

T/CECS XXXX-202X



**中国工程建设协会标准**

**岩土体和混凝土材料热物性测试方法标准**

Test standard for thermal properties testing methods on rock, soil, and concrete materials

（征求意见稿）

2024-05-07

中国XXX出版社

**中国工程建设协会标准**

**岩土体和混凝土材料热物性测试方法标准**

Test standard for thermal properties testing methods on rock, soil, and concrete materials

T/CECS ###-202X

（征求意见稿）

 主编单位：河海大学、深圳大学

 批准单位：中国工程建设标准化协会

 实施日期：202X年 X 月 X 日

中国XXX出版社

202X 北京

**前 言**

根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2023年第二批工程建设协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字[2023]50号）的要求，标准编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国内外标准，并在广泛征求意见的基础上，编制了本标准。

本标准共分5章和3个附录，主要内容包括：总则，术语和符号，基本规定，土体、岩石和混凝土材料热物性测试以及土体热致力学特性测试。

本标准由中国工程建设标准化协会归口管理，由河海大学和深圳大学负责具体技术内容的解释。使用过程中如有意见或建议，请寄送解释单位（地址：江苏省南京市西康路1号土木与交通学院，邮政编码：210024，联系电话：025-83772015）

**主编单位**：河海大学、深圳大学

**参编单位**：【暂略】

**主要起草人：**【暂略】

**主要审查人**：……

**目 次**

[1 总 则 1](#_Toc165793946)

[2 术语和符号 2](#_Toc165793947)

[2.1 术 语 2](#_Toc165793948)

[2.2 符 号 3](#_Toc165793949)

[3 基本规定 4](#_Toc165793950)

[4 土体、岩石和混凝土材料热物性测试 5](#_Toc165793951)

[4.1 一般规定 5](#_Toc165793952)

[4.2 测试方法 5](#_Toc165793953)

[4.3 试样制备 7](#_Toc165793954)

[4.4 热学特性测定 8](#_Toc165793955)

[4.5 现场综合导热系数测定 8](#_Toc165793956)

[4.6 结果分析与评估 9](#_Toc165793957)

[5 土体热致力学特性测试 10](#_Toc165793958)

[5.1 一般规定 10](#_Toc165793959)

[5.2 温控直接剪切试验 10](#_Toc165793960)

[5.3 温控压缩固结试验 11](#_Toc165793961)

[5.4 温控三轴试验 11](#_Toc165793962)

[5.5 温控渗透试验 12](#_Toc165793963)

[附录A：室内土体、岩石和混凝土材料热学特性测试记录 14](#_Toc165793964)

[附录B：现场综合导热系数试验记录 15](#_Toc165793965)

[附录C：岩土热物性测试报告样例 16](#_Toc165793966)

[本标准用词说明 17](#_Toc165793967)

[引用标准名录 18](#_Toc165793968)

[条文说明 19](#_Toc165793969)

Contents

[1 General Provisions 1](#_Toc165795366)

[2 Terms and Symbols 2](#_Toc165795367)

[2.1 Terms 2](#_Toc165795368)

[2.2 Symbols 3](#_Toc165795369)

[3 Basic Regulations 4](#_Toc165795370)

[4 Thermal Properties Testing of Rock, Soil and Concrete Materials 5](#_Toc165795371)

[4.1 General provisions 5](#_Toc165795372)

[4.2 Testing methods 5](#_Toc165795373)

[4.3 Sample Preparation 7](#_Toc165795374)

[4.4 Determination of thermal properties 8](#_Toc165795375)

[4.5 Determination of comprehensive thermal conductivity 8](#_Toc165795376)

[4.6 Result Analysis and Evaluation 9](#_Toc165795377)

[5 Testing of Thermomechanical Properties of Soil 10](#_Toc165795378)

[5.1 General provisions 10](#_Toc165795379)

[5.2 Temperature controlled direct shear test 10](#_Toc165795380)

[5.3 Temperature controlled compression consolidation test 11](#_Toc165795381)

[5.4 Temperature controlled triaxial test 11](#_Toc165795382)

[5.5 Temperature controlled penetration test 12](#_Toc165795383)

[Appendix A Thermal characteristic records 14](#_Toc165795384)

[Appendix B Field test records 15](#_Toc165795385)

[Appendix C Test progress records 16](#_Toc165795386)

[Explanation of wording in this standard 17](#_Toc165795387)

[List of quoted standards 18](#_Toc165795388)

[Addition: Explanation of provisions 19](#_Toc165795389)

1 总 则

**1.0.1** 为规范土体、岩石和混凝土材料热物性测试和土体热致力学特性测试，做到安全适用、技术先进、确保质量、保护环境、经济合理，制定本标准。

**1.0.2** 本标准适用于土体、岩石和混凝土材料室内/现场热物性测试，土体热致力学特性的试样制备方法、测试系统搭建、测试操作要求以及数据分析。

**1.0.3** 土体、岩石和混凝土材料的热物性测试和土体热致力学特性测试除应符合本标准规定外，尚应符合国家现行有关标准和现行中国工程建设标准化协会有关标准的规定。

2 术语和符号

下列术语和定义适用于本标准。

**2.1 术 语**

**2.1.1** 导热系数 thermal conductivity

在稳定传热条件下，1m厚的均质材料，两侧表面的温差为1oC，在1秒内，通过1m2面积传递的热量，单位为W/(m·K)，此处的K可用oC代替。

**2.1.2** 综合导热系数 comprehensive thermal conductivity

对多孔、多层、多结构、各向异性材料的导热系数实际是一种综合导热性能的表现，被称为综合导热系数（也称为综合热导率系数），单位为W/(m·K)。

**2.1.3** 能源地下结构 energy geostructure

通过在各种永久或临时地下结构中预埋换热管，使其充当地下换热器的功能，以提取浅层地热能的地下结构。

**2.1.4** 地层初始平均温度 initial average temperature of the rock-soil

从自然地表以下10~20m至竖直地埋管换热器埋设深度范围内，地层常年恒定的平均温度。

**2.1.5** 测试孔 exploration and vertical testing exchanger

按照测试要求和拟采用的成孔方案，将用于岩土热物性测试勘察和测试的竖直地埋管换热器称为测试孔。

**2.2 符 号**

|  |  |
| --- | --- |
| *A* | 试样中热流量通过的正面面积（m2） |
| *H* | 钻孔埋深深度（m2） |
| *k* | 进出传热液平均温度与时间对数关系的线性拟合直线的斜率 |
| *q* | 系统的实际加热功率（W） |
| *Q* | 通过试样的热流量（W） |
|  | 沿着热流量方向的两个面之间的温度差（oC） |
|  | 沿着热流量方向的两个面之间的距离（m） |
| *λ* | 导热系数（W/(m·K)） |
|  | 综合导热系数（W/(m·K)） |

3 基本规定

**3.0.1** 本标准适用于土体、岩石和混凝土材料的热物性测试和土体热致力学特性测试。

**3.0.2** 在进行室内土体、岩石和混凝土材料的热物性测试和土体热致力学特性测试前，应明确所测样品的环境温度、物理特性和压力特性。

**3.0.3** 在进行室内土体、岩石和混凝土材料的热物性测试和土体热致力学特性测试时，应保持室内环境应无明显对流、传导、辐射等传热现象。

**3.0.4** 在设计室外土体、岩石和混凝土材料的热物性测试时，应具备完整的能源地下结构的设计施工资料，并根据设计资料进行传感器布置设计。

**3.0.5** 在进行室外土体、岩石和混凝土材料的热物性测试时，应根据能源地下结构和上部结构施工情况安排测试时间，宜做到不影响结构正常施工进度。

4 土体、岩石和混凝土材料热物性测试

**4.1 一般规定**

**4.1.1** 测试前要确定所测试样的密度、含水率以及粒径分布等本身固有特性以及试样所处环境的温度和压力。

**4.1.2**土体试样制备要符合《土工试验方法标准》GB/T50123的有关规定。

**4.1.3** 混凝土试样制备参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T50081。

**4.1.4** 测试前需要对导热系数测量仪器进行校准，测量已知材料的导热系数误差不超过5%方可进行试验。

**4.1.5** 对于现场土体和岩石热物性测试，本标准计算的是能源地下结构或者地源热泵系统在运行过程中，热量从传热液传输到周围土体的综合导热系数。

**4.1.6** 本标准所测现场综合导热系数受到多种因素的影响，包括建筑材料、传热管材料、传热管的管形、传热管直径、传热液以及传热液体流速等。

**4.2 测试方法**

**4.2.1** 导热系数定义为当物体内部存在一定的温度梯度及温差时单位面积区域内单位时间内通过导热传递的能量大小与法向温度梯度的比值，表示为：

  (4-1)

式中：——导热系数（W/(m·K)）；

*Q*——通过试样的热流量（W）；

*A*——试样中热流量通过的正面面积（m2）；

——沿着热流量方向的两个面之间的温度差（oC）；

——沿着热流量方向的两个面之间的距离（m）。

**4.2.2** 土体、岩石和混凝土材料导热系数的测试方法，主要分为两类：稳态法和瞬态法。

**4.2.3** 瞬态法测试原理是在无限大介质中，当其处于初始热平衡状态下受到瞬间加热脉冲，测量介质因此而产生的热量传导变化。瞬态法的测量时间较短，能够快速获取所测介质的导热系数。

**4.2.4** 测量导热系数的瞬态法，具体包括热线法（包括热丝和热探针）、热带法、平面热源法、激光闪射法、光学扫描法以及差示扫描量热法等。

**4.2.5** 稳态法的测试原理是通过控制待测试样的温度分布，当试样上的温度分布稳定后，测量试样内的温度分布和热流分布，通过公式计算得到试样的导热系数。导热系数稳态法的具体测量方法，包括纵向热流法、径向热流法、热保护板法以及分棒法等。

**4.2.6** 土体、岩石和混凝土材料室内导热系数测量仪器可以使用KD2 Pro、Hot Disk等成品仪器或者经过校准测量的自制设备。

**4.2.7** 测定现场综合导热系数测试方法——恒热通量法。

通过提供恒定的加热功率，记录进水口和出水口传热液的温度随时间的变化，进水口和出水口的传热液温度逐渐升高，逐步达到换热平衡，利用传热液进水口和出水口平均温度随对数时间的变化曲线，根据式（4-2）计算综合导热系数。

  (4-2)

式中：——综合导热系数（W/(m·K)）；

*q*——系统的实际加热功率（W）；

*k*——进水口和出水口传热液平均温度与时间对数关系的线性拟合直线的斜率；

*H*——钻孔埋深深度（m2）。

**4.2.8** 测定现场土体、岩石和混凝土材料的综合导热系数需要结合能源地下结构或地源热泵的传热液循环工作系统，能源地下结构的设计可参照《桩基地热能利用技术标准》GJ/T 438、《地源热泵系统工程技术规范》GB 50366和《能量桩桥面除冰融雪系统技术规程》T/CECS 1316等标准。

**4.2.9** 现场综合导热系数仪器要求

**1** 所用恒定加热功率的加热器应满足长期稳定工作的要求，稳定工作时长超过500小时；

**2** 进水口和出水口处应安装温度计，温度计测量精度不低于0.1oC，能够实时反馈进水口和出水口温度的变化；

**3** 所用循环水泵应可设置循环流量，最高扬程必须高于该能源地下结构或地源热泵系统的高度；

**4** 进水口宜安装流量计，用于测量相应的流速，具体要求如下：

1）流量计公称通径应等于换热管直径；

2）流量计量程宜根据换热水管数量确定，单根流量宜为0.1~3m3/h；

3）流量计公称压力应满足循环管路压力要求。

**4.3 试样制备**

**4.3.1** 颗粒粒径小于60mm的原状土样和扰动土样制样参照《土工试验方法标准》GB/T50123，试样尺寸应根据所选用导热系数测量仪器测量要求确定，并定制相关尺寸环刀、击样器、压样器以及盛样器等。

**4.3.2** 混凝土和岩石材料需要预制成导热系数测量仪器所规定尺寸，并按照要求将表面打磨平整。

**4.3.3** 土体、岩石和混凝土材料的制备和状态调节应同时按相应的测量仪器标准要求进行。当没有相应的标准要求时可参考规范《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定防护热板法》GB/T 10294和《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定热流计法》GB/T 10295。

**4.3.4** 综合导热系数测试系统搭建

**1** 综合导热系数测试系统，包括温度计、流量计、水箱、加热设备、循环水泵以及外部保温水管（图4.3.1）。



**图4.3.1 综合导热系数测试系统**

**2** 试验过程中，循环水泵可实现能源地下结构或者地源热泵系统管内与水箱内的换热液体的循环，三者通过外套有保温材料的PE管连通，减少循环液的热量损失。

**3** PE管与能源地下结构或地源热泵连接处安装有温度传感器和流量计，用于测量进水口和出水口处的实际温度和流量。

**4** 测试系统中所需仪器在测量前必须经过严格校准。

**5** 测试系统测量综合导热系数所需时间较长，可连接自动测量仪器进行试验。

**4.4 热学特性测定**

**4.4.1** 探针法：在试样的中心位置插入探针，如土体试样硬度过高或者为岩石、混凝土试样，需预先在试样表面打孔，测量时在孔内放入导热凝胶，并在探针周围涂抹导热凝胶。

**4.4.2** 平板法：测试前需要将混凝土或岩石试样表面打磨平整，确保试件和工作表面之间获得紧密的接触。混凝土试件表面应与它接触的工作表面一样平整。

**4.4.3** 测量过程中需要保持试样周围没有空气对流情况出现，禁止人员走动，以减小测量误差。

**4.5 现场综合导热系数测定**

**4.5.1** 通过外套保温水管将能源地下结构或者地源热泵系统的进出水管与温度计、流量计、水箱、加热设备、循环水泵相连通。

**4.5.2** 恒定加热功率的选择根据能源地下结构或者地源热泵系统的实际设计换热功率决定，恒定换热功率宜选用2~5kW。

**4.5.3** 传热液流速的选择参照《地源热泵系统工程技术规范》GB 50366和《桩基地热能利用技术标准》JGJ/T438相关标准，确保换热器内流体始终保持紊流状态。

**4.5.4** 设定恒定加热功率和传热液流速，开启循环水泵，实时监测传热液进水口和出水口平均温度随时间的变化。数据记录频率应根据温度变化的速率决定，遵循温度变化大，数据记录频率高，温度变化慢，数据纪律频率低。当进水口和出水口温度变化低于1%时，认为系统达到换热平衡。

**4.5.5** 分别按结构物放热和取热两种工况进行。

**4.6** 结果分析与评估

**4.6.1** 土体、岩石和混凝土材料试样的导热系数测量，应进行重复测量，至少重复3次，且重复误差不超过2%。

**4.6.2** 试验过程宜按本标准附录A的格式进行记录，确保数据记录的完整性和准确性。

**4.6.3** 应分析导热系数随土体、岩石和混凝土材料的温度、含水率以及相对密度的变化。

**4.6.4** 现场综合导热系数试验过程宜按本标准附录B的格式进行记录，岩土热物性测试报告宜按照本标准附录C的格式进行记录，确保试验过程的完整性和可追溯性。

**4.6.5** 现场综合导热系数试验所得传热液进水口和出水口平均温度随时间的坐标轴为半对数坐标，求得传热液进水口和出水口平均温度随对数时间的变化曲线的斜率。

5 土体热致力学特性测试

**5.1 一般规定**

**5.1.1** 测试前要确定所测土体试样的密度、含水率以及粒径分布等固有特性以及试样所处环境的温度和压力。

**5.1.2** 土体热致力学特性测试所制备土体试样要符合《土工试验方法标准》GB/T50123的有关规定。

**5.1.3** 土体热致力学特性测试，可采用传统室内土工试验仪器在温控箱内进行或者在传统室内土工试验仪器的基础上增加温控系统来实现，传统室内土工试验仪器设备要符合《土工试验方法标准》GB/T50123的有关规定。

**5.2 温控直接剪切试验**

**5.2.1** 本试验方法分为快剪、固结快剪和慢剪三种。

**5.2.2** 快剪试验和固结快剪试验的土样宜为渗透系数小于1×10-6cm/s的细粒土。

**5.2.3** 温控直接剪切试验步骤与一般的直接剪切试验步骤类似，传统的直接剪切操作步骤应按照《土工试验方法标准》GB/T50123的有关规定进行。主要区别在于引入了温度控制的步骤，可以按照以下步骤进行：

**1** 准备试验样品：获取或准备适当尺寸和几何形状的试验样品，确保符合试验标准的要求。

**2** 准备剪切装置：使用直接剪切试验机或其他适当的装置，确保设备处于良好的工作状态，并进行必要的校准和调整。

**3**  安装样品：将试验样品安装到剪切装置中，确保样品位于正确的位置，剪切平面是水平的。

**4** 连接温控系统：将温控系统到电源和试验设备，确保连接安全可靠，同时保留试验设备的机械性能。对试样进行升温或者降温的温度变化速率宜为5℃/h，到每个目标温度后应保持恒温1h。

**5** 进行试验：启动温控系统，并同时进行直接剪切试验。确保在试验过程中温度保持在所需范围内，并记录试验数据，包括剪切应力、剪切应变等。

**6** 监控温度：在试验过程中持续监控温度，确保温控系统的稳定性。如果有必要，可以根据实验进展调整温度参数。

**5.2.4** 计算、制图和记录符合《土工试验方法标准》GB/T50123的有关规定的同时，应记录试验时温度。撰写试验报告，详细记录温控直接剪切试验的步骤、数据和结论。确保报告中包括足够的信息，以便他人能够理解和重复试验。

**5.3 温控压缩固结试验**

**5.3.1** 土样应为饱和的细粒土。当只进行压缩试验时，可以用于非饱和土。

**5.3.2** 本试验有温控系统装置，其他设备符合《土工试验方法标准》GB/T50123的有关规定。

**5.3.3** 操作步骤应按照《土工试验方法标准》GB/T50123的有关规定进行。

**5.3.4** 计算、制图和记录符合《土工试验方法标准》GB/T50123的有关规定的同时，应记录试验时的温度。

**5.4 温控三轴试验**

**5.4.1** 土样粒径应小于 20mm，其他应符合《土工试验方法标准》GB/T50123的有关规定。

**5.4.2** 温控三轴仪为本试验所用的主要仪器设备，应符合下列规定：

**1** 应变控制式三轴仪：由定制压力室、轴向加压设备、周围压力系统、反压力系统、孔隙水压力量测系统、轴向变形和体积变化量测系统组成。

**2** 压力室改造可设置双层隔热玻璃，外层玻璃为有机玻璃、内层玻璃为钢化玻璃，两层玻璃之间填充空气夹层。钢化玻璃的热膨胀系数应足够小，使得温度变化引起的变形能够满足压力室密封的要求，并具有良好的热稳定性。压力室内设置可连通外界的螺旋管道，控温水箱通过连通压力室内螺旋管道实现对试验温度的控制。

**3** 其他必要设备：击样器、饱和器、切土器、原状土分样器、切土盘、承膜筒、对开圆膜、天平以及橡皮膜。

**4** 周围压力的测量准确度应不低于全量程的1%。根据试样的强度大小，选择不同量程的测力计，应使最大轴向压力的准确度不低于1%。

**5** 孔隙水压力量测系统内的气泡应完全排除。系统内的气泡可用纯水冲出或施加压力使气泡溶解于水，并从试样底座溢出。整个系统的体积变化因数应小于1.5×10-5cm3/kPa。

**6** 管路应保持畅通，各连接处应无漏水，压力室活塞杆在轴套内应能滑动。

**7** 橡皮膜在使用前应仔细检查其完整性，其方法是扎紧两端，向膜内充气，在水中检查，应无气泡溢出，方可使用。

**5.4.3** 主要分为不固结不排水剪试验、固结不排水剪试验和固结排水剪试验，温控过程应设置于固结或者不固结过程中，对试样进行升温或者降温的温度变化速率宜为5℃/h，到每个目标温度后应保持恒温1h。不排水过程中排水管应保持关闭状态，排水过程中排水管保持打开状态。

**5.4.4** 在温度变化过程中，岩土体试样所得排水体积和位移应减去相同工况下塑料空心圆柱的结果。

**5.4.5** 其他数据处理参照《土工试验方法标准》GB/T50123和《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T50081。

**5.5** **温控渗透试验**

**5.5.1** 温控渗透试验主要分为常水头渗透试验和变水头渗透试验，常水头渗透试验适用于粗粒土，变水头渗透试验适用于细粒土。

**5.5.2** 试验用水宜采用实际存在于土中的天然水。如有困难，可用纯水或经过过滤的清水。

**5.5.3** 试验仪器采用传统的渗透仪器，通过设置温控设备以控制水的温度，其他设备仪器参照《土工试验方法标准》GB/T50123。

**5.5.4** 常水头渗透试验和变水头渗透试验的记录格式应符合《土工试验方法标准》GB/T50123的规定。

附录A：室内土体、岩石和混凝土材料热学特性测试记录

表A 室内土体、岩石和混凝土材料热学特性测试记录

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 任务单号 |  | 试验者 |  |  |  |
| 试验日期 |  | 校核者 |  |  |  |
| 测试仪器 |  | 试验单位 |  |
| 试样编号 | 试样说明 | 密度(g/cm3) | 含水率  | 比重 | 孔隙率 | 导热系数 | 测量误差 |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |

附录B：现场综合导热系数试验记录

表B 现场综合导热系数试验记录

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 任务单号 |  |  | 试验者 |  |  |
| 试验日期 |  |  | 校核者 |  |  |
| 测试地点 |  |  | 试验单位 |  |  |
| 传感器编号 | 说明 | 时间 | 进水口温度 | 出水口温度 |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

附录C：岩土热物性测试报告样例

**1** 项目概况

1）项目所在区域

2）测试孔选址原则

**2** 测试孔基本参数

表C1测试孔基本参数表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 项目 | 参数 | 项目 | 参数 |
| 钻孔深度（m） |  | 钻孔直径（mm） |  |
| 地埋管换热器形式 |  | 埋管材质 |  |
| 地埋管内径（mm） |  | 地埋管外径（mm） |  |
| 回填料组成 |  | 回填料导热系数（W/m·K） |  |

**3** 测试参数及数据处理

1）岩土初始平均温度

（a）测试参数

（b）数据处理

2）岩土综合导热系数

（a）测试参数

（b）数据处理

**4** 测试孔测试结果汇总

表C2 测试孔测试结果汇总

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 测试参数 | 测试结果 |
| 1 | 岩土体初始平均温度（℃） |  |
| 2 | 岩土体综合导热系数（W/ m·K） |  |
| 3 | 岩土体容积比热容（J/ m3·K） |  |

本标准用词说明

为便于在执行本标准条文时区别对待，对于要求严格程度不同的用词，说明如下：

**1** 表示很严格，非这样做不可的用词：正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”。

**2** 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。

**3** 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：正面词采用“宜”或“可”，反面词采用“不宜”。

**4** 条文中指定应按其他有关标准、规范执行时，写法为“应符合……的规定”。非必须按所指定的标准、规范或其他规定执行时，写法为“可参照……”

引用标准名录

《土工试验方法标准》GB/T50123

《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T50081

《地源热泵系统工程技术规范》GB 50366

《桩基地热能利用技术标准》JGJ/T438

《能量桩桥面除冰融雪系统技术规程》T/CECS 1316

**中国工程建设协会标准**

**岩土体和混凝土材料热物性测试方法标准**

Test standard for thermal properties testing methods on rock, soil, and concrete materials

条文说明

目 次

[1 总 则 22](#_Toc165796897)

[2 术语和符号 23](#_Toc165796898)

[3 基本规定 24](#_Toc165796899)

[4 土体、岩石和混凝土材料热物性测试 25](#_Toc165796900)

[4.1 一般规定 25](#_Toc165796901)

[4.2 测试方法 25](#_Toc165796902)

[4.3 试样制备 25](#_Toc165796903)

[4.4 热学特性测定 28](#_Toc165796904)

[4.5 现场综合导热系数测定 28](#_Toc165796905)

[4.6 结果分析与评估 29](#_Toc165796906)

[5 土体热致力学特性测试 30](#_Toc165796907)

[5.2 温控直接剪切试验 30](#_Toc165796908)

[5.3 温控压缩固结试验 30](#_Toc165796909)

[5.4 温控三轴试验 31](#_Toc165796910)

[5.5 温控渗透试验 41](#_Toc165796911)

1 总 则

**1.0.1** 为测定土体、岩石和混凝土材料热物性，测试土体热力学特性，统一试验方法，制定本标准。

**1.0.2** 本标准适用于能源地下结构设计、建造过程中的基本热学、热力学特性试验。

**1.0.3** 室内土体、岩石和混凝土材料试样制备方法符合《土工试验方法标准》GB/T50123和《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T50081；室外土体、岩石和混凝土材料的热物性测试符合《地源热泵系统工程技术规范》GB 50366和《地源热泵系统工程技术规范》GB 50366。

2 术语和符号

**2.1.1** 本标准所测导热系数主要针对土体、岩石和混凝土材料。土体材料包括有机土和无机土，无机土包括巨粒土、含巨粒土、粗粒土和细粒土。混凝土材料是指由胶凝材料将集料胶结成整体的工程复合材料，主要用于能源地下结构。

**2.1.2** 本标准所测综合导热系数是指能源地下结构和周围土体一起的平均导热系数或者其他混合结构（多孔、多层、多结构、各向异性）的平均导热系数。

**2.1.3** 能源地下结构是指利用浅层地热能的各种永久或临时的地下结构。能源地下结构的形式，包括能源桩（能量桩）、能源隧道、能源地连墙、能源锚索（锚杆）、能源管廊等。

3 基本规定

**3.0.2** 室内土体、岩石和混凝土材料的热物性特性与材料本身的物理特性、所处的环境温度、压力以及材料所受到的压力有关，这些因素的变化会影响测量结果。因此，应根据测量计划和要求，严格控制土体、岩石和混凝土材料的基本物理特性、所处环境的温度和压力，以及材料所受到的压力，并将这些信息详细记录。

**3.0.3** 在进行室内土体、岩石和混凝土材料热物性测试时，如果样品属于半封闭状态，应严格控制样品周围的环境，避免热对流、传导、辐射等因素造成所测热物性结果不准确。

**3.0.4** 室外土体、岩石和混凝土材料的热物性测试，主要是针对能源地下结构进行。能源地下结构指的是承担荷载等工程作用的同时，能够进行浅层地热能的交换，室外土体、岩石和混凝土材料的热物性就是在这个交换过程中进行的。应测量结构物热量交换过程中结构物的温度和换热功率。

**3.0.5** 室外土体、岩石和混凝土材料的热物性测试，主要是服务能源地下结构工程的设计和建设。因此，在设计测试时间和测试计划时，应充分考虑各种突发事情和意外，宜不耽搁能源地下结构施工以及上部结构物施工进度。

4 土体、岩石和混凝土材料热物性测试

**4.1 一般规定**

**4.1.1**材料的导热系数与材料的矿物成分、密度、含水率、温度以及压力相关，应根据测量要求严格控制试样的物理特性和所处环境条件。

**4.1.4** 测试前需要对导热系数测量仪器进行校准，测量已知材料的导热系数误差不超过5%方可进行试验。

**4.2 测试方法**

**4.2.6** 推荐使用KD2 Pro、Hot Disk等较为成熟的成品仪器测量，也可使用自制设备，自制设备可参考规范《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定防护热板法》GB/T 10294和《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定热流计法》GB/T 10295。

**4.3** **试样制备**

**4.3.1**土体试样制备应符合规范《土工试验方法标准》GB/T50123：

**1** 本试验方法适用于颗粒粒径小于60mm的原状土和扰动土。

**2** 需要准备的仪器设备有：土工筛、天平、击样器、压样器、抽气设备（真空表和真空缸）、切土刀、钢丝锯、碎土工具、烘箱、保湿缸、喷水设备以及定制换刀。

**3** 根据所使用的测量导热系数的仪器定制环刀、击样器以及压样器的尺寸。

**4** 原状试样制备步骤

1. 将土样筒按标明的上下方向放置，剥去蜡封和胶带，开启土样筒取出土样。检查土样结构，当确定土样已经受到扰动或取土质量不符合规定时，则不应制备试样。
2. 根据试验要求用环刀切取试样时，应在环刀内壁涂一薄层凡士林，刃口向下放在土样上，将环刀垂直下压，并用切土刀沿环刀外侧切削土样，边压边削至土样高出环刀，根据试样的软硬采用钢丝锯或切土刀整平环刀两端土样，擦净环刀外壁，称环刀和土的总质量。
3. 从余土中取代表性试样测定含水率、颗粒分析等试验项目。
4. 切削试样时，应对土样的层次、气味、颜色、夹杂物、裂缝和均匀性进行描述，对低塑性和高灵敏度的软土，制样时不得扰动。

**5** 扰动土试样制备

1. 将土样从土样筒或包装袋中取出，对土样的颜色、气味、夹杂物和土类及均匀程度进行描述，并将土样切成碎块，拌合均匀，取代表性土样测定含水率。
2. 对含有机质的土样应根据试验项目取足够数量的土样，置于通风处晾干至可碾散为止。对砂土进行制样时，宜在105~110oC温度下烘干，对有机质含量超过5%的土、含石膏和硫酸盐的土，应在65~70oC温度下烘干。
3. 将风干或烘干的土样放在橡皮板上用木碾碾碎，对不含砂和砾的土样，可用碎土器碾散（碎土器不得将土粒破碎）。
4. 对分散后的粗粒土和细粒土，应使用土工筛过筛。对含细粉土的砾质土，应先用水浸泡并充分搅拌，使粗细颗粒分离后过筛。
5. 试样的数量根据试验项目而定，应有备用试样1~2个。
6. 将碾散的风干土样通过孔径2mm或5mm的筛，取筛下足够试验用的土样，充分拌匀测定风干含水率，装入保湿缸或塑料袋内备用。
7. 根据试验所需的土量与含水率，制备试样所需的加水量应按式（4.3.1-1）计算：

  (4.3.1-1)

式中：*m*w——制备试样所需要的加水量（g）；

*m*0——湿土（或风干土）质量（g）；

*ω*0——湿土（或风干土）含水率（%）；

*ω*1——制样要求的含水率（%）。

1. 称取过筛的风干土样平铺于搪瓷盘内，将水均匀喷洒于土样上，充分拌匀后装入盛土容器内盖紧，润湿一昼夜，砂土的润湿时间可酌减。
2. 测试润湿土样不同位置处的含水率，不应少于两点，含水率与要求的含水率之差不得大于±1%。
3. 根据环刀容积及所需的干密度，制样所需的湿土量应按式（4.3.1-2）计算：

  (4.3.1-2)

式中：*ρ*d——试样的干密度（g/cm3）；

*V*——试样体积（cm3）。

1. 扰动土制样可采用击样法：将根据环刀容积和要求干密度所需质量的湿土倒入装有环刀的击样器内，击实到所需密度。
2. 扰动土制样可采用压样法：将根据环刀容积和要求干密度所需质量的湿土倒入装有环刀的压样器内，以静压力通过活塞将土样压紧到所需密度。
3. 取出带有试样的环刀，称定制环刀和试样总质量，对不需要饱和，且不立即进行试验的试样，应存放在保湿器内备用。
4. 如试样需要饱和，宜根据土样的透水性能，进行饱和。粗粒土采用浸水饱和法；渗透系数大于10-4cm/s的细粒土，采用毛细管饱和法；渗透系数小于、等于10-4cm/s的细粒土，采用抽气饱和法。

**4.3.2**混凝土试样制备应符合规范《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T50081：

**1** 试模应符合现行行业标准《混凝土试模》JG237的有关规定，当混凝土强度等级不低于C60时，宜采用铸铁或铸钢试模成型；应定期对试模进行核查，核查周期不宜超过3个月。

**2** 振动台应符合现行行业标准《混凝土试验用振动台》JG/T245的有关规定，震动频率应为50Hz±2Hz，空载时振动台面中心点的垂直振幅应为0.5mm±0.02mm。

**3** 捣棒应符合现行行业标准《混凝土坍落度仪》JG/T248的有关规定，直径应为16mm±0.2mm，长度应为600±5mm，端部应呈半球形。

**4** 橡皮锤或木槌的锤头质量宜为0.25kg~0.50kg。

**5** 混凝土取样与试样的制备应符合现行国家标准《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T50080的有关规定。

**6** 每组试件所用的拌合物应从同一盘混凝土或同一车混凝土中取样。

**7** 取样或实验室拌制的混凝土应尽快成型；制备混凝土试样时，应采取劳动防护措施。

**8** 应将试模擦拭干净，在其内壁上均匀地涂刷一薄层矿物油或其他不与混凝土发生反应的隔离剂，试模内壁隔离剂应均匀分布，不应有明显沉积。

**9** 混凝土拌合物在入模前应保证其均匀性。

**10** 宜根据混凝土拌合物的稠度或试验目的确定适宜的成型方法，包括用振动台振实制作试件、用人工插捣制作试件或用插入式振捣棒振实制作试件。

**11** 试件成型后刮除试模上口多余的混凝土，待混凝土临近初凝时，用抹刀沿着试模口抹平。试件表面与试模边缘的高度差不得超过0.5mm。

**12** 试件成型抹面后应立即用塑料薄膜覆盖表面，或采取其他保持试件表面湿度的方法。

**13** 试件成型后应在温度为20oC±5oC、相对湿度大于50%的室内静置1d~2d，试件静置期间应避免受到振动和冲击，静置后编号标记、拆模，当试件有严重缺陷时，应按废弃处理。

**14** 试件拆模后应立即放入温度为20oC±2oC，相对湿度为95%以上的标准养护室中养护，或在温度为20oC±2oC的不流动氢氧化钙饱和溶液中养护。标准养护室内的试件应放在支架上，彼此间隔10mm~20mm，试件表面应保持潮湿，但不得用水直接冲淋试件。

**15** 试件的养护龄期可分为1d、3d、7d、28d、56d或60d、80d或90d、180d等。

**4.4** **热学特性测定**

**4.4.3**导热系数测量仪器在使用前应进行校准，并按照仪器的使用说明书进行。

**4.5** 现场综合导热系数测定

**4.5.1** 换热器与水平总管连接方法的确定，宜考虑其实用性、经济性以及阻力损失等因素。换热器中管内流体需维持一定的流速，因此需设置循环水泵以保证所需的换热系数和换热量。

**4.5.4** 现场综合导热系数测定试验步骤如下：

**1** 根据地下结构形式确定埋管形式；

**2** 平整测试孔周边场地，提供水电接驳点；

**3** 测试岩土初始温度；

**4** 测试仪器与测试孔的管道连接；

**5**  水电等外部设备连接完毕后，应对测试设备本身以及外部设备的连接再次进行检查；

**6** 启动电加热、水泵等试验设备，待设备运转稳定后开始读取记录试验数据，包括循环水进出口温度、流量以及试验过程中向地埋管换热器施加的加热功率等；

**7** 提取试验数据，分析计算得出岩土综合热物性参数；

**8** 测试试验完成后，对测试孔应做好密封、标识等防护工作，后续可与其他钻孔等同使用。

**4.6** **结果分析与评估**

**4.6.1**试验开始前，宜制备相同规格的试样三个，分别测量其导热系数，三个样的测量误差不超过2%，即证明试样具有可重复性，该试样方法可用于后续制样。所制样品应具有均匀性和可重复性。

**4.6.4**可以直接或间接获得的主要参数包括：初始（未受扰动的）平均地基温度、测试深度范围内综合导热率。结合工程地质学的知识，或者从其它试验或已有的资料中获得比热容，从勘察报告中得到天然重度，再结合本项测试中得到的综合热导率，可以计算出其热扩散系数。

**4.6.5**对于一些特殊地基土而言，如果温度改变导致的地基土中水分迁移现象显著，则其加热状态下的热响应测试与制冷状态下热响应测试所获得的岩土平均导热系数和换热性能有较大差别。

5 土体热致力学特性测试

**5.2 温控直接剪切试验**

**5.2.3** 温控系统装置可按照以下步骤操作：

**1** 设计温控系统装置：根据试验所需的温度范围和精度，设计一个温控系统，包括温度控制器、加热器或制冷器等组件。

**2** 选择温控系统装置：根据设计要求选择适当的温控系统装置，并确保它能够与直接剪切试验设备集成。

**3** 安装温控系统：将设计好的温控系统安装到直接剪切试验设备上，可能需要进行结构上的调整以容纳温控系统的组件。

**4** 连接温控系统：将温控系统连接到电源，并确保电气和机械连接是安全可靠的。

**5** 测试温控系统：在进行实际试验之前，测试温控系统的性能，确保它能够准确控制温度，并保持在所需的范围内。

**6** 设定温度参数：根据试验需要，设定试验期间所需的温度参数，包括目标温度、温度升降速率等。

**7**  进行预热：在进行正式试验之前，进行试验设备和温控系统的预热，以确保温度的稳定性。

**5.3 温控压缩固结试验**

**5.3.2** 温控系统在固结试验中的作用是维持土壤样品在一定的温度条件下进行试验，以研究土壤在特定温度下的压缩特性。以下是温控系统在固结装置中的基本作用和实现方式：

**1** 保持温度稳定性：温控系统旨在维持土壤样品在试验期间的稳定温度。这对于研究土壤在不同温度下的变形行为和压缩性质非常重要。

**2** 设定目标温度：使用温控系统，试验人员可以设定试验期间所需的目标温度。这可以在试验的不同阶段或对于不同试验条件进行调整。

**3** 加热和制冷：温控系统通常包括加热器和（或）制冷器，用于升高或降低固结装置中土壤样品的温度。这些装置通过调整温度控制器中的参数，使得试验条件能够在所需温度范围内保持稳定。

**4** 传感器和反馈控制：温控系统通常包括温度传感器，用于测量土壤样品的实际温度。这些传感器通过反馈控制系统与温度控制器连接，以确保实际温度与设定的目标温度保持一致。

**5** 温度均匀性：在固结试验中，确保土壤样品整体温度均匀性非常重要。温控系统应能够提供均匀的加热或制冷，以防止试验结果受到温度分布的影响。

**6** 在使用温控系统进行固结试验时，通常需要在试验开始前对系统进行校准和测试，以确保其性能和稳定性。

**5.4** **温控三轴试验**

**5.4.1** 试样制备和饱和应符合以下规定：

**1** 试样的高度宜为试样直径的2.0~2.5倍，当试样直径小于100mm时，允许的最大粒径为试样直径的1/10，当试样直径大于100mm时，允许的最大粒径为试样直径的1/5。

**2** 原状土试样步骤如下：

1. 对于较软的土样，先用钢丝锯或切土刀切取一稍大于规定尺寸的土柱，放在切土盘上下圆盘之间，用钢丝锯或切土刀紧靠侧板，由上往下细心切削，边切削边转动圆盘，直至土样被削成规定的直径为止。试样切削时应避免扰动，当试样表面遇有砾石或凹坑时，允许用削下的余土填补。
2. 对较硬的土样，先用切土刀切取一稍大于规定尺寸的土柱，放在切土架上，用切土器切削土样，边削边压切土器，直至切削到超出试样高度约2cm为止。
3. 取出试样，按规定的高度将两端削平，称量，并取余土测定试样的含水率。

**3** 扰动土试样制样：扰动土试样制备应根据预定的干密度和含水率备样后，在击样器内分层击实，粉土宜为3~5层，粘土宜为5~8层，各层土料数量应相等，各层接触面应创毛。击完最后一层，将击样器内的试样两端整平，取出试样称量对制备好的试样，应量测其直径和高度。试样的平均直径应按式（5.4.1-1）计算：

  (5.4.1-1)

式中：、、——分别为试样上、中、下部位的直径（mm）。

**4** 砂类土的试样制备应先在压力室底座上依次放上透水石、滤纸，橡皮膜和对开圆模。根据砂样的干密度及试样体积，称取所需的砂样质量，分三等分，将每份砂样填入橡皮膜内，填至该层要求的高度,依次第二层、第三层，直至膜内填满为止。当制备饱和试样时，在压力室底座上依次放透水板，橡皮膜和对开圆模，在模内注入纯水至试样高度的1/3，将砂样分三等分，在水中煮沸，待冷却后分三层，按预定的干密度填入橡皮膜内，直至膜内填满为止。当要求的干密度较大时，填砂过程中，轻轻敲打对开圆模，使所称的砂样填满规定的体积，整平砂面，放上滤纸、透水石、试样帽，扎紧橡皮膜。对试样内部施加5kPa负压力使试样能站立，拆除对开圆模。

**5** 试样饱和方法：抽气饱和法、水头饱和法或反压力饱和法。

**6** 本试验必须制备3个以上性质相同的试样，在不同的周围压力下进行试验。周围压力宜根据工程实际荷载确定。对于填土，最大一级周围压力应与最大的实际荷载大致相等。

**5.4.2** 测量仪器温度校准试验

**1** 如果温度改变仅发生在三轴仪压力室内，压力室内部与外部形成一个温差，压力室外壳、试样的顶盖、传力杆、透水石、滤纸以及排水管等组成的试验排水系统将随着设置温度的变化而发生膨胀或者压缩，从而对实际测量值产生一定干扰，应对三轴试验系统进行校准试验。

**2** 应使用一个与试样同尺寸的塑料圆柱安装到三轴仪中，按照透水石、滤纸、空心圆柱、滤纸、透水石以及顶盖的顺序进行安装，整体外套橡皮膜，试样上下使用橡皮圈箍紧。

**3** 当所做试验样为饱和样时，塑料空心圆柱中充满了水溶液，根据所做试验工况温度和围压进行试验，测量排水体积和位移传感器位移变化，所得结果用于修正试样试验结果。

**4** 当所做试验样为干样时，塑料空心圆柱也为干燥状态，根据所做试验工况温度和围压进行试验，测量位移传感器位移变化，所得结果用于修正试样试验结果。

**5.4.3** 温控三轴仪测定热力学特性具体试验步骤如下：

**1** 不固结不排水剪切试验

1. 关闭排水阀，根据饱和过程中的方法，施加一定围压，在不排水条件下测定试样的孔隙水压力，验证试样饱和度，如果试样不饱和，则先要根据饱和过程中的相关反压饱和方法饱和试样。
2. 试样完成饱和后，为准确模拟现场土的初始固结应力水平，应在不固结围压施加以前，先进行一个等压排水的固结过程，然后关闭排水阀门。
3. 试样施加各向相等的围压，逐渐升到预定荷载，一般为100kPa、200kPa、300kPa、400kPa四级，或者根据实际工程需要施加。
4. 施加温度荷载，加温速率宜为5 oC/h，升高到预定温度。
5. 轴向应变剪切的速率应控制在0.5%/min~1%/min，开其电动机，试样每产生0.3%~0.4%的轴向应变时（或0.2~0.3mm的位移值），测记一次位移百分表、量力环百分表和孔隙水压力的读数。当轴向应变大于3%时，每产生0.7%~0.8%的轴向应变时(或0.5mm的位移值)，测记一次读数。若加载过程中，量力环百分表读数出现峰值，则轴向应变增加到15%时停止试验，否则轴向应变需增加到20%方能停止试验。
6. 试验结束后，关闭电动机，卸除周围围压，用吸管排出压力室内的水，降低试样底座，移除压力室，拆除试样，记录试样破坏时的形状，称量试样质量，测定含水率。

**2** 固结不排水试验

1. 试样安装以后，将排水管中的气体排空，放水使排水管中的水头与试样中部齐高，再将此时孔压读数调整为零，或者记录此时的水头水位读数，作为孔压基准值。
2. 检测试样是否饱和。
3. 在已施加反压基准上，再对试样施加各向相等的围压，逐级升到预定的荷载，一般净增围压设100kPa、200kPa、300kPa和400kPa四级，或根据实际工程需要实施。
4. 打开排水阀，进行排水，直至超静孔隙水压力消散95%以上，记录固结完成后排水管读数，其与排水前排水管读数的差值即为排水量（试样体变）。判定固结完成时间标准是24h，固结完成后，关闭排水阀，测记当前孔隙水压力和排水管水面读数。
5. 打开排水阀门，施加温度荷载，加温速率宜为5 oC/h，升高到预定温度，升温到恒温结束，时间为24h。升温结束后，关闭排水阀，测记当前孔隙水压力和排水管水面读数。
6. 测记完成后，开动电动机，进行轴向加压，速率一般为黏性土轴向应变0.05%/min~0.1%/min，粉土轴向应变0.1%/min~0.5%/min，试样每产生0.3% ~0.4%的轴向应变时（或0.2~0.3mm的位移值），测记一次位移百分表、量力环百分表和孔隙水压力的读数；当轴向应变大于3%时，每产生0.7%~0.8%的轴向应变时（或0.5mm的位移值），测记一次读数；若加载过中，量力环百分表读数出现峰值，则轴向应变增加到15%时停止试验，否则轴向应变需增加到20%方能停止试验。
7. 试验结束后，关闭电动机，卸除周围围压，用吸管排出压力室内的水，降低试样底座，移除压力室，拆除试样，记录试样破坏时的形状，称量试样质量，测定含水率。

**3** 固结排水试验

1. 试样安装以后，将排水管中的气体排空，放水使排水管中的水头与试样中部齐高，再将此时孔压读数调整为零，或者记录此时的水头水位读数，作为孔压基准值。
2. 检测试样是否饱和。
3. 在已施加反压基准上，再对试样施加各向相等的围压，逐级升到预定的荷载，一般净增围压设100kPa、200kPa、300kPa和400kPa四级，或根据实际工程需要实施。
4. 打开排水阀，进行排水，直至超静孔隙水压力消散95%以上，记录固结完成后排水管读数，其与排水前排水管读数的差值即为排水量（试样体变）。判定固结完成时间标准是24h，固结完成后，关闭排水阀，测记当前孔隙水压力和排水管水面读数。
5. 打开排水阀门，施加温度荷载，加温速率宜为5 oC/h，升高到预定温度，升温到恒温结束，时间为24h。升温结束后，测记当前孔隙水压力和排水管水面读数。
6. 剪切过程中，由于是排水，因此在剪切前，不必关闭排水阀门，同时要改变剪切的速率，控制轴向应变增加的速率为0.003%/min~0.012%/min；另外，必须控制单位时间内超静孔隙水压力的增量，以保证剪切过程为排水，要求即时的孔压增量不超过0.05倍的初始围压。试样每产生0.3%~0.4%的轴向应变时（或0.2~0.3mm的位移值），测记一次位移百分表、量力环百分表和孔隙水压力的读数。当轴向应变大于3%时，每产生0.7%~0.8%的轴向应变时（或0.5mm的位移值），测记一次读数，若加载过程中，量力环百分表读数出现峰值，则轴向应变增加到15%时停止试验，否则轴向应变需增加到20%方能停止试验。

**5.4.5** 所得土体、岩石和混凝土材料热力学特性试验数据处理方法：

**1** 三轴试验结果计算：

1. 不固结不排水剪试验

**a**）轴向应变按式（5.4.5-1）计算：

  (5.4.5-1)

式中：*ε*1——轴向应变（%）；

*h*1——剪切过程中试样的高度变化（mm）；

*h*0——试样初始高度（mm）。

**b**）试样面积的校正，应按式（5.4.5-2）计算：

  (5.4.5-2)

式中：*A*a——试样的校正断面积（cm2）；

*A*0——试样的初始断面积（cm2）。

**c**）主应力差应按式（5.4.5-3）计算：

  (5.4.5-3)

式中：——主应力差（kPa）；

——大总主应力（kPa）；

——小总主应力（kPa）；

*C*——测力计率定系数（N/0.01mm或N/mV）；

*R*——测力计读数（0.01mm）；

10——单位换算系数。

**d**）以主应力差为纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制主应力差与轴向应变关系曲线。取曲线上主应力差的峰值作为破坏点，无峰值时，取15%轴向应变时的主应力差值作为破坏点。

**e**）以剪应力为纵坐标，法向应力为横坐标，在横坐标轴以破坏时的为圆心，以为半径（注脚表示破坏时的值），在应力平面上绘制破损应力圆，并绘制不同周围压力下破损应力圆的包线，求出不排水强度参数。

1. 固结不排水剪试验

**a**）试样固结后的高度，应按式（5.4.5-4）计算：

  (5.4.5-4)

式中：*h*c——试样固结后的高度（cm）；

∆*V*——试样固结后与固结前的体积变化（cm3）。

**b**）试样固结后的面积，应按式（5.4.5-5）计算：

  (5.4.5-5)

式中：——试样固结后的断面积（cm2）。

**c**）试样面积的校正，应按式（5.4.5-6）和（5.4.5-7）计算：

  (5.4.5-6)

  (5.4.5-7)

**d**）主应力差应按式（5.4.5-8）计算：

  (5.4.5-8)

式中：——主应力差（kPa）；

——大总主应力（kPa）；

——小总主应力（kPa）；

*C*——测力计率定系数（N/0.01mm或N/mV）；

*R*——测力计读数（0.01mm）；

10——单位换算系数。

**e**）有效主应力比应按式（5.4.5-9）计算：

有效大主应力：

  (5.4.5-9)

式中：——有效大主应力（kPa）；

——孔隙水压力（kPa）。

有效小主应力：

  (5.4.5-10)

式中：——有效小主应力（kPa）。

有效主应力比：

  (5.4.5-11)

**f**）孔隙水压力系数，应按式（5.4.5-12）计算：

初始孔隙水压力系数：

  (5.4.5-12)

式中：*B*——初始孔隙水压力系数；

——施加周围压力产生的孔降水压力（kPa）。

破坏时孔隙水压力系数：

  (5.4.5-13)

式中：——破坏时的孔隙水压力系数；

——试样破坏时主应力差产生的孔隙水压力（kPa）。

**g**）以主应力差为纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制主应力差与轴向应变关系曲线，取曲线上主应力差的峰值作为破坏点，无峰值时，取15%轴向应变时的主应力差值作为破坏点；以有效应力比为纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制有效应力比与轴向应变曲线；以孔隙水压力为纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制孔隙水压力与轴向应变关系曲线。

**h**）以为纵坐标，为横坐标绘制有效应力路径曲线图。并计算有效内摩擦角和有效粘聚力。

有效内摩擦角：

  (5.4.5-14)

式中：——有效内摩擦角；

——应力路径图上破坏点连线的倾角（°）。

有效粘聚力：

  (5.4.5-15)

式中：——有效粘聚力（kPa）；

——应力路径上破坏点连线在纵轴上的截距（kPa）。

**i**）以主应力差或有效主应力比的峰值作为破坏点，无峰值时，以有效应力路径的密集点或轴向应变15%时的主应力差值作为破坏点，绘制破损应力圆及不同周围压力下的破损应力圆包线，并求出总应力强度参数；有效内摩擦角和有效粘聚力，应以为圆心，为半径绘制有效破损应力圆确定。

1. 固结排水剪试验

**a**）试样固结后的高度，应按式（5.4.5-16）计算：

  (5.4.5-16)

式中：*h*c——试样固结后的高度（cm）；

∆*V*——试样固结后与固结前的体积变化（cm3）。

**b**）试样固结后的面积，应按式（5.4.5-17）计算：

  (5.4.5-17)

式中：——试样固结后的断面积（cm2）。

**c**）剪切时试样面积的校正，应按式（5.4.5-18）计算：

  (5.4.5-18)

式中：——剪切过程中试样的体积变化（cm3）；

——剪切过程中试样的高度变化（cm）。

**d**）主应力差应按式（5.4.5-19）计算：

  (5.4.5-19)

式中：——主应力差（kPa）；

——大总主应力（kPa）；

——小总主应力（kPa）；

*C*——测力计率定系数（N/0.01mm或N/mV）；

*R*——测力计读数（0.01mm）；

10——单位换算系数。

**e**）有效应力比及孔隙水压力系数

有效大主应力：

  (5.4.5-20)

式中：——有效大主应力（kPa）；

——孔隙水压力（kPa）。

有效小主应力：

  (5.4.5-21)

式中：——有效小主应力（kPa）。

有效主应力比：

  (5.4.5-22)

孔隙水压力系数，应按下式计算：

初始孔隙水压力系数：

  (5.4.5-23)

式中：*B*——初始孔隙水压力系数；

——施加周围压力产生的孔降水压力（kPa）。

破坏时孔隙水压力系数：

  (5.4.5-24)

式中：——破坏时的孔隙水压力系数；

——试样破坏时主应力差产生的孔隙水压力（kPa）。

**f**）以主应力差为纵坐标,轴向应变为横坐标，绘制主应力差与轴向应变关系曲线，取曲线上主应力差的峰值作为破坏点，无峰值时，取15%轴向应变时的主应力差值作为破坏点；以有效应力比为纵坐标轴向应变为横坐标绘制有效应力比与轴向应变曲线；以体积应变为纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制体应变与轴向应变关系曲线。

**g**）以主应力差或有效主应力比的峰值作为破坏点，无峰值时，以有效应力路径的密集点或轴向应变15%时的主应力差值作为破坏点，绘制破损应力圆及不同周围压力下的破损应力圆包线，并求出总应力强度参数；有效内摩擦角和有效粘聚力，应以为圆心，为半径绘制有效破损应力圆确定。

**5.5** **温控渗透试验**

**5.5.3**当设计控制水温的装置时，关注以下主要方面：

**1** 温度传感器和控制器：选择准确、灵敏的温度传感器和高质量的控制器，确保及时监测和调节水温。

**2** 加热和制冷系统：使用可靠的加热和制冷系统，确保在试验期间水温能够快速、准确地达到设定的目标温度。

**3** 水槽和循环系统：采用合适的水槽和循环系统，以确保水体中的温度均匀分布，防止局部温度梯度。

**4**  安全措施和校准验证：遵循安全规定，确保系统符合相关标准。定期校准和验证温度传感器和控制系统，以保证其准确性和可靠性。