基于塑性力学上下限定理的高边坡稳定极限分析方法体系

➢ 简要信息

【获奖等级】 理论成果奖特等奖

【任务来源】 国家科技计划项目、其他项目

【课题起止时间】 1998 年 1 月～2020 年 11 月

【完成单位】 中国水利水电科学研究院

【主要完成人】 汪小刚、王玉杰、林兴超、孙　平、凌永玉、赵宇飞、段庆伟、刘立鹏、张　强、姜　龙

➢ 背景

边坡稳定分析方法是岩土力学的经典研究问题之一，也是工程界和学术界高度关注的热点。基于极限平衡的传统边坡稳定分析方法，由于未知量数目大于可用方程数量，在力学上属于静不定问题，无法直接获得解答。在二维分析领域，通常通过引入假定的方法使得问题静定可解，两百多年来，国内外学者通过引入不同的假定，提出的边坡稳定分析方法有数十种之多，如瑞典圆滑法、毕肖普法、简布法、摩根斯坦-普瑞斯法和萨玛法等。这些假定的引入不仅破坏了边坡稳定分析方法的理论严密性，而且在实际工程中这些假定的适用性问题也受到了挑战。如果选用方法不合适，会导致错误的计算结果，给工程带来严重问题。当将二维方法拓展到三维领域时，这些问题就更为突出，已很难像二维问题一样通过引入合理的假定使问题静定可解，由于未知量和

需引入的假定急剧增加，很多时候已经失去了实际应用的意义。因此，到目前为止尚无成熟的三维稳定分析方法。

自上世纪八十年代以来，依托系列国家和省部级科研项目，结合水利水电建设中重大边坡工程实践，项目组逐渐建立了基于塑性力学极限分析理论的边坡稳定极限分析方法体系。其核心思想是放弃通过等式方程和引入假定来直接求解边坡安全系数的传统思路，依据塑性力学上下限定理，在不引入任何假定的前提下，将求解边坡安全系数的问题转化为求解边坡稳定安全系数最大、最小值的优化数学问题，通过上下限值逐渐逼近安全系数的真实解，形成了完整的边坡稳定极限分析方法体系。在此基础上，开发了具有自主知识产权的边坡稳定极限分析软件体系，相关软件已被规范推荐使用，在边坡稳定性分析领域得到广泛应用。依托研究成果已出版专著 1 部，发表论文 34 篇（其中 SCI/EI24 篇），获得发明专利 5 项（其中国际发明专利 1 项）、软件著作权 4 项。

➢ **主要内容**

- 边坡极限状态机构一般性构建方法研究。
- 边坡稳定安全系数上限解优化数学模型研究。
- 边坡稳定安全系数下限解优化数学模型研究。
- 边坡稳定性分析优化模型的高效求解方法研究。
- 边坡稳定分析上下限方法体系及应用研究。

➢ **创新点**

- **构建了二三维边坡稳定安全系数上下限解的统一优化数学模型。**提出了边坡极限状态破坏机构的一般性构造方

法。基于塑性力学极限分析理论，在不引入任何假定的前提下，建立了二三维边坡稳定安全系数上下限解的统一优化数学模型。使边坡稳定分析方法具备了更为严密的理论基础，突破了从二维向三维边坡稳分析领域拓展的瓶颈。

- **提出了复杂大自由度边坡稳定性分析优化模型的高效求解方法。**首次提出了优化模型中高度非线性约束方程的降维数学表达方式，同时引入了复杂优化模型的逻辑判断迭代求解方法，解决了大自由度优化模型求解的收敛难题，大大提高了优化效率和精度，使得该方法应用于三维边坡稳定分析领域成为可能。
- **建立了更为完善的边坡稳定极限分析方法体系和实用软件系统。**首次建立了通过上下限逼近安全系数真实解、可准确确定计算误差的二三维边坡稳定极限分析方法体系，在边坡稳定分析领域实现了新的突破，并开发了具有自主知识产权的边坡稳定极限分析软件体系。

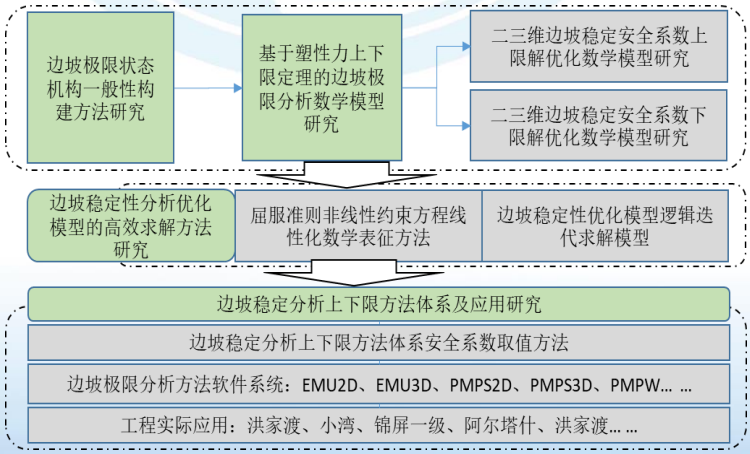

图 1 主要内容及技术路线图

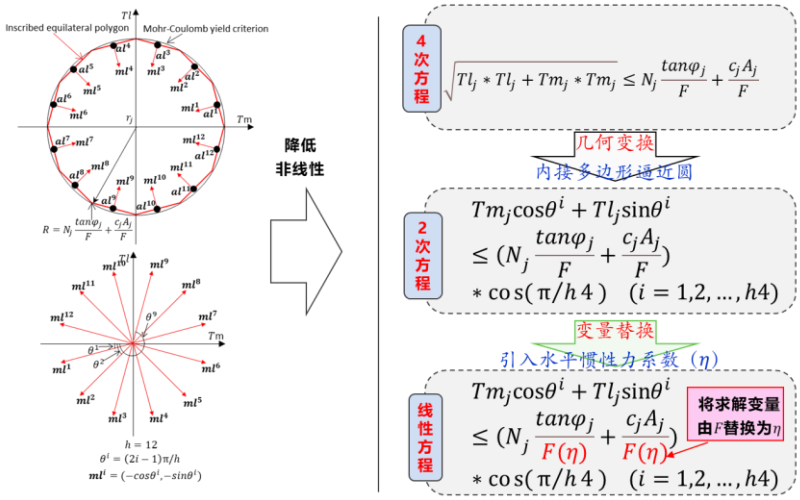

图 2 屈服准则的降维数学表征方式

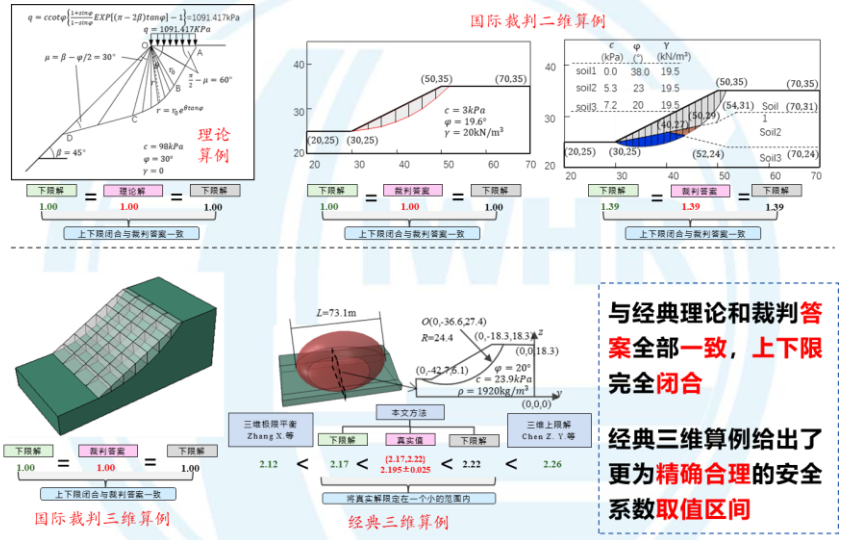

图 3 边坡稳定极限分析方法体系验证

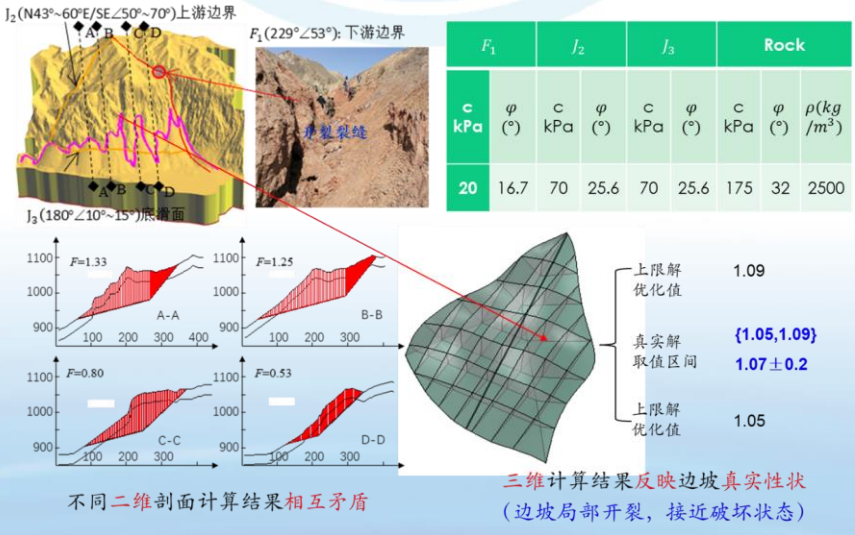

图 4 边坡稳定极限分析方法体系应用