



# 钢板与砂泥岩混合填土接触面力学特性试验研究\*

王俊杰<sup>1</sup>, 马伟<sup>2</sup>, 梁越<sup>1</sup>, 尹文<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心、省部共建水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 2. 山东农业大学勘探设计研究院, 山东 泰安 271018)

**摘要:** 基于直接剪切试验原理, 研究了钢板与砂泥岩混合填土接触界面的剪切力学特性。试验中, 钢板采用Q235钢材制作; 砂泥岩混合土料采用弱风化砂岩和泥岩的破碎颗粒料按照5种不同的颗粒级配曲线以质量比8:2配制。试验结果表明, 钢板与砂泥岩混合填土接触界面的剪切应力-位移曲线可用双曲线拟合; 抗剪强度可用摩尔-库伦强度准则来描述; 抗剪参数粘聚力值随土体特性粒径 $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{90}$ 的增大呈先减小后增大的抛物线型变化; 摩擦角值随土体特性粒径 $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{90}$ 的增大呈先增大后减小的抛物线型变化; 粘聚力和摩擦角与土体不均匀系数和曲率系数的相关性不明显。

**关键词:** 钢-土接触面; 剪切力学特性; 砂泥岩混合填土; 试验研究; 颗粒级配

中图分类号: TU 411

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)01-0182-06

## Experimental study on mechanical properties of steel and sandstone mixed with mudstone interface

WANG Jun-jie<sup>1</sup>, MA Wei<sup>2</sup>, LIANG Yue<sup>1</sup>, YIN Wen<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Hydraulic, Waterway Engineering of the Ministry of Education, National Inland Waterway Regulation Engineering Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;  
2. Shandong Agricultural University Survey and Design Institute, Tai'an 271018, China)

**Abstract:** Based on the direct shear test theory, mechanical properties of steel and sandstone mixed with mudstone interface are studied by experiments. In the tests, steel plate is made from Q235 steel, soil materials of sandstone mixed with mudstone is composed of weak weathered sandstone and mudstone after crushing, soil material weights ratio of 8:2 prepared by sandstone and mudstone with 5 different particle grading curves. The tests results show that the shear stress-displacement curve of steel and sandstone mixed with mudstone interface can be used by hyperbolic model fitting; shear strength can be described by the Mohr-Coulomb strength criterion; shear strength cohesion value decreases and then increases as a parabola with increase of the characteristics of soil particle size  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{90}$ ; friction angle values increase and then decrease as a parabola with increase of the characteristics of soil particle size  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{90}$ ; relations between cohesion and friction angle versus coefficient of uniformity and curvature coefficient are not obvious.

**Key words:** steel-soil interface; shear mechanical property; sandstone mixed with mudstone; experimental study; grading curve of soil particle

土体与刚性结构间的相互作用问题是各类土木工程中经常遇到且重要的问题。由于土体与刚性结构物两种材料在刚度与强度等力学特性方面

差别较大, 在一定荷载条件下, 土体与结构物之间除了力的传递外, 还有可能产生相对位移等非连续变形行为。因此, 在分析土体与结构物相互

收稿日期: 2013-05-22

\*基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题(2011BAB09B01和2012BAB05B04)

作者简介: 王俊杰(1973—), 男, 博士, 教授, 从事水利水运工程的教学和科研工作。

作用时, 仅仅单纯地考虑土体与结构物各自的特性是不够的, 需要对土体与结构物接触界面的力学特性进行分析。

砂泥岩混合料是长江中上游地区工程建设中常用的建筑填料, 在三峡库区港口码头建设中也常作填料修筑码头岸坡、陆域填方等, 因此, 研究砂泥岩混合填土体与结构物的相互作用问题具有一定的现实意义。在长江中上游地区大型港口码头工程(如在建的重庆果园港)建设中, 码头基础多采用钢护筒嵌岩桩基础。查明钢护筒与库岸砂泥岩混合填土接触界面的摩擦特性对揭示钢护筒嵌岩桩基的承载性状具有重要意义, 而前人对此研究较少。

国内外学者对土体与结构物间的接触问题进行了大量的研究, 取得了不少研究成果。Brown<sup>[1]</sup>使用自制的大型盒式直剪仪研究了土与混凝土接触界面的力学特性, 研究认为接触面附近土体的渐进式破坏会对应力-位移曲线产生影响; Desai等<sup>[2]</sup>通过研制的循环剪切仪研究了砂与混凝土接触界面的静动力特性; Clough等<sup>[3]</sup>通过大量的土与混凝土的直剪试验成果, 认为接触界面的剪应力与剪切位移为双曲线关系; 殷宗泽等<sup>[4]</sup>通过分析土与混凝土接触面的直剪试验成果, 认为接触面上的剪切破坏是由外向内逐渐发展的结果, 进而提出了接触面剪切变形的刚塑性模型; 高俊合等<sup>[5]</sup>通过研制的大型单剪仪研究了细粒土与混凝土接触界面的剪切破坏带并确定了接触面单元的厚度; 徐进等<sup>[6]</sup>研制了大型土石混合料多功能力学试验仪, 其试验过程中能保证施加法向应力为一定值, 使结果更为可靠; 胡黎明等<sup>[7]</sup>利用改进的直剪仪研究了砂土与钢板接触面的力学特性, 从接触面微观变形机理上进行了分析。

本文采用自制的直剪试验装置, 试验研究钢板与砂泥岩混合填土接触面的力学特性, 以期获得对进一步研究钢-土接触问题的有益认识。

## 1 试验方法

### 1.1 试验土料

试验土料由现场采取的弱风化砂岩、泥岩

块体人工破碎后的颗粒按一定比例、级配混合而成。弱风化砂岩、泥岩块体取自在建的重庆果园港二期工程建设区, 室内试验测得砂岩的单轴抗压强度为60.0~72.2 MPa(天然状态)和60.0~67.4 MPa(饱和状态), 泥岩的单轴抗压强度为17.6~25.8 MPa(天然状态)和8.3~15.0 MPa(饱和状态)。砂岩、泥岩块体分别破碎成粒径不大于20 mm的砂岩颗粒和泥岩颗粒, 按照图1所示的5种颗粒级配配制成砂岩颗粒料和泥岩颗粒料, 最后按照质量比8:2混合砂岩颗粒料和泥岩颗粒料, 形成5种不同颗粒级配的试验土料。

表1给出了5种试验土料的界限粒径 $d_i$ ( $d_i$ 为小于某粒径土粒含量分别为 $i$ %时所对应的粒径, 图1)、不均匀系数 $C_u$ 和曲率系数 $C_c$ 值。可知级配1,2,3是良好级配, 级配4,5是不良级配。试验中, 取试样干密度为1.9 g/cm<sup>3</sup>, 含水率为9.0%。

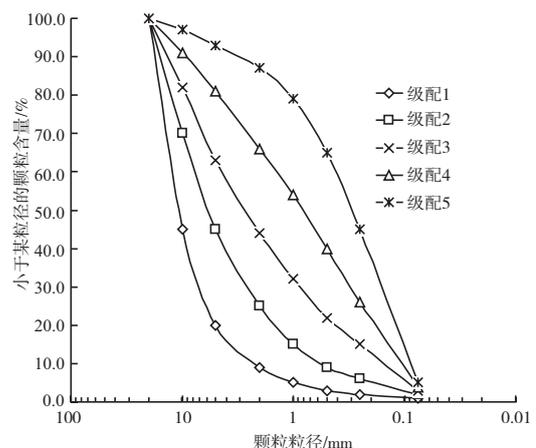


图1 颗粒级配曲线

表1 颗粒特性指标

级配	$d_{10}/\text{mm}$	$d_{30}/\text{mm}$	$d_{50}/\text{mm}$	$d_{60}/\text{mm}$	$d_{90}/\text{mm}$	$C_u$	$C_c$
1	2.27	7.00	10.91	12.73	18.18	5.60	1.69
2	0.58	2.75	6.00	8.00	16.67	13.71	1.62
3	0.18	0.90	4.53	4.53	14.44	25.56	1.01
4	0.12	0.32	0.86	1.50	9.50	12.22	0.56
5	0.10	0.18	0.31	0.44	3.50	4.52	0.80

### 1.2 试验仪器及试验方法

可用于接触面应力变形及强度特性的试验仪器主要有直剪仪、单剪仪、环剪仪, 针对本试验的研究目的, 根据室内直剪试验原理, 自行设计制作了一套简易的直剪试验装置, 如图2所示。

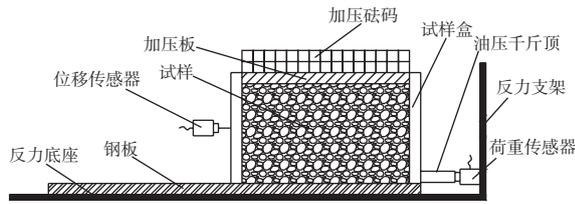


图2 直剪试验装置

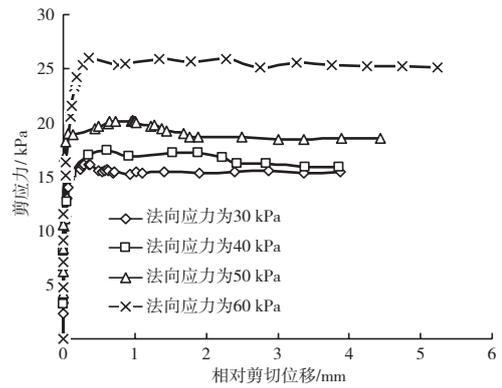
该试验装置由可更换的钢板、反力支架、反力底座、试样盒、油压千斤顶、荷重传感器、位移传感器、数据采集系统、加压砝码等组成。直剪试验装置试样盒内土体尺寸为15 cm × 15 cm × 10 cm，钢板采用Q235钢材，尺寸为50 cm × 50 cm，厚度为1 cm。由于钢板的面积大于试样的面积，可保证在剪切试验过程中试样的剪切面积15 cm × 15 cm 保持不变，且剪切作用始终发生在土体与钢板接触界面上。

法向压力通过堆载砝码实现，水平推力通过油压千斤顶施加。法向应力分别采用30，40，50，60 kPa。剪力施加采用应力控制的形式，加载分级进行，为了保证施加剪力均匀，每级荷载为预估极限荷载的1/10~1/15。在每级荷载作用下，剪切位移稳定后施加下一级荷载，若剪切位移持续发展或突然快速发展，则认为接触面已经发生剪切破坏。

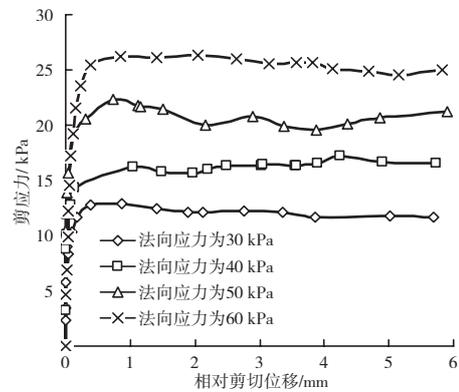
## 2 试验结果及分析

### 2.1 接触面剪应力与相对剪切位移曲线

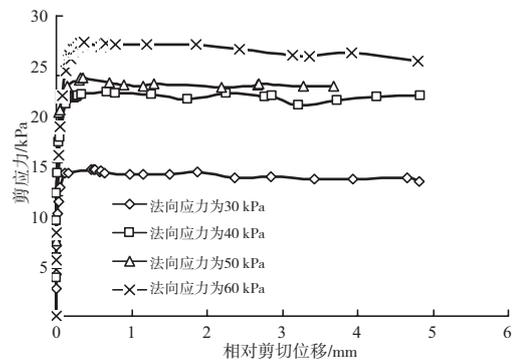
图3给出了5种级配试验土体在不同法向应力下的剪应力与相对剪切位移关系（ $\tau-s$ 曲线）。可见，在某一级法向应力作用下，剪应力随相对剪切位移的增大而增大，在剪切的初始阶段，剪应力迅速增大，随着相对剪切位移的增大，剪应力增大的速率逐渐减小， $\tau-s$ 曲线逐渐平缓，剪应力缓慢增至最大值，峰值过后剪应力有所减小并达到稳定，相对剪切位移继续发展，而剪应力基本保持不变，表明钢-土接触面已经发生剪切破坏；接触面的剪应力随法向应力的增大而增大，相对剪切位移相同时，法向应力越大则剪应力越大。



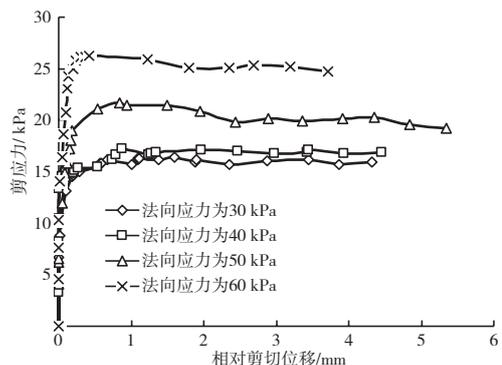
a) 级配1



b) 级配2



c) 级配3



d) 级配4

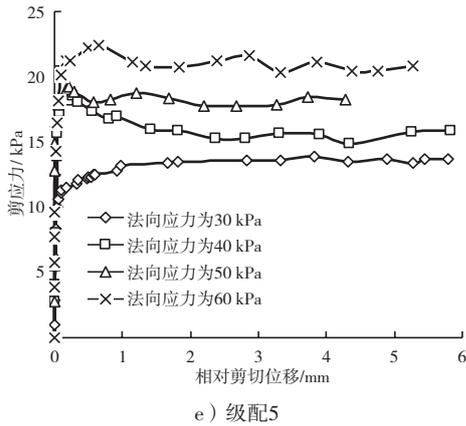


图3 剪应力-相对剪切位移曲线

### 2.2 接触面抗剪强度分析

图4给出了不同试验中钢与砂泥岩混合填土接触面抗剪强度与法向应力的关系曲线, 抗剪强度取接触面剪切破坏时的峰值剪应力。由图4可知, 钢与砂泥岩混合填土的抗剪强度随法向应力的增大而提高, 两者具有良好的线性关系。因此, 接触面的抗剪强度可用摩尔-库伦强度准则来描述, 即

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中:  $\tau_f$ 为接触面的抗剪强度;  $c$ 为接触面上的粘聚力;  $\varphi$ 为接触面上的摩擦角;  $\sigma$ 为法向应力。

各试验的抗剪参数见表2。

表2 不同设计级配试验的抗剪参数

试验土料 颗粒级配编号	抗剪参数	
	粘聚力 $c$ /kPa	摩擦角 $\varphi$ (°)
1	5.48	19.07
2	1.35	24.38
3	2.29	21.63
4	4.74	20.73
5	7.92	18.85

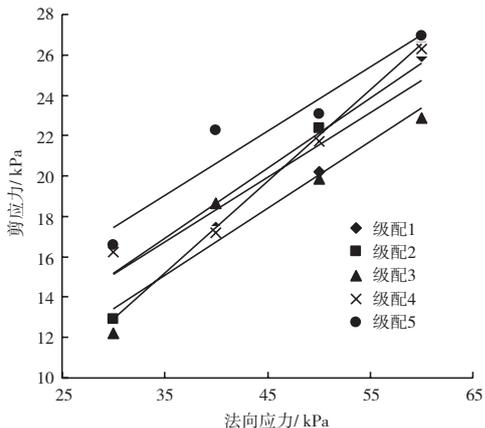


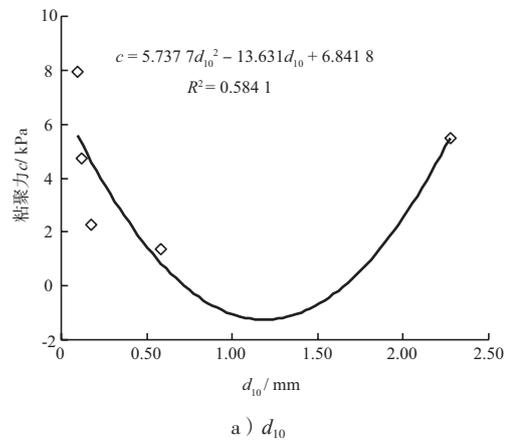
图4 不同颗粒级配的法向应力与抗剪强度关系

### 3 讨论

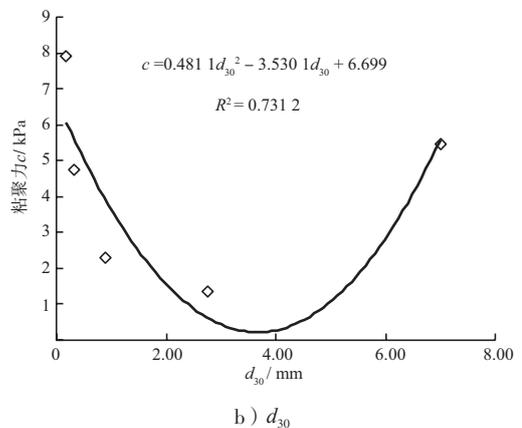
#### 3.1 颗粒级配对接触面粘聚力 $c$ 的影响

图5给出了钢与砂泥岩混合填土接触面抗剪参数粘聚力  $c$  与颗粒级配特征指标  $d_i$  的关系曲线。由图5可以看出, 接触面抗剪参数粘聚力  $c$  随  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{90}$  均呈先减小后增大的抛物线型关系。

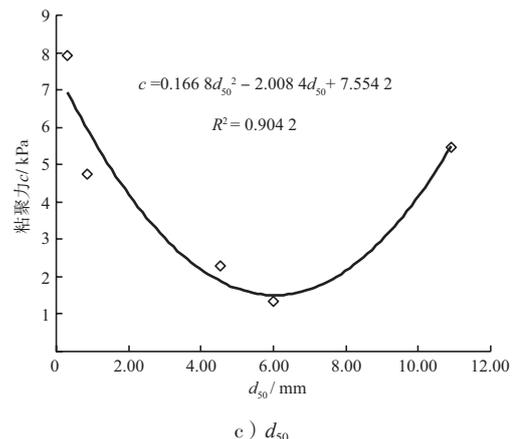
图6和图7分别给出了钢与砂泥岩混合填土接触面抗剪参数粘聚力  $c$  与不均匀系数  $C_u$  和曲率系数  $C_c$  的关系。由图6和图7可以看出, 粘聚力  $c$  随不均



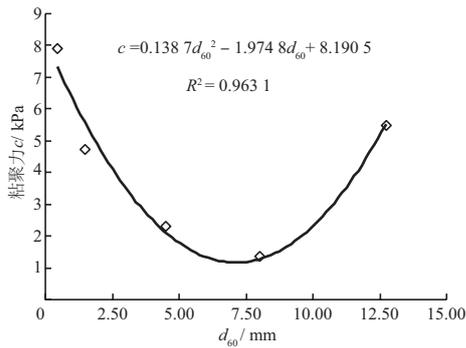
a)  $d_{10}$



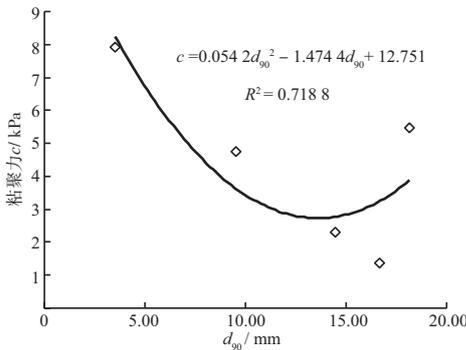
b)  $d_{30}$



c)  $d_{50}$



d)  $d_{60}$



e)  $d_{90}$

图5  $d_i$ 与粘聚力 $c$ 的关系

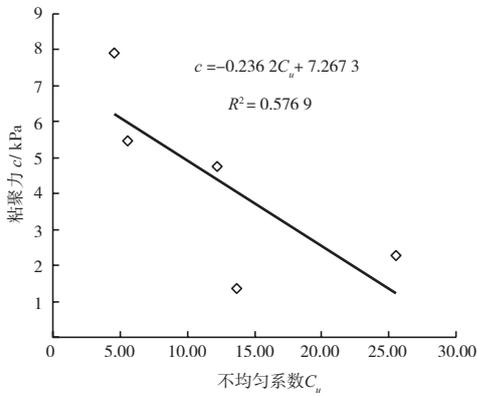


图6 不均匀系数 $C_u$ 与粘聚力 $c$ 的关系

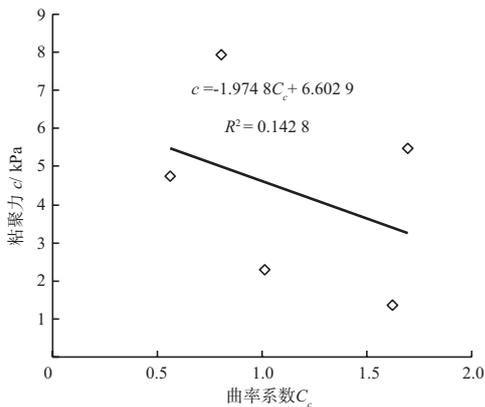
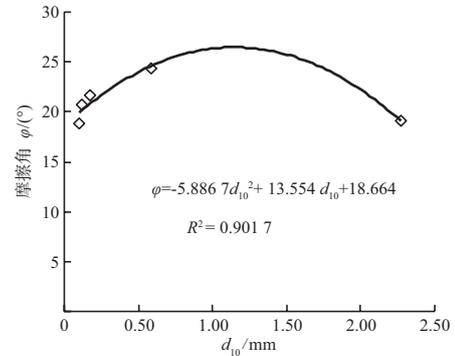


图7 曲率系数 $C_c$ 与粘聚力 $c$ 的关系

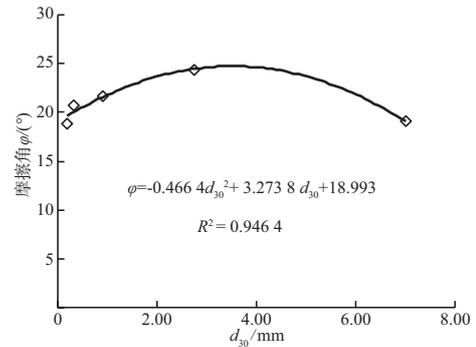
匀系数 $C_u$ 和曲率系数 $C_c$ 增大存在减小的趋势，但是相关性不太明显。

### 3.2 颗粒级配对接面摩擦角 $\phi$ 的影响

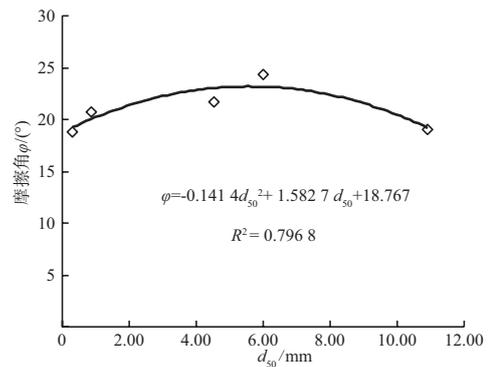
图8给出了钢与砂泥岩混合填土接触面抗剪参



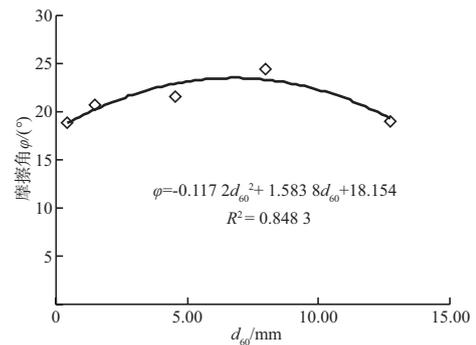
a)  $d_{10}$



b)  $d_{30}$



c)  $d_{50}$



d)  $d_{60}$

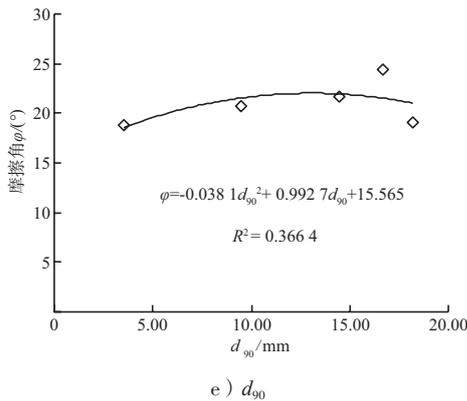


图8  $d_i$ 与摩擦角 $\phi$ 的关系

数摩擦角 $\phi$ 与颗粒级配特征指标 $d_i$ 的关系曲线。由图8可以看出, 接触面抗剪参数摩擦角 $\phi$ 随 $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{90}$ 均呈先增大后减小的抛物线型关系。

图9和图10分别给出了钢与砂泥岩混合填土接触面抗剪参数摩擦角 $\phi$ 与不均匀系数 $C_u$ 和曲率系数 $C_c$ 的关系。由图9和图10可以看出, 接触面抗剪参数摩擦角 $\phi$ 随不均匀系数 $C_u$ 和曲率系数 $C_c$ 增大存在增大的趋势, 但是相关性不太明显。

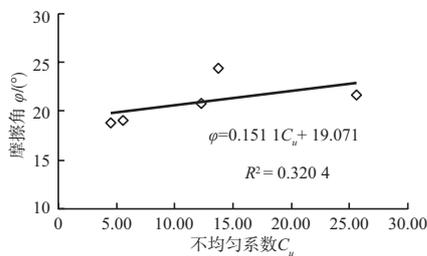


图9 不均匀系数 $C_u$ 与内摩擦角 $\phi$ 的关系

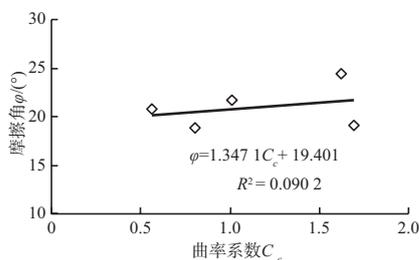


图10 曲率系数 $C_c$ 与内摩擦角 $\phi$ 的关系

#### 4 结论

1) 钢与砂泥岩混合填土接触界面的关系曲线未出现明显的应变软化现象, 接触面的剪应力与相对剪切位移可用双曲线模型拟合。

2) 在试验的法向应力范围内, 钢与砂泥岩混合填土接触界面的抗剪强度随法向应力的增大而增大, 两者具有良好的线性关系, 接触面的抗剪强度可用摩尔-库伦强度准则来描述。

3) 接触界面粘聚力 $c$ 随 $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{90}$ 均呈先减小后增大的抛物线型关系; 接触界面的内摩擦角 $\phi$ 随 $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{90}$ 均呈先增大后减小的抛物线型关系,  $c$ ,  $\phi$ 与不均匀系数 $C_u$ 和曲率系数 $C_c$ 的关系不是很明显。

#### 参考文献:

- [1] Brandt J R T. Behavior of Soil-Concrete Interfaces[D]. Alberta: University of Alberta, Edmonton, 1985.
- [2] Desai C S, Drumm E C, Zaman M M. Cyclic testing and modeling interfaces[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division: ASCE, 1985, 111(6): 793- 815.
- [3] Clough G W, Duncan J M. Finite element analysis of retaining wall behavior[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division: ASCE, 1971, 97(12): 1 657- 1 673.
- [4] 殷宗泽, 朱泓, 许国华. 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(3): 14- 22.
- [5] 高俊合, 于海学, 赵维炳. 土与混凝土接触面特性的大型单剪试验研究及数值模拟[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4): 42-46.
- [6] 徐进, 刘建锋, 高春玉, 等. 新型粗粒土直剪试验机研制[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2008, 40(4): 12- 16.
- [7] 胡黎明, 濮家骝. 土与结构物接触面物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 431- 435.

( 本文编辑 武亚庆 )