

关于“涉水边坡稳定性分析及区域滑坡敏感性测评的整体方法”项目申报 2019 年国家自然科学奖的公示

项目名称：涉水边坡稳定性分析及区域滑坡敏感性测评的整体方法

提名单位：中国岩石力学与工程学会

提名意见：

针对降雨和库水位变动引起的边坡（高坝）稳定性分析、区域内的滑坡敏感性测评展开研究，主要创新点如下：

1. 建立了边坡地下水渗流的 Signorni 型变分不等式模型。该模型消除了出渗点的奇异性，非线性弱于其他变分不等式，其适用性已被澳大利亚等国的数学家所论证，并已在水利、堤防和港口建设中取得应用。

2. 发现并证明了适用于岩土类材料的 Phi-Nu 不等式，已在边坡稳定性分析中取得了广泛应用，并被一些大型商用软件（如 Abaqus）所采纳。

3. 提出了边坡稳定性分析的整体方法，实现了三维稳定性分析的严格极限平衡法，解决了解的不收敛问题。基于 Logistic 回归分析，揭示了年概率暴雨条件下滑坡发生概率的空间分布特征，据此可对区域内的滑坡敏感性做出测评。

研究始于 1996 年香港政府 RGC 项目：自然边坡失稳与泥石流机制；2002 年研究领域扩展至三峡库区边坡和高坝稳定性分析，并陆续获得了包括国家杰出青年基金在内的多个自然科学基金和部门基金的资助。

八篇代表性论文 SCI 严格他引 984 次，其中一篇获 2015 年 Elsevier 最佳论文奖；相关论文 81 篇，SCI 严格他引 2830 次，其中一篇中文期刊论文 CNKI 严格他引 744 次。

部分成果于 2008 年获中国岩石力学与工程学会首个自然科学一等奖。

提名该项目为国家自然科学奖二等奖。

项目简介：

采用确定性分析和概率统计方法，针对与降雨/库水位变动有关的边坡（高坝）稳定性分析和区域内滑坡敏感性测评展开研究。主要科学发现如下：

1. 建立了边坡地下水渗流的 Signorni 型变分不等式模型，该模型消除了自由面出渗点的奇异性，非线性弱于其他变分不等式；基于该不等式的有限元法可在固定网格上求解无压渗流场，其适定性和良好的数值特性已被 Monash 大学数学家 Alnashri 和 Droniou 发表在数值分析顶尖刊物上的论文详细论证。

2. 发现并证明了适用于岩土类材料的 ϕ - v 不等式： $\sin\phi \geq 1 - 2v$ 。不等式有以下双重意义：首先，可使基于强度折减法的边坡稳定性分析结果更加合理、计算效率成倍提高；其次，可作为常规岩土力学试验结果的一个检验准则：若峰值摩擦角 ϕ 和峰前泊松比 v 不满足该不等式，就意味着试验结果不合理。

3. 提出了边坡稳定性分析的整体方法，实现了经典条分法框架内无法实施的三维严格极限平衡法；同时，通过将安全系数的求解归结为一个代数特征值问题，彻底解决了极限平衡法中解的不收敛问题。确定临界滑面的 EPS（等效塑性应变）法被随后提出的、具有严格数学力学基础的 Cauchy 法所论证。基于 Logistic 回归分析，揭示了年概率暴雨条件下滑坡发生概率的空间分布特征，据此可对区域内的滑坡敏感性做出测评。

研究始于 1996 年香港政府 RGC 项目：自然边坡失稳与泥石流机制；2002 年研究领域扩展至三峡库区边坡和高坝稳定性分析，并陆续获得了包括国家杰出青年基金在内的多个自然科学基金和部门基金的资助。

八篇代表性论文的 SCI 严格他引 984 次，其中一篇获 2015 年 Elsevier 颁发的“Outstanding Paper Award”；相关论文 81 篇，SCI 严格他引 2830 次，其中一篇中文期刊论文 CNKI 严格他引 744 次。发明专利 5 项（含一项美国发明专利）。

许多著名科学家对项目成果进行了引用和积极评价，如美国科学院院士 Turcotte 在国际顶级期刊 PNAS（美国科学院院报）上评价：滑坡频率-体积模型很合理地呈现出幂次定律分布特征；加拿大皇家科学院院士 Clague 指出：基于 GIS 和多元统计分析的滑坡预测模型可以对滑坡的主控因子进行深层次的解析；中国科学院院士陈祖煜及其团队对稳定性分析方面的成果进行了积极推广。

ϕ - v 不等式已被写入公路行业边坡技术规范（征求意见稿），并被一些大型

商用软件（如 ABAQUS）所采纳。边坡稳定性分析理论和方法在包括三峡工程在内的多个大型水电工程和地质灾害防治工程中得以成功应用，部分成果已被其他专家写入土木工程研究生教材。

基于 Signorni 型变分不等式所开发的渗流分析软件已被设计部门应用于堤防、港口和边坡工程，其研究和应用领域已被国际国内同行推广至非稳态、非饱和渗流分析等方面。

部分成果于 2011 年获国际计算岩土力学学会（IACMAG）“Excellent Contributions Award”，2008 年获中国岩石力学与工程学会首个自然科学一等奖。

客观评价：

1. 国际国内的一些工程数值分析专家对论文 1 建议的 Signorini 型变分不等式进行了改进和推广。例如，周创兵教授（杰青）对这一成果的评价是：Signorini 型变分不等式提法从理论上消除了出渗点的奇性，有效地克服了网格依赖性和数值不稳定（Int J Numer Methods Geomech 35, 2011: 1034-58）。

同时，Signorini 型变分不等式也引起了数学家的关注。例如，Monash 大学数学系的 Alnashri 和 Droniou 在数值分析的顶尖刊物 Siam J Numer Anal 上专门发文论证了惩罚形式的 Signorini 型变分不等式的适定性（56, 2018: 2375-2405）。而且证明该方法即使对于扭曲网格仍然能取得非常好的结果。瑞典和德国数学家 Berninger, Kornhuber 和 Sander 还将 Signorini 变分不等式提法推广至非稳态非饱和渗流分析（Siam J Num Anal 49, 2011: 2576-97）。

2. 帝国理工学院的 SK Sarma 教授是享誉世界的边坡工程专家，以他的名字命名的 Sarma 法是最重要的条分法之一。继 1973 年发明 Sarma 法之后，Sarma 和同事于 2006 年又发表了“增强型极限平衡法”。随后，他们采用了有限元法来验证这一方法，并于 2008 年在 Geotechnique 这一岩土力学顶尖刊物上发表了验证结果（Geotechnique 58, 2008: 481-487）。项目建议的迭代有限元强度折减法（论文 2）被认为是计算安全系数的代表性方法。

3. 论文 2 提出的 ϕ - v 不等式已在边坡稳定性分析中被广为采用，其目的是为了 提高计算效率并获得理想的、边坡在极限平衡态下的塑性区分布。很多学者都将 ϕ - v 不等式编入了自编程序，例如：新兰威尔斯大学 HA Taiebat 教授在 Computers and Geotechnics 49 (2013) : 279-288 中写道：“郑等建议在进行强度折减边坡稳定性分析时调整泊松比，本项研究中我们所采用的有限元程序也实现了郑的方法”。著名软件商 Abaqus 在了解这一情况后，将 ϕ - v 不等式制作成了独立插件 SlopeSR（附件 9）。

4. ϕ - v 不等式不仅在边坡稳定性分析中被广为采用，而且也作为一个检验新材料准则是否合理的法则。例如以色列科技大学的 GB Muravskii 教授在 ZAMM-Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik 92(2012): 565-572 中写道：“确定系数 K 很简单...。然而，这一简化可能为导致伪失效。郑建议适当调整泊松比来避免这种伪失效”。

中国科学院院士陈祖煜教授不仅发文论证遵守 ϕ - v 不等式的必要性，对其做了更精细的推广，还在其主编的文集“Landslides and Engineering Slopes. 2008 Taylor & Francis, London”中收入了4篇 ϕ - v 不等式的应用论文。

5. 重庆大学周小平教授（长江、杰青）对于三维严格极限平衡法（论文3）所取得的成就给予了很贴切也很高的评价，他们在 Eng Geol 195 (2015): 292-300 时写道：“本文基于郑 2007 年提出的无条分法对三维滑坡就行了严格极限平衡分析。郑于 2009 年通过将三维极限平衡法归结为一个代数特征值问题而彻底解决了解的不收敛问题；2012 年郑又提出了将 2D 严格极限平衡法拓广至 3D 的普适方法”。

6. 确定临界滑面的 EPS 方法（论文 4）除了在边坡稳定性的安全系数法中被普遍接受之外，在可靠度分析中也开始得到应用。例如突尼斯国家工程学院的 K Farah 等教授就把 EPS 方法全盘应用于可靠度分析方法，他们在 Procedia Engineering 10 (2011) 1402-1407 中写道：“它是在边坡稳定性评价中满足所有平衡条件的可用工具，郑已经实现了这一工具”，随后 Farah 等把 EPS 方法又复述了一遍。

论文 4 于 2015 年荣获 Elsevier 颁发的“Outstanding Paper Award”(附件 11)，该奖是根据过去 5 年的论文表现，由 Computers and Geotechnics 主编们推荐的。

2011 年，时任国际岩石力学学会主席的冯夏庭教授在第十二届国际岩石力学大会上做了题为“New rock mechanics developments in China”的大会报告，将三维严格极限平衡法以及确定临界滑面的 Cauchy 方法作为中国在新世纪岩石力学发展成就的代表性成果（附件 12）。

7. 国际许多著名滑坡研究专家对滑坡敏感性测评方面所取得的成果给予引用和积极评价，如：

英属哥伦比亚大学（UBC）教授 O Hungr 在总结滑坡发育的地质特征时把项目的研究成果作为代表性成果进行报道。美国佐治亚理工学院（GIT）副校长 RL Bras 教授将项目所采用的 Logistic 回归方法视为滑坡敏感性分析的典型方法。

日本九州大学 Paudel 教授在研究滑坡发生频率和高程之间的关系将论文 5 的研究结果作为参照与验证，得出了相似的结论（Geomorphology 88, 2007: 21-33）。

美国科学院院士、康奈尔大学教授 Turcotte 在国际顶级期刊 PNAS 上在详细引述了论文 6 的研究成果后总结到：“论文 6 得出的滑坡频率-体积之间很好并且很合理的呈现出幂律分布特征” (PNAS 99, 2002: 2530-2537)。

加拿大皇家科学院院士 Clague 教授引用论文 7 来阐述基于地理信息系统和多元统计分析的滑坡预测模型，并指出该成果可以扩展对控制冰碛坝失稳的主控因子进行深入剖析(Global and Planetary Change 56, 2007: 153–171)。

香港理工大学 Chau 教授把文 8 的成果与相关研究进行对比，取得了一致的结论，认为滑坡体高程是控制香港地区边坡稳定性的主要因素(Landslides 2, 2005: 280–290)。

8. 第一完成人于 2011 年获国际计算岩土力学协会颁发的“Excellent Contributions Award” (附件 13)，证书上写道：“鉴于你在岩土力学和工程中边坡稳定性、渗流分析、及其数值分析方面的杰出贡献，特发此奖”。

中国岩石力学与工程学会于 2008 年开始设立“自然奖”、“发明奖”和“科技进步奖”，每两年评奖一次。该学会将首个自然科学一等奖授予第一完成人负责的项目：“边坡稳定性分析及其相关问题的研究” (附件 14)。

代表性论文专著：

1. Zheng H, Liu DF, Lee CF, Tham LG. A new formulation of Signorini's type for seepage problems with free surfaces. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 64(2005): 1871-1888.
2. Zheng H, Liu DF, Li CG. Slope stability analysis based on elasto- plastic finite element method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 64(2005): 1871-1888.
3. Zheng H. A three - dimensional rigorous method for stability analysis of landslides. *Engineering Geology* 145(2012): 30-40.
4. Zheng H, Sun GH, Liu DF. A practical procedure for searching critical slip surfaces of slopes based on the strength reduction technique. *Computers and Geotechnics* 36(2009): 1-5.
5. Dai FC, Lee CF. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology* 42 (2002): 213-228.
6. Dai FC, Lee CF. Frequency - volume relation and prediction of rainfall- induced landslides. *Engineering Geology* 59(2001): 253-266.
7. Dai FC, Lee CF. A spatiotemporal probabilistic modelling of storm- induced shallow landsliding using aerial photographs and logistic regression. *Earth Surface Processes and Landforms* 28(2003): 527-545.
8. Dai FC, Lee CF. Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environmental Geology* 40(2001): 381-391.

主要完成人情况：

排名	姓名	职称	工作单位	完成单位
1	郑宏	教授	北京工业大学	中国科学院 武汉岩土力学研究所
2	戴福初	教授	北京工业大学	中国科学院 地理科学与资源研究所
3	孙冠华	研究员	中国科学院 武汉岩土力学研究所	中国科学院 武汉岩土力学研究所
4	李春光	副研究员	中国科学院 武汉岩土力学研究所	中国科学院 武汉岩土力学研究所
5	刘德富	教授	湖北工业大学	三峡大学

完成人合作关系说明：

研究始于 1996 年由香港政府设立的 RGC 项目：Landslide hazard mitigation – mechanisms of natural slope failures and debris flows，研究起止年月：1996.9–1999.9；项目的 PI 是李焯芬院士；期间，项目第一和第二完成人郑宏和戴福初是香港大学的 Research Associate，李焯芬是这二人的博士导师之一。

郑和戴的最近合作的一篇论文发表在 Landslides 13(2016)。

第三和第四完成人孙冠华和李春光皆为郑宏的学生及助手，分别于 2006 年和 2000 年加入郑宏团队。

第一和第五完成人于 2002 年至 2010 年在一个团队从事三峡库区地质灾害机理研究，合作发表了多篇论文。

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者	合作时间	合作成果	证明材料	备注
1	论文合著	第一、二	1996-今	论文	Landslides 13(2016):1167-79	曾在同一团队
2	论文合著	第一、三	2006-今	论文	代表论文 4	师生
3	论文合著	第一、四	2000-今	论文	代表论文 2	师生
4	论文合著	第一、五	2002-2010	论文	代表论文 1、4	
5	论文合著	第二、三	2013-今	论文	Landslides 13(2016):1167-79	
6	论文合著	第三、五	2008-2010	论文	代表论文 4	