

2024 年度陕西省科学技术奖提名公示

(科技进步奖)

一、项目名称：非饱和黄土蠕变特性研究及工程应用

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：该项目依托陕西省重点研发计划项目和陕西省教育厅专项科研项目，针对非饱和黄土蠕变特性的关键问题进行了系统研究。建立了适用于三轴应力和平面应变状态下的黄土蠕变模型，提出了分别、分级加载情况下的最终蠕变值转化方法，实现了复杂工况下黄土长期蠕变的预测，促进了黄土区域基础工程、边坡工程等长期变形的计算和预测；基于大量土工试验数据库，建立了原状非饱和黄土的土水特征曲线（SWCC）的预测和拟合方法，实现了试验数据缺乏情况下 SWCC 的获取方式，提高了预测模型的可靠性和适用性，为非饱和黄土区域的基础工程、边坡工程等提供了设计依据；建立了一种简化的非饱和黄土的离散元数值模型，提出了一种细观模拟参数的标定方法，实现了对不同含水率黄土的精准模拟，提高了复杂水分场和应力场情况下的黄土工程设计的效率。项目共发表学术论文 16 篇（其中 SCI/CSCD 检索 7 篇），授权国家专利 6 项，获软件著作权 8 项。项目成果成功应用于西成铁路专线、延安新区、延长石油、空港新城、宏宇健康花城等 10 余个工程项目中，获陕西高等学校科学技术研究优秀成果二等奖 1 项，省部级优秀工程勘察设计一等奖 1 项，二等奖 1 项，三等奖 2 项，延安市科学技术一等奖 1 项，陕西秦岭生态科学考察项目奖，经济效益、社会效益和生态环境效益显著，为黄土地区地基处理、生态修复、防灾减灾等提供了重要科学依据，对服务于黄河流域生态保护和高质量发展国家战略具有重要的现实意义。

该项目成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省科学技术进步奖提名条件。特提名为陕西省科技进步奖三等奖。

三、项目简介

习近平总书记指出，黄河流域是我国重要的生态屏障和重要的经济地带，在我国经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的地位。黄土广泛分布于该经济带，它具有大孔隙结构和强水敏特性，使得其在工程应用中面临诸多挑战。黄土地区的工程建设，如道路、桥梁、隧道、水利设施等，常常受到黄土蠕变的影响，导致构筑物产生长期沉降和耐久性降低。传统的黄土工程处理方法往往依赖于经验，缺乏对黄土蠕变特性的深入理解，加之气候变化对黄土土水特征的影响，致使设计计算往往和实际情况不相符。

本项目综合运用室内试验、理论分析、数值模拟等手段，对非饱和黄土的蠕变特性进行了

系统研究，项目主要内容如下：

(1) 建立了黄土三轴蠕变和平面蠕变模型

通过对分别加载的试验数据和经陈氏转化法处理的分级加载的试验数据拟合分析，建立了分别、分级加载情况下的黄土三轴 Burgers 蠕变模型；基于剪应力函数、时间和应变的试验关系，建立了参数变量少且易获取的简化的非饱和黄土的平面蠕变模型，提高了模型的实用性和操作性。通过与实际工程案例的对比分析，验证了模型的准确性和可靠性。新模型能够为黄土地区的工程设计和施工提供理论依据，特别是在预测和评估长期蠕变问题方面具有重要的工程应用价值。

(2) 土水特征曲线 (SWCC) 的高精度预测与拟合

在 Brooks & Corey 方法的基础上，建立了只含两个参数的简化的非饱和黄土的土水特征方程，提出了一种简化了非饱和黄土 SWCC 预测模型，提高了预测的准确性。通过对比不同的拟合方法，优化了 SWCC 的拟合技术，使得拟合结果更贴近实际土水关系，提高了模型的适用性和可靠性。

(3) 非饱和黄土的离散元数值模拟

基于压缩试验、休止角试验和颗粒碰撞试验中获得的压缩模量，内摩擦角和恢复系数的方法，提出了一种用于精确且快捷的非饱和土离散元模拟的细观参数标定方法；在此基础上，根据非饱和黄土的宏观含水率和细观颗粒间摩擦系数的关系，建立了一种非饱和黄土的简化离散元模型。该模型能够为非饱和黄土的工程设计和施工提供数值模拟支持，特别是在复杂水分场和应力场条件下的工程应用中具有指导意义。

本项目从非饱和黄土理论，蠕变理论等方面开展了基础理论和应用研究。项目建立的适合三轴应力和平面应变工况的蠕变模型，综合考虑了非饱和土含水率、围压等因素，为研究黄土蠕变变形提供了新思路，提出的考虑蠕变变形的地基沉降计算方法创新性明确，对精准化工程设计提供了理论支撑。建立的非饱和黄土土水特征简化模型，对提高工程应用效率具有重要的实际意义。建立的简化离散元数值模型，对黄土地区的工程高效设计及模拟计算提供了行之有效的解决办法。

本项目历时 9 年，以陕西省重点研发计划和陕西省教育厅专项科研计划项目为依托，以黄土区域的诸多工程实践为支撑，形成了非饱和黄土蠕变、土水特征、数值模拟等系列研究成果，已成功应用于西成铁路专线、延安新区、延长石油、空港新城、宏宇健康花城等 10 余个工程项目中，获陕西省科技进步三等奖 1 项，省部级优秀工程勘察设计一等奖 1 项，二等奖 1 项，三等奖 2 项，延安市科学技术一等奖 1 项，陕西秦岭科学考察奖，陕西高等学校科学技术研究优秀成果二等奖 1 项，项目组成员获得“汉中市青年科技创新人才”荣誉称号。发表学术论文 16 篇（其中 SCI/EI 检索 7 篇），授权国家专利 6 项，获软件著作权 8 项。本项目的经济效益、社会效益和生态环境效益较为显著，为黄土地区的基础工程、边坡工程等提供了重要的理论支

撑和科学依据，对服务于黄河流域的高质量发展国家战略具有重要的现实意义。

四、客观评价

黄土作为一种结构性和水敏性极强的土类。针对不同工况，系统研究其蠕变特性，可以预测和控制黄土在不同环境条件下的变形行为，这对于在水利工程、道路建设、建筑施工等领域中优化工程等设计，提高工程的稳定性、适应性、安全性和耐久性，提高资源利用效率，降低能耗和碳排放，实现黄河流域高质量发展和生态文明建设具有重要的意义。

(1) 国内外相关技术的比较

黄土受到降水、外部荷载等的影响，其变形非常复杂。除了孔隙变化引起的初始变形外，随着黄土内部胶结物的逐渐溶解、颗粒的破碎与重新排列组合，微孔隙还会进一步变化，进而产生蠕变问题，对工程的长期稳定性存在难以预测的影响。

在非饱和黄土蠕变分析中，目前存在两方面的问题。首先，以往的模型并未考虑不同加载方式情况下蠕变终值的相互换算，不利于不同工况工程的应用和推广。本项目基于非饱和黄土的三轴蠕变试验，提出了分别、分级加载情况下的蠕变终值的转换方法，大大提高了工程应用场景和效率。第二，目前在研究诸如黄土路基、堤坝这类工程时，大多数仍然采用的时三轴蠕变计算方法，与土体实际所受平面应变状态不符。本项目提出了基于平面应变状态的蠕变模型，并给出了简易的蠕变参数获取方式，在解决诸如路基、堤坝等平面应变问题时具有更高的计算效率。本项目提出的非饱和黄土的蠕变模型具有适用范围更广，参数更少，预测精度更高的特点，在诸多黄土工程中已得到了应用。

在非饱和黄土的土水特征研究方面，目前国内外的研究大都采取单一数据分析方法，在缺少现场试验条件的情况下，难以确定非饱和黄土的土水特征，进而在工程设计中缺乏精准的依据。本项目在 Brooks & Corey 方法的基础上，提出了一种简化的 SWCC 预测模型，该模型在减少计算复杂度的同时，保持了较高的预测精度，适用于缺乏详细试验数据的情况。基于此方面的研究成果，在黄土基坑工程中，实现了对气候影响下基坑稳定性的精准计算。

在非饱和黄土的离散元数值模拟方面，目前国内外诸多学者都采用比较复杂的点接触模型、平行黏结模型或者 Hill 模型等。在理论研究方面，这些模型的优势比较突出，可以反映不同饱和度情况下的黄土颗粒接触，但是由于比较复杂的细观参数，在工程中难以大范围推广和使用。本项目提出了一种简化的离散元数值模型，并给出了细观参数的标定方法，极大地提高了黄土工程设计、计算与数值模拟的效率。

(2) 科技查新结论

西安交通大学图书馆（教育部科技查新工作站/Z08）进行了“非饱和黄土蠕变特性研究及工程应用”中各项创新性成果的科技查新工作，查新结果表明：在所检索的国内外相关数据库中，除该查新课题单位成员发表的文献外，未见与本课题重点技术内容相同的文献报道。

(3) 科技成果评价结论

本项目依托的 1 项陕西省重点研发计划项目顺利通过专家验收, 依托的 2 项陕西省教育厅专项科研计划项目均顺利通过结题。

(4) 获奖情况

项目组针对非饱和黄土的蠕变特性、土水特征、离散元数值模拟等方面开展了理论研究和工程应用, 其中“延长石油研究中心岩土工程勘察”获陕西省优秀工程勘察设计一等奖; “新建西安至成都铁路客运专线西安铁路局调度所扩建工程基坑支护设计、降水及检测工程”获陕西省优秀工程勘察设计二等奖; “宇宏健康花城(二期)岩土工程勘察”获陕西省优秀工程勘察三等奖; “延安新区填方场地填筑体综合研究系统”获延安市科学技术一等奖。项目组成员获陕西秦岭科学考察奖 1 项, 陕西高等学校科学技术研究优秀成果二等奖 1 项, “汉中市青年科技创新人才”称号。

五、应用情况

本项目针对非饱和黄土的蠕变特性、土水特征、数值模拟等方面开展了理论研究和工程应用, 成功应用到西成铁路专线、延安新区、延长石油、空港新城、宏宇健康花城等 10 余个工程项目中, 推广应用领域涉及到建筑工程、市政工程、交通工程等多个领域, 经济效益、社会效益和生态环境效益较为显著, 为黄土地区的基础工程、边坡工程等提供了重要的理论支撑和科学依据, 对服务于黄河流域的高质量发展国家战略具有重要的现实意义。

六、主要知识产权和标准规范等目录

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家(地区)	授权号(标准编号)	授权(标准发布)日期	证书编号(标准批准发布部门)	权利人(标准起草单位)	发明人(标准起草人)
1	论文	A continuum model of drag and lift forces for inclined planes dragged through granular beds	中国	WOS:000543527300001	2020 年 06 月 01 日	Granular Matter	陕西理工大学、信息产业部电子综合勘察研究院	郭鸿、付江涛、郭瑞、徐乾、蒋红、陈能远
2	论文	分别、分级加载下压实黄土三轴蠕变特性及模型分析	中国	DOI:10.11660/slfdbx.20160414	2016 年 04 月 25 日	水力发电学报	西北农林科技大学、陕西理工大学、中建市政工程有限公司	郭鸿、骆亚生、王鹏程
3	论文	黄土平面蠕变模型	中国	DOI:10.13471/j.cnki.acta.snus.2017.06.014	2017 年 11 月 15 日	中山大学学报(自然科学版)	陕西理工大学、西北农林科技大学、法国国立应用科学学院、中建市政工程有限公司	郭鸿、骆亚生、胡连信、王鹏程
4	论文	平面应变状态下黄土蠕变研究	中国	DOI:10.13207/j.cnki.jnwf.2016.11.030	2016 年 10 月 09 日	西北农林科技大学学报(自然科学版)	陕西理工大学、西北农林科技大学	郭鸿、骆亚生、胡连信

5	论文	原状黄土土水特征曲线拟合方法研究	中国	DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2016.19.018	2016年10月14日	人民长江	陕西理工大学	郭鸿、陈茜、陈栋梁、李军
6	论文	原状黄土土水特征曲线预测方法研究	中国	DOI:10.3969/j.issn.2095-2783.2018.01.008	2018年01月08日	中国科技论文	陕西理工大学、中建市政工程有 限公司	郭鸿、李军、王鹏程、郭瑞
7	论文	非饱和重塑黄土的一种简化离散元模型	中国	DOI:10.13244/j.cnki.jiwhr.2016.06.000	2016年12月15日	中国水利 水电科学 院学报	陕西理工大学、西北农林科技大学、中国城市建设研究院有限公司	郭鸿、黄文华、李军、魏鸿林
8	计算机软件著作权	基于 PFC3D 的土体三轴蠕变模拟程序	中国	2016SR205208	2016年08月04日	1383825	陕西理工大学	郭鸿
9	实用新型专利	一种蠕变仪用串行传力机构	中国	ZL201822054034.5	2019年08月13日	9222342	陕西理工大学	郭鸿、陈栋梁、徐乾、郭瑞
10	发明专利	一种离散元模拟中的细观参数标定方法	中国	ZL201811477615.8	2022年09月06日	5434924	陕西理工大学	郭鸿、马帅帅、曹龙、王普

七、主要完成人情况

姓名：郭鸿

排名：1

行政职务：副院长

技术职称：副教授

工作单位：陕西理工大学

完成单位：陕西理工大学

对本项目贡献：项目总负责，全面负责项目理论研究和应用研究工作，投入工作量 95%，负责项目组织和实施。建立项目的实施方案，统筹安排人员、设备等各项资源，参与项目各创新点的主要研究工作，是创新点一、二、三的主要贡献人，主持科研成果的推广和应用。

姓名：张鹏

排名：2

行政职务：人力资源部部长

技术职称：高级工程师

工作单位：信电综合勘察设计研究院有限公司

完成单位：信电综合勘察设计研究院有限公司

对本项目贡献：主要完成人，投入工作量 80%，负责项目创新点一黄土三轴蠕变模型专题的研究工作，是创新点一的重要贡献人，协助项目负责人开展工程优化应用，解决科技成果在工程推广应用中出现实际问题，产生了显著的经济和社会效益。

姓名：王鹏程

排名：3

行政职务：商务成本主管

技术职称：高级工程师

工作单位：中国南水北调集团生态环保有限公司

完成单位：中建市政工程有限公司

对本项目贡献：项目技术负责，制定整个项目的技术路线，投入工作量 80%，负责项目创新点黄土蠕变和非饱和土土水特征的研究工作，是创新点一的重要贡献人。

姓名：徐乾

排名：4

行政职务：系主任

技术职称：副教授

工作单位：陕西理工大学

完成单位：陕西理工大学

对本项目贡献：主要完成人，投入工作量 80%，合作完成项目创新点二非饱和黄土土水特征和创新点三非饱和黄土的离散元模型的专题工作，并负责挡土墙工程中的应用，是创新点二、三的重要贡献人。

姓名：李阳

排名：5

行政职务：无

技术职称：工程师

工作单位：信电综合勘察设计研究院有限公司

完成单位：信电综合勘察设计研究院有限公司

对本项目贡献：主要完成人，参与项目的成果推广应用工作，投入工作量 80%，创新点二的重要贡献人。基于非饱和土的土水特征模型，研发了一种双排桩基坑支护结构，有效减少了基坑的变形，并在陕西关中区域等推广应用，取得了良好的经济、社会和生态环境效益。

姓名：付江涛

排名：6

行政职务：无

技术职称：副教授

工作单位：陕西理工大学

完成单位：陕西理工大学

对本项目贡献：主要完成人，合作完成项目创新点三非饱和黄土离散元模型的的专题工作，投入工作量 70%，参与项目的推广应用，是创新点三的重要贡献人。

姓名：骆亚生

排名：7

行政职务：无

技术职称：教授

工作单位：西北农林科技大学

完成单位：西北农林科技大学

对本项目贡献：项目顾问，投入工作量 70%，指导项目的总体理论和技术的统筹工作，以及对各创新点对应科研成果的转化和应用工作，创新点一、二和三的重要贡献人。

七、主要完成单位及创新推广贡献

单位名称：陕西理工大学

创新推广贡献：陕西理工大学作为项目主持单位，是创新点一、二和三的主要贡献者。负责本项目组织管理、统筹协调。对项目的前期论证、项目实施、结题验收等工作进行组织和管理。在人才培养和梯队建设方面，鼓励和支持新引进人才加入本项目，提升了项目团队的科研攻关能力。依托单位的秦巴山地岩土环境与灾害防治研究中心、岩土与地下工程创新实验平台，投入大量经费，开展项目的应用研究，保证了本项目的顺利实施。

单位名称：信电综合勘察设计研究院有限公司

创新推广贡献：信电综合勘察设计研究院有限公司作为项目合作单位，是创新点一和二的重要贡献者。负责本项目的应用性技术研发及成果的应用，牵头推进非饱和黄土蠕变特性研究中的多个关键技术在国内多个工程建设项目中应用实践，研发了多项工程技术，取得了良好的示范效应，并为项目的运转提供后勤保障和资源调配，推动了项目的有序进行，为项目的顺利完成做出了重要贡献。

单位名称：西北农林科技大学

创新推广贡献：西北农林科技大学作为项目合作单位，是创新点一和三的重要贡献者。发挥高水平大学在基础理论研究方面的优势，主要负责项目的理论研究工作，针对非饱和黄土的蠕变特性关键问题开展了系统研究，指导了多个工程勘察，地基基础加固、边坡治理等项目，协助本项目成果的推广应用。学校与陕西理工大学一起开展项目的理论研究工作，并在科研场所、实验平台方面，学校重点支持并购置了大量的先进试验设备，为本项目的顺利开展提供了

平台保障。

单位名称：中建市政工程有限公司

创新推广贡献：中建市政工程有限公司作为项目合作单位，是创新点一的重要贡献者。负责本项目成果在隧道工程中的应用实践，为项目的顺利完成做出了重要贡献。

八、完成人合作关系说明

“非饱和黄土蠕变特性研究与工程应用”作为推荐项目参加 2024 年度陕西省科技进步奖评审，项目完成人陕西理工大学郭鸿、徐乾、付江涛，信电综合勘察设计研究院有限公司张鹏、李阳，中建市政工程有限公司王鹏程等组成技术团队，长期合作，联合攻关，共同完成该项目。

第一完成人郭鸿，作为项目负责人完成了陕西省重点研发计划项目“干湿循环作用下土石混合体劣化机理及变形预警关键技术研究”（2020SF-430），陕西省教育厅专项科研项目“秦巴山区典型滑坡案例的灾害机理研究”（15JK1117）和“土石混合体蠕变特性的宏-细观机理研究”（19JK0174），共青团陕西省委秦岭科学考察项目“秦岭南麓风化岩体浅层滑坡考察及治理策略研究”，获得了陕西高等学校科学技术研究优秀成果二等奖 1 项（2022），陕西秦岭生态科学考察项目奖（2020），发表论文 8 篇，获专利授权 2 项，获软件著作权 8 项。

第二完成人张鹏，2020 年 4 月开始与第一完成人合作开展土体蠕变相关的研究，于 2020 年 1 月与第一完成人共同申报的陕西省重点研发计划项目“干湿循环作用下土石混合体劣化机理及变形预警关键技术研究”（2020SF-430）获立项并顺利结题，于 2020 年 9 月与第一完成人共同撰写的论文“坡积土石混合体蠕变特性的 Burgers 模型”（DOI:10.13471/j.cnki.acta.snus.2020.05.13.2020d019）在中山大学学报（自然科学版）发表。

第三完成人王鹏程，2015 年 5 月开始与第一完成合作开展黄土蠕变模型相关的研究，于 2016 年 4 月与第一完成人共同撰写的论文“分别、分级加载下压实黄土三轴蠕变特性及模型分析”（DOI:10.11660/slfdx.20160414）在水力发电学报发表，于 2017 年 11 月与第一完成人共同撰写的论文“黄土平面蠕变模型”（DOI:10.13471/j.cnki.acta.snus.2017.06.014）在中山大学学报（自然科学版）发表，于 2018 年 1 月和第一完成共同撰写的论文“原状黄土土水特征曲线预测方法研究”（DOI:10.3969/j.issn.2095-2783.2018.01.008）在中国科技论文发表。

第四完成人徐乾，2018 年 1 月开始与第一完成人合作开展土体蠕变特性试验研究，于 2019 年 8 月与第一完成人共同研发的专利“一种蠕变仪用串行传力机构”（专利号：ZL201822054034.5）获得授权，于 2020 年 6 月与第一完成人共同撰写的论文“A continuum model of drag and lift forces for inclined planes dragged through granular beds”（WOS:0005435273 00001）在 Granular Matter 上发表。

第五完成人李阳，2019 年 8 月开始与第二完成人从事黄土基坑变形等问题的研究，于 2022 年 6 月与第二完成人共同撰写的论文“黄土双排抗滑桩模型试验”（DOI:10.13637/j.issn.1009-6094.2021.0673）在安全与环境学报发表。

第六完成人付江涛，2018年2月开始与第一完成人从事非饱和土、离散元数值模拟等方面的研究，于2020年1月与第一完成人共同申报的陕西省重点研发计划项目“干湿循环作用下土石混合体劣化机理及变形预警关键技术研究”（2020SF-430）获立项并顺利结题，于2020年6月与第一完成人共同撰写的论文“A continuum model of drag and lift forces for inclined planes dragged through granular beds”（WOS:000543527300001）在 Granular Matter 上发表。

第七完成人骆亚生，2014年1月开始与第一完成人从事非饱和黄土、离散元数值模拟等方面的研究，于2016年4月与第一完成人共同撰写的论文“分别、分级加载下压实黄土三轴蠕变特性及模型分析”（DOI:10.11660/slfdb.20160414）在水力发电学报发表，于2017年11月与第一完成人共同撰写的论文“黄土平面蠕变模型”（DOI:10.13471/j.cnki.acta.snus.2017.06.014）在中山大学学报(自然科学版)发表，于2016年10月与第一完成人共同撰写的论文“平面应变状态下黄土蠕变研究”（DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.11.030）在西北农林科技大学学报(自然科学版)发表。