

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.03.009

钢-土接触面位移与强度特性直剪试验

朱俊高^{1,2},汪 森^{1,2},黄 维³,刘 忠⁴

- (1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;
2. 江苏省岩土工程技术工程研究中心,江苏 南京 210098;
3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,浙江 杭州 330110;
4. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院,河南 郑州 450003)

摘要: 利用改进的直剪仪对不同密实度(40%、55%、70%、85%)的粗粒土与不锈钢毛坯板之间接触面进行直剪试验,研究粗粒土与钢板接触面之间的接触力学特性以及粗粒土相对密实度对其影响规律。结果表明:粗粒土与钢板之间的接触面在达到剪切破坏前,剪应力与剪切位移之间近似呈线性关系。接触面的抗剪强度及切向劲度系数均随着粗粒土相对密实度的增大而增大,相对密实度由40%增至85%时,接触面的黏聚力平均增大41.8%,内摩擦角平均增大35.4%;切向劲度系数 k_s 平均增加11.2%。接触面法向应力 σ_n 从100 kPa增加到800 kPa的过程中,切向劲度系数 k_s 平均增加40.3%。基于试验结果找到切向劲度系数 k_s 与法向应力 σ_n 和相对密实度 D_r 之间的关系,提出 k_s - σ_n - D_r 经验关系式,建立了具有简单形式的接触面本构模型。

关键词: 钢-土接触面;粗糙度;剪切位移;相对密实度;切向劲度系数

中图分类号: TU411 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2021)03-0265-07

Experimental study on displacement and strength behavior of interface between soil and steel using direct shear test

ZHU Jungao^{1,2}, WANG Miao^{1,2}, HUANG Wei³, LIU Zhong⁴

- (1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Power China Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 330110, China;
4. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The contact surface between the coarse-grained soil and the stainless-steel blank was tested by an improved direct shear apparatus. Four relative compactness, which is 40%, 55%, 70% and 85%, were used for the coarse-grained soil. The contact mechanical properties of the interface between coarse-grained soil and steel plate and the influence of relative density of coarse-grained soil are studied. The results show that before the interface between coarse-grained soil and steel plate reaches shear failure, the relationship between shear stress and shear displacement is approximately linear. The shear strength and shear stiffness coefficient of the contact surface increase with the increase of relative density of coarse-grained soil. When the relative density increases from 40% to 85%, the cohesion of the contact surface increases by 41.8% on average, the internal friction angle increases by 35.4% on average, and the shear stiffness coefficient k_s increases by 11.2% on average. The tangential stiffness coefficient k_s increases by 40.3% on average when the normal stress σ_n of contact surface increases from 100 kPa to 800 kPa. Based on the test results, the relationship between the tangential stiffness coefficient k_s , the normal stress σ_n and the relative density D_r is found, and an empirical formula of k_s - σ_n - D_r is proposed, thus a simple contact-surface constitutive model is established.

Key words: steel and soil contact surface; roughness; shear displacement; relative density; tangential stiffness coefficient

在道路桥梁工程、水利工程、地下工程中常常会遇到钢材料与土体接触的问题,如钢管桩或钢护筒与桩周土接触^[1]、钢板桩等土体支护结构接触等。由于钢与土体的物理力学性质差异很大,当土与钢结构物共

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1508505); 国家自然科学基金委员会-雅砻江流域水电开发有限公司联合基金(U1865104); 国家自然科学基金(51609098)

作者简介: 朱俊高(1964—),男,教授,博士,主要从事土体基本性质与本构关系研究。E-mail: zhujungao@hhu.edu.cn

通信作者: 汪森,硕士研究生。E-mail: wangmiao2548@163.com

引用本文: 朱俊高,汪森,黄维,等. 钢-土接触面位移与强度特性直剪试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):265-271.
ZHU Jungao, WANG Miao, HUANG Wei, et al. Experimental study on displacement and strength behavior of interface between soil and steel using direct shear test [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(3): 265-271.

同作用时,钢-土之间力的传递完全是通过接触面进行的,通常会在钢-土接触面上产生相对位移。这种位移的大小或力的传递决定了整体结构的受力状态。如果对其估计不够准确,可能会造成这些结构的破坏,严重时将造成相关建筑物、结构物等的破坏,产生较大损失。因此,准确把握钢与土体接触面的位移和强度特性,对保证工程安全具有重要意义。

目前,对混凝土-土接触面位移与强度特性的研究很多,而针对钢-土接触面的研究较少,针对钢-粗粒土的研究更少。事实上,钢-砂、粗粒土或堆石料等无黏性土的接触问题在不少工程中涉及,如很多大型桥梁中桩基常常穿过粗砂甚至卵砾石层,有些桥梁桩基周围也常常采用抛石防冲刷等钢板桩格型围堰。在钢-土接触面问题的研究中,大部分是针对接触面力学性质进行的试验研究,如杨大方等^[2]基于改进直剪仪定性研究了法向应力对干燥状态、饱和状态的砂土与光滑、粗糙的钢板接触面强度特性的影响;张晓峰等^[3]基于改进的应变式直剪仪研究了法向应力对上海土体与钢板接触面的位移强度特性的影响;梁越等^[4]通过试验定性研究了土体干密度对钢-土接触面的强度特性的影响;殷勇等^[5]研究了法向应力对滨海土体与钢板接触面的强度特性的影响;吴梦喜等^[6]运用单调和循环剪切试验研究了粗糙度对钙质砂与钢板接触面力学特性的影响。总体上,这些研究只揭示了各种因素对钢-土接触面的位移与强度特性影响规律,而且,黏性土或砂土的居多,至于钢-土接触面模型的深入研究就更少。因此,关于钢-粗粒土接触面位移与强度特性、本构模型等问题仍需进一步深入研究。

本文采用改进的直剪仪对粗粒土与一定粗糙度的不锈钢板^[7]进行接触面试验,依据直剪试验^[8]测得的不同情况下接触面剪应力与剪切位移的试验数据,定量分析粗粒土的相对密实度、法向应力对钢-土接触面抗剪强度及力学特性的影响,建立了一个形式简单的能反映钢-土接触面剪应力-剪位移-强度关系的本构模型。

1 试验方案

将等应变直剪仪进行改装,在上下剪切盒之间放置钢板,并将钢板与下剪切盒固定,土样置于上剪切盒内,如图1所示。直剪试验时,上剪切盒不动,下剪切盒连同钢板移动进而钢板和土样之间发生剪切。原有的垂直加压设备、剪切传动装置、测力计以及位移量测系统不变。试验钢板选用12 cm×12 cm 正方形不锈钢板,为市面上普通的不锈钢毛坯板,利用TR100 便携式粗糙度测量仪测量钢板粗糙度,取4次有效测量值的平均值作为钢板粗糙度值,测得钢板粗糙度为2.21。

本文将对不同相对密实度的粗粒土分别在4种法向应力下与粗糙度为2.21的不锈钢板进行钢-土接触面性质试验。试验采用的粗粒土为双江口堆石坝坝料,其级配曲线如图2所示。

试验法向应力取100 kPa、200 kPa、400 kPa 和 800 kPa,粗粒土的相对密实度为40%、55%、70% 和 85%,共4个梯度值。在制备不同相对密实度粗粒土前,分别通过最大、最小干密度试验测得粗粒土的最大干密度为1.584 g/cm³,最小干密度为1.392 g/cm³,而后利用相对密实度计算公式推求所需的粗粒土干密度,最后用干燥粗粒土在体积一定的剪切盒内制备试验土样。试验时以0.2 mm/min 的速率匀速剪切,每产生0.05 mm的剪切位移时记录下剪应力以及剪切位移,直至测力计的读数出现峰值或接触面发生剪破,并记下对应的破坏数值及剪切位移。若在剪切过程中发现测力计读数始终无峰值出现时,在剪切位移达到5 mm 时停机。

2 试验结果分析

2.1 剪应力与剪切位移关系

依据粗粒土-钢接触面的直剪试验结果,整理得不同相对密实度的剪应力 τ 与剪切位移 ω_s 关系曲线,不同法向应力 σ_n 下粗



图1 等应变直剪仪

Fig.1 Constant strain direct shear apparatus

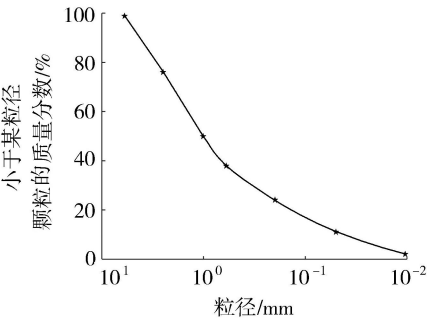


图2 粗粒土的级配曲线

Fig.2 Gradation curve of coarse-grained soil

粒土相对密度 D_r 为 40%、70%、55%、85% 的试验结果如图 3 所示。

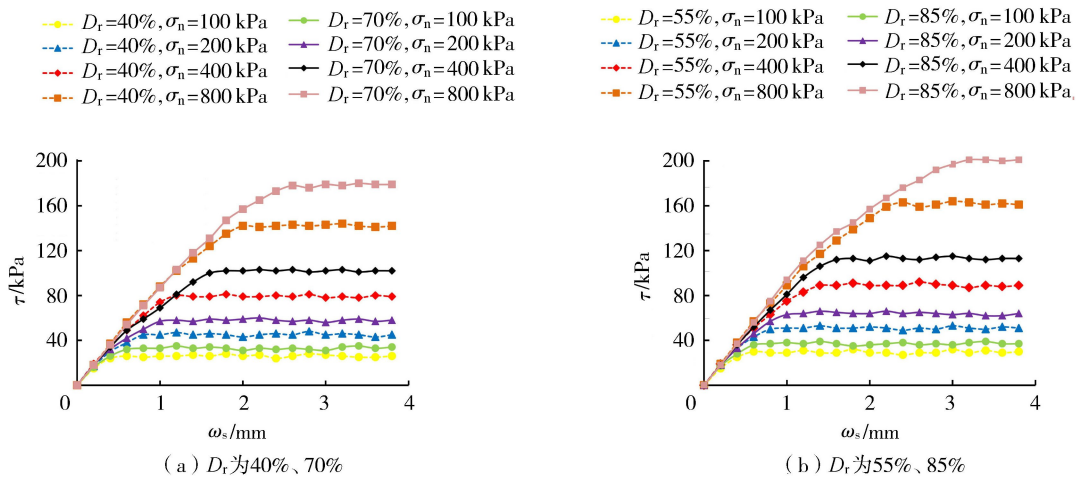


图 3 不同法向应力和相对密度下接触面 τ - ω_s 曲线

Fig. 3 τ - ω_s curve of contact surface under different normal stress σ_n and relative density D_r

由图 3 可以看出,钢-土接触面上剪应力随着剪切位移的增加而增加,但在剪切位移达到一定值后,钢-土接触面上的剪应力迅速趋于平缓,此前的阶段 τ - ω_s 关系近乎直线;之后,随着切向位移的增加,剪应力增加速度明显变缓;最后,虽然剪切位移持续增大,但是剪应力已经达到了极限,此时接触面发生了破坏,剪应力趋于稳定。

目前,对黏土或砂土与混凝土接触面的性质研究较多,大多数的研究表明,土-混凝土之间接触面的剪应力与剪位移之间明显表现为非线性关系。因此,Clough 等^[9]提出了双曲线的接触面模型。但是,图 3 表明,钢-粗粒土接触面与一般土体-混凝土接触面的剪应力与剪位移的关系有一定差异,即在剪切初始段较长一段范围内,剪应力与剪位移近乎线性关系,只是接近破坏前有一小段为非线性。这种特性为建立简单的钢-粗粒土接触面本构模型提供了依据。

2.2 抗剪强度

依据钢-土接触面的剪切试验结果,整理了接触面破坏时剪应力与法向应力之间的关系,如图 4 所示。破坏时剪应力取值为图 3 中各曲线中剪应力最大值。图 4 给出了粗粒土与不锈钢板接触面在不同相对密度下的抗剪强度线。

从图 4 可以看出,在同一相对密度下,粗粒土剪应力与法向应力存在较强的线性相关关系,可以用摩尔-库伦破坏准则描述。相对密度由 40% 增加到 85% 的过程中,黏聚力 c 、内摩擦角 φ 均随之增加。将图 4 中的试验点用直线拟合,可得到钢-粗粒土接触面的黏聚力、内摩擦角,见表 1。

由表 1 可以发现,随相对密实度的增加,接触面黏聚力和内摩擦角均显著增大。在试验相对密实度范围内 (40% ~ 85%),相对密实度每增加 10%,黏聚力增加 2.7 kPa,增加幅度约 10%,内摩擦角增加 1.69°,增加幅度约 8%。接触面强度随相对密实度增加而增加从机理上是容易解释的。

对接触面,其强度是由于土与钢接触而引起,相对密实度越大,土体孔隙比越小,则土颗粒与钢的接触面积越大,必然引起强度的提高。

为进一步分析相对密实度对钢-土接触面的抗剪强度影响,点绘出黏聚力和摩擦角与相对密实度的关系,如图 5 所示。可以看出,不同相对密实度下,黏聚力和内摩擦角与相对密实度之间表现了良好的线性关系。

将图 5 中的数据点分别用直线拟合,则黏聚力、内摩擦角与相对密实度的关系可表示为

$$c = m_1 D_r + n_1 \tag{1}$$

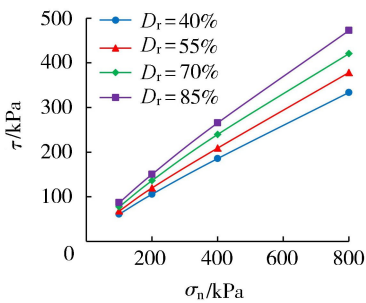


图 4 4 种相对密度下抗剪强度线

Fig.4 Shear strength curves of interface under four D_r

表 1 各相对密实度下黏聚力与内摩擦角的关系

Table 1 Relationship between c , φ and D_r

$D_r / \%$	c / kPa	$\varphi / (^\circ)$
40	26.6	21.1
55	29.1	23.7
70	36.5	25.9
85	38.8	28.7

$$\varphi = m_2 D_r + n_2 \tag{2}$$

式中: m_1 、 m_2 ——拟合直线斜率; n_1 、 n_2 ——拟合直线截距。

由图 5 可知, $m_1=29.4$, $n_1=14.3$; $m_2=16.7$, $n_2=14.4$ 。可以看出,粗粒土与钢板接触面黏聚力和内摩擦角关于相对密度的拟合效果较好,拟合决定系数 R^2 值分别为 0.953、0.998。

2.3 钢-粗粒土接触面本构模型

Goodman 等^[10]提出了一种无厚度的接触面单元,用于模拟岩石中节理、断层的非连续性变形。后推广应用于土与结构的共同作用、人工块体结构的有限元计算中作为接触面单元。已有研究表明^[11],Goodman 单元能够较好地反映接触面切向应力和变形的发展,能够考虑接触面变形的非线性特征,已经广泛应用于模拟钢、混凝土与土之间的接触。但是,Goodman 单元的应用还有一个重要问题需要解决,那就是本构模型。

在 Goodman 单元中,假定接触面上的法向应力、剪应力与法向相对位移、剪切位移之间无交叉影响,则剪应力与剪切位移之间的关系为

$$\tau = k_s \omega_s \tag{3}$$

式中: k_s ——切向劲度系数。

关于式(3)中切向劲度系数 k_s ,其取值决定了接触面本构模型的好坏。对此,很多学者进行过深入研究^[12-16],但多是针对混凝土与土之间的接触面,而且相关研究表明混凝土与土之间接触面的剪应力与剪切位移之间呈非线性关系, k_s 随接触面应力而变化。Clough 等^[9]提出了基于剪应力与剪切位移之间为双曲线的接触面模型。

由图 3 可以看出,随着剪应力从 0 开始逐渐增大,剪应力与剪切位移基本呈线性关系,只是在剪应力增加到接近破坏时,表现出轻微的非线性;当剪应力增大到一定的值(抗剪强度)之后,剪切位移迅速增大,而剪应力几乎不增加。因此,笔者认为,钢与粗粒土接触面剪应力与剪切位移的关系可以简化为如图 6 所示的曲线,其中,OA 段表示剪应力与剪位移之间线性关系,剪应力达到 A 点后接触面发生剪切破坏。所以,式(3)中的切向劲度系数应该等于图 6 中直线段 OA 的斜率。

为此,将图 3 中近似直线部分的试验数据进行线性拟合,可求得不同相对密度、不同法向应力下接触面的切向劲度系数 k_s ,如表 2 所示。

从表 2 可以看出,切向劲度系数随相对密度和法向应力而变化。对同一相对密度,随着法向应力增大,切向劲度系数逐渐增大;同一法向应力下,随相对密度的增大切向劲度系数也呈增加趋势。

在试验的法向应力范围内(100~800 kPa),法向应力从 100 kPa 增加到 800 kPa 的过程中,钢-土接触面的切向劲度系数平均增加了 40.3%。在试验的相对密度范围内(40%~85%),相对密度从 40% 增加到 85% 的过程中,钢-土接触面的切向劲度系数平均

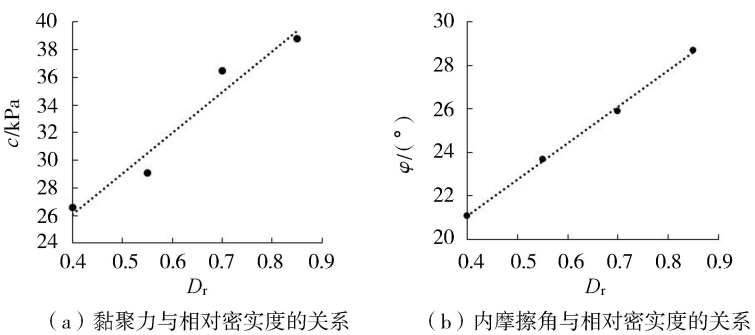


图 5 接触面黏聚力、内摩擦角与相对密度的关系
Fig. 5 Relationship between c , φ and D_r

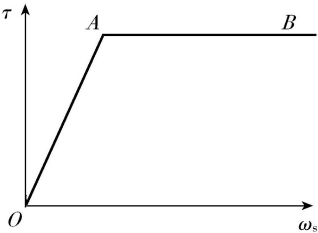


图 6 钢与粗粒土接触面剪应力与剪切位移的简化关系
Fig. 6 Simplified relationship of shear stress τ and shear displacement ω_s for interface between steel and coarse-grained soil

表 2 不同法向应力和相对密度下的切向劲度系数
Table 2 Tangential stiffness coefficient k_s under different σ_n and D_r

$D_r / \%$	$k_s / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$			
	$\sigma_n = 100 \text{ kPa}$	$\sigma_n = 200 \text{ kPa}$	$\sigma_n = 400 \text{ kPa}$	$\sigma_n = 800 \text{ kPa}$
40	141 250	165 833	192 125	212 750
55	147 187	168 875	199 062	219 437
70	153 633	176 387	204 312	223 562
85	165 230	180 166	217 667	227 333

增加 11.2%。为了进一步研究 k_s 随 D_r 、 σ_n 变化规律,引入常量 4℃ 时水的容重 γ_w (9.8 kN/m³),标准大气压 p_a (100 kPa),笔者在双对数坐标系中整理出 k_s/γ_w 与 σ_n/p_a 的关系,如图 7 所示。

从图 7 可以看出,在不同相对密实度下, $\ln(k_s/\gamma_w)$ 与 $\ln(\sigma_n/p_a)$ 之间存在明显的线性相关关系。将图 7 中的数据点用直线拟合,拟合方程为式(4)。拟合决定系数 R^2 值在相对密实度 40%、55%、70% 和 85% 时分别为 0.990、0.989、0.989 和 0.951,均大于 0.95,拟合效果较好。拟合得到的直线斜率和截距分别用 k 和 b 表示,直线拟合结果见表 3。

$$\ln \frac{k_s}{\gamma_w} = k \ln \frac{\sigma_n}{p_a} + b$$

(4)

式中: k ——拟合直线斜率; b ——拟合直线截距。

从表 3 可以看出,随着相对密实度的增大,斜率逐渐减小,而截距 b 逐渐增大。研究发现,相对密实度的三次方 D_r^3 与 k 和 b 存在较强的线性相关关系,如图 8 所示。

将图 8(a) 和图 8(b) 中的数据点分别用直线拟合,则 k 和 b 与 D_r 的关系可表示为

$$k = \alpha_1 D_r^3 + \beta_1$$

(5)

$$b = \alpha_2 D_r^3 + \beta_2$$

(6)

式中: α_1 、 α_2 ——拟合直线斜率; β_1 、 β_2 ——拟合直线截距。

图 8 中, D_r 与 k 、 b 拟合直线的决定系数 R^2 值分别为 0.979 和 0.993,拟合效果较好。根据式(4)、式(5)、式(6),可得 k_s - σ_n - D_r 的经验关系式如下:

$$\ln \frac{k_s}{\gamma_w} = (\alpha_1 D_r^3 + \beta_1) \ln \frac{\sigma_n}{p_a} + \alpha_2 D_r^3 + \beta_2$$

(7)

由图 8 可知, $\alpha_1 = -0.0635$, $\beta_1 = 0.205$; $\alpha_2 = 0.254$, $\beta_2 = 9.577$ 。式(7)和式(1)、式(2)联合摩尔库伦破坏准则,就组成了完整的接触面本构模型。根据式(7),可以确定某一相对密实度、法向应力条件下接触面的切向劲度系数;而根据式(1)和式(2)并结合摩尔库伦准则可以确定某一相对密实度、法向应力条件下的剪应力破坏峰值(即接触面的抗剪强度)。

2.4 接触面本构模型验证

基于钢-粗粒土的接触面试验结果,提出了接触面的本构模型,即式(7)、式(1)、式(2)。笔者利用本文及前人的试验成果对该模型的合理性进行验证。验证方法是:首先根据式(1)和式(2)以及相对密实度,计算接触面的黏聚力和内摩擦角;进而,根据试验采用的法向应力计算各个法向应力下对应的抗剪强度;然后,由式(7)、相对密实度及法向应力可计算各个法向应力下对应的切向劲度系数 k_s ,依据该系数,就可以在 τ - ω_s 平面内绘出斜率为 k_s 的直线;最后,由前面算出的抗剪强度,即可绘出由模型预测的 τ - ω_s 关系曲线。

根据上述方法由本文模型计算得出对应法向应力 100 kPa、200 kPa、400 kPa、800 kPa 下剪应力与剪切位移关系曲线,并将曲线与试验结果(图 3)进行对比,如图 9 所示。由图 9 可以看出,本文模型预测的曲线与试验曲线吻合很好,说明了本文模型的合理性。

为进一步验证本文模型的合理性,笔者利用已有试验成果^[17] 对其进行验证。依据陆勇等^[17] 对砂砾-钢接触面的直剪试验结果,整理得到不同法向应力的剪应力与剪切位移的关系曲线;同时,利用本文提出的接

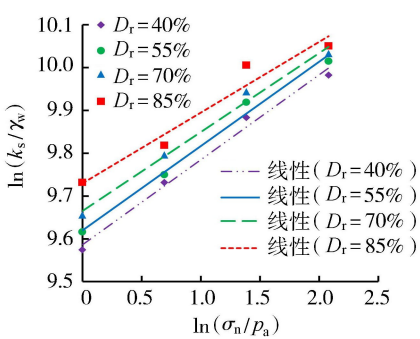


图 7 不同相对密实度下 k_s/γ_w 与 σ_n/p_a 的关系
Fig.7 Relationship of k_s/γ_w and σ_n/p_a under different D_r

表 3 $\ln(\sigma_s/\gamma_w)$ 与 $\ln(\sigma_n/p_a)$ 直线拟合结果
Table 3 Linear fitting results of $\ln(\sigma_s/\gamma_w)$ and $\ln(\sigma_n/p_a)$

D_r	k	b
0.40	0.198	9.59
0.55	0.197	9.62
0.70	0.184	9.67
0.85	0.165	9.73

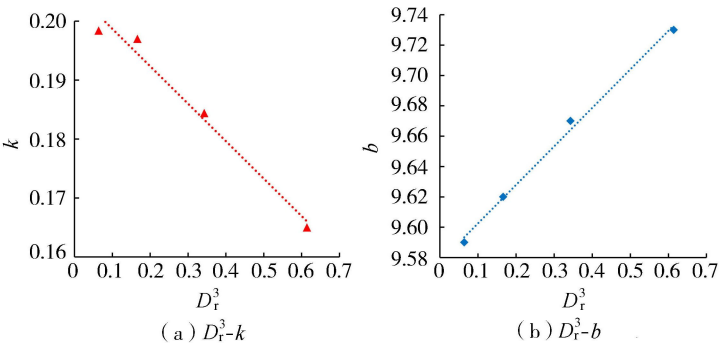


图 8 相对密度与斜率、截距的关系
Fig.8 Relationship between slope k , intercept b and D_r

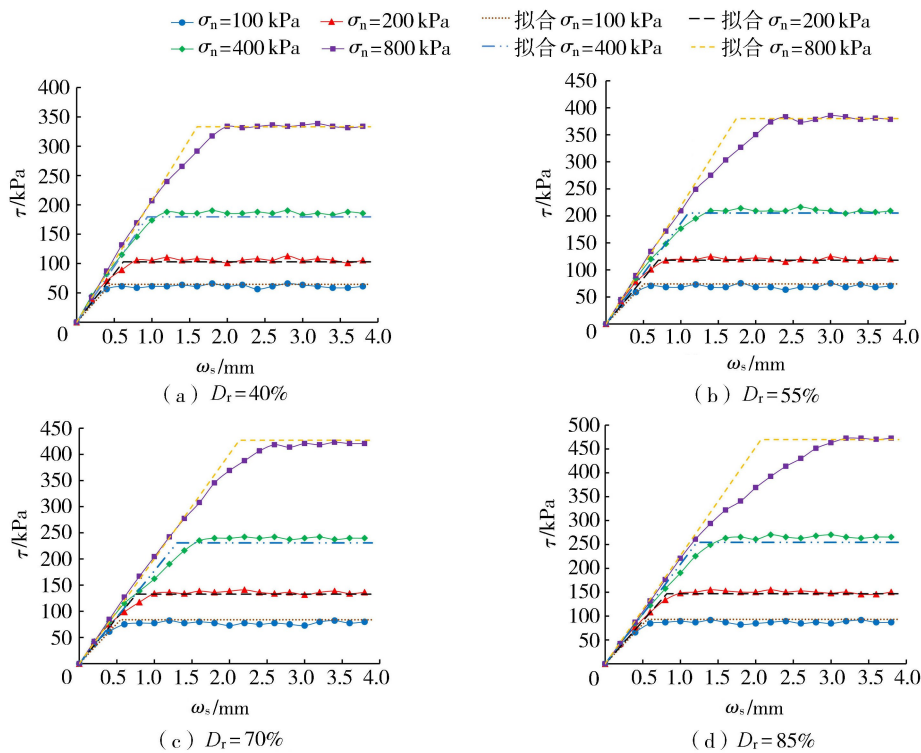


图9 不同 D_r 下接触面 τ - ω_s 模型预测曲线与试验曲线比较

Fig.9 Comparison between test curves and prediction curves of contact surface τ - ω_s model under different D_r

触面本构模型,对陆勇等^[17]的试验结果进行预测,结果如图10所示。可以看出,本文模型能较好地预测砂砾-钢接触面的应力变形性质。

值得指出,陆勇等^[17]没有给出试验中砂砾土试样的相对密实度,为此,笔者根据本文砂砾土的相对密度和干密度,计算其制样孔隙比,根据孔隙比,近似推求本文试验用砂砾土所对应的相对密实度($D_r=69\%$)来计算抗剪强度和切向劲度系数。

由图9、图10可知,本文所建立的钢-土接触面本构模型可以用来描述接触面抗剪强度、切向劲度系数与法向应力和相对密实度之间的关系,从而能够较好地反映钢-土接触面剪应力与剪切位移的关系。

3 结 论

- a. 在给定法向应力下,当剪位移较小时,钢-粗粒土接触面的剪应力与剪位移近乎直线关系;在剪位移较大时,表现出一定的非线性,但很快就随剪位移的增大进入剪切破坏阶段,随剪位移增大剪应力恒定。
- b. 粗粒土相对密实度对钢-土接触面抗剪强度有一定影响,黏聚力和内摩擦角与相对密实度之间均具有良好线性关系;接触面抗剪强度与法向应力之间也具有良好的线性关系,符合摩尔库伦破坏准则。
- c. 接触面切向劲度系数与法向应力以及粗粒土相对密实度相关;法向应力从100 kPa增加到800 kPa的过程中,钢-土接触面的切向劲度系数平均增加了40.3%;相对密实度从40%增加到85%的过程中,切向劲度系数平均增加了11.2%。
- d. 基于试验结果,建立了切向劲度系数 k_s 与法向应力以及相对密实度之间的经验关系,结合摩尔库伦破坏准则,提出了形式简单的钢-粗粒土接触面本构模型,并对模型进行了验证。由于现有试验资料相对较少,该模型的普适性有待更多试验资料的验证。

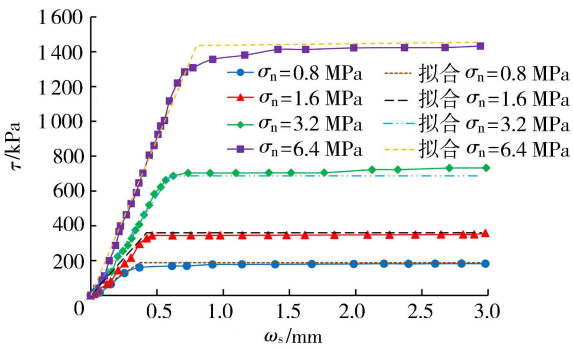


图10 文献[17]接触面 τ - ω_s 模型预测曲线与试验曲线比较

Fig.10 Comparison between test curves and prediction curves of contact surface τ - ω_s model in literature 17

参考文献:

- [1] 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,1994,5(3):14-22. (YIN Zongze, ZHU Hong, XU Guohua. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structural material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 5(3): 14-22. (in Chinese))
- [2] 杨大方,刘希亮,何军. 砂土与钢材接触面剪切特性的试验研究[J]. 路基工程,2009,5(6):77-78. (YANG Dafang, LIU Xiliang, HE Jun. Experimental study on shear characteristics of interface between sand and steel[J]. Subgrade Engineering, 2009, 5(6): 77-78. (in Chinese))
- [3] 张晓锋,袁聚云. 土与钢材材料接触面性能的试验研究[J]. 岩土工程技术,2007(3):131-133. (ZHANG Xiaofeng, YUAN Juyun. Mechanical properties of interface between soil and steel[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2007(3): 131-133. (in Chinese))
- [4] 梁越,卢孝志,王晓龙,等. 考虑土体密实度的钢-土界面剪切特性研究[J]. 水运工程,2014(4):168-172. (LIANG Yue, LU Xiaozhi, WANG Xiaolong, et al. Research on shearing characteristics of steel-soil interface considering dense degree of soil [J]. Port & Waterway Engineering, 2014(4): 168-172. (in Chinese))
- [5] 殷勇,李富荣. 滨海土体与钢材接触面剪切特性试验[J]. 土工基础,2014,28(6):123-125. (YIN Yong, LI Furong. The shear properties of the contact surface between steel and coastal plain soil[J]. Soil Engineering and Foundation, 2014, 28(6): 123-125. (in Chinese))
- [6] 吴梦喜,楼志刚. 钙质砂与钢板接触面力学特性试验研究[J]. 岩土力学,2003,24(3):369-371. (WU Mengxi, LOU Zhigang. Experimental study on mechanical behavior of calcareous sand-steel interfaces[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 369-371. (in Chinese))
- [7] 李惠军. 不锈钢表面处理方法[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [8] 南京水利科学研究院. 土工试验规程:SL237—1999[S]. 北京:中国水利水电出版社,1999.
- [9] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analysis of retaining wall behavior[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 1971, 97(12):1657-1673.
- [10] GOODMAN R E, TAYLOR R L, BREKKE T L. A model for the mechanics of jointed rock[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 1968, 94(3):637-660.
- [11] 李守德,俞洪良. Goodman 接触面单元的修正与探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(15):2628-2631. (LI Shoude, YU Hongliang. Modification of Goodman interface element[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2628-2631. (in Chinese))
- [12] 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,2010,39(6):831-836. (XIA Hongchun, ZHOU Guoqing. Experimental study of the shear mechanical characteristics at a soil-structure interface and the factors affecting them[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(6): 831-836. (in Chinese))
- [13] 朱俊高,SHAKIR R R,杨有莲,等. 土-混凝土接触面特性环剪单剪试验比较研究[J]. 岩土力学,2011,32(3):692-696. (ZHU Jungao, SHAKIR R R, YANG Youlian, et al. Comparison of behaviors of clay-concrete interface from ring-shear and simple shear tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 692-696. (in Chinese))
- [14] 彭凯,朱俊高,张丹,等. 粗粒土与混凝土接触面特性单剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(9):1893-1900. (PENG Kai, ZHU Jungao, ZHANG Dan, et al. Study of mechanical behaviors of interface between coarse-grained soil and concrete by simple shear test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1893-1900. (in Chinese))
- [15] 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,2001,12(4):431-435. (HU Liming, PU Jialiu. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 12(4): 431-435. (in Chinese))
- [16] 王伟,卢廷浩,宰金珉,等. 土与混凝土接触面反向剪切单剪试验[J]. 岩土力学,2009,30(5):1303-1306. (WANG Wei, LU Tinghao, ZAI Jinmin, et al. Negative shear test on soil-concrete interface using simple shear apparatus[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1303-1306. (in Chinese))
- [17] 陆勇,周国庆,夏红春,等. 中高压下粗粒土-结构接触面特性受结构面形貌尺度影响的试验研究[J]. 岩土力学,2013,34(12):3491-3499. (LU Yong, ZHOU Guoqing, XIA Hongchun, et al. Effect of shape scale on characteristics of coarse grained soil-structural interface under medium and high pressures [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(12): 3491-3499. (in Chinese))