

建筑工程地基基础中土壤承载力原位试验检测技术应用

文 / 胡 昊 西安中交公路测试技术有限责任公司

摘要：土壤承载力是建筑工程地基基础设计的关键参数，直接影响工程的安全性与经济性。原位试验检测技术通过直接在现场测定土壤力学性质，能够提供更准确、可靠的承载力数据。本文系统分析土壤承载力原位试验检测技术的特点，探讨了其在建筑工程地基基础中的应用，包括静力触探试验、标准贯入试验、平板载荷试验、十字板剪切试验及旁压试验等技术的原理、适用范围及实施要点，为工程实践提供理论依据和技术参考。

关键词：土壤承载力；原位试验；地基基础；静力触探试验；平板载荷试验

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.15.021

引言

在建筑工程地基基础设计领域，土壤承载力作为关键参数，对建筑物的安全性与经济性起着决定性作用。精准确定土壤承载力，是确保建筑物在整个使用周期内稳定屹立，避免因地基问题引发安全事故的根本前提，同时也关乎工程建设成本的有效控制。传统的实验室试验方法在获取土壤承载力数据时，存在难以克服的缺陷。由于取样过程不可避免地对土壤原有结构造成扰动，且实验室模拟的试验条件与现场复杂多变的实际工况存在较大差异，使得基于此得出的土壤力学特性数据，无法精准反映现场土壤的真实状况。而原位试验检测技术凭借其独特优势，在该领域崭露头角。它摒弃传统的取样方式，直接在现场对土壤力学性质进行测定，有效规避取样扰动问题，所获取的承载力数据更贴合工程实际工况，能为建筑工程地基基础设计提供更具可靠性与准确性的依据，对推动建筑工程领域的发展具有重要意义。

一、土壤承载力原位试验检测技术的特点

(一) 数据可靠性高

土壤承载力原位试验检测技术作为岩土工程勘察的重要方法，其数据可靠性建立在科学的测试原理和严格的质量控制体系基础之上。该技术通过在天然状态下直

接测定土体的力学响应参数，避免取样扰动和实验室模拟误差，为工程基础设计提供可靠的承载力评价依据。从测试原理来看，原位试验通过现场加载装置对未扰动土体施加荷载，直接测定土体在天然状态下的变形模量、抗剪强度等关键参数。这种方法有效避免传统取样试验中因土样卸荷回弹、结构破坏导致的参数失真问题。（如图1所示）以静力触探试验为例，探杆以恒定速率贯入地层过程中，锥尖阻力和侧壁摩擦力反映土体在三维应力状态下的综合强度特性，其测试数据具有表征天然土体结构完整性的优势。现行规范对原位试验的仪器校准、操作流程和数据采集制定严格标准。测试设备的几何尺寸、加载速率等关键参数均需满足国际通用技术标准。操作规范严格限定加载速率与稳压时长，消除动态效应误差^[1]。技术人员需持证上岗，规范动作减少接触干扰。测试全程同步记录环境变量，自动补偿温度波动对传感器的影响。相比室内试验，原位测试最大优势在于保持土体天然赋存环境。未扰动的结构特征与孔隙水压力系统完整保留，尤其对灵敏性黏土或胶结砂层，能真实反映结构强度衰减规律。连续剖面测试揭示土层参数渐变规律，精准捕捉软弱夹层与裂隙发育带，克服取样离散性导致的力学指标失真问题



图1 土壤承载力原位试验检测技术数据可靠性高特点

(二) 适用范围广

土壤承载力原位试验检测技术之所以具有广泛适用

性这一特点，是因为其方法原理的科学性以及工程实践的系统适配能力。该技术通过直接获取天然应力状态下

土体的力学响应参数，能够有效规避取样运输过程中土壤结构扰动导致的强度弱化问题，在岩土工程勘察领域展现出独特的技术优势。该技术普适性主要体现在地层条件适应性、工程类型兼容性、测试深度覆盖性三方面。第一，在地层条件适应性方面，原位试验方法可建立针对不同岩土介质的标准化测试体系。静力触探技术通过锥尖阻力与侧壁摩阻力的协同分析，可有效评价软黏土、松散砂土等低强度地层的力学特性；动力触探依据贯入能量衰减规律，适用于碎石土、风化岩等非均质地层的密实度评估；平板载荷试验则通过刚性承压板与土体的接触应力分布，准确测定硬黏土、强风化岩等结构性土体的承载力特征值。这种基于地层物理力学特性差异的测试方法优选机制，能够确保复杂地质条件下参数获取的可靠性。第二，在工程类型兼容性方面，原位试验技术构建跨领域的应用框架。高层建筑地基勘察中，连续贯入测试可系统获取深层土体的强度与变形参数；交通路基工程中，贯入阻力与动力响应的关联分析为填土压实质量控制提供量化依据；港口码头等近海工程则依托十字板剪切试验，精准测定潮汐作用带软黏土的不排水抗剪强度。不同工程场景下的参数解译模型与设计规范的深度耦合，实现勘察成果向工程实践的定向转化^[2]。第三，在测试深度覆盖性方面，原位试验技术则体现在技术体系的空间拓展能力方面。浅层地基评价采用轻型贯入装置或微型载荷板，通过地表测试快速获取持力层参数；深层基础设计则应用重型触探设备或深层静力加载系统，系统揭示深部土体的力学行为特征。

二、建筑工程地基基础中土壤承载力原位试验检测技术应用

（一）静力触探试验（CPT）

静力触探试验通过探杆连续贯入土体的力学响应机理，直接测定土体抗剪强度与变形特性，其技术优势体现在实时获取锥尖阻力、侧壁摩阻力及孔隙水压力的多参数耦合关系，为地基承载力计算提供高分辨率的连续数据剖面。该技术的实施需严格遵循系统性操作规范，重点控制设备精度与过程质量两个维度。第一，设备安装与地层适应性处理。施工人员需在作业前完成设备系统的全面校验，重点核查探杆垂直度与探头几何形位的精度偏差，确保测试装置满足国际标准的技术要求。在探杆组接过程中，使用专业校准工具检测各节杆件的同轴度，消除累积误差对测试精度的影响^[3]。在场地布置阶段，结合地质勘察报告，采用全站仪对测试孔位进行空间坐标精确定位，严格控制孔位平面偏差。针对复杂地层条件，施工人员应该预先分析土层剖面特征，对含硬质夹层或碎石透镜体的区段配置高强度耐磨锥头，并制定差异化的贯入速率调整策略。此外，对于探杆路径规划，施工人员需综合地下管线探测数据与障碍物分布

信息，采用三维路径优化算法避开既有构筑物，同时在测试区域布设地面基准控制网，为后期数据空间关联分析建立参考框架。第二，贯入操作与数据质量控制。贯入作业需依托全自动液压驱动系统，通过闭环控制模块实现探杆匀速贯入，消除速率波动引起的测试参数畸变。施工人员应实时监测锥尖阻力与侧壁摩阻力的协同变化曲线，结合孔隙水压力消散特征动态评估土体结构状态。探杆空间姿态采用多传感器融合定位技术连续监测，当探杆轴线偏移超出允许阈值时，系统自动激活多级液压纠偏装置，施工人员应根据偏移量分级调整反推力矢量，确保纠偏过程中贯入动作的连续性。对于阻力梯度显著变化的土层界面区域，启动分层复测程序，通过优化贯入速度与采样频率实现薄层土体力学特性的精准识别。在原始数据经加密传输至解译平台后，采用多参数联合反演算法构建地层力学模型，基于锥尖阻力与摩阻比的非线性关联特征生成标准化土层分类图谱。在成果验证阶段，将解译数据与钻孔岩芯进行空间耦合分析，运用地质统计方法验证参数的空间分布规律，当发现系统性偏差时应溯源检测传感器标定状态并实施补充测试。

（二）标准贯入试验（SPT）

标准贯入试验基于动态贯入原理，通过重锤自由下落产生的冲击能量驱动贯入器刺入土层，测定特定深度土层的贯入阻力。该技术通过标准击数反映土体密实度与抗剪强度，其核心在于建立锤击能量与土体力学响应的关联模型，为砂土、粉土等粗粒土地基承载力评价提供定量依据。第一，设备安装与地层预处理。施工人员需依据规范要求完成设备系统校验，重点核查落锤装置的自由下落行程与贯入器几何尺寸。试验前应采用全站仪对钻孔位置进行定位标定，确保孔位偏差符合规范允许范围^[4]。钻孔成孔过程中需严格控制孔深与垂直度，采用泥浆护壁或套管跟进技术维持孔壁稳定，防止塌孔影响测试精度。对于地下水位较高地层，需预先采取降水措施降低水位，避免孔内积水对贯入阻力造成干扰。贯入器安装阶段应检查对开放式取土管的闭合状态，确保刃口完整无磨损，贯入杆连接部位需施加规定扭矩紧固，防止能量传递损耗。第二，贯入操作与数据采集。试验实施时需分阶段进行预贯入与正式贯入操作。预贯入阶段将贯入器压入孔底土层，消除孔底扰动影响。正式贯入采用标准落锤以恒定高度自由下落，记录贯入器累计贯入规定深度所需锤击数。操作过程中需保持落锤导向杆垂直度，采用激光测斜仪实时监测贯入轨迹，当偏斜度超过阈值时需重新调整钻孔位置。每完成一个测试深度，施工人员应及时清理贯入器内残留土样，检查刃口磨损情况并更换受损部件。数据采集需同步记录地层描述信息，包括土体颜色、粒径组成及含水状态，为后期数据修正提供地质依据。试验完成后，需依据地层类别

对实测击数进行杆长修正与地下水修正,通过经验公式换算为标贯承载力参数,并与静力触探、平板载荷试验结果进行相关性分析,建立多方法验证的承载力评价体系。

(三) 平板载荷试验 (PLT)

平板载荷试验基于地基土体在分级荷载作用下的应力-应变响应原理,通过测定承压板沉降量反演地基承载力。该技术通过模拟实际基础荷载传递路径,建立荷载-沉降曲线的数学关系,直接反映地基土层的压缩模量与极限承载力,为浅基础设计提供原位实测参数。第一,试验准备与设备安装。施工人员需依据规范要求进行场地预处理,清除表层松散土体并平整试验区域,确保承压板底面与地基土充分接触。设备安装前应校验液压加载系统精度,检查反力装置(如地锚系统或堆载平台)的承载能力与稳定性。承压板选用应根据土层特性确定,均质土层采用圆形刚性板,层状地基则优先选用矩形板。安装时需采用精密水准仪调整承压板水平度,偏差控制在允许范围内^[5]。对于地下水位浅层地基,需设置降水井或排水沟控制水位,避免孔隙水压力影响沉降观测精度。反力架安装需与承压板中心轴线严格对中,采用全站仪进行三维坐标校准,确保荷载传递路径无偏心。第二,加载过程与数据采集。试验加载采用分级维持荷载法,每级荷载施加后需稳定至沉降速率符合规范要求。施工人员通过液压控制系统精确调节荷载值,采用高精度压力传感器实时监控荷载稳定性。沉降观测系统需布置四只对称分布的位移传感器,同步采集承压板各测点沉降量,通过数据采集仪自动记录时间-沉降曲线。当出现沉降量突变或持续发展时,需延长稳压时间直至沉降收敛。加载至预定最大荷载后,按规范要求进行分级卸载,并记录回弹变形数据。试验全程需同步监测环境温度与地下水位变化,对温度敏感型传感器需采取遮阳隔热措施。数据采集完成后,通过专业软件拟合荷载-沉降曲线,识别比例界限荷载与极限荷载拐点,结合土工参数建立承载力计算模型。

(四) 十字板剪切试验 (VST)

十字板剪切试验(VST)作为测定饱和软黏土不排水抗剪强度的原位测试方法,其理论基础建立于土体剪切破坏力学模型与抗剪强度参数的直接关联性。在试验过程中,通过将特定几何尺寸的十字板探头垂直贯入指定土层,施加可控扭矩使土体产生圆柱形剪切破坏面,基于扭转力矩与土体抗剪强度的力学平衡关系,推导出土体不排水抗剪强度参数。第一,试验前需系统性完成场地勘察与设备调试。施工人员应依据地质勘察报告划定代表性试验点位,采用静力触探或钻孔取芯法验证土层分布特征,确保试验深度位于目标软黏土层范围内。设备安装阶段需严格校准十字板探头几何尺寸,使用扭矩

传感器与角度编码器联调系统,确保量测误差控制在合理阈值内。土层预处理需清除孔底扰动土体,采用套管护壁维持孔壁稳定,十字板贯入过程须保持匀速垂直下压,避免侧向偏转导致附加应力干扰。当探头到达预定深度后,需静置足够时间使孔隙水压力充分消散,恢复土体原位应力状态。第二,试验实施阶段需精确控制加载速率与数据采集。操作人员启动扭转装置时,应以标准速率匀速旋转十字板轴杆,同步记录扭矩-转角变化曲线。当扭矩值达到峰值后维持稳定旋转一定角度,判定土体达到完全塑性破坏状态。数据采集系统需高频连续记录扭矩、转角、贯入深度等参数,通过实时曲线监测识别异常波动。若发现扭矩陡降或多次震荡现象,应立即终止试验并检查探头是否发生机械损伤或土层夹砂。试验结束后,按规范要求进行正反向重复剪切,验证土体触变恢复特性。最终通过峰值扭矩与十字板常数换算公式计算不排水抗剪强度,其中几何常数需根据探头尺寸进行三维有限元修正,确保参数准确性^[6]。

结语

在建筑工程地基基础中,土壤承载力原位试验检测技术凭借其数据可靠性高、适用范围广的显著特点,在各类工程项目中发挥着关键作用。静力触探试验、标准贯入试验、平板载荷试验、十字板剪切试验及旁压试验等多种原位试验技术,各有其独特原理、适用范围与实施要点,能精准测定不同类型土壤的力学性质,为地基基础设计提供可靠数据支撑,有力保障建筑工程的安全性与经济性。这些技术的合理运用,是确保建筑工程质量、推动行业稳健发展的重要基石。

参考文献

- [1] 宋超,李志豪,孙益振,等.大直径钢管桩承载力影响因素及现场试验分析[J/OL].水运工程,1-6[2025-03-19].
 - [2] 况文斌.自平衡静载试验法在桥梁桩基承载力检测中的应用[J].交通世界,2025,(Z2):172-174.
 - [3] 黄斌彩.基于沉降的堆场淤泥软基处理承载力预测方法[J].水利与建筑工程学报,2024,22(02):19-25+54.
 - [4] 高伸,王波.基于地基承载力分析的轮式载具通过性研究[J].山西建筑,2023,49(13):105-109.
 - [5] 赵伟河,刘贤德,胡仁立,等.高层建筑不同深度地基土承载力和沉降评估[J].中国新技术新产品,2023,(07):104-106.
 - [6] 廖德华,杨董为.广西某高桩码头原位荷载试验研究[J].西部交通科技,2021,(08):201-203+208.
- 作者简介:胡昊,1988年12月23日,男,汉,陕西省韩城市,本科,工程师,西安中交公路测试技术有限公司,研究方向:建筑物地基基础检测。