

项目合同编号：25-63K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：黄土地区公路桥梁挤扩支盘桩成套技术研究

承担单位：陕西省交通规划设计研究院有限公司

项目负责人：臧 斌

通讯邮编、地址：陕西省西安市高新区科技六路 37 号 710065

传真、电话：029-68718801

起止年限： 2026 年 3 月 至 2028 年 3 月

陕西省交通运输厅制

项目合同编号：25-63K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：黄土地区公路桥梁挤扩支盘桩成套技术研究

承担单位：陕西省交通规划设计研究院有限公司

项目负责人：臧 斌

通讯邮编、地址：陕西省西安市高新区科技六路 37 号 710065

传真、电话：029-68718801

起止年限： 2026 年 3 月 至 2028 年 3 月

陕西省交通运输厅制

填写说明：

1. 此文本要求采用计算机打印，字迹清晰，字间距采用标准距离；
2. 合同甲方为陕西省交通运输厅；
3. 按照合同书正文、附件（修改后的科研项目研究大纲、专家评审意见、专家名单及意见处理表等）顺序双面打印胶装，封面、封底采用白色布纹纸张。

一、项目主要研究内容

1. 主要研究内容

(1) 黄土地区支盘桩施工工艺及质量检测

①黄土地区支盘桩支（盘）施工工艺及施工参数

②黄土地区支盘桩支（盘）完整性检测方法及其评定标准

(2) 黄土地区支盘桩竖向承载力计算及设计方法

①竖向承载力主要影响因素及其影响规律

②竖向承载力计算修正公式

③黄土地区支盘桩设计方法

(3) 黄土地区支盘桩沉降计算方法

①黄土地区支盘桩现场静载试验时分级荷载作用下桩顶沉降、桩身压缩变形、支盘及桩端压缩变形等；

②考虑支盘作用，建立支盘桩单桩沉降变形计算公式，结合桥梁工程中支盘桩的沉降变形进行理论计算。

2. 技术关键

(1) 支盘施工工艺

黄土相比于软土，可塑性较差，支盘施工工艺选择直接影响孔壁的稳定性，结合施工效率、支盘稳定性、经济和社会效益等指标比较压应力、剪应力主导的施工方式，选取黄土地层灌注桩支盘合理的施工工艺。

(2) 支盘阻力计算参数

结合现场试桩试验，测试分级荷载作用下桩身位移以及对应的

桩身轴力，得出桩侧摩阻力、支盘阻力及桩端阻力与桩土相对位移之间的关系，结合现场孔内旁压试验及室内土体物理力学指标，修正黄土地层支盘阻力设计参数。

（3）支盘完整性检测方法及评定标准

目前规范针对支盘完整性仅限于灌注混凝土之前进行检测，主要检测手段是井径仪；对于工程技术人员，施工结束后支盘的完整性是关注重点。目前，支盘完整性检测还没有经济有效的检测手段，判断标准在国内外未见相关报道。

3. 依托工程（依托工作）

依托 310 国道眉县青化至渭滨高家镇公路工程礞溪至高家镇段项目，路线全长 35.974 公里。全线桥梁 10353.904 米/34 座，其中特大桥 1951 米/1 座，大桥 8097.904/28 座，中桥 305 米/5 座。路线全长桥梁占比高，施工工艺、安全组织及工期等方面提质增效、节能减排、新工艺新技术创新需求突出。

二、考核指标

1.预期目标

(1) 通过黄土加固试验及现场足尺试验，提出黄土地层支盘桩施工工艺及质量控制方法；

(2) 结合室内模型试验及现场静载试验，完善黄土地区支盘桩承载力计算公式及计算方法；

(3) 考虑桩与土之间的相对沉降及桩身弹性压缩变形，提出支盘桩沉降计算方法。

2.主要技术经济指标（具体的技术经济参数）

(1) 造价指标：单位承载力造价较常规桩降低 25%~35%，单桩施工成本<1800 元/m³，项目总造价较传统方案节约 15%~20%。

(2) 效率指标：单桩施工周期<72h，较常规工艺缩短 30%以上；设备台班效率≥2 根/台班，成盘质量检测效率>5 根/天。

(3) 技术适配：形成黄土地层扩盘桩施工与检测标准；建立的设计计算方法可直接用于工程，覆盖主流桩径、盘数、盘径范围；施工设备国产化率>95%，专用旋扩钻头使用寿命≥500 根桩。

(4) 环保安全：泥浆排放量较常规工艺减少 60%，固废回收率>90%；施工噪声<75dB，施工安全达标率 100%，无塌孔等安全事故。

3.经济和社会效益

(1) 经济效益分析

本项目预期实现工程全周期成本显著压降：针对 1.8m 桩径桩

基,单根预固结扩盘桩较原 65m 超长灌注桩直接成本降低 4.48 万元,降幅 15.97%,规模化应用可大幅节约项目总造价;单桩混凝土、钢筋用量分别减少 38.5%、46.1%,源头压缩主材采购成本;单桩施工工期由 15 天压缩至 10 天,同步节约人工机械成本,降低资金占用与工期违约风险;同时解决黄土地层灌注桩质量通病,提升桩基耐久性,大幅减少后期运维投入。

(2) 社会及生态效益分析

一是筑牢工程安全底线,通过桩型结构优化规避超长灌注桩孔壁坍塌等质量隐患,提升结构稳定性,减少后期处置对居民生活的干扰,防范安全事故引发的社会风险;二是保障民生通行权益,压缩施工工期减少道路长期占用,缓解施工期交通拥堵,降低交通管理公共成本,保障区域交通顺畅;三是践行绿色低碳发展,大幅减少高耗能建材用量,降低生产施工环节的污染物、碳排放与噪声污染,减小黄土地层施工的生态扰动,助力工程领域“双碳”目标落地;四是推动行业技术升级,形成黄土地层桩基技术示范,为西北黄土地区基建桩基选型提供科学支撑,推动技术规模化推广,提升湿陷性黄土地区基建技术创新水平。

4.成果提供形式

(1) 测试报告——黄土地层支盘桩足尺试验报告

(2) 研究报告——黄土地区公路桥梁挤扩支盘桩成套技术研究;工程造价及经济分析研究

(3) 技术指南——黄土地区公路桥梁支盘桩设计与施工技术指

南

(4) 研究成果达到国内领先水平，在国内外核心学术期刊上发表论文 1 篇，申请国家专利 1 项。

4. 其他考核指标

(1) 培养工程技术人员 3-5 名；

(2) 开展技术交流 1 次。

三、项目年度计划内容及考核目标

年度	计划内容及考核目标（每栏限 125 字）
2026 年 第二季度	调研收集有关资料，制定详细的研究大纲和实施细则
2026 年 第三季度	开展室内模型试验和数值分析工作，探索支盘位置、支盘间距、支盘盘径对承载力的规律
2026 年 第四季度	在充分收集、分析前人资料的基础上，针对依托工程沿线地质情况开展地层试验
2027 年 第一季度	埋置传感器，租赁施工机械及测试设备，开展现场足尺试验
2027 年 第二季度	整理足尺试验测试结果，总结预固结扩盘桩施工工艺及质量检测方法
2027 年 第三季度	通过测试分级荷载作用下桩侧阻力、桩身轴力、盘端阻力、桩端阻力，提出扩盘桩沉降及承载力计算方法
2027 年 第四季度	编制研究成果报告及其他有关文件
2028 年 第一季度	申请组织验收

四、项目经费

项目总经费：100 万元
交通运输厅补助：19.99 万元
自筹资金：80.01 万元

经费支出预算表

科 目	总经费 (单位：万元)	厅补经费 (单位：万元)
(一) 直接费用	75	19.99
1. 设备费	14	0
(1) 购置设备费	0	0
(2) 试制设备费	0	0
(3) 设备改造与租赁费	14	0
2. 业务费	57	19.99
(4) 材料支出	17	6.09
(5) 测试化验实验加工支出	28	13.9
(6) 燃料及动力支出	0	0
(7) 差旅支出	1	0
(8) 会议支出	1.8	0
(9) 国际合作与交流支出	1.7	0
(10) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/ 印刷支出	7.5	0
(11) 其他支出	0	0
3. 劳务费	4	0
(12) 劳务性支出	1.5	0
(13) 咨询专家支出	2.5	0
(二) 间接费用	25	0
4. 管理费	8	0
5. 绩效支出	17	0
合 计	100	19.99

注：预算编制按照《陕西省人民政府办公厅关于改革完善省级财政科研经费管理的实施意见》（陕政办发〔2022〕3号）文件执行。项目验收将组织财务专项验收或审计。可参考《陕西省交通运输厅科研项目经费决算报告参考格式说明》

五、项目绩效目标

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	知识产权	1.专利授权数（项）	1
		（1）授权发明专利	
		（2）实用新型	1
		（3）外观设计	
		2.软件著作权授权数（项）	
		3.发表论文（篇）	1
		（1）其中 SCI 索引收录数	
		（2）其中 EI 索引收录数	
		（3）其他	1
		4.著作（部）	
		5.制订标准数（项）	
		（1）国际标准	
		（2）国家标准	
		（3）行业标准	
		（4）地方标准	
		（5）企业标准	
		（6）科技报告	1
	其他成果	1.填补技术空白数	
		（1）国际	
		（2）国家	
		（3）省级	1
		2.获奖项数	
		（1）国家奖项	
		（2）部、省奖项	
		（3）地市级奖项	
		3.其他科技成果产出	
		（1）新工艺（或新方法模式）	1
		（2）新产品（含农业新品种）	
		（3）新材料	
		（4）新装备（装置）	
		（5）平台/基地/示范点	
		（6）中试线	
		（7）生产线	

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	其他成果	4. 研究开发情况	
		(1) 小试	否
		(2) 中试（样品样机）	否
		(3) 小批量	否
		(4) 规模化生产	否
	人才引育	1. 引进高层次人才	
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	
		2. 培养高层次人才	
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	
		3. 培训从事技术创新服务人员（人次）	
		4. 是否设立科研助理岗位	否
	产业化情况	1. 开放共享仪器设备数（台/套/只等）	
		2. 科研仪器设备利用率（%）	
		3. 孵化科技型企业（个）	
		4. 转化科技成果（个）	
效果类指标	经济效益	1. 新增产值（万元）	
		2. 新增销售（万元）	
		3. 新增出口创汇（万美元）	
		4. 新增利润（万元）	
	社会效益	1. 新增税收（万元）	
		2. 新增就业人数	
		3. 就业培训（人次）	
		4. 带动农民增收（万元）	
		5. 培训和指导科技服务（人次）	
		6. 新增产业带动情况	带动桥梁桩基等相关产业高质量发展
		7. 技术集成示范（项）	

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
		8. 建立示范基地（亩数）	
		9. 节约资源能源	节约桥梁桩基原材料使用及相应能耗
		10. 环保效益	减少施工过程中泥浆排放，回收固废，节能减排降碳
其他需要说明的情况	无		

六、承担单位或研究人员分工

(1) 陕西省交通规划设计院有限公司

项目牵头单位，依托陕西省企业技术中心、陕西省工程技术研究中心和西安市绿色智能交通工程研究中心开展研究工作，负责统筹课题的总体进度、项目任务分工和组织管理工作，落实依托工程，指导室内外试验及理论研究，落实现场试验场地及科研经费，组织协调现场试桩试验及性能监测等现场实体工作。此外，公司建有博士后科研工作站、西安市智慧与低碳交通工程技术研究中心、BIM技术与全装配结构研究中心、桥梁标准化构件设计创新工作室、半山一水·低碳景观创新工作室等，为本项目提供技术和人才支持。

(2) 宝鸡市综合交通建设协调服务中心

参与研究方案的制定及技术交底工作，指导现场足尺试验，参与完成技术交底、技术培训以及课题研究阶段评审工作。

(3) 长安大学

负责课题研究大纲的制定及可行性报告编制工作，开展室内模型实验、现场足尺试验、试桩静载试验、工程桩沉降及受力性能监测试验，有限元数值分析及承载力计算等方面的研究工作，整理研究成果，编制研究报告及技术指南，配合陕西省交通规划设计院有限公司完成各个阶段项目评审工作。

(4) 陕西交控市政路桥集团公司第一分公司

负责协调施工环节及机械组合，协助编制施工技术指南；完成桩基试验前场地硬化及试验过程中的协助工作；协助课题验收。

七、项目参加人员表

项目承担单位：陕西省交通规划设计研究院有限公司 参与单位（排序）：宝鸡市综合交通建设协调服务中心 长安大学 陕西交控市政路桥集团有限公司第一分公司						
项目负责人						
序号	姓名	出生年月	工作单位	职称/职务	专业	在项目担任具体工作
1	臧斌	1979.03	陕西省交通规划设计研究院有限公司	正高	道路与桥梁工程	项目总负责
主要研究人员						
2	赵永昭	1972.10	宝鸡市综合交通建设协调服务中心	副高	桥梁工程	协助方案制定, 审核成果
3	赵斌云	1968.07	宝鸡市综合交通建设协调服务中心	副高	工程机械	协助方案制定, 审核成果
4	党祺	1983.08	陕西省交通规划设计研究院有限公司	正高	桥梁工程	项目设计总协调

5	赵琳	1971.07	宝鸡市综合交通建设 协调服务中心	副高	道路与 桥梁工程	项目管理总协调	赵琳
6	周志军	1975.01	长安大学	教授	岩土工程	技术总负责	周志军
7	王奎	1975.10	西安长安大学工程设计 研究院有限公司	副高	道路与 桥梁工程	现场试验实施	王奎
8	杨凯	1979.10	陕西省交通规划设计 研究院有限公司	正高	桥梁工程	桩基设计总负责	杨凯
9	何军	1980.01	陕西省交通规划设计 研究院有限公司	副高	桥梁工程	现场应用技术负责	何军
10	冉海峰	1986.12	陕西高速机械化工 程有限公司	副高	公路工程	现场试验实施	冉海峰
11	张建强	1979.11	陕西交控市政路桥集团 有限公司第一分公司	副高	公路工程	现场总负责	张建强
12	雷辉	1975.12	陕西交控市政路桥集团 有限公司第一分公司	副高	桥梁工程	现场总协调	雷辉
13	李敖	1992.02	陕西省交通规划设计 研究院有限公司	副高	土木工程	应用落地及协调	李敖
14	梁田	1987.11	陕西高速机械化工 程有限公司	副高	桥梁工程	现场应用及技术支持	梁田

15	王晓利	1987.04	陕西省交通规划设计 研究院有限公司	副高	其他	项目管理	王晓利
16	李富安	1972.04	陕西省交通规划设计 研究院有限公司	助工	桥梁工程	工程应用及现场管理	李富安
17	田伟涛	1989.07	陕西省交通规划设计 研究院有限公司	中级	其他	桩基成孔及质量检测	田伟涛
18	王 帅	1992.01	陕西省交通规划设计 研究院有限公司	中级	桥梁工程	桩基设计	王帅
19	谢宏丽	1999.08	长安大学	助工	岩土工程	试验方案及数值分析	谢宏丽
20	任展腾	2000.05	长安大学	助工	岩土工程	试验及数据处理	任展腾
21	薛瑞杰	1985.12	陕西省交通规划设计 研究院有限公司	副高	桥梁工程	桩基设计	薛瑞杰
22	吴礼杰	1988.10	陕西省交通规划设计 研究院有限公司	副高	桥梁工程	桩基设计	吴礼杰
23	姬乃川	1995.12	陕西省交通规划设计 研究院有限公司	中级	桥梁工程	桩基设计	姬乃川

八、信息表

项目合同编号		25-63K		密级		/		A: 机密 B: 秘密 C: 内部		
项目名称		黄土地地区公路桥梁挤扩支盘桩成套技术研究								
项目实施所在地		西安		起止年限		2026 年 3 月至 2028 年 3 月				
总 经 费		100 万元		厅 拨		19.99 万元				
第一承担单位	单位名称	陕西省交通规划设计研究院有限公司								
	所在地	陕西省 西安市 高新区					代码	610010		
	通讯地址	陕西省西安市高新区科技六路 37 号					邮编	710065		
	单位性质	(3) 1.大专院校 2.科研院所 3.企业 4.其他					代码	435201880		
参与单位	序号	单 位 名 称								
	1	宝鸡市综合交通建设协调服务中心								
	2	长安大学								
	3	陕西交控市政路桥集团公司								
项目负责人		姓 名	臧斌		性别 (1) 1.男 2.女		出生年份	1979		
		学 历	(1) 1.研究生 2.大学 3.大专 4.中专 5.其他							
		职 称	(1) 1.高级 2.中级 3.初级 4.其他							
		联系电话	18192252738 (029-68718892)		电子邮箱		286689387@qq.com			
项目联系人		姓 名	王晓利		性别		女			
		联系电话	15319988584 (029-68718892)		电子邮箱		8958283@qq.com			
项目组人数		23	高级	17	中级	3	初级	3	其他	0
主要研究内容 (100 字以内)		(1) 黄土地地区支盘桩施工工艺及质量检测 (2) 黄土地地区支盘桩竖向承载力计算及设计方法 (3) 黄土地地区支盘桩沉降计算方法								
成果属性		AB	A: 新技术 B: 新工艺 C: 新材料 D: 新产品 E: 软科学 F: 装备 G: 其他							
成果形式		AC	A: 专著、论文 B: 样机、样品 C: 试验工程、产品 D: 示范工程 E: 产品 F: 其他							

九、共同条款

合同各方应共同遵守《陕西省交通运输厅科研项目管理办法》。

1.合同执行过程中，乙方如需修改合同某项条款，应向甲方提出变更内容及理由的申请报告，经甲方审核同意后实施。未接到正式批准以前，双方仍须按原合同条款履行，否则后果由自行修改条款的一方负责。

2.乙方因任何主观或客观原因（如：与大纲评审内容有出入，挪用经费、技术措施或某种条件不落实等）致使计划无法执行而要求解除合同的，需取得甲方书面同意且应视不同情况，部分或全部退还所拨经费；出现上述情况的，甲方有权单方解除本合同且视不同情况要求乙方部分或全部退还所拨经费。

3.乙方的厅补助经费及自筹经费应按国省有关科研经费使用范围开支。

4.项目执行过程中，甲方提出变更合同有关内容时，要与乙方协商达成书面协议。

5.项目完成后，乙方必须按要求向甲方提交一套真实、完整、详细的技术资料及样机，并提出项目验收申请报告，由甲方审查后组织验收。

6.合同正本一式壹拾捌份，甲方单位伍份，承担单位壹拾叁份。

7.本合同经双方签章后生效，规定内容执行完毕后自然失效。

十、合同签约各方

合同甲方：陕西省交通运输厅

负责人：（签字） 2020年3月27日

联系人：（签字） （公章）

电 话：029-88869067

合同乙方：陕西省交通规划设计研究院有限公司

单位负责人：（签字） 2020年3月27日

项目负责人：（签字） （公章）

电 话：029-68718888

财务负责人：（签字） 陕西省交通规划设计研究院有限公司

账 户 名：陕西省交通规划设计研究院有限公司

开户银行：中国工商银行股份有限公司西安电子工业区支行

账 号：3700023109014412785

陕西交通科技项目科研诚信 承诺书

本单位承诺在科研项目实施过程中，遵守科学道德和科研诚信要求，严格执行《陕西省交通运输厅科研项目管理办
法》的规定和科技项目合同书约定，保证所提交材料的真实
性，确保专款专用。如违背以上承诺，愿意承担相关责任，
并同意主管部门将相关失信信息记入公共信用信息系统。



项目承担单位：（盖章）

项目负责人：

年 月 日

项目编号：25-63K

2025 年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称：黄土地地区公路桥梁挤扩支盘桩成套技术研究

申请单位：陕西省交通规划设计研究院有限公司，
宝鸡市综合交通建设协调服务中心，长安大学，陕西
交控市政路桥集团公司

联系人：王晓利

电话：029-68718892

陕西省交通运输厅制

2026 年 3 月

目 录

一、项目研究的背景和必要性	3
二、前期科研及工作基础	5
2.1 国内外研究现状	5
2.2 项目前期科研及现有工作条件	19
2.3 参考文献	24
三、实施方案	27
3.1 拟解决的关键问题	27
3.2 主要研究内容及实施方案	28
3.3 技术路线	38
3.4 后续技术改造或基本建设计划的衔接	38
3.5 有关技术经济指标	40
四、项目承担单位及参加单位概况	42
4.1 单位概况	42
4.2 技术力量及人员构成	40
4.3 各自承担的主要工作	42
4.4 项目主要负责人情况	42
五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件	43
5.1 依托工程（工作）概况	43

5.2 投资来源	43
5.3 程进度与项目科研进度的配合	43
5.4 组织管理形式	44
六、项目经费估算及资金筹措情况	46
七、预期目标、成果提供形式及经济社会效益	47
7.1 项目预期目标	47
7.2 提交的研究成果及其形式	47
7.3 经济、社会、环境效益分析	51
八、其它需要说明的问题	50
九、申请单位意见	51

黄土地区公路桥梁挤扩支盘桩 成套技术研究

一、项目研究的背景和必要性

我国黄土分布面积为 63 万平方公里，占世界黄土分布面积的 4.9%，约占全国陆地总面积的 6.63%，其中湿陷性黄土的面积就高达 38 万平方公里，约占黄土分布总面积的 3/4。黄土地区的土质条件受湿陷性影响，土质强度差异显著，而在桩基工程中，黄土的湿陷沉降特性更是造成桩基负摩阻力产生的主要原因，使得该区域桩基设计、施工均区别于其它地区。值得注意的是，黄土的湿陷沉降与固结沉降存在本质区别，其负摩阻力问题也与软土、填土地基上的负摩阻力问题差异明显，这进一步加剧了黄土地区桩基础设计的复杂性。在黄土地区，尤其是湿软性黄土地区进行桩基础设计时，面临着诸多问题与挑战，其中桩基础的承载力、沉降变形、负摩阻力及造价问题均为不可避免的核心要点，而超长桩施工及质量风险更是该区域桩基工程中突出的安全隐患。

常规桩基工程设计中，为满足结构安全及荷载要求，通常需采用更长桩长或更大桩径的原桩，这不仅导致施工工艺复杂、施工周期延长，更关键的是，超长桩在黄土地区湿陷性地质条件下，施工过程中易出现孔壁坍塌、桩身混凝土离析、桩底沉渣超标等质量问题，质量控制难度极大，安全风险居高不下，同时还存在经济性差的弊端。此外，传统桩基施工过程中会产生更多废弃物和污染物排放，对周边环境造成不利影响。

与普通等截面桩相比，挤扩支盘桩（图 1.1）的桩身结构、受力特性发生了根本变化，其最核心的优势的是能够大幅缩短桩长，这一特点在黄土地区桩基工程中具有不可替代的价值——可有效规避超长桩施工带来的各类质量隐患，降低施工难度，显著提升桩基施工质量与结构安全稳定性，从源头减少质量事故发生的可能性。同时，该桩型集合了摩擦桩和端承桩的优点，在缩短桩长的基础上，仍具备高承载力、低沉降、低造价、低排放等特点，经济效益、生态效益显著。

目前，挤扩支盘桩在黄土地区陕西省内公路桥梁工程中尚无应用先例，其勘察-设计-施工-检测监测等全周期技术规范尚处于空白阶段。因此，展开对黄土地区公路桥梁挤扩支盘桩技术的一系列研究，核心意义在于依托其缩短桩长的优势，为黄土地区规避超长桩施工及质量风险、提升桩基质量安全提供切实可行的技术路径，同时为该地区黄土地质条件下桩基工程的勘察、设计、施工、检测监测提供科学依据，为制定相关标准提供支撑，积累宝贵的工程应用数据。此外，该研究还能为推动黄土地区桥梁桩基工程新质生产力发展提供技术支持和经验总结，对绿色公路工程技术发展产生深远影响。该技术已在诸多非黄土地区大量推广，展现出优良的承载性能、巨大的发展潜力及显著的社会、经济、环境效益，加快其在黄土地区（尤其是陕西省内）实际工程中的试验及应用研究，将进一步放大其质量安全价值与综合效益。

综上所述，结合宝鸡黄土地区在建公路桥梁，开展“黄土地区公路桥梁挤扩支盘桩成套技术研究”，核心是通过该技术缩短桩长的优

势，破解黄土地地区超长桩施工及质量风险难题、提升工程质量安全，进而全面提升工程经济效益、社会效益和环境友好性，具有重要的现实意义和深远的社会影响。

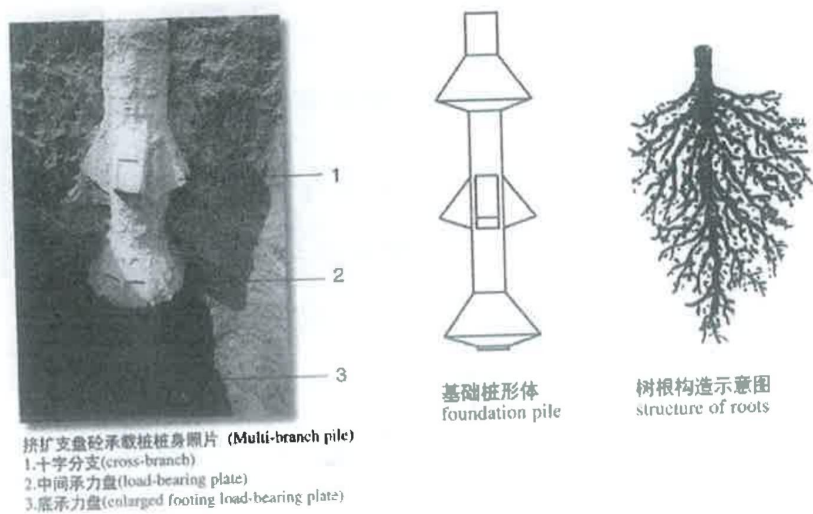


图 1.1 挤扩支盘桩示意图

二、前期科研及工作基础

2.1 国内外研究现状

(1) 挤扩支盘桩的提出

挤扩支盘桩的专利技术包括两大部分,其一为该桩型及工艺的发明专利;其二为完成该桩型的机械设备的实用新型专利,这两项专利技术在 20 世纪 80 年代末由张俊生高级工程师取得,与此同时,他还在欧洲、美国、加拿大、日本和泰国申请并获得了专利。截止目前,挤扩支盘桩技术在中国已有十几项相关专利,《人民日报》、《工人日报》以及《中央电视台》等多家新闻媒体都对这项专利技术进行过报道。1992 年,挤扩支盘桩首次在我国投入使用,截止目前,该技术已被应用于北京、天津、江苏、浙江等十多个省市的 100 多项工程中,并且其在提高桩基承载力、提高施工安全性、降低工程造价和缩短工期等诸多方面都取得了显著效果^[1]。

国家科委于 1998 年 4 月将挤扩支盘桩技术纳入“重点国家级火炬计划项目”,1998 年 11 月科技部、税务总局、对外贸易经济合作部、质量技术监督局、环保总局等单位将挤扩支盘桩及设备纳入“国家重点新产品”,并列入《建筑施工手册》和《地基基础施工手册》。目前挤扩支盘桩在电力、交通等行业也得到大规模的推广应用。

(2) 国内关于挤扩支盘桩的研究现状

自从 1992 年挤扩支盘桩在我国投入使用,这二十几年来该技术迅速发展并取得了丰硕的研究成果。

1) 单桩竖向承载力预估

作为一种承力构件,挤扩支盘桩在诞生之后,诸多专家学者不免要对其单桩竖向承载力预估进行深入研究和探讨,其中不乏一些工程师结合工程背景对其竖向承载力进行过对比验证。大多数学者认为,挤扩支盘桩的竖向承载力包括三部分:桩侧摩阻力、承力盘端阻力以及桩端阻力,并且都是根据桩周土体的物理条件参数、极限侧阻力标准值及极限端阻力标准值对挤扩支盘桩的承载力公示进行预估和评价,本文按照时间先后顺序,依次介绍了几个具有代表性的公式,例如:1997年,为了对挤扩支盘桩的单桩承载力进行计算分析,史鸿林等^[2]充分考虑了支盘增加的侧摩阻力减去被支盘占去的直杆桩侧摩阻力以及挤密效应对承载力的有利影响,对17组挤扩支盘桩试桩做了原型荷载试验,并提出下列公式:

$$R_k = R_{sk} + R_{pk} = \mu_p \sum q_{si} l_i + \sum m_i q_{si} h(a-b) + q_a A_p + \sum m_i q_{pi} \beta_{ab} \quad (1-1)$$

2000年,为了分析挤扩支盘桩的变形破坏机理,吴兴龙等^[3]做了大量现场测试,通过数值计算和理论分析的方法,提出了如下公式:

$$Q_{\mu k} = Q_{zk} + \eta Q_{Bk} + Q_{pk} = U \sum_{i=1}^n \psi_{si} q_{sik} l_{ei} + \eta \sum_{j=1}^n \psi_{Bj} q_{Bjk} A_{Bj} + q_{pk} A_p \quad (1-2)$$

式中, ψ_{si} 为桩侧摩阻力综合修正系数,包括施工影响系数和桩侧阻力尺寸效应; ψ_{Bj} 为支盘端阻力综合修正系数,包括施工影响,尺寸修正系数和支盘盘间净距折减系数。

2001年,吴军帅^[4]给出的单桩承载力计算公式如下:

$$Q_{\mu k} = Q_{sk} + Q_{pk} = \mu \sum q_{sik} l_i + \sum \psi_j q_{pj k} A_{pj} \quad (1-3)$$

上式主要采用综合影响系数 ψ_j 对支、盘处的端阻力进行了折减。

2003年,作为挤扩支盘桩研究方面的权威专家,钱德玲博士在

其著名的《变截面桩与土的相互作用机理》^[5]这本书中,全面详细地介绍了挤扩支盘桩的工作机理和荷载传递性状,大胆地提出了用经验公式计算其单桩承载力,明确地标明各种修正系数的选取方法,并通过一系列试验辅助验证。她提出的单桩承载力计算公式如下:

$$Q_k = \xi Q_{sk} + Q_{pk} + \eta Q_{zk} = \xi U \sum q_{ski} l_i + q_{pk} A_k + \eta \sum q_{zkj} A_{zj} \quad (1-4)$$

式中, ξ 为小于 1 的摩阻力修正系数; η 为大于 1 的支盘端阻力修正系数。其具体取值还应综合考虑承力盘间距以及桩周土层性质。

2003 年,巨玉文等^[6]通过静载试验验证了山西金石建筑安装工程有限公司编制的《挤扩多分支承力盘混凝土灌注桩基础工程设计规程》中的关于承载力计算公式:

$$Q_u = U \sum q_{sik} l_{ei} + \sum \beta_i \psi_{pi} q_{pi} A_{pi} b_i + \psi_p q_{pk} A_p \quad (1-5)$$

2) 挤扩支盘桩荷载传递特性研究

由于挤扩支盘桩从桩型结构上发生了本质变化,因此,其荷载传递特性与普通灌注直桩必然不同。对于挤扩支盘桩的荷载传递特性,现有诸多现场试验说明:在竖向工作荷载作用下,其桩身应力随深度分布曲线在支盘上下端位置(即主桩与支盘相连位置)会发生急剧变化,支盘上端应力明显大于支盘下端应力,不难得知,该部分应力损失主要由支盘来承担。加载初期,桩顶荷载主要由第一个承力盘以上桩周摩阻力承担;继续加载,则桩身轴力向下传递至第一个承力盘;随着荷载逐渐增加,桩身轴力继续向下传递至第二个、第三个直至最后一个承力盘;加载最后,桩身轴力终于传递至桩端持力层。

1998 年,中国地质大学的黄根生运用荷载传递分析法,结合工

程实例对多级挤扩钻孔灌注桩的荷载传递特性进行了分析,并给出了承力扩大盘的荷载传递函数^[7]。1999年,崔江余通过挤扩支盘桩的试验研究,分析探讨了该新型桩荷载沿桩身传递规律,试验研究表明,挤扩支盘桩可满足工程上高层建筑承载力高,沉降量小的要求^[8]。2003年,钱德玲^[5]通过现场试验结合数值模拟的方法,对支盘桩的荷载传递特性进行了细致分析,她发现支盘桩具有支盘力大、侧阻力小的承力特点,盘体的承力特性有明显的时间效应和互补效应。2006年,北京工业大学的苑辉等在黄河三角洲地区对普通桩、支盘桩、分支桩进行了静载试验,结果表明:在荷载传递过程中,分支和支盘分担了大部分荷载,桩段只承担小部分荷载^[9]。2002年,中核大地工程总公司高级工程师杨志龙,天津市岩土工程教授顾晓鲁等,根据挤扩多支盘混凝土灌注桩的现场静载荷试验结果,分析多支盘桩的荷载传递机理。试验结果表明,随着竖向荷载的增加,由上到下各承力盘或分支先后发挥其端承作用;各承力盘或分支上、下一定范围内桩侧摩阻力不能发挥出来^[10]。2011年,吉林大学地质工程的谢新颖博士,利用大型有限元软件 ANSYS 分析了挤扩多盘桩的影响因素,同时利用实际工程现场的原状土进行试验分析,得出桩—土间剪应力和位移关系的函数,提出承载力理论分析方法,同时建立刚塑性模型并求出摩擦系数,推导侧摩阻力极限承载力公式,为挤扩多盘桩的研究提供参考^[11]。

3) 挤扩支盘桩挤扩效应研究

挤扩支盘桩的支和盘主要通过专用挤扩装置,液压挤密成承力支

盘。首先,设计好并选定设置支盘的土层;其次,利用挤扩装置对该土层强力挤压形成支盘状空穴;最后在支盘状空穴中灌注混凝土形成支盘。

2001年,卢成原等通过对挤扩支盘桩的桩周土体进行室内土工试验分析,得出支盘对桩周土体的挤密效应所引起的桩周土干密度的变化规律,他认为挤扩设备在施工过程中,桩周一定范围内的土体所受到的挤密作用较为显著,超过这个范围,则挤密效应几乎可以忽略,并且挤密作用可以使该范围内土体的干密度增大20%以上^[9]。吴兴龙考虑DX桩的实际受力性状,得出了桩基承载力扩大盘周边土体的应力应变及位移分析的解析解,基本反映了土体在挤扩过程中的运动规律,并分析了DX桩承载力扩大盘(或支)的形成机理^[10]。崔江余通过36根室内模型桩和2根足尺挤扩桩的试验研究,分析探讨挤扩桩的受力机理及承载力性状,同时收集调研了21根工程挤扩桩试验资料,他认为支盘成型挤密的影响范围为:水平方向在距桩孔外1.0m以内,垂直方向在0.5m以内^[11]。

4) 影响挤扩支盘桩承载力因素研究

作为一种“年轻”的桩型,挤扩支盘桩的受力机理和荷载传递特性与普通灌注等截面直桩有着本质区别,这种区别的产生和诸多因素有关,例如主要组成部分主桩的施工,使承载力显著提高的支盘的位置、大小、形状、尺寸以及间距,桩体周围土体的性质等。

李连祥等通过对现场试验进行有限元模拟,并以此设计了34组对比模型,全面深入地研究了支盘桩的承载性状,得出支盘桩后期承

承载力与扩径体位置有关；桩基承载力提高与扩径体数量有关，且扩径体数量并不是设置越多越好，扩径体数量，间距过小反而会影响桩基承载力和扩径端阻力的发挥。因此，为使其承载力最大程度提高、经济性达到最优，他建议最佳扩径体数量为 2~3 个^[12]。钱永梅^[16]等结合理论分析与试验研究两种方法，对影响多支盘桩承载力的因素进行了细致的定量和定性分析，她认为承力盘的直径、形式、位置、数量、间距等都会对多支盘桩的承载力产生不同程度影响。杨志龙等^[10]认为在密实土中，盘的临界间距值应取 $l_{cr} = 5d$ 或 $2.5d$ ，分支间或分支与承力盘间取 $l_{cr} = 4d$ 或 $2.0d$ ；在稍松软土中，盘的临界间距值应取 $l_{cr} = 4d$ 或 $2.0d$ ，分支间或分支与承力盘间取 $2l_{cr} = 3d$ 或 $1.5d$ ；承力盘或分支间距宜不小于 $(4 \sim 6)d$ 。

5) 挤扩支盘桩沉降研究

作为一种主要的抵抗竖向荷载的构件，桩基极限承载力的确定准则几乎都是以变形量来控制的。目前，对于挤扩支盘桩的沉降计算的研究资料较为有限，一般认为支盘桩的沉降由桩身材料的压缩量 s_e 、分支或承力盘的压密变性位移 s_p 以及桩端对土的变形 s_d 这三部分组成。

高笑娟等^[17]对三根处于湿陷性黄土中的支盘桩进行了足尺现场静载荷试验，试验场地湿陷土层厚度不宜，在 300kPa 压力下湿陷性土下陷深度约为 11.6~12.6m，Q—S 曲线为缓变型，当桩达到极限荷载时，最下盘和桩端仍然有比较大的承载潜力，即挤扩支盘桩在工作荷载下有比较大的安全储备。蒋建平^[18]等对 8 个场地中共 22 根现场

试验桩的实测资料进行了优化拟合分析,验证了支盘桩的缓变型沉降曲线,并构建幂函数—双曲线组合数学模型对沉降曲线进行预测。吴永红博士根据多支支盘孔灌注桩的受力机理,应用分层总和法计算沉降的概念,提出了一种多支盘钻孔灌注桩基础沉降计算理论与方法,并编制了相应的计算软件,计算值与实测结果吻合较好^[19]。

6) 挤扩支盘桩设计以及现场施工的经验总结

虽然挤扩支盘桩从实际投入使用到现在只有短短二十几年时间,但是其却在全国各个省市特别是在一些软土地区,得到不断地推广应用,并取得了很好的应用效果,因而也积累了不少宝贵经验。

针对应用于湿陷性黄土地基中的挤扩支盘桩,高笑娟^[20]等对其施工过程和受力特点进行了详尽描述,她认为桩侧阻力及端阻力(包括扩径端阻力及桩端阻力)的发挥会随着加载过程逐渐达到稳定状态,承力盘承担了大部分荷载,而只有很少部分荷载传到桩端;她还指出当水平受荷时,承力支盘宜设置在上层较好土层中。刘建涛等介绍了挤扩支盘桩的施工工艺,结合厂房现场施工过程中遇到的问题,提出施工时的注意事项,并分析了支盘桩与普通灌注桩的异同点、经济性,认为支盘位置、间距、数量等因素对桩的极限承载力有直接影响^[22]。

7) 挤扩支盘桩的现行规范

由于目前挤扩支盘桩正处于一个不断探索和发展的推广和上升阶段,因而对于其受力机制、荷载传递特性、极限承载力计算、支盘间距等的理论确定方法和工程推广部等有着不同的认识、解释和经验。但是对于建筑行业,新结构的投入使用与推广必须有一套大家都

认同的规程准则，以确保工程质量。因此，针对各地方甚至各工程的实际情况，部分地区及行业编制了详细的设计、施工、质量检测和验收评定标准，如：1997年天津市城乡建设管理委员会审定了《挤扩多支盘灌注桩基础设计与施工规程》^[23]。1997年4月，《建筑地基与基础施工手册》^[24]第三版第3卷第12章，在“地基与基础的泥浆护壁成孔灌注桩”（第508页）中编入了《多分支承力盘灌注桩》相关内容。1997年7月，在《建筑地基与基础施工手册》^[24]关于混凝土灌注桩的说明中，也编入《多分支承力盘灌注桩》的章节，内容包括支盘桩的特点、适用范围、工艺工法、承载力计算、质量要求、工程实例、效果评价等。2000年国家电力公司电力规划设计总院审定的《火力发电厂支盘灌注桩暂行技术规定》^[25]（DLGJ153-2000）成为第一部支盘桩技术规范用于指导全国行业性工程应用的标志性文件，并于2000年5月1日在系统内正式使用。2002年，河北省工程建设标准《DX挤扩灌注桩技术规程》^[26]正式颁布。2003年，浙江省《挤扩支盘混凝土灌注桩技术规程》^[27]正式颁布执行，成为支盘桩技术在华东地区建筑工程应用的首例技术标准文件。2005年实施的浙江省工程建设标准《挤扩支盘灌注桩技术规程》^[28]。

8) 交通工程方面的应用

在交通工程领域，1998年~2003年，完成了挤扩支盘桩北京城市轨道交通工程中应用与研究，开创了支盘桩在较大动载工作条件下、超小沉降变形的理论设计和施工技术；依托宁波绕城匝道桥工程中的成功应用，浙江省颁布了《公路桥涵挤扩支盘桩工程技术规范》地标，

首次对大直径挤扩支盘桩设计、施工、设备及验收等作出规范性说明，但宁波绕城仅在部分匝道桥应用了该技术，表明业界对新技术的应用和推广尚存疑虑；在 2013 年，交通运输行业标准《桥梁挤扩支盘桩》（JTJ/T855-2013）发布，标志着挤扩支盘桩在桥梁桩基应用条件趋于成熟。但直到潮汕环线高速公路项目，挤扩支盘桩才开始大范围应用于主桥，该项目全线共约 800 根支盘桩，桩径最大达 1.8m，盘径 2.5m，同时依托工程针对支盘桩理论研究、检测技术滞后的问题，开展了大量设计、施工及检测等方面课题研究。

在挤扩支盘灌注桩技术理论研究方面也做了大量工作。1992 年，北京交通大学唐业清教授主持完成支盘桩相关的多项课题研究，根据不同支盘间距、支盘数量设计了 18 组物理模型，并获得大量实验数据，总结不同工况下的支盘桩基承载力和计算公式，为支盘桩推广应用提供重要依据。1994 年在中国水利水电科学研究院主持下，对挤扩支盘带来的土质挤密效果进行了 72 组试验，得出了不同土层下挤密效果和成型规律。1995 年，在天津大学顾晓鲁教授，依托天津沿海软土地地区地质条件，主持开展了大量支盘桩承载机理的试验研究，并对承载效果进行评估分析，同时与北勘院合作进行了大量试桩试验，进一步丰富了软土地基支盘桩设计计算方法，为支盘桩在软土地基中的应用奠定理论基础。近些年，对挤扩支盘桩的理论和应用研究又进入一个新阶段。在桩基沉降计算理论逐步形成荷载传递法、弹性理论 Mindlin 法、GeddeS 法、剪切变形传递法、有限元法及其它一些简化方法，此外对于挤扩支盘桩的承载特性、支盘荷载分担机理及时

序特性、支盘抗剪特性、抵抗水平力以及应用推广经济性和市场化等方面均进行了广泛研究。

此外，张德华、徐至钧、张国栋、钱德玲、王训波、毕小兵、张肖峰、潘玲、唐松涛等行业专家采用了理论分析、现场试验、模型试验、数值分析等多种手段，对支盘桩承载特性、受力机理、沉降机理、影响因素、关键设计参数等进行了大量的研究工作，获得的成果对本项目设计课题的研究具有重要的指导意义，以上专家的相关研究成果不再复述。土体受到扰动后，其结构性受到了影响，相应的物理力学指标都会改变。通常简称土体受扰动的程度为扰动度，如何建立能够正确反映土体物理力学参数改变量与扰动度之间关系的函数（简称扰动函数）成为土体扰动理论研究的关键。

9) 孔壁稳定理论及措施研究现状

在钻孔灌注桩钻孔施工过程中，土体的平衡遭到破坏，土中应力状态和物理状态都发生了变化。这种变化又反作用于孔壁，会对桩基础的稳定和变形产生明显的影响，所以需要孔壁进行力学分析。对于这个方面已经有了一定的研究：

罗绍明、朱文鉴从理论上分析并结合实践经验，提出了大口径钻孔桩孔壁稳定的3个条件，即静力平衡、地质渗流、时间因素，在此基础上分析了影响孔壁稳定的各种客观、工艺、环境及人为因素，给出了预防和处理孔壁坍塌事故的措施。

陈国灿将钻孔灌注桩成孔后的分层土体受力作的问题抽象为带圆柱形孔的分层土体受自重、均面荷载和泥浆压力作用的问题，尔后

应用弹性理和塑性力学中的屈服准则导出了钻孔灌注桩在施过程中孔壁稳定的条件，并在工程中得到了应用。

徐奋强、王旭利用极限分析原理对土体中泥浆护壁深钻孔的极限孔深问题进行计算研究。计算中考虑了护壁泥浆的工作机理、泥浆性质、孔径等对孔深的影响。得出结论:泥浆护壁深钻孔的极限孔深随泥浆比重及孔壁土体内摩擦角的增加而增大，随孔径的增加而减小。

胡晓敏、李之达通过成孔过程中的孔边应力分析，得到桩孔孔边应力的解析表达式，表明适当深度的泥浆护壁可以缓解孔边应力。通过对成孔过程的破坏分析，提出了桩孔中泥浆最小、最大深度的概念，并依此判断孔壁稳定性。通过调整泥浆的深度，可以有效地防止桩孔坍塌;当钻进到某一高程，桩孔中所要求的泥浆最大深度小于最小深度要求时，建议采取护筒护壁措施。

李小青、郝行舟、朱宏平、赵文光等认为从钻孔灌注桩钻孔过程来看，由于地层土压力、孔隙水压力、地下水位及土体的蠕变等因素的影响，在成孔过程中或混凝土浇筑之前，孔壁处于不稳定状态之中，随时会出现滑裂或坍塌的危险。所以结合重阳大桥钻孔灌注桩工程，在分析孔壁稳定条件的基础上，进行不同土层的钻孔孔壁稳定性分析，同时分析孔内泥浆的稳定护壁作用及功能，建立孔壁稳定性数学分析模型，提出相应的护壁措施，防止孔壁的坍塌。

挤扩支盘桩在盘腔挤扩成型后，由于形成较大的临空空腔，极易发生塌孔事故，对支盘桩承载力发挥影响显著，目前孔壁稳定性控制技术主要包括下放护筒和泥浆护壁两种防塌孔技术，但对于盘腔体的

稳定性控制还没有形成一套完整的工法或控制技术体系,对此本课题在前人研究基础上,开展相关研究。

10) 桩身完整性检测研究现状

目前桥梁挤扩支盘桩设计、施工及应用具有一定的工作基础,但成品质量检测已经成为技术大范围推广的一项重要制约因素。尤其支盘体作为重要的受力结构,且完整性检测技术尚未成熟,而热异常检测技术虽然可行,但成本太高,且检测设备受国外技术封锁,当前阶段大面积推广尚存在一定困难。对此,研究一种既有效,成本又合理的完整性检测技术,成为当前研究工作当务之急,也为形成桥梁挤扩支盘桩完整技术体系奠定基础。

在桩基检测方面,目前国内外采用的桩基工程检测的主要方法有静载荷试验法、低应变法、高应变法、声波透射法、钻孔取芯法等。尽管桩基完整性检测技术的应用已经逐步趋于成熟,但各种方法都有相应的优缺点和局限性,一般情况应当选用多种方法对同一桩基进行检测,使相关施工更安全高效。尤其随着各种新型桩型的出现,以及项目现场对桩基检测技术越来越高的要求,传统的桩基检测方法往往无法满足检测要求,需要不断对桩基承载力及完整性检测技术更新和突破。

本文结合工程实际应用情况,针对挤扩支盘桩传统工后成品检测可靠性差的问题,结合事前井径仪盘腔形状检测,事后声波透射法、管波测试法、跨孔 CT 法、单孔地震波法等多项技术,对支盘桩检测技术进行研究,从方案可行性、技术可靠性及经济合理性等角度综合

分析和评价，为支盘桩成套检测技术体系的形成奠定基础。

③国外关于挤扩支盘桩的研究现状

由前文已知，20 世纪 80 年代，挤扩支盘桩技术最先在中国发展起来的，其发展推广时间仅二十几年，所以目前国外可检索到的真正关于挤扩支盘桩的相关文献还比较少，但总归可找到一些类似工作性能的桩型的文献。1969 年，印度的 D.Mphan 对变截面桩进行过小规模的应用，并探讨过其最佳扩大盘间距，然而由于当时施工机械设备和认识水平的限制，这一技术并未得到进一步推广^[29]。Ogura.H^[31]等研究了一种类似竹节桩的桩型在砂土中的模型试验，对其荷载—沉降曲线进行了理论分析，并发现与相同直径相同长度的直桩相比，该竹节桩的承载力显著提高。

综上所述，挤扩支盘桩主要应用于软土地区，黄土地层中应用相对较少，仅在洛阳三门峡^[17]某电厂黄河 III 级阶地上开展了挤扩支盘桩试桩试验，支盘桩具有较好的承载性能，但是支盘的施工工艺及质量控制均未见相关报道。黄土地层物理力学特性明显不同于软土地层，例如广东沿海软土地区孔隙比 0.9~2.8，含水率 30%~108%，压缩模量在 1.5~4.0MPa，塑性指数 10%~31%；其中关中地区黄土含水率 12%~25%，孔隙比 0.7~1.3，塑性指数 10%~20%，压缩模量 7~20MPa。

因此，黄土地区桥梁工程中挤扩支盘桩应用还存在以下技术难点：

1) 黄土地区挤扩支盘桩支盘施工工艺

黄土地层的含水率及塑性指数明显低于软土，可塑性较差，参照软土地区挤扩参数，支盘施工过程的挤扩压力、挤扩尺寸、孔壁稳定性等需要通过现场试桩试验进行论证。若挤扩成盘（支）工艺稳定性差、效率低，则需要结合黄土地层特征充分论证其扩孔成盘避免塌孔的可行性工艺方法。

2) 黄土地区挤扩支盘桩竖向承载特性及影响因素

挤扩支盘桩竖向承载特性主要包括侧摩阻力、桩端阻力、支盘阻力，其中支盘阻力与土的性质密切相关，黄土的压缩模量显著高于软土，支盘阻力在竖向承载特性占比显著提升，可有效降低桩长。

3) 黄土地区挤扩支盘桩支盘完整性及长期性能

支盘完整性直接影响灌注桩竖向承载力，因此，支盘完整性是设计师关注的重点。支盘完整性的检测方法、检测仪器、检测指标及评定标准，目前缺乏相应的标准；相比常规灌注桩，支盘桩桩身长期受力及沉降变形需要结合依托工程进行监测，并与常规灌注桩进行对比。

2.2 项目前期科研及现有工作条件

(1) 项目的支撑条件

项目已经由陕西省交通运输厅立项，依托工程是 310 国道眉县至渭滨高家镇公路工程。项目组已对项目桥梁工程灌注桩进行了统计，并沿线桥梁所处地层进行了分类。陕西省交通运输厅及陕西交通控股集团有限公司分别对项目给予了科研补助，陕西省交通规划设计研究院有限公司提供现场试验条件。

(2) 过去相关研究的工作基础

课题组结合潮汕京灶大桥挤扩支盘桩的实际应用情况,取京灶枢纽互通主线桥变径桩 12#-1 的试验数据,采用 ABAQUS 有限元软件对多支盘挤扩支盘桩开展数值模拟分析;考虑到实际土层挤密效应与边界效应对模型精度的影响,将实际工程挤扩支盘桩沉降变形曲线与有限元结果进行对比分析,验证了模型的实用性;在此基础上,对传统灌注桩与挤扩支盘桩的荷载传递特性、沉降特性进行了对比分析。论文成果发表在《建筑科学与工程学报》(2025 年 7 月)、2024 世界交通运输大会(WTC2024)论文集(公路工程)。



(3) 相关获奖情况

课题组在桥梁桩基开展了近二十年研究,取得了多项研究成果,并获得省部级(学会)多项奖项。

①2024 年“黄土地地区公路桥梁后压浆灌注桩承载性状与智能压

浆装备开发及应用”获得中国公路学会三等奖；

②2024年“高寒盐沼区桩基韧性设计理论及建造关键技术”获得青海省科技进步三等奖；

③2017年“多雨冲沟区在役桥梁桩基工程安全评价及其维护技术研究”获得中国公路学会三等奖；

④2017年“在役黄河下承式钢管混凝土系杆拱桥桩基安全保证关键技术”获得河南省交通运输科学一等奖。





(4) 现有的试验手段（设施、设备）

课题承担单位是陕西省交通规划设计研究院有限公司，协助单位是长安大学。

陕西省交通规划设计研究院有限公司，依托国家级博士后科研工作站、陕西省企业技术中心及陕西省工程技术研究中心开展研究工作。此外，公司建有西安市绿色智能交通工程研究中心、西安市智慧与低碳交通工程技术研究中心、BIM 技术与全装配结构研究中心、桥梁标准化构件设计创新工作室、半山一水·低碳景观创新工作室等为本项目提供技术和人才支持，以岩土工程、桥梁工程专业技术人员为骨干成立课题组，力争将科研成果产业化，提升桩基工程质量与效率。

长安大学拥有国家发改委“公路与桥梁高效养护及安全耐久性国家工程研究中心”、教育部“特殊地区公路工程教育部重点实验室”、

陕西省“陕西省公路桥梁与隧道重点实验室”等研究平台。实验室拥有完成本项目相关的仪器设备，例如：

①桩基静载与自平衡加载试验系统：含反力架与大吨位液压千斤顶，最大加载可达 50MN，用于桩基承载力与变形特性测试；

②基桩低应变、高应变检测系统：低应变测试桩身完整性，高应变测试竖向承载力，适配桥梁桩基无损检测；

③土工离心模型试验系统：最大离心加速度 150g，可模拟桥梁基础在复杂应力下的变形与稳定，支撑基础沉降与边坡稳定研究；

④3000kN 岩土材料万能试验机：用于桥梁基础岩土、混凝土材料力学性能测试；

⑤高精度静动态数据采集系统(含 32 通道超低频动态测试系统、TDS-602 系统)：精准采集基础结构受力与变形数据；

⑥大型桩基模型试验槽：可开展大比例桥梁桩基、沉井等基础模型的受力与施工模拟试验。

(6) 研究人员情况及协作条件

课题组由设计、施工、科研等人员组成，分工如下：

①项目负责人：负责整体项目规划，制定预期目标，落实科研经费及试验场地，做好课题研究过程中协调工作，监督课题完成进度，审核研究成果等；

②设计组：根据课题研究大纲，设计大比例模型桩，包括桩长、桩径、支盘直径、钢筋布置等，结合模型桩施工过程中存在问题完善设计，为后期工程桩设计提供依据；

③施工组：根据设计模型，选取有经验的施工技术人员参与模型桩施工，比较支盘施工工艺，包括挤扩、预固结扩孔等施工工艺，保证成盘质量及桩身完整性，为全线工程桩施工奠定基础；

④科研组：针对现场试桩，从施工便利性、可靠性、经济性等方面比较施工工艺，测试支盘桩承载特性，分析支盘桩承载能力主要影响因素及适用条件；结合现场静载试验，计算桩侧阻力、桩端阻力及支盘阻力，利用有限元软件得出黄土地层钻孔灌注桩合理的支盘设置，修正和完善规范计算公式。

⑤顾问组：聘请桥梁工程、岩土工程等专业方向的专家对本项目进行指导，特别是试验方案的制定、现场大比例模型桩施工、研究成果的审核等阶段，邀请专家顾问组进行严格把关，并提出项目存在的问题及改进措施。

2.3 参考文献

[1]潘雪峰.竖向荷载作用下挤扩支盘桩承载力试验研究和沉降计算[D].太原理工 大学,2003.

[2]史鸿林,胡林忠,王维雅等.新型挤压分支桩的计算与试验研究[J].建筑结构学 报.1997,18(1):49-54.

[3]吴兴龙,李光茂,魏章和.DX 桩单桩承载力设计分析[J].岩土工程学 报.2000(5):68-72.

[4]吴军帅.竖向荷载下支盘桩的荷载传递性状及承载力的确定[J].电力勘 测.2001(1):12-16.

[5]钱德玲.变截面桩与土的相互作用机理[M].合肥工业大学出版

社,2003.

[6]巨玉文,梁仁旺,白晓红等.挤扩支盘桩承载变形特性的试验研究及承载力计算 [J].工程力学.2003,20(6):34-38.

[7]黄生根.多级挤扩钻孔灌注桩的荷载传递特性分析[J].工程勘察,1998(5):19-21.

[8]杨锦东,崔江余,唐业清.挤扩支盘混凝土灌注桩现场试验研究[J].工业建筑,1999,29(10).

[9]苑辉,张延庆,屈展.液压挤扩分支/支盘桩承载性能试验研究[J].北京工业大学学报,2006,32(10):879-882.

[10]杨志龙,顾晓鲁,张国梁.挤扩多支盘混凝土灌注桩承载力试验研究[J].土木工程学报,2002,35(5):100-104.

[11]谢新颖.挤扩多盘桩极限承载力及桩—土间剪应力和位移关系研究[D].吉林大学,2011.

[12]卢成原,贾颖栋,周玲.重复荷载下模型支盘桩工程性状的试验研究[J].岩土力学,2008,29(2).

[13]吴兴龙,闫军,魏章.多节扩孔灌注桩的挤扩效应及形成机理[J].岩土工程技术,2000(1):29-32.

[14]崔江余,吕勤.挤扩支盘桩受力机理试验研究[J].铁道学报,2002,24(3).

[15]李连祥,李先军.不同扩径体数量、位置对支盘桩承载力的影响[J].山东大学学报(工学版),2016,46(5).

[16]钱永梅,尹新生,王若竹等.挤扩多盘桩承力扩大盘位置对单桩

承载力影响分析 [J].吉林建筑大学学报,2010,27(3):1-3.

[17]高笑娟.挤扩支盘桩承载性状试验和数值模拟分析[D].浙江大学,2007.

[18]蒋建平,高广运,刘文白.描述抗拔挤扩支盘桩 $Q-s$ 曲线的修正双曲线模型研究 [J].应用基础与工程科学学报,2010,18(6):999-1009.

[19]吴永红,郑刚,闫澍旺.多支盘钻孔灌注桩基础沉降计算理论与方法[J].岩土工程学报,2000,22(5).

[20]GaoXJ,WangJC,ZhuXR.Static load test and load transfer mechanism study of squeezed branch and plate pile in collapsible loess foundation[J].Journal of Zhejiang University(Science),2007,8(7):1110-1117.

[21]高笑娟,刘丰军,李跃辉等.挤扩支盘桩水平承载力计算和影响因素分析[J].工程力学,2009,26(7):97-104.

[22]刘建涛,张广亮,苏冠英.挤扩支盘桩在厂房基础中的应用[J].探矿工程(岩土 钻掘工程),2011,38(5):42-44.

[23]《挤扩多支盘灌注桩基础设计与施工规程》[S].北京,1997.

[24]《建筑地基与基础施工手册》[M].中国建筑工业出版社,1997.

[25]《火力发电厂支盘灌注桩暂行技术规定》(DLGL153-2000)[S].北京:中国建筑工业出版社,2000.

[26]《DX 挤扩灌注桩技术规程》(DB13-J37-2002) [S].北京:中国建筑工业出版社,2002.

[27]《挤扩支盘混凝土灌注桩技术规程》(DB33/T1012-2003) [S].
北京:中国建筑工业出版社,2003.

[28]《挤扩支盘灌注桩技术规程》(CECS192-2005) [S].北京:中国
建筑工业出版社,2005.

[29]Mohan D,Murthy V N S,Jain G S.Design and construction of
multi-under-reamed piles[A].In proceedings of the 7th International
Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico,
1969, Vol.2:183-186.

三、实施方案

拟解决的关键问题

(1) 支盘施工工艺

黄土相比于软土,可塑性较差,支盘施工工艺选择直接影响孔壁的稳定性,结合施工效率、支盘稳定性、经济和社会效益等指标比较压应力、剪应力主导的施工方式,选取黄土地层灌注桩支盘合理的施工工艺。

(2) 支盘阻力计算参数

结合现场试桩试验,测试分级荷载作用下桩身位移以及对应的桩身轴力,得出桩侧摩阻力、支盘阻力及桩端阻力与桩土相对位移之间的关系,结合现场孔内旁压试验及室内土体物理力学指标,修正黄土地层支盘阻力设计参数。

(3) 支盘完整性检测方法及评定标准

目前规范针对支盘完整性仅限于灌注混凝土之前进行检测,主要

检测手段是井径仪；对于工程技术人员，施工结束后支盘的完整性是关注重点。目前，支盘完整性检测还没有经济有效的检测手段，判断标准在国内外未见相关报道。

3.2 主要研究内容及实施方案

(1) 黄土地区支盘桩施工工艺及质量检测

研究内容

①黄土地区支盘桩支（盘）施工工艺及施工参数

黄土地层采用挤扩工艺成盘过程主要研究挤扩压力、挤扩变形、孔壁稳定性、挤扩前后土体干密度及压缩性变化；采用预固结旋扩工艺成盘过程主要研究高压旋喷最优水灰比、旋喷压力、加固体强度及加固体范围等，预加固结束后，采用旋扩设备成盘。

②黄土地区支盘桩支（盘）完整性检测方法及评定标准

支盘质量检测包括支盘直径（半径）、支盘厚度（高度）、支盘数量与间距、支盘位置，开发出无损检测方法及配套结构对以上参数进行检测；结合支盘完整性对承载力的影响程度，给出支盘完整性质量评定标准。

实施方案

采用大比例模型试验及现场试桩的方法开展支盘桩施工工艺及质量控制研究。

①挤扩支盘桩模型挤扩试验

支盘桩施工的核心矛盾聚焦于盘体成型质量的稳定性，模型实验需通过精准控制相似条件、量化黄土物理特性及施工参数对支盘施工

的影响,并探索适用于室内模型的盘体质量检测方法,为现场施工提供直接参考。

模型试验必须满足几何相似、材料相似、荷载相似等条件。试验系统组成包括:模型槽、支盘成型系统、数据采集系统、检测设备等。通过单因素试验和正交试验,重点研究黄土物理特性、施工参数、设备性能三大类因素对支盘施工的影响,其中黄土物理特性因素分为含水率、干密度、粘聚力、内摩擦角、颗粒级配等;施工参数影响因素分为扩张压力、扩张速率、分级扩张次数、清孔质量。盘体成型质量主要采用激光测距法、CT扫描法进行试验。

②支盘桩现场挤扩试验

对试桩场地开展黄土物理力学指标检测,明确黄土的密实状态。试桩参数包括桩径、支盘数量、支盘间距以及支盘直径等,桩身采用C30~C40钢筋混凝土,支盘与桩身同步浇筑,钢筋配置复合设计要求,桩端进入中密~密实土层 $\geq 2\text{m}$ 。

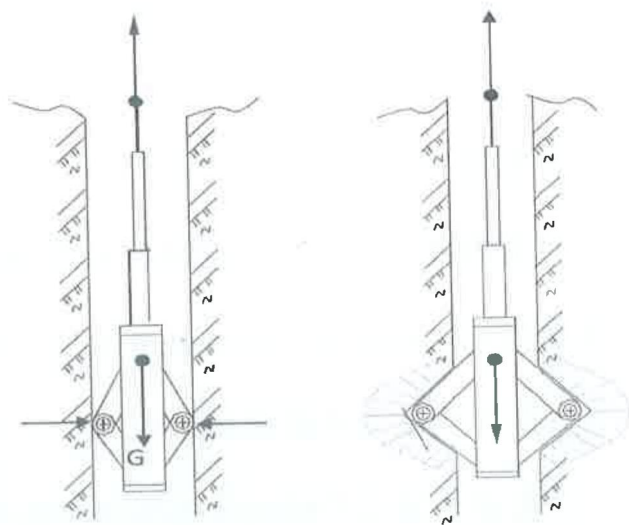


图 3.1 挤扩设备及工艺概念示意图

试桩采用单因素变量法,施工参数包括扩张压力、扩张速率、分

级次数，其中扩张压力分为 1.0MPa、1.2MPa、1.5MPa；速率分为 8mm/min、10 mm/min、12mm/min；分级次数分为 1 次、2 次。支盘挤扩过程中，监测压力变化、孔壁稳定性、盘体成型直径偏差；采用井径仪监测成孔后孔壁直径的变化，评估黄土密实状态对孔壁稳定性的影响；采用液压传感器监测支盘扩张压力，记录不同黄土状态下的压力峰值。

③支盘桩现场旋扩试验

由于黄土的可塑性明显低于软土，若模型试验和现场试桩试验过程支盘挤扩施工效率低、孔壁稳定性差，则采用预固结扩盘工艺，即对盘附近一定范围土体采用高压旋喷预加固，灌注桩钻孔结束后，采用旋扩设备在预加固土体冲旋扩成盘。

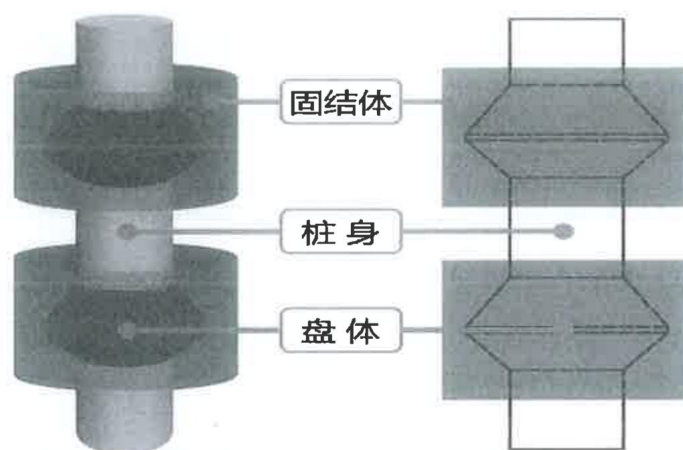


图 3.2 固结扩盘工艺概念示意图

首先明确硬塑、可塑黄土在不同参数下的高压旋喷加固效果，量化加固体 28d 无侧限抗压强度及有效加固直径，确定适配黄土的最优旋喷参数组合。黄土种类：硬塑、软塑；含水率：10%、17%、24%；旋喷压力：25MPa、35MPa、45MPa；水灰比：0.8:1、1:1、1.2:1。测试指标：强度检测和加固范围检测。养护 28d 后钻孔取芯，测试无侧

限抗压强度 ($\geq 2\text{MPa}$ 为合格); 测量不同深度处加固直径, 为盘体附近预固结最优范围提供依据。

灌注桩成孔结束后, 采用旋扩设备在预加固土体处扩盘施工, 记录扩盘过程施工扭矩及扩盘尺寸。施工结束后, 定时采用井径仪检测盘体尺寸, 判断孔壁的稳定性和完整性。钢筋笼下放前, 在钢筋笼固定超声波检测无缝钢管及支盘轮廓检测软塑管, 混凝土浇筑结束后, 采用高密度电磁法或热像仪法检测盘的完整性, 通过统计盘完整性检测数据与承载能力的相关性, 给出盘的完整性评定标准。

(2) 黄土地区支盘桩竖向承载力计算及设计方法

研究内容

① 竖向承载力主要影响因素及影响规律

支盘桩竖向承载力主要影响因素支盘位置、支盘数量、支盘直径、支盘处土体性质等, 以上述因素为变量, 开展模型试验和数值分析, 得出各个因素对支盘桩竖向承载力的影响规律, 为承载力计算及支盘桩设计提供依据。

② 竖向承载力计算修正公式

在《公路桥涵地基与基础设计规范》JTG3363-2019 基础上, 建立旁压试验及现场动探等原地基测试结果与室内物理力学指标的关系, 结合现场静载试验过程中桩土相对位移时对应侧摩阻力、端阻力及支盘阻力变化规律, 对支盘承载力特征值进行修正。

③ 黄土地区支盘桩设计方法

支盘桩设计方法中除常规钻孔灌注桩的设计外, 还包括支盘位

置、支盘直径、支盘间距以及支盘完整性检测配套结构等。支盘成盘工艺设计时，若采用挤扩工艺则包括挤扩设备的型号、挤扩压力及操作步骤；若采用旋扩工艺则包括高压旋喷加固范围、旋喷压力、水灰比、旋扩设备型号、旋扩半径等。

实施方案

①通过模型试验，验证支（盘）桩中盘体的竖向承载贡献，不同不同土层下盘体的合理间距。

模型几何相似比 1:10，容重相似比 1:10，采用缩尺桩（桩径 50mm，盘径 100mm/150mm，盘厚 10mm）与重塑土（粉质黏土/粉砂），模拟工程土层。设置无盘直桩对照组，及盘间距 6D、8D、10D（D 为盘径）的扩盘桩实验组，每组 3 根重复试件。

通过试验，计算盘体承载占比（盘体阻力/总承载力），绘制荷载—沉降曲线；对比不同盘间距组的极限承载力、沉降量，确定承载力峰值对应的合理间距；分析盘间土压缩量，绘制盘的沉降与承载力关系曲线，验证盘间土是否发生剪切破坏，避免间距过小导致的群盘效应。

②采用 Midas GTS/NUMECA，建立三维桩土模型。桩体采用实体单元（C30 混凝土，弹性模量 30GPa），土体采用摩尔库伦模型（模拟粉质黏土、粉砂等工程土层），盘体与土体接触设置接触面单元（切向刚度 100MPa/m，法向刚度 1000MPa/m）。几何参数：桩径 0.8m，盘径 1.6~2.4m，盘厚 0.2m，桩长 15~20m。

设置 4 组试验工况，每组 3 次参数迭代验证：

- 1) 无盘直桩对照组：验证盘体承载贡献基准值；
- 2) 单盘桩试验组：不同盘径（1.6/2.0/2.4m），分析盘径与承载力的相关性；
- 3) 多盘桩等间距组：盘间距 $6D$ 、 $8D$ 、 $10D$ （ D 为盘径），控制盘数 3 个；
- 4) 多盘桩变间距组：上密下疏（ $8D+10D+12D$ ）、上疏下密（ $12D+10D+8D$ ），模拟土层差异。

通过数值模拟，量化盘体承载贡献：计算各工况下盘体端阻占总承载力的比例，明确盘体对竖向承载的提升效应；确定合理间距范围：对比不同间距下桩顶荷载—沉降曲线、盘间土应力分布，判断盘间距土是否发生剪切破坏，确定无群盘效应且承载效率最高的间距区间；优化盘体布置策略：分析不同土层、不同间距形式下的桩身轴力、土体塑性区分布，提出适应土层特性的盘体间距与位置方案；验证参数敏感性，明确土层性质、环境因素对盘体承载及间距合理性的影响程度，为工程参数调整提供依据。

③结合模型试验和数值分析结果，结合现场试桩桩径、桩长、盘径、盘数量、盘间距（盘位置）等变量制定试验工况，测试工况下桩顶位移—荷载关系曲线、桩侧阻力—桩土相对位移关系曲线、盘阻力—盘土相对位移关系曲线、端阻力—桩端土相对位移关系曲线。根据现场测试结果，补充、完善黄土地区挤扩支盘桩承载力计算及设计方法。

(3) 黄土地区支盘桩沉降计算方法及长期稳定性

研究内容

①黄土地区支盘桩现场静载试验时分级荷载作用下桩顶沉降、桩身压缩变形、支盘及桩端压缩变形等；考虑支盘作用，建立支盘桩单桩沉降变形计算公式，针对实体桥梁工程中支盘桩的沉降变形进行理论计算，并与现场沉降监测结果进行对比。

②桥梁上部结构及车辆荷载作用下桩身内力分布规律，包括不同深度处桩身轴力、桩侧摩阻力、支盘阻力、桩端阻力等，以此估算出桩基承载能力的安全储备。

实施方案

①沉降计算方法

现有挤扩支盘桩沉降计算方法有等效直径法、改进分层总和法、数值模拟法、经验公式法。其中等效直径法:核心是将支盘结构等效为扩大直径的直桩，沿用传统直桩沉降计算公式。优点:计算逻辑简单、所需参数少且易获取，工程现场初步估算效率高；缺点:完全忽略支盘的空间分布形态、盘间土的协同受力与变形特性，无法匹配黄土地层高压缩性的变形规律，计算误差通常较大；改进分层总和法:通过叠加桩身弹性压缩量、桩端土分层压缩量及各盘端土分层压缩量得到总沉降。优点:兼顾土层分层特性，对桩-土变形的拆分更贴合实际；缺点:未量化不同支盘的承载贡献占比，未考虑黄土地层压缩模量随应力变化的特性，也未体现支盘对盘间土体压缩的约束作用，适配性不足；数值模拟法:借助有限元(如 MidaS GTS、ABAQUS)或有限差分软件构建桩-土耦合模型，模拟竖向荷载下的沉降过程。优点:可

精细刻画桩土相互作用、支盘受力分布及土体塑性变形,适用于复杂工况;缺点:对土体参数选取依赖性强,计算流程繁琐、成本高,需专业人员操作,难以直接应用于现场快速计算;经验公式法:基于特定区域的现场实测数据拟合回归得到计算式。优点:针对特定土层的计算精度较高;缺点:地域局限性强,公式参数未关联黄土地层压缩特性,难以直接迁移应用。

项目组拟基于改进分层总和法优化,核心思路是强化对黄土压缩特性的适配,具体如下:1) 沉降组成界定:总沉降=桩身弹性压缩量+各盘端土压缩量+桩端土压缩量,明确各组分的计算边界;2) 关键参数修正:引入支盘承载效率系数,量化不同位置、尺寸支盘的端阻贡献:基于黄土地层室内压缩试验($e-p$ 曲线),获取不同应力水平下的压缩模量,替代传统恒定压缩模量,匹配黄土压缩模量随应力变化的特性;引入约束系数修正盘间土压缩系数,反映支盘对周边土体压缩的抑制作用;3) 参数取值依据:通过室内固结试验、三轴压缩试验获取不同密实度黄土地层的压缩模量、泊松比、压缩系数等关键参数,确保参数贴合实际地层条件。

分别采用现有4种方法及构建的改进方法计算相同工况下的沉降值,与数值模拟结果及现场静载试验结果进行对比,计算相对误差,分析各方法误差来源。数值模拟采用 Midas GTS 建立三维桩-土耦合模型,桩体与支盘采用实体单元(C30 混凝土参数),土体采用摩尔-库伦模型,输入实测黄土地层物理力学参数;模拟竖向分级加载过程,获取顶荷载-沉降曲线及各关键部位变形数据。对比工况:不同支盘

间距($6D$ 、 $8D$ 、 $10D$, D 为盘径)、盘径($2d$ 、 $2.5d$ 、 $3d$, d 为桩径)及荷载等级工况,验证构建方法在多工况下的稳定性与适用范围。

②长期稳定性

通过长期现场监测,精准获取桥梁灌注桩在运营期的沉降变形数据及桩身竖向受力分布特征,明确沉降变形速率受力峰值位置及变化规律,建立稳定性评估指标体系,为桥梁桩基长期安全运维提供数据支撑与技术依据。

1) 监测对象:桥梁工程关键部位灌注桩(如主桥桥墩桩基、边跨承重桩基),选取不同桩长、不同地质条件的桩基作为典型监测桩(每组 3-5 根,确保代表性)。

2) 沉降变形监测

a. 监测指标:桩顶绝对沉降量、沉降速率、不均匀沉降差。

b. 测方法:采用“水准测量+自动化沉降监测仪”联合监测。水准测量:以桥梁工程首级水准点为基准,建立监测控制网,采用二等水准测量精度,定期(运营初期 1 次/月,稳定后 1 次/季度)测量桩顶监测点高程,计算沉降量;自动化沉降监测仪:在典型监测顶布设光纤光栅沉降计或振弦式沉降计,实时采集沉降数据(采样频率 1 次/天),通过无线传输系统上传数据,实现沉降变形的动态追踪。

c. 辅助监测:在桩周 3-5m 范围内布设土层沉降观测点,采用深层沉降仪监测不同深度土层沉降,排除土层整体沉降对桩基沉降的影响。

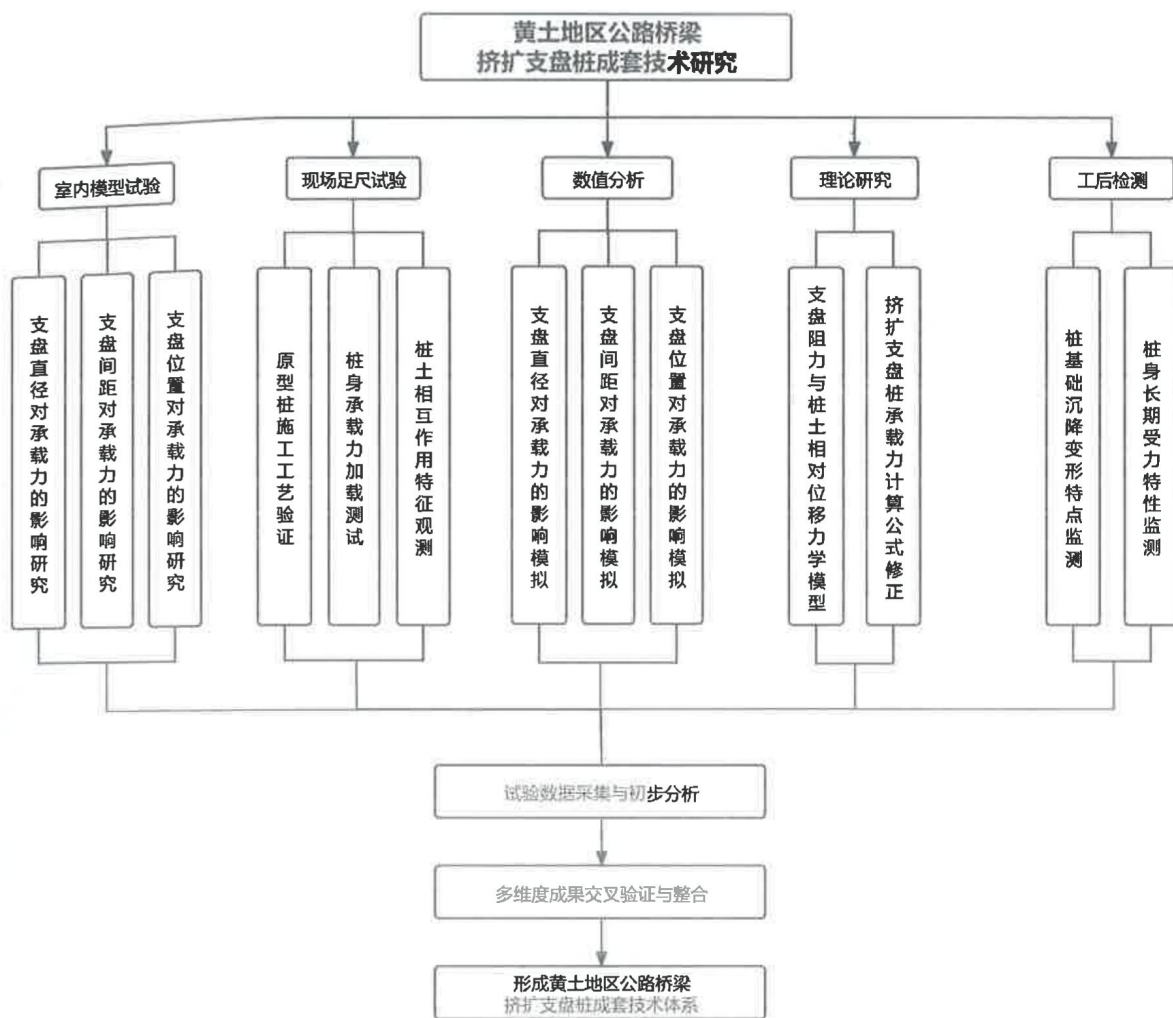
3) 桩身竖向受力监测

a. 监测指标:桩身轴力分布、最大轴力值、轴力变化幅度。

b. 监测方法:在桩基浇筑过程中预埋监测元件, 具体为:(1) 元件选型:选用振弦式钢筋应力计(适配混凝土环境, 耐腐蚀性强);(2) 布设位置:在顶下 $1/4$ 桩长、 $1/2$ 桩长、 $3/4$ 桩长及桩端上部等关键截面, 沿桩身均匀布设 3-4 个应力计(确保数据代表性);(3) 数据采集:运营初期 1 次/月, 稳定后 1 次/季度, 通过频率接收仪读取应力计数据, 结合钢筋弹性模量、截面面积换算为桩身轴力;对重点监测桩, 采用自动化数据采集系统, 实时传输轴力数据。

c. 辅助监测:同步监测桥梁上部结构荷载(如车辆荷载、桥面铺装重量变化), 建立荷载与身受力的关联关系。

3.3 技术路线



技术路线

3.4 后续技术改造或基本建设计划的衔接

(1) 黄土层预固结处理：针对黄土地层，采用 RJP/MJS 高压旋喷工艺在桩位及盘位处施工水泥土固结体，可围绕桩中心做咬合桩（ ≥ 4 根），深度至底盘下 $\geq 80\text{cm}$ ，水泥掺入比约 15%，水灰比 1，需要养护 7d 以上（可加早强剂缩短龄期），防止扩盘时塌腔。

(2) 旋扩设备适配与扩盘施工：常规钻机改装或换旋扩钻头/专用旋扩设备，钻孔至盘位处适当超钻，在固结体内旋切扩盘形成盘腔，控制盘径、盘高及垂直度，黄土地层需低速旋扩防孔壁失稳。

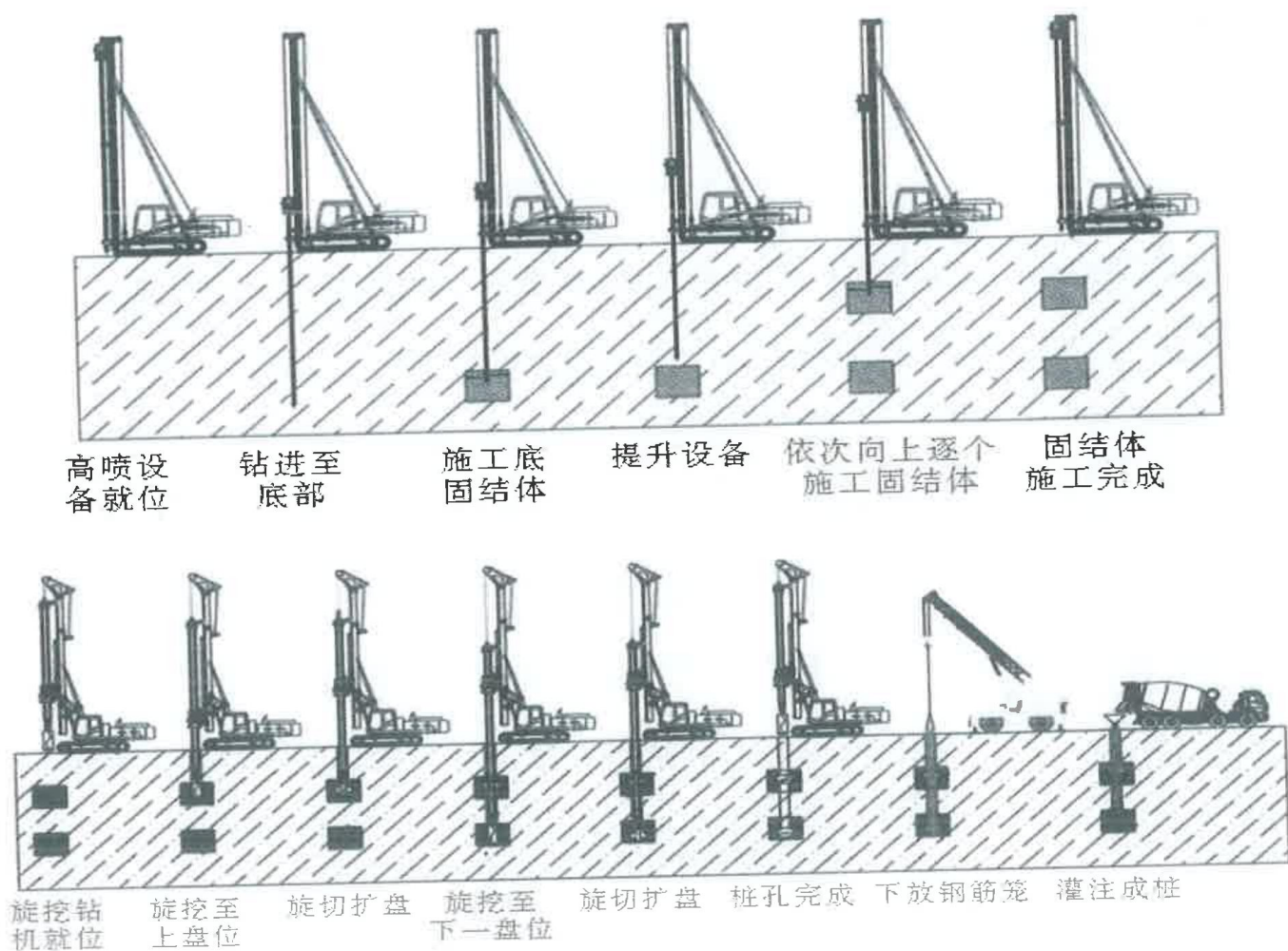


图 3.1 固结扩盘桩施工工序示意图

(3) 成盘质量专项检测：旋扩结束后采用井径仪检测孔壁尺寸；用超声波、钻孔成像等检测盘腔尺寸、圆整度、与固结体贴合度。

(4) 桩孔与清孔优化衔接：穿越固结体时调整钻进参数防卡钻，扩盘后清底，沉渣 $\leq 50\text{mm}$ ；黄土地层可采用干钻或低粘度泥浆护壁，避免湿陷。

(5) 钢筋笼与混凝土适配调整：钢筋笼增设盘处加强箍与抗剪筋，下放时避开固结体薄弱区；混凝土浇筑时控制导管理深，盘腔处放缓浇筑速度防离析，确保盘体充盈。

(6) 固结体与成桩工序衔接控制：先做固结体并养护达标，再

成孔扩盘，衔接时复测桩位与垂直度，避免扰动固结体。

3.5 有关技术经济指标

(1) 性能指标

①适用条件：适用于自重湿陷性或非自重湿陷性黄土层（湿陷等级 I~III 级），桩长大于 60 米，支盘、桩端持力层为非湿陷性黄土状粉质黏土或粉质黏土，承载力特征值 $\geq 180\text{kPa}$ 。

②施工及成盘质量指标：预固结体无侧限抗压强度 $\geq 2.5\text{MPa}$ ，养护 7d 强度达标率 $\geq 95\%$ ；扩盘直径偏差率 $\leq \pm 100\text{mm}$ ，盘高偏差 $\leq \pm 50\text{mm}$ ，盘位垂直度偏差 $\leq 1\%$ ；成盘质量检测合格率 $\geq 98\%$ 。

③承载及沉降性能：单桩竖向承载力较同直径常规钻孔灌注桩提高 60%~80%；在设计荷载作用下，沉降收敛时间 ≤ 3 年，单桩沉降量 $\leq 20\text{mm}$ ，长期稳定性满足 100 年使用要求。

(2) 技术经济指标

①造价指标：单位承载力造价较常规钻孔灌注桩降低 25%~35%；单桩施工成本（含预固结、扩盘、检测） < 1800 元/ m^3 （桩径 800~1200mm）；项目总造价较传统桩基方案节约 15%~20%。

②效率指标：单桩施工周期 $< 72\text{h}$ （含预固结养护），较常规工艺缩短 30%以上；施工设备台班效率 ≥ 2 根/台班（桩长 $\leq 25\text{m}$ ），成盘质量检测效率 > 5 根/天。

③技术适配指标：形成一套适配黄土地层的扩盘桩施工工艺规程及成盘质量检测标准；建立的竖向承载力计算方法、沉降计算模型可直接用于工程设计，设计参数选取范围覆盖桩径 600~1500mm、盘数

1~3 层、盘径 1.5~3.0 倍桩径；施工设备国产化率>95%，适配黄土层施工的专用旋扩钻头使用寿命 ≥ 500 根桩。

④环保及安全指标：施工过程中泥浆排放量较常规工艺减少 60%，固废回收率>90%；施工噪声<75dB(距设备 5m 处)，无塌孔、涌土等安全事故发生，施工安全达标率 100%。

四、项目承担单位及参加单位概况

4.1 单位概况

(1) 陕西省交通规划设计院有限公司

陕西省交通规划设计研究院有限公司，隶属陕西交控科技发展集团。公司拥有工程设计公路行业甲级，市政行业道路、桥梁、城市隧道工程专业甲级等 30 项资质。2009 年被认定为陕西省高新技术企业，2022 年入选国家“科改示范企业”名单。公司现有教授级高级职称 22 人，高级职称 285 人，中级职称 143 人，各类注册人员 192 人，陕西省勘察设计大师 1 人，陕西省优秀勘察设计师 2 人。

在已完成的勘察设计项目中，先后荣获国家优秀设计、优质工程、优秀咨询成果、詹天佑土木工程等省部级以上奖项 186 项；依托重点勘察设计项目取得的科研成果，分别荣获交通部科技进步奖、陕西省科学技术奖等奖项 27 项，取得发明专利和实用新型专利 133 项，软件著作权 31 项。

(2) 宝鸡市综合交通建设协调服务中心

宝鸡市综合交通建设协调服务中心是宝鸡市交通运输局下属的事业单位，其主要职能是承担全市高速公路、城际铁路等中省重大综合交通项目前期筹划、征迁协调和环境保护；负责市属重大交通项目建设的组织实施；开展全市重大交通建设招商项目融资、前期筹建以及项目建设期和运营期管理等事务性工作。内设机构 8 个，分别为办公室、宣传教育科、勘察设计科、资金管理科、工程技术管理科、质量安全监督科、征迁协调科、合作发展科。基层单位 2 个，即孙家公

路收费站和太白超限检测站。

(3) 长安大学

长安大学公路学院(公路科学研究院)是教育部直属的长安大学“211工程”重点建设的学院。学院科研实力雄厚,近五年来,先后获得国家、省部级科技奖励100余项,多项科研成果达到国际或国内领先水平,填补了诸多领域的空白。

学院现有公路桥梁与隧道陕西省重点实验室,实验室拥有一批国内一流水平的实验设施和检测系统,包括美国“MTS”公司的电液伺服闭合循环试验系统,英国“ELE”公司的自动马歇尔仪,丹麦“B·K”公司的测振试验系统,日本“三荣”、“共和”等公司的超级数据采集系统和信号处理系统等,为人才培养和科学研究提供了坚实的基础平台,同时也可为公路交通规划、勘测、设计、施工等部门提供优质高效的科技服务。

(4) 陕西交控市政路桥集团公司第一分公司

陕西交控市政路桥集团公司具备强大的技术优势,拥有专利24项、科技研发10项、技术创新成果应用于实践28项,编写3项地方标准,填补了国内交通安全设施工程地方标准的空白。先后荣获“中国公路养护工程奖”(青牛奖)、交通运输部优质工程“李春奖”3个、国家优质工程奖13个、“长安杯奖”(省优质工程)2个,得到陕西省政府嘉奖7次;获得过全国工人先锋号、交通运输行业文明单位、交通运输企业文化建设优秀单位、安全优秀班组、“守合同重信用”企业,陕西省工人先锋号、陕西省五一劳动奖状、“安康杯”竞赛优

胜单位、省级文明单位标兵、省级机关文明单位等 17 项集体荣誉称号；权属企业有陕西省文明单位 3 户、西安市文明单位 2 户。

4.2 技术力量及人员构成

姓 名	单 位	性 别	年 龄	技术职称	专 业	在项目中担任 具体工作
臧 斌	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	47	正高	桥梁工程	项目总负责
赵永昭	宝鸡市综合交通建设协调服务中心	男	54	副高级	桥梁工程	协助项目总体方案制定，审核课题阶段成果
赵斌云	宝鸡市综合交通建设协调服务中心	男	58	副高级	工程机械	协助项目总体方案制定，审核课题阶段成果
党 祺	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	42	正高	桥梁工程	协助项目总体方案制定，审核课题阶段成果
赵 琳	宝鸡市综合交通建设协调服务中心	男	55	副高级	道路与桥梁	参与现场试桩试验
周志军	长安大学	男	51	教授	岩土工程	负责课题研究大纲制定、审核室内外试验方案、汇总验收资料。
王 奎	西安长安大学工程设计研究院有限公司	男	51	副高级	道路与桥梁	参与现场试桩试验
杨 凯	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	47	正高	桥梁工程	桩基设计负责人
何 军	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	46	副高级	桥梁工程	参与研究大纲制定，负责现场试验实施
冉海峰	陕西高速机械化工务有限公司	男	40	副高级	公路工程	负责课题申请书编制及项目管理
张建强	陕西交控市政路桥集团有限公司第一分公司	男	47	副高级	公路工程	参与现场试桩试验

雷 辉	陕西交控市政路桥集团有限公司第一分公司	男	51	副高级	桥梁工程	参与现场试验及工程应用
李 教	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	34	副高级	土木工程	参与现场试验及工程应用
梁 田	陕西交控市政路桥集团公司	男	39	副高级	桥梁工程	参与支盘桩现场试验
王晓利	陕西省交通规划设计研究院有限公司	女	39	副高级	其他	负责课题申请书编制及项目管理
李富安	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	54	助工	桥梁工程	工程应用及现场管理
田伟涛	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	37	中级	其他	桩基成孔及扩孔质量检测
王 帅	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	34	中级	桥梁工程	桩基设计
谢宏丽	长安大学	女	27	助工	岩土工程	负责室内外试验方案编制, 数值分析
任展腾	长安大学	男	26	助工	岩土工程	负责室内外试验及试验数据处理
薛瑞杰	陕西省交通规划设计研究院有限公司	女	41	副高级	桥梁工程	桩基设计
吴礼杰	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	38	副高级	桥梁工程	桩基设计
姬乃川	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	31	中级	桥梁工程	桩基设计

4.3 各自承担的主要工作

(1) 陕西省交通规划设计院有限公司负责本项目的总体进度掌控、项目任务分工和协调管理工作, 并协调静载试验及性能监测等实体工程, 指导室内外试验及理论研究, 落实现场试验场地及科研经费, 审查课题研究成果, 组织项目评审工作。

(2) 宝鸡市综合交通建设协调服务中心负责参与研究方案的制定及技术交底工作,指导现场足尺试验及工程桩施工,参与完成技术交底、技术培训以及课题研究阶段评审工作。

(3) 陕西交控市政路桥集团有限公司第一分公司参与研究大纲制定,协调施工环节及机械组合,协助编制施工技术指南;完成桩基静载试验前场地硬化及静载试验过程中的协助工作。审查研究成果,协助课题验收。

(4) 长安大学负责课题研究大纲的制定及可行性报告编制工作,开展室内模型实验、现场足尺试验、试桩静载试验、工程桩沉降及受力性能监测试验,有限元数值分析及承载力计算等方面的研究工作,整理研究成果,编制研究报告及技术指南,配合陕西省交通规划设计院有限公司完成各个阶段项目评审工作。

4.4 项目主要负责人情况

臧斌,男,陕西省交通规划设计院有限公司工程总承包事业部总经理,硕士研究生,正高工。自2003年参与工作以来,先后主持和参与了省内西宝改扩建、商丹一级公路改建、太白至凤县高速、旬邑至陕甘界、子长至姚店高速公路等设计施工总承包项目,任项目设计服务部部长、设计经理、项目经理等,总参与里程达111公里,合同金额85亿元,实现利润超3亿元,质量评定名列前茅。参与科技厅、公司2项科研课题等的研究工作,获4项国家实用新型专利授权,参编《公路工程设计施工总承包管理实施指南》著作,人民交通出版社有限公司2022年7月出版,具有较高的工程设计、工程管理及工程

科研水平。

五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件

5.1 依托工程（工作）概况

依托 310 国道眉县青化至渭滨高家镇公路工程礆溪至高家镇段项目，路线全长 35.974 公里。全线桥梁 10353.904 米/34 座，其中特大桥 1951 米/1 座，大桥 8097.904/28 座，中桥 305 米/5 座。路线全长桥梁占比高，施工工艺、安全组织及工期等方面提质增效、节能减排、新工艺新技术创新需求突出。

5.2 投资来源

本项目陕西省交通运输厅补助 19.99 万元，单位自筹 60.01 万元，其他经费 20 万元。

5.3 工程进度与项目科研进度的配合

本项目将在室内外试验及理论研究基础上，提出黄土地区公路桥梁支盘桩设计与施工技术指南，指导依托工程建设。课题总体安排和进度如下：

(1) 2026 年 3 月至 2026 年 8 月 调研收集有关资料，制定详细的研究大纲和实施细则，开展室内模型试验和数值分析工作，探索支盘位置、支盘间距、支盘盘径对承载力规律；

(2) 2026 年 9 月至 2027 年 2 月 在充分收集、分析前人资料的基础上，针对依托工程沿线地质情况开展挤扩支盘及预固结黄土扩盘试验，变量包括土质类别、旋喷压力、水灰比、含水率等因素，开展现场足尺试验，总结预支盘桩施工工艺及质量检测方法；

(3) 2027 年 3 月至 2027 年 8 月 在室内试验的基础上, 结合依托工程情况, 选取宝鸡境内试验场地开展支盘桩试桩试验。通过测试分级荷载作用下桩侧阻力、桩身轴力、盘端阻力、桩端阻力, 提出黄土地层预固结扩盘桩沉降及承载力计算方法。

(4) 2027 年 9 月至 2028 年 3 月 编制研究成果报告及其他有关文件, 申请组织验收。

5.4 组织管理形式

(1) 课题领导小组(统筹决策)

由牵头单位陕西省交通规划设计院有限公司负责人、技术总顾问及合作单位分管领导组成, 设组长 1 名、副组长 2 名。核心职责: 统筹课题方向与技术路线, 审批实施方案与经费计划; 协调跨单位协作、技术瓶颈等重大问题; 定期审核阶段性成果, 对接行业主管部门争取支持。

(2) 课题执行组(核心实施)

由牵头单位技术负责人任执行组长, 下设五大专项小组及 1 名综合协调专员, 实现分工协同:

室内模型试验小组: 由科研院校岩土工程教师、试验工程师组成, 负责支盘参数(直径、间距、置)对承载力影响的模型试验, 采集分析数据并提供基础支撑;

现场足尺试验小组: 由施工、检测单位及科研院校人员组成, 开展现场试桩施工与承载力测试, 比验证室内试验结果;

数值分析小组: 由数值模拟专业人员组成, 建立桩-土相互作用模

型，分析参数影响规律，复核理论计算结果；

理论研究小组:由教授、博士及资深工程师组成，构建支盘阻力力学模型，修正承载力计算公式；

工后监测小组:由检测、施工单位监测人员组成，开展沉降变形、桩身长期受力监测，评估基础稳定性；

综合协调专员:负责小组间沟通、数据共享、进度同步及资料归档等日常工作。

(3) 保障监督组(保障管控)

由牵头单位科研管理、财务人员及外聘专家组成。核心职责:管控经费使用，监督研究进度与成果质量，组织专家评审，负责知识产权保护与成果归档。

六、项目经费估算及资金筹措情况

对经费估算及资金筹措情况说明，提供所需经费测算说明。

经费投入（万元）		经费支出（万元）			
科 目	估算数	科 目	总经费	厅补 经费	其他 经费
省交通运输厅补助	19.99	合 计	100	19.99	80.01
工程配套研究经费	0	（一）直接费用	75	19.99	55.01
单位自筹	60.01	1.设备费	14	0	14
其他经费	20	（1）购置设备费	0	0	0
		（2）设备改造与租赁费	14	0	14
		2.业务费	55	19.99	35.01
		（1）材料费	17	6.09	10.91
		（2）测试化验实验加工费	28	13.9	14.1
		（3）燃料动力费	0	0	0
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	4.5	0	4.5
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	5.5	0	5.5
		（6）其他费用	0	0	0
		3.劳务费	6	0	6
		（1）专家咨询费	2.5	0	2.5
		（2）聘用人员劳务费	0	0	0
		（3）其他劳务费	3.5	0	3.5
		（二）间接费用	25	0	25
		4.管理费	8	0	8
		5.绩效支出	17	0	17

注：预算编制按照《陕西省人民政府办公厅关于改革完善省级财政科研经费管理的实施意见》（陕政办发[2022]3号）文件执行，详见附件《科研经费预算编制说明》。项目验收将组织财务专项验收或审计。

七、预期目标、成果提供形式及经济社会效益

7.1 项目预期目标

(1) 通过黄土加固试验及现场足尺试验, 提出黄土地层支盘桩施工工艺及质量控制方法;

(2) 结合室内模型试验及现场静载试验, 完善黄土地区支盘桩承载力计算公式及计算方法;

(3) 通过依托工程支盘桩沉降及桩身内力监测, 了解支盘桩长期性能。

7.2 提交的研究成果及其形式

(1) 测试报告——黄土地层支盘桩足尺试验报告

(2) 研究报告——黄土地区公路桥梁挤扩支盘桩成套技术研究; 工程造价及经济分析研究

(3) 技术指南——黄土地区公路桥梁支盘桩设计与施工技术指南

(4) 研究成果达到国内领先水平, 在国内外核心学术期刊上发表论文 1 篇, 申请国家专利 1 项。

7.3 经济、社会、环境效益分析

黄土地层具有湿陷性、承载力不均等特性, 对公路桥梁基础的稳定性要求较高。针对某黄土地层公路桥梁原设计 65m、桩径 1.8m 灌注桩方案, 结合预固结扩盘桩“支盘增强承载力、缩短桩长”的技术优势, 开展合理参数设计及经济性对比分析, 为方案优化提供依据。

(1) 黄土地区支盘桩合理参数设计

预固结扩盘桩通过在桩身设置支盘增大桩土接触面积,结合预固结处理提升黄土地层承载力,可显著缩短桩长。基于黄土地层分布规律(表层风积黄土、下部老黄土,承载力随深度递增)及原灌注桩承载力要求,设计参数如下:

①桩长确定

原 65m 灌注桩核心目的是通过超长桩穿越湿陷性黄土层,依托下部稳定地层提供承载力。预固结扩盘桩通过支盘承担 80%以上竖向荷载,结合黄土地层承载力特征,经计算可将长缩短至 35m:其中嵌入下部稳定老黄土层 5m,上部 30m 穿越风积黄土层,通过支盘传递荷载,满足桥梁基础承载力及沉降控制要求(沉降量 $\leq 10\text{mm}$)。

②支盘数量及位置设计

结合 35m 桩长及黄土地层分层特性,设置 3 个支盘,具体位置及参数如下:

第一支盘:位于桩身 20m 处(风积黄土与老黄土过渡层),支盘直径 3.2m,厚度 0.8m。该层经预固结处理后承载力显著提升,支盘可有效分散上部荷载,减少桩身应力集中;

第二支盘:位于桩身 28m 处(老黄土上部),支盘直径 3.0m,厚度 0.8m。利用老黄土天然较高承载力,进一步增强桩基础抗拔及抗倾覆能力;

第三支盘:位于桩身 33m 处(桩端上部 2m),支盘直径 2.8m,厚度 0.8m。与端共同承担竖向荷载,提升桩基础整体稳定性,避免桩端沉

降过大。支盘采用对称挤扩成型工艺，确保支盘与黄土层紧密接触，预固结处理采用水泥土搅拌复合地基法，处理范围为支盘上下各 2m，提升地层承载力稳定性，

(2) 两种桩型经济效益对比分析

以单根桩为核心对比单元，结合黄土地层施工特性、2025 年当地市场价格及项目实际规模，从经济社会、环境三大维度开展全面效益对比，为方案选型提供综合依据，具体分析如下：

(一) 经济效益分析

成本项目	原设计灌注桩 (65m、1.8m)	预固结扩盘桩 (35m、1.8m+3 个盘)	成本差异 (节省)
混凝土用量及成本	混凝土量 = $3.14 \times 0.9 \times 0.9 \times 65 \approx 165.321 \text{m}^3$; 单价 420 元/ m^3 ，成本 ≈ 6.95 万元	桩身混凝土量 = $3.14 \times 0.9 \times 0.9 \times 35 \approx 89.0 \text{m}^3$ ；盘混凝土量 $\approx 12.5 \text{m}^3$ ，总 101.6；成本 ≈ 4.27 万元	2.68 万元
钢筋用量及成本	桩身钢筋含量 80kg/m，总用量 13.2t；单价 6500 元/t，成本 ≈ 8.6 万元	桩身钢筋含量 80kg/m，总用量 7.12t；单价 6500 元/t，成本 ≈ 4.6 万元	4.00 万元
预固结处理成本	无	盘区域于固结处理，3 个盘成本 ≈ 4.5 万元	-4.5 万元
施工机械及人工成本	钻孔、浇筑施工期 15 天，机械台班+人工成本 ≈ 12.5 万元	钻孔、扩盘、浇筑工期 10 天，机械台班+人工成本 ≈ 10.2 万元	2.3 万元
直接成本合计	28.05 万元	23.57 万元	4.48 万元

(二) 社会效益分析(核心差异:施工影响、工程稳定性、资源利用)

缩短工期保障通行:原灌注桩单桩施工 15 天，预固结扩盘桩 10 天，50 根总工期可缩短 250 天能加快桥梁工程整体进度，减少施工对周边公路通行的长期占用，保障区域交通顺畅，降低交通拥堵带来的社会成本；

提升工程安全稳定性:黄土地层超长灌注桩易因孔壁坍塌、缩径

引发质量隐患，预固结扩盘桩长缩短且支盘与地层紧密结合，工程稳定性更优，可减少后期维修加固对周边居民生产生活的干扰降低工程安全事故引发的社会影响；

节约社会资源：预固结扩盘桩大幅减少混凝土、钢筋等建材用量，降低建材生产环节的资源消耗契合节约型社会建设需求；同时施工工期缩短，减少施工人员长期驻场带来的社会资源占用。

(三)环境效益分析(核心差异:地层扰动、污染排放、能源消耗)

减少地层扰动与生态破坏：黄土地层湿陷性强，超长灌注钻孔深度大、范围广，易引发周边地层沉降、土体松动等生态问题；预固结扩盘桩桩长缩短 30m，钻孔扰动范围大幅减小，且预固结扩盘成型工艺对地层扰动更均匀可控，能有效保护周边土体结构稳定性，降低对邻近被、地下水位的影响；

降低污染排放：混凝土、钢筋生产过程会产生大量二氧化碳、粉尘等污染物，预固结扩盘单混凝土用量减少 61m³、钢筋用量减少 3.8t，可显著降低建材生产环节的污染物排放；同时施工工期缩短，施工机械运行时间减少，能降低噪声污染、尾气排放对周边生态环境的干扰；

节约能源消耗：施工机械运行及建材生产均需消耗大量能源，预固结扩盘施工机械台班减少，建材用量降低，可减少能源消耗总量，契合绿色低碳发展理念，助力降低工程建设的碳足迹。

八、其它需要说明的问题

无

九、申请单位意见

课题研究意义明确，方案可行，经费与依托工程已落实，具备研究基础与条件。各单位同意申报，并提供必要支持，确保按时完成。

(公章)
单位负责人: (签字)
年 月 日

(公章)
单位负责人: (签字)
年 月 日

(公章)
单位负责人: (签字)
年 月 日

梁栋
6198010123212

(公章)
单位负责人: (签字)
年 月 日

大纲评审意见

2026年3月12日，陕西省公路局受陕西省交通运输厅委托在西安主持召开了“黄土地区公路桥梁挤扩支盘桩成套技术研究”（项目编号：25-63K）项目大纲评审会。与会专家（名单附后）听取了项目组的汇报，审阅了项目研究大纲，经质询讨论，形成如下评审意见。

一、项目研究内容全面，研究目标明确，技术路线可行。

二、项目研究人员组成合理，前期研究基础扎实，试验设备齐全，依托工程落实，经费预算符合规定，具备开展研究工作的条件。

三、预期成果覆盖研究目标，与研究内容的逻辑框架契合。

与会专家一致同意该项目研究大纲通过评审。

建议：

- 1.明确支盘桩在黄土地区的适用范围；
- 2.考虑黄土特性，加强支盘的施工工艺和检测技术研究。

主任委员：王彦科

2026年3月12日

专家审查意见表

项目名称	25-63K 黄土地区公路桥梁挤扩支盘桩成套技术研究				
专家姓名	王登科	职务/职称	正高级工程师	专 业	桥梁与隧道
专家单位	陕西省铁路集团公司			联系电话	13709260508

评 审 意 见

本项目研究必要，前期研究成果和研究支撑条件满足研究内容，实施方案及技术路线可行，依托工程落实，预期目标成果明确，同意项目立项研究。

建议：

1、研究内容范围界定挤扩支盘桩的适用范围。（斜坡上桩基及冲刷要求的桩基）及禁用范围（湿陷性黄土）

2、 增加挤扩支盘桩承载能力及沉降变形试验和工程可靠度研究。

3. 补充支盘桩桩底扩大承载力的加固方法，减弱沉降变形，增强抗剪能力的方法。

4. 补充支盘桩的图例和成套技术图式。

评审专家（签字）：王登科

2026 年 3 月 12 日

（本意见入档，填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	黄土地区公路桥梁挤扩支盘桩成套技术研究				
专家姓名	牛磊	职务/职称	正高	专业	桥梁工程
专家单位	中交一公局			联系电话	13981801018

评审意见

该项目技术内容全面，技术路线正确，内容创新性强。评审意见及建议如下：

1. 明确“挤扩”与“浆土固结簇打”两种工艺适用条件，避免现场盲目选择。建议增加不同密实度黄土的挤扩及浆土固结簇打对比试验。
2. 如何考虑浆液流动性对支盘端阻力的影响，还有地下水位的变化对支盘土体固结的影响，这是重点！
3. 如何和现行规范中的检测方法相衔接，使成桩效率能够满足规范验收要求。针对检测方法还有相当大的工作量，造成后期检测成本过高制的应用。
4. 设备改造与租赁费14万占比较高，建议降低设备租赁数量。

评审专家（签字）：

牛磊

2026 年 3 月 12 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

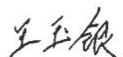
项目名称	黄土地区公路桥梁挤扩支盘桩成套技术研究				
专家姓名	柴唐焰	职务/职称	正高	专 业	桥梁工程
专家单位	中铁第一勘察设计院集团有限公司			联系电话	13991256879
评 审 意 见					
一、本项目通过依托预固结扩盘桩“支盘增强承载力、缩短桩长”技术，开展黄土地区公路桥梁挤扩支盘桩成套技术研究，合理确定参数设计并进行经济性对比分析，选题明确，研究内容全面、针对性强，具有较好的社会、经济和环境价值，具备较强的工程实践指导作用，研究意义较高。 同意研究大纲。 二、建议 1. 建议补充相关图例，利于更加直观的理解。 2. 文中提到长期现场监测，达到什么条件可以被视为已满足长期监测的目的，建议补充相关说明。 3. 根据文中所述，本项目的研究内容在黄土地区尚属首次，建议补充在同一座桥梁中采用本技术与传统桩技术的设计对比，以作为经济等指标结果对比的依据。 4. 黄土地区土层力学性能复杂，本项目研究的挤扩支盘桩施工技术复杂、难度大，施工方面应作为一项研究重点，文中涉及内容偏少，建议补充。					
评审专家（签字）：柴唐焰					
2026年3月12日					
（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）					

专家审查意见表

项目名称	25-63K 黄土地区公路桥梁挤扩支盘桩成套技术研究				
专家姓名	王玉银	职务/职称	党委书记 教授	专 业	结构工程
专家单位	哈尔滨工业大学土木工程学院			联系电话	13766831066

评 审 意 见

- 1、增加挤扩支盘桩的示意图。
- 2、正文引用文献到[29]，但在参考文献目录中仅列出了 19 篇，请核实补充。
- 3、在“2.1 国内外研究现状”部分，应进一步明确给出现有标准规范的适用范围，并补充介绍“洛阳三门峡[17]某电厂黄河 III 级阶地上开展了挤扩支盘桩试桩试验”详尽情况。
- 4、第 17 页“1) 黄土地区挤扩支盘桩支盘施工工艺”中最后一句“则需要结合黄土地层特征”，好像没有写完整。
- 5、“7.3 经济、社会、环境效益分析”“(1) 黄土地区支盘桩合理参数设计”中，桩的设计参数是否满足现有标准的相关要求，如“挤扩支盘桩竖向最小盘间距不小于 2D (D 为桩承力盘直径)”。

评审专家（签字）： 

年 月 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	25-63K 黄土地区公路桥梁挤扩支盘桩成套技术研究				
专家姓名	李立峰	职务/职称	教授	专 业	桥梁
专家单位	湖南大学			联系电话	13607433836

评 审 意 见

本项目的文献综述非常全面，对支盘桩的发展历史、分析理论进行了较为全面的阐述，研究大纲总体内容齐全，具有很好的研究技术路线和前期研究基础。经费预算符合规定，依托工程支撑。

几点建议如下。

1、题目为成套技术，涵盖设计和施工、检测等多方面，题目非常大。建议有所取舍，特别是选取典型黄土地区来展开研究，支盘桩的适应范围、如何成孔和避免塌孔、以及如何检测支盘更为重要。

2、可以看出支盘桩的研究比较深入，建议补充挤扩支盘桩的土层适用范围，阐述黄土与其他土质的不同特性，针对黄土，和以往研究的不同点应说明。

3、选取代表性的土质类型开展模型试验，评估和原状土的异同。

4、建议检测手段和应用范围的研究。

评审专家（签字）： 李立峰

2026 年 3 月 12 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

黄土地区公路桥梁挤扩支盘桩成套技术研究 (项目编号: 25-63K)

大纲评审专家委员会名单

序号	评审会职务	姓名	工作单位	所学专业	从事专业	职称/职务	签名
1	主任委员	王登科	陕西省铁路集团有限公司	路桥工程	路桥工程	正高工	王登科
2	委员	牛宏	中交第一公路勘察设计有限公司	桥梁工程	桥梁工程	正高工	牛宏
3	委员	柴唐焰	中铁第一勘察设计院	桥梁工程	桥梁工程	正高工	柴唐焰
4	委员	王玉银	哈尔滨工业大学	桥梁工程	桥梁工程	教授	线上评审
5	委员	李立峰	湖南大学	土木工程	土木工程	教授	线上评审

专家意见处理表

项目名称: 黄土地区公路桥梁挤扩支盘桩成套技术研究 (项目编号: 25-63K)

序号	姓名	建议内容	处理意见 (逐条回应, 详细说明修改情况)
1	王登科	1、研究内容范围界定挤扩支盘桩的适用范围; 2、增加挤扩支盘桩承载力及沉降变形试验和工程可靠度研究; 3、补充支盘桩桩底(扩大承载力)的加固方法, 减弱沉降变形, 增强抗剪能力的方法; 4、补充支盘桩的图例和成套技术图示。	1、3.5 有关技术指标中适用条件增加了适用范围; 2、P29 页增加承载力及沉降模型试验、足尺试验; 3、桩底扩大承载力加固方法与预固结扩盘方法一致, 预固结过程能够提高土体抗剪能力; 4、已补充。
2	王玉银	1、增加挤扩支盘桩的示意图; 2、正文引用文献到【29】, 但在参考 目录仅列出 19 篇, 请核实补充; 3、在“2.1 国内外研究现状”部分, 应进一步明确给出现有标准规范的适用范围, 并补充“洛阳三门峡【17】某电厂黄土 III 级阶地上开展了挤扩支盘桩试桩试验”详尽情况; 4、第 17 页“1) 黄土地区挤扩支盘桩支盘施工工艺”中最后一句“则需要结合黄土地层特征”, 好像没有写完整; 5、“7.3 经济、社会、环境效益分析”“(1) 黄土地区支盘桩合理参数设计中, 桩的设计参数是否满足现有标准的相关要求, 如“挤扩支盘桩竖向最小盘间距不小于 2D (D 为桩承力盘直径)”。	1、图 1.1 已补充; 2、参考文献已补充; 3、第 10 页中补充了场地概况及主要试验结果; 4、补充了黄土地区支盘桩研究的不足; 5、目前规范盘间距不小于 8D (D 为盘径), 试验工况分为 6D、8D、10D 进行;
3	柴唐焰	1、建议补充相关图例, 利于更加直观的理解; 2、文中提到长期现场监测, 达到什么条件可以被视为已满足长期监测的目的, 建议补充相关说明;	1、已补充; 2、结合本课题实际情况, 后期结合依托工程实施, 开展不同阶段桩基沉降监测, 监测过程沉降收敛;

	3、根据文中所述,本项目的研究内容在黄土地区尚属首次,建议补充在同一座桥梁中采用本技术与传统桩技术的设计对比,以作为经济等指标结果对比的依据; 4、黄土地区土力学性能复杂,本项目研究的挤扩支盘桩施工技术复杂、难度大,施工方面应作为一项研究重点,文中涉及内容偏少,建议补充。	3、7.3中补充了黄土地区65米传统灌注桩和35米支盘桩经济性对比; 4、3.2中补充了支盘施工工艺,包括挤扩和预固结旋扩两种工艺,详细分析了高压旋喷预固结试验情况。
4 牛宏	1、明确“挤扩”与“预固结旋扩”两种工艺的适用条件,避免现场盲目选择,建议增加不同密实度黄土的挤扩压力响应对比试验; 2、如何考虑湿陷性黄土对支盘端阻力的影响,还有地下水位变化对支盘土体特性的影响; 3、如何和现行规范的检测方法相衔接,使成桩效果能够满足工程验收要求,针对检测方法还有相当大的工作要做,避免后期检测成本过高制约应用; 4、设备改造与租赁14万占比较高,建议备注具体设备及数量。	1、已根据黄土塑性范围及现场前期试验,支盘施工主要以预固结工艺为主; 2、设计过程中,支盘设置在无湿陷性黄土地层中,其次,由于黄土采用预固结,地下水的影响较小,且设计过程中不考虑预固结后土体强度的提高,仅采用原状土盘端阻力; 3、采用声测管作为传感器的通道,通过热成像,测试成桩后支盘完整性; 4、足尺试验需要租赁旋挖钻机1台、吊车1台、扩孔设备1台以及静载试验设备1套。
5 李立峰	1、题目为成套技术,涵盖设计和施工、检测等多方面,题目非常大。建议有所取舍,特别是选择典型黄土地区来展开研究,支盘桩的适用范围、如何成孔和避免塌孔、以及如何检测支盘更为重要; 2、可以看出支盘桩的研究比较深入,建议补充挤扩支盘桩的土层适用范围,阐述黄土与其他土质的不同特性,针对黄土,和以往研究的不同点应说明; 3、选取代表性的土质类型开展模型试验,评估和原状土的异同; 4、建议检测手段和应用范围的研究。	1、研究大纲将支盘质量检测作为研究内容,并给了研究方案; 2、在3.5有关技术经济指标补充了适用条件; 3、项目研究过程结合宝鸡典型地层开展模型试验; 4、适用范围主要考虑黄土地层长桩、超长桩,检测方法主要考虑高密度电磁法和热成像法,在3.2研究内容一中已补充。

大纲评审委员会专家(签字): 王彦科

项目负责人(签字): 王彦科