

T/CECS XXXX-2022



**中国工程建设协会标准**

**透明土试验标准**

Standard for transparent soil model test

（征求意见稿）

中国计划出版社

**中国工程建设协会标准**

**透明土试验标准**

Standard for transparent soil model test

T/CECS XXXX-20XX

（征求意见稿）

主编单位：河海大学

重庆大学溧阳智慧城市研究院

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：2023年X月X日

中国计划出版社

2022 北京

**前 言**

根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2021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[2021]20号）的要求，标准编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国内标准，并在广泛征求意见的基础上，编制本标准。

本标准共分7章和4个附录，主要内容包括：总则、术语和符号、基本规定、透明砂土、透明黏土、透明土试验、回收与处理。

本标准由中国工程建设标准化协会勘测专业委员会归口管理，由河海大学、重庆大学溧阳智慧城市研究院负责具体技术内容的解释。执行过程中，如有意见或建议，请反馈给河海大学（地址：江苏省南京市西康路1号土木与交通学院，邮编：210024，邮箱： @，联系电话：025-83772015）。

**主编单位**：河海大学

重庆大学溧阳智慧城市研究院

**参编单位**（排序待定）：大连理工大学、三峡大学、同济大学、中国矿业大学、上海大学、上海市岩土工程检测中心有限公司、中国铁路设计集团有限公司、河南大学、广东工业大学、河南工业大学、宁波大学、广西大学、中交投资南京有限公司、河海大学苏州研究院

**主要起草人**：孔纲强、刘汉龙、杨庆、周杨、陈建峰、武亚军、王忠涛、隋旺华、陈敏、赵红华、张建伟、周航、陈育民、齐昌广、高俊丽、高磊、马少坤、沈扬、刘俊驰、王成青、徐志军、袁炳祥、陈荣淋、仉文岗、于江华

**主要审查人**：XXX XXX XXX

**目 次**

[1 总 则 1](#_Toc112692359)

[2 术语和符号 2](#_Toc112692360)

[2.1 术 语 2](#_Toc112692361)

[2.2 符 号 4](#_Toc112692362)

[3 基本规定 6](#_Toc112692363)

[4 透 明 砂 土 7](#_Toc112692364)

[4.1 固 体 颗 粒 7](#_Toc112692365)

[4.2 孔 隙 液 体 7](#_Toc112692366)

[4.3 透 明 砂 土 制 配 8](#_Toc112692367)

[4.4 示 踪 粒 子 9](#_Toc112692368)

[5 透 明 黏 土 10](#_Toc112692369)

[5.1 固 体 颗 粒 10](#_Toc112692370)

[5.2 孔 隙 液 体 10](#_Toc112692371)

[5.3 透 明 黏 土 制 配 10](#_Toc112692372)

[5.4 示 踪 粒 子 11](#_Toc112692373)

[6 透明土试验 12](#_Toc112692374)

[6.1 一 般 规 定 12](#_Toc112692375)

[6.2 仪 器 设 备 12](#_Toc112692376)

[6.3 试 验 操 作 13](#_Toc112692377)

[6.4 数 据 分 析 13](#_Toc112692378)

[7 回收与处理 15](#_Toc112692379)

[7.1 一 般 规 定 15](#_Toc112692380)

[7.2 固 体 回 收 15](#_Toc112692381)

[7.3 液 体 处 理 15](#_Toc112692382)

[附录A （资料性附录） 土体参数表 16](#_Toc112692383)

[附录B （资料性附录） 试验环境记录表 17](#_Toc112692384)

[附录C （资料性附录） 试验进程记录表 18](#_Toc112692385)

[附录D （资料性附录） 试验固废液表 19](#_Toc112692386)

[本标准用词说明 20](#_Toc112692387)

[引用标准名录 21](#_Toc112692388)

[条文说明 22](#_Toc112692388)

**Contents**

[1 General Provisions 1](#_Toc111458812)

[2 Terms and Sympols 2](#_Toc111458813)

[2.1 Terms 2](#_Toc111458814)

[2.2 Sympols 4](#_Toc111458815)

[3 Basic Requirements 6](#_Toc111458816)

[4 Transparent Sand 7](#_Toc111458817)

[4.1 Solid particles 7](#_Toc111458818)

[4.2 Pore fluid 7](#_Toc111458819)

[4.3 Preparation of transparent sand 8](#_Toc111458821)

[4.4 Tracer particle 9](#_Toc111458822)

[5 Transparent Clay 10](#_Toc111458824)

[5.1 Solid particles 10](#_Toc111458825)

[5.2 Pore fluid 10](#_Toc111458826)

[5.3 Preparation of transparent clay 10](#_Toc111458827)

[5.4 Tracer particle 11](#_Toc111458828)

[6 Transparent Soil Test 12](#_Toc111458830)

[6.1 General provisions 12](#_Toc111458831)

[6.2 Instrument and equipment 12](#_Toc111458832)

[6.3 Test operation 13](#_Toc111458833)

[6.4 Data analysis 13](#_Toc111458834)

[7 Recovery and Disposal 15](#_Toc111458835)

[7.1 General provisions 15](#_Toc111458836)

[7.2 Solid recovery 15](#_Toc111458837)

[7.3 Liquid handling 15](#_Toc111458838)

[Appendix A Table of soil parameters 16](#_Toc111458839)

[Appendix B Test environment record 17](#_Toc111458840)

[Appendix C Test progress record 18](#_Toc111458841)

[Appendix D Table of test solid and waste liquid 19](#_Toc111458842)

[Explanation of Wording in This Standard 20](#_Toc111458843)

[List of Quoted Standards 21](#_Toc111458844)

[Addition: Explanation of Provisions 22](#_Toc112692388)

1 总 则

**1.0.1** 为统一透明土试验方法与要求，做到安全适用、技术先进、经济合理、确保质量、环境保护，制定本标准。

**1.0.2** 本标准适用于采用透明土开展的各类模型试验。

**1.0.3** 透明土试验的材料制配、系统设计、数据分析和操作步骤除应符合本标准外，尚应符合国家现行有关标准的相关规定。

2 术语和符号

下列术语和定义适用于本文件。

2.1 术 语

**2.1.1** 透明土 transparent soil

利用透明固体颗粒材料和具备相同折射率的孔隙液体充分混合，形成的饱和试样可以模拟天然饱和土体，称为透明土。

**2.1.2** 硅胶 silica gel

又称硅酸凝胶，是一种具备高活性吸附的非晶态二氧化硅产品。

**2.1.3** 熔融石英砂 fused silica

天然石英在高温冷却后形成的非结晶二氧化硅产品。

**2.1.4** 透明度 transparency

能够透过光线的程度。

**2.1.5** 折射率 （又称折光率） refractive index

光在真空中的传播速度与光在介质中的传播速度之比。

**2.1.6** 粘度 viscosity

流体或半流体流动程度的难易。

**2.1.7** 密度 density

每一空间单位（如面积、长度、体积）的量（如质量、电量、能量）的分布。

**2.1.8** 有机液体 organic liquid

由低碳数的卤代烃、醇、醚、羧酸、酯构成的化合物，本标准中涉及有机液体有乙醇、异丙醇、二甲基硅油、煤油、正十二烷、白油、石蜡、丙三醇、变压器油、聚乙二醇等。

**2.1.9** 正十二烷 dodecane

一种有机物，化学式为C₁₂H₂₆，[式量](https://baike.baidu.com/item/%E5%BC%8F%E9%87%8F/1582730" \t "_blank)为170.38。

**2.1.10** 白油 （又称矿物油） mineral oil

由石油所得精炼液态烃的混合物，[原油](https://baike.baidu.com/item/%E5%8E%9F%E6%B2%B9/789512" \t "_blank)经常压和减压分馏、溶剂抽提和脱蜡，加氢精制而得的有机物。

**2.1.11** 无机液体 inorganic liquid

通常指无机盐或无机酸、碱的水溶液，本标准中涉及无机液体主要为溴化钙溶液。

**2.1.12** 溴化钙 calcium bromide

无机盐的一种，分子式为CaBr2，无色斜方针状结晶或晶块，无臭，味咸而苦。

**2.1.13** 水系微孔滤纸 （又称微孔滤膜） microporous membrane

由精制硝化棉，加入适量醋酸纤维素、丙酮、正丁醇、乙醇等制成，亲水，无毒卫生，是一种多孔性的薄膜过滤材料，孔径分布比较均匀的微孔，微孔率高达80‰的绝对孔径。主要用于水系溶液的过滤，故也称水系膜。

**2.1.14** 真空抽滤 vacuum filtration

利用抽气造成的负压加速滤水的方法。

**2.1.15** 活性炭 activated carbon

由木质、煤质和石油焦等含碳的原料经热解、活化加工制备而成，具有发达的孔隙结构、较大的比表面积和丰富的表面化学基团，特异性吸附能力较强的炭材料的统称。

**2.1.16** 砂雨法 sand rain method

利用沙漏控制落距及出砂速度获得可靠均匀性砂土地基的方法。

**2.1.17** 示踪粒子 tracer particle

用以描述、记录土体运动轨迹的粒子。

**2.1.18** 无定形二氧化硅 amorphous silica

没有晶体结构的二氧化硅物质，如石英玻璃、熔融石英、微细无定型物（包括硅溶胶、硅胶、沉淀SiO2、气相SiO2）。

**2.1.19** 锂皂石 laponite

一种含镁、锂、硅的黏土矿物，属蒙脱石、蛭石族中的蛭石亚族，晶体结构为三八面体型。

**2.1.20** 卡波姆 carbopol

丙烯酸键合烯丙基蔗糖或季戊四醇烯丙醚的高分子聚合物。

**2.1.21**  粒子图像测速（PIV） particle image velocimetry

粒子图像测速，是一种用多次摄像以记录流场中粒子的位置，并分析摄得的两次或多次图像，获得每一小区域中粒子图像的平均位移，从而测出粒子运动速度的方法。

**2.1.22** 散斑场 speckle field

被激光照明的粗糙物面在透镜的像面上形成的散斑照相。

2.2 符 号

*v*i——透明土清晰度相对值；

*u*i——为各根杆在透明土中灰度值；

*f(x,y)*——图像中经二阶处理后各点像素灰度值；

*m*i, *n*i ——所在图像区域所形成的二阶矩阵的行数与列数；

*A*0——为图像处理去除测试杆后透明材料的平均灰度值；

*n*s——制配的透明土体折射率（-）；

*n*o1——第一种有机液体折射率（-）；

*n*o2——第二种有机液体折射率（-）；

*m*o1——第一种有机液体质量（kg）;

*m*o2——第二种有机液体质量（kg）；

*m*卡波姆——卡波姆材料质量（W/m2）；

*m*水——纯水质量（W/m2）；

*m*氢氧化钠——氢氧化钠质量（W/m2）。

3 基本规定

**3.0.1** 透明土试验材料，包括光学上透明可见的人工制配土体的固体颗粒及孔隙液体。

**3.0.2** 透明土试验材料存放及试验操作过程应满足防火、防爆等安全要求。试验材料涉及化学材料时应保证通风实验环境，以保证实验人员安全。

**3.0.3** 透明土试验的模型尺寸，除了应考虑试验目的、相似比等因素之外，还应考虑透明土材料的透明度。

**3.0.4** 透明土制配完成后应测量其基本物理力学特性，宜按照《土工试验方法标准》GB/T50123或相关行业规范中的相关规定执行。评估所制配透明土模拟天然土体的相似性或进行模型试验的相似比。

**3.0.5** 透明土材料制配及试验应考虑光线、温度变化对土体光学透明度的影响，同时应尽量减少人为操作对试验结果的影响。

**3.0.6** 完成透明土的制配过程后，应进行透明度的量化工作。可采用将灰度图像转化成由代表明暗程度的数字组成的矩阵，定义清晰度评价函数来衡量。

**3.0.7** 应根据透明土可视化模型试验中散斑场的质量、图片的清晰度，调整系统中各装置的位置，并在试验中固定其相对位置。

**3.0.8** 透明土试验应遵守实验室安全管理规定，在试验结束后废弃土体固、液应分开回收处置，防止污染环境。

4 透 明 砂 土

4.1 固 体 颗 粒

**4.1.1** 透明砂土固体颗粒一般选用二氧化硅化合物。

**4.1.2** 所选透明土固体颗粒应与天然土颗粒比重接近，且具备良好透明度。

**4.1.3** 透明土固体颗粒折射率宜用最小偏向角法或自准直法测量。

4.2 孔 隙 液 体

**4.2.1** 用来模拟孔隙液体的无机溶液，应具有良好的透明度。

**4.2.2** 无机液体折射率的测量方法应符合《化学试剂折光率测定通用方法》GB/T614中的规定。

**4.2.3** 无机液体宜与模拟孔隙液体具有相近的粘度和密度，不与透明土固体颗粒发生化学反应。液体粘度的测量方法应符合《液体粘度的测定》GB/T22235中的规定。

**4.2.4** 以溴化钙溶液为孔隙液体时，需考虑其吸湿性对效果影响，通常采用以下方法：

**1** 用棕色玻璃瓶保存溴化钙，并将其贮存在干燥阴凉的地方，密封避光保存。

**2** 如果实验中使用了不止一瓶溴化钙，则需重新测量每瓶溴化钙的折射率-浓度关系。

**3** 制备孔隙流体时，溴化钙溶液浓度应高于所需浓度。

**4.2.5** 无机液体应根据温度调整浓度获取合理的折射率。

**4.2.6** 用来模拟孔隙液体的有机溶液，应与透明土固体颗粒具备一致的折射率。

**4.2.7** 有机液体折射率的测量方法应符合《化学试剂折光率测定通用方法》GB/T614中的规定，可参考4.2.2中推荐方法。

**4.2.8** 有机液体宜具备模拟孔隙液体相近的粘度和密度，不与透明土固体颗粒发生化学反应。液体粘度的测量方法应符合《液体粘度的测定》GB/T22235中的规定，可参考4.2.3中推荐方法。

**4.2.9** 孔隙液体为多种液体混合而成的有机液体时应满足：液体不互溶、无化学反应、两种液体折射率分别大于和小于固体颗粒折射率。可采用混合有机溶液折射率计算公式：

 （4.1）

式中： *n*s ——制配的透明土体折射率（-）；

*n*o1 ——第一种有机液体折射率（-）；

*n*o2 ——第二种有机液体折射率（-）；

*m*o1 ——第一种有机液体质量（kg）；

*m*o2 ——第二种有机液体质量（kg）。

**4.2.10** 烷烃类易燃液体存放应满足防火要求。

**4.2.11** 混合有机液体应根据温度调整质量比获取合理折射率。

4.3 透 明 砂 土 制 配

**4.3.1** 若孔隙液体为有机混合油，按照质量比调制与固体颗粒折射率一致的混合液体。

**4.3.2** 若孔隙液体为溴化钙溶液，透明砂土孔隙液体的制配应按下列步骤进行：

**1** 称量一定量的溴化钙及纯水。

**2** 搅拌、溶解、冷却至室温后测定温度及折射率。

**3** 调整溴化钙及纯水的质量比，重复溶解直至折射率与固体颗粒一致。

**4** 利用水系微孔滤纸和真空抽滤装置进行过滤，直至溶液清澈透明。若过滤后溴化钙溶液仍显淡黄色，可采用活性炭吸附。在过滤期间，需不断调整溴化钙和水的质量比，以保证折射率的一致。

**4.3.3** 纯水淘洗固体颗粒3~4 遍，浸泡在纯水中24时以上，以去除固体颗粒表面的灰尘和附着的氯离子等杂质。淘洗2~3遍、烘干、冷却、密封。

**4.3.4** 按照试验需求模拟土体密度计算所需固体颗粒质量，将固体颗粒缓慢倒入孔隙液体中，搅拌保持充分混合后宜静置抽真空。

4.4 示 踪 粒 子

**4.4.1** 若制配透明砂土激光散斑效果不佳，则可在制配土体中添加土体质量0.01%~1%的示踪粒子。

**4.4.2** 示踪粒子颜色应与激光颜色不同，在激光面清晰可见。

**4.4.3** 示踪粒子不与透明砂土颗粒及孔隙液体发生化学反应，示踪粒子大小宜根据试验所需土体材料性质及图片效果而定。

**4.4.4** 在以温度场为观测目的的透明土试验中不需要采用示踪粒子，在以渗流为观测目的的透明土试验中需要采用彩色荧光物质。

5 透 明 黏 土

5.1 固 体 颗 粒

**5.1.1** 透明黏土固体颗粒一般为气相或无定型二氧化硅、锂皂石、卡波姆等材料。

**5.1.2** 细颗粒粉末存放应满足防火、防爆要求。

**5.1.3** 宜按照试验中所模拟天然土体性质制配土体颗粒。

5.2 孔 隙 液 体

**5.2.1** 二氧化硅材料对应孔隙液体要求同4.2.3-4.2.5透明砂土的孔隙液体。

**5.2.2** 锂皂石及卡波姆材料对应的孔隙液体一般为纯水。

5.3 透 明 黏 土 制 配

**5.3.1** 在制配操作之前，为防止细颗粒物质对身体健康造成影响，需提前准备防雾面罩、橡胶手套和护目镜。

**5.3.2** 二氧化硅透明黏土制配流程同4.3中要求，并在制配过程后进行抽真空操作去除微小气泡。

**5.3.3** 以卡波姆等材料制配透明黏土应以氢氧化钠或氯化钠溶液为中和剂。

**5.3.4** 以卡波姆等材料制配透明黏土流程如下：

**1** 按照以下公式设计计算材料配比，称取卡波姆粉末，氢氧化钠粉末，及纯净水。

 （5.1）

式中： *m*卡波姆 ——卡波姆材料质量（W/m2）；

*m*水 ——纯水质量（W/m2）；

*m*氢氧化钠 ——氢氧化钠质量（W/m2）。

**2** 加热纯净水至50～60℃；然后，称量并加入卡波姆粉末，并在常温下密封静置8～10hrs；搅拌30～40min，密封静置8～10h。

**3** 称量氢氧化钠粉末，搅拌、溶解后制配成溶液并倒入卡波姆混合液中，快速均匀搅拌10～15 min至均匀粘稠状。

**4** 将示踪粒子加入土体中，搅拌均匀后利用真空泵抽真空方法去除气泡，完成制配。

**5** 可根据所需土体力学特性进行固结。

5.4 示 踪 粒 子

**5.4.1** 若制配土体内无天然杂质及气泡，宜在制配土体中添加土体质量0.01%~1%的示踪粒子。

**5.4.2** 示踪粒子颜色、化学性质及粒径方面规定同4.5中要求。

6 透明土试验

6.1 一 般 规 定

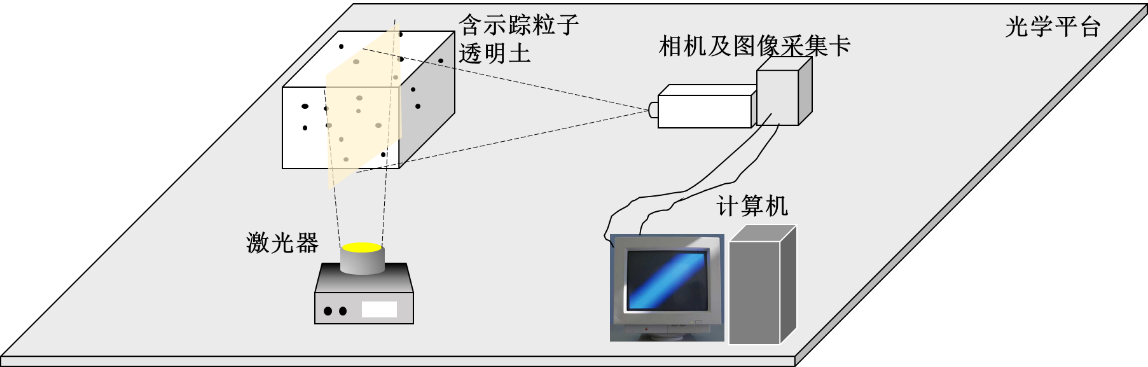
**6.1.1** 透明土试验场地宜恒温、整洁、通风、安静、光亮可调，温度宜控制为20℃~25℃左右，且试验时的温度应与制配时一致。湿度宜不大于60%。

**6.1.2** 每组透明土试验应在试验计划时间内尽快完成。

**6.1.3** 开展透明土相似模型试验，试验参量应满足模型试验相似率。

6.2 仪 器 设 备

**6.2.1** 透明土试验所需仪器设备包括计算机、试验平台、一字线激光发生器、数码相机及图像采集卡。透明土试验系统如图6.1.1所示。



**图6.1.1 透明土试验系统**

**6.2.2** 试验平台应坚固、稳定、水平平整，试验平台材料不易锈蚀。

**6.2.3** 数码相机、图像采集卡性能指标宜满足以下要求：

**1** 相机像素分辨率不宜小于2048×1536。

**2** 相机帧率不宜小于15fps。

**3** 图像采集卡可接相机，可自动采集图像。

**6.2.4** 一字线激光发生器性能指标宜满足以下要求：

**1** 功率不宜小于300mW，且能形成一个扇形激光面。

**2** 波长不宜小于532nm。

**3** 光束质量宜小于1.2。

**6.2.5** 试验中设计电源系统应符合GB 7251.1的规定。

6.3 试 验 操 作

**6.3.1** 透明土试验宜按以下技术步骤开展：

**1** 按照模型试验要求在模型槽中制配透明土，将模型槽固定于光学平台上，静置至试样变形稳定。

**2** 调整光学平台水平，固定支架，安装一字线激光发生器、数码相机及其他相应仪器设备，连接形成试验系统。

**3** 打开激光发生器，调节功率，检验激光在透明土中形成的散斑场切面的清晰度。

**4** 打开数码相机，镜头所在平面应平行于散斑场切面；调整拍摄范围和焦距，获得能够记录和获得清晰的视场，完成相机标定；设置数码相机拍摄模式与时间间隔。

**5** 试验开始前，设置标定点，以确定散斑场切面和相机的坐标位置。

**6** 开展试验，连续拍摄获得试验图片像素数据。

**6.3.2** 试验开始前，需做好安全准备，穿好工作服，佩戴橡胶手套，避免与孔隙液体直接接触；佩戴护目镜，避免激光刺激眼睛。

**6.3.3** 试验结束后，应及时洗手、洗脸、洗澡，更换工作服；分开回收处置废弃固体颗粒和孔隙液体。

6.4 数 据 分 析

**6.4.1** 可采用基于数字散斑相关算法的图像处理软件分析透明土试验中连续拍摄的图像。

**6.4.2** 图像处理软件分析步骤一般如下：

**1** 图像前处理：对图像文件重命名为统一格式的字符串。可删除差异微小且不影响实验结果分析的图像。使用相关图像处理工具程序裁剪不需要分析的图像区域。将待分析图像序列保存在同一文件夹中。

**2** 创建控制点：如在试验中布置有控制点，需对所有的图像分别建立相同的控制点。

**3** 设置图像分析参数：输入图像分析计算所需参数。

**4** 进行图像分析处理：运行图像分析，由软件对分析区域进行自动变形计算。

**5** 图像分析结果查看：打开分析结果文件，查看位移矢量图、云图。

**6.4.3** 为提高分析效率，可预先在图像上选取较少的测点，进行粗略运算分析，预览图像分析效果后再精细化分析处理。

**6.4.4** 图像处理结果精度受试验过程中图像拍摄质量、拍摄时间间隔影响很大**，**应严格控制试验过程中影响图像质量的各个因素。

7 回收与处理

7.1 一 般 规 定

**7.1.1** 废弃试验化学材料应遵守安全管理规定，防止污染环境。

**7.1.2** 试验完成后，废弃土体固、液应分开回收处置。

7.2 固 体 回 收

**7.2.1** 若固体颗粒在试验中表面未严重被其它颜色侵蚀、折射率变化在±10%范围内，可多次循环利用。

**7.2.2** 回收利用流程（流程方案、措施）

**1** 淘洗固体颗粒3~4 遍，浸泡24小时以上，以去除固体颗粒表面杂质。去油（可用洗洁精）和附着物。

**2** 用纯净水淘洗2~3遍、烘干、冷却、密封。

7.3 液 体 处 理

**7.3.1** 孔隙液体废液需用专用胶桶封装，贴上“有机/无机”标识，废液严禁直接倒入下水道。

**7.3.2** 孔隙溶液宜重复利用。

附录A  
（资料性附录）  
土体参数表

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 透明土试验名称 | |  | | 土体类型 | |  | 土样批数 |  |
| 土工试验类型 | |  | | 试验单位 | |  | 试验负责人 |  |
| 序号 | 试验尺寸 | | 测试时间 | | 试验结果 | | | |
| 01 |  | |  | |  | | | |
| 02 |  | |  | |  | | | |
| 03 |  | |  | |  | | | |
|  |  | |  | |  | | | |
|  |  | |  | |  | | | |
|  |  | |  | |  | | | |
|  |  | |  | |  | | | |
|  |  | |  | |  | | | |
|  |  | |  | |  | | | |
|  |  | |  | |  | | | |
|  |  | |  | |  | | | |
|  |  | |  | |  | | | |
|  |  | |  | |  | | | |
|  |  | |  | |  | | | |
|  |  | |  | |  | | | |
|  |  | |  | |  | | | |

附录B  
（资料性附录）  
试验环境记录表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 透明土试验名称 | |  | 土体类型 |  | 试验总时间 |  |
| 土工试验类型 | |  | 试验单位 |  | 试验负责人 |  |
| 时刻 | 类型 | | | | | |
| 9:00 | 环境温度 | 粉尘含量 | 光线 | 明火 |  |  |
| 9:15 |  |  |  |  |  |  |
| 9:30 |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |

附录C  
（资料性附录）  
试验进程记录表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 透明土试验名称 | |  | 土体类型 |  | 试验总时间 |  |
| 土工试验类型 | |  | 试验单位 |  | 试验负责人 |  |
| 时刻 | 照片编号 | | | | | |
| 9:00 |  | | | | | |
| 9:15 |  | | | | | |
| 9:30 |  | | | | | |
|  |  | | | | | |
|  |  | | | | | |
|  |  | | | | | |
|  |  | | | | | |
|  |  | | | | | |
|  |  | | | | | |
|  |  | | | | | |
|  |  | | | | | |
|  |  | | | | | |
|  |  | | | | | |
|  |  | | | | | |
|  |  | | | | | |
|  |  | | | | | |
|  |  | | | | | |
|  |  | | | | | |
|  |  | | | | | |

附录D  
（资料性附录）  
试验固废液表

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 透明土试验名称 | |  | | 土体类型 | |  | 土样批数 |  |
| 土工试验类型 | |  | | 试验单位 | |  | 试验负责人 |  |
| 序号 | 液体、液体类型/名称 | | 质量 | | 处置方式 | | | |
| 01 |  | |  | |  | | | |
| 02 |  | |  | |  | | | |
| 03 |  | |  | |  | | | |
|  |  | |  | |  | | | |
|  |  | |  | |  | | | |
|  |  | |  | |  | | | |
|  |  | |  | |  | | | |
|  |  | |  | |  | | | |
|  |  | |  | |  | | | |
|  |  | |  | |  | | | |
|  |  | |  | |  | | | |
|  |  | |  | |  | | | |
|  |  | |  | |  | | | |
|  |  | |  | |  | | | |
|  |  | |  | |  | | | |
|  |  | |  | |  | | | |

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》GBT50123

《液体粘度的测定》GB/T222352008

《化学试剂折光率测定通用方法》GB/T614

《半导体激光器总规范》GB/T 31358

《低压成套开关设备和控制设备第一部分：总则》GB 7251.1

**中国工程建设协会标准**

**透明土试验标准**

Standard for transparent soil model test

条文说明

（征求意见稿）

**目 次**

[1 总 则 24](#_Toc112692389)

[3 基本规定 25](#_Toc112692390)

[4 透 明 砂 土 27](#_Toc112692391)

[4.1 固 体 颗 粒 27](#_Toc112692392)

[4.2 孔 隙 液 体 27](#_Toc112692393)

[4.3 透 明 砂 土 制 配 34](#_Toc112692394)

[4.4 示 踪 粒 子 34](#_Toc112692395)

[5 透 明 黏 土 35](#_Toc112692396)

[5.1 固 体 颗 粒 35](#_Toc112692397)

[5.3 透 明 黏 土 制 配 35](#_Toc112692398)

[5.4 示 踪 粒 子 35](#_Toc112692399)

[6 透明土试验 36](#_Toc112692400)

[6.1 一 般 规 定 36](#_Toc112692401)

[6.2 仪 器 设 备 36](#_Toc112692402)

[6.3 试 验 操 作 37](#_Toc112692403)

[6.4 数 据 分 析 37](#_Toc112692404)

[7 回收与处理 38](#_Toc112692405)

[7.1 一 般 规 定 38](#_Toc112692406)

[7.3 液 体 处 理 38](#_Toc112692407)

1 总 则

**1.0.1** 近三十年来，国内外相关科研单位、高校等逐步开展透明土试验，并基于该技术开展各类科学研究；但是，世界范围内尚缺少透明土试验的统一标准；因此，亟需编制一部针对透明土试验的技术标准，统一透明土试验的技术方法与要求。

**1.0.2** 本标准规定了以人工合成透明土材料及数字图像处理技术为载体的透明土试验的材料制配、系统设计、数据分析和操作步骤等要求，为透明土试验提供技术指导及质量控制标准。

**1.0.3** 本标准应用过程中应结合国家标准《土工试验方法标准》GBT50123、《液体粘度的测定》GB/T222352008、《化学试剂折光率测定通用方法》GB/T614、《半导体激光器总规范》GB/T 31358的相关规定。

3 基本规定

**3.0.1** 光照射到物体上时，会产生部分或者全部的反射和折射，正是因为光的反射和折射，才会使得物体看起来变得透明或者不透明。人工合成透明土的基本原理是利用透明固体颗粒材料和具有相应折射率的孔隙液体充分混合，并排除空气，光线就可以穿过，土体即为透明的。

**3.0.2** 透明土试验材料若涉及可燃、微毒的化学试剂，透明土制配过程中若涉及细颗粒粉末物质，需保证实验室及试验过程中的环境安全。常用透明土材料归类整理及妥善保存是实验室安全运行保证，同时应在试验前、过程中、后及时记录试验环境状态。

**3.0.3** 不同试验材料配置的透明土的透明度不同，设计透明土试验的模型箱尺寸应考虑透明度的影响。

**3.0.4** 采用透明土进行相似模型试验宜满足模型相似比要求，非模型试验时需考虑其土性与天然土体的相似性。宜按照《土工试验方法标准》GB/T50123进行试验，测定透明砂土的颗粒级配、比重、密度、孔隙流体与固体颗粒的质量比、以及剪切强度等物理力学性质指标。

**3.0.6** 透明土试验图像的数据进行测量和处理，由于仪器或人为的原因，图像最清晰（或最不清晰）的位置不容易确定。因此有必要提出图像清晰度的量化测量方法。一般认为，清晰度是影像边缘的锐利程度。从影像清晰度的因素来看，主要有像素、亮度（在黑白图像中等同于灰度）、对比度等。透明土量化推荐方法为：通过在透明土中不同距离设置测试杆、获取图片分析测试杆的清晰度来反映透明材料的透明程度。将灰度图像转化成由代表明暗程度的数字组成的矩阵，透明土清晰程度可用清晰度评价函数来衡量。主要操作要点：

1 试验配制厚度为3cm、6cm 和12cm 的透明土试样，并进行了效果图拍摄。试验所用模型槽材质为有机玻璃，规格为25cm×3cm×15cm，25cm×6cm×15cm，25cm×9cm×15cm（长×宽×高）。为保证拍摄条件一致，同时控制色散，拍摄均在夜晚进行，光照条件为室内日光。

2 试验固定相机高度与距离模型槽的距离，排除人为拍摄抖动造成误差。

3 槽内测试杆斜对角线布置，等间距为 24mm。试验用 2mm×10mm×150mm （长 × 宽 × 高）黑色亚克力有机玻璃做标定杆标记，相邻标定杆间距。右起第一根紧贴槽壁。试验所用相机固定条件同上。

4 测试杆斜对角线布置，获取图片经黑白二阶处理后逐个分析各杆的灰度值及透明材料的平均灰度值，再引入评价函数对不同位置透明土的清晰度进行分析。其评价函数要能反应透明土清晰度变化，以第一根测试杆为对照分析后续测试杆的清晰度，可得透明土中各点清晰度的相对值*v*i，然后根据相应的点可作出透明土透明度沿厚度的变化曲线。各点清晰度的相对值：

 （3.1）

 （3.2）

式中： *A*0 ——为图像处理去除测试杆后透明材料的平均灰度值；

*v*i ——透明土清晰度相对值；

*u*i ——为各根杆在透明土中灰度值；

其中，*f*(*x, y*)为图像中经二阶处理后各点像素灰度值；*m*i, *n*i为杆所在图像区域所形成的二阶矩阵的行数与列数。

4 透 明 砂 土

4.1 固 体 颗 粒

**4.1.1** 无定型二氧化硅凝胶和粉末都具有很强的吸附能力，常见的如亲水无定型凝胶；一些经过化学处理后可具有很强的吸油能力，如疏水无定型硅石凝胶。无定型硅石的原子排列形式很广泛，微粒有透明和不透明两种，其中透明的微粒具有模拟自然土体的特征。无定型硅石有两种形式：凝胶和粉末，它们都有相同的折射率。无定型硅石凝胶是硅石的胶状形式，具有较好的透明度，其固体聚合物中有许多的细小孔道，具有强大的吸附能力。无定型硅石凝胶，最普遍的尺寸在0.5~5mm 之间，最普遍的形态呈圆珠形和有角微粒状，其中粒状的硅石凝胶微粒适合模拟透明的砂土。高纯熔融石英砂物理及化学性质稳定，具有极低的导热率和极好的热稳定性，颗粒均匀、纯度高、杂质极少、无色透明、光学性质好，其折射率为1.4585，相比硅石凝胶其内部没有微细孔道，更适合模拟天然砂土。

**4.1.4** 常见固体折射率参考表4.1.4-1。

**表4.1.4-1 常见透明砂土固体折射率**

|  |  |
| --- | --- |
| 硅胶 | 熔融石英砂 |
| 1.4475 | 1.4585 |

4.2 孔 隙 液 体

**4.2.2** 当固体颗粒浸入到液体物质中，透明的效果由三个因素决定：一是折射率匹配的程度；二是入射光的方向、颗粒的大小、形状和级配（相当于聚集形态因素）等几何因素；三是混合物间空气含量。当固体折射率和液体的折射率相同时，固液界面由于折射率差而产生的散射将减少，透射光强增加，从而显出透明的特性。尽管只是满足折射率的匹配并不能形成理想的透明效果，但折射率匹配技术能有效的降低介质间的折射、反射和散射，是提高成像清晰度的有力手段。宜在稳定温度下使用阿贝斯折射仪，主要包括以下要点：

**1** 阿贝折射仪测量折射率，折射率测量精度 0.0002，温度测量范围在 0~70℃。

**2** 试验时利用循环泵将折射仪与恒温水浴箱相连，利用循环水控制试验温度，水浴箱控温精度 0.1℃。光照条件为室内日光灯，试验过程中控制室内温度在 20~25℃。

**3** 配置好的液体编号记录后密封置于水浴箱中加热至所需温度。待水浴温度稳定后，依次取出待测液体，用滴管取少量液体至折射仪测试棱镜表面，等待约 10 秒，以待液体温度和折射仪棱镜温度一致，减少因暴露于空气中产生的温度差而对折射率的影响，测量液体的折射率及色散值并记录。

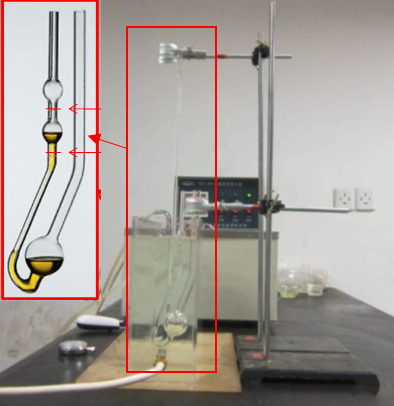
**4** 试验前利用仪器附带标准溶液和试块进行折射率校核，每次测量后须利用超纯水或者酒精清洗折射仪棱镜表面，并用擦镜纸擦净。



**图4.2.2-1 阿贝斯折射仪**

**4.2.3** 测定油类液体的运动粘度时，应根据试样的性质和试验的温度选择适当的粘度计。要求试样在粘度计毛细管中的流动时间应不少于200s，以保证油类在毛细管中的流动处于层流状态，符合泊塞尔方程的适用条件。油类液体通过毛细管时间过短，会使试验结果误差偏大；通过时间过长，则不易保持温度恒定，也使试验结果出现偏差。一般情况，油类液体在毛细管中流动时间控制在200～500s 比较适中，这样可保证在毛细管内的流动为层流状态。宜采用ISO3105 “玻璃毛细管运动粘度计规格和操作标准制造说明”标准制造的1840芬氏管（改良奥氏管，图4.2.3-1）进行测量，主要测量要点：

**1** 芬氏管的内径分别为0.3、0.54、0.78、1.01、1.27、1.92mm，测定试样的运动粘度时，应根据试验温度选用适当的粘度计，保证试样流动时间不少于200s，试验时，利用循环泵将水槽与恒温水浴箱相连，利用循环水控制试验温度，水浴箱控温精度0.1℃。

**图4.2.3-1 1840芬氏管**

**2** 光照条件为室内日光灯，试验过程中控制室内温度在20~25℃。由于作为介质的水加热后会有白垢产生，在有机玻璃恒温浴壁上附着或飘荡于介质中，给温度的调节观察，读数以及速降油面的观察带来不便，因此需要专门的清洗液来清洗，建议采用丙酮为清洗剂。

**3** 试验时，首先将试验油样注入毛细管。由于毛细管较细而且要保证注入的油中不含气泡，入口接橡皮管，倒置芬氏管，利用负压吸引法注入油样，操作时注意保证芬氏管垂直。然后用架子夹住橡皮管，固定芬氏管。预热15-20min 后，取下夹子，让油样流下，当油样上液面最低处流过芬氏管a 标线的瞬间，开始计时；当油液完全流出A 球，液面最低处流过标线b，停止计时。最后取下芬氏管，倒出油样。为保证精度，用10 倍及以上放大镜观察标线。

**4** 用秒表记录流动时间，应反复测定4次然后取平均值；在15~100℃测定粘度时，测量时间的最大值与最小值的差值不应超过算术平均值的±0.5%；然后取不少于2 次的流动时间的算术平均值为试样的平均流动时间，温度一定时，试验液体的运动粘度为粘度计常数与平均流动时间的乘积。

**4.2.4** 溴化钙具有很强的吸湿性，极易吸收空气中的水分，这就容易导致溶液配置时出现偏差，影响溴化钙溶液的折射率，从而导致透明土试样透明效果欠佳。

**4.2.5** 溴化钙溶液折射率与温度关系参考表4.2.6-1。

**表4.2.5-1 不同浓度下溴化钙溶液折射率与温度关系**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 溶液类型 | 浓度 | 溶液温度（℃） | | | | | | |
| 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| 溴化钙 | 0(水) | 1.333 | 1.333 | 1.333 | 1.333 | 1.333 | 1.333 | 1.333 |
| 5 | 1.3395 | 1.3398 | 1.3386 | 1.339 | 1.338 | 1.3374 | 1.337 |
| 15 | 1.3592 | 1.3596 | 1.3587 | 1.3586 | 1.3576 | 1.3572 | 1.3557 |
| 25 | 1.3782 | 1.3782 | 1.3772 | 1.3766 | 1.3762 | 1.3754 | 1.375 |
| 35 | 1.3976 | 1.3988 | 1.3978 | 1.3979 | 1.396 | 1.3955 | 1.3948 |
| 45 | 1.4294 | 1.4263 | 1.4256 | 1.4249 | 1.424 | 1.4239 | 1.4238 |
| 55 | 1.4502 | 1.4502 | 1.4487 | 1.4475 | 1.4471 | 1.4473 | 1.4456 |
| 65 | 1.4828 | 1.4824 | 1.4782 | 1.4785 | 1.4781 | 1.478 | 1.4764 |

**4.2.7** 常见有机液体折射率与温度关系参考表4.3.2-1。

**表4.2.7-1 常见有机液体折射率**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 溶液类型 | 温度（℃） | | | | | |
| 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
| 乙醇 | 1.36331 | 1.3615 | 1.3608 | 1.3575 | 1.3565 | 1.3548 |
| 正庚烷 | 1.37877 | 1.3765 | 1.3747 | 1.3726 | 1.3711 | 1.3685 |
| 异丙醇 | 1.38945 | 1.3866 | 1.3852 | 1.3822 | 1.38 | 1.379 |
| 二甲基硅油 | 1.40564 | 1.4031 | 1.4017 | 1.4004 | 1.3981 | 1.396 |
| 正十二烷烃 | 1.42331 | 1.4211 | 1.4196 | 1.418 | 1.415 | 1.4141 |
| 煤油 | 1.44908 | 1.4445 | 1.4421 | 1.4406 | 1.4378 | 1.4361 |
| 液体石蜡 | 1.4600 | 1.4578 | 1.4549 | 1.4546 | 1.4528 | 1.4506 |
| 丙三醇 | 1.46528 | 1.4626 | 1.4609 | 1.4596 | 1.4575 | 1.4553 |
| 15#白油 | 1.46675 | 1.4625 | 1.461 | 1.4589 | 1.4572 | 1.4552 |
| 10#变压器油 | 1.4708 | 1.4675 | 1.4658 | 1.4638 | 1.4619 | 1.4575 |
| 高温导热油 | 1.47448 | 1.4714 | 1.4704 | 1.4699 | 1.4691 | 1.4661 |
| 聚乙二醇200 | 1.48368 | 1.4793 | 1.478 | 1.4764 | 1.4745 | 1.4724 |

**4.2.11** 常见有机混合液体折射率与温度关系参考表4.3.6-1~4.3.6-5。

**表4.2.11-1 常见有机混合液折射率与温度关系-以石蜡为基础混合油**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 溶液类型 | 质量比 | 溶液温度（℃） | | | | | |
| 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
| 石蜡：正庚烷 | 0:1 | 1.4665 | 1.4634 | 1.4628 | 1.4665 | 1.4579 | 1.4564 |
| 1:4 | 1.4479 | 1.4495 | 1.4485 | 1.4479 | 1.4432 | 1.4389 |
| 1:2 | 1.4388 | 1.445 | 1.4394 | 1.4388 | 1.4342 | 1.4281 |
| 1:1.25 | 1.4323 | 1.4374 | 1.4326 | 1.4323 | 1.4258 | 1.4225 |
| 0.75:1 | 1.427 | 1.43 | 1.428 | 1.427 | 1.4207 | 1.417 |
| 2:1 | 1.4141 | 1.4125 | 1.4152 | 1.4141 | 1.4075 | 1.4028 |
| 4:1 | 1.4037 | 1.4019 | 1.4031 | 1.4037 | 1.3962 | 1.3917 |
| 石蜡：正十二烷烃 | 0:1 | 1.4664 | 1.4635 | 1.4626 | 1.4601 | 1.4579 | 1.4564 |
| 1:4 | 1.4568 | 1.4525 | 1.4521 | 1.4491 | 1.4482 | 1.4471 |
| 1:2 | 1.4497 | 1.4475 | 1.4466 | 1.4418 | 1.4421 | 1.4406 |
| 1:1.25 | 1.4464 | 1.4446 | 1.4422 | 1.438 | 1.438 | 1.4361 |
| 0.75:1 | 1.4426 | 1.4415 | 1.4393 | 1.4354 | 1.4347 | 1.4315 |
| 2:1 | 1.4363 | 1.4345 | 1.432 | 1.429 | 1.4278 | 1.4225 |
| 4:1 | 1.4312 | 1.4291 | 1.4269 | 1.4244 | 1.4228 | 1.4205 |
| 石蜡：煤油 | 0:1 | 1.4664 | 1.4636 | 1.4623 | 1.4601 | 1.4583 | 1.4565 |
| 1:4 | 1.4624 | 1.4602 | 1.4581 | 1.4556 | 1.4544 | 1.4529 |
| 1:2 | 1.4602 | 1.4575 | 1.4557 | 1.4532 | 1.4521 | 1.4503 |
| 1:1.25 | 1.4585 | 1.4555 | 1.4535 | 1.4511 | 1.4502 | 1.4486 |
| 0.75:1 | 1.4572 | 1.4542 | 1.4521 | 1.45 | 1.4491 | 1.4474 |
| 2:1 | 1.4544 | 1.4513 | 1.4489 | 1.4471 | 1.4459 | 1.4445 |
| 4:1 | 1.4523 | 1.4485 | 1.4465 | 1.4442 | 1.444 | 1.4421 |

**表4.2.11-2 常见有机混合液折射率与温度关系-以15#白油为基础混合油**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 溶液类型 | 质量比 | 溶液温度（℃） | | | | | |
| 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
| 15#白油：正庚烷 | 0:1 | 1.4704 | 1.4686 | 1.4655 | 1.4628 | 1.4612 | 1.4594 |
| 1:4 | 1.4523 | 1.4499 | 1.4491 | 1.4471 | 1.4435 | 1.4435 |
| 1:2 | 1.4426 | 1.4392 | 1.438 | 1.4353 | 1.4313 | 1.4312 |
| 1:1.25 | 1.4325 | 1.4308 | 1.4305 | 1.4274 | 1.4247 | 1.4235 |
| 0.75:1 | 1.4277 | 1.4265 | 1.4251 | 1.4221 | 1.4168 | 1.4176 |
| 2:1 | 1.4155 | 1.4134 | 1.4121 | 1.4082 | 1.405 | 1.4055 |
| 4:1 | 1.4049 | 1.4031 | 1.402 | 1.398 | 1.3951 | 1.3945 |
| 15#白油：正十二烷烃 | 0:1 | 1.4704 | 1.4685 | 1.4655 | 1.4627 | 1.4611 | 1.4595 |
| 1:4 | 1.4585 | 1.4518 | 1.4546 | 1.4525 | 1.4494 | 1.4491 |
| 1:2 | 1.4524 | 1.4481 | 1.4489 | 1.4465 | 1.4426 | 1.4413 |
| 1:1.25 | 1.4486 | 1.4447 | 1.4444 | 1.4416 | 1.438 | 1.4356 |
| 0.75:1 | 1.4454 | 1.4421 | 1.4405 | 1.4371 | 1.4348 | 1.4331 |
| 2:1 | 1.4375 | 1.4351 | 1.4325 | 1.4302 | 1.4283 | 1.4266 |
| 4:1 | 1.432 | 1.4294 | 1.427 | 1.425 | 1.4231 | 1.4209 |
| 15#白油：煤油 | 0:1 | 1.4649 | 1.4631 | 1.4604 | 1.4589 | 1.4571 | 1.4552 |
| 1:4 | 1.4615 | 1.4596 | 1.456 | 1.4555 | 1.454 | 1.4516 |
| 1:2 | 1.4591 | 1.4575 | 1.4539 | 1.4531 | 1.4515 | 1.4499 |
| 1:1.25 | 1.4576 | 1.456 | 1.452 | 1.4516 | 1.4501 | 1.4481 |
| 0.75:1 | 1.4561 | 1.4549 | 1.4513 | 1.4505 | 1.4489 | 1.4472 |
| 2:1 | 1.454 | 1.4525 | 1.4484 | 1.4481 | 1.4463 | 1.4434 |
| 4:1 | 1.452 | 1.4506 | 1.4458 | 1.4459 | 1.4441 | 1.4416 |

**表4.2.11-3 常见有机混合液折射率与温度关系-以10#变压器油为基础混合油**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 溶液类型 | 质量比 | 溶液温度（℃） | | | | | |
| 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
| 10#变压器油：煤油 | 0:1 | 1.4664 | 1.4635 | 1.4626 | 1.4601 | 1.4579 | 1.4564 |
| 1:4 | 1.4568 | 1.4525 | 1.4521 | 1.4491 | 1.4482 | 1.4471 |
| 1:2 | 1.4497 | 1.4475 | 1.4466 | 1.4418 | 1.4421 | 1.4406 |
| 1:1.25 | 1.4464 | 1.4446 | 1.4422 | 1.438 | 1.438 | 1.4361 |
| 0.75:1 | 1.4426 | 1.4415 | 1.4393 | 1.4354 | 1.4347 | 1.4315 |
| 2:1 | 1.4363 | 1.4345 | 1.432 | 1.429 | 1.4278 | 1.4225 |
| 4:1 | 1.4312 | 1.4291 | 1.4269 | 1.4244 | 1.4228 | 1.4205 |
| 10#变压器油：正庚烷 | 0:1 | 1.4831 | 1.4805 | 1.478 | 1.4776 | 1.4756 | 1.4741 |
| 1:4 | 1.4633 | 1.4734 | 1.4575 | 1.4578 | 1.4543 | 1.4537 |
| 1:2 | 1.4495 | 1.4582 | 1.4504 | 1.4464 | 1.4389 | 1.437 |
| 1:1.25 | 1.4391 | 1.445 | 1.4386 | 1.4339 | 1.431 | 1.4285 |
| 0.75:1 | 1.434 | 1.4355 | 1.4325 | 1.4289 | 1.4251 | 1.4224 |
| 2:1 | 1.4185 | 1.4275 | 1.415 | 1.4123 | 1.4094 | 1.4075 |
| 4:1 | 1.4069 | 1.4076 | 1.4025 | 1.3998 | 1.3974 | 1.3951 |
| 10#变压器油：正十二烷烃 | 0:1 | 1.4833 | 1.4792 | 1.4795 | 1.4774 | 1.4757 | 1.4741 |
| 1:4 | 1.4701 | 1.465 | 1.4664 | 1.4645 | 1.4622 | 1.4566 |
| 1:2 | 1.4612 | 1.4576 | 1.4581 | 1.4556 | 1.4535 | 1.4481 |
| 1:1.25 | 1.4548 | 1.4513 | 1.4519 | 1.448 | 1.4473 | 1.4429 |
| 0.75:1 | 1.451 | 1.447 | 1.448 | 1.4443 | 1.4425 | 1.4376 |
| 2:1 | 1.4416 | 1.4382 | 1.4377 | 1.4346 | 1.4322 | 1.4296 |
| 4:1 | 1.4339 | 1.4312 | 1.4298 | 1.4271 | 1.4251 | 1.4228 |

**表4.2.11-4 常见有机混合液折射率与温度关系-以10#高温导热油为基础混合油**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 溶液类型 | 质量比 | 溶液温度（℃） | | | | | |
| 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
| 高温导热油：煤油 | 0:1 | 1.4702 | 1.4685 | 1.4655 | 1.4627 | 1.4614 | 1.4595 |
| 1:4 | 1.4656 | 1.4645 | 1.4596 | 1.4591 | 1.4566 | 1.4553 |
| 1:2 | 1.4626 | 1.4619 | 1.4578 | 1.4557 | 1.4539 | 1.4527 |
| 1:1.25 | 1.4593 | 1.4594 | 1.4545 | 1.4534 | 1.4518 | 1.4503 |
| 0.75:1 | 1.4584 | 1.4578 | 1.453 | 1.4521 | 1.4505 | 1.4486 |
| 2:1 | 1.4555 | 1.4544 | 1.4495 | 1.4481 | 1.4472 | 1.4457 |
| 4:1 | 1.453 | 1.4515 | 1.4465 | 1.4452 | 1.4449 | 1.4426 |
| 高温导热油：正庚烷 | 0:1 | 1.465 | 1.4631 | 1.4602 | 1.4585 | 1.4569 | 1.4553 |
| 1:4 | 1.4492 | 1.4487 | 1.4469 | 1.4422 | 1.4426 | 1.4379 |
| 1:2 | 1.438 | 1.4378 | 1.437 | 1.4323 | 1.4335 | 1.428 |
| 1:1.25 | 1.4322 | 1.4314 | 1.4308 | 1.4262 | 1.4227 | 1.4215 |
| 0.75:1 | 1.4273 | 1.4269 | 1.4263 | 1.4222 | 1.4185 | 1.4158 |
| 2:1 | 1.415 | 1.4145 | 1.4145 | 1.4092 | 1.4059 | 1.4036 |
| 4:1 | 1.4055 | 1.4052 | 1.4021 | 1.3984 | 1.3956 | 1.3925 |
| 高温导热油：正十二烷烃 | 0:1 | 1.465 | 1.4629 | 1.4603 | 1.4585 | 1.457 | 1.4553 |
| 1:4 | 1.4558 | 1.4544 | 1.4511 | 1.4489 | 1.4463 | 1.4467 |
| 1:2 | 1.4493 | 1.4486 | 1.4446 | 1.443 | 1.438 | 1.4405 |
| 1:1.25 | 1.445 | 1.4445 | 1.4409 | 1.4386 | 1.4354 | 1.4357 |
| 0.75:1 | 1.4421 | 1.441 | 1.4365 | 1.4359 | 1.4316 | 1.4324 |
| 2:1 | 1.4361 | 1.4341 | 1.4315 | 1.4297 | 1.4271 | 1.4262 |
| 4:1 | 1.431 | 1.4294 | 1.4263 | 1.4245 | 1.4223 | 1.4209 |

**表4.2.11-5 常见有机混合液折射率与温度关系-以丙三醇为基础混合油**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 溶液类型 | 质量比 | 溶液温度（℃） | | | | | |
| 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
| 丙三醇：乙醇 | 0:1 | 1.4746 | 1.4712 | 1.4705 | 1.4707 | 1.4697 | 1.4664 |
| 1:4 | 1.4456 | 1.4505 | 1.4474 | 1.4461 | 1.4419 | 1.4393 |
| 1:2 | 1.4245 | 1.4316 | 1.4315 | 1.4246 | 1.4218 | 1.4225 |
| 1:1.25 | 1.4137 | 1.4192 | 1.42 | 1.4135 | 1.4119 | 1.4119 |
| 0.75:1 | 1.4071 | 1.4102 | 1.4109 | 1.4063 | 1.4033 | 1.403 |
| 2:1 | 1.3935 | 1.3903 | 1.3931 | 1.3886 | 1.3865 | 1.3861 |
| 4:1 | 1.3806 | 1.38 | 1.3792 | 1.3752 | 1.3741 | 1.3722 |
| 丙三醇：正庚烷 | 0:1 | 1.4745 | 1.4711 | 1.4705 | 1.4706 | 1.4695 | 1.4665 |
| 1:4 | 1.4504 | 1.4535 | 1.4499 | 1.4489 | 1.4463 | 1.4509 |
| 1:2 | 1.4367 | 1.4373 | 1.4342 | 1.4223 | 1.432 | 1.4294 |
| 1:1.25 | 1.4256 | 1.4288 | 1.4255 | 1.4194 | 1.4216 | 1.419 |
| 0.75:1 | 1.419 | 1.42 | 1.4183 | 1.4138 | 1.4137 | 1.4115 |
| 2:1 | 1.4046 | 1.4052 | 1.4019 | 1.3995 | 1.3961 | 1.3946 |
| 4:1 | 1.3936 | 1.3929 | 1.3899 | 1.3884 | 1.3844 | 1.3834 |
| 丙三醇：正十二烷烃 | 0:1 | 1.4745 | 1.4712 | 1.4705 | 1.4706 | 1.4695 | 1.4664 |
| 1:4 | 1.4716 | 1.4698 | 1.4699 | 1.4674 | 1.4665 | 1.4627 |
| 1:2 | 1.4697 | 1.4681 | 1.4676 | 1.465 | 1.4639 | 1.4605 |
| 1:1.25 | 1.4675 | 1.4663 | 1.4645 | 1.4632 | 1.4623 | 1.4588 |
| 0.75:1 | 1.467 | 1.466 | 1.4638 | 1.4619 | 1.4607 | 1.4572 |
| 2:1 | 1.4653 | 1.4635 | 1.4612 | 1.4595 | 1.4576 | 1.4546 |
| 4:1 | 1.4635 | 1.4617 | 1.4598 | 1.4575 | 1.4557 | 1.4531 |

4.3 透 明 砂 土 制 配

**4.3.4** 在溶液中加入固体颗粒后，也可用玻璃棒充分搅拌排气，并在溶液透明澄清后静置一小时，使气泡完全排出，然后分压到试验预定密度，才可开始实验。

4.4 示 踪 粒 子

**4.4.1** 在以温度场为观测目的的透明土试验中不需要采用示踪粒子，在以渗流为观测目的的透明土试验中需要采用彩色荧光物质。

**4.4.4** 透明土的固体颗粒折射率随温度变化小，可认为不随温度变化；孔隙液体折射率受温度作用变化大，随温度变化孔隙液体折射率与固体颗粒匹配度变差，透明土透明度变低。通过建立透明度与温度关系即可反映温度场变化。

5 透 明 黏 土

5.1 固 体 颗 粒

**5.1.1** 石英砂的细颗粒产品如气相或无定型二氧化硅一般为常用的透明黏土的固体颗粒材料，此外锂皂石、卡波姆等材料产品也可以作为透明黏土的固体颗粒材料。

5.3 透 明 黏 土 制 配

**5.3.2** 土体制配后需去除气泡；施加压力达到设计密度，将模型槽固定于光学平台上；静置一段时间，待试样变形稳定；静置过程中，利用透明薄膜包裹模型槽，避免外界因素影响。若制配完成的透明土仍残留少量气泡，可利用真空泵进行抽真空处理。

5.4 示 踪 粒 子

**5.4.1** 示踪粒子宜根据试验所需土体材料性质及图片效果而定。卡波姆材料透明黏土推荐将添加一种或多种纳米材料（碳纳米管、碳化硅、纳米硅粉和纳米氧化铝等）作为示踪粒子。所用纳米材料质量量级为所配置透明黏土质量的1‰。

6 透明土试验

6.1 一 般 规 定

**6.1.1** 透明土试验时的温度，应与配置透明土时的温度一致，宜控制为室温20℃~25℃左右。湿度宜不大于60%**。**试验场地宜整洁、通风、安静，仪器设备和材料摆放整齐，避免有振动源影响。室内光线宜保持均匀、稳定。为凸显激光剖面和示踪粒子效果，室内光亮可调，可形成暗室。

**6.1.2** 透明土透明度随时间会降低**，**故每组试验应在试验计划时间内尽快完成。

**6.1.3** 采用透明土进行模型试验应满足模型相似率，根据相似原理给出模型试验几何、材料密度（力）相似比尺。如涉及固结、渗流等与时间相关的问题，需同时给出时间的相似比尺。

6.2 仪 器 设 备

**6.2.1** 可根据试验具体要求调整仪器设备，如可加入土体温度传感器和土体湿度传感器。对桩基础的透明土试验，可增加桩基加载装置，用于桩基荷载的施加。增加新传感器和装置原则上不得改变和影响透明土试验系统的基本功能。

**6.2.2** 试验平台宜采用光学平台，宜满足以下要求：

**1** 台面平面度宜小于0.05mm/m2；可用水准气泡进行调平处理。

**2** 宜具备用于固定设备装置的螺纹孔。

**3** 振幅宜小于2μm。

**4** 宜采用不锈钢材质。

**6.2.4 一字线**激光发生器可在透明土中形成散斑场扇形切面，可根据试验需求，参照《半导体激光器总规范》GB/T 31358选取合适类型一字线激光发生器。如需在试验中产生多个散斑场切面，可布置多个一字线激光发生器**。**

激光是一种电磁波，具有波长和频率。波长越短，光所携带的能量在传播中损失越少；短波长激光包含发光波长由390 nm到950 nm的激光，主要使用于光驱、激光打印机、条形码机、扫描仪及指示器等光信息及显示的应用；长波长激光则涵盖发光波长由980 nm至1550 nm，主要用于光纤通讯。试验常用半导体激光器波长为375nm~1550nm。其中532nm是最常见绿光激光波长的，而激光波长越短虽然贯穿能量越强，但是波长越短越容易产生散射。

激光光束质量M2是指激光器光束质量好坏，理想的光束质量的M2是1，实际中精细制作的话好的能做到1.2，数值越大说明激光器的光束质量越差。对于很多种单模输出的激光器来说，高品质的激光器通常都具有很高的光束质量，对应很小的M2，例如1.05或1.1。

6.3 试 验 操 作

**6.3.1** 拍摄时间间隔应根据试验过程中试样变形速率大小确定，电脑储存空间应满足整个试验拟采集所有图像的文件大小。相机标定可以采用刻度尺或标定板，标定。

6.4 数 据 分 析

**6.4.1** 可以采用商业或者学者公认的图像处理开放软件，分析人员也可根据数字散斑相关法原理自主开发图像处理软件，经与成熟软件对比验证后使用。

**6.4.2** 如分析图像多，计软件分析耗时会较长，故对连续两幅或几幅差异微小且不影响实验结果分析的图像，可以删除，以节省图像分析时间。如周边有较多不需要的分析区域，可使用相关图像处理工具程序对图像进行裁剪，以节省存储空间。如试验中没有布置控制点，则无需创建控制点，图像分析中位移不做坐标转换，位移单位为像素**。**

7 回收与处理

7.1 一 般 规 定

**7.1.2** 宜遵循各相关单位固废专用程序及实验室相关规定进行处置。

7.3 液 体 处 理

**7.3.2** 孔隙溶液的回收宜按照以下步骤：

**1** 松动已在透明土容器中配制好的透明土，使其处于松散状态；透明土中的孔隙溶液是由两种折射率不同的油体混合而成的，一种油体的折射率大于固体颗粒的折射率，另一种油体的折射率小于固体颗粒的折射率，各液体的密度小于蒸馏水的密度，且不与蒸馏水相溶。

**2** 将松散状态的透明土倒入厚壁容器中，并倒入相同体积的蒸馏水。

**3** 采用微型搅拌器搅拌透明土与蒸馏水的混合体，使透明土中的孔隙溶 液悬浮上升，蒸馏水和透明土固体颗粒下沉。

**4** 连接好带有溢出口的受力盘和密封圈，溢出口连接好导管，并插入到盛有透明土的厚壁容器内。

**5** 当受力盘与孔隙溶液表面接触后，施加竖向压力，孔隙溶液则通过溢出口和导管逐步转移到孔隙溶液容器中。

**6** 当受力盘刚好接触蒸馏水后停止施加竖向压力。

**7** 采用蒸馏法对孔隙溶液进行分离，完成透明土中孔隙溶液的回收。



**图7.3.2 回收透明土中孔隙溶液的装置示意图**