DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.051

粗粒土与混凝土接触面剪切特性试验研究

邓国栋
（中铁建南方建设投资有限公司，广东 深圳 518000）

摘要：采用大型直剪仪进行了不同法向应力下粗粒土与混凝土结构接触面剪切试验，通过在混凝土表面预制规则的半圆形凹槽来模拟不同粗糙度结构面，研究结构面粗糙度对接触面剪切位移曲线以及强度参数的影响。试验结果表明：随着粗糙度的增大，接触面剪切位移曲线的应变硬化特征越来越明显；接触面剪切应力比（即剪切强度与法向应力比值）随法向应力的增大呈指数型衰减，随粗糙度的增大而增大；表明粗糙度的增大能提高接触面的剪切强度，能显著提高接触面的表观黏聚力，但对内摩擦角的影响很小。

关键词：粗粒土；混凝土；接触面；大型直剪试验

土体与地下结构相互作用问题广泛存在于岩土工程领域，如土与桩基础、土与隧道结构、土与地下管道等，由于其数学描述涉及到不连续、非线性和大变形等复杂力学问题，因此一直是岩土领域的热点课题之一。土体与混凝土接触面作为土体与结构相互作用系统的薄弱环节，进行接触面力学特性的研究具有重要意义。

国内外学者针对土体与结构接触面开展了广泛的研究，Uesugi 和 Kishida 针对砂土与结构接触面开展了系统的研究，分析了土体级配、相对密实度、含水率和结构面粗糙度等因素对接触面剪切强度的影响规律；夏红春等针对深部地下结构与土体相互作用问题，开展了高法向应力条件下标准砂与结构接触面的直剪试验；金子豪等提出了修正的灌砂法粗糙度计算方法，并进行了不同粗糙度条件下砂土与混凝土结构接触面剪切试验，分析了粗糙度对接触面的剪切强度与变形规律的影响；Taha 进行了海相黏土与钢板接触面剪切试验，研究了法向应力、超固结比、含盐量以及粗糙度对接触面剪切强度的影响；Feligha 和 Hammouda 等通过不同黏土矿物成分和粗糙度条件下的黏性土与钢板接触面的直剪试验，研究发现粗糙度对接触面剪切强度的影响存在临界值，并进一步探讨了粗糙度与界面剪切破坏模式之间的联系；张明义等通过黏性土与不同粗糙表面混凝土板的室内直剪试验，定量分析了粗糙度对接触面力学参数的影响，并通过在混凝土板表面预装的微型孔隙水压力传感器，分析了剪切过程中界面孔隙水压力的变化规律。

上述关于接触面力学特性的研究成果主要是针对黏性土或是砂土，而粗粒土由于其优良的工程特性，已经被广泛应用于路基工程、土石坝工程等领域。目前针对粗粒土力学特性的研究已较为丰富，但针对粗粒土与混凝土接触面的研究还较少。粗粒土作为一种典型的散粒体材料，其颗粒粒径较之砂土颗粒相对较大，因此粗粒土与混凝土接触面的力学特性与黏性土或砂土与结构接触面存在明显的差异。为了研究结构面粗糙度对粗粒土与结构接触面力学特性的影响，该文采用具有规则凹槽的混凝土接触面来模拟实际粗糙接触面，进行不同法向应力条件下粗粒土与规则结构面的大型直剪试验，探讨粗糙度对接触面剪切变形曲线及强度参数的影响规律。

1 试验设备与材料

1.1 试验设备

试验设备采用大型多功能界面直剪试验仪 TAW－800，该设备主要由主机加载系统、液压伺服控制系统、计算机控制系统组成。设备加载系统可施加的最大法向荷载为 800 kN，最大水平剪切荷载为 400 kN，水平最大剪切位移可达到 300 mm。加载方式可采用应力控制或位移控制。直剪仪剪切盒尺寸为 500 mm（长）×500 mm（宽）×150 mm（高），不仅能进行常规的黏性土或砂土的直剪试验，也能适用于粒径更大的粗粒土直剪试验。剪切过程中所得的试验数据通过计

收稿日期：2019－03－19（修改稿）

作者简介：邓国栋，男，博士，高级工程师.E－mail:csudgd@163.com

算机系统自动记录并保存。

1.2 试验土样

试验所用粗粒土为经人工破碎的灰岩碎石料，对其进行室内筛分试验得到级配曲线如图 1 所示，根据级配曲线得到该粗粒土的平均粒径为 3.3 mm，不均匀系数约为 4.12，曲率系数约为 1.55。通过大型击实试验确定该粗粒土的最大干密度约为 1.92 g/cm^3。

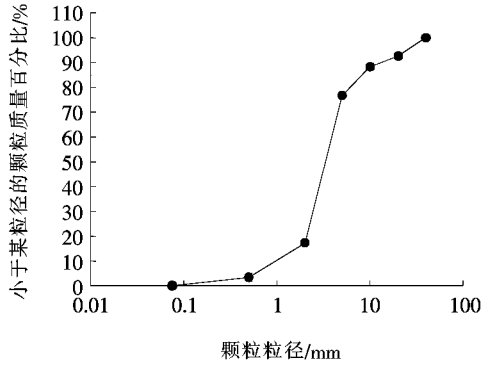


图 1 粗粒料级配曲线

1.3 混凝土表面设计与评价

试验中采用预制的混凝土试块来模拟实际工程中的结构物，试块尺寸为 570 mm(长)×570 mm(宽)×170 mm(高)。结构表面粗糙度是影响土体与结构接触面力学特性的重要因素，考虑到实际工程中粗糙结构表面的形貌特征较为复杂，比如钻孔灌注桩和地下连续墙等通过混凝土现场浇筑而成的结构物，其与周围土体的接触面往往是凹凸不平的粗糙面，且接触界面的粗糙度难以获取。为了便于研究，室内试验中往往通过在混凝土试块预制不同的规则形状凹槽来模拟粗糙的结构面。该文通过在混凝土试块表面预制规则的半圆形凹槽来对其进行粗糙化处理，其中半圆形凹槽的直径 $d=50$ mm。试块表面凹槽数量分别设置为 0、1、3、5 个，用以表征不同的粗糙程度的结构面，对应的试块编号分别为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ。

灌砂法是目前进行混凝土表面粗糙度评定的常用方法，其具体的测量方法是用挡板将混凝土试块四周围起来，并使挡板最高点与试块表面最高点平齐，然后将标准砂灌入围挡内并保证所灌入标准砂的顶面与围挡顶面相平。试块表面的粗糙度采用平均灌砂深度来表征，其具体计算公式如下：

$$R=\frac{V}{S} \tag{1}$$

式中：R 为表面粗糙度；S 为试块表面面积；V 为所灌入的标准砂体积；根据式(1)计算得到的结构表面粗糙度结果见表 1。

表 1 混凝土表面粗糙度评定结果

试块编号	R/mm	试块编号	R/mm
Ⅰ	0	Ⅲ	5.89
Ⅱ	1.96	Ⅳ	9.81

2 试验方案

在进行土与结构接触面剪切试验时，首先将下剪切盒替换为混凝土试块，通过调整垫块使得试块表面与上剪切盒底面平齐，然后将土样分层装入上剪切盒中，以形成粗粒土试样与混凝土试块表面的有效接触。试样制备过程中需要对剪切盒内粗粒料分层进行整平、压实，并控制各层压实度为 90%，层间表面需进行刮毛以避免出现明显的分层。每组试样在法向应力分别为 100、200、400、800 kPa 下进行试验，剪切过程中剪切速率恒定为 1 mm/min，当剪切位移达到 40 mm 时终止试验。

3 试验结果与分析

3.1 接触面剪切试验结果

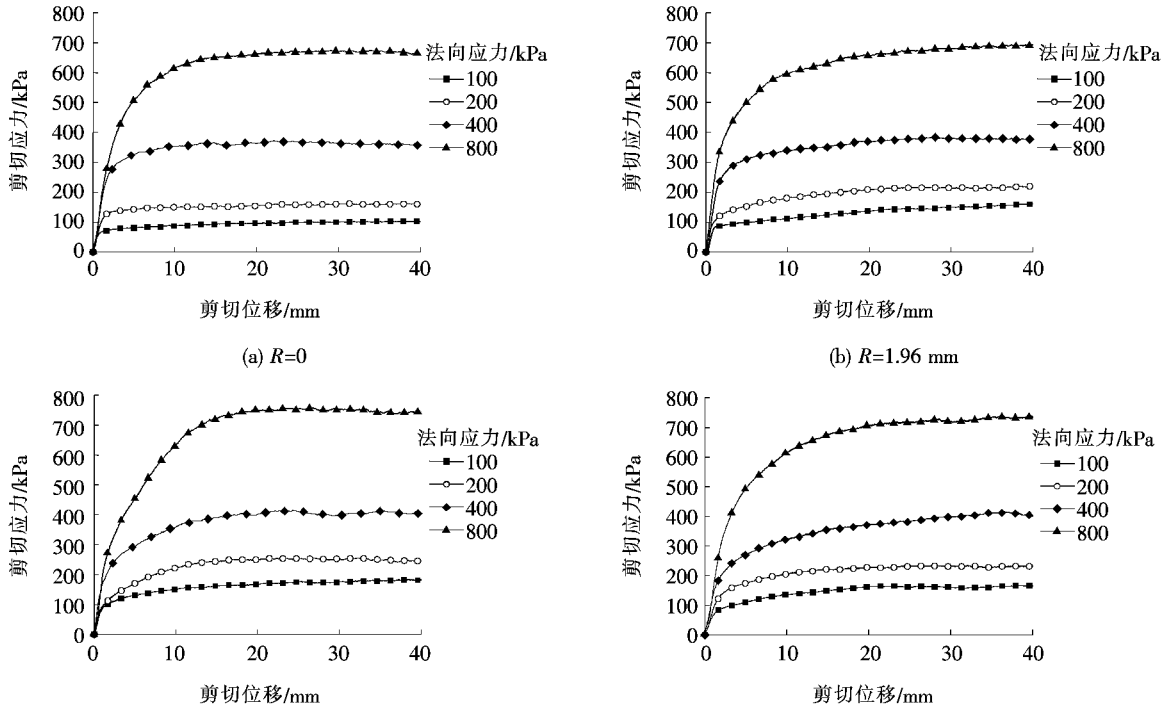
不同试验条件下粗粒料与混凝土接触面剪切应力与位移关系曲线如图 2 所示。

从图 2 可以看出：对于粗粒料与混凝土接触面，剪切初期剪切应力均随剪切位移的增大近似呈线性增长；随着剪切位移的继续增大，接触面剪切应力的增大速率逐渐减小。法向应力越大，接触面初始剪切刚度越大，所达到的最终剪切应力值也越大。粗糙度对接触面的剪切曲线形态有着一定的影响；在接触面相对光滑时($R=0$ mm)，接触面的剪切应力在达到最大值后几乎保持不变，此时接触面并未表现出明显的剪切硬化现象；而随着粗糙度的增大，接触面的剪切应力在达到转折点后仍继续增加，但其增大速率逐渐减小，接触面的剪切硬化现象较为显著。

3.2 接触面剪切应力比

图 3 为接触面剪切应力比随法向应力的变化曲线，其中剪切应力比定义为接触面剪切强度 τ_f 与法向应力 σ 的比值。

从图 3 可以看出：相同粗糙度时，接触面剪切应力比随法向应力的增大呈现非线性衰减趋势，以粗糙度 $R=0$ mm为例，法向应力分别为100、200、400、800



(a) R=0　(b) R=1.96 mm

(c) R=5.89 mm　(d) R=9.81 mm

图 2　不同法向应力下接触面剪切应力与剪切位移曲线

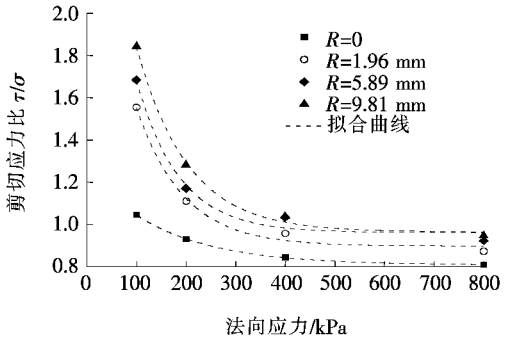


图 3　接触面剪切应力比与法向应力关系曲线

kPa 时，接触面剪切应力比分别为 1.05、0.93、0.84、0.81；剪切应力比随法向应力的增大减小了 27.8%。金子豪等和 Irsyam 在进行砂土与结构界面剪切试验时也得到了相同的结论。这可能是因为高法向应力下粗粒料颗粒更容易发生破碎，需要消耗外力做功，且颗粒破碎耗散的能量随法向应力的增大而增大；但同时高法向应力下的颗粒破碎又会促进颗粒的重排列，导致剪切面摩擦阻力的提高，二者综合作用下导致了随法向应力增大，接触面剪切强度提高的同时剪切应力比降低。

根据接触面剪切应力比与法向应力的关系曲线形式，采用指数形衰减函数对二者的关系进行拟合：

$$\tau_f/\sigma = a\exp(-b\sigma) + c \tag{2}$$

式中：τ_f 为接触面剪切强度；σ 为法向应力；a、b 和 c 为拟合参数。

拟合结果见图 3，相关参数见表 2。从表 2 可以得出拟合相关系数均大于 0.962，表明拟合结果良好。

表 2　剪切应力比与法向应力关系拟合结果

粗糙度	拟合参数			相关系数
R/mm	a	b	c	R^2
0	0.452	−0.006	0.809	0.999
1.96	1.901	−0.011	0.897	0.979
5.89	2.304	−0.012	0.962	0.962
9.81	2.346	−0.01	0.965	0.993

图 4 为接触面剪切应力比随粗糙度的变化曲线。

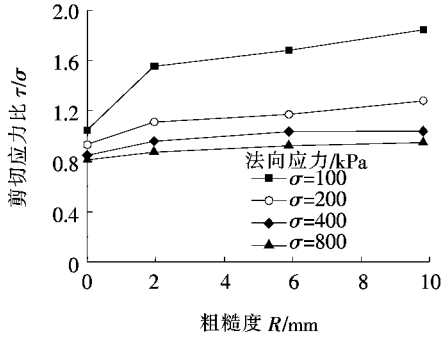


图 4　接触面剪切应力比与粗糙度关系曲线

从图 4 可以看出：① 相同法向应力时，接触面剪切应力比随粗糙度的增大而增大。以法向应力为 100 kPa 为例，粗糙度分别为 0、1.96、5.89、9.81 mm 时，接触面剪切应力比分别为1.05、1.55、1.68、1.84，表明随粗糙度的增大，接触面剪切强度得到明显的提高。剪切应力比与粗糙度的关系曲线存在转折点，该转折点对应的粗糙度值为1.96 mm，当粗糙度小于1.96 mm 时，剪切应力比随粗糙度的增大显著增大；当粗糙度大于1.96 mm 时，随粗糙度的增大，剪切应力比的增大速率明显减小；② 随粗糙度的增大，接触面剪切应力比的增大幅度从 100 kPa 时的76.3%减小到 800 kPa 时的12.1%。这也表明在低法向应力下，粗糙度对接触面剪切应力比的影响更为显著，这与夏红春通过砂土与结构接触面剪切试验所得到的结论相同。

3.3 粗糙度对接触面强度参数的影响

根据剪切试验结果得到不同粗糙度与法向应力条件下接触面的剪切强度，图 5 为接触面剪切强度随法向应力的变化规律。

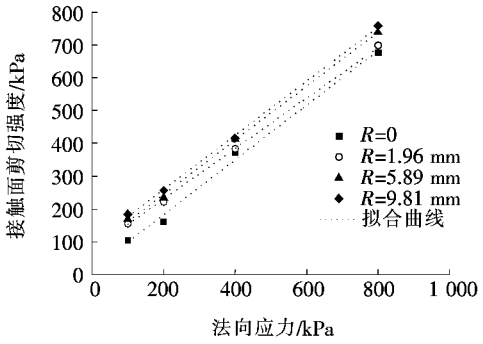


图 5 接触面剪切破坏包络线

从图 5 可以看出：相同粗糙度条件下接触面剪切强度随法向应力的增大近似呈线性增大。通过线性拟合得到不同粗糙度条件下接触面的剪切破坏包络线如图 5 所示；二者拟合的相关系数均在 0.992 以上，表明接触面的剪切破坏符合摩尔－库仑强度准则，即：

$$\tau_f = \sigma \tan\varphi + c \tag{3}$$

式中：τ_f 为接触面剪切强度；σ 为法向应力；φ 为内摩擦角；c 为表观黏聚力。

接触面的表观黏聚力与黏性土的黏聚力不同，黏性土的黏聚力主要表现为颗粒间胶结物的胶结力、黏粒间的电荷吸力和分子吸力等，而接触面的表观黏聚力则主要表现为粗颗粒间以及粗颗粒与粗糙结构面间的咬合力或嵌固力，这与郭庆国所提出的粗粒土的表观黏聚力类似。

根据接触面的剪切破坏包络线，可得到不同粗糙度条件接触面的强度参数，图 6 为接触面强度参数随粗糙度的变化曲线。

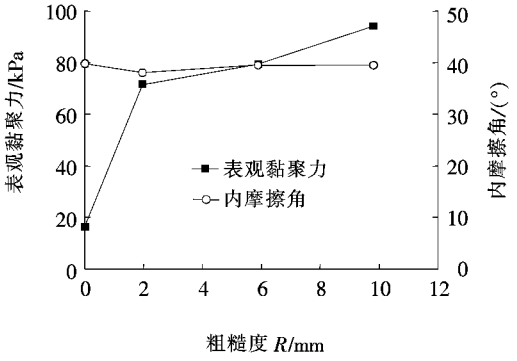


图 6 接触面强度参数随粗糙度变化曲线

从图 6 可以看出：粗糙度的增大能够显著地提高接触面表观黏聚力，但对接触面内摩擦角影响很小。这是因为对于粗粒料与混凝土接触面而言，其表观黏聚力表现为土颗粒与粗糙结构表面的咬合力或嵌固力。当混凝土表面相对光滑（R＝0 mm）时，接触面剪切应力主要由土颗粒与结构面之间的摩擦作用来提供，而土颗粒与结构表面的咬合作用并不明显，此时接触面的表观黏聚力也较小（16.38 kPa）。随着粗糙度的增大，受规则结构表面凹槽的约束，剪切过程中不仅存在土颗粒与结构面光滑部分的摩擦作用，同时也存在土体颗粒自身的咬合、嵌固作用，导致了接触面表观黏聚力的显著增大。

4 结论

（1）粗糙度对粗粒土与混凝土接触面剪切应力－位移曲线有着显著的影响，随粗糙度的增大，接触面剪切应力－位移曲线从折线形向双曲线形发展。

（2）接触面剪切应力比随法向应力的增大呈指数型衰减，随粗糙度的增大而增大。粗糙度对接触面剪切应力比的影响存在临界值。

（3）不同粗糙度条件下接触面剪切强度与法向应力之间表现出良好的线性关系，采用摩尔－库仑强度公式进行拟合发现：粗糙度的增大能显著提高接触面表观黏聚力，但对内摩擦角的影响很小。

参考文献：

[1] 曾志强，郭志宇.地震作用下土－结构相互作用的接触效应研究[J].公路工程，2010(2).

[2] 张丙印，温彦锋，朱本珍，等.土工构筑物和边坡工程发展综述、作用机理与数值模拟方法[J].土木工程学报，2016(8).

DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.052

胶粉对SBS改性沥青流变特性及微观结构的影响

包建业
（内蒙古建筑职业技术学院，内蒙古 呼和浩特 010070）

摘要：基于CR/SBS复合改性沥青的基本性能指标确定废旧胶粉的适宜掺量，采用DSR、BBR试验、扫描电镜试验和红外光谱试验分别对SBS改性沥青和CR/SBS复合改性沥青的流变特性以及微观结构进行对比研究。试验结果表明：掺加18%废旧胶粉的CR/SBS复合改性沥青的高温流变特性、低温流变特性优于SBS改性沥青和CR沥青，抗疲劳特性与SBS改性沥青基本相当。胶粉与SBS改性剂产生了部分化学反应，废旧胶粉在体系中起到了填充作用；同时整个体系形成了改性剂相和沥青相双连续相，形成了致密的空间网络结构，从而使得CR/SBS复合改性沥青的性能优良。

关键词：胶粉；复合改性；流变性能；微观结构

在中国的道路建设中，废旧胶粉改性沥青和SBS改性沥青因其性能优良，是目前使用最普遍的改性沥青。近年来，国内外路面研究工作者们倾向于将SBS改性剂、废旧胶粉和沥青进行适当的混合，以期得到性能更佳的复合改性沥青。

韦大川和王云鹏等通过分析发现CR/SBS复合改性沥青的降噪效果良好，在系统研究与分析的基础上，建立了CR/SBS复合改性沥青中聚合物掺量与吸声系数之间的线性关系；赵桂娥采用4%SBS＋4%CR掺量形成CR/SBS复合改性沥青于室内进行路用性能试验，分析认为该掺量下CR/SBS复合改性沥青的路用性能良好；杨光和申爱琴针对季冻区沥青路面特殊病害问题，通过扫描电镜、红外光谱等试验系统地分析了CR与SBS共混的机理，并以魏茅茨（Wegmouth）粒子干涉理论为核心，研究出一整套适用于CR/SBS复合改性沥青混合料级配改进设计的方法。并重新定义CR/SBS复合改性沥青混合料路用性能指标体系。

[3] Uesugi M, Kishida H. Influential Factors of Friction between Steel and Dry Sands[J]. Soils and Foundations, 1986,26(2):33－46.

[4] Uesugi M, Kishida H, Tsubakihara Y. Behavior of Sand Particles in Sand－Steel Friction[J]. Soils and Foundations,1988,28(1):107－118.

[5] 夏红春，周国庆.土－结构接触面剪切力学特性及其影响因素试验[J].中国矿业大学学报，2010(6).

[6] 金子豪，杨奇，陈琛，等.粗糙度对混凝土－砂土接触面力学特性的影响试验研究[J].岩石力学与工程学报，2018(3).

[7] Taha A, Fall M. Shear Behavior of Sensitive Marine Clay－Steel Interfaces[J]. Acta Geotechnica, 2014, 9(6): 969－980.

[8] Feligha M, Hammoud F, Belachia M, et al. Experimental Investigation of Frictional Behavior between Cohesive Soils and Solid Materials Using Direct Shear Apparatus [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2016, 34(2):567－578.

[9] F. Hammouda, A. Boumekik. Experimental Study of the Behaviour of Interfacial Shearing between Cohesive Soils and Solid Materials at Large Displacement[J]. Asian Journal of Civil Engineering, 2006, 7(1): 63－80.

[10] 张明义，白晓宇，高强，等.黏性土中桩－土界面受力机制室内试验研究[J].岩土力学，2017(8).

[11] 殷雨时，范颖芳，徐义洪.粗糙度对CFRP－混凝土界面剪切粘结性能的影响[J].建筑材料学报，2018(2).

[12] M Irsyam, L Hasan, R D Hryciw. Experimental Study of the Pullout Resistance of Ribbed Anchors in Sands[C]. Proceeding of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009.

[13] 郭庆国.粗粒土的工程特性及应用[M].郑州：黄河水利出版社，1999.

收稿日期：2018－11－08
基金项目：山西省基础研究计划项目（编号：2015021074）；山西省交通建设科技项目（编号：15－2－07）
作者简介：包建业，男，大学本科，讲师.E－mail:799190860@qq.com