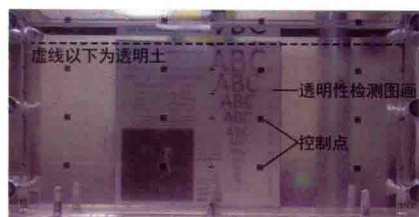
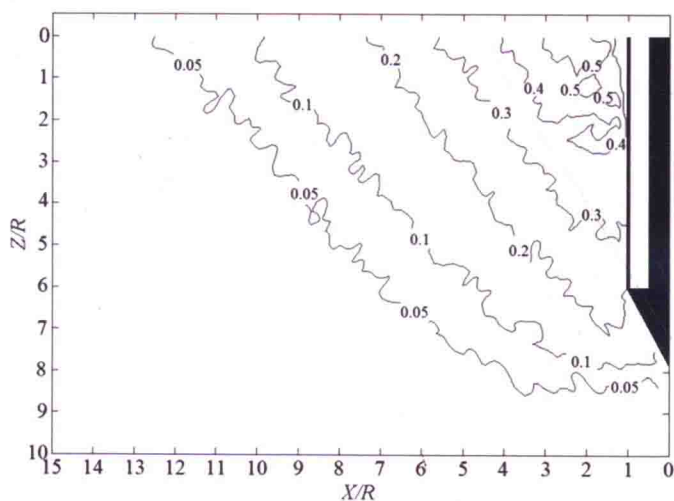


Experimental Simulation Technology Based on
Transparent Soil and Image Measurement and Its Application

基于透明土和图像测量的 试验模拟技术及应用

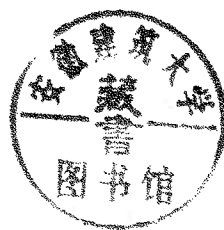
齐昌广 左殿军 王新泉 著



中国建筑工业出版社

基于透明土和图像测量的 试验模拟技术及应用

齐昌广 左殿军 王新泉 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

基于透明土和图像测量的试验模拟技术及应用/齐昌广等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2017. 11
ISBN 978-7-112-21299-6

I. ①基… II. ①齐… III. ①建筑测量-数值模拟-研究 IV. ①TU198

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 242670 号

透明土试验是岩土工程研究的一种新型试验方法, 本书结合图像测量技术, 第一次系统总结介绍了相关试验理论、技术。全书共分为 7 大部分 20 章, 对透明土试验模拟技术、数字图像测量技术及其应用进行详细的阐述和解释, 主要包括: 透明土和光学测量技术、透明土研究综述、透明土岩土特性研究、数字图像处理技术、透明土的应用研究、透明土的本构关系研究和总结。

本书适合从事岩土工程试验研究的科研和技术人员参考, 也可供高等院校相关专业师生学习。

责任编辑: 杨 允

责任设计: 李志立

责任校对: 李美娜 王 烨

基于透明土和图像测量的试验模拟技术及应用

齐昌广 左殿军 王新泉 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 18¼ 字数: 454 千字

2018 年 2 月第一版 2018 年 2 月第一次印刷

定价: 58.00 元

ISBN 978-7-112-21299-6
(31010)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

2016年10月在河海大学举办了《第27届全国土工测试学术研讨会》，会议中首次开设了透明土专题，本书的第一作者也做了大会汇报，还有更多优秀的学者做了更好的更精彩的汇报，其中，中国矿业大学隋旺华教授特邀做了“透明土实验技术的综述报告”，隋旺华教授从透明土研究起源、透明土研究发展现状和透明土研究展望三方面进行了阐述。当前透明土在国内的研究成果呈缤纷多彩、百家争鸣、蓬勃发展的态势，起步晚但发展快，截止会议当期，已申请到的与透明土技术相关的国家自然科学基金项目11项，另外，发表了期刊论文42篇、会议论文6篇、硕士学位论文8篇，申请或授权的专利达52项；然而遗憾的是，本次研讨会并未出版一套完整的透明土研究的论文集，因此本书作者当时产生了写一部有关透明土的国内著作的想法，经过近一年努力和国内外诸多友人的倾力支持，终于形成了本书。此外，针对国内诸多的透明土研究成果，本书不一一叙述，读者可自行通过学术/专利检索系统进行查阅。

本书共分了7大部分20章，对透明土试验模拟技术、数字图像测量技术及其应用进行详细的阐述和解释，7大部分依次是：透明土和光学测量的技术介绍、透明土研究综述、透明土岩土特性研究、数字图像处理技术、透明土的应用研究、透明土的本构关系研究和总结。第1部分从第1章到第3章，主要介绍了透明土技术、应力应变的光学测量方法和知识，由齐昌广负责编著；第2部分有第4章和第5章，分别是本书第一作者和国际透明土权威学者纽约大学 Iskander 教授对透明土研究的看法，由左殿军负责翻译和编著；第3部分从第6章到第8章，涵盖了透明土与天然土岩土特性的对比、孔隙溶液对透明土特性的影响以及透明土室内试验大数据分析，由王新泉编著；第4部分包括第9章和第10章，依次介绍了DIC和Geo-PIV的基本原理和实际操作技巧，由齐昌广负责编著；第5部分从第11章到第18章，是透明土应用的主体部分，也是本书篇幅最大部分，详细介绍了透明土在静态和动态的土-结构相互作用试验模拟中的应用，其中，第11章和第12章由左殿军负责编著，第13章到16章由齐昌广负责编著，第17章和第18章由王新泉翻译和编著；第6部分是第19章，引入了透明颗粒土的本构模型及其应用，由齐昌广负责编著；第7部分是第20章，给出了本书的研究总结和展望，由齐昌广负责编著。

鉴于本书作者的水平和能力有限，疏漏、不足和错误在所难免，本书全体作者在此恳请各位同行、专家、学者提出宝贵的批评和修改意见，以便本书再次出版时能够及时补充、修改和完善。

感谢以下课题对本书的资助：

- (1) 国家自然科学基金项目 (51508282)；
- (2) 浙江省自然科学基金项目 (LY18E080010)；
- (3) 浙江省自然科学基金项目 (LQ15E080002)；
- (4) 宁波市自然科学基金项目 (2017A610317)；

(5) 交通运输部天津水运工程科学研究所委托项目 (HK2016000092);

(6) 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (TKS160101、TKS160109)。

感谢河海大学孔纲强教授、重庆大学肖杨副教授、碧桂园集团青年领袖曹兆虎博士对本书的倾力支持、热心帮助和成果分享,感谢 Magued Iskander (Professor, New York University)、Ivan Guzman (Lecturer, New Jersey Institute of Technology)、David White (Professor, University of Western Australia)、Mehdi Omidvar (Assistant Professor, Manhattan College) 对本书作者的帮助、指导和解惑。

目 录

第1部分 透明土和光学测量技术	1
第1章 透明土技术	3
1.1 背景技术	3
1.2 透明土的类型	4
1.3 本书的目的	6
1.4 本章参考文献	6
第2章 光学测量技术在岩土工程中的应用	9
2.1 概述	9
2.2 岩土工程中的图像技术应用	9
2.3 图像技术在其他工程中的应用实例	17
2.4 本章小结	19
2.5 本章参考文献	19
第3章 应变和应力的光学测量技术	25
3.1 概述	25
3.2 目标跟踪	25
3.3 数字图像相关	26
3.4 干涉测量法	26
3.5 光测弹性学	31
3.6 断层摄影术	33
3.7 本章小结	34
3.8 本章参考文献	34
第2部分 透明土研究综述	37
第4章 透明土的研究进展	39
4.1 概述	39
4.2 人工合成透明土体的发展	39
4.3 透明土在岩土工程模拟试验方面的研究进展	41
4.4 透明土变形测量方面的研究进展	41
4.5 透明土在离心机模型试验研究中的应用可行性	42
4.6 本章小结	43
4.7 本章参考文献	43
第5章 Iskander 对当前透明土研究的看法	46

5.1	概述	46
5.2	过去	47
5.3	现在	51
5.4	未来	57
5.5	本章小结	59
5.6	本章参考文献	59
第3部分 透明土岩土特性研究		65
第6章 单轴压缩试验对比：以透明砂与标准砂为例		67
6.1	概述	67
6.2	单向压缩试验概况	68
6.3	单向压缩试验结果与分析	70
6.4	本章小结	74
6.5	本章参考文献	74
第7章 孔隙液体对透明土特性的影响研究		76
7.1	概述	76
7.2	室内试验概况	77
7.3	试验结果与分析	79
7.4	本章小结	85
7.5	本章参考文献	86
第8章 透明土岩土特性的大数据对比研究		87
8.1	数据库的形成	87
8.2	粒径分布对比	87
8.3	一维压缩试验对比	88
8.4	直剪试验对比	89
8.5	三轴试验对比	90
8.6	动力特性对比	90
8.7	本章小结	92
8.8	本章参考文献	92
第4部分 数字图像处理技术		95
第9章 数字图像相关 (DIC) 技术		97
9.1	引言	97
9.2	数字成像	97
9.3	运动估计方法	99
9.4	数字图像相关	100
9.5	数字图像相关误差分析	103
9.6	自适应互相关	105
9.7	数字图像相关 (DIC) 和自适应互相关 (ACC) 比较	107

9.8	本章小结	111
9.9	本章参考文献	111
第 10 章	Geo-PIV 技术及其操作	113
10.1	引言	113
10.2	软件验证	114
10.3	软件使用	116
10.4	故障诊断	120
10.5	实例操作	121
10.6	本章小结	136
10.7	本章参考文献	136
第 5 部分	透明土的应用研究	139
第 11 章	浅基础模拟	141
11.1	概述	141
11.2	透明土的配制	142
11.3	浅基础模拟试验的建立	143
11.4	浅基础试验结果分析	146
11.5	荷载板模型试验	148
11.6	荷载板模型试验结果分析	149
11.7	本章小结	151
11.8	本章参考文献	152
第 12 章	桩基础模拟 I：以常规实心桩静压为例	154
12.1	概述	154
12.2	模型试验系统	154
12.3	模型试验准备	155
12.4	试验结果分析	156
12.5	本章小结	161
12.6	本章参考文献	161
第 13 章	桩基础模拟 II：以塑料套管混凝土桩 (TC 桩) 为例	163
13.1	概述	163
13.2	非侵入可视化模拟试验	164
13.3	试验结果分析	166
13.4	TC 桩与传统静压桩的对比	180
13.5	讨论	181
13.6	本章小结	182
13.7	本章参考文献	182
第 14 章	桩基础模拟 III：以管桩贯入为例	184
14.1	概述	184
14.2	室内试验系统介绍	185

14.3	试验结果与分析	187
14.4	本章小结	190
14.5	本章参考文献	190
第 15 章	桩基础模拟Ⅳ：以相邻桩的打设为例	192
15.1	概述	192
15.2	数字图像相关	192
15.3	实验室模型测试	193
15.4	试验结果	194
15.5	本章小结	198
15.6	本章参考文献	199
第 16 章	桩基础模拟Ⅴ：以细长桩压屈稳定为例	200
16.1	概述	200
16.2	透明土模型试验	201
16.3	单桩压屈试验结果分析	208
16.4	多桩压屈试验结果分析	214
16.5	透明土屈曲模型试验的局限性	217
16.6	本章小结	218
16.7	本章参考文献	218
第 17 章	快速贯入模拟Ⅰ：非侵入可视化观察	221
17.1	概述	221
17.2	试验步骤	222
17.3	观测和结果	225
17.4	讨论	229
17.5	本章小结	230
17.6	本章参考文献	230
第 18 章	快速贯入模拟Ⅱ：最终贯入深度	232
18.1	概述	232
18.2	试验方法	233
18.3	试验结果	236
18.4	试验的可重复性和“空气冲击流”对贯入深度的影响	241
18.5	数据分析方法	242
18.6	本章小结	247
18.7	本章参考文献	247
第 6 部分	透明土的本构关系研究	249
第 19 章	透明颗粒土的本构模型研究	251
19.1	概述	251
19.2	三轴剪切试验	251
19.3	状态参数指标	253

19.4	峰值应力比和相变应力比	255
19.5	透明颗粒土的状态相关模型	257
19.6	材料常数的确定	260
19.7	模型的性能表现	263
19.8	应力-应变-剪胀关系的模型模拟	268
19.9	带有状态指数的峰值强度和最大剪胀的模型模拟	272
19.10	讨论	274
19.11	本章小结	274
19.12	本章参考文献	275
第7部分	本书总结	277
第20章	结论和展望	279
20.1	结论	279
20.2	展望	282



第1部分

透明土和光学测量技术

本部分内容从第1章到第3章，第1章介绍本书的目的和组织方式，其终极目的是期望人工合成透明土技术和非侵入变形测量方法能够成为环境岩土工程相关研究中一种有效的辅助工具，来协助解决和理解岩土和环境工程中的机理问题，长远来看有助于环境岩土的设计和和实践工作。第2章对一些土建工程应用中的图像技术进步作了一定的综述，并按照学科进行归类，而重点关注的是在岩土工程方面的应用。第3章对透明土中的变形和应力测量中使用的光学测量技术做了详细介绍，并对如何将其用于透明土的应力和应变测量作了讨论，同时还讨论了各种技术的优缺点。

第 1 章 透明土技术

测量土体内部空间变形的传统模型试验通常受到一些限制,从而使得土工传感器无法提供土体内的连续测量数据。通常情况下,土工传感器表现出的静态和动态特性与周围土体的特性不同,因而会改变所测量土体的反应。本书的主要目的是介绍一种人工合成的透明土,试图用于替代天然土体,用于土工模型试验中,测量土体内部空间的连续变形,在岩土物理力学特性方面,人工合成的透明土与天然土体相似或相近。此外,还介绍一种非侵入变形测量的试验方法,即无需在土体模型中植入土工传感器,从而获得空间变形的连续流动模式,避免了土工传感器的存在造成的数据点中断。本书的终极目的是期望人工合成透明土技术和非侵入变形测量方法能够成为环境岩土工程相关研究中一种有效的辅助工具,来协助解决和理解岩土和环境工程中的机理问题,长远来看有助于环境岩土的设计和实际工作。

1.1 背景技术

土体中渗流、变形和应变的可视化能够为解决很多环境岩土问题提供思路。人们已经尝试了几种方法来测量土体内部空间的连续变形,从 20 世纪 60 年代后期到 70 年代早期,使用嵌入微小铅粒的 X 射线法来测量内部变形^[1-3],然而,铅粒和周围土体的特性不同,测试结果会受到很大影响,存在诸多争议,此外,该方法属于离散测量的范畴,无法提供被测土体的连续变形测量数据。为了得到连续变形测量数据,研究者还尝试了一些新技术,例如,计算机化轴向断层(简称 CAT 扫描)和磁共振成像(简称 MRI)^[4-9]。但是,上述技术的应用受到以下限制:设备成本高、实验困难、结果解释难度高。与此同时,数码摄影和计算机图像处理技术的飞速发展促进了光学测量技术在工业、工程和学术领域的广泛应用。

在 20 世纪 80~90 年代,光学测量技术便已经用于测量透明材料的反应,而这些透明材料能够模拟某一特定土体的特性。例如,由碎玻璃和折射率与之相匹配的液体组成的半透明介质已用于研究纯剪切试验中的应力分布^[10]以及在地震作用下饱和路堤的响应^[11,12]。由玻璃珠或石英粉和折射率与之相匹配的孔隙液组成的透明替代品也已经用于帮助模型土体内部渗流或流动的可视化^[13,14]。但是,玻璃和石英替代品也受到限制,即不能代表各种天然土体的岩土特性,并且合成物的透明度偏低。

Mannheimer (1990)^[15]开发了由无定形硅粉和折射率与之相匹配的孔隙液配置而成的透明泥浆,用于非牛顿泥浆流动问题的研究,经过固结试验和其他测试,发现这种材料表现出与天然黏土类似的宏观岩土特性^[16,17]。无定形硅粉和简易光学测量技术已用于模型测试中,来研究污染物在塑料排水带的流动^[18,19]、黏土中的沉桩贯入^[20,21]以及土工原位测试设备引起的周围土体变形^[22,23]。开发的透明土也用于离心实验,用于吸力式安装平板锚的行为建模^[24]。

在国内，透明土、图像测量及相关技术的发展和开发为不同领域的研究奠定了基础，例如，室内三轴试验变形测量、条形基础的变形测量、沉桩过程中周围土体的变形测量等方面的变形测量都已开始采用该项技术。在基础地基变形和承载力研究方面，齐昌广等 (2015)^[25] 基于透明土试验研究了浅基础沉降引起的土体变形规律；高炳伦 (2015)^[26] 研究了在溃砂过程中砂体的流动形态变化规律，对溃砂发生过程、阶段特点以及溃砂流动形态进行了研究；李文涛 (2015)^[27] 基于透明土开展了盾构隧道壁后同步注浆模型试验；刘佳佳 (2012)^[28] 基于透明土研究了盾构隧道开挖面土体变形及稳定性，系统研究了盾构施工引起土体变形的细观机理；林志斌等 (2015)^[29] 对基于透明岩体的深埋软岩巷道变形破裂规律进行了研究；孔纲强等 (2015)^[30] 基于透明土研究了异形桩拔桩过程中土体变形规律，沉桩过程中土体三维变形规律，扩底楔形桩中性点位置测定方法分析，水平荷载下扩底楔形桩承载力特性分析，水平荷载桩室内模型试验系统研究分析，等截面桩的沉桩模型试验变形分析，管桩贯入特性模型试验研究分析，极限荷载下 X 形桩和圆形桩破坏形式模型试验分析对比；齐昌广等 (2015)^[31] 在透明土的基础上研究观测了不同约束形式下完全嵌入模型细长桩的完整屈曲曲线；吴跃东等 (2016)^[32] 基于透明土进行了取土管的贯入试验，得到了在取土管贯入过程中土体扰动变形场的分布特性。综上可见，透明土和图像测量技术在国内发展迅速，应用研究广泛，并取得了丰富的成果，表明该项技术已日趋成为国内岩土工程试验模拟的一项重要技巧和手段。

1.2 透明土的类型

透明土是由透明的固体颗粒和折射率相匹配的孔隙溶液组成，当前文献中记载的固体颗粒和孔隙溶液如图 1.1 所示，透明颗粒的物理特性如表 1.1 所示，固体颗粒示意图见

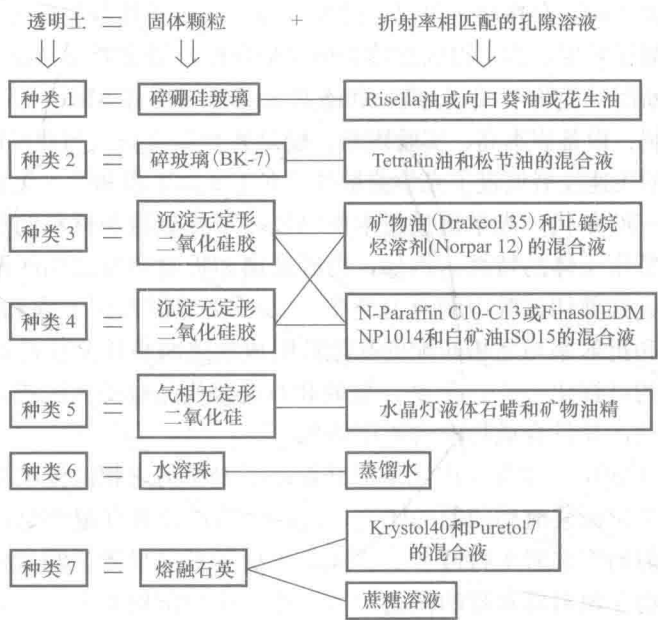


图 1.1 透明土的组成

图 1.2，孔隙溶液的物理特性如表 1.2 所示。

混合液体的折射率由 Clausius-Mosotti 公式给出：

$$\frac{1}{\rho} \frac{s^2 - 1}{s^2 + 2} = \frac{c_1}{\rho_1} \frac{s_1^2 - 1}{s_1^2 + 2} + \frac{c_2}{\rho_2} \frac{s_2^2 - 1}{s_2^2 + 2}$$

(1.1)

其中， s 和 ρ 分别是指混合液体的折射率和密度； s_1 和 ρ_1 分别是指第一种孔隙液体的折射率和密度； s_2 和 ρ_2 分别是指第二种孔隙液体的折射率和密度； c_1 和 c_2 分别是指第一种和第二种孔隙液体的含量百分比。

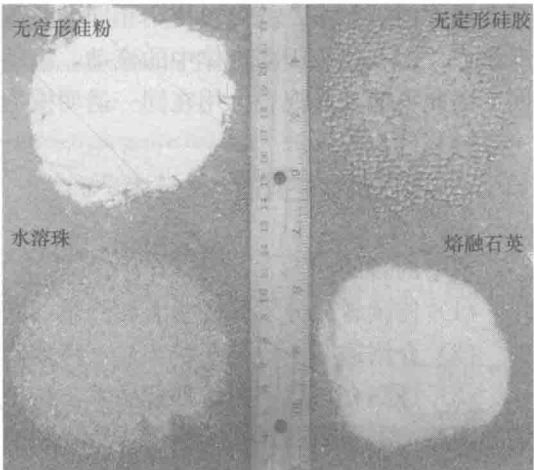


图 1.2 固体颗粒的示意图

透明颗粒的物理特性 表 1.1

特性 \ 固体颗粒	碎硼硅玻璃	碎玻璃 (BK-7)	沉淀无定形二氧化硅粉	沉淀无定形二氧化硅胶	气相无定形二氧化硅	水溶珠	熔融石英 (FQ)
折射率	1.469	1.5194	1.447	1.447	1.46	1.333	1.458
相对密度	2.2	—	2.0~2.1	2.2	2.2	0.98	2.2
泊松比	—	—	0.2~0.3	—	—	—	0.16
有效摩擦角 (°)	—	—	19~21	29~42	31~37	—	44~59
有效黏聚力 (kPa)	0	0	44	0	0	—	0
渗透系数 (mm/d)	—	—	0.2~21.6	>129.6	—	>17.3	>11.2
预计可模拟土壤	砂土	砂土	黏土	砂土	砂土	软弱土	砂土

孔隙溶液的物理特性 表 1.2

特性 \ 孔隙溶液	Tetralin 油和松节油的混合液		矿物油 (Drakeol 35) 和正链烷烃溶剂 (Norpar 12) 的混合液		蒸馏水	Krystol 40 和 Puretol 7 混合液		蔗糖溶液 (66.5%)
	Tetralin 油	松节油	Drakeol 35	Norpar 12		Krystol 40	Puretol 7	
折射率	1.546~1.557	1.481~1.491	1.46~1.48 (24℃)	1.418 (24℃)	1.333 (20℃)	1.444 (21℃)	1.463 (21℃)	1.458 (23℃)
密度 (g/cm³)	0.96~1	0.815~0.85	0.868	0.749	1.000	0.798	0.836	—
运动黏度 (cSt) (40℃)	—	—	68.50	0.61	0.66	3.90~5.00	10.80~13.60	—

注：cSt=centistokes 且 1cSt=1mm²/s。运动黏度等于动力黏度除以密度。

综上所述，当前已经为砂土和黏土的模拟开发了三类透明材料。第一类由无定形硅粉组成，模拟天然黏土的岩土性质；第二类模拟砂土，由无定形硅胶组成，这两类物质

具有相同的折射率,故可以使用相同的孔隙液,因此,可以用于同一模型;第三类由水溶珠组成,适合代表很多土体中的流动,极弱的沉积强度。水溶珠的折射率与硅胶和硅粉不同,因此不能与其混合,用在同一透明模型中。

1.3 本书的目的

本书的目的:

- (1) 使读者充分了解透明土和光学(图像)测量技术及其二者结合方式;
- (2) 介绍透明土研究现状和岩土特性研究,使读者宏观把握当前的研究动态;
- (3) 详细介绍数字图像处理技术,特别地,对 GeoPIV 软件的使用,初学者会存在一定的困惑,本书通过具体实例,详尽地展现给初学者该软件的使用方法,有助于初学者快速掌握该软件的使用技巧并用到科研工作中;
- (4) 着重给出图像测量和透明土技术在岩土模型试验中的应用,揭示土-基础相互作用机理,同时还初步呈现给读者有关快速贯入过程中引起的一系列岩土问题;
- (5) 对透明颗粒土的本构模型及其应用进行了介绍,该部分研究内容主要来自于重庆大学肖杨副教授的研究工作,肖杨副教授是颗粒土本构模型研究方面的权威学者,感兴趣的读者可查阅肖杨副教授的研究成果对颗粒土本构模型作进一步的了解。

值得一提的是,当前数字图像测量和透明土的国内外研究不局限于本书的7大部分,本书所列举的内容仅仅是本书作者的研究工作及其相关内容的延伸,同时还借鉴和引用了国内同行的相关研究成果。除此之外,数字图像测量和透明土技术还在环境、农业、物理化学等方面有着突出的标志性研究成果。

1.4 本章参考文献

- [1] Roscoe K, Arthur J, James R. The determination of strains in soils by an X-ray method [J]. Civil Engineering and Public Works Review 58, 1963, 873-876.
- [2] Lorenz H, Heinz W. Change of density in sands due to loading [C]. In: Proc. 7th Int. Conf. Soil Mech. & Found. Engr., vol. 1, 1969, pp. 267-273.
- [3] Bransby P, Milligan G. Soil deformation near cantilever sheet pile [J]. Geotechnique, 1975, 25 (2): 175-195.
- [4] Mandava S, Watson A, Edwards C. NMR imaging of saturation during immiscible displacements [J]. AIChE Journal, 1990, 36 (11): 1680-1686.
- [5] Desrues J, Mokni M, Mazerolle F. Tomodensitometrie et la localisation sur les sables [C]. In: Proc. X Int. Conf. Soil Mech. & Found. Eng., vol. 1, 1991, pp. 61-64. (in French).
- [6] Orsi T, Anderson A, Leonard J, et al. Use of X-ray computed tomography in the study of marine sediments. In: Proc. CEO V, ASCE, College Station, Texas, 1992, pp. 968-982.
- [7] Posadas D, Tannus A, Panepucci H, et al. Magnetic resonance imaging as a non-invasive technique for investigating 3-D preferential flow occurring within stratified soil samples [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 1996, 14 (4): 255-267.
- [8] Ng T, Kelley M, Sampson J. MRI studies of direct shear tests on round particles [C]. In: Proc.

- Engr. Mechanics, ASCE, 1996, pp. 572-575.
- [9] Wong R. Mobilized shear strength components of Athabasca sand in Triaxial compression [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 23 (4): 413-422.
- [10] Allersma H. Using imaging technologies in experimental geotechnics [C]. In: Proc. 2nd Int. Conf. on Imaging Technologies: Techniques and Applications in Civil Engr., ASCE, 1998, pp. 1-9.
- [11] Konagai K, Tamura C, Rangelow P, et al. Laser-aided tomography: a tool for visualization of changes in the fabric of granular assemblage [C]. Proc. JSCE No: 455 I-21, Structural Engr. / Earthquake Engr. 1992, 9 (3): 193-201.
- [12] Konagai K, Rangelow P, Sato T. Real-time observation of dynamic changes in the fabric of granular material structures through laser-aided tomography [C]. In: Proc. 10th European Conf. on Earthquake Engineering, 1994, pp. 459-466.
- [13] Chen J, Wada N. Visualization of immiscible displacement in a three-dimensional transparent porous medium [J]. Experiments in Fluids, 1986, 4 (6): 336-338.
- [14] Brock D, Orr F. Flow visualization of viscous fingering in heterogeneous porous media [C]. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1991, pp. 211-222.
- [15] Mannheimer R. Slurries you can see through [J]. Technology Today, 1990, p. 2.
- [16] Iskander M, Lai J, Oswald C, et al. Development of a transparent material to model the geotechnical properties of soils [J]. Geotechnical Testing Journal, 1994, 17 (4): 425-433.
- [17] Mannheimer R, Oswald C. Development of transparent porous media with permeabilities and porosities comparable to soils, aquifers, and petroleum reservoirs [J]. Ground Water, 1993, 31 (5): 781-788.
- [18] Welker A, Bowders J, Gilbert R. Applied research using transparent material with hydraulic properties similar to soil [J]. Geotechnical Testing Journal, 1999, 22 (3): 266-270.
- [19] Welker A, Bowders J, Gilbert R. Using a reduced equivalent diameter for a prefabricated vertical drain to account for smear [J]. Geosynthetics International, 2000, 7 (1): 47-57.
- [20] Gill D, Lehan B. An optical technique for investigating soil displacement patterns [J]. Geotechnical Testing Journal, 2001, 24 (3): 324-329.
- [21] Lehan B, Gill D. Displacement fields induced by penetrometer installation in an artificial soil [J]. International Journal of Physical Modeling in Geotechnics, 2004, 4 (1): 25-36.
- [22] Toiya M, Hettinga J, Losert W. 3D imaging of particle motion during penetrometer testing, from microscopic to macroscopic soil mechanics [J]. Granular Matter, 2007, 9: 323-329.
- [23] Stainer, S. Geotechnical Modeling using a transparent synthetic soil [R]. M. Sc. Report, University of Sheffield (Supervisor Dr. C. Hird), 2006.
- [24] Song Z, Hu Y. Plate anchor keying under inclined pullout in clay: observation and estimation [C]. In: Proc. XVII Int. Conf. Soil Mechanics & Geotechnical Engr., 2009, pp. 708-711.
- [25] 齐昌广, 范高飞, 崔允亮, 等. 利用人工合成透明土的岩土物理模拟试验 [J]. 岩土力学, 2015, 36 (11): 3157-3163.
- [26] 高炳伦. 基于透明土的采掘溃砂流动形态试验研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- [27] 李文涛. 基于人工合成透明土盾构隧道壁后同步注浆模型试验研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [28] 刘佳佳. 基于透明土的盾构隧道开挖面稳定性分析 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [29] 林志斌, 李元海, 高文艺, 等. 基于透明岩体的深埋软岩巷道变形破裂规律研究 [J]. 采矿与安