

高土石坝中接触问题研究进展

韩华强 陈生水

(南京水利科学研究所土工所,江苏 南京 210024)

摘要 :从试验研究、本构模型和数值模拟 3 个方面对国内外高土石坝接触问题的主要研究成果及不足之处进行简要总结和回顾,简要分析了高土石坝接触问题研究中应重点关注的问题。在此基础上,建议今后对高土石坝接触问题研究应注重高应力循环荷载作用下的试验研究、整体离心模型试验研究、渗透破坏试验研究及基于直接约束的接触力学分析方法。

关键词 :高土石坝;接触问题;试验研究;本构模型;计算方法

中图分类号 :TV641.1 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2009)02-0089-06

Research progress on the contact problems of high earth-rock dam//Han Hua-qiang, Chen Sheng-shui(*Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China*)

Abstract :Achievements and shortages in the contact problems of high earth-rock dams at home and abroad are briefly summarized and reviewed in terms of experimental study, constitutive models and numerical simulation. The problems that should be of special concern in the contact problems of high earth-rock dam are also briefly analyzed. On this basis, it is suggested that the contact problems of high earth-rock dams under high stress and cyclic loadings should be studied intensively through experimental study, centrifugal model tests and the contact mechanics analysis method, which is based on the direct constraint model.

Key words :high earth-rock dam; contact problems; experimental study; constitutive model; calculation method

土石坝存在多种不同材料的交界面或接触带,如心墙与反滤料、坝体与岸坡或基岩、混凝土(沥青)面板与垫层料以及坝基与防渗墙等,由于接触面两侧材料性质的差异,在界面两侧常存在较大的剪应力并出现位移不连续现象,因此这些部位通常是大坝易发生事故的薄弱环节。张利民等^[1]通过三维有限元非线性分析研究了狭谷地区高面板堆石坝坝肩坡度对其特性的影响,发现在坝肩坡度变化处将产生显著的拉应力,且坡度变化越大拉应力越大,而且从格里拉斯(Golillas)和里苏(Lesu)2座混凝土面板堆石坝的运行和实测情况来看,在狭窄陡峭河谷地形条件下,坝体堆石可能会沿陡峭的坝肩发生滑移,从而导致面板裂缝或止水破坏^[2-3]。张丙印等^[4]对天生桥面板脱空问题研究后发现坝体的流变变形可明显加大面板的脱空和垫层料亏坡的程度,坝体后期变形是三期面板脱空的直接原因。笔者对“635”黏土心墙砂砾石坝进行原型观测,所获得的资料也表明^[5],该坝防渗体和陡岸坡接触部位在水库运行期发生了较大的剪切和水平位移,导致上游防渗体和岸坡出现脱空趋势,从而可能在高水头作用下形

成渗漏通道。由渗漏所导致的溃坝对于混凝土坝及混凝土面板堆石坝均是一个非常严重的问题,必将严重危及大坝安全。为了合理描述上述接触面的应力变形特性,确保高土石坝安全,国内外许多学者开展了大量卓有成效的研究工作。本文分别对高土石坝接触问题的试验、本构模型和数值模拟技术3个方面的研究成果进行总结,并就目前研究工作中存在的问题以及今后该领域研究工作中应重点关注的问题提出建议。

1 高土石坝接触问题试验研究

试验研究是揭示土石坝接触问题应力变形特性最重要的途径,Clough等^[6]在这方面比较早地开展了研究工作,采用标准直剪仪分别研究了7d和28d龄期的混凝土与砂接触面的剪切特性。试验中将压实土样置于直剪仪的上剪切盒中,用于模拟混凝土挡土墙的混凝土试样置于下剪切盒中,试验结果表明其位移与剪应力的关系可用Duncan所提出的双曲线型模拟。然而砂作为一种松散介质而非刚性材料,在上剪切盒水平推力作用下将产生压缩变形,对

剪应力传递起了缓冲作用,因此剪应力沿接触面的分布是不均匀的,接触面上的相对位移也不一致,而且除剪切面积不能保持定值外其应力条件也不明确,也不能区分是砂样本身变形所产生的位移还是沿接触面的滑动位移。为了克服这些缺点,一些研究者改进了常规直剪仪并对土与不同结构物接触特性进行了一系列研究:如 Desai 等^[7]的双自由度扭剪仪,Brandt 的大型合成直剪仪,Jewell^[8]的对称直剪仪等;卢廷浩等^[9]则改进了接触面的直剪试验,把常规直剪仪的下剪切盒取出,直接用结构物(混凝土、砖、石)代替,较好地解决了剪切过程中实际剪切面积不断减小、上下剪切盒边缘处应力集中的问题。

然而在直剪试验中,由于人为地固定了剪破面的位置,因此剪破正好发生在 2 种材料的界面上。但事实上接触面的破坏未必仅仅发生在该界面上,它必然会带动周围一定的土体形成一个“剪切错动带”,因此研究接触面不能仅局限于接触的界面上,而应该研究“剪切错动带”的特性。Uesugi 等^[10]和 Kishida 等^[11]用矩形断面的单剪仪进行了干砂与钢板的接触面试验,单剪仪的下剪切盒放置结构材料(混凝土或钢板等),上剪切盒由重叠的矩形钢环或铝环组成,内填土样,单剪仪可容许接触面和土体自身具有不同的剪切位移,保持接触面及土体的剪切应力均匀分布。近年来,张丙印等^[4,12-14]利用自行研制的叠环式单剪仪对糯扎渡高心墙堆石坝心墙料和反滤料进行试验,试验结果证实当结构物表面较为“粗糙”时,剪切面不一定发生在结构物与土体的直接接触面上,剪切破坏既可发生在接触面上,也可以发生在土体内。因此,单剪仪是目前研究土石坝接触问题较为理想的一种仪器。此外,张冬霖等^[15]利用由一系列光滑的、厚度很薄的钢环代替直剪仪上剪切盒的单剪试验对接触面剪切错动带进行了研究,为避免目前单剪仪尺寸较小而导致试验结果受尺寸效应的影响,周小文等^[16]、高俊合等^[17]分别就一种大型单剪仪对不同土类与混凝土接触面的力学特性进行了研究。

在动力试验研究方面,Bosscher 等^[18]通过动力直剪试验发现接触面剪切模量随应变幅度的增大而减小,同时还发现在相同的剪应力水平下阻尼比和剪切模量随侧限压力的增大而增大。Desai 等^[7]通过对接触面进行扭剪试验研究后认为,当应变振幅一定时接触面剪切刚度随法向应力振动周数的增加而增大,当法向应力和振动周数一定时,剪切刚度随应变幅度的增大而减小。李万红改进了 Desai 的扭剪仪,将混凝土制件作为底座,把砂样放于混凝土制件上,其扭剪试验具有应力条件明确及剪切面积不

变的优点,但是试验制作复杂且接触面的变形需要采用特殊技术才能够观察^[19-20]。此外,俞培基等^[21]通过双层土试样的共振柱试验研究了粗糙接触面上土的动剪模量;吴军帅等^[22]利用动单剪仪研究了混凝土面板与垫层接触面的动力特性,提出了接触面动模量和阻尼比的建议表达式。近年来,张嘎等^[23-29]在自行研制的环加载剪切仪上对粗粒土与结构接触面的力学特性进行了一系列试验研究,揭示了循环荷载作用下粗粒土与结构接触面受力变形的机制和主要影响因素,为建立土与结构物的动力本构模型奠定了试验基础。

显然,目前对接触问题的试验研究主要是通过现有常规试验仪器或其改进设备对土与不同结构物的接触面特性进行研究,在静力特性方面,研究主要集中于接触面的试验方法、强度和破坏特性,以及接触面的应力应变特性等;动力特性研究则主要集中在应变振幅和振动周数对接触面动力特性的影响上。试验手段可谓不少,但值得注意的是现有的接触面静动力特性测试方面均存在 2 个关键技术问题^[20]:一是无法保证土试样的应力和应变沿接触面分布的均匀性,或者变形观测存在技术上的困难;二是目前大量接触问题试验无论采用何种仪器,所量测的数据都是对接触面某一点(或面)力学特性的描述,能否正确反映接触面整体的力学特性及变形特性尚需做进一步研究,因此有必要引入一种新的能够反映接触面整体力学特性及变形特性的试验方式对其整体特性进行研究。值得一提的是,人们常常通过室内小比例尺物理模型试验去揭示和分析现象的本质和机理,以验证理论和解决工程实际问题。但一般小比例尺模型由于其自重产生的应力远低于原型,因而不能再现原型的特性。从相似理论的分析得知,当原型结构的自重应力与室内模型相同时,模型才可能呈现与原型相似或相同的应力应变关系,从而获得与原型一致的试验结果。土工离心模型试验是将土工模型置于高速旋转的离心机中,让模型承受大于重力加速度的离心加速度的作用,补偿因模型缩尺带来的土工构筑物自重的损失。它比通常在静力(重力加速度)条件下的物理模拟更接近于实际。由于离心加速度所产生的离心力场与重力场在一定条件下基本等效,且通常情况下加速度对工程材料性质的影响很小,从而使模型和原型的应力、应变相等,变形相似,破坏机理相同,能再现原型的应力变形特性和破坏形式^[30-31]。鉴于离心模型试验的这些优点,采用离心模型试验对土石坝中的各类接触问题进行研究应是今后的发展方向。

2 土石坝中接触面问题的本构模型研究

自 20 世纪 70 年代初以来,各国学者就土与结构物接触面已建立了多个本构模型,包括线弹性模型、非线性弹性模型、弹塑性模型和损伤模型等,并与相应的接触单元相结合用于实际工程问题的计算分析。目前国内外应用比较多的是 Clough 等^[6]根据砂与混凝土接触面上的摩擦试验结果所提出的双曲线模型:

K_{st} = K_1 \rho_w \left(\frac{\sigma_n}{P_a} \right)^{n'} \left(\frac{1 - R_f \tau}{\sigma_n \tan \delta + c_s} \right)^2 \tag{1}

式中:K_{st} 为切向剪切刚度系数;ρ_w 为水的密度;σ_n 为接触面上的法向应力;P_a 为大气压力;K_1 和 n' 为剪切刚度参数;c_s 和 δ 为接触面强度参数;R_f 为破坏比;τ 为剪应力。

该模型中的 5 个独立参数 K_1, n, C_s, δ 和 R_f 可通过接触面直剪试验确定。该模型的优越性在于所提出的概念简单明确,将其用于无厚度的 Goodman 单元,可得出切向劲度计算公式,将其用于有厚度的 Desai 单元,又可得出相应的剪切模量计算公式。

Brandt^[32]等根据室内剪切试验及相关工程实测资料,提出一类描述接触面应力应变特性的弹塑性模型,其平均剪应力和相对位移可采用图 1 所示的折线关系来表示。

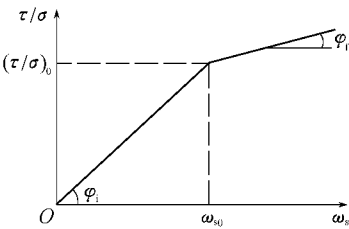


图 1 Brandt 本构模型

陈慧远^[33]通过试验研究发现砂和混凝土等刚性较大的结构物接触时,接触面的剪应力和剪切位移关系中剪应力达到某一极限强度 τ_p 峰值后就下降为剩余强度 τ_r,应力~位移曲线甚至会发生中断,仅在位移较小时剪应力和剪切位移保持比例关系,发生摩擦滑移后剪应力只能维持在 τ_r 的水平上。因此,砂与刚性建筑物接触面上的剪应力与剪切位移的关系可简化成如图 2 所示的弹塑性关系。在剪应力小于摩擦力 fσ_n (f 为土与墙面的摩擦系数)时,τ 和 ω_s 成正比,呈线弹性,即

τ = k_s ω_s \tag{2}

式中:k_s 为剪切模量,如图 2 中弹性阶段时应力~位移关系曲线的斜率;ω_s 为剪切位移。

剪应力大于或等于摩擦力时,属摩擦滑移阶段,应力和位移之间不再遵循某一特定的关系式,而剪

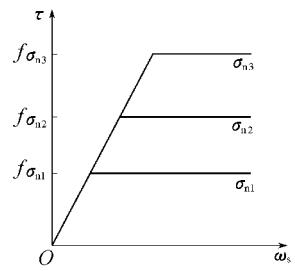


图 2 简化后的 τ ~ ω_s 曲线

切位移满足:

ω_s ≥ τ / k_s \tag{3}

殷宗泽等^[34]通过不同试样尺寸的土与混凝土接触面直剪试验,提出了否定 τ ~ ω_s 关系的观点,认为 τ 和 ω_s 的关系与试样尺寸有关,不完全取决于接触面的性质,不能用来表示土与结构接触面的本构关系,土与结构接触面剪切变形特性实际上是刚塑性的,并提出了相应的刚塑性计算模型。张丙印等^[4]通过大型接触面循环加载剪切试验对糯扎渡高心墙堆石坝坝料的接触特性进行研究后认为,对散粒体的接触问题也可用“刚塑性”模型进行描述。

张嘎等^[23-29]利用自行研制的土与结构接触面循环加载剪切仪对粗粒土与结构接触面的力学特性、受载过程中的损伤及循环荷载作用下的变形特性进行了一系列的试验研究。结果表明,该类接触面表现出显著的剪应变与体应变的耦合特性,接触面剪切过程中存在着结构面附近土颗粒破碎和剪切压密 2 种物态演化机制,共同支配着接触面力学特性的演化,接触面的变形可分解为土与结构交界面上的滑移变形以及结构面约束下的土的剪切变形 2 部分,接触面静力学及动力学特性应为弹塑性损伤关系,并借用边界面模型的相关概念建立了描述粗粒土与结构接触面的弹塑性损伤模型:

dγ = \left(\frac{1}{G_e} + \frac{1}{H_r} \right) dτ - \frac{1}{H_{rd}} \frac{|τ|}{σ} dσ \tag{4}

dε_v = \left\{ \frac{\frac{1}{μ} + n_a + A_1}{H_r} dτ + \left(\frac{C + C_e}{σ} - \frac{\frac{1}{μ} + n_a + A_1}{H_{rd}} \frac{|τ|}{σ} \right) dσ \right\}

模型中包括损伤演化参数、强度参数、剪切参数、可逆剪胀参数和压缩参数等 17 个参数,可分别通过 1 组常应力法向边界条件往返剪切试验和 1 个侧限压缩试验加以确定。但该模型对高应力和循环荷载双重因素作用下接触带粗粒土的颗粒破碎对其应力变形特性影响的考虑比较简单。

3 土石坝中接触面问题的数值模拟

为模拟不同材料的接触界面由于接触面两侧材

料的变形特性差异较大时存在的接触面错动、滑移或张开等位移不连续现象,有限元通常是在两者之间设置接触面单元,通过增量和迭代手段调整单元本构模型中的参数,模拟其应力应变关系,具有概念清晰、简单易行等优点。目前接触面的单元模型通常有无厚度单元、薄层单元和接触摩擦单元 3 种形式。

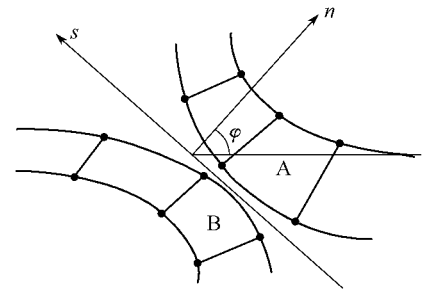
Goodman 等^[35]于 1968 年提出的无厚度单元能较好地反映接触面切向变形和应力之间的非线性关系,并且在一定程度上反映接触面的剪切特性。这种单元最初应用于岩石力学中作为节理单元,后用于各种边界接触单元,如桩土接触、面板与垫层接触等。工程实践表明,Goodman 单元能够模拟接触面的滑移和张开,概念明确,应用方便,长期以来得到了广泛的应用。但由于单元本身没有厚度,因此计算过程中常出现两侧单元嵌入或脱离的现象,而且当法向相对位移有微小误差时,就可能使法向力产生较大误差,最终可能出现不合理现象,这是其主要的不足之处。

在混凝土面板堆石坝的浇筑过程中,面板直接浇筑在垫层上面,部分混凝土砂浆会进入垫层与垫层胶结在一起,形成有一定厚度的粗糙接触带,此时接触面的受力破坏将多发生在该接触带内。因此 Desai 等^[36]提出 2 种材料接触面应存在一个涂抹区,其力学性质与周围单元不同,剪应力传递和剪切带的形成均发生在接触面这一薄层土体中,并提出了劲度矩阵由切向劲度和法向劲度及其耦合分量共同组成的薄层单元,用于模拟土与结构接触面剪切错动带的错动、滑移、张开或闭合等的观点。Desai 薄层单元克服了无厚度单元造成的接触面两侧单元嵌入或脱开的问题,并可以解释剪切破坏常发生在接触面附近土体内的现象,能够较好地反映接触面剪切带的性质。但是由于单元厚度选取的不确定性,及限于试验条件的影响而无法测定耦合分量,因此并不能客观地描述接触带的实际应力应变特性。殷宗泽等^[34]进一步提出,应将划入有厚度单元接触面附近土体的变形分为 2 部分:一是土体的基本变形,不管滑移与否都存在;二是破坏变形,包括滑移破坏和拉裂破坏,只有当剪应力达到抗剪强度,产生了顺接触面方向的滑动破坏,或接触面上法向应力为拉,产生拉裂破坏时才存在,总的变形为两者的叠加。然而和 Desai 薄层单元一样,其方法也没有很好地解决单元厚度的确定问题。

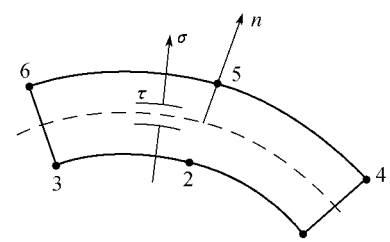
接触摩擦单元最初由 Katona 提出,采用位移约束及接触应力约束来模拟 2 个物体之间的滑动、张开和闭合过程,适用于不计厚度影响的节理、断层及位移不连续等问题的有限元分析。同时由于采用了

常接触力的二节点简单单元,也没有考虑接触面上法向应力的影响,是一种较为简单的解决接触问题的方法,很难适应复杂的接触面问题。此外由于其约束位移和容许剪应力的大小需要人为给定,接触应力也由接触力平均得到,降低了计算精度,同时由于其刚度矩阵为非对称矩阵,增加了计算困难,收敛性也不好。

雷晓燕等^[37-39]在 Katona 的基础上提出了一种新的接触摩擦单元,直接取节点接触应力作为基本量,同时采用六节点等参元来模拟 2 个物体之间不同的接触状态,并采用虚位移原理导出了接触摩擦问题的等效单元刚度-约束矩阵和等效荷载向量。其单元接触面双节点的布置及接触摩擦单元 A 和 B 定义分别如图 3(a)(b)所示。



(a) 摩擦单元接触面双节点布置



(b) 接触摩擦单元定义

图 3 接触摩擦单元

接触摩擦单元的刚度-约束方程如下:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{C}^T \mathbf{S} \\ \mathbf{C}' & \mathbf{R} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \mathbf{a} \\ \Delta \boldsymbol{\sigma} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta \mathbf{F} \\ \mathbf{a}^* \end{Bmatrix} \quad (9)$$

其刚度-约束矩阵 $\mathbf{K}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{C}^T \mathbf{S} \\ \mathbf{C}' & \mathbf{R} \end{bmatrix}$, 其中 $\mathbf{S} = \int_{\Gamma} \mathbf{N}^T \mathbf{N} d\Gamma$, $\mathbf{C}'$ 为坐标转换矩阵, $\mathbf{R}$ 为对角矩阵。

汪召华等^[40]也以接触应力为基本未知量,将二维摩擦接触单元推广到三维空间,并给出了三维应力状态下摩擦接触与材料非线性耦合的接触算法,避免了通常采用 Goodman 单元在劲度系数测定和取值上存在的困难和不确定性,但是由于耦合的刚度-约束方程系数矩阵的对角元不占优,增加了迭代的难度,因此对于大型结构的求解仍有一定的难度。

以连续介质力学的基本模式为基础对位移和应变进行描述的接触面单元法侧重于不同材料界面上

的应力传递,而对于材料界面上位移不连续现象的描述较为粗糙,特别是对于大规模滑移和脱开问题很难得到合理的结果。而基于接触力学的接触分析方法通过物体几何关系的准确描述来判别物体之间的接触关系,摆脱了连续介质力学所采用的以单元位移和应变来描述物体几何特性的基本模式,使得该方法对处理位移不连续现象具有本质上的优越性。

用直接约束法处理接触问题,方法是追踪物体的运动轨迹,一旦探测出发生接触,便将接触所需的运动约束(即法向无相对运动,切线可滑动)和节点力作为边界条件直接施加在产生接触的节点上。张丙印等^[4,12,14,11]基于接触分析方法中的直接约束算法并结合邓肯 E-B 模型研究了流变变形对高面板堆石坝脱空的影响,分别将混凝土面板和堆石体当作独立的可变形接触体,采用基于直接约束法的接触迭代算法跟踪和判别它们之间的接触关系,使用库仑摩擦定律模拟当两者接触时接触界面上的摩擦特性,对高面板堆石坝面板脱空问题进行了分析,计算结果表明,采用基于直接约束法的接触迭代算法可直观和有效地再现天生桥一级面板堆石坝脱空的现象,与接触面单元法相比,具有明显的优越性。因此,研究基于直接约束的高土石坝接触问题的接触力学计算方法应是今后重点努力的方向。

4 结 语

a. 现有的接触面静动力试验要么无法保证土试样的应力和应变沿接触面均匀分布,要么变形观测存在技术上的难题,而且其量测的数据也仅是对接触面某一点(或面)力学特性的描述,能否正确反映接触面整体的力学及变形特性并再现原型特征尚需做进一步研究。而离心模型试验具有再现原型重力场的优点,因此采用离心模型试验来研究高土石坝中的接触问题应该是今后努力的重点。

b. 随着土石坝坝高的不断增加,高应力必将对高土石坝接触带的应力变形特性产生显著的影响,但目前已有的高土石坝接触问题本构模型大多基于较低应力条件下的直剪试验结果得出。至于位于高地震烈度区的高土石坝,其接触带除了承受高应力作用外,还受到循环荷载的作用,因此,开展高应力循环荷载作用下高土石坝接触问题的试验研究,并建立相应的本构模型显得很有必要。

c. 基于接触力学的接触分析方法通过物体几何关系的准确描述来判别物体之间的接触关系,摆脱了连续介质力学所采用的以单元位移和应变来描述物体几何特性的基本模式,使得该方法对处理位移不连续现象较目前常用的接触单元法具有本质上

的优越性。高土石坝在建设和运行期间必将产生较大变形,各类接触带很可能在不同材料界面上产生滑移和脱开等位移不连续问题,因此基于接触力学分析方法,研究高土石坝各类接触问题数值模拟方法应是今后的发展方向。

参考文献:

- [1] ZHANG Li-min, DU Jian-cheng. Effects of abutments slopes on the performance of high rockfill dams[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(4): 489-497.
- [2] 郭兴文,王德信,蔡新.混凝土面板堆石坝流变分析[J]. 水利学报, 1999(11): 42-47.
- [3] 宋永杰.关于周边缝止水结构设计的探讨[J]. 水利水电技术, 1999, 30(3): 20-21.
- [4] 张丙印,师瑞锋.流变变形对高面板堆石坝面板脱空的影响分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1179-1184.
- [5] 陈生水,霍家平,石泉,等.“635”黏土心墙砂砾石坝工程性状分析[J]. 长江科学院院报, 2002, 19(6): 29-32.
- [6] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analysis of retaining wall behavior[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1971, 97(12): 1657-1673.
- [7] DESAI C S, DRUMM E C, ZAMAN M M. Cyclic testing and modeling of interface [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(6): 793-815.
- [8] JEWELL R A. Direct shear tests in sand[J]. Geotechnique, 1989, 39(2): 309-322.
- [9] 卢廷浩,王伟,王晓妮.土与结构接触界面改进直剪试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2006, 22(1): 82-86.
- [10] UESUGI M, KISHIDA H. Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel[J]. Soils and Foundations, 1986, 26(4): 139-149.
- [11] KISHIDA H, UESUGI M. Tests of the interface between sand and steel in the simple shear apparatus[J]. Geotechnique, 1987, 37(1): 45-52.
- [12] 张丙印,师瑞锋,王刚.高面板堆石坝面板脱空问题的接触力学分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 361-364.
- [13] 张丙印,付建,李全明.散粒体材料间接触面力学特性的单剪试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1522-1526.
- [14] 张丙印,于玉贞,张建民.高土坝的若干关键技术问题[C]//中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集编委会.中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集.北京:清华大学出版社, 2003: 163-186.
- [15] 张冬霖,卢廷浩.一种土与结构接触面模型的建立及其应用[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(6): 62-66.
- [16] 周小文,龚壁卫,丁红顺,等.砾石垫层-混凝土接触面力学特性单剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 876-880.
- [17] 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.
- [18] BOSSCHER P J, CARLOS-ORITIZ G. Frictional properties

between sand and various construction materials[J]. Journal of Geotechnical Engineering ,1987 ,113(9) :1035-1039.

[19] 朱泓 ,殷宗泽 .土与结构材料接触面性能研究综述[J]. 河海科技进展 ,1994 ,14(4) :1-8.

[20] 张建民 ,张嘎 .土体与结构物动力相互作用研究进展[J]. 岩石力学与工程学报 ,2001 ,20(增 1) :854-865.

[21] 俞培基 ,秦蔚琴 .粗糙接触面上土的动剪模量[J]. 水利学报 ,1992(11) :37-42.

[22] 吴军帅 ,姜朴 .土与混凝土接触面的动力剪切特性[J]. 岩土工程学报 ,1992 ,12(4) :61-66.

[23] 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.

[24] 张嘎 ,张建民 .粗粒土与结构接触面受载过程中的损伤[J]. 力学学报 ,2004 ,36(3) :322-327.

[25] 张嘎 ,张建民 .循环荷载作用下粗粒土与结构接触面变形特性的试验研究[J]. 岩土工程学报 ,2004 ,26(2) :254-258.

[26] 张嘎 ,张建民 .粗粒土与结构接触面统一本构模型及试验验证[J]. 岩土工程学报 ,2005 ,27(10) :1175-1179.

[27] 张嘎 ,张建民 .粗粒土与结构接触面静动本构规律[J]. 岩土工程学报 ,2005 ,27(5) :516-520.

[28] 张嘎 ,张建民 .粗粒土与结构接触面三维本构关系及数值模型[J]. 岩土力学 ,2007 ,28(2) :288-291.

[29] 张嘎 ,张建民 .接触面弹塑性损伤模型在面板堆石坝应力变形分析中的应用[J]. 水力发电学报 ,2005 ,24(4) :5-10.

[30] 杨旭毅 ,支喜兰 .地形对路堤沉降影响的有限元分析[J]. 路基工程 ,2007(3) :6-8.

[31] 包承纲 ,饶锡保 .土工离心模型的试验原理[J]. 长江科

(上接第 79 页)

[13] SLOBAND S , HACK R . 3D terrestrial laser scanning as a new field measurement and monitoring technique[J]. Lecture Notes in Earth Sciences ,2004 ,104 :179-189.

[14] 毛野 ,黄才安 ,陈建华 .长江镇江段河道采砂的影响及其控制利用的试验研究[J]. 泥沙研究 ,2004(3) :41-44.

[15] 马颂德 ,张正友 .计算机视觉——计算理论与算法基础[M]. 北京 :科学出版社 ,1998 :72-74.

[16] 孙凤梅 .摄像机标定与三维重建[D]. 北京 :首都师范大

(上接第 88 页)

[21] JTG C30—2002 ,公路工程水文勘察设计规范[S].

[22] RICHARDRON E V ,RICHARDRON J R ,LAGASSE P F . Bridge scour evaluation in the Unite States[C]//BRAUD J L . Scour of Foundations Proceedings of an International Symposium.[S.l.] 2000 :69-72.

[23] BREUSERS H N C ,RAUDKIVI A J . Hgdraulic structure design manual[M].[S.l.] :Notherlands Rotterdam ,1991 :43-51.

[24] 朱炳祥 .黏性土桥渡冲刷天然资料分析报告[J]. 铁道工程学报 ,1984(2) :122-123.

[25] 朱炳祥 .黏性土桥渡冲刷计算[J]. 武汉水利电力学院学

学院院报 ,1998 ,15(2) :1-4.

[32] BRANDT J R T . Behavior of soil concrete interface[M]. Alberta , Canada :The University of Alberta ,1985.

[33] 陈慧远 .摩擦接触单元及其分析方法[J]. 水利学报 ,1985(4) :44-50.

[34] 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.

[35] GOODMAN R E , TAYLOR R L ,BREKKE T L . A model for the mechanics of jointed rock[J]. Journal of Soil Mechanics And Foundation Division , ASCE ,1968 ,94(3) :637-659.

[36] DESAI C S ,ZAMAN M M . Thin-layer-element for interface and joints[J]. International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics ,1984 ,8(3) :19-43.

[37] 雷晓燕 ,SWOBODA G ,杜庆华 .接触摩擦单元的理论及其应用[J]. 岩土工程学报 ,1994 ,16(3) :23-32.

[38] 雷晓燕 .大位移接触摩擦单元在工程设计中的应用[J]. 华东交通大学学报 ,1994 ,11(1) :1-10.

[39] 雷晓燕 .三维接触问题新模型研究[J]. 土木工程学报 ,1996 ,29(3) :24-33.

[40] 汪召华 ,高莲士 ,宋文晶 .三维摩擦接触的有限元分析[J]. 清华大学学报 :自然科学版 ,2002 ,42(S1) :93-96 ,104.

[41] ZHANG Bing-yin , WANG J G , SHI Rui-feng . Time-dependent deformation in high concrete-faced rockfill dam and separation between concrete face slab and cushion layer[J]. Computers and Geotechnics ,2004 ,31 :559-573.

(收稿日期 2008-04-07 编辑 高建群)

学 2006.

[17] SAITO K ,MIYOSHI T . Development of non-contact 3-D digitizing and machining system for free-form surface[J]. Annals of CIRP ,1991 ,40 :483-486.

[18] ZHANG Zheng-you . A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence ,2000 ,22(11) :1330-1334.

[19] 马志敏 ,范北林 ,许明 ,等 .河床模型地形的无接触快速测量技术[J]. 无损检测 ,2006 ,28(4) :185-188.

(收稿日期 2008-09-23 编辑 高建群)

报 ,1981(2) :60-61.

[26] 朱炳祥 .黏性土桥墩局部冲刷计算[J]. 公路 ,1985(12) :19-20.

[27] 赵全安 .散粒体泥沙、黏性土和岩石河床桥墩局部冲刷计算的通用公式[J]. 中南公路工程 ,1986(3) :65.

[28] HAN Yu-fang , CHEN Zhi-chang . Experimental study on local scour around bridge piers in tidal current[J]. China Ocean Engineering ,2004 ,18(4) :2-3.

[29] 房世龙 ,陈红 ,王岗 .桥墩局部冲刷防护工程特性研究综述[J]. 水利水电科技进展 ,2007 ,27(4) :84-89.

[30] 黄崇佑 ,王群 ,林桂宾 ,等 .分层土壤桥墩局部冲刷的计算[J]. 泥沙研究 ,1993 ,17(1) :22-27.

(收稿日期 2008-01-14 编辑 高建群)