

土体颗粒破碎研究进展

张家铭¹, 汪 稔¹, 张阳明², 陈复兵³

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100083; 3. 湖北省第二建筑工程公司, 武汉 430030)

摘 要: 在打入桩的桩端以及大型土石坝、海洋平台等的地基中常常会出现高应力区。在这些高应力区中, 作为地基的粒状土的颗粒会发生不同程度的破碎。对高应力水平下粒状土体的破碎特性进行深入研究有助于解决这一类型的岩土工程问题。因此近年来土体颗粒破碎逐渐引起人们的重视。本文对土体颗粒破碎研究现状进行了详尽的阐述, 并指出研究中存在的问题及今后研究发展方向。

关 键 词: 颗粒破碎; 影响因素; 机理; 工程应用; 进展

中图分类号: TU 43 **文献标识码:** A

Advance in studies of soil grain crush

ZHANG Jia-ming¹, WANG Ren¹, ZHANG Yang-ming², CHEN Fu-bing³

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics the Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Geological Survey Development and Research Center, Beijing 100083, China; 3. The Second Construction Engineering Company, Wuhan 430030, China)

Abstract: Many geotechnical engineerings are constructed accompanied by the occurrence of high stresses, such as pile end bearing high earth or rockfill dams or foundations of offshore gravity structures. Such high stresses would lead to the crushing of even the strongest soil particles. Understanding the behavior of soils subjected to high pressures is fundamental to assisting in the solution to these types of geotechnical engineering and geological problems. So the problem of soil grain crush attracts more and more interests of man. This present paper elucidates in detail the current condition of studies on this problem and points out the problem and the direction in coming studies.

Key words: grain crush; affecting factors; mechanism; application in engineerings; andvance

1 引 言

土体颗粒破碎是指组成土体的颗粒在外部荷载作用下产生结构破坏或破损, 分裂成粒径相等或不等的多个颗粒。颗粒破碎会引起土体级配的改变, 从而使其物理力学性质发生变化。

经典土力学认为, 土体颗粒是不可压缩和破碎的, 其变形是由于土体孔隙中气水排出和颗粒的重组, 其强度理论是建立在粒间摩擦和滑移基础之上。然而, 实际上土体颗粒在受到于其自身强度的应力

作用下会产生部分或整体破碎。不同的材料其破碎应力是不同的。已有资料表明, 石英砂发生破碎的应力往往要达到数十兆帕。而对于钙质砂, 由于其颗粒多孔隙、质脆、颗粒多不规则, 在常应力水平下就会发生破碎。

粒状土颗粒破碎的工程背景是 20 世纪 60 年代国际上高土坝建设的兴起, 这些建筑物的大荷重造成作为地基的石英砂、砾石等发生颗粒破碎。随着近年来大型工业与民用建筑建设的兴起与大型土石坝的兴建, 特别是堆石、砂石、粗粒料等材料被广泛应用于水利、港口、交通等岩土工程建设中, 颗

收稿日期: 2003-03-28

基金项目: 科技部批准“十五”南沙群岛及其邻近海区综合调查项目 2001 年度中央级科研院所社会公益研究专项资金项目(编号: 7001DIA50041)。

国家自然科学基金资助项目: 钙质砂破碎机理及其桩基工程承载性状研究(编号: 40272121)。

作者简介: 张家铭, 男, 1976 年生, 2001 年毕业于中国地质大学地质工程专业, 获工学硕士学位, 现为中国科学院武汉岩土力学研究所博士研究生, 岩土工程专业, 主要从事土力学方面的研究工作。

粒破碎产生的影响越来越显著。例如在三峡工程建设中,填筑材料花岗岩风化料有时破碎率达到20%。因此,颗粒破碎越来越引起人们的重视,特别是颗粒破碎与力学性质的关系在土力学中渐成为一个新课题。

2 国外研究历史、现状与进展

土体颗粒破碎现象早在本世纪初就引起了人们的注意。Blackwelder(1920)、Terzaghi(1925)、Athy(1935)、Botset 与 Reed(1935)等通过一系列简单的试验研究,认为颗粒材料即使在高达 8.5 MPa 的情况下其破碎量都是很小的,因而在相当长的一段时间内颗粒破碎未引起人们的注意,很少有人从事这方面的研究^[1]。

Terzaghi 的发现引起了人们对这一现象的重视。Terzaghi、Peek(1948)对砂样进行压力高达 96.5 MPa 一维压缩试验时,发现颗粒破碎十分显著。此外,他发现孔隙比与有效应力的对数坐标的斜率在高应力水平下随着应力的增长下只是稍微的增加。

此后,麻省理工学院一些学者对颗粒破碎是否会石油沉积层产生重要影响而进行了一系列的试验研究。De Souza(1958)对三种不同的砂进行了试验,压力高达 138 MPa。结果表明,在压缩的过程中压缩指数发生变化处出现了一个破碎点。颗粒分析结果表明,在高于破碎点的应力作用下,破碎相当明显;初始相对密度越高,相应于破碎点的应力也越高,颗粒棱角度的增加会使破碎点的应力降点;但是中间粒径的减小会使破碎点的应力变大。他还注意到加载越缓慢,破碎越显著。

Harremoes(1959)研究了颗粒矿物成分对其破碎特性的影响,在高达 138 MPa 应力的作用下,发现矿物和晶体尺寸的改变并不会影响破碎点的应力。但在破碎点以上,含有大量裂隙颗粒的破碎现象更加明显。

Roberts (1964)对相同材料进行了试验,压力达到 276 MPa,结果与 De Souza 和 Harremoes 的结果非常相似。

Hendron(1963)对一系列砂进行了一维压缩试验,压力加到 2.7 MPa,发现相对密度的提高会使破碎应力增大,在破碎应力以上时,表现出的性质与麻省理工学院得到的结果非常相似。棱角度的增加会降低破碎应力;但是中间粒径变大会使破碎应力降低,这和 De Souza 的结果正好相反。

与此同时,DeBeer(1963)^[2]为了对 Terzaghi、Peek(1948)提出的说法进行验证,即在 9.8 MPa 的应力以下,破碎可以忽略不计;在 9.8 MPa 以上,随

着应力的增加,破碎急剧降低。他对均匀砂样进行了一维压缩试验,他发现应力为 15 MPa 时,破碎变得相当明显,而在 34 MPa 以上,随着应力的增加破碎渐次降低。

Kjaernsli、Sande(1963)^[3]对砂样进行了三轴压缩试验,他发现在给定的应力下,不规则的、表面粗糙的颗粒更易发生破碎。

Hall、Gordon(1963)^[4]发现在给定的应力下,级配良好的砂的破碎要比级配不良的少的多。

Marsal. R.J.(1965)^[5-6]在对土的抗剪强度进行讨论时,提出了一种表示破碎度量的方法,他是以试验前后试样粒组百分含量的正值之和来表示破碎率。两年以后,他在对堆石料进行大规模的试验后认为,影响材料抗剪强度与压缩特性最重要的因素是当材料受力后应力状态发生改变时而引起粒状材料颗粒本身的破碎。

Lee、Farhoomand(1967)^[7-8]在对土石坝反滤材料进行研究时提出了一种表示破碎的方法,他们研究的目的是验证大量颗粒破碎是否会有效地堵塞坝体的反滤层。他们对砂样进行了一系列的等向加载和比例加荷试验,提出用颗粒粒径变化的比值来表示颗粒的破碎程度,即用破碎前后试样某含量的粒径比值表示,这种方法表示的破碎率为试验前后级配曲线上某含量相应点的水平差距,比较简单、直观,但对反映整体变化情况欠佳。

Vesic、Clough(1968)^[9]对 chattahoochee 河砂进行了一系列的三轴压缩试验,围压加到 63.3 MPa。实验结果表明,在低应力作用下,破碎量是很小的;但是在高压作用下,破碎量很大,直到达到临界破碎点。这个临界破碎点实际上就是消除了所有初始孔隙比影响的一个临界点。在这个点上,任何初始孔隙比的影响都将消失,压缩曲线趋于一致。他们指出,材料的摩擦角随着压力的增加而减小,在破碎临界点之上,达到了一个基本粒间摩擦角,其结果和 DeBeer 的非常相似。限于试验条件,所有的三轴试验压力均低于 138 MPa。

Norihiko Miara、Suke O-Hera(1979)^[10]在研究颗粒材料剪切过程中的颗粒破碎时,提出了以试样颗粒面积增量来表示破碎数量,并发现试样破坏时颗粒面积增量与塑性功增量之比 $(ds/dw)_f$ 与相应的

$(s_1/s_3)_f$ 、 $(\frac{de_v}{de_1})_f$ 存在很好的线性关系,这说明

ds/dw 是试验材料破坏的一种很好的特征量,这是这种表示法独特之处,但对颗粒形状不规则的试样,这种表示法将有较大的误差。

为了克服以往对破碎度量时只考虑某一单一粒径或某一含量的缺点,O.Hardin(1985)^[11-12]在他人

实验成果分析的基础上，引入了破碎势的概念 (potential for breakage)，提出了一种表示破碎的方法，破碎势(B)即颗粒破碎的可能性。该法认为颗粒破碎的可能性随颗粒粒径的增大而增大，在高应力作用下大颗粒将破碎成粉粒，而粉粒则被认为是不可继续破碎的。他还定义了相对破碎率，这种引入相对破碎率的一个显著特点就是对于同一种材料，具有相同的颗粒形状和相对初始状况，沿同一路径加载，不同级配的试样相对破碎率基本相同。这可理解为相对破碎是材料的一种基本属性。

为了对中间粒径对颗粒破碎的影响做一充分认识，Hite(1985)^[13]选用 Ottawa 砂、Black Beauty 矿渣和纯方解石片进行了一系列试验，压力高达 345 MPa。由于方解石在试验后无法分离，且结果都很离散，所以没有得到有用的结果。砂试样表明，松散的试样在压力作用下要比密实的试样的破碎明显的多。压力在 103 MPa 至 345 MPa 之间时，随着压力的增加，破碎变得非常明显，这有别于 DeBeer 的结果和 Terzaghi、Peck 在 1948 年提出的假设。

为了验证破碎是否会在高压下停止，Esterle (1990)对疏松的砂样(Ottawa 砂、Black Beauty 矿渣)进行了高达 689 MPa 的试验。得到的结果却与 Hite 的一致。

Hagerty et al(1991)对不同的砂样进行了试验，压力也加到 689 MPa。他发现随着颗粒棱角度和尺寸的增加，颗粒破碎加剧；疏松砂样的初始破碎应力要比密实砂样的低。

Mcdowell(1996)^[13]等运用分形理论对颗粒破碎进行了研究，并对其进行了简单的二维分形模拟，得出一些工程材料的分形维数为 2.5。

1999 年 7 月在日本山口大学召开的国际土体破碎会议，系统地总结了几十年来土体颗粒破碎的研究成果，是土体颗粒破碎研究发展史上的里程碑^[15-16]。近几年来，陆续有少量关于土体颗粒破碎研究的文章发表，但其基本方法和成果并无新的突破。

目前，国外对颗粒破碎的研究主要集中在影响因素的试验研究上，至于破碎对土体的力学性质会产生什么样的影响，以及如何在考虑破碎的情况下进行实际工程设计，尚未见这方面的文献报道。

3 国内研究现状与进展

相比之下，国内对颗粒破碎研究的文献较少见。蒙进等(1989)^[17]对四川瀑布沟黑马料场的冰碛土进行研究时发现，黑马冰碛土在压力作用下颗粒会发生破碎。他在试验中采用颗粒表面积增量 S 来计算破碎的大小。研究发现，大于 1 mm 的颗粒在被压碎时有明显的规律性。首先是随着围压的增

加，颗粒破碎越趋于严重。应力路径不同，试验过程中的破碎量也不同，总的趋势是 CD 试验中产生的破碎量较大。对于 $5\text{ mm} < d < 10\text{ mm}$ 粒组范围内的颗粒，加卸荷试验中的颗粒破碎次之，然后是 UU 试验中，最后是 P 为常数的；粒径在 $2\text{ mm} \sim 5\text{ mm}$ 内的土颗粒，加卸荷试验中颗粒破碎与 UU 试验中的不相上下，破碎最少的是 $P=C$ 的试验；粒径在 $1\text{ mm} \sim 2\text{ mm}$ 之内时，三种试验产生的破碎差不多。他还发现，在同一应力路径下，颗粒粒径越大，粒径分布范围越宽破碎量越小，他认为颗粒破碎的必要条件是作用在其上的应力大于本身的抗压强度，除了这个必要条件外，颗粒周围的接触面对颗粒破碎也起到关键作用。他认为颗粒粒径越大，形状越不规则，表面越粗糙，其周围的孔隙一定比粒径较小的大，因而在受到外力作用时，粒径较大的颗粒以位移为主，也就是说周围是软接触，颗粒不易被压碎。他在研究其应力应变关系时指出，在高压下，剪胀已不是影响应力应变特性的主要因素，起影响作用的是颗粒破碎。颗粒破碎与围压和应变也有很大的关系。在中低压范围内，颗粒破碎主要是受应变大小控制。随着应变的增加，总破碎量是以减速率增加的，因而应变特性呈硬化型或弱软化型；而在更高的围压下，由于一开始颗粒就承受了较大的压力，因而在应变较小时颗粒破碎就达到很大。当应变较大时，颗粒破碎量的增加率比中低围压下的还要小，总的破碎量增加更慢，所以在这种情况下，应力应变曲线呈明显的软化特性。

马巍等(1995)^[18]利用扫描电子显微镜，对饱和和冻结兰州砂土在 -5 和围压 ($0 \sim 22\text{ MPa}$) 下进行了结构观测，结合围压对强度影响的宏观特征分析发现：当 $0 < \sigma_3 < 8\text{ MPa}$ 时，结构以压密为主，强化作用占优势，强度随围压的加大而增大；当 $8 < \sigma_3 < 16\text{ MPa}$ 时，颗粒出现破碎现象，某些颗粒接触点处的冰发生融化，粒间摩擦减少，致使强度随着围压的增大而缓慢降低； $16 < \sigma_3 < 32\text{ MPa}$ 时，颗粒破碎程度加剧，某些团粒中出现大的裂隙，结构联结破坏，导致冻土强度急剧下降。

郭熙灵等(1997)^[19]通过对三峡花岗岩风化石碴的三轴试验和平面应变试验，结合日本森吉山安山岩和玄武岩的三轴试验结果，综合分析了颗粒破碎规律及有关力学特性，分析了破碎与剪胀及破碎强度分量的关系。他指出，颗粒破碎对剪胀性产生明显影响，其影响程度与破碎率的大小、试验方式、试验颗粒形状等因素有关。颗粒破碎对试验剪切强度指标有影响，其对强度的影响程度与破碎率、试验方式、形状系数有关；破碎率越大，破碎强度分量越大，试验总的强度指标降低。

刘崇权(1999)^[20-21]等对取自南沙群岛永暑礁的

钙质砂进行了两种试验,一种是普通三轴排水剪切试验,一种是定轴向应变试验。在分析颗粒破碎机理的基础上,提出了颗粒破碎下剪胀耦合作用的破碎功表达式,采用 Hardin(1985)提出的破碎度量理论,在实验中证明了相对破碎 B_r 与轴向应变 \hat{a}_1 、塑性功 W^p 、破碎功 W^b 之间的关系,从而建立了钙质砂颗粒破碎评价指标及其能量公式。他指出,颗粒破碎是一个不可逆过程,所以破碎功与度量颗粒破碎的指标相对破碎也应是一个过程量,而非状态量,在实验中也证明了这一点。他还指出, B_r 与 \hat{a}_1 成直线关系,与 W^b 成分段直线关系,它们各自对应着不同的破碎阶段,他提出的以破碎功 W^b 作为联系颗粒破碎与加载过程中功能关系的变量较好地描述了颗粒破碎中的能量关系。

温彦锋等(2000)^[22]在对强风化防渗土料的渗透特性进行研究时,发现增加击实功可有效提高土料的颗粒破碎程度,采用重型击实土料破碎程度明显高于轻型击实。另外他还发现,随着含水量的增加,土的颗粒破碎程度也逐渐加剧。

孙吉主等(2000)^[23]在对钙质砂进行研究时,发现颗粒破碎会导致钙质砂的声发射。他指出,钙质砂的声发射就是在变形的过程中,由于颗粒破裂使聚积的能量突然释放而产生的一种弹性波,因此声发射活动反映了钙质砂的损伤程度。在试验中发现,围压较低时,颗粒破碎数量有限,声发射活动总体较为平静。随着围压的增加,颗粒破碎的数量也相应地增加,结果声发射总体水平得到提高。当围压增加到一定水平时,随着变形的增加声发射逐渐增加,直到塑性流动产生后,应力水平不再提高,颗粒破碎进入并保持“寂静”状态即无声发射。他将声发射从岩石研究中引入钙质土颗粒破碎的研究中,必将对深入认识颗粒破碎产生重要影响。

汪谔等(2002)^[24]在对钙质砂进行研究时,针对钙质砂在低应力水平下的破碎现象,指出其变形在微观上存在着颗粒破碎与滑移两种机制的耦合作用,并分别采用弹性损伤模型和界面塑性模型予以描述,对建立钙质砂可靠的本构关系做了新的尝试。

综观目前国内外对颗粒破碎的研究进展,不难发现人们的注意点尚集中在对产生破碎的影响因素的认识上,对破碎本身的机理则缺乏系统的认识。破碎对土体力学性质的影响等方面做得还很不够,尤其是微观破碎机理的研究则还无人涉足。这些研究成果远远不能说明土体颗粒破碎的力学机理,更不能应用工程实际中。因此,加强这方面的研究,具有重要的理论意义和实用价值。

4 颗粒破碎研究的主要内容和问题

4.1 进一步对影响颗粒破碎因素进行研究

影响土体颗粒破碎的因素很多,既有土体颗粒本身的物理力学性质,如土体颗粒的地质成因、矿物成份、微观结构、尺寸、形状、表面粗糙程度等。也有其它的外在因素,如颗粒级配、中间粒径、孔隙比、相对密度、应力水平、应力路径、含水量、时间等因素。综观已有文献资料发现,有些因素的影响已经基本清楚,而有的影响因素还并不清楚。要逐一弄清各因素是如何影响的,需要进行大量的试验。由于普通石英砂在高应力条件下才产生破碎,而常规试验设备难以完成,限制了颗粒破碎的研究。钙质砂的出现,给颗粒破碎带来了合适的研究材料。通过对钙质砂的研究,促进颗粒破碎的研究水平。

4.2 提出颗粒破碎程度有效实用的度量指标

研究颗粒破碎,首先遇到的一个问题就是如何有效地对其破碎程度进行度量。已有的度量指标主要是以颗分曲线为基础的,也有从能量观点出发的,也有用残存概率来度量的。但这些度量手段有的不全面,有的不易测量,不能在实际工程中应用。能否将这几种方法综合考虑,提出一个实用有效的度量指标是深化颗粒破碎研究的前提。

4.3 颗粒破碎模型的建立与模拟

由于颗粒破碎是一个相当复杂的过程,不仅有颗粒材料力学中的应力轴、主轴偏转、剪胀、滑移,而且颗粒破碎也将使颗粒数目、主轴大小、方向、配位数等发生变化。虽然传统颗粒材料力学有了很成熟的理论和研究方法,但至今未有人建立考虑颗粒破碎的微观力学模型。

常规土力学中的剪切带、剪胀等物理现象不仅可以在实验中直接观察到,而且已有计算机成功地进行了模拟,但颗粒破碎的过程、方式的微观数学描述,计算机模拟尚未见有文献报道, McDowell(1996)对其进行过二维分形模拟,但他们假设破碎过程符合 Sierprinskin 海绵垫不一定与真实情况一致。因此开展这方面的工作具有重要的理论意义和实际价值。

4.4 开展颗粒破碎微观(细观)试验研究

开展颗粒破碎研究,宏观方法和微观手段应同时进行。加强颗粒破碎微观(细观)试验研究,借助电镜扫描,电子探针,电子显微镜,压汞仪,声发射仪,岩土细观数字视频观测仪,以及 CT 等手段对其进行研究。

4.5 研究颗粒破碎耦合与本构关系

可破碎土在加载过程中既有剪胀又有破碎,即二者存在耦合关系,分析在加载过程中剪胀下破碎

耦合机制,在此基础上得出基于剪胀与破碎耦合的、能够正确描述其力学性质与行为的本构模型,将对工程设计具有重要的指导意义。

4.6 开展高压仪器的研究与研制

随着高层建筑与大型水库建设的不断兴起,作为地基的石英发生破碎的情况必须予以考虑,因此开展高压下石英砂破碎研究意义深远重大,这就要求试验设备的承压性能提高,开展高压仪器的研制是研究高压下颗粒破碎的前提。

参 考 文 献

- [1] Hagerty M M, Hite D R, Ullrich C R, Hagerty D J. One dimensional high pressure compression of granular media [J]. **Journal of geotechnical engineering**, 1993, 113(1): 1-18.
- [2] DeBeer E E. The scale effect in the transposition of the results of deep sounding tests on the ultimate bearing capacity of piles and caisson foundations[J]. **Geotechnique**, 1963, 13(1) : 39-75.
- [3] Kjaernsli B, Sande A. Compressibility of some coarse-grained materials[A]. **Proc. European Conf. Soil Mech. And Found. Engrg.**[C]. Weisbaden: Germany, 1963. 245-251.
- [4] Hall E B, Gordon B B. Triaxial testing with large-scale high pressure equipment. Laboratory Shear Testing of Soils. **Spechial Tech. Publication**, 1963, 361: 315-328.
- [5] Marsal R J. Large scale testing of rockfill materials[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**. 1967, 93(SM2) : 27-43.
- [6] Marsal R J. 土石坝工程[M]. (第四章). 江苏:水利出版社, 1979.
- [7] Lee K L, Seed H B. Drained strength characteristics of sand, Proc[C]. **ASCE, JSMFD**. 1967, 93(SM6)
- [8] Lee K L, Farhoomand I. Compressibility and crushing of granular soils in anisotropic triaxial compression[J]. **Can. Geotech.**, 1967, (14) : 68-86.
- [9] Vesic A, Clough G W. Behavior of granular materials under high stresses[J]. **J. Soil Mech. and Found. Engrg. Div.**, ASCE, 1968, 94(3): 661-688.
- [10] Norihiko Miura and Sukeo O-hara, Particle crushing of a decomposed granite soil under shear stresses[J]. **Soils and Foundations. JSSMFE**. 1979, 19(3)
- [11] Hardin B O. Crushing of Soil Particles[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1985, 111(10): 1 177-1 192.
- [12] Hardin B O. 1-D strain in normally consolidated cohesionless soils[J]. **J. Geotech. Engrg., ASCE**, 1987, 113(12) : 1 449-1 467.
- [13] Mc Dowell G R, Boltom M D, Roberston D. The fractal crushing of granular materials[J]. **J. Mech. Solids**, 1996, 44(12) : 2 079-2 102.
- [14] McDowell G R, Bolton M D. On the micromechanics of crushable aggregates[J]. **Geotechnique**, 1998, 48(5): 667-679.
- [15] Coop M R. The influence of particle breakage and state on the behaviour of sands[A]. Proc. International workshop on soil crushability[C]. Japan: Yamaguchi, 1999.
- [16] Joer H A, Bolton M D, Randoph M F. Compression and crushing behaviour of calcareous soils[A]. Proc. International workshop on soil crushability[C]. Japan: Yamaguchi, 1999.
- [17] 蒙进, 屈智炯. 高压下冰碛土的颗粒破碎及应力应变关系[J]. 成都科技大学学报, 1989, 43(1) : 17-22.
- [18] 马巍, 吴紫汪, 常小晓等. 围压作用下冻结砂土微结构变化的电镜分析[J]. 冰川冻土, 1995, 17(2) : 152-158.
- [19] 郭熙灵, 胡辉等. 堆石料颗粒破碎对剪胀性及抗剪强度的影响[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(3) : 83-88.
- [20] 刘崇权, 汪稔. 钙质砂在三轴剪切颗粒破碎评价及其能量公式[J]. 工程地质学报, 1999, 7(4) : 366-371.
- [21] 刘崇权, 汪稔. 钙质砂在三轴剪切颗粒破碎评价及其能量公式[J]. 工程地质学报, 1999, 7(4) : 366-371.
- [22] 温彦锋, 蔡红, 边京红. 强风化岩防渗土料的压实及渗透特性[J]. 水力发电学报, 2002, 69(2) : 17-24.
- [23] 孙吉主, 汪稔. 围压对钙质砂变形特性和声发射模式的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增刊) : 1 173-1 176.
- [24] 汪稔, 孙吉主. 钙质砂不排水性状的损伤-滑移耦合作用分析[J]. 水利学报, 2002, (7): 75-78.
- [25] Yamamuro J A, Bopp P A, Lade P V. One dimensional compression of sands at high pressures[J]. **J. Eeotech. Engrg., ASCE**. 1966, 122(7) : 147-154.
- [26] Yamamuro J A, Lade P V. Drained sand behavior in axisymmetric tests at high pressures[J]. **J. Geotech. Engrg., ASCE**. 1996, 122(2) : 109-119.
- [27] Vesic A S, Barksdale R D. Discussion: shear strength at high pressures[A]. Lab. Shear Testing of Soils[C]. ASTM STP 361, ASTM, Canada: Ottawa, 301-305.
- [28] Lade P V, Yamamuro J. Significance of particle crushing in granular materials[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 122(4) : 309-316.