

岩土破裂过程分析 RFPA 离心加载法

唐春安¹, 唐烈先², 李连崇², 李常文³

(1. 大连理工大学土木水利学院, 辽宁 大连 116024; 2. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 3. 中煤国际集团沈阳设计研究院, 辽宁 沈阳 110015)

摘要: 将离心加载算法引入到岩石破裂过程分析 RFPA 系统中, 形成了 RFPA 离心加载法(RFPA-Centrifuge)。RFPA-Centrifuge 的应力分析采用有限元基本算法, 满足静力平衡、应变相容及岩土体的非线性应力-应变关系; 秉承了 RFPA 系统的破坏分析功能, 并且同样考虑材料细观非均匀的影响, 对边坡等难点问题进行分析时, 不需对滑动面或破坏区域做任何预先假定。通过对垂直土坡离心物理试验、倾斜的土坡、含两组平行节理岩质边坡和不同截面形状隧道的数值试验, 证明该法可以直观、逼真地获得岩土结构的破坏区域或滑移破坏面, 同时求得安全储备系数, 分析结果与物理的试验和有限元强度折减法均比较一致。RFPA-Centrifuge 不仅回避了强度折减法中有关力学参数复杂的折减规则, 还克服了强度折减法难以用物理试验进行相互验证的不足, 因而是一种极具前景的岩土工程稳定性分析方法。

关键词: RFPA; 离心试验; 边坡; 岩土工程

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2007)01-0071-06

作者简介: 唐春安(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石破裂过程失稳及其工程诱发灾害机理的应用基础性研究工作等。E-mail: tca@mail.neu.edu.cn。

Centrifugal loading method of RFPA for the failure process analysis of rock and soil structure

TANG Chun-an¹, TANG Lie-xian², LI Lian-chong², LI Chang-wen³

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 3. Shenyang Design Research Institute, China Coal International Energy Corporation, Shenyang 110015, China)

Abstract: The fundamental principle of centrifugal tests usually applied in geotechnical engineering was introduced into rock failure process analysis (RFPA) system, so RFPA-Centrifuge was proposed. Stress analysis of RFPA-Centrifuge adopted the FEM basic arithmetic, so it was satisfied for the force equilibrium, strain consistency and nonlinear constitutive relation of rock and soil materials. RFPA-Centrifuge took the analytical function of RFPA for failure, also took into account the heterogeneous characteristics of materials at micro- and macro-scopical levels. As the proposed method was used to conduct the stability analysis of slopes of tunnel engineering which was the difficult point of geotechnical engineering, failure surface as well as the safety factor could be achieved directly without any artificial assumption on the failure surface. Based on the numerical simulation of centrifugal tests on vertical soil slopes, declining soil slopes, rock slopes with two group joints and tunnels with different shapes of sections. It was proved that RFPA-Centrifuge might obtain the failure area or slip face intuitively and realistically, and at the same time, the safety factor could be obtained. The results were close to those of physical tests and strength-reduction method with FEM. The present method could not only slide over the complex reduction rules about mechanical parameters in strength-reduction method with FEM, but also tide over the scarcity of evidence to be difficult to validate with physical tests in strength-reduction method with FEM. Therefore it is a valid numerical method for slopes in geotechnical engineering.

Key words: RFPA; centrifugal test; slope; geotechnical engineering

0 引言

在岩土工程稳定性分析方法中, 边坡的稳定分析方法发展最引人注目, 它是经典土力学最早试图解决而至今仍未圆满解决的课题。边坡稳定性分析方法主

要包括两个步骤: ①计算已知滑动面上的安全系数,

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(40638040); 国家自然科学基金资助项目(10672028, 50374020)

收稿日期: 2005-10-31

常用的方法有极限平衡法、极限分析法、有限元法、可靠度法和边坡专家系统方法；②搜索对应最小安全系数的临界滑动面。近年来，有限元数值分析方法在边坡安全系数确定方面的研究有很大的进展。随着计算机技术的快速发展，可以计算的有限元单元数越来越多，很多试验问题或者大型岩土工程问题都可以通过数值模拟得以更加准确详细的分析，应用到实际工程的机会也会越来越多。因此，充分合理地发展和利用有限元数值分析方法，对更好的研究、设计、维护和加固边坡，有非常重要的意义。

通常的有限元边坡有限元分析方法都采用强度折减法作为边坡安全系数的求解方法^[1-7]。这种方法通过降低边坡岩土体的强度，使边坡达到极限状态，从而可以根据强度折减的倍率获得边坡的强度储备，即安全系数。这种分析方法的优点是不需事先假设边坡滑移面，程序根据应力分析的结果，通过强度分析，自动获得边坡破坏的滑移面。该方法的不足之处：难以通过物理试验加以对比研究，而且由于强度准则涉及多种参数，其关系十分复杂，各种参数的折减比例目前还没有获得统一的共识。

在岩土工程问题研究中，采用小比例尺模型来模拟实际工程是常用的方法。然而常规小比例尺模型由于其自重产生的应力远低于原型，因而不能再现原型的特性。解决这问题的唯一途径就是提高模型的自重，使之与原型等效。许多研究表明在正常重力下做小比例尺的模型试验，用离心加速是模拟体积力的最有效的方法^[8]。1869 年 E Phillips 首次提出用离心机作模型试验的设想，到 20 世纪 30 年代实现。1932 年包克罗夫斯基在莫斯科水力设计院土力学试验室内首次用离心机研究土工建筑物的稳定，并发展了土工离心机模型试验，取得了进展。到 70 年代，在不同研究机构中，专门为研究岩土工程设置了 20 余台离心机，并对离心模型试验的相似理论、试验设备的设计技术以及试验方法等做了卓有成效的工作。80 年代以来，土工离心机模型试验有了长足的发展，成为岩土工程学科的研究前沿和焦点。由于其能再现自重应力场以及与自重有关的变形过程，直观揭示变形破坏的机理，并能为其他分析方法提供真实可靠的参数依据，离心模型试验技术的这一优点使其能按照相似率要求，在原型应力状态下研究各类岩土工程、地质工程的稳定、变形与破坏过程，验证设计工程是否安全可靠、经济合理，因而得到越来越广泛的应用，受到了越来越多工程技术人员的重视^[9-10]。土工离心机模型试验促进了土力学基本理论的发展，提高了岩土工程如近海平台，高土石坝、高挡墙、高路堤、码头、核电站等重型结构的设计水平，甚至进行大地构造、重力异常形成地质

上的不稳定，褶皱-断层山带形成的离心模型试验，取得了有意义的成果。

但是，离心机试验也有如下不足：

(1) 在试验中的量测技术方面，在离心模型试验中，为了真实反映工程的实际情况，常要对模型加、卸荷，如边坡、堤坝的填筑、开挖等属这种情况，模型中的应力在离心机运转的情况下可以量测，但断面内的位移无法量测，常常要停机量测，而且常常只能对某一特定断面量测，这同离心机运转时所反映的位移情况不同；另外，目前用于量测的传感器或应变片其体积大，通过高速运转后，其尺寸效应不可忽略；且传感器在土中存在拱效应问题，所测数值与实际值不同，有些传感器在高加速运转中频繁出现故障，导致数据采集中断，传感器在高加速离心环境中的高耐久性及可靠性成为难以解决的重要问题。

(2) 土体、岩体中排水模拟问题在离心模型中也难以体现。

(3) 填料模拟。由于离心模型是采用小比例尺模型，那么所需填料也要按同一比例缩小，有时满足了尺寸效应，即缩制的材料虽然接近了原位材料，但随着缩制率的加大将会改变原位料的性质，小尺寸的原状试样在离心试验中可能不能完全反映整个原位模型的物理力学性质，如原状样中存在结构面、裂隙、夹层等在模型中不能按比例缩小，这样对边坡，特别是对岩质边坡的实验就失去了有效性^[8-10]。

本文试图将离心机试验的基本原理引入到岩石破裂过程分析 RFPA 系统中，期望充分发挥 RFPA 方法在分析岩土介质破裂过程方面的优势，用于岩土工程破坏机理和破坏过程分析，研究岩土工程的安全储备、稳定性发展趋势，达到自动获得破裂面同时求出相应安全系数的目的，既克服离心机试验的一些不足，又回避有限元强度折减法中存在的问题，更方便、准确、全面地对岩土工程进行分析，旨在为岩土工程的稳定分析提供一种新的便捷、有效方法。

1 RFPA-Centrifuge 基本原理

离心机试验是通过离心机高速旋转使土工模型体积力增加，形成人工重力，进而反映工程原型的力学特性，观察破坏模式、了解安全储备。设模型的几何尺寸是原型的 $1/n$ 倍，原型的重度为 $\gamma_p = \rho g$ ， ρ 为土体质量， g 为重力加速度，模型的重度为 $\gamma_m = \rho a$ ， a 为总加速度向量。按照模型与原型的应力相一致的条件，即 $\sigma_p = \sigma_m$ ，得到 $\rho g h_p = \rho a h_m$ ，于是：

$$\alpha = \left(\frac{h_p}{h_m} \right) g = ng \quad (1)$$

RFPA 是唐春安教授等研究开发的能够模拟岩石破坏过程的数值分析工具。该系统基于对岩石细观层次结构的认识, 假定岩石的细观力学性质具有统计性, 首先把岩石离散成适当尺度的细观基元, 对于这些组成材料的细观基元, 考虑其非均匀性特性, 按照给定的 Weibull 统计分布函数, 对这些单元的力学性质进行赋值, 这样就生成了非均匀岩石的数值试样。这些细观基元可以借助有限元法作为应力分析工具来计算其受载条件下的位移和应力。在此基础上, 通过基元破坏分析, 考察基元是否破坏, 从而获得基元材料性质的新状态^[11-14]。本文将离心加载的基本思想引入 RFPA 模型, 建立了 RFPA-Centrifuge, 从而使 RFPA 系统可以通过离心加载法来研究岩土工程问题, 特别是其破裂过程和安全储备系数。RFPA-Centrifuge 将细观基元的自重以线性关系、按一定步长逐渐增加, 每增加一次, 有限元计算程序将进行迭代计算, 寻找外力与内力的平衡, 同时进行破坏分析, 直至边坡宏观失稳破坏, 求得数值模型的滑动破坏面, 以获得最大破坏单元数的计算步作为边坡失稳的临界点, 计算相应的安全系数^[15]。

RFPA-Centrifuge 中以最大的基元破坏数作为数值模型失稳的判据^[14]。RFPA-Centrifuge 在进行计算分析时, 自动记录了每一加载步的基元破坏个数, 用这种方法来判断边坡失稳, 简单、有效。

安全系数也称稳定系数, 是边坡等岩土工程问题研究中的一个重要概念。传统边坡稳定性分析的极限平衡法采用莫尔-库仑屈服准则, 安全系数定义为滑动面的抗滑力与下滑力之比:

$$\omega = \frac{s}{\tau} = \frac{\int_0^l (c + \sigma \tan \varphi) dl}{\int_0^l \tau dl}, \quad (2)$$

式中, ω 为安全系数, s 为滑动面上抗剪强度, τ 为滑动面上实际剪力。

RFPA-Centrifuge 中, 让模型单元自重逐步增加, 基元的不断破坏逐渐形成破裂面, 当破裂面贯通时基元破坏数最大, 此时认为模型失稳, 安全系数 K 定义为模型失稳时单元自重与初始单元自重的比值:

$$K = \frac{\gamma + \gamma(S_{\text{tep}} - 1)\Delta_g}{\gamma} = 1 + (S_{\text{tep}} - 1)\Delta_g, \quad (3)$$

式中, K 为安全系数, S_{tep} 为基元破坏数最大时的加载步数, Δ_g 为离心加载系数, γ 为密度。

2 模拟例证

本文利用 RFPA-Centrifuge, 对垂直边坡离心物理试验、不同角度的倾斜土质边坡、含两组平行节理岩质边坡以及不同截面隧道围岩破裂演化过程及其滑动

面形成过程进行数值模拟分析, 证明该法的正确性。

2.1 垂直土坡离心试验

垂直边坡模型为素土, 密度 1.55 g/cm^3 , 黏聚力 51 kPa , 内摩擦角 27.1° 。制作完成后实测模型尺寸为长 30.3 cm , 高 35 cm , 厚 20 cm 。

数值模拟中重点研究其破坏模式, 即破裂面的形状, 所以为了克服有限元中边界效应的影响, 设置模型时其长度比物理试验稍大, 高度一致。破坏过程如图 1 所示, 物理试验结果如图 2 所示 (仅截取模型破坏面部分)^[16]。通过图 1、2 的结果我们可以发现, 数值模拟与物理试验破坏破坏面较为相似。数值试验中每步的加载系数 Δ_g 为 1, 即每步自重增加 1 倍。

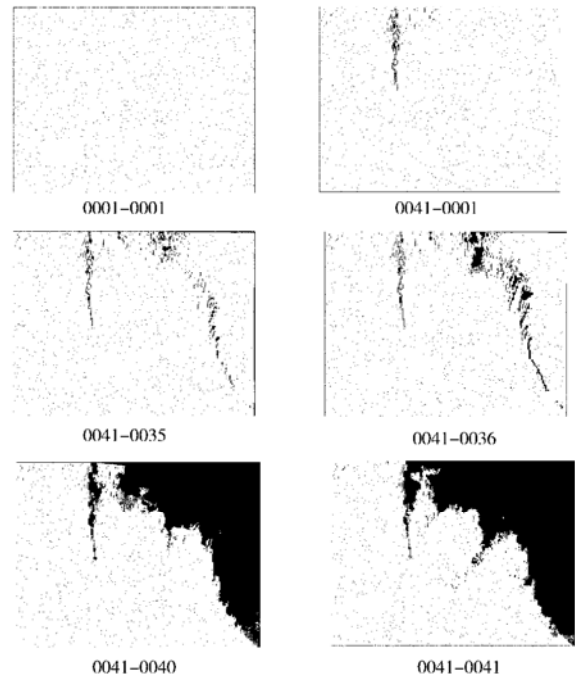


图 1 数值模拟结果

Fig. 1 Results of numerical tests



图 2 物理试验结果示意图 (正视图)

Fig. 2 Results of physical tests

从图 1 可知模型破坏单元数最多时完全破坏, 加载步数 S_{tep} 为 41, 每步的加载系数 Δ_g 为 1, 则实际加载总量为: $(S_{\text{tep}} - 1) \times \Delta_g = (41 - 1) \times 1 = 40$, 也就是在增加到自重的 40 倍时, 模型破坏。文献[16]中物理试验时加载到 $43g$ 完全破坏, 数值计算结果跟试验结果比较接近。可见, RFPA-Centrifuge 对垂直土坡离心

物理试验的模拟,破坏面和加载量都比较接近。

2.2 斜土坡

假设介质密度 2 g/cm^3 , 黏聚力 50 kPa , 内摩擦角 30° , 泊松比 0.35 , 坡高 30 m , 离心加载系数 0.001 , 模型尺寸 $40 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 。图 3 是 60° 边坡滑移过程数值试验结果, 可以看到, 60° 边坡是一个渐进破坏过程。随着加载系数的增加, 滑动面的位置逐渐形成, 但并未立即发生整体边坡破坏, 而是从坡顶出现部分破裂, 进而坡脚和滑动面中部开始出现破坏, 最后滑动面贯通, 直至出现整体边坡破坏。数值试验结果表明, 边坡在破坏演化过程中, 首先形成前兆滑移面, 然后再从滑移面的顶部开始出现滑移面的起裂破坏, 并逐渐沿着滑移面发展直至整个边坡滑移破坏完成。按照式 (3) 求得相应安全系数为 1.05 。

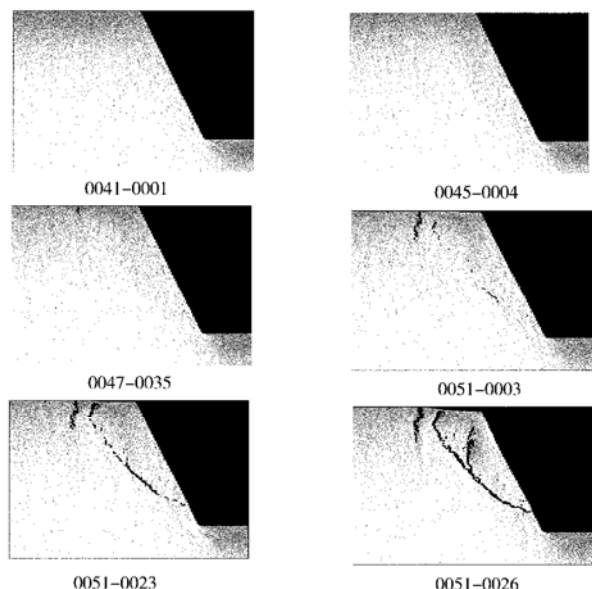


图 3 60° 边坡破坏过程

Fig. 3 Failure process of a 60° -slope

以上数值试验破坏过程与王庚荪在文献[17]中所分析的边坡渐进破坏过程和谭文辉等在文献[18]中描述的边坡物理模拟破坏过程完全一致。文献[17]中指出, 岩土材料的失稳破坏并不是瞬间完成的, 而是一个从局部破坏逐渐扩展直至最后贯通形成滑移的渐进发展诱致突变的过程。文献[18]物理实验结果: 边坡的破坏过程先在坡顶出现裂缝, 然后坡脚破坏, 坡顶和坡脚破坏向坡体中间扩展, 最后形成连通的滑面。

2.3 岩质边坡

岩质边坡, 其稳定性主要取决于岩体内部所含节理、裂隙等软弱结构面。因为岩体本身结构的复杂性, 其软弱结构面分布十分复杂, 但大多都具有一定的规律性。他们往往是成组分布, 多组交叉等等。由于结构面是控制岩体变形、破坏的主要因素, 因此, 在岩

质边坡分析中, 重点考虑结构面的影响是十分重要的。由于岩体结构的复杂性, 含单一软弱结构面的比较少, 考虑单一软弱结构面的意义不大, 因此本文主要进行含两组软弱结构面的边坡的破坏情况。使用文献[18]中所使用的计算模型及相关参数, 一岩质边坡, 含两组方向不同的平行节理, 贯通率为 100% , 第 1 组软弱结构面倾角 75° , 平均间距 10 m , 第 2 组软弱结构面倾角 30° , 平均间距 10 m 。

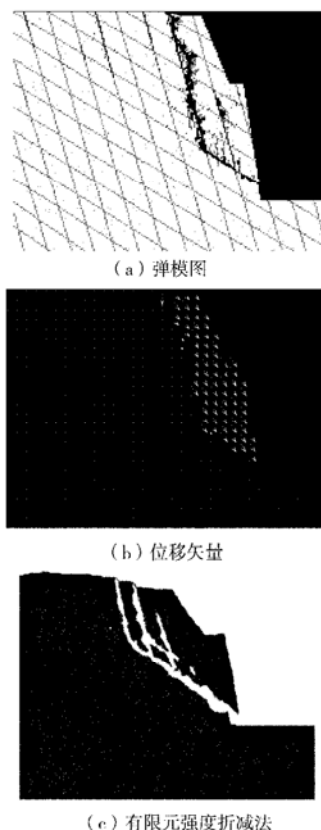


图 4 含两组节理岩质边坡破坏图

Fig. 4 Failure modes of rock slope with two groups of joints

破坏结果如图 4 所示, 计算求得的安全系数为 1.76 。目前, 对复杂节理岩质边坡的稳定性分析尚没有好的办法, 传统的极限平衡方法无法得到节理岩质边坡的滑动面及其稳定安全系数, 而各种数值分析方法只能算出应力、位移、塑性区等, 无法判断边坡的稳定安全系数以及相应的滑移面^[19]。本文采用 RFPA-Centrifuge 可以由程序自动求得滑动面以及相应的稳定安全系数, 破坏模式与文献[19]采用 ANSYS 有限元强度折减法所得结果相近。

2.4 隧道围岩

为了验证 RFPA-Centrifuge 不仅适用于边坡稳定性分析, 还适用于其它岩土工程问题, 下面对岩土工程常见的隧道围岩破坏进行数值试验, 对 3 种不同隧道截面的情况进行试验, 模型尺寸为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$, 主

要参数为: 弹性模量 5000 MPa, 抗压强度 20 MPa, 泊松比 0.25, 重度 $2.5 \times 10^{-5} \text{ N/mm}^3$, 拉压比 10, 均质度 5, 离心加载系数 0.2。为便于比较, 取圆形隧道截面孔径 6 m, 方形隧道截面边长 6 m, 拱形隧道截面宽 6 m, 高 6 m, 破坏结果如图 5 所示。

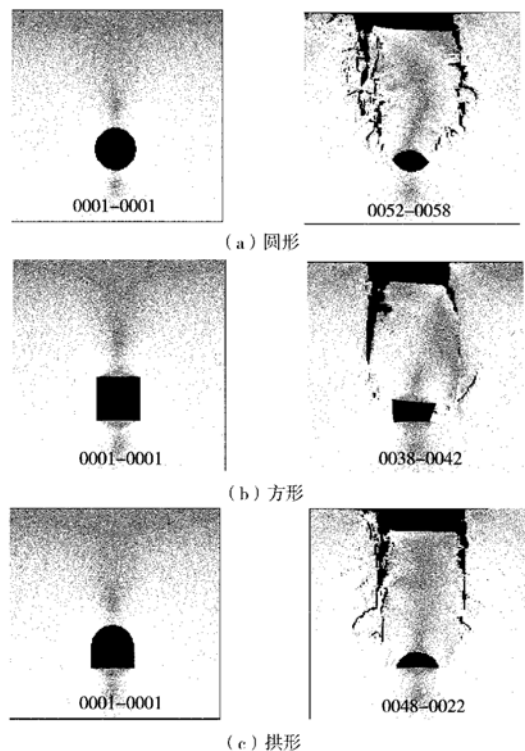


图 5 隧道破坏结果

Fig. 5 Failure of tunnels

从图 5 我们可以看到截面分别为圆形、方形、拱形的隧道的初始模型和其破坏后的结果, 裂纹一般首先在隧道附近产生, 但不出现破坏, 当内部裂纹扩展至地表时均出现塌陷。在相同的边界条件和加载条件下, 3 种截面的隧道中, 方形隧道最先贯通, 出现在第 38 步, 拱形隧道居中, 出现在 48 步, 而圆形隧道最后贯通, 出现在第 52 步, 对应安全储备系数分别为 7.4、9.4、10.2, 在该数值试验条件下圆形隧道围岩最不容易破坏, 而方形隧道围岩最易破坏。

3 结 语

本文提出了基于离心试验原理的离心加载数值试验方法 RFPA-Centrifuge, 并通过边坡离心试验、倾斜边坡、含节理岩质边坡以及不同截面隧道围岩的破坏过程对其可行性进行验证, 主要结论如下。

(1) RFPA-Centrifuge 基于有限元作为应力分析工具, 全面满足静力许可、应变相容以及岩土体的非线性应力 - 应变关系, 并秉承了 RFPA 系统在岩石破裂过程分析中的特色。该系统对边坡等岩土工程问题进

行稳定性分析时, 无需假定潜在滑动面的具体位置和形状, 系统可自动求得滑动面, 而且能够跟踪破裂面起裂、裂纹发展和滑动面形成的演化过程。

(2) RFPA-Centrifuge 能够对复杂地质、地貌的岩、土质边坡进行稳定性分析, 不受边坡几何形状和结构的限制, 并可充分考虑材料的细观、宏观非均匀特性。

(3) RFPA-Centrifuge 对垂直土坡离心物理试验的数值模拟和 60° 倾角边坡的渐进破坏过程的数值试验结果与文献[17]中所描述的物理实验结果具有较好的一致性, 表明了 RFPA-Centrifuge 研究土坡的正确性。

(4) 对含两组平行节理的岩质边坡, RFPA-Centrifuge 得到了节理边坡的潜在滑动破坏面, 其滑移破坏模式与 ANSYS 有限元强度折减法的计算结果基本一致, 再次证明软弱结构面是控制岩质边坡破坏模式主要因素的同时也证明 RFPA-Centrifuge 在研究岩质边坡方面的可行性。

(5) 不同截面隧道围岩破坏的数值试验, 表明 RFPA-Centrifuge 不仅适合于边坡问题的研究, 也适合于隧道等岩土工程问题的研究, 而且在该试验条件下得出方形截面最易破坏, 拱形其次, 圆形最牢固的结论。

本文的计算分析结果表明, 基于离心试验原理的离心加载方法的基本模型是可靠的, 所形成的 RFPA-Centrifuge 力学效果与有限元强度折减法等效, 还可以避免有限元强度折减法计算过程中所要求的折减力学参数之间的约束关系, 而且数值试验结果还可以通过离心试验相互验证, 为边坡等岩土工程问题研究提供了新的研究思路 and 一种便捷、有效的手段。

致谢: 河海大学刘汉龙教授课题组为本研究提供了离心实验部分的参考资料, 深表谢意。

参考文献:

- [1] 郑颖人, 赵尚毅, 等. 用有限元强度折减法进行边坡稳定性分析[J]. 中国工程科学, 2002, 4(10): 57 - 63. (ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, et al. Slope stability analysis by strength reduction FEM[J]. Engineering Science, 2002, 4(10): 57 - 63. (in Chinese))
- [2] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡和岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381 - 3388. (ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Application of strength reduction FEM in soil and rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3381 -

- 3388.(in Chinese))
- [3] 郑颖人, 赵尚毅. 边坡稳定分析的一些进展. 地下空间[J]. 2001, **21**(4): 262 - 271.(ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Progress in analysis of slope stability[J]. Underground Space, 2001, **21**(4): 262 - 271.(in Chinese))
- [4] 栾茂田, 武亚军, 年廷凯. 强度折减有限元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, **23**(3): 1 - 8.(LUAN Mao-tian, WU Ya-jun, NIAN Ting-kai. Plastic criterion of slope and application in strength reduction FEM[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, **23**(3): 1 - 8.(in Chinese))
- [5] DAWSON E M, ROTH W H, DRESCHER A. Slope stability analysis by strength reduction [J]. Geotechnique, 1999, **49** (6): 835 - 840.
- [6] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements [J]. Geotechnique, 1999, **49**(3): 387 - 403.
- [7] 郑宏, 李春光, 李焯芬. 求解安全系数的有限元法[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(5): 626 - 628.(ZHENG Hong, LI Chun-guang, LEE C F, GE Xiu-run. Finite element method for solving the factor of safety[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(5): 626 - 628.(in Chinese))
- [8] 雷胜友. 离心模型试验技术及其在中国的应用[J]. 西安公路交通大学学报, 1998, **18**(4): 222 - 225.(LEI Sheng-you. Centrifugal modelling and its application in China[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1998, **18**(4): 222 - 225.(in Chinese))
- [9] 黄志全, 王思敬. 离心模型试验技术在我国的应用概况[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, **17**(2): 199 - 204.(HUANG Zhi-quan, WANG Si-jing. A survey of application of centrifugal model testing in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, **17**(2): 199 - 204.(in Chinese))
- [10] 油新华, 李晓. 国外离心模型试验技术在边坡工程中的应用现状与展望[J]. 2000, **8**(4): 442 - 445.(YOU Xin-hua, LI Xiao. Current status and prospect of application of centrifugal model test to slope engineering [J]. Journal of Engineering Geology, 2000, **8**(4): 442 - 445.(in Chinese))
- [11] TANG C A. Numerical simulation on progressive failure leading to collapse and associated seismicity[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1997, **34**(2): 249 - 261.
- [12] 朱万成. 混凝土断裂过程的细观数值模型及其应用[D]. 哈尔滨: 东北大学, 2001.(ZHU Wan-cheng. Mesoscopic mechanical model and numerical simulation of fracture process of concrete[D]. Shen yang: Northeastern University, 2001.(in Chinese))
- [13] 朱万成, 唐春安, 杨天鸿, 等. 岩石破裂过程分析(RFPA2D)系统的细观单元本构关系及验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(1): 24 - 29.(ZHU Wan-cheng, TANG Chun-an, YANG Tian-hong, LIANG Zheng-zhao. Constitutive relationship of mesoscopic elements used in RFPA2D and its validations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(1): 24 - 29.(in Chinese))
- [14] 唐春安, 朱万成, 李连崇, 等. 材料破坏过程中应力分布的数值光弹图[J]. 力学与实践, 2002, **24**(5): 47 - 50.(TANG Chun-an, ZHU Wan-cheng, LI Lian-chong, LIU Hong-yuan, et al. Numerical photo elastic fringe of stress distribution during failure process of material[J]. Mechanics and Engineering, 2002, **24**(5): 47 - 50.(in Chinese))
- [15] TANG C A, LI Lian-chong. RFPA centrifugal model-theory and application[J]. Failure Mechanics Letters, 2005, **3**: 41 - 42.
- [16] 介玉新, 李广信, 陈轮. 纤维加筋土和素土边坡的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 1998, **7**(4): 12 - 15.(JIE Yu-xin, LI Guang-xin, CHEN Lun. Study of centrifugal model tests on tectosol and cohesive soil slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **7**(4): 12 - 15.(in Chinese))
- [17] 王庚荪. 边坡的渐进破坏与稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(1): 29 - 33.(WANG Geng-sun. The progressive failure of slope and stability analyses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(1): 29 - 33.(in Chinese))
- [18] 谭文辉, 王家臣, 周汝弟. 岩体边坡渐进破坏的物理模拟和数值模拟研究[J]. 有色冶金, 2000, **16**(3): 5 - 7.(TAN Wen-hui, WANG Jia-chen, ZHOU Ru-di. Research of physical analysis and numerical simulation on rock slope progressive failure[J]. Non-ferrous Mining and Metallurgy, 2000, **16**(3): 5 - 7.(in Chinese))
- [19] 赵尚毅, 郑颖人, 邓卫东. 用有限元强度折减法进行节理岩质边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(2): 254 - 26.(ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, DENG Wei-dong. Stability analysis on jointed rock slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(2): 254 - 26.(in Chinese))