

Analysis and Discussion about the Field Direct Shear Test Results of the Recently Deposited Sand and Cobble Stratum

Wu Liu

Beijing Geological Engineering Design Institute, Beijing
Email: liuwu1832@163.com

Received: Jun. 28th, 2014; revised: Jul. 18th, 2014; accepted: Jul. 26th, 2014

Copyright © 2014 by author and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

This paper verified that the sand and cobble stratum was of significant cohesion strength according to the results of field direct shear test. On analysis of the sand and cobble stratum structure, we consider that the imbricate structure of the stratum is the main cause of the pseudo cohesion, which makes the experimental verification highly anastomosed with the theoretical analysis. This research result not only has great theoretical significance, but also has practical significance in reducing project cost and geotechnical engineering design. This subject is worth making thorough survey and study.

Keywords

Sand and Cobble Stratum, Field Direct Shear Test, Special Structure, Pseudo Cohesion

某地新近沉积砂卵石地层现场直接剪切试验成果分析及探讨

刘 伍

北京市地质工程设计研究院, 北京
Email: liuwu1832@163.com

收稿日期：2014年6月28日；修回日期：2014年7月18日；录用日期：2014年7月26日

摘要

通过在砂卵石地层中进行的现场直剪试验，来验证这种地层并非像一般的“无黏性土”地层那样，黏聚力为零，而是具有显著的黏聚力数值。另外，通过对砂卵石地层的结构进行深入分析，认为其具有的“叠瓦状结构”是产生“似黏聚力”的主要原因，从而达到了试验验证与理论分析的高度吻合。本研究成果不仅具有理论意义，更具有在岩土工程设计及降低工程造价方面的实际意义，值得进一步深入、系统研究。

关键词

砂卵石地层，现场直剪试验，特殊结构，似黏聚力

1. 引言

在岩土工程设计中，常会遇到“无黏性土”的“黏聚力 C ”及“内摩擦角 ϕ ”的取值问题，一般的习惯是，不论是砂土，还是碎石土、砂卵石土，均对其“黏聚力” C 值取零。但在实际边坡开挖中，发现砂卵石地层的边坡自稳性远比砂土的高得多，沉积越久远的，自稳性越好，在砂卵石采场，10 余米高的陡立开采面比比皆是，这就引起了一些岩土工程技术人员的疑问，是什么力量造就了砂卵石地层具有如此好的自稳性，仅仅是砂卵石地层的密度与颗粒间的相互咬合作用而已吗？也就是说全是“内摩擦角 ϕ ”的贡献吗？难道“黏聚力 C 值”真的为零吗？

针对这个问题，国内已有一些岩土工程学者、技术人员对此进行了探讨及开展了现场剪切试验[1]-[4]，得到了一些研究成果，前不久笔者参加了一个砂卵石地层现场直剪试验项目，现对此试验过程及结果进行必要介绍，并对砂卵石地层是否具有“黏聚力 C 值”进行分析、探讨。

2. 试验场地的岩土工程勘察成果

试验场地位于某一区域性大型洪积扇的主干河流中上游的现代河床外侧附近。

在试坑两端布设了 2 个勘探孔，每个深度 10.0 m，并在 2 个钻孔内进行了剪切波速测试，根据已有资料，第一层地下水埋深约 30 m。浅部为填土，其下为新近沉积[5]的粉细砂层及巨厚砂卵石层。参见表 1。

本次剪切试验共布设 4 个砂卵石地层原位同条件试样，在每一个试样剪切完成后，在试样的中下部取样 4~5 kg，进行颗粒分析。参见表 2。

Table 1. The shear wave velocity measurement results of stratum and the formation density of the sand and cobble stratum judgment table

表 1. 地层剪切波速测试成果及砂卵石地层密度判断简表

岩土名称	层底深度(m)	波速 V_s (m/s)	密度判定
房渣土①层	1.9	184	/
细砂②层	2.9	215	/
卵石③层	6.0	313	中密
卵石④层	10.0	376	中密

3. 试验准备工作

3.1. 剪切试验层位及深度确定

根据勘察报告及孔内地层剪切波速测试结果,认为新近沉积[5]的卵石③层密度已达中密,从卵石密度上分析,基本可以进行现场直剪试验操作,测试结果能够反映出砂卵石地层的固有特性,同时考虑施工条件,最终确定试样底深度为 3.50 m,样高为 400 mm,测试前,须在样顶以上预留保护层 500 mm。

3.2. 试坑设计尺寸

参见图 1、图 2。

3.3. 试样“金属盒保护罩”加工制作

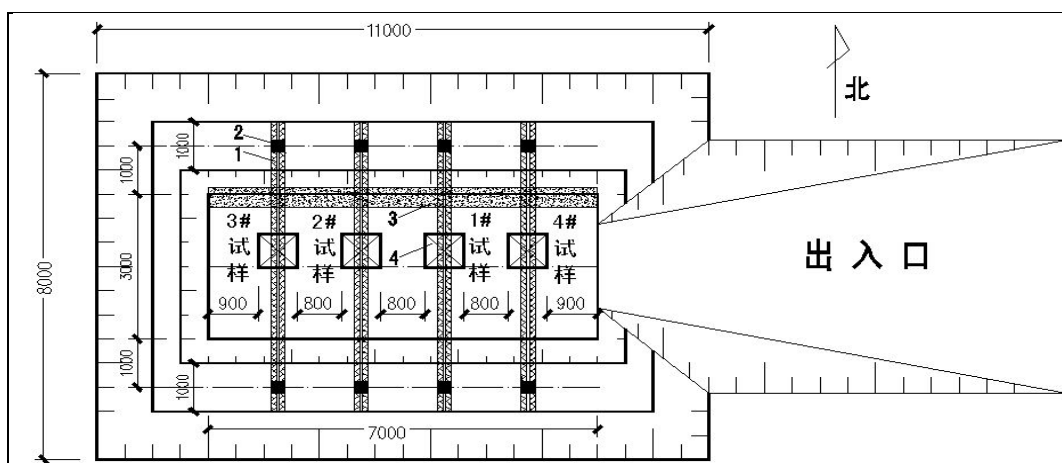
- 1) “金属盒保护罩”尺寸:长 74 cm × 宽 74 cm × 高 43 cm,采用 20 mm 厚钢板焊接。
- 2) “金属盒保护罩”内净尺寸:长 70 cm × 宽 70 cm × 高 43 cm(顶部预留钢盖板厚 20 mm,粗砂垫层 10 mm)。
- 3) 试样有效尺寸:70 cm × 宽 70 cm × 高 40 cm。

Table 2. The results of particle size analysis for shear specimen and gradation degree judgment table
表 2. 剪切试样颗粒分析成果及级配程度判断简表

	小于该粒径的土含量占总质量的百分数			不均匀系数(C_u)	曲率系数(C_c)
	d10	d30	d60		
1#试样	0.434	1.895	28.425	65.55 > 10	0.29
2#试样	10.17	13.316	30.516	30 > 10	5.17
3#试样	1.546	13.977	42.128	27.25 > 10	3.0
4#试样	0.365	6.182	24.781	67.88 > 10	4.23

级配综合判定标准:当 $C_u > 10$, $C_c = 1\sim 3$ 时,土级配最好。

1#~4#试样级配判定:级配好,但数值过大,属于不连续级配,其中 3#试样较理想,对本次试验最有利



1-双 28B 工字钢反力梁; 2-地锚; 3-钢筋混凝土反力梁; 4-试样。

Figure 1. The plane arrangement chart of test pits

图 1. 试坑平面布置图

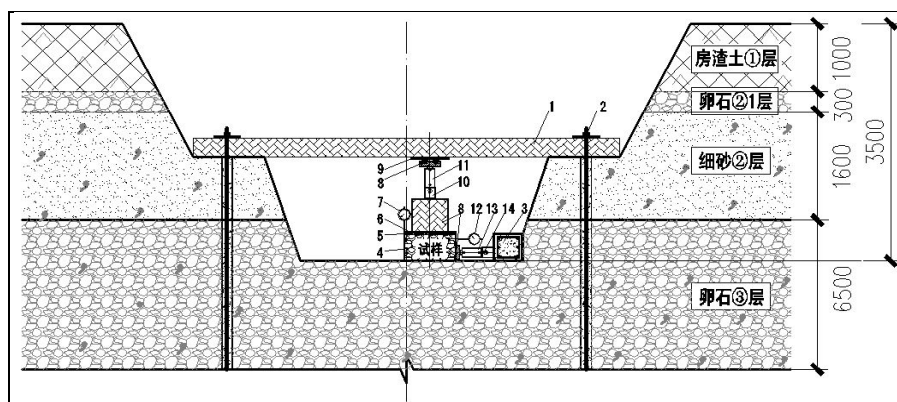
4. 剪切试验步骤及过程控制

4.1. 砂卵石地层试样制作

共计 4 个试样，相邻试样中心点距离 1.5 m，相邻试样净距 0.8 m。以 3#试样制作步骤为例，参见图 3。

4.2. 试样周围的试验条件

在“金属盒保护罩”完全下沉 43 cm 后，清除“样罩”外侧附近余土，并加深至“样罩”下沿以下 2 cm，以保证试样在水平剪切过程中不受其它外侧水平阻力的影响。



1-双 28B 工字钢反力梁；2-地锚；3-钢筋混凝土反力梁；4-试样；5-粗砂垫层；6-传压盖板；7-垂向位移计；8-滚珠轴承；9-固定钢板；10-垂向轴力计；11-垂向千斤顶；12-水平向位移计；13-水平向千斤顶；14-水平向轴力计。

Figure 2. The transverse section of test pit

图 2. 试坑横剖面图



3#试样-步骤 1

3#试样-步骤 2

3#试样-步骤 3

3#试样-步骤 4

Figure 3. The processing of making specimen

图 3. 试样制作

4.3. 试样加压设备及测表安装

参见图 4、图 5。

4.4. 试样垂直加压

4 个剪切试样的垂直加压数值分别为 70 kPa、150 kPa、200 kPa、300 kPa。根据试样顶部有效横截面积 0.49 m^2 ($700 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$)，其对应的垂直力分别为 34.3 kN、73.5 kN、98 kN、147 kN。

4.5. 试样水平加压及水平位移量测

1) 预估试样最大水平压力及水平力

预估本次试样的水平抗剪强度是垂直压力的 1 倍，本次 4 个剪切试样的预估最大水平压力数值分别为 70 kPa、150 kPa、200 kPa、300 kPa。根据试样底面面积 0.49 m^2 ($700 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$)，其对应的预估最大水平力分别为 34.3 kN、73.5 kN、98 kN、147 kN。每级剪切荷载安预估最大剪切荷载的 10% 分级等量施加，并按每 30 秒施加一级剪切荷载[5]。

2) 终止试验标准

当剪切变形急剧增长或剪切变形达到试体尺寸边长的 1/10 时，可终止试验[5]。

5. 试样垂直加压与垂直变形的试验成果

5.1. 试样垂直压力与垂直位移关系曲线图表

参见图 6、表 3。



Figure 4. The vertical pressurization equipment
图 4. 垂直加压设备



Figure 5. The horizontal pressurization equipment
图 5. 水平加压设备

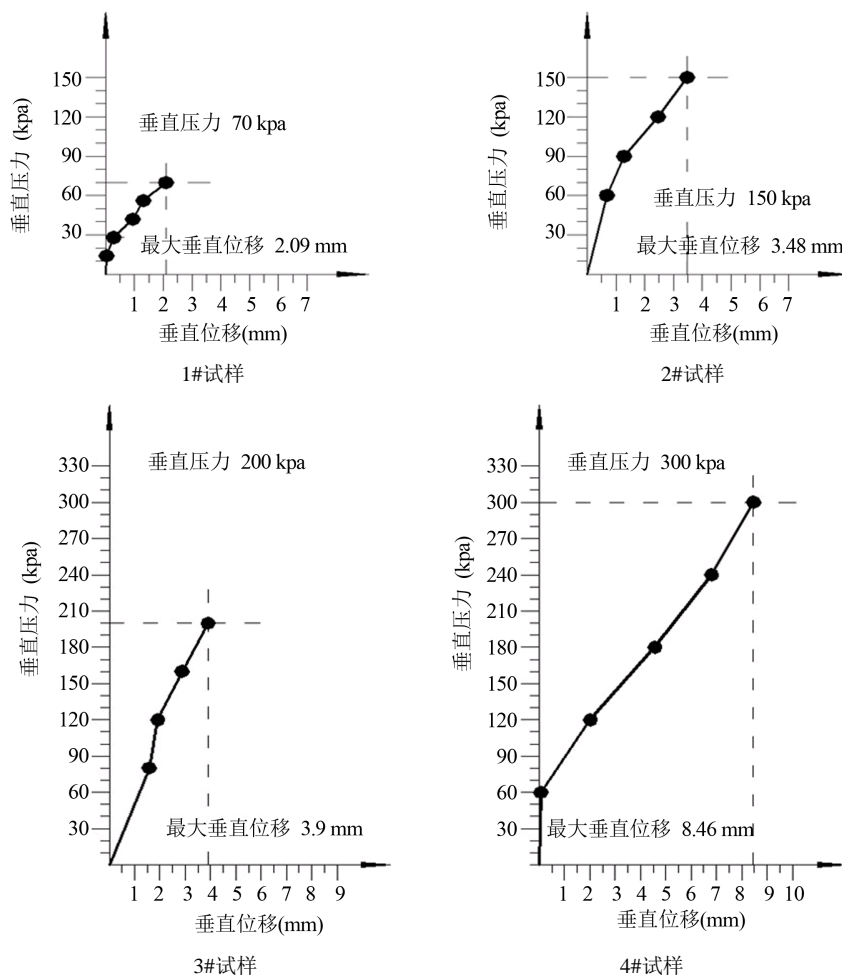


Figure 6. The relation curve chart of vertical pressure and displacement of the shear specimen

图 6. 试样垂直压力与垂直位移关系曲线图

Table 3. The statistical table of accumulated vertical pressure and displacement of the shear specimen

表 3. 试样累计垂直压力与累计垂直位移统计表

	累计垂直压力(kPa)	累计垂直位移(mm)	累计时间(min)
1#	70	2.09	25
2#	150	3.48	25
3#	200	3.90	25
4#	300	8.46	25

5.2. 试样垂直压力与垂直位移的图表成果分析

根据图 6、表 3 的成果可知, 1#~4#试样在垂直加压累计时间 25 分钟的过程中, 其垂直位移达到 2.09~8.46 mm, 每一个试样的“垂直压力与垂直位移关系曲线”均处于直线变形阶段, 并未出现缓慢变形趋势, 更没有呈现每小时变形小于 0.005 mm[6]迹象, 说明, 其一, 最后一级的加压稳定时间远远不够, 其二, 较大的位移说明试样在垂直方向上存在松软问题。

6. 试样水平加压与水平变形的试验成果

6.1. 试样水平压力与水平位移关系曲线图

参见图 7。

6.2. 试样最大水平压力下的水平位移拉张缝

参见图 8、表 4。

6.3. 试样水平压力与水平位移图表成果分析

从 1#~4#试样现场直剪试验[5]过程中的直接观察及根据图 7 可知，在剪切过程中水平向测力计读数

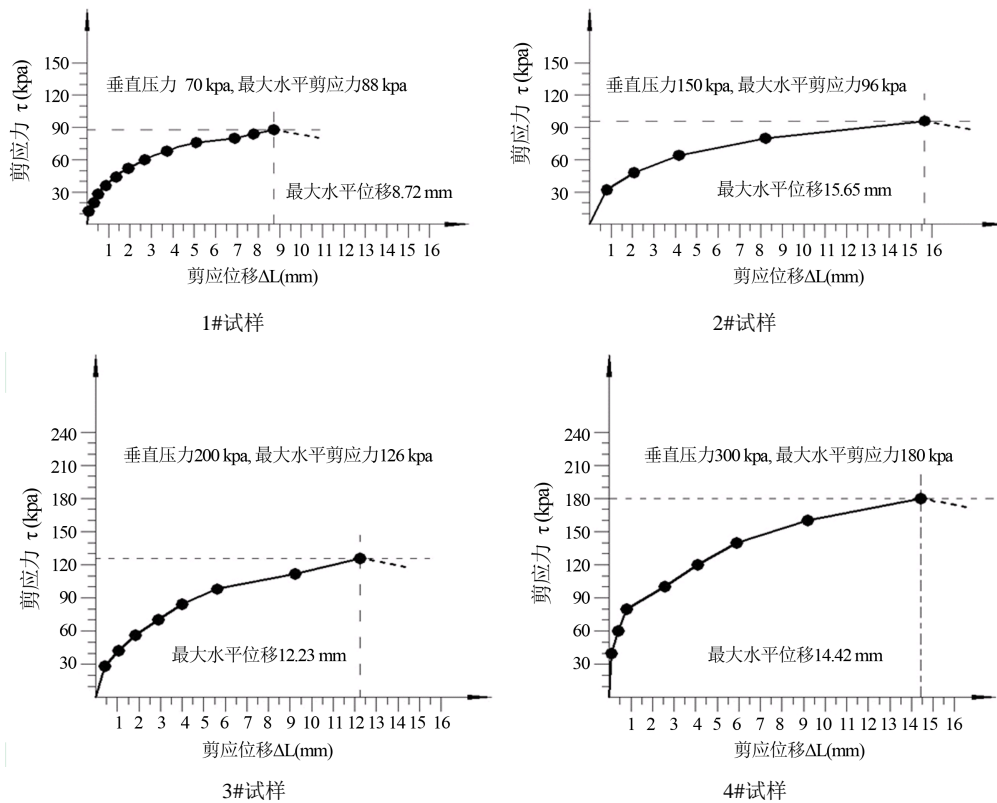


Figure 7. The relation curve chart of horizontal pressure and displacement of the shear specimen
图 7. 试样水平压力与水平位移关系曲线图

Table 4. The comprehensive statistical table of the maximum horizontal pressure and accumulated horizontal displacement

表 4. 试样最大水平压力与累计水平位移综合统计表

	最大水平压力 (kPa)	最大水平力 (kN)	累计水平位移 (mm)	累计水平拉张缝 (mm)
1#	88	44	8.72	20
2#	96	48	15.65	20
3#	126	63	12.23	16
4#	180	90	14.42	20

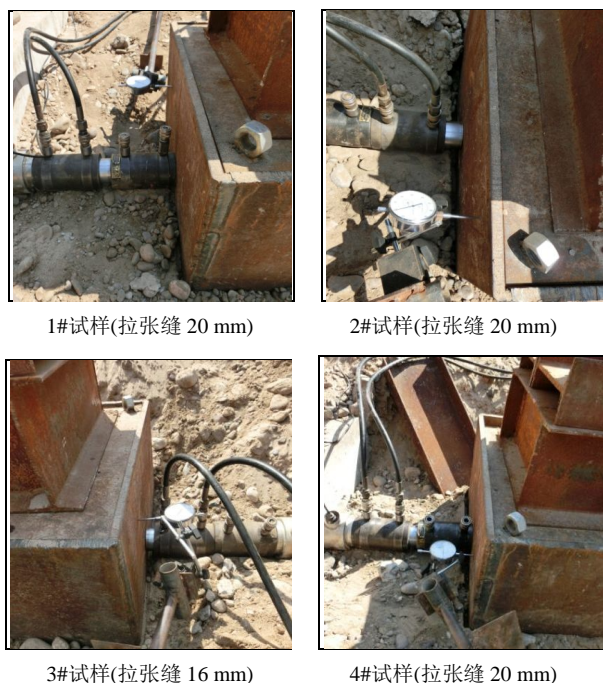


Figure 8. The accumulated horizontal tension suture of the shear specimen

图 8. 试样累计水平拉张缝

出现了峰值[6]，表现为水平向压力达到一个数值后无法再继续增加水平压力，并且，试样的水平位移在持续增大不止。因此，本次将最大一级水平压力确定为抗剪强度[6]。

7. 试样现场直剪试验综合成果

7.1. 绘制抗剪强度与垂直压力关系曲线

根据 1#~4#试样施加的垂直压力数值，及试验已测试出的抗剪强度数值，绘制“抗剪强度与垂直压力关系曲线”。参见图 9。

7.2. 抗剪强度与垂直压力关系曲线合理性分析

1) 直观确定曲线

根据“1#~4#试样抗剪强度与垂直压力关系曲线”中 4 个样点位置，按常规做法，所连直线应是四个点所呈现的最佳趋势直线[6]。

依据此连线，黏聚力 $C = 43.86 \text{ kPa}$ ，内摩擦角 $\phi = 23^\circ$ 。

2) 综合确定曲线

根据“1#~4#试样抗剪强度与垂直压力关系曲线”中 4 个样点位置，1#试样的最大水平压力明显较大，与垂直压力不匹配，初步分析可能是试样底部滑动面附近存在较大卵石，对水平推力起到了较大阻力，因此，将 1#试样最大水平压力数值剔除，仅考虑 2#、3#、4#试样之间的连线更为合理。

依据此连线，黏聚力 $C = 10.18 \text{ kPa}$ ，内摩擦角 $\phi = 30^\circ$ 。

3) 现场直剪试验小结

根据现场直剪试验成果的最终分析，不论那一个作图处理方法，都无法否认“似黏聚力”的存在。由此可见，对砂卵石地层“黏聚力” $C = 0$ 的习惯取值做法是不可取得，需要根据现场观测砂卵石地层的

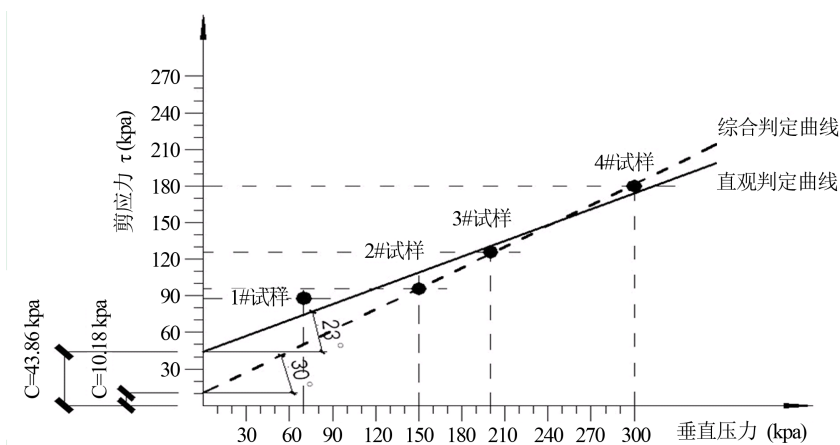


Figure 9. The relation curve chart of shear strength and vertical pressure of the shear specimen

图 9. 试样抗剪强度与垂直压力关系曲线

状态并结合勘察成果综合取值。

8. 本次试验的不足及失败点分析

8.1. 试验方案编制的不足

在试验方案中,对有些环节介绍的不细、不够明确,尤其对水平推力的后期控制没有写清楚,在出现最大推力后,宜依次减小推力,继续测试出 3~4 个压力点下的位移值[6],以使“水平压力与水平位移关系曲线”更完整。

8.2. 试样制作存在的隐患

原位砂卵石地层制样难度非常大,应采取一切可行的手段保证试样少受扰动。

1) 在本次制样过程中,“金属盒保护罩”内侧壁还是出现严重的上下大小“V”型缝,缝隙深度可达 20 cm,受试验时间所限,采用砂土充填、捣实,事实上这种方法并不有效,没能采取更有效的密实充填方法,恰是反映在试验方案编制中未对此有足够认识。

2) 制样初步完成后,在试样顶部铺设的砂层太厚,实际厚度达 2~3 cm,此砂层的作用是找平,厚度宜为 1 cm,太厚,会增加垂直加压变形稳定时间,本次试验结果充分反映出垂直变形较大,为 2.09~3.90 mm,最大达 8.46 mm,且从加压至结束的 25 分钟内,垂直变形远未达到稳定(稳定标准为<0.005 mm/h)[6]。

3) 试样受扰动的程度,直接影响着最大水平推力的测试数值。如扰动大,则最大水平推力值会明显变小,导致“抗剪强度与垂直压力关系曲线”的斜率变小,从而,得出的内摩擦角 ϕ 变小,黏聚力 C 也随之变小,最终导致试验效果不佳。

8.3. 试样剪切滑动面未进行检查描述、拍照

在每一个试样水平剪切破坏后,应剥开试样土块,重点查看样底部剪切滑动面附近有无较大粒径卵石,并对较大卵石粒径及数量进行统计、拍照,以用于对最大水平推力的离散性进行合理分析。在本次试验中,此项工作被疏忽。

8.4. 试样沉积年代及卵石定向排列因素

新近沉积土[5]定义为“第四纪全新世中晚期形成的土”,距今约 7000~7500 年以内,一般呈欠压密

状态，且强度较低。

显然，从沉积压密时间上来分析，新近沉积[5]砂卵石地层强度较低，最重要的是此时沉积的卵石其定向排列不佳，原因有二，其一是，此阶段的水流强度远比此前的强度低得多，卵石在水流中的分选不够，其二是，长时间的压密，会进一步增加卵石定向排列的效果，使其咬合更紧密。可见，一般第四纪沉积的砂卵石其密实度、卵石的定向排列程度远比新近沉积的好，且深部的比浅部的好。

本次试验采用的是河流中上游现代河床附近非常浅部的的新近沉积[5]砂卵石地层进行试验，其效果不一定很能说明问题。

9. 现场直剪试验工作的改进方法

9.1. 试样加固措施

在试样制作过程中，“金属盒保护罩”内侧壁附近很容易出现不同程度的“V型”缝，对此缝采用M10防收缩速凝水泥砂浆充填，对试样顶面采用同类型砂浆找平，厚度宜为1~2cm，待其强度达到要求后再进行试验。因此，应加工多个“金属盒保护罩”同时制样，在制样完成后须对试样采用塑料布进行覆盖保湿、保护。

9.2. 合理增加试样数量

砂卵石地层中卵石粒径变化极大，个别特大卵石如处于试样底部附近，将对试样的水平剪切结果影响极大，建议砂卵石地层现场直剪试验1组中的试样数量不应少于5个。

10. 对库伦抗剪强度理论的解读及探讨

10.1. 对库伦抗剪强度理论及公式的常规理解

10.1.1. 库伦理论及公式的产生背景

1776年，法国学者库伦根据砂土的试验结果得出砂土的抗剪强度公式，以后，库伦又根据黏性土的试验结果得出黏性土的抗剪强度公式。库伦抗剪强度表达式为：

$$\text{砂土 } \tau_f = \delta \tan \phi; \quad \text{黏性土 } \tau_f = C + \delta \tan \phi$$

式中 τ_f ——抗剪强度，kPa； δ ——总应力，kPa； C ——土的黏聚力，或称内聚力，kPa； ϕ ——土的内摩擦角，(°)。

参见图10。

10.1.2. 抗剪强度产生的途径

库伦认为，砂土的抗剪强度是由土粒间的滑动摩擦以及凹凸面间的镶嵌作用所产生的(咬合)摩阻力，其大小决定于土粒表面的粗糙度、土的密实度以及颗粒级配等因素。黏性土和粉土的抗剪强度由摩阻力及黏聚力组成，黏聚力是由于黏土颗粒之间的胶结作用和静电引力效应等因素引起的。

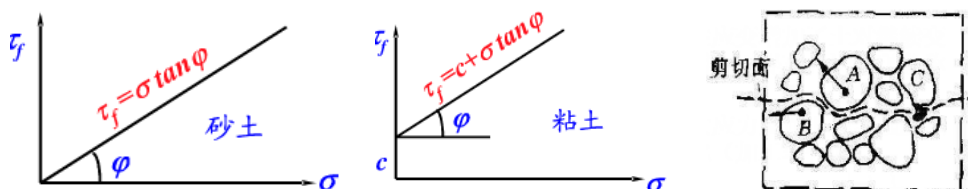


Figure 10. The graphical representation of Coulomb's theory

图10. 库伦原理图示

10.1.3. 砂土不存在粘聚力的依据

根据库伦原理，砂土的抗剪强度决定于有效法向应力和内摩擦角，不存在黏聚力。密实状态的砂土的内摩擦角与初始孔隙比、土粒表面的粗糙度以及颗粒级配等因素有关，松散状态的砂土的内摩擦角与干燥时的天然休止角相等。

10.1.4. 库伦理论中“砂土”的含义

在二十世纪90年代，国内高校《土力学》教材中，基本上是将库伦理论中的“砂土”含义仅限于“粉砂、细砂、中砂、粗砂、砾砂”，没有将其含义进一步扩展。但在2000年以后国内部分高校《土力学》教材中出现了新的表述，即，采用“无黏性土”及“黏性土”概念对库伦理论及公式进行表述，并且对“无黏性土”的含义无具体解释，更奇怪的是在“无黏性土”前提下反复讲“砂土”的库伦理论及公式的特性。

笔者认为，“无黏性土” \neq “砂土”，前者包含后者，后者不能替代前者，这种替换会带来理解上的混淆。

10.2. 砂卵石地层具有“似黏聚力”的结构特征依据

10.2.1. 砂卵石地层的结构特征

由于河水流动引起的长期冲刷作用，使卵石在沉积过程中产生了定向排列，并促成了相邻卵石间以叠瓦状形式接触，相邻卵石间的空隙被砂砾、泥土等完全充填，经此冲积作用及后来的覆土长期压密作用，将砂卵石土层造就成了一个具有内部紧密联结的一个整体，笔者将砂卵石地层的这种特殊结构称为“叠瓦状结构”[7]。参见图11。

在实际的开挖现场(如深基坑、河道内的砂石采场)，会经常看到砂卵石地层中的卵石具有不同程度的定向排列现象，一般来讲，新近沉积[5]的定向排列差些，一般第四纪的要好些，总之，沉积越久，卵石定向排列效果越好。并且，巨深采坑(10~20 m)侧壁常呈长时间陡立存在，这本身就是卵石定向排列形成的“叠瓦状结构”[7]及互相咬合的结果。参见图12、图13。

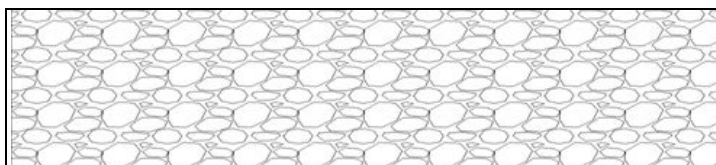


Figure 11. The schematic diagram of imbricate structure of sand and cobble stratum

图 11. 砂卵石地层中叠瓦状结构示意图



Figure 12. The effect diagram of the directional arrangement of cobble in recently deposited sand and cobble stratum

图 12. 某地新近沉积砂卵石地层的卵石定向排列效果图



Figure 13. The diagram of the exploitation surface of recently deposited sand and cobble stratum

图 13. 某地新近沉积砂卵石地层采场开采面陡壁

10.2.2. 砂卵石地层中存在“似黏聚力”的理论分析

在水流冲积成因的砂卵石地层中，其表现的抗剪强度不仅是颗粒间的滑动与镶嵌咬合所产生的摩阻力，还有水流冲积条件下形成的卵石定向排列，由此产生了“叠瓦状结构” [7]，形成了另外一种力，类似于“黏聚力”，笔者称之为“似黏聚力” [4]，库仑理论未对这种情况进行阐述，对粗颗粒土仅提及砂土，不包括这种砂卵石土。因此，在岩土工程设计计算中也就简单的将所有粗颗粒土均当做砂土对待，认为“水流冲积成因的砂卵石地层”黏聚力 $C = 0$ ，而没有考虑“似黏聚力” [4] 的贡献作用，显然，这是不科学的，同时也造成了岩土工程成本的增加。

11. 结论

1) 准确理解库伦理论及公式表达式

通过该项现场砂卵石地层直剪试验，及对水流冲积成因砂卵石地层结构的分析，及再次对库伦理论及公式的深入解读，笔者认为，库仑理论仅对“砂土”及“黏性土”进行了抗剪强度的理论解密及表述，其中的“砂土”并不等于“无黏性土”，在对库仑理论的解读及应用时，不可以将所有的“无黏性土”均当作“砂土”处理，尤其对水流冲积成因砂卵石地层的 C 值、 ϕ 值，取值要非常慎重，应尽可能的挖掘该种砂卵石地层具有“似黏聚力” [4] 的潜力，指导岩土工程设计，安全、科学、合理的降低岩土工程造价。

2) 全面、系统的开展现场剪切试验

建议对水流冲积成因的新近沉积砂卵石地层及一般第四系沉积砂卵石地层分别开展全面、系统的现场剪切试验，进一步了解不同时期、不同密度、不同卵砾含量、不同级配条件下的 C 值、 ϕ 值的规律性趋势，以便更好的指导岩土工程设计，同时，也是对库仑理论及公式内涵的进一步补充。

参考文献 (References)

- [1] 张玲玲, 姚勇 (2008) 川西北地区砂卵石土抗剪强度影响因素分析. *硅谷*, **18**, 4-5.
- [2] 赵兵, 黄荣 (2011) 成都地区砂卵石的抗剪强度探讨. *价值工程*, **18**, 60-61.
- [3] 陈希哲 (1994) 粗粒土的强度与咬合力的试验研究. *工程力学*, **4**, 56-63.
- [4] 刘伍 (2003) 在砂卵石地层中的基坑支护结构设计及施工工艺探讨. *土木工程(Hans 汉斯)*, **1**, 84-88
- [5] GB50021-2001 (2012) 岩土工程勘察规范(2009 版). 中国建筑工业出版社, 北京.
- [6] GB/T50123-1999 (1999) 土工试验方法标准. 中国建筑工业出版社, 北京.
- [7] 冯明, 张先, 吴继伟 (2007) 构造地质学. 地质出版社, 北京.