

砂砾石与混凝土接触面力学性能的试验研究

刘容地¹, 郑建国², 李致远³

- (1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055;
2. 机械工业勘察设计研究院, 陕西 西安 710043;
3. 中国铝业股份公司郑州研究院, 河南 郑州 450041)

摘要:利用自制的大型单剪仪进行接触面在不同法向应力下的对比试验, 试验中采用了两种不同级配的砂石料, 模拟了两种不同粗糙度的结构面, 并考虑了最大粒径和试样高度对试验结果的影响. 分析总结了粗粒土与结构接触面受力变形的基本规律及影响因素, 并给出本构方程中各参数的解决方法. 试验结果表明: 结构面粗糙度、颗粒级配和法向应力对接触面特征影响较大; 接触面单元厚度约为 4~5 倍平均粒径; 屈服前土体的剪切变形用非线性弹性模型描述, 屈服后接触面单元内所产生的滑移变形用完全塑性理论描述.

关键词:粗粒土; 单剪试验; 相互作用; 接触面; 力学特性

中图分类号: TU 43, TU 411.7

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2013)06-0834-08

土与结构的接触面在静动荷载作用下可能会出现大变形、局部不连续等不同于土体、又不同于结构材料的力学响应, 是土与结构物相互作用研究的重要课题之一. 随着大型工业与民用建筑的兴起, 砂砾石被广泛的应用于水利、交通、港口等岩土工程建设中, 如用于建筑物的高土石坝、高速铁路路基、桥梁墩台、人工筑岛及处理软弱地基的砂石垫层等. 砂石这种粗粒料最明显的特性就是颗粒粒径大, 在测定其工程特性时需要用大型仪器进行试验, 还有剪胀性及颗粒破碎性, 这些区别于其它土体的特殊性质使得砂石垫层与上部结构接触面的研究显得十分必要.

国外学者 Potyondy 在 1961 年进行了多种土料与结构物材料接触面的直剪试验, 总结出土质、含水量、粗糙度、正应力是影响接触面摩擦强度的四大因素, 并提出了结构安全设计方法^[1]. Clough 和 Duncan 根据土与混凝土接触面的直剪试验确定了接触面剪应力-应变呈双曲线关系, 现在仍在为人们所沿用^[2]. Desai 等^[3-5]也相继进行了不同粗粒料的接触面大型剪切试验. 张嘎等^[6-8]人对均匀砾和复合砾进行接触面对比试验. 胡黎明等^[9-10]探讨了试样缩尺和粒径缩尺对粗粒料与混凝土板接触面力学特性的影响及其机理. 贾宇峰等^[1-16]对接触面进行了本构模型及数值分析研究. 笔者自制了大型单剪试验设备对砂石垫层与混凝土接触面在静力荷载作用下的强度与变形特性进行了试验研究, 分析了颗粒级配、接触面粗糙度、法向应力、尺寸效应和缩尺效应对接触面特性的影响, 并对接触面静力特性的基本规律, 本构关系进行探讨.

1 试验设备及方法

1.1 试验设备

叠环式单剪仪是接触面力学特性研究最常用的试验仪器. 本文借助于前人对一般土体与结构接触面的研究方法, 研制了大尺寸(300 mm×300 mm)的单剪仪. 图 1 是其示意图. 长江科学院通过大量试验统计出当最大粒径为 30~50 mm 时, 若试样尺寸 $D = (4 \sim 6)d_{\max}$ 可基本消除试样的尺寸效应, 因此边长 30 cm 较为合理. 剪切盒由五层正方形叠环组成, 用宽 20 mm 厚 2 mm 的扁钢焊接而成, 每个叠环厚度为 20 mm, 边长为 300 mm, 总高度 100 mm. 理论上叠环的厚度越小对剪切面的限制越小, 但叠环厚度过小刚度也小, 会使试验难度增加. 由于砂石的松散性需要直接在叠环内重塑土样, 为了避免砂石

在叠环中分层击实会导致叠环产生变形,因此在叠环外侧再焊上一道扁钢,形成 T 字形截面,以加大弯矩,减小变形.为了方便测量剪切过程中的位移,分别在叠环的左侧、右侧焊接一段伸出部分的扁钢,以将百分表装在这个位置测量位移.图 2 为叠环及试样的照片.通过沙袋堆载由配有压力表的千斤顶施加反力获得竖向荷载,荷载大小利用压力表控制,由千斤顶向混凝土柱子施加反力得到水平向荷载,水平荷载大小利用传感器来测量;并用六个百分表组成的水平位移测量系统,主要测量每个叠环及混凝土块的水平位移.图 3 为水平向量测系统的照片.

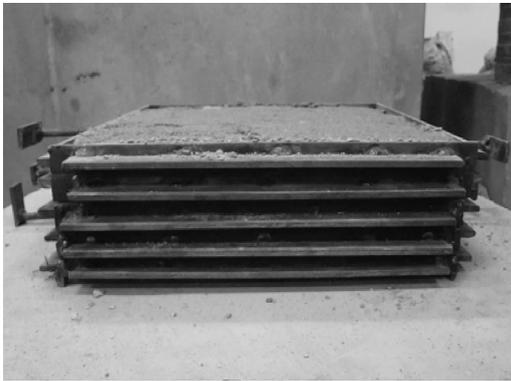


图 2 在叠环中击实的试样

Fig. 2 Test sample compacted in the fold rings

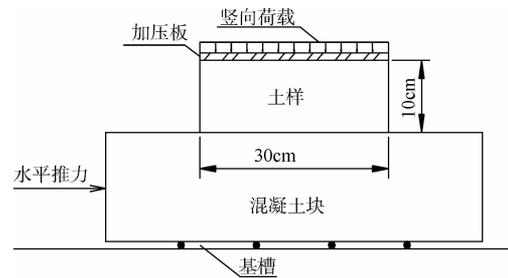


图 1 单剪试验示意图

Fig. 1 Sketch of single shear test



图 3 水平向量测系统

Fig. 3 Horizontal measurement system

1.2 试样的制备

由于砂石粘聚力较小,颗粒粒径也较大,试验所需土样尺寸也相应很大,很难通过常规的试验方法取得原状土样,试样很容易散掉.因此本文试验采用重塑的办法,砂石取自砂石厂,最大粒径不超过 50 mm.击实后再向剪切盒内装样比较困难,所以采取直接在叠环中分层击实的办法.试验之前先将全部土样置于室外风干,用木捶将土块及附着在粗颗粒上的细粒土敲散.将全部土样依次过筛,按 > 50 、 $50 \sim 20$ 、 $20 \sim 10$ 、 $10 \sim 5$ 、 $5 \sim 2$ 、 $2 \sim 1$ 、 $1 \sim 0.5$ 、 < 0.5 mm,将每个粒径范围的土分开放置,以方便取用;制样时根据试样的体积和设计干密度,提前计算所需的砂石料的质量,然后根据不同的设计级配称取不同粒径范围的砂石料.将土样平铺在不吸水的垫板上按照 3% 的含水率均匀喷水,边喷水边拌和,使土颗粒均匀地混合在一起;为了使试样均匀,并综合考虑到试样的高度,把每个土样的配料均匀分成三份,直接在叠环中分层装填击实.装填时应防止大颗粒的集中并控制每层的高度大致相同.击实时,应使击锤自由铅直下落,并且锤击点应均匀分布于土面上.

1.3 试验方案

接触面试验包括不同法向应力 (50, 100, 200 kPa) 下与光面混凝土以及粗面混凝土的剪切试验,加载按剪切位移控制,剪切速率为 0.3 mm/min,具体试验方案如表 1 所示.一般以粒径 5 mm 为分界,将大于 5 mm 的颗粒称为粗粒,小于 5 mm 的颗粒称为细粒.级配 A 是粗粒:细粒 = 70% : 30%,级配 B 是粗粒:细粒 = 50% : 50%,通过两种不同级配的砂石料进行平行试验以分析其对接面力学性能的影响.试验中制作了两种粗糙度有明显区别的混凝土试块以研究结构面的粗糙度对接面力学特性的具体影响:一类是将混凝土块表面经抹平后自然形成,另一类是将混凝土块表面人为拉毛.方案 4 和 5 采用混合法对级配 B 进行粒径缩尺,对于 $d < 5$ mm 的颗粒组成仍使用原级配,对于 $d > 5$ mm 的颗粒组成用相似级配法进行缩尺,进行了不同试样高度的剪切试验.级配 A 与级配 B 的颗粒级配如图 4 所示.

2 试验结果及分析

2.1 接触面力学特性

为了分析颗粒级配对接触面剪切强度的影响,分别对级配 A(粗粒:细粒=70%:30%),级配 B(粗粒:细粒=50%:50%)与粗面混凝土进行了不同竖向应力下的对比试验,其剪切应力-位移关系见图 5.从图中可以看出:剪切应力-相对位移曲线呈双曲线型,两种级配的曲线初始段斜率相差不是很大;在相同的法向应力作用下,级配 A 的砂石所承受的抗剪强度小于级配 B 的抗剪强度,且对应相同的切向应力时,级配 A 的变形大于级配 B 的变形,法向应力越大差异越明显.

以上结果说明级配 A 的结构性比级配 B 的好.在由粗粒和细粒组成的混合料中,既包括细粒土的颗粒粘聚力,又有粗颗粒间的相互咬合作用即摩擦强度.级配 A 是按照粗粒 70%细粒 30%混合的,这样土样中粗粒部分能充分接触咬合,从而产生较大的强度.而级配 B 的粗粒含量较少,颗粒间不能充分接触咬合,使得其结构性大大降低.对于粗粒土,粗粒含量是决定抗剪强度的主要因素,即颗粒级配是决定抗剪强度的主要因素.

通过对两种粗糙度有明显区别的混凝土试块与级配 B 砂石料进行了不同竖向应力下的对比试验得到了其剪切应力-位移关系见图 6.根据结果可以看出接触面剪切变形明显受到混凝土板的粗糙度影响,峰值剪应力及破坏时的剪切位移均随着表面粗糙度的增大而增大,但曲线的初始段较一致.

为了分析缩尺效应对接触面剪切强度的影响,方案 4 采用混合法对级配 B 进行粒径缩尺,对于 $d < 5$ mm 的颗粒组成仍使用原级配,对于 $d > 5$ mm 的颗粒组成用相似级配法进行缩尺,进行了不同竖向应力下的对比试验,其剪切应力-位移关系见图 7.可以看出小粒径土料的剪切应力-位移曲线在初始段的斜率与大粒径土料的比较接近,但是随着位移的逐渐发展,小粒径土料首先达到剪切破坏.总的来说,接触面试验中土颗粒之间或土与结构物之间的位移形式有三种错动、滑动和滚动.在试验的初始阶段,接触面与混凝土板之间主要以滑动为主,当粒径缩尺后,颗粒与混凝土板之间的接触面积增大,比较难以发生滑动,产生相同位移所需要的剪应力也就更大.随着剪切位移的发展,最大粒径 20 mm 的砂石混合物很快达到其剪切强度,而最大粒径 50 mm 的砂石混合物需要发生较大的切向位移才能达到剪切强度.

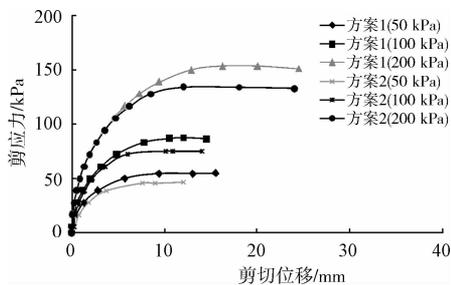


图 5 级配 A、级配 B 试样与粗面混凝土接触面剪切应力-位移关系曲线

Fig. 5 Shear stress-displacement curve of the contact area between the rough concrete and the test sample of grade A and B

表 1 砂石垫层料剪切试验方案

Tab. 1 Shear test program of the sand-gravel cushion

方案编号	试样条件
1	级配 A 与粗面混凝土 $d_{max} = 50$ mm,高 $H = 100$ mm
2	级配 B 与粗面混凝土 $d_{max} = 50$ mm,高 $H = 100$ mm
3	级配 B 与光面混凝土 $d_{max} = 50$ mm,高 $H = 100$ mm
4	级配 B 与光面混凝土,试样 $d_{max} = 20$ mm,高 $H = 100$ mm
5	级配 B 与光面混凝土,试样 $d_{max} = 20$ mm,高 $H = 40$ mm

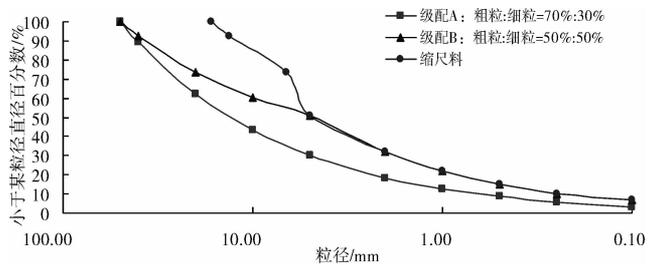


图 4 级配 A 与级配 B 的颗粒级配累积曲线

Fig. 4 The particle size distribution grading curve of grade A and B

图 6 级配 B 试样与光面、粗面混凝土接触面剪切应力-位移关系曲线

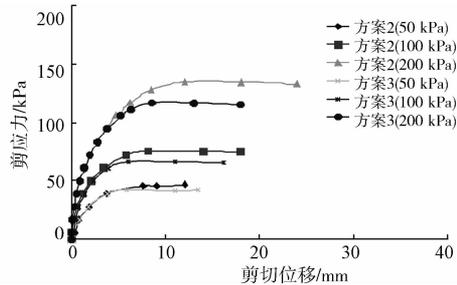


图 6 级配 B 试样与光面、粗面混凝土接触面剪切应力-位移关系曲线

Fig. 6 Shear stress-displacement curve of the contact area between the test sample of grade B and the rough, smooth concrete

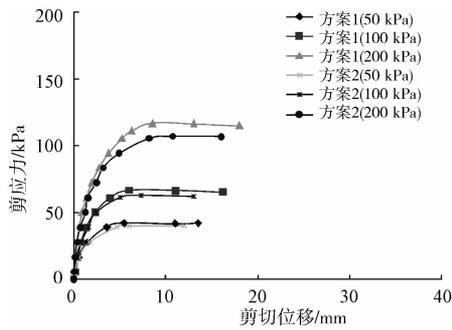


图 7 级配 B 最大粒径 5 cm,最大粒径 2 cm 试样与光面混凝土接触面剪切应力-位移关系曲线

Fig. 7 Shear stress-displacement curve of the contact area between the smooth concrete and the grade B test sample with maximum grain size of 5 cm and 2 cm

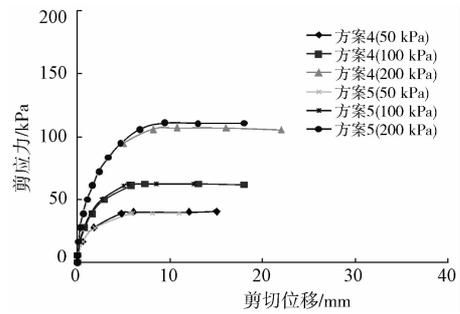


图 8 级配 B 试样高度为 100 mm 和 40 mm 时与光面混凝土接触面剪切应力-相对位移关系曲线

Fig. 8 Shear stress-displacement curve of the contact area between the smooth concrete and the grade B test sample with the height of 100 mm and 40 mm

方案 4~5 的剪切应力-位移关系曲线见图 8,由图可知高度为 40 mm 试样的破坏剪应力在各级法向应力作用下都略高于高度为 100 mm 的试样,但相差幅度并不大.表明试样的最小高度对于接触面单剪试验的结果有一定的影响.根据规程要求,只要土料的最大粒径 d_{max} 不大于土样与结构物接触面的最小尺寸(对于单剪试验来讲是试样的高度 H)的五分之一时,才能忽略内部石块对试样结果的影响^[17].也就是接触面强度主要受边界约束的影响,边界约束条件随着 H/d_{max} 的变大而减弱,当它超过一定值时,试样的尺寸就可以忽略了.采用合适尺寸的试样进行接触面试验可以简化试验,提高效率.

图 9 给出了五种方案接触面的抗剪强度与法向应力的关系及线性拟合结果.在本文试验所用的法向应力范围内,接触面的抗剪强度与法向应力关系呈现良好的线性关系.因此,可以用 Coulomb 公式 $\tau = c + \sigma \tan \varphi$ 来描述本文试验所得的接触面抗剪强度凝聚力 c 及摩擦角 φ .

方案 1~2 进行比较,级配 A 砂石混合物与粗面混凝土接触面的凝聚力和摩擦角都比级配 B 的大,可见:(1)一般认为粗粒土颗粒之间无粘结力,但是由于颗粒之间大小悬殊,充填时颗粒间相互嵌挂咬合,在剪切过程中外力既要克服摩擦力做功,又要克服颗粒间的相互咬合作用做功,所以粗粒土在剪切过程中存在咬合力 C ;(2)当试样中细粒含量较多时,其强度参数主要取决于细粒土的强度,粗粒含量较大时,粗粒部分能充分接触,咬合, C 、 φ 值都随着粗粒含量的增大而增大.

方案 2~3 进行比较,各项强度指标随着混凝土接触面粗糙程度的减小而减弱.当接触面较为粗糙时,结构面与砂砾石颗粒之间形成一定的咬合力,滑动破坏不再沿着一个面而是许多面,从而在靠近接触面一定厚度的土体内形成一个剪切破坏带.土样破坏之前,结构面的位移会带动结构面附近一定厚度内的土体运动产生位移,破坏面在土体内产生,此时单剪试验所测得的 C 、 φ 值就是接触面界面的 C 、 φ 值.

方案 3~5 进行比较,都是级配 B 与光面混凝土接触面进行试验,对于试样高度相同,最大粒径不同的情况,最大粒径为 50 mm 的内摩擦角比最大粒径为 20 mm 的内摩擦角大;对于试样最大粒径相同,试样高度不同的情况,高度为 100 mm 的试样比高度 40 mm 的内摩擦角小.方案 4 比方案 3 摩擦角小的原因可能是缩尺后粗细颗粒之间填充不紧密,造成强度降低,缩尺比例越大,强度相差越大.可见:(1)粒径缩尺后接触面

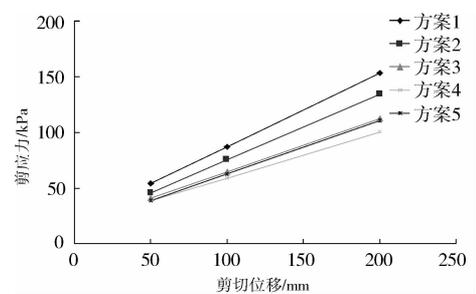


图 9 各方案接触面抗剪强度与正应力关系曲线

Fig. 9 The shear strength and normal stress curve of the interface in each testing schemes

表 2 五种接触面的凝聚力 C 及摩擦角 φ
Tab. 2 The cohesion and friction angle of the five contact surfaces

接触面类型	C / kPa	φ / (°)
方案 1	21.34	33.42
方案 2	16.36	30.58
方案 3	17.21	26.45
方案 4	18.03	22.77
方案 5	15.12	25.59

强度比原级配试料与混凝土板的强度低;(2)试样的最小高度对强度有一定的影响.

2.2 变形特性

结构面附近一定范围内的一部分砂砾石颗粒与结构面共同构成了有厚度的接触面.通常将接触面厚度与土的粒径建立一定关系来定量描述接触面的力学特性.在试验过程中,对每一种接触面都测量了接触面处土的切向相对位移(即第一个叠环的相对位移),不同高度处叠环的切向相对位移(即土体位移),还测量了混凝土的位移.

试验结果表明,在试验材料与结构接触面附近的剪切变形并不是呈连续变化,或均匀分布的.从所绘制的土颗粒剪切位移沿接触区试样高度的分布图可以看出,在某一高度处土层的剪切位移有较为明显的突变,以此为分界点,下部曲线的剪切位移比上部大许多,可以将其视为剪切带(即接触面部分).图 10 分别给出了五种方案在不同竖向荷载作用下的接触区土颗粒剪切位移沿试样高度分布曲线.其中,纵坐标“0”为绝对零点,“1-5”自上而下为叠环序数,“6”为混凝土底座.

五种接触面试验得到的峰值剪应力所对应的各层土样沿试样高度的变化规律类似.最大的相对错动位移均发生在第一层叠环与混凝土之间的接触面处,离混凝土越远土层剪切位移越小.基于剪切位移的变化从下至上基本可以分为 3 层:①零厚度接触面,较大的相对滑动发生在混凝土板与第一层土样之间;②剪切错动带,于零厚度接触面以上的一定厚度内的薄层,垫层材料由于受结构物的影响产生较大剪切应变,③未扰动区,存在于薄层以外的土样内,剪切位移沿高度基本呈线性变化,其变形特性与结构物无关,仅与土体本身的性状有关.

方案 1 接触面在达到峰值剪应力时,对应的第三、四、五层土样的剪切位移较大,第一、二层的土颗粒运动轨迹较为一致,也即混凝土板对该试料的最大影响范围约为 60 mm 左右,是级配 A 材料平均粒径的 4.46 倍.方案 2~4 接触面在达到峰值剪应力时,第四层土样的剪切位移相对第五层土样的剪切位移较小,且突变明显,而第一、二、三层的土样的剪切位移与第四层的很接近,因此将接触面厚度确定在第五层左右,即 20 mm 左右,是级配 B 材料平均粒径的 4.15 倍.因此可以认为接触面剪切引起的土颗粒变位大约局限在距结构面 4~5 倍平均粒径的范围内.

图 10 表明,同一高度处叠环的水平位移随着法向应力的增大而增大.在同等条件下,方案 1 叠环的水平位移最大,方案 3 最小,说明水平向剪切位移的大小与内摩擦角成正比.可见土料颗粒级配对接触区土体变形特性还是有较大影响的,即使结构物表面粗糙度相同,在颗粒级配不同的情况下接触区土体变形形状亦存在差别.同时也验证了图 5~9 的试验结果.在同一法向应力作用下在同一高度,方案 2 叠环的水平位移比方案 3 的大,说明接触面对土颗粒的剪切变形影响较大,接触面粗糙度越大,接触区土颗粒的剪切位移亦越大.对光面混凝土来说,位移以接触面的错动位移为主,对粗面混凝土来说,以剪切带土体应变产生的相对位移为主.比较方案 4 与方案 5 说明试样高度对水平位

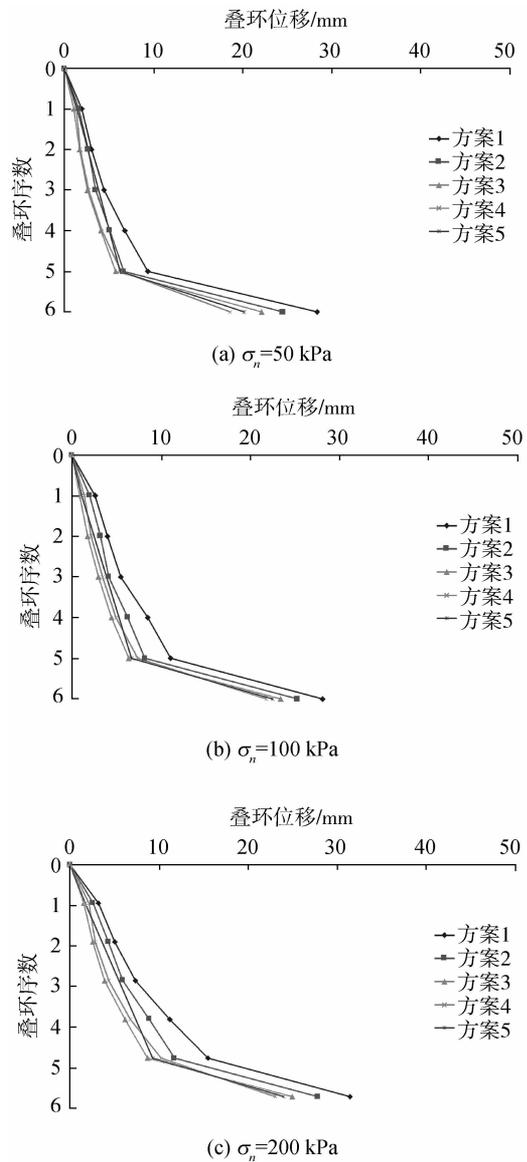


图 10 方案 1~5 剪切位移沿试样高度分布

Fig. 10 Shear displacements along sample height of programs 1~5

移有一定影响.同时,由方案 3 与 4 可以看出大大粒径粗粒料的水平位移比小粒径的略小.

3 本构关系

砂石垫层与混凝土接触面的剪切过程可以分为两个阶段,剪切变形与错动变形.当剪切带厚度不为零且剪应力较小时,接触面会发生一定的相对变形即剪切变形,对这一阶段采用双曲线非线性弹性模型描述;第二阶段属于错动滑移变形,当剪应力超过剪切强度后,剪切变形将无限制发展,对这一阶段采用完全塑性理论描述,其表达式为:

$$\begin{cases} \{\epsilon\} = \{\epsilon^e\} + \{\epsilon^p\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_n^e \\ \epsilon_s^e \\ \epsilon_{ns}^e \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \epsilon_n^p \\ \epsilon_s^p \\ \epsilon_{ns}^p \end{Bmatrix} & \tau \leq \tau_f \\ \{\epsilon\} = \{\epsilon_n \quad \epsilon_s \quad \epsilon_{ns}\} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\{\epsilon^e\}$ 为土样的剪切变形; $\{\epsilon^p\}$ 为土样的错动滑移变形; $\{\epsilon_s\}$ 为切向变形; $\{\epsilon_n\}$ 为法向变形; $\{\epsilon_{ns}\}$ 为法向与切向耦合变形,若不考虑耦合作用,则取为 0.

其本构关系可以表示为以下,式中, ω_{s0} 为土样基本剪切变形, ω_{sf} 为土样破坏后的变形:

$$\begin{cases} \tau = \frac{\omega_s}{a + b\omega_s} & \omega_{s0} \leq \omega_s \leq \omega_{sf} \\ \tau = \tau_f & \omega_s > \omega_{sf} \end{cases} \quad (2)$$

从以上研究可知砂石垫层与混凝土接触面的总变形等于土体的基本剪切变形 (ϵ^e) 与沿接触面错动滑移 (ϵ^p) 变形两者之和,其增量形式可以表示为:

$$\{d\epsilon\} = \{d\epsilon^e\} + \{d\epsilon^p\} \quad (3)$$

其中 $d\epsilon^e$ 、 $d\epsilon^p$ 分别代表弹、塑性应变.

接触面单元应力-应变关系可表示为: $\{d\sigma\} = [D_{ep}]\{d\epsilon\}$ (4)

$[D_{ep}]$ 为弹塑性刚度矩阵.

接触区应力与内弹性应变之间的关系为:

$$\{d\sigma\} = [D_e]\{d\epsilon^e\} \quad (5)$$

$[D_e]$ 为弹性刚度矩阵.

若不考虑切向位移与法向位移的耦合作用,那么接触区的弹性刚度矩阵为:

$$[D_e] = \begin{bmatrix} D_{nn} & D_{ns} \\ D_{sn} & D_{ss} \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据(3)和(5)可以得到: $\{d\sigma\} = [D_e]\{d\epsilon\} - [D_e]\{d\epsilon^p\}$ (7)

采用不抗拉的莫尔库伦屈服准则: $\begin{cases} f = \sigma_n \\ f = |\tau| - \sigma_n \tan\varphi - c \end{cases}$ (8)

采用相适应的流动法则,即令塑性势面与屈服面重合, $g = f$

根据塑性势理论,

$$\{d\epsilon^p\} = d\lambda \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right\} = d\lambda \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \quad (9)$$

当接触面单元发生拉裂破坏时

$$\{d\epsilon^p\} = \begin{Bmatrix} d\epsilon_n^p \\ d\epsilon_s^p \end{Bmatrix} = d\lambda \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

当接触面单元发生剪切破坏时

$$\{d\epsilon^p\} = \begin{Bmatrix} d\epsilon_n^p \\ d\epsilon_s^p \end{Bmatrix} = d\lambda \begin{Bmatrix} -\tan\varphi \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (11)$$

对(8)微分可得 $\{df\} = \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T \{d\sigma\} = 0$ (12)

将(7)两边同乘以 $\left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}^T$, 并结合(10), (12)可得

$$\left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}^T [D_e] \{d\epsilon\} - d\lambda \left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}^T [D_e] \left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\} = 0 \quad (13)$$

$$\text{可以求得 } d\lambda = \frac{\left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}^T [D_e] \{d\epsilon\}}{\left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}^T [D_e] \left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}}$$

将其代入(9), 再代入(7)得

$$\{d\sigma\} = \left[[D_e] - \frac{[D_e] \left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\} \left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}^T [D_e]}{\left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}^T [D_e] \left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}} \right] \{d\epsilon\} = [D_{ep}] \{d\epsilon\} \quad (14)$$

其中 $[D_{ep}]$ 为弹塑性模量矩阵。

4 结 语

(1) 单剪试验所得的不同接触面的剪应力与切向位移曲线相似, 呈现良好的双曲线关系, 接触面的剪应力值随着剪切位移的增大也逐渐增大并趋于稳定。

(2) 通过对接触面剪切应力 - 位移关系和抗剪强度的研究得出: C, φ 值都随着粗粒含量的增大而增大, 随着混凝土接触面粗糙程度减小而减弱。粒径缩小后接触面强度比原级配试料与混凝土板的强度低。试样高度对强度指标有一定的影响。接触面单元厚度大约局限在距结构面 4~5 倍平均粒径的范围内。

(3) 本文认为接触面变形由结构面附近的土体在结构面位移约束之下的剪切变形和土与结构交界面上的滑移变形两部分组成, 这两部分变形同时发生、互相影响, 选择殷宗泽改进的薄层单元形式作为本文接触面单元形式。屈服前土体的剪切变形用非线性弹性模型描述, 屈服后接触面单元内所产生的滑移变形用完全塑性理论描述, 对非线性弹性 - 理想塑性本构模型的弹塑性矩阵进行推导。

参考文献 References

- [1] POTYONDY J G. Skin Friction between Various Soils and Construction Materials[J]. Geotechnique, 1961, 11(4): 339-353.
- [2] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analyses of retaining wall behavior[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1971, 97(12): 1657-1673.
- [3] DESAI C S, DRUMM E C, ZAMAN M M. Cyclic testing and modeling of interfaces [J]. J Geotech Engrg, ASCE, 1985, 111(6): 793-815.
- [4] UESUGI M, KISHIDA H. Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel[J]. Soils and Foundation, 1986, 26(4): 139-149.
- [5] FAKHARIAN K, EVGIN E. Cyclic simple-shear behavior of sand-steel interfaces under constant normal stiffness condition[J]. J Geotech & Geoenv Engng, 1997, 123(12): 1096-1105.
- [6] 张 嘎. 粗粒土与结构接触面静动力学特性及弹塑性损伤理论研究[D]. 北京: 清华大学, 2002.
ZHANG Ga. A New Monotonic and Cyclic Elasto-Plasticity Damage Theory for Soil-Structure Interfaces[D]. Beijing: Tsinghua University, 2002.
- [7] 张 嘎, 张建民. 大型土与结构接触面循环加载剪切仪的研制及应用[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 149-153.
ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Development and application of Cyclic Shear Apparatus for Soil-structure Interface [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 149-153.
- [8] 张 嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面单调力学特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 21-25.
ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Experimental study on monotonic behavior of interface between soil and structure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 21-25.
- [9] 胡黎明, 马 杰, 张丙印, 等. 粗粒料与结构物接触面力学特性缩尺效应[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(3): 327-330.
HU Li-ming, MA Jie, ZHANG Bing-yin, et al. Scaling effect on the mechanical behavior of the interface between

- coarse-grained materials and a structure[J]. J Tsinghua Univ. :Sci & Tech, 2007,47(3):327-330.
- [10] 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.
HU Li-ming, PU Jia-liu. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001,23(4): 431-435.
- [11] 贾宇峰,迟世春,林 皋. 考虑颗粒破碎影响的粗粒土本构模型[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3261-3267.
JIA Yu-feng, CHI Shi-chun, LIN Gao. Constitutive model for coarse granular aggregates incorporating particle breakage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11):3261-3267.
- [12] 陆 勇,周国庆. 粗粒土与结构接触面作用机理及本构规律分类[J]. 工业建筑, 2012,42(S1):478-481.
LU Yong, ZHOU Guo-qing. Interaction mechanism and constitutive law's classification of coarse granular soil-structure interface[J]. Industrial Construction,2012,42(S1):478-481.
- [13] 孙海忠,黄茂松. 考虑粗粒土应变软化特性和剪胀性的本构模型[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2009,37(6): 727-732.
SUN Hai-zhong, HUANG Mao-song. A constitutive model for coarse granular material incorporating both strain work-softening and dilatancy[J]. Journal of Tongji University:Natural Science, 2009,37(6):727-732.
- [14] 张 嘎,张建民. 粗粒土与结构接触面的静动本构规律[J]. 岩土工程学报,2005,27(5):516-520.
ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Monotonic and cyclic constitutive law of interface between structure and coarse grained soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2005, 27(5):516-520.
- [15] 贾宇峰,迟世春,林 皋. 考虑颗粒破碎的粗粒土剪胀性统一本构模型[J]. 岩土力学,2010,31(5):1381-1388.
JIA Yu-feng, CHI Shi-chun, LIN Gao. Dilatancy unified constitutive model for coarse granular aggregates incorporating particle breakage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010,31(5):1381-1388.
- [16] 侯文峻. 土与结构接触面三维静动力变形规律与本构模型研究[D]. 北京:清华大学, 2008.
HOU Wen-jun. Behavior and Constitutive Model of Three-dimensional Soil-Structure Interface[D]. Beijing: Tsinghua University,2008.
- [17] 中华人民共和国行业标准编写组. SL237-1999 土工试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社, 1999.
The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. SL237-1999 Specification of soil test [S]. Beijing:China Water Power Press, 1999.

Experimental research on mechanical properties of interface between concrete and gravel

LIU Rong-di¹, ZHENG Jian-guo², LI Zhi-yuan³

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. China JK Institute of Engineering Investigation and Design, Xi'an 710043, China;

3. Zhengzhou Light Metals Research Institute of CHALCO, Zhengzhou 450041, China)

Abstract: The contrast tests on the interface were conducted by self-made large single shear apparatus under different normal stress, where two gravel aggregates with different gradation and two structure surfaces with different roughness were used in the test, the influence of the maximum grain size and the test sample height to the results were also considered. The basic rules and influence factors of the interface's stress deformation between the structure and coarse aggregates were analyzed, and the solution of the parameters of the constitutive equation were given. The results show that the roughness of structural surface, particle size distribution and the normal stress have a great influence on the interface; that the thickness of the interface element is 4 to 5 times the average particle size. The shear deformation of the soil before yielding can be described with nonlinear elastic model, and the slip deformation of the interface element after yielding can be described with complete plastic theory.

Key words: coarse grained; simple shear test; interaction; interface; mechanical properties