

地震作用下水利水电工程边坡稳定分析

抗震中心 张伯艳、王 璨、李德玉

1 研究背景

在水利水电工程的建设和运行中，大多涉及边坡的稳定问题^[56]，大型工程中的高陡边坡问题更加突出。位于广西和贵州界河南盘江下游的天生桥二级水电站，厂区边坡总高度 380m，上部 120m 为调压井边坡，下部 260m 为厂房边坡。厂房边坡由西坡陡岩、芭蕉林滑坡体、西坡及南坡 4 部分组成。在施工过程中，南坡和西坡曾发生不同类型的滑坡，经加固处理后，才保证了厂房边坡的稳定安全；漫湾水电站位于云南省云县与景东县交界的澜沧江中游河段，主要挡水建筑物为混凝土重力坝，在开挖坝基、水垫塘的过程中，左岸坝肩下游、缆机平台下部产生大范围平面型滑移破坏，土石方量约 10.6 万 m³，修复加固后，边坡才处于稳定状态；小浪底水利枢纽位于洛阳市以北 40km 的黄河干流上，其挡水建筑物为壤土斜心墙堆石坝，发电洞、灌溉洞、泄洪洞和溢洪道等所有引水、泄水建筑物都集中布置在左岸，进出口高边坡的稳定性成为工程顺利建设和安全运行的关键问题，进出口边坡在施工过程中多次出现滑塌险情，经开挖、体型设计和加固处理才保证了进、出口边坡的稳定性；长江三峡水利枢纽船闸工程，在开挖过程中，形成高 170m，长 1607m 的高边坡，边坡岩体中存在两组中缓倾角节理，从而构成 1000 余个不稳定楔形块体，对这些楔形块体进行逐个分析和处理后，边坡才处于安全稳定状态；洪家渡水电站位于贵州省乌江干流北源六冲河下游，挡水建筑物是面板堆石坝，由于枢纽布置的需要，左岸坝肩形成了高达 310m 的岩质陡边坡，通过采取主动预应力锁口锚固和系统喷锚措施，以较少的处理量保证了高陡边坡的稳定安全；龙滩水电站位于红水河干流广西天峨县境内，挡水建筑物为碾压混凝土重力坝，最大坝高 216.5m，由于处理左岸坝肩蠕变岩体及采用全地下厂房布置方案，全部 9 台机组的进水口均布置在左岸，因而形成了长约 400m，最大组合坡高达 435m 的、轮廓复杂的反倾向层状结构岩质高边坡，对其倾倒稳定分析，目前尚无成熟的方法，在离心机试验研究的指导下，采用预应力锚索和排水方案，才保证高边坡的稳定性；位于澜沧江中游的小湾水电站存在左岸坝前饮水沟堆积体高达 700m 的开挖边坡；位于四川省凉山彝族自治州盐源县和木里县境内的锦屏水电站，因修建高拱坝开挖坝肩以及缆机平台的需要，形成了高达 530m 的陡边坡；此外，大岗山、溪洛渡和白鹤滩等水电站，均存在边坡稳定性问题。由上述实例，可以看出，水电工程

边坡的特点是：地处深山峡谷，地形地质条件复杂，边坡开挖深，高度大，处理难度高，其稳定性往往成为制约工程设计的关键技术问题。

由于高坝大库大多建于西部地区，西部地区是中国大陆的主要地震区^[57]，地震烈度无论在时间和空间的分布上，西部地区都大于东部地区，近代中国大陆 82%的强震都发生在该地区，这使水电工程的高陡边坡稳定分析难度更大。虽然汶川地震中近坝工程边坡与远离坝址的天然边坡比较而言有较好的抗震表现，这主要得益于工程建设过程中对边坡采取的各种加固措施，然而边坡地震的输入机制，地震沿边坡的放大效应，各种加固措施的抗震机理，均缺乏深入认识，边坡的抗震稳定分析和研究相对边坡静力稳定分析而言要薄弱得多，才刚刚起步；边坡抗震稳定分析和研究相对于高坝的抗震分析而言，也很显不足。强震作用下的高坝安全问题已引起工程设计和研究人员的极大关注并已取得极大进步^[1,57-58]，然而，在地震作用下，边坡尤其是近坝边坡的失稳，可能会导致大坝的功能丧失，甚至有产生溃坝的风险。因此，近年来，对地震作用下水利水电工程边坡稳定分析和研究给予了越来越多的关注，本文拟将此学科研究的现状与最新成果作出概括、总结与展望，这不论是从工程应用的角度，还是从学科发展的角度都具有深远意义。

2 研究现状

水利水电工程边坡在地震作用下的稳定分析研究，除涉及静力作用（如自重、降雨、开挖应力、水岩耦合等）外，主要研究边坡的地震反应，它包括地震动在边坡中所引起的加速度、速度、位移和内力，地震引发的边坡永久位移，边坡动力失稳机理及其稳定性判据等。

从考察地震动作用下的边坡地震反应的物理现象出发，以能够体现真实地震动作用下的边坡岩土体的动力行为的物理本质为目标，以数学力学和计算工具的发展为前提，国内外学者们逐渐发展了多种边坡地震反应分析方法，可以分为计算分析与模型试验两大类，计算分析又可分为确定性方法和非确定性方法等。本文对各种研究方法概述如下。

（1）极限平衡分析方法

极限平衡方法始终是堤坝、天然边坡和其他岩土结构中主要的稳定分析方法。这一方法起源于经验的背景，后由 Bishop、Janbu、Spencer、Morgstern、Sarma、陈祖煜^[59,60]等学者作出了一系列的改进，形成了一个满足静力平衡要求，适用于任意形状滑裂面的较严格的方法。在极限平衡分析中，考虑地震作用时，均使用拟静力方法。即，将作用于边坡体上的地震惯性力作为大小和方向均不变的静力荷载施加在边坡体上。为此，引入地震作用系数 k_h 和 k_v ，其数值上等于水平或竖直加速度与重力加速度之比。其优点是，简单易行，并获得了广泛的应用，积累了大量

的工程经验,并纳入了有关规范^[61,62]。合理确定地震作用系数是拟静力法的难点,不同的研究者,采用不同的动力稳定安全系数标准,会推荐采用不同的地震作用系数^[2,3],水平地震作用系数大约为0.1~0.5。Stewart et al., Bray 和 Travararou 建议^[4,5]将地震作用系数与工程场址允许地震位移相关联,地震作用系数是最大水平地面加速度,地震震级,震源距离,谱加速度和允许地震位移的函数。需要指出的是,地震作用系数虽然与设计峰值地震加速度(PGA)有一定的关联,但两者并非相等,一般认为地震作用系数为PGA的0.3~0.5倍^[6]。遗憾的是,我国与水利水电工程边坡有关的三个现行规范^[7,13,63]对地震作用系数的取值均无条文规定,这导致边坡抗震设计具有较大的随意性。

一般说来,随高程的增加,地震作用于水工建筑物上的加速度会有所放大,对边坡而言,也存在这种放大效应,Bourdeau 等^[7,8]初步研究了边坡场地的地震放大效应。水利水电工程边坡具有开挖深、高度大的特点,在其抗震设计的拟静力法中,考虑这种地震的放大效应,可能对边坡的抗震稳定性有重要影响,这是值得深入探讨的问题。

虽然拟静力法对地震的作用过分简化,不能充分反应地震作用的多种因素:大小、方向、持续时间、频率成分与地震沿边坡的放大效应,但作为边坡抗震设计的初步分析方法,拟静力法仍然是边坡抗震设计最重要最广泛使用的方法之一。通过拟静力法筛选而得到的潜在滑动边坡,在进一步的动力分析中,宜选用应力变形分析或Newmark 滑块分析法,研究其稳定性。

(2) 基于连续介质力学理论的应力变形分析

基于连续介质力学理论的应力应变分析方法日益发展成为解决高边坡问题的不可或缺的技术手段,主要包括有限元和有限差分方法。有限元的概念是由Clough 在1960年首先提出的^[9],其后得到长足的发展,并在土坝和边坡抗震分析中得到应用。应力变形分析具有强大的处理复杂几何边界条件和材料非线性特征的能力,同时,也可模拟有限条数的岩体结构面。由于能严格考虑岩体及结构面的应力应变特征,加之大型通用软件(ANSYS, FLAC)的应用和普及,这些方法已成为研究高边坡变形问题的主要手段。运用ANSYS 软件^[10,11], A Fayou 等研究开挖角对地震响应的影响,得出减小开挖角是改善边坡动力性能的重要措施,研究顺层边坡与反倾边坡的动力响应,得出顺层边坡的动应力、位移和加速度总比反倾边坡为大的结论,这与汶川地震后观察到的结果一致; Wu 等^[12]利用FLAC3D 软件研究地震高发地区云南省路堑边坡的临界高度,对其抗震设计提供指导。为了与传统极限平衡方法的安全系数挂钩,应力变形分析方法正尝试用强度折减技术和动力超载方法来求解边坡稳定的强度储备安全系数和超载安全系数,取得了有益的成果^[13,64-65],并在工程中初步应用。应力变形分析的缺点主要是,需要高质量描述边坡体的几何与

地质数据和复杂的岩土体本构模型作为支撑,计算比较费时,因此,只适用于针对特定问题的重要边坡,而难以应用于面广量多的区域问题。一般来说,水电工程边坡,尤其是近坝边坡,因为其重要性,建议使用应力变形分析方法,计算研究其动力稳定性。

大多数岩土边坡问题,都涉及无限域或半无限域,而离散化只能在有限的范围内进行,为了使这种离散化不产生大的误差,或要求地震波的散射波场在人工截断边界处不产生反射,应使用吸能边界计入无限地基辐射阻尼的影响,现有的大型通用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 和 FLAC3D 中^[14,15],有可供选用的吸能边界。应力变形分析的另一个挑战是如何选取输入地震动时程,为水库大坝抗震分析选取输入地震动的方法^[16]为边坡工程的地震动选用提供了好的借鉴。最近,基于谱元法(spectral-element method)的边坡稳定弹塑性分析^[17,18]是应力应变分析的一个新亮点,它兼具有限元的灵活性和谱方法的精度,可大幅降低计算费用,是值得关注的研究方向之一。

(3) 基于不连续介质力学理论的应力变形分析

由于不连续介质力学可以考虑裂隙岩体的不连续性,近年来许多学者致力于这方面的研究。近期,在非连续介质应力应变分析方面发展了一系列新的方法,如离散元、界面元、DDA、流形元等,为研究类似岩体这样的非连续介质提供了很好的手段。

1) 离散单元法

离散元^[19,20](Distinct Element Method, DEM)是由美国学者肯代尔(CunDall)首先提出的,最初用于模拟岩石边坡的渐进破坏过程。离散元的突出特点是可以反映岩石块体之间接触面的滑移、分离与倾翻,同时又能计算块体内部的变形与应力。该法采用牛顿运动定律得出由不平衡力引起的速度和位移。在求解岩石工程非线性问题的任何阶段,都存在着不平衡力,单元之间并非完全处于平衡状态,解题技术的任务,是确定使全部单元处于平衡状态的一组位移,或在不可能处于平衡状态时指明破坏模式。离散元的数值解,可以从方程组由直接法求解。但直接法不能很好地适用于求解单元之间联接的频繁变化。因此,现常用松弛法求解,松弛技术可避免矩阵的存贮和处理,它以增量的方式逐步逼近平衡,并可随时满足相容条件。离散元的困难在于较难确定阻尼系数。目前阶段主要应用于二维边坡稳定求解^[21,22],三维离散元尚处于研究阶段。王泳嘉等^[66]将离散元应用于岩土力学的计算。Lemos, 张楚汉等^[23-24,67]完成了三维离散元的自动剖分系统并初步应用于拱坝坝肩和岩质高边坡分析。

2) 不连续变形分析

不连续变形分析^[25,68](Discontinuous Deformation Analysis, DDA),是著名学者石根华提出的,

它求解的是有限单元类型的网格。但所有的单元是被事先存在的不连续缝所包围的实际隔离块体，DDA 的单元或块体可以是任何凸状形或凹状形，甚至可以是带孔的多节点多边形。在 DDA 方法中，当块体接触时库仑定律可用于接触面，而联立平衡方程式是对每一荷载或时间增量来选择和求解的。DDA 使总势能最小化以建立平衡方程，选择位移作为联立方程的未知量。DDA 的特点是：完全的运动学及其数值可靠性，完全一阶位移近似，严格的平衡要求，正确的能量守恒。因此，DDA 理论严密，精度高，且可以模拟直到破坏后的整个过程。但由于块体假定为常应力常应变场，划分单元时块体不能太大，又因变形不连续，网格结点上的位移不兼容，整个变形计算为动态过程，这都使得计算量增大。DDA 方法目前阶段主要应用于平面域内，在边坡稳定分析等方面获得了较广泛的应用^[26-27,69-71]。

作为对 DDA 方法的改进，蔡永恩等提出了 LDDA 方法^[28-29]，即具有拉格朗日乘子的不连续变形分析。该方法在块体界面处设置接触力替代接触弹簧，模拟张裂和滑动。接触力的计算收敛性是 LDDA 的一个难点，张伯艳等给出了一个高效的迭代算法^[72]。LDDA 在块体内部采用有限单元计算应力与变形，因此块体本身是可变形的，特别适合三维问题的处理，但只适用计算前已知接缝位置的情形。LDDA 已应用于多个有缝混凝土坝、地基系统的动力分析，并取得较好的效果^[73-75]。对于具有明确滑面的边坡动力稳定问题，LDDA 也同样具有较高计算效率和处理实际工程边坡的能力^[65]。

3) 数值流形法

数值流形法^[68] (Numerical Manifold Method, NMM)，被认为是具有广阔应用前景的最新计算方法，它统一解决连续与非连续变形的力学问题。这种技术的基本思想是在求解区域上构造一组覆盖函数，覆盖函数具有局部非零和覆盖函数之和在求解域内恒为 1 的特性。该方法使用独立的数学覆盖和物理网格：数学覆盖只定义近似解的精度，而物理网格作为实际的材料边界。分析不受边界条件的阻碍，单元的形状可以任意，理论上遵守能量守恒定律，材料可服从库仑定律。数值流形法的收敛性和精确性主要依赖于复合形形状的单纯形积分。单纯形积分以单纯形作为积分域，目前阶段二维流形方法的理论和单纯形积分公式已经完善，并在岩土工程上获得了初步应用^[30,76]，制约数值流形法应用的主要因素，在于怎样定义物理和数学覆盖并形成计算所需数据，对于具有复杂工程背景的三维问题，这是一个具有挑战性的难题，迄今还没有好的解决方案。

4) 界面元

界面元^[31,77] (Interface Stress Element Method)，即基于分片刚体位移的界面应力模型，其思路是将单元介质的变形累积在单元之间交界面区域内，以众多单元界面的应力来表征整体结构的

受力特征。界面元是在刚体弹簧元的基础上建立与发展的，它的独立未知量是各单元形心位移，其支配方程便是各单元形心点的静动力平衡条件，该法采用的是位移不协调而应力保持连续的单元，既能反映结构面的不连续位移，又能计入各单元的弹、塑、粘性变形。在使用界面元进行动力稳定分析时，卓家寿教授提出了干扰能量法^[78]，从能量的观点建立稳定分析的理论，问题是由干扰能量确定的稳定性概念与采用阻滑力和滑动力的比值作为判据来确定块体稳定的概念有何相关性？后一稳定判据常为工程界所采用，因而溶入了多年的工程应用经验，且为现行规范所采纳。

基于不连续介质力学理论的应力变形分析，主要用于节理、裂隙较发育的不能简化为连续体的岩质边坡分析，现已处理二维问题为主，是有限元和有限差分的有益补充。

(4) Newmark 滑块分析法

通过应力应变分析求解边坡极限荷载的方法虽然在理论体系上十分严格，但是在实际应用中面临一些问题：(1) 与极限平衡分析方法不同，应力应变分析需要预先确定很多有关材料力学性能的参数。更令人头痛的问题是这些参数中的有些参数目前还很难通过试验确定。计算参数的取值问题已成为这些方法应用于工程实践的瓶颈。(2) 现有的应力应变分析程序的成果缺乏唯一性，不同程序给出的成果有时会产生很大的差异。造成这个现象的原因是材料进入弹塑性阶段各种程序处理方式不一。(3) 目前，工程界仍广泛应用安全系数来评价边坡的安全性。但应力应变分析方法提供的是边坡岩体不同点的应力、变形信息，如何把这些信息与安全系数挂钩，尚无一致公认的方法，这也是制约应力应变分析方法在边坡稳定分析领域广泛应用的瓶颈问题。虽然强度折减有限元法已广泛使用，这一方法以数值分析方法不能收敛作为边坡失稳的判据，对一些边坡形式简单、材料力学性质单一的边坡，获得了与传统的边坡稳定极限平衡分析方法(如 Bishop 法) 相同的结果。但是对于边坡形态复杂、材料力学性质变异大的复杂岩质边坡，采用数值分析方法不能收敛作为求解安全系数的判别标准值得商榷，需要进一步的研究。

Newmark 滑块分析法^[32]计算边坡在地震作用下产生的不可恢复的永久位移，以永久位移的大小作为判断边坡稳定性的标准。相对拟静力法分析，Newmark 滑块分析法能给出地震作用下边坡的更多动力响应信息，而不需要应力应变分析的复杂材料参数，起连结拟静力分析与应力应变分析的桥梁作用。Newmark 滑块分析法的地震输入是加速度时程，当地震动超过临界加速度时，块体加速度通过两次积分而得到位移，在整个时程计算中，上述通过积分而得到的位移是累计相加的。Newmark 滑块分析法包括以下 4 个假定^[2]：1) 动、静力抗剪强度相同；2) 临界加速度不依赖于应变，在整个计算过程中维持不变；3) 块体向上坡滑动是不允许的；4) 动孔隙水

压力的影响是忽略的。前 3 个假定在早期的简单计算中被应用，在近期的改进中，已不需要。关于动孔隙水压力的假设是唯一的约束条件。模型试验和对天然边坡的计算分析证实^[33-35]，在边坡的几何特性、土的力学特性和地震地面运动已知的情况下，Newmark 滑块分析法能相当精确地预测边坡地震永久位移。

从 65 年 Newmark 提出滑块分析法以来，这一方法受到理论和工程界的普遍关注，得到长足的进展，除 Newmark 早年提出的刚性滑块分析外，现已发展了非耦合分析和耦合分析方法。非耦合分析是基于这样的事实而研发的，滑动块在地震作用下其内部是可变形的，并非刚体。通常包括两步^[36,37]计算：1) 求假设边坡在无滑面的情况下的场地动力反应，得到边坡内部若干点的加速度时程，取这些时程的平均值作为滑坡体上作用的加速度。场地动力反应一般需要材料的剪切波速、潜在滑坡体的厚度、阻尼比等，等效非线性分析时，还需要剪切模量与阻尼比关系曲线。2) 将得到的时间历程应用于刚性块体分析，得到地震永久位移。从上述计算过程可见，非耦合分析未计入块体永久位移对地面运动的影响，而耦合分析将计入这种影响^[38,39]，耦合分析的计算是滑块分析中最复杂的，Bray 和 Travararour 提出了一个半经验公式^[40]，通过屈服加速度、场地基本周期 (T_s) 和地面运动在 $1.5 T_s$ 处的谱加速度来预测滑块永久位移。针对不同的场地和地震地面运动，文献 9 指出了最合适的 Newmark 滑块分析类型，为正确选用不同类型的 Newmark 滑块分析方法预测边坡永久位移提供了指导。另外，以 Newmark 滑块分析法为基础制作地震诱发滑坡灾害图^[41,42]是值得关注的應用。

(5) 关键块理论

关键块理论^[43,44]是石根华与 Goodman 提出的一种节理岩体几何分析方法。它的基本概念是，在坚硬和半坚硬地层中，岩体被结构面分割成各种类型的空间镶嵌块体，在自然状态下，这些空间块体处于静力平衡状态。当进行边坡、地基以及地下洞室的人工开挖，或对岩体施加新的荷载后，使暴露在临空面上某些块体失去原始的静力平衡状态，因而造成某些块体首先沿结构面滑移、失稳，进而产生连锁反应，造成整个岩体工程的破坏。关键块理论中有两个基本定理，即有限性定理和可动性定理。有限性定理是指：设某凸块体由几个半空间的交集构成，平移各半空间面使之通过坐标原点而形成棱圆锥。若棱锥为空集，则相应的凸块体为有限，反之，若棱锥为非空集，则相应的凸块体为无限。可动性原理：若由结构面和临空面共同构成的块体为有限，而仅由结构面构成的裂隙块体为无限，则该块体为可动；若由结构面和临空面共同构成的块体为有限，而仅由结构面构成的裂隙块体亦为有限，则该块体为不可动。关键块理论的核心就是找出临空面上的关键块体。关键块理论是根据实际节理参数定出关键块体，运用起来十分方便。块体系统完整的

分析步骤通常包括^[45,46]：a) 由节理、裂隙和岩石表面对块体系统作几何切割；b) 发现潜在的可能的滑动的关键块和可能的滑动模式；d) 计算稳定安全系数或地震荷载作用下块体的永久位移。关键块理论分析结果易与极限平衡和 Newmark 滑块法挂钩，其缺点是未考虑块体本身的变形。

在节理发育的岩质边坡抗震稳定分析中，运用关键块理论与极限平衡或 Newmark 滑块分析相结合应是一个较好的选择，值得关注的是三维块体的 Newmark 滑块分析要考虑在地震过程中滑动模式从单面到双面滑动的交替变化^[46]。

(6) 模型试验

模型试验是边坡稳定分析研究的重要方面，70 年代以前，大多针对土石坝进行，模型较小，地震波单一，以固定频率的正弦波为主，随着大型地震模拟振动台的增多，针对土质和岩质边坡的地震模拟震动台试验有明显增多的趋势^[79-84,47-49]。这些试验中以研究土质和岩质边坡地震作用的破坏机理为主，Lin 和 Wang^[47]在长宽高分别为 4.4m、1.3m 和 1.2m 的模型箱内，制作了高 0.5m、宽 1.3m，坡角 30° 的均质土坡，在不同频率和振幅波的激励下，得到加载频率低于 8.9Hz，幅值小于 0.4g 时，模型土坡显现线性反应，加载幅值超过 0.5g 时，土坡显现非线性反应，且模型土坡的破坏与原型观察相一致。徐光兴等^[79]在长宽高分别为 3.5m、1.5m 和 2.15m，坡角约 38° 的模型土坡上，通过输入不同类型、幅值、频率的地震波和白噪声激励，探讨了地震作用下模型边坡的动力特性与动力响应规律，以及地震动参数对动力特性和动力响应的影响，得出结论为：随着振动次数的增加，模型边坡自振频率逐渐降低，阻尼比逐渐增大，自振频率降低的幅度随振幅的增大而加大；边坡土体对输入地震波具有明显的放大作用，沿坡面向上，加速度峰值放大系数呈现递增趋势，在坡肩附近急剧增大；在不同地震波作用下，坡面加速度响应具有明显的差异，当输入地震卓越频率与模型边坡自振频率接近时，坡面加速度峰值放大效应显著增强；随着输入地震动幅值的增加，坡面加速度峰值放大系数呈现明显的递减趋势，边坡土体对输入波的低频部分存在放大作用，对高频部分存在滤波作用。随着输入地震动幅值的加大，土体表现出更强的滤波作用。李振生等^[80]对陡倾层状岩质边坡，杨国香等^[81]对反倾层状结构岩质边坡，邹威等^[82]对层状岩质斜坡的振动台试验表明：地震作用下边坡的变形破坏程度、特征以及稳定性不仅与地震波的类型、加载方向、频率、振幅有关，同时还受边坡的岩体性质、高程、微地貌、结构面等地质因素控制；与土坡一样，岩质边坡中地震波沿坡高有一定的放大效应。叶海林等^[83]利用振动台试验了预应力锚索的作用机制，Srilatha 等^[48]研究边坡加固措施的效果，Murakami 等^[49]研究岩石螺栓和绳网对边坡的加固作用和机理，并推导了用于加固设计的简化公式，于玉贞、邓丽军^[84]利用离心机试验，进行了抗滑桩加固边坡地震响应，分析了抗滑桩的加固效果和作用机制。

边坡模型试验的主要局限性，在于难以满足应力、变形、材料特性的严格相似，因此，难以得到原型边坡的定量结果，多用于定性和宏观破坏现象的研判，或用于计算模型的试验验证。由于实际水电工程边坡往往规模巨大，在振动台上作模型试验，需要大的几何比尺，试验难度会更大，这类试验研究有利于水利水电工程师作出直观研判，是未来边坡试验的关注点。

（7）非确定性方法

由于在边坡稳定分析中，存在诸如输入地震动和边坡材料特性等的随机性问题，理所当然发展了非确定性的分析方法。Lin 等^[50]基于块体为刚体和把强地震动看作高斯过程的假设研究了块体失效的概率。Christian 等^[51]考虑土特性的不确定性和一次二阶矩方法应用于土坝设计。Massih 等^[52]利用极限分析的拟静力模型和 Newmark 滑块分析模型，分别以边坡的安全系数和坡脚永久位移作为功能函数，土的抗剪强度为随机变量，用 Hasofer-Lind 可靠度指标评估边坡稳定性，得出拟静力法具有比 Newmark 滑块分析更保守的结论。Al-Homouda 等^[53]进行了三维边坡的可靠性分析，除安全系数和地震永久位移外，还增加了临界和总坡宽为两个新的重要参数，不确定性包括：材料的抗剪强度及空间变化、地震发生的随机性和地震诱发加速度。参数研究表明：震源距离和震级对地震永久位移有主要的影响。Juang 和 He 等^[54,55]将模糊数学引入边坡稳定分析中，初步进行了地震作用的边坡稳定模糊可靠性分析。与确定性方法相比，边坡稳定的不确定性分析开展得还比较少，有待深入研究。

3 评述

从最近几年边坡地震稳定分析研究的大量国内外文献来看，拟静力的极限平衡分析仍然是边坡动力稳定分析的主要方法，在可以预见的将来，拟静力的极限平衡分析将继续发挥其应有的作用，为量大面广的边坡提供初步分析。拟静力法的地震作用系数是一个经验系数，由于我国水利水电工程边坡的有关规范对其未作条文规定，应加强这方面的研究。与拱坝坝肩稳定分析相似^[85,86]发展一种能考虑地震动时程变化的安全系数计算方法，从而可考察地震过程中边坡安全系数的变化，所得安全系数是与时间有关的变化量，也很有必要。

基于连续介质理论的应力应变分析，理论上比较成熟，是从宏观的小尺度范围内研究岩体的各种力学量的统计平均值，从而将岩体视为连续介质，可方便地分析复杂岩基和边坡的变形、应力和稳定状态。具有强大的处理复杂几何边界条件和材料非线性特征的能力，也可以模拟有限条数的岩体结构面。由于能严格考虑岩体及结构面的应力应变特征，这些方法已成为研究边坡变形问题的主要手段。基于谱元法的边坡稳定弹塑性分析是应力应变分析的一个新亮点，它兼有限

元的灵活性和谱方法的精度，可大幅降低计算费用，是值得关注的研究方向之一。

非连续介质力学可以考虑裂隙岩体的不连续性，为节理、裂隙发育岩体的分析提供了很好的手段，是边坡稳定分析的有益补充。

Newmark 滑块分析，起到拟静力法和应力应变分析之间的桥梁作用，以永久位移作为边坡失稳的指标，兼具简单实用与无需过分复杂的材料本构之优点。地震作用下，不同场地条件边坡失稳的滑块永久位移临界值，滑块永久位移与边坡失稳概率的关系是值得关注的研究方向。另外，对于节理发育的岩质边坡抗震稳定分析，运用关键块理论与极限平衡或 Newmark 滑块分析相结合应是一个较好的选择。

对于重要的、离大坝较近的水利水电边坡，可能直接影响水工建物的运行安全，应采用应力应变分析和地震模拟振动台模型试验，还可进一步开展边坡地震稳定性的概率分析，为工程安全和风险评估提供依据。

4 展望

就边坡地震反应数值分析方法而言，尽管有多种方法，但如何考虑地震动输入仍然是一个没有很好解决的问题，计入无限地基辐射阻尼影响和地震波的入射方向的边坡地震响应分析研究是需要加强的研究方向。

边坡的场地效应，包括地震动沿高程的放大，对理解和运用拟静法的地震作用系数意义重大，是将来研究的重点之一。

地震作用下边坡加固措施（特别是锚索）的作用机理，对边坡抗震设计有重要指导意义，需从理论和试验两方面展开研究。

不同场地条件下，边坡失稳与 Newmark 滑块永久位移的对应关系，滑块永久位移与边坡失稳概率的关系是应开展的研究。

混凝土拱坝地基系统的振动台模型试验方面，已积累了相当多的经验，而重大水电工程边坡的地震模拟振动台试验明显不足，由于已有的数值分析方法模拟地震作用下的材料本构行为方面的限制而较难给出准确评估，具有工程背景的水电工程边坡，特别是近坝边坡的大型振动台和离心机试验研究，将为水电工程师提供较直观的研判，同时能有效验证数值方法的合理性，应加强这一方向的研究。

目前国内外对地震作用下的边坡稳定性有安全系数和永久位移两种评价标准，但究竟用哪一种更合适尚没有定论。对于安全系数标准通常有三种判据：(1)基于强度判据的安全系数；(2)基

于某一变形量的安全系数；(3)基于能量观点的安全系数。不像边坡稳定的静力分析的安全系数目前有相对明确的物理意义，考虑地震动作用采用地震动时程分析时，安全系数是一个随时间发生变化的物理量。如何选取一个具有物理意义或具有工程风险决策含义的评价指标来表征整个地震动过程中边坡稳定程度，在学术界还有很大的争论。虽然在这一方面进行了少量的探索性研究，但都不太成熟。因此，对边坡地震稳定性评价指标与安全标准的研究还很不成熟，是一具有实际意义、值得深入研究的问题。

参考文献

- 1 Anil K. Chopra, Earthquake analysis of arch dams: factors to be considered [C], The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, 2008
- 2 R. W. Jibson, Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes - A retrospective [J]. Engineering Geology, 2011, 122:43-50
- 3 A.J. Li, A.V. Lyamin, R.S. Merifield, Seismic rock slope stability charts based on limit analysis methods[J]. Computers and Geotechnics. 2009, 36:135-148
- 4 J.P. Stewart, T.F. Blake, R.A. Hollingsworth, A screen analysis procedure for seismic slope stability [J], Earthquake Spectra, 2003, 19:697-712
- 5 J.D. Bray, T. Travararou, Pseudostatic coefficient for use in simplified seismic slope stability evaluation [J], Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009,135:1336-1340
- 6 D. Leshchinsky, H.I. Ling, J-P Wang, A. Rosen, Y. Mohri, Equivalent seismic coefficient in geocell retention systems [J], Geotextiles and Geomembranes, 2009,27:9-18
- 7 C. Bourdeau, H.-B. Havenith, Site effects modelling applied to the slope affected by the Susamy earthquake (Kyrgyzstan,1992) [J], Engineering Geology, 2008,97:126~145
- 8 Li Yang, Li Tongchun, Zhao Lanhao, Study on distribution of seismic coefficient for rock slopes [J], Earth and Space, 2012, 1003~1014
- 9 R.W. Clough, The finite element method in plane stress analysis [C], Proceedings of the 2nd Conference on Electronic Computation, American Society of Civil Engineers, Structural Division, Pittsburgh, PA. 1960
- 10 Fayou A, J.M. Kong, Z.Q. Ni, Research the excavation angle affect on seismic dynamic

- response of slope [J], *Advanced Materials Research*, 2012, 374:2583~2587
- 11 Fayou A, J.M. Kong, Z.Q. Ni, Research the layered structure affect on seismic dynamic response of rock slope[J], *Advanced Materials Research*, 2012,382:439~443
 - 12 G.X. Wu, G.Y. Cheng, J.S. Ding, J. Luo, Determination of critical height of cut slope of red-bed soft rock under seismic loading [J], *Advanced Materials Research*, 2011,261:1660~1664
 - 13 T. Zhao, J. Sun, B. Zhang, C. Li, Analysis of slope stability with dynamic overloading from earthquake [J], *Journal of Earth Science*, 2012, 23:285-296
 - 14 Itasca Consulting Group, Inc., *FLAC^{3D} Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions (Version 2.0) User's Manual*
 - 15 J.O. Hallquist, *LS-Dyna Theoretical Manual*, 1998
 - 16 Chen Houqun, Li Min, Zhang Boyan, Input ground motion selection for Xiao Wan High Arch Dam [C], 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004, Paper No. 2633
 - 17 T.R. Chandra, B.N. Prakash, Y. Ryuichi, High-Order FEM formulation for 3-D slope instability [J], *Applied Mathematics*, 2013, 4:8~17
 - 18 H.N. Gharti, D. Komatitsch, V. Oye, R. Martin, J. Tromp, Application of an elastoplastic spectral-element method to 3D slope stability analysis [J], *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2012,91:1~26
 - 19 P.A. Cundall, Formulation of three-dimensional distinct element model[J], Part I, A scheme to detect and represent contact in system composed of many polyhedral blocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 25 (3):107~116, 1988
 - 20 R. Hart, P.A Cundall, J. Lemos, Formulation of three-dimensional distinct element model [J], Part II, Mechanical calculation of a system composed of many polyhedral blocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 25 (3):117~125, 1988
 - 21 V. Kveltsvik, A.M. Kaynia, F. Nadim, R. Bhasin, B. Nilsen, H.H. Einstein, Dynamic distinct-element analysis of the 800m high Åknes rock slope [J], *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 2009, 46:686~698
 - 22 M. Barbero, G. Barla, Stability analysis of a rock column in seismic conditions[J], *Rock*

- Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43:845~855
- 23 J. Lemos, A distinct element model for dynamic analysis of jointed rock with application to dam foundations and fault motion [D]. Ph. D. Thesis, University of Minnesota, June, 1987
- 24 Zhang Chuhan et al., Application of distinct element method in dynamic analysis of high rock slopes and blocky structures [J], Soil Dynamic and Earthquake Eng. 1997, 16:385~394
- 25 Shi Genhua, Block System Modeling by Discontinuous Deformation Analysis[M], Southampton UK and Boston USA, 1993
- 26 Y. H. Hatzor, R. Benary, The Stability of a Laminated Voussoir Beam: Back Analysis of a Historic Roof Collapse Using DDA [J], Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1998, 35(2):165~181
- 27 Y.H. Hatzora, A. Feintuch, The validity of dynamic block displacement prediction using DDA [J], Int. J. Rock Mech. Min. Sci.,2001, 38:599~606
- 28 Y. Cai, T. He, R. Wang, Numerical simulation of dynamic process of the Tangshan earthquake by a new method LDDA [J], Pure and Applied Geophysics, 2000, 157(11-12):2083~2104
- 29 L.B.L. Hilbert, Y.W. Jr., N.G.W. Cook, Y. Cai, G.P. Liang, A new discontinuous finite element method for interaction of many deformable bodies in geomechanics [C]. In: Pro 8th Int. Conf. Comp Meth, Adv. Geomech, 1994, 931~936
- 30 Weiyuan Zhou, Qiang Yang, Xiaodong Kou, Manifold method and its application to engineering[C]. Proc. of ICADD-2, The second international conference on analysis of discontinuous deformation. Kyoto Japan, 1997, 274~281
- 31 Zhuo Jiashon, Zhang Qing,Zhao Ning. Interface stress element method for deformable body with discontinuous medium such as rock mass [C], Proc. of ISRM-8,1995, 939~941
- 32 N.M. Newmark, Effects of earthquakes on dams and embankments [J], Geotechnique,1965, 15 : 139~160
- 33 J. Wartman, J.D. Bray, R.B. Seed, Inclined plane studies of the Newmark sliding block procedure[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003. 129:673~684
- 34 J. Wartman, R.B. Seed, J.D. Bray, Shaking table modeling of seismically induced deformations in slopes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,

- 2005, 131: 610~622
- 35 R.C. Wilson, D.K. Keefer, Dynamic analysis of a slope failure from the 6 August 1979 Coyote Lake, California, earthquake [J], Bulletin. Seismological Society of America, 1983, 73: 863~877
- 36 F.I. Makdisi, H.B. Seed, Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations [J], ASCE Journal of the Geotechnical Engineering, 1978, 104: 849~867
- 37 J. D. Bray, E.M. Rathje, Earthquake-induced displacements of solid-waste landfills [J], Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124: 242~253
- 38 E.M. Rathje, J.D. Bray, An examination of simplified earthquake-induced displacement procedures for earth structures [J], Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36: 72~87
- 39 E.M. Rathje, J.D. Bray, Nonlinear coupled seismic sliding analysis of earth structures [J], Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126: 1002~1014
- 40 J.D. Bray, T. Travasarou, Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements [J], Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133: 381~392
- 41 R. Romeo, Seismically induced landslide displacements: a predictive model [J]. Engineering Geology. 2000, 58: 337~351
- 42 W-F Peng, C-L Wang, S-T Chen, S-T Lee, Incorporating the effects of topographic amplification and sliding areas in the modeling of earthquake-induced landslide hazards, using the cumulative displacement method [J], Computers & Geosciences, 2009, 35: 946~966
- 43 Gen-hua Shi, A Geometric Method of Stability Analysis of Discontinuous Rocks [J], Scientia Sinica, 1982, 25 (1): 125~148
- 44 R.E. Goodman, G.H. Shi, Block theory and its application to rock engineering [M], Prentice Hall Inc, London, 1985
- 45 V. Greif, J. Vlčko, Key block theory application for rock slope stability analysis in the foundations of medieval castles in Slovakia [J], Journal of Cultural Heritage, 2013, 14: 359~364

- 46 Gen-hua Shi, Single and multiple block limit equilibrium of key block method and discontinuous deformation analysis[C], Stability of Rock Structures, 2002, 3-43
- 47 M-L. Lin, K-L. Wang, Seismic slope behavior in a large-scale shaking table model test [J], Engineering Geology, 2006, 86:118~133
- 48 N. Srilatha, G. Madhavi Latha, C.G. Puttappa, Effect of frequency on seismic response of reinforced soil slopes in shaking table tests [J], Geotextiles and Geomembranes, 2013, 36:27~32
- 49 H. Murakami, T. Kaneko, H. KIMURA, S.R. Darbar, New criteria to qualify seismic stability of reinforced slopes [C], 13th World Conference on Earthquake Engineering Conference Proceedings, 2004, Vancouver, B.C., Canada
- 50 J.S. Lin, R. Whitman, Earthquake induced displacements of sliding blocks [J], Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 112(1):44~59
- 51 J. T. Christian, C.C. Ladd, G.B. Baecher, Reliability applied to slope stability analysis [J], J. Geotech. Engrg. , 1994, 120:2180~2207
- 52 D. Massih, J. Harb, Application of reliability analysis on seismic slope stability [C], Advances in Computational Tools for Engineering Applications, 2009 ACTEA'09 International Conference on: IEEE, 2009, 52~57
- 53 A.S. Al-Homouda, W.W. Tahtamonib, Reliability analysis of three-dimensional dynamic slope stability and earthquake-induced permanent displacement [J], Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2000, 19:91~114
- 54 C.H. Juang, Yuin-Yao Jhi , Der-Her Lee , Stability analysis of existing slopes considering uncertainty [J], Engineering Geology , 1998, 49: 111~122.Engineering Geology 49 (1998) 111-122
- 55 G. He, B. Yang, N. Wen, Fuzzy probabilistic analysis of seismic stability of coastal embankment [J], China Ocean Engineering, 1996, 10(1):99~105
- 56 周建平、杨泽艳、翁新雄, 中国典型工程边坡, 水利水电工程卷[M], 北京: 中国水利水电出版社, 2008
- 57 陈厚群, 混凝土高坝抗震研究[M], 北京: 高等教育出版社, 2011
- 58 张楚汉、金峰、王进廷、徐艳杰, 混凝土坝非线性特性与地震安全评价[M], 北京: 清

- 华大学出版社, 2012
- 59 陈祖煜, 汪小刚, 杨健, 贾志欣, 王玉杰. 岩质边坡稳定分析—方法.应用.程序[M], 北京:中国水利出版社, 2005
- 60 陈祖煜, 土质边坡稳定分析—原理.方法.程序[M], 北京:中国水利水电出版社, 2003
- 61 SL 386—2007, 水利水电工程边坡设计规范[S], 北京: 中国水利水电出版社, 2007
- 62 DL/T 5353—2006, 水电水利工程边坡设计规范[S], 北京: 中国电力出版社, 2007
- 63 DL 5073—2000, 水工建筑物抗震设计规范[S], 北京: 中国电力出版社, 2001
- 64 万少石, 年廷凯, 蒋景彩, 栾茂田, 边坡稳定强度折减有限元分析中的若干问题讨论[J], 岩土力学, 2010, 7:15~22
- 65 张伯艳, 李德玉, 白鹤滩水电站左岸边坡抗震分析[J], 待发表于工程力学
- 66 王泳嘉、邢纪波, 离散单元法及其在岩土力学中的应用[M], 沈阳: 东北工业学院出版社, 1991
- 67 王吉亮, 李会中, 杨静, 李琳, 乌东德水电站右岸引水洞进口边坡稳定性研究[J], 水利学报, 2012, 11: 1271~1278
- 68 石根华著, 裴觉民译, 数值流形方法与非连续变形分析[M], 北京: 清华大学出版社, 1997
- 69 王书法、李树忱、李术才、朱维申, 节理岩质边坡变形的DDA模拟[J], 岩土力学, 2002, 23(3):352~354
- 70 孙东亚、彭一江、王兴珍, DDA 数值方法在岩质边坡倾倒破坏分析中的应用[J], 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1):39~42
- 71 王如路、陈乃明、刘宝琛, 三维块体不连续变形分析理论简析[J], 岩石力学与工程学报, 1996, 15(3):219~224
- 72 张伯艳, 陈厚群. LDDA动接触力的迭代算法[J], 工程力学, 2007, 24(6):1~6
- 73 张伯艳, 李德玉, 何建涛. 施工期裂缝对拱坝静动力响应的影响[J]. 水力发电学报, 2012, 31(1): 72~76
- 74 李德玉, 张伯艳, 何建涛. 官地重力坝极限抗震能力初探[J]. 水力发电学报, 2011, 30(6): 118~121
- 75 张伯艳, 李德玉, 涂劲. 乌东德拱坝非线性地震反应分析[J]. 水力发电学报, 2009, 28 (5) : 62~67

- 76 周维垣、杨若琼、剡公瑞, 流形元法及其在工程中的应用[J], 岩石力学与工程学报, 1996, 15(3):211~218
- 77 方义琳、卓家寿、章青, 具有任意形状单元离散模型的界面元法[J], 工程力学, 1998, 15(2):27~37
- 78 卓家寿、邵国建、陈振雷, 工程稳定问题中确定滑塌面、滑向与安全度的干扰能量法[J], 水利学报, 1997, 8:80~84
- 79 徐光兴, 姚令侃, 高召宁, 李朝红, 边坡动力特性与动力响应的大型振动台模型试验[J], 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3):624~632
- 80 李振生, 巨能, 攀侯伟, 龙李果, 陡倾层状岩质边坡动力响应大型振动台模型试验研究[J], 工程地质学报, 2012, 20(2):242~248
- 81 杨国香, 叶海林, 伍法权, 祁生文, 董金玉, 反倾层状结构岩质边坡动力响应特性及破坏机制振动台模型试验研究[J], 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11):2214~2221
- 82 邹威, 许强, 刘汉香, 陈龙, 王龙, 强震作用下层状岩质斜坡破坏的大型振动台试验研究[J], 地震工程与工程振动, 2011, 31(4):143~149
- 83 叶海林, 郑颖人, 李安洪, 杜修力, 地震作用下边坡预应力锚索振动台试验研究[J], 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增1):2847~2854
- 84 于玉贞, 邓丽军, 抗滑桩加固边坡地震响应离心模型试验[J], 岩土工程学报, 2007, 29(9):1320~1323
- 85 张伯艳, 陈厚群. 用有限元和刚体极限平衡方法分析坝肩抗震稳定[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 665~670
- 86 张伯艳, 涂劲, 陈厚群, 褚志生. 混凝土拱坝横缝对坝肩抗震稳定的影响[J]. 水利水电技术, 2002, 33(6): 9~13