HUDSON J A. Engineering rock mechanics[M]. Oxford: Pergamon Press, 2000.

[2] JING Lan-ru. A review of techniques ,advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 2003 40(3) 283-353.

[3] ITASCA. Three dimensional distinct element code user 's guide[K]. Minneapolis :Itasca Consulting Group ,Inc ,1999.

[4] 张贵科 ,徐卫亚 ,石安池. 三峡船闸高边坡及中隔墩变形影响因素分析[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2006 ,34(3) 315-320.

[5] 徐卫亚 ,宋晓晨 ,周维垣. 水电站进水口岩石高边坡及坝坡与洞室相互作用的三维数值分析[J]. 岩石力学与工程学报 ,2004 23(16) 2712-2717.

[6] 巫德斌 ,徐卫亚. 基于 Hoek-Brown 准则的边坡开挖岩体力学参数研究[J]. 河海大学学报 :自然科学版 2005 33(1) 89-93.

[7] MIN K B ,JING Lan-ru. Numerical determination of the equivalent elastic compliance tensor for fractured rock masses using the distinct element method[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 2003 40(6) 795-816.

[8] 张贵科. 节理岩体正交各向异性等效力学参数与屈服准则研究及其工程应用[D]. 南京 河海大学 2006.

[9] 朱焕春 ,BRUMMER R ,ANDRIEUX P. 节理岩体数值计算方法及其应用(一):方法与讨论[J]. 岩石力学与工程学报 ,2004 23(20) 3444-3449.

Analysis of excavation-induced high rock slope deformation
with 3D discrete element code

MENG Guo-tao¹ , XU Wei-ya¹ , ZHENG Wen-tang¹ , SHI An-chi²

(1. Geotechnical Research Institute of Hohai University , Nanjing 210098 , China ;

2. East China Hydropower Investigation and Design Institute , CHECC , Zhejiang 310014 , China)

Abstract :Three-dimensional discontinuous and nonlinear numerical simulation was performed of a typical high rock slope with anti-dip strata structure. With complicated geological condition taken into account , the control structural plane and anti-dip joint set of the high slope at inlets were simulated , and the excavation and anchoring of the slope and diversion tunnel in stages were realized numerically. Moreover , 3D discrete element code (3DEC) was used to solve the deformation of the high slope in the modes of mixed discontinuousness and degenerate continuousness. The influence of structural plane on the calculated result was discussed , and the stability of the high slope at inlets after excavation and reinforcement was analyzed by comparison of the calculated results in different calculation modes.

Key words :rock mechanics ; slope engineering ; excavation ; deformation ; 3D discrete element code (3DEC)