

胶结钙质土的室内试验研究进展

朱长歧^{1,2}, 周 斌^{2,3}, 刘海峰²

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074;
2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;
3. 中建三局总承包公司, 湖北 武汉 430064)

摘 要:天然胶结钙质土是广泛分布于热带及亚热带海洋中由生物碎屑经碳酸钙胶结或固结而形成的碳酸盐岩类。其独特的工程性质常常给岩土工程设计与施工带来麻烦,也正因为此引起了研究者的兴趣并对其开展了较为全面的试验研究工作。针对天然胶结钙质土、人工胶结钙质土的室内试验以及人工胶结钙质土试样的制备等 3 方面取得的研究进展进行总结回顾,汇总了胶结钙质土的基本应力-应变行为以及围压、初始密度及胶结度等主要参数的影响规律,指出了研究中尚存在的问题,并对胶结钙质土的进一步的研究工作进行了展望。该工作必将对此领域的研究具有借鉴和指导意义。

关键词:胶结钙质土;人工胶结;三轴试验;循环加载;破坏状态;小应变

中图分类号: TU 442

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2015) 02 - 0311 - 10

State-of-the-art review of developments of laboratory tests on cemented calcareous soils

ZHU Chang-qi^{1,2}, ZHOU Bin^{2,3}, LIU Hai-feng²

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;
3. General Contracting Company of CCTEB, Wuhan, Hubei 430064, China)

Abstract: The naturally cemented calcareous soil is a carbonate soil or rock cemented by high-magnesium calcite or aragonite. It usually contains a large portion of coral and other tropical marine organism. Its unique engineering properties often result in troubles and difficulties in the geotechnical design and foundation construction. Its characteristics also attract research and experimental interests of many researchers. This paper presents state-of-the-art review of developments of the laboratory tests on both naturally and artificially cemented calcareous soils as well as the sample preparation techniques of artificially cemented soils. The general stress-strain behaviors of the cemented calcareous samples and factors that might affect its characteristics, such as confining pressure, initial sample density, and degree of cementation, are also summarized. The research work that could be improved is also proposed with an objective of providing a research guideline for the further studies of cemented calcareous soils.

Key words: cemented calcareous soil; artificially cementation; triaxial compression test; cyclic loading; failure state; small strain

1 引 言

1968 年在阿拉伯湾海洋平台施工中,桩基穿过胶结钙质土层时发生了自由下落 7.5 m 的事故^[1]。1982 年位于澳大利亚西北大陆架,意外地出现了打桩阻力过低的现象,当时 1.8 m 直径的基桩在自重作用下自由下落达 60 m,这就预示着桩身摩阻力可能远远不能满足设计要求^[2]。事故的发生与处理促

进了人们对钙质土尤其是天然胶结钙质土的力学性质的深入研究。

研究发现,这些大陆架上的沉积物多为生物碎屑沉积,具有高孔隙比、颗粒易破碎且胶结不均匀等特征。胶结是由于碳酸盐的析出及碳酸盐质晶体生长引起的,具有极其无序的特征,使得在较小的范围内土的强度、密度和胶结度都会呈现出明显的各向异性,常常出现强胶结层中包裹完全松散层的

收稿日期: 2014-06-30

基金项目: 国家自然科学基金资助(No.41372318, No.41330642); 国家科技支撑课题及国家重大科学研究计划课题资助(No. 2014BAC01B01, No. 2012CB026103, No. 2013CB956104)

第一作者简介: 朱长歧,男,1963 年生,研究员,主要从事海洋工程地质、胶结钙质土的力学特性及地基加固理论研究及实践。E-mail: zcqh@whrsm.ac.cn

现象。

自 1980 年中后期开始,已有多位学者相继开展了天然胶结钙质土力学性质的试验研究工作^[3-6],这些研究工作均强调了胶结度的重要性以及密度和胶结度极大的空间各向异性^[7]。同时,天然胶结钙质土的结构敏感性,取样时极有可能遭到破坏,再加之海上获取原状试样以及进行原位测试的成本巨大等原因,都给全面进行天然胶结钙质土的性状研究带来了困难。因此,人们开始关注采用合适的人工胶结剂制备胶结试样来开展对人工胶结钙质土的物理力学性质的研究。最常采用的胶结剂就是水泥^[8]或石膏^[9]等通用胶结材料,通过改变胶结剂的加入量来调整胶结强度。但研究表明,这种细颗粒状胶结剂的加入会改变土的级配和矿物组成,进而影响土的密度及其应力-应变行为。同时,此种试样制备方法的另外一个问题是,要使试样达到天然结构性土的密度和强度,通常的做法是要将混合物在很高的压力下压密,而高压会引起颗粒的破碎进而影响其后续响应,导致人工制备试样的力学行为与天然原状试样间存在较大的差异。

为了制备出更加相似的人工胶结试样, Ismail 等^[10]开发出了一项被称为 CIPS 的胶结试样制备技术,通过在土粒上沉淀一层方解石使土粒间相互胶结,从而制备出胶结试样。其优点是胶结剂的化学成分与天然胶结钙质土相同,同时可以制备出大孔隙比、高强度试样,使得胶结钙质土的研究向前推进了一大步。

我国的南海岛礁上广泛地分布着天然胶结钙质土^[11-16],随着我国国防建设及海洋资源开发进程的加快,开展南海天然胶结钙质土的岩土工程特性研究迫在眉睫,因此,对胶结钙质土的室内研究进展进行必要的总结归纳,必将对我国此领域的研究工作的开展具有指导和借鉴意义。

2 天然胶结钙质土

钙质土即是以碳酸盐矿物(主要为碳酸钙)为主要成分的土类,钙质土含有大量的海洋植物与动物遗骸,其分布范围覆盖了大陆架的 50%、深海平原的一半以上以及陆坡及其上升区的一部分,就全球而言,有超过 55% 的海床为钙质土所覆盖。其中有胶结的钙质土层呈不规则状分布于其中。

我国目前发现的天然胶结钙质土(南海海滩岩),是指形成于热带、亚热带珊瑚岛礁砂质海滩的潮间带内、由碳酸盐(主要是碳酸钙)胶结海滩钙质沉积物而成的一种海岸带碳酸盐胶结岩;是一种

低温,低压胶结而成的岩类,从岩石学及工程分类角度上说是许多种碳酸盐胶结岩类的一种^[17-19],其砂屑颗粒大小从砂至砾或更大,分选差,颗粒扁长,颗粒越小磨圆越好。生物组分主要为红藻、珊瑚、绿藻,珊瑚藻、有孔虫及少量棘皮等;颗粒矿物组成以文石、方解石为主,占到 90% 以上。

其胶结物通常也为高镁方解石和文石^[20]。胶结类型多为接触式及镶嵌式胶结;孔隙类型主要为粒间孔、溶蚀孔、生物体腔孔和少量粒内溶孔、铸模孔,孔隙连通性较好。

据报道,印度洋某地海滩岩的胶结速度极快,可以在 10~15 年内胶结成岩^[21]。我国的天然胶结钙质土均为全新世产物,形成年龄为 1 660~15 980 BP。块体密度为 1.33~2.17 g/cm³;颗粒密度为 2.71~2.75 g/cm³;渗透系数为 4.62×10⁻³~5.41×10⁻³ cm/s^[16],澳大利亚 NRA 平台场地获取的天然胶结钙质土渗透系数为 10⁻⁶~10⁻⁴ cm/s,前者的渗透系数是后者的 50 倍以上,这也反映出天然胶结钙质土区域上的差异性。

3 天然胶结钙质土的室内试验研究

3.1 试样制备及试验方法

由于试样结构极易受到扰动以及受到海上取样成本高昂等客观因素的影响,天然胶结钙质土的室内试验研究工作不很普遍,主要系澳大利亚、美国、意大利及伊朗等国的学者开展了相关的研究工作,我国也于近期开始了此项研究。试样主要取自于澳大利亚西北大陆架的 NRA 平台场区、阿拉伯湾、意大利的巴里岛以及我国的南海岛礁等地,按着相关的工程分类法该天然胶结钙质土均定名为生物砂(砾)屑灰岩。

已经开展的试验研究手段主要有各向等压固结试验、常规排水及不排水三轴试验、循环加载三轴试验、应力路径试验以及抗拉强度试验等。三轴试验主要采用 Bishop & Henkel 位移控制式三轴仪,围压采用伺服控制可以维持 5 MPa,采用钢制压力室,可以对试样失稳段的应力-应变行为开展研究^[22-23]。也有的三轴试验采用 Wykeham Farrance 高压土三轴试验系统,垂向加载范围 250~2 000 kN,最大围压 15~35 MPa^[6,24]。为了减小外部轴向测量数据受系统误差的影响^[25],也有的三轴试验采用标准的 Bishop & Wesley 应力路径压力室,该压力室装备有测斜仪,使得刚度测试值更为可靠。

由于试样结构在空间上的各向异性,为了尽量减小数据的离散性,在进行三轴试样粗加工时,可

将试样端部切掉的部分加工成密度及抗拉强度试样。成型后的三轴试样采用细砂纸打磨修整，尽量减少胶结结构的破坏程度，由于试样表面仍相对的粗糙，为了防止橡胶膜被刺穿，常用的措施是在试样的侧面涂上乳胶，多数情况下采用 2 层以上的橡皮膜包裹试样；或采用土工织物及其他的软质橡胶片包裹试样，并将包裹物纵向切开，减小其对试样刚度及强度的影响，试验前还要对橡皮膜的影响进行率定。

关于试样的饱和方法也有 2 种截然不同的观点，一种认为，采用真空饱和法，因为当气体自试样逸出时膨胀的气泡会将细粒物质从试样中带出，建议采用给试样两端加负压的方法进行试样饱和，液体选用天然海水或专门配制的盐水；另一种则认为，采用 Bressani 等^[26]提出的干法真空饱和技术，首先对干燥试样抽真空几分钟，然后让水从试样底部浸透试样，并在水中保持真空 12 h，采用此方法饱和的试样能使孔隙水压力系数 B 值大于 0.98，相比其他方法可以获得更高的 B 值。

3.2 各向等压固结特性

多数的研究者认为，在比容 (v)-平均有效应力 ($p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_2)/3$) 空间内，天然胶结钙质土与一般胶结土及结构性土的各向等压行为大致类似。在平均有效应力达到某个门槛值之前为线弹性（也有的认为是非线性^[22]），直线的斜率 $\kappa = 0.0065$ ，在门槛值前后进行加载-卸载循环均不会对其线弹性行为产生影响，也就是说胶结不会对加、卸载响应产生影响。而体积模量与平均有效应力间的线性关系会受到试样初始状态的影响。随着胶结度的增加 κ 值减小^[7]。

门槛值后会产生较大的体变，压缩曲线的斜率均趋于 $\lambda = 0.18 \sim 0.24$ ，该值与颗粒破碎特性和相对较高的孔隙比有关。门槛值前后的相对压缩性 λ/k 值为 30 左右。

各向等压条件下门槛值的大小与试样干重度 (γ_d) 间为近似的线性关系，干密度越大，门槛值越高（在其他应力状态下，如一维固结或 K_0 固结条件下该关系不一定成立）。非各向等压固结条件（如 $\sigma'_3/\sigma'_1 = 0.3$ 及 0.4）下，门槛值为 1~2 MPa，与干重度间不存在明确的相关关系^[6]。门槛值的大小与胶结结构的破坏特征及颗粒本身的破碎有关^[27]。

Lagioia 等^[22]认为，门槛值后颗粒的骨架结构会发生崩解并伴随着粒间胶结的破坏，会表现出各向等压下的软化现象（应力衰减），经过一段时间后，材料将再次获得刚度，虽然没有初始刚度那样大，

其行为与原状土类似。但也有试验研究发现，某些胶结强度较高的天然胶结钙质土的门槛值并不位于松散钙质土的正常压缩直线上，且与人工胶结钙质土的正常压缩线也不再重合。

根据 Yamamuro 等^[28]的研究成果，等向压缩过程中的颗粒破碎现象可以由压缩曲线的下弯段来识别。目前，还没有其他公认的方法能从等向压缩曲线上鉴别出颗粒破碎现象。同时，胶结剂含量及密度对各向等压过程中的颗粒破碎的影响也还尚未得到彻底的研究。因此，对门槛值的力学机制的研究工作尚待深化。

3.3 三轴剪切特性

三轴压缩条件下，天然胶结钙质土的最显著的特点是存在一个恒定压力下的结构破坏阶段，结构破坏段的起始点有明确的定义，这样使得对材料的行为的描述变得相对简单。一般说来，可以将应力-应变行为分为 3 个阶段^[22]，如图 1 所示。

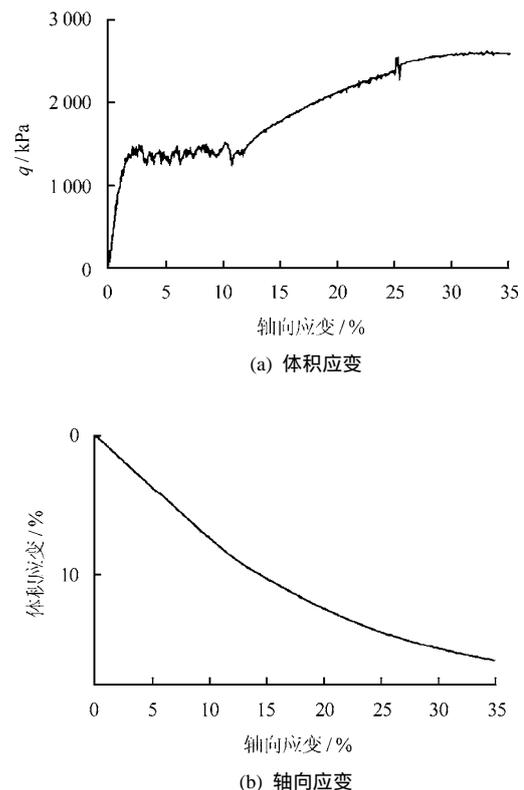


图 1 三轴剪切试验 ($\sigma'_3 = 900$ kPa)
Fig.1 Triaxial test ($\sigma'_3 = 900$ kPa)

- (1) 初始完全可逆的弹性阶段（类似于岩石等材料^[28]）；
- (2) 结构破坏阶段，此阶段应力保持恒定不变（由岩石向土性材料的过渡）；
- (3) 硬化或软化阶段，在 $p-q'$ 平面内其结束点

位于线性的极限状态轨迹上(恒压下,由于颗粒破碎的原因,体应变随着轴向应变而增加)(类似于土性材料);

排水条件下,偏应力($q = (\sigma'_1 - \sigma'_3)$)与轴向应变(ε_a)以及体应变(ε_v)与轴向应变(ε_a)间的关系曲线表明,屈服之前,偏应力与轴向应变间呈线性关系,材料呈弹性。轴向应变线性增加,径向应变在偏应力达到屈服应力的50%之前也为线性增加,之后偏离,偏离线性的点标志着纯弹性行为的边界,被称为弹性极限。对弱胶结试样,有效应力路径方向的明显改变点可以作为弹性极限的边界。对于强胶结试样,曲线缓慢偏离线性,当偏应力达到50%左右的屈服应力时,弹性极限也可以确定。弹性极限对应的典型应变量为0.1%。之后径向应变保持不变,体应变开始从线性偏离,该偏离点对应于屈服点。屈服点是刚性小应变的界线,达到屈服时的剪应变都小于0.3%,曲线偏离线性的行为与弱胶结以及胶结点在高应力下的破碎有关,屈服时胶结会发生快速的渐进性破坏,屈服后轴向应变及径向应变快速增加。

屈服后,进入第2阶段,偏应力维持不变,但轴向应变稳定增加。在有伺服控制的条件下, ($q = (\sigma'_1 - \sigma'_3)$) - 轴向应变(ε_a)平面内应力-应变曲线会形成一个明显的锯齿状台阶,这一特征想必与胶结破碎有关。

在经过相对大的一段应变之后进入第3阶段,材料产生应变硬化或软化,应变量要达到很大值时偏应力才会达到最大值。

整个过程中不论结构破坏与否,体应变始终处于压缩过程中(甚至于轴向应变达到35%以上时还是如此),且直到第3阶段开始,体应变-轴向应变间都呈线性关系。这可能是由于钙质土颗粒一直处于破碎状态的原因,所以天然胶结钙质土的应力-应变行为不可能达到常规土力学意义上的临界状态。

围压会对天然胶结钙质土应力-应变行为产生显著的影响。研究发现^[22],当围压小于400 kPa时,结构破坏的门槛值与峰值相对应。围压越低,峰值越明显。同时峰值后,围压越低,剪胀(低压缩性)越明显。峰值总是与破裂面(剪切带)的形成相对应。

当围压 $\sigma'_3 > 400$ kPa且小于各向等压条件下的结构破坏压力时(相对于 $\sigma'_3 = 2\ 500$ kPa),其力学行为与前者相似。但结构破坏对应的门槛值并不是随着围压的增加而单调增加,最大围压下对应的结

构破坏门槛值也可能最小。而最大偏应力值基本上与各向等压有效应力成正比,但初始刚度几乎与围压无关。

压缩量也随有效围压而增加,但压缩速率逐渐减小。同时材料达到硬化时的孔隙比基本上是相似的,与围压及初始孔隙比的大小无关,因此,可以认为,材料出现硬化行为时钙质土颗粒彼此呈接触状态。

围压大于各向等压门槛值时,剪切一开始就伴随着硬化的产生。其初始刚度相比低围压状态要小很多,体应变随着偏应力而增加,甚至偏应力达到最大值后也是这样,这可能标志着钙质土颗粒处于持续的破碎过程中。

研究发现,不排水三轴试验的结果与排水条件下的试验结果相似,但弹性区的边界不像排水试验那样易于确定。但随着侧限应力的增加,不排水试验中应变会出现由软化到硬化的转变。

$\sigma'_3 = 400$ kPa值接近于两种变形行为的转变点,因此,可以简单地将该围压值作为脆性向柔性行为的转变点。

不排水试验不像排水试验那样屈服应力随剪切模量增加,其屈服应力与剪切模量不相关。且屈服后,试样形成明显的劈裂面,偏应力明显减小,同时应力比也减小。试验结束时的应力始终未达到最大值,因而也就无法确定出极限状态。

应力路径试验结果显示,初始阶段的剪切行为似乎与应力路径无关。但其体应变行为却受到应力路径的影响,即使在初始各向等压阶段,其影响也难以与密度及抗拉强度间建立起对应关系,Airey^[7]认为,试验结果系试样的均一性、扰动程度及蠕变等因素影响的综合体现。

4 人工胶结钙质土试样制备

由于很难获得足够量的天然胶结钙质土平行试样来进行单一参数的影响研究,因此,人们将注意力转移到人工胶结钙质土试样的制备上。大量胶结岩土材料的试验证明^[29],控制材料力学响应最重要的因素是密度和胶结强度。因此,矿物组成、密度及胶结度与天然胶结钙质土极其相似的人工样品应具有相似的力学性质。最常采用的胶结剂就是水泥^[8]或石膏^[9]等通用胶结材料,通过改变胶结剂的加入量来调整胶结强度。但研究证明,这些细颗粒胶结剂地加入会改变土的级配和矿物组成,从而影响土的密度。部分研究者采用尽量减小改变级配的方法来降低对土的性质影响^[9, 29],但至目前,还没有

一个简单的方法判断胶结性状对土性的专门影响。石膏和其他颗粒胶结剂的另外一个问题是，要使试样达到天然胶结土的强度，试样必须经过高压压密，然而高压下颗粒的破碎又会影 响级配和土的后续响应。同时高压下无法制备出孔隙和胶结结构与天然胶结钙质土（大孔隙比、高强度等）相似的人工胶结试样^[29]。

Ismail 等^[30]最近开发出一项称为 CIPS 的新型专利技术，这种方法是采用冲刷 CIPS 液体的方法在土粒上沉淀一层方解石，从而使土粒相互胶结，连续冲刷 CIPS 溶液使胶结逐渐增强，直至制备出符合要求的试样。该方法模拟了地质沉积过程，用时只需几分钟或几小时。这种技术对钙质土胶结试样的制备尤其有优势，因为胶结剂的矿物成分与天然原状土相同，同时无需高压就能制备出高孔隙比及高强度的试样。每次冲洗胶结剂的用量依土样类型而定，例如，对于纯净石英砂，一次 CIPS 的冲洗会使土的密度增加大约 0.5%，对于均质钙质砂增加大约 3%，对于粉砂（取自澳大利亚西北部的古德温附近的近海）增长可达 8%。这些差异系土的比表面积不同地反映。

CIPS 方法中会加入两种试剂，试剂混合后会在颗粒表面生成以方解石形式存在的 CaCO_3 。这一方法实际上已被开发成（并且将可进一步开发成）一种环境友好的灌浆方法，CIPS 方法的优点还在于连续地冲洗下试样的渗透性会保持缓慢的降低，这样就可以进行多次的液体冲刷。

通过开展与天然胶结钙质土、石膏及水泥胶结钙质土的对比试验研究^[10, 31-34]发现，CIPS 方法制备的试样可以较好地模拟天然胶结钙质土的物理力学行为。Ismail 等^[30]的初步研究结果表明，在给定的密度和强度下，CIPS 制备的胶结试样能够更充分地展现出天然材料的脆性。

4.1 密度、胶结度及围压对应力-应变行为的影响

对干重度为 13~19 kN/m^3 、胶结剂含量为 0~20% 的不同组合条件下的人工胶结试样的试验研究发现^[34-36]，当干重度和围压一定，但围压小于各向等压的屈服压力时，胶结剂含量的增加会引起峰值强度和刚度的显著增长，但剪胀量的增长较小，达到破坏对应的应变有所减小。而当胶结剂含量一定时，强度的增加率随着围压和密度的增加而减小。

当围压大于各向等压屈服压力时，胶结产生破坏，试样的应力-应变行为相似且峰值强度几乎相等。胶结度对体积变形和孔隙水压力的影响较小。然而，受胶结性状的影响，胶结样的峰值剪胀率和峰值强

度不会同时出现，这一点已得到研究证实^[37-38]。

当胶结度和围压不变时，密度的增加会引起峰值强度的显著增加，从剪缩到显著的剪胀再到应变软化，这一演变规律与表观超固结比随密度增加的规律是一致的。随着密度的增加产生剪胀的应力范围变大，不同密度试样从剪胀到剪缩的表观超固结比值几乎相等，同时胶结度对强度和刚度的影响随密度增加而减小。

对松散的可压缩性土而言，其常规的力学行为可以采用临界状态理论加以解释。然而，在低围压（即高表观超固结比）下，胶结土的胶结效应相对显著，此时的力学行为显然不能用临界状态理论来解释^[39]。

4.2 密度及胶结度对屈服的影响

对胶结土而言，在应力空间中应该有一个区域，在这个区域里土只会发生弹性变形，区域边界的大小由屈服轨迹所决定。屈服轨迹随胶结度和密度增大而向外扩展^[35]。人工胶结剂的添加会提高有效前期固结压力（各向等压屈服应力）并使正常压缩线右移，即使在加入胶结剂但无胶结的情况下，正常压缩线的右移也会使屈服轨迹向外扩大。为了能够更加清晰地揭示胶结的作用，将屈服轨迹按表观前期固结压力 p'_c 进行归一化，结果发现，胶结剂的添加对屈服轨迹的形状和大小均有重大影响。部分研究者认为，可能是由于粒状胶结剂材料的添加改变了试样级配的结果，但也有试验表明，添加细颗粒前、后的屈服轨迹是相似的。不同密度的屈服轨迹采用表观前期固结压力 p'_c 归一化后发现，胶结样的屈服轨迹的形状随密度而变化。

然而，胶结剂含量的增加对其力学性质的影响具有不确定性。例如，当干重度为 16 kN/m^3 时，添加 20% 胶结剂后会使前期固结压力增加 60%，而干重度为 13 kN/m^3 时同样添加 20% 胶结剂后前期固结压力只增加 30%。还比如，单轴压缩和拉伸试验发现，其强度随胶结剂含量和密度的增加而增加，然而，其强度和刚度增量与表观前期固结压力的变化不成比例，因此，为了达到提高强度的目的，随着密度的增加可以适当减少胶结剂的添加量。Huang 等^[40]对胶结试样开展的显微结构研究也发现，密度越大，粒间接触越多，而胶结剂颗粒就越多地充填于大颗粒间的孔隙中，试验表明，此种胶结方式相比粒间胶结其强度要低。这样可以解释密度会引起屈服轨迹形状的改变试验结果，因为屈服应力与胶结点的强度直接相关。

对天然胶结钙质土而言，由于密度或胶结度相

同的平行试样数量不足,使得试验结果的离散性偏大。干密度为 14 kN/m^3 、抗拉强度为 200 kPa (胶结程度)取自澳大利亚的天然胶结钙质土的试验结果显示^[37],其屈服轨迹与干重度为 13 kN/m^3 ,胶结剂含量为 20%的人工胶结钙质土相类似,说明了天然胶结钙质土与人工胶结钙质土具有足够的相似性。

对于一些天然胶结钙质土的研究还发现,其屈服轨迹受结构面或层面与主应力方向间夹角的大小所控制。对取自 Marsala 的天然胶结钙质土试验结果显示,主应力方向垂直或平行于层面时,其屈服轨迹的形状与大小截然不同^[41]。

4.3 破坏状态

对人工胶结钙质土试样的研究发现^[31],干重度为 13 kN/m^3 、胶结剂含量从 0 到 20%时,其极限破坏轨迹呈双线段状,高围压时 $c' = 0$, $\varphi' = 39.5^\circ$;低围压时 $\varphi' = 28^\circ$, c' 值随胶结度和干密度增加而增加。

天然胶结钙质土试样由于在胶结度和密度上的均一性较差,其极限破坏轨迹不存在上述规律。天然样的全部研究成果显示,其极限破坏轨迹接近残余应力比,此时 $c' = 0$,内摩擦角介于 $\varphi' = 39^\circ$ ^[9]和 $\varphi' = 45^\circ$ ^[6-7]之间。

对人工胶结钙质土试样的试验证明,其临界状态线在 $v - p'$ 空间内为一直线^[9, 40]且该直线与各向等压直线相平行。而天然胶结钙质土的临界状态线在高应力下与正常固结线趋于分离^[6-7]。

为了定量评价密度和胶结度对极限摩擦角的影响,可以将极限摩擦角表示为^[42]

$$\varphi'_p = \varphi'_{cv} + nI_r \quad (1)$$

式中: I_r 为剪胀指数,与相对密度和有效应力水平有关:

$$I_r = I_D^*[Q - \ln(p') - R] \quad (2)$$

式中: n 、 Q 、 R 为模型参数; I_D^* 为修正的相对密度,考虑了轻度胶结的影响。

4.4 小变形特征

在土的应力空间内,屈服轨迹将弹性区和弹塑性区分开。然而,研究表明,即使在屈服轨迹之内许多土也能表现出明显的非弹性特性,而胶结土应该呈现出更大范围的线弹性特征。但迄今为止,关于此问题的试验研究成果极少,其结果似乎也显示出与简单弹塑性模型的矛盾。

在静态试验条件下,人工胶结钙质土^[9, 35]和天然胶结钙质土^[7, 9, 43]表现出近似线性的应力-应变关

系。天然胶结钙质土的屈服轨迹内存在一个小的弹性范围^[7],由于试验中未对应变进行足够精确的测量,所以不能确定其应力-应变关系的线性与否。然而,其他胶结材料的静态试验结果表明,材料的非线性特性在变形的初期就表现的十分明显^[44],人工胶结钙质土在进行循环加载试验时也得出同样的结论^[35]。即使线弹性特征明显,一定围压下的剪切模量也仅为剪切波速测得值的 1/10,同时也比循环加载试验中的测得值小很多^[44]。

事实上,尽管应力状态刚好位于静态试验的屈服轨迹内,但在循环加载条件下也没有发现线弹性区的存在。不过,对不同胶结度、密度和围压的人工胶结钙质土样进行静态试验研究发现,其行为与非胶结土相似,其剪切模量是围压、超固结比和密度的函数,且随着胶结度而增长。当 $p' < p'_c$ 时,胶结剂含量的微小改变就可以使剪切模量产生显著的变化,中等胶结度的天然胶结钙质土的剪切模量是相似密度的松散土的 2.2 倍,而体积模量的变化不受胶结度的影响,而是与平均有效应力呈线性关系。

在对意大利 Gravina di Puglia 天然胶结钙质土的小应变性状(应变小于 0.05%)研究中^[43],通过对三轴试验设备进行专门改造,试样的局部应变测量系统采用一个径向测量带和一套专门研制的测斜仪,使得量测应变的精度可以达到 0.001%。另外,为了防止样品在加载过程中倾斜,在样品顶部涂上石膏使得样品和加压板之间的应力分布更均匀。研究发现,Gravina 天然胶结钙质土的应力-应变关系基本上是线弹性的,然而由于天然胶结钙质土的平行试样数量不足,预想通过一系列试验确定刚度和围压的关系就变得十分困难。试验还发现,天然胶结钙质土在屈服前的线性响应与添加石膏的人工胶结土的非线性形成鲜明的对比,这表明人工胶结土不能重现天然胶结土屈服前的力学行为。而人工胶结土与澳大利亚西北近海的天然钙质砂在循环加载的响应上却有很多相似之处,这说明无论是人工胶结样还是天然胶结样,很显然这一领域还有很多的试验研究工作尚需开展。

对 CIPS 制备的胶结试样的小应变刚度进行的初步研究表明^[45-46],无侧限抗压强度 q_{\max} 随胶结程度而增加, E_{\max} 随胶结度的增加而减小。刚度与强度之比 (E_{\max}/q_{\max}) 随强度的增加快速减小,从 $q_{\max} = 1 \text{ MPa}$ 的 2 700 降到 $q_{\max} = 20 \text{ MPa}$ 的 900。应力-应变曲线的线性同样随胶结度的增加而增加,这种线性可以用破坏点的割线刚度 E 与初始切线刚度 E_{\max} 的比值表示。CIPS 溶液冲刷 5 次或者 5 次以

上的胶结样, E/E_{\max} 不小于 0.95, 冲洗 1 次时其比值为 0.7。试验结果表明, 采用 CIPS 制备的胶结钙质土试样来研究天然胶结钙质土的诸多小应变特性是可行的。

4.5 加荷速率的影响

尽管许多研究者已经认识到了粒状材料的力学行为有明显的时间依赖性, 含有大量易碎颗粒的钙质土的力学行为的时间依赖性将更为明显, 只是此方面的研究工作还相对薄弱。已有的研究成果表明, 在达到屈服状态前、后产生的胶结渐进破坏过程系胶结土的主要蠕变机制之一。

对人工胶结土的加荷速率和蠕变等特性的研究表明^[40], 当围压小于等压固结屈服应力时, 蠕变系数 C_{α} 随围压增加而增大, 随后维持不变。松散砂的 C_{α} 值相对较高, 且随石膏含量增加而增大, 这说明石膏的添加会高估天然胶结钙质土的蠕变和加载速率效应。

不排水条件下破坏时间与偏应力的关系显示, 干重度为 13 kN/m^3 、石膏含量为 20% 的人工胶结试样, 在围压为 300 kPa 大约持续 5 min 后即达到破坏。在 50% 峰值强度下也会发生不排水蠕变破坏, 破坏时的剪应变为 11% 左右, 很显然, 此时的胶结结构已经破坏, 即使偏应力仅为峰值强度的 30%, 200 d 的应变也会累积至 1%。因此, 石膏的添加可能是蠕变量增大的部分原因, 但对天然胶结钙质土是否具有类似的蠕变规律及加载速率效应值得进一步研究。

4.6 循环加载特性

天然胶结钙质土^[6, 24]和人工胶结钙质土^[36, 47-48]的不排水循环加载三轴试验结果显示, 破坏时的应力远低于单调加载的峰值应力, 破坏时的轴向应变远大于单调加载峰值应变。初始的几个加载循环后, 孔隙水压力急剧增长, 然后以稳定的较小的速率发展, 直到接近破坏时孔隙水压力开始减小, 孔隙水压力减小的同时伴随着轴向累积应变速率的增加。因此, 在低应力水平下要想达到某个应力比, 就必须使试样产生更高的超孔隙水压力, 这种现象在天然胶结钙质土试验中也有发现^[24], 这就意味着可能存在一个临界应力比, 当试样达到临界应力比时胶结结构会发生显著的破坏。人工胶结钙质土的临界应力比为 $q/p' = 2.56$ ^[48]。

研究发现, 加载频率、应力增量、平均应力是不排水条件下影响破坏循环次数的 3 个主要参数。同时, 排水会对该循环次数产生重大影响, 也会增加循环后期试样的单调加载强度^[47]。这意味着在不

排水循环加载试验中进行排水将会对胶结土产生加固的效果, 会使其不排水抗剪强度值提高。

比较人工胶结钙质土与澳大利亚西北近海的天然胶结钙质土的试验结果发现^[24], 在胶结度和密度相似的情况下, 两者的疲劳曲线是相似的。然而, 天然胶结钙质土的试验数据仍有相当程度的离散, 这可能与选取的单调加载强度的合理性有关, 同时, 也与两种试样的密度、试验方法以及加载频率的不同有关。

5 研究热点及展望

胶结钙质土是一种软岩硬土材料, 由于其颗粒及胶结物的化学成分均为碳酸钙, 使其具有大孔隙、低强度的特征, 从而表现出不同于常规胶结土或结构性土的岩土工程特性。因此, 开展胶结钙质土的岩土工程性质研究, 不仅可以丰富岩土力学理论, 对当下我国正要大规模开展的南海工程建设也具有指导意义。

通过上述对胶结钙质土试验研究成果的归纳与综述可见, 截止目前, 对胶结钙质土的研究工作主要集中于采用常规的试验手段开展了天然胶结钙质土及人工胶结钙质土的基本力学性质的研究工作, 初步弄清了主要的岩土参数包括密度、围压及胶结度等对其应力-应变行为的影响规律。由于材料本身及其所处海洋环境的复杂性, 仍有诸多本质性的问题有待研究, 笔者建议至少应从以下几个方面开展更深入的工作。

(1) 高应力下的应力-应变行为研究。随着大型海洋结构物的不断涌现, 桩端的最大应力值可达到 350 MPa 左右^[49], 然截至目前, 对高压下胶结钙质土的力学特性的研究尚不多, 同时对高压下的诸多问题尚存在一些分歧, 如试验设备的改进方法、试样制备方法、破坏包线的形状、临界状态方法的有效性与否、胶结剂-砂间的胶结破碎、颗粒破碎及胶结剂对其力学行为的影响等。而对高应力下胶结钙质土的压缩及抗剪强度特性的综合了解又是进行海洋深基础设计所必须的。

(2) 胶结钙质土的微细观研究。胶结钙质土的力学行为直接受其微观结构的控制, 微观结构即颗粒间的几何排列方式及颗粒间的作用力^[50]。颗粒-胶结体系在不均匀应力及胶结剂下各组元间的微观尺度上的相互作用, 并伴随着高压下颗粒破碎和胶结破坏的特征以及微观现象与宏观行为间的物理联系的建立等均未得到深入的研究。这一工作将有助于本构模型的改进, 使得对工程行为的预测更为准

确。

(3) 人工胶结钙质土试样制备技术改进。由于天然胶结钙质土具有显著的空间各向异性, 获得足够数量平行试样十分困难, 再加之目前对其胶结度等参数尚无法进行定量测试等, 因而制约了开展岩土参数及加载方式影响其力学行为的系统研究工作的推进。因此, 采用人工制备胶结钙质土试样就成了必然选择, 然而, 人工胶结试样与天然试样的相似性一直是个值得探讨的问题, 一方面应该继续开发新的模拟天然条件的人工试样制备技术; 另一方面还要对常规的试样制备方法(如加入水泥、石膏等胶结剂制备试样)中胶结剂的加入对力学行为的影响(如蠕变性等)开展更加深入的研究。

(4) 天然胶结钙质土的原位测试试验研究。由于天然胶结钙质土的结构性强, 极易受到取样等操作过程的扰动, 因此, 室内试验成果的可靠性也一直受到不同程度的质疑。因此, 建议在现场条件允许的情况下, 开展天然胶结钙质土的原位测试试验研究, 从专用仪器设备的研制到试验成果的解释等方面均有大量的工作亟需开展。

参 考 文 献

- [1] McCLELLAND B. Calcareous sediments and engineering enigma, engineering for calcareous sediments[M]. Rotterdam: [s. n.], 1988.
- [2] KING R, LODGE M. North West Shelf development——The foundation engineering challenge[C]//Proc. Int. Conf. Calcareous Sediments. [S. l.]: [s. n.], 1988, 333 - 342.
- [3] FAHEY M, JEWELL R J. Model pile tests in calcarenite[C]//Proc. Int. Conf: Calcareous Sediments, 1988, 555 - 564.
- [4] RENFREY G E, WATERTON C A, VAN GOUDOEVER P. Geotechnical data used for the design of the North Rankin 'A' platform foundation[C]//Proc. Int. Conf. Calcareous Sediments, 1988, 343 - 356.
- [5] WILLIAMS A F, VAN DER ZWAAG G L. Analysis and evaluation of grouted section tests[C]//Proc. Int. Conf. Calcareous Sediments. [S. l.]: [s. n.], 1988, 493 - 502.
- [6] CATER J P, JOHNSTON I W, FAHEY M, et al. Triaxial testing of North Rankin calcarenite[C]//Engineering for Calcareous Sediments: Proceedings of the International Conference on Calcareous Sediments. Rotterdam: Balkema AA, 1988, 2: 515 - 530.
- [7] AIREY D W. Triaxial testing of naturally cemented carbonate soil[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1993, 119(9): 1379 - 1398.
- [8] ALLMAN M A, POULOS H G. Stress-strain behaviour of an artificially cemented calcareous soil. Engineering for calcareous sediments[C]//Proceedings of the International Conference on Calcareous Sediments. Perth, Western Australia: Rotterdam, 1988, 1: 51 - 60.
- [9] COOP M R, ATKINSON J H. The mechanics of cemented carbonate sands[J]. **Geotechnique**, 1993, 43(1): 53 - 67.
- [10] ISMAIL M A, JOER H A, RANDOLPH M F. Sample preparation technique for artificially cemented soils[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2000, 23(2): 171 - 177.
- [11] 张明书. 关于海滩岩几个问题的初步研究[J]. **海洋地质与第四纪地质**, 1985, 5(2): 105 - 112.
ZHANG Ming-shu. On problems of beachrock[J]. **Marine Geology & Quaternary Geology**, 1985, 5(2): 105 - 112.
- [12] 孙金龙, 徐辉龙. 中国的海滩岩研究与进展[J]. **热带海洋学报**, 2009, 128(2): 103 - 109.
SUN Jin-long, XU Hui-long. Advances of beach rock research in China[J]. **Journal of Tropical Oceanography**, 2009, 128(2): 103 - 108.
- [13] 赵希涛, 沙庆安, 冯文科. 海南岛全新世海滩岩[J]. **地质科学**, 1978, (2): 163 - 173.
ZHAO Xi-tao, SHA Qing-an, FENG Wen-ke. Holocene beachrocks at Hainan island[J]. **Scientia Geologica Sinica**, 1978, 2: 163 - 173.
- [14] 耿爱琴, 刘效曾. 海南岛南岸海滩岩的胶结作用及稳定同位素组成[J]. **矿物岩石**, 1990, 10(3): 67 - 72.
GENG Ai-qin, LIU Xiao-zeng. Cementation and isotope composition of beach rock at south coast of Hainan island[J]. **Mineralogy and Petrology**, 1990, 41(3): 67 - 72.
- [15] 孙志鹏, 许红, 王振峰, 等. 西沙群岛海滩岩类型及其油气地质意义[J]. **海洋地质动态**, 2010, 26(7): 1 - 6.
SUN Zhi-peng, XU Hong, WANG Zhen-feng, et al. Types of beachrocks in Xisha islands and its geological significance of petroleum[J]. **Marine Geology Letters**, 2010, 26(7): 1 - 6.
- [16] 朱长歧, 周斌, 刘海峰. 天然胶结钙质土强度及微观结构研究[J]. **岩土力学**, 2014, 35(6): 1655 - 1663.
ZHU Chang-qi, ZHOU Bin, LIU Hai-feng. Investigation

- on strength and microstructure of naturally cemented calcareous soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(6): 1655 - 1663.
- [17] FOOKES P G, HIGGINBOTTOM I E. The classification and description of near-shore carbonate sediments for engineering purposes[J]. **Géotechnique**, 1975, 25(2): 406 - 411.
- [18] CLARK A R, WALKER B F. A proposed scheme for the classification and nomenclature for use in the engineering description of Middle Eastern sedimentary rocks[J]. **Géotechnique**, 1977, 27(1): 93 - 99.
- [19] DEMARS K R, NACCI V A, KELLY W E, et al. Carbonate content: an index property for ocean sediments[C]//Proc. 8th OTC Conf. Houston: [s. n.], 1976, 97 - 106.
- [20] 李毓英. 南沙群岛太平岛地质概况[J]. 地质论评, 1948, 8(3): 333 - 339.
LI Yu-ying. The geology survey on Taiping reef island in South China Sea[J]. **Geology Review**, 1948, 8(3): 333 - 339.
- [21] EMERY K O, TRACEY J I J R, LADD H S. Geology of Bikini and nearby atolls[R]. [S. l.]: Geological Survey Professional Paper, 1954, 260A: 265.
- [22] LAGIOIA R, NOVA R. An experimental and theoretical study of the behaviour of a calcarenite in triaxial compression[J]. **Geotechnique**, 1995, 45(4): 633 - 648.
- [23] CUCCOVILLO T, COOP M. On the mechanics of structured sands[J]. **Geotechnique**, 1999, 49(6): 741 - 760.
- [24] AIREY D. W, FAHEY M. Cyclic response of calcareous soil from the northwest shelf of Australia[J]. **Geomechanics**, 1991, 41(1): 101 - 122.
- [25] BURLAND J B. "Small is beautiful"-the stiffness of soils at small strains[J]. **Can. Geotech. J.**, 1989, 26: 499 - 516.
- [26] BRESSANI L A, VAUGHAN P R. The effect of laboratory test technique on the measured properties of weakly bonded soils[C]//Proc. 12th Int. Conf. Soil Mech. [S. l.]: [s. n.], 1989, 17 - 20.
- [27] COOP M R. The mechanics of uncemented carbonate sands[J]. **Geotechnique**, 1990, 40(4): 607 - 626.
- [28] YAMAMURO J A, LADE P V. Drained sand behaviour in axisymmetric tests at high pressures[J]. **Journal of Geotechnical Engineering-ASCE**, 1996, 122(2): 109 - 119.
- [29] ISMAIL M A, JOERH A, SIM W H, et al. Effect of cement type on shear behavior of cemented calcareous soil[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2002, 128(6): 520 - 529.
- [30] ISMAIL M A, JOER H A, RANDOLPH M F. Sample preparation technique for artificially cemented soils[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2000, 23(2): 171 - 177.
- [31] PELLEGRINO A. Mechanical behaviour of soft rocks under high stresses[C]//Proc. 2nd Int. Congr. Rock Mech. [S. l.]: [s. n.], 1970, 173 - 180.
- [32] LEROUEIL S, VAUGHAN P. The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks[J]. **Geotechnique**, 1990, 40(3): 467 - 488.
- [33] RANDOLPH M F, JOER H A, AIREY D W. Foundation design in cemented soils[C]//The Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks, Proceedings of the 2nd International symposium on Hard Soils—Soft Rocks. Naples, Italy. Rotterdam: Balkema A A, 1998, 3.
- [34] HUANG J T, AIREY D W. Properties of artificially cemented carbonate sand[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1998, 124(6): 492 - 499.
- [35] HUANG A, HSU S, KUHN H. A multiple purpose soil testing apparatus[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 1994, 17(2), 227 - 232.
- [36] SHAMBHU S S, FAHEY M. Deformation characteristics of two cemented calcareous soils[J]. **Can. Geotech. J.**, 2004, 41: 1139 - 1151.
- [37] CARTER J P, AIREY D W. The engineering behaviour of cemented marine carbonate soils[M]. New Delhi: Oxford and IBH Publishing Company, 1994, 65 - 101.
- [38] CLOUGH G W, SITAR N, BACHUS R C, et al. Cemented sands under static loading[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division-ASCE**, 1981, 107(6): 799 - 817.
- [39] CARTER J P, AIREY D W, FAHEY M. A review of laboratory testing of calcareous soils[C]//Proceedings of the Second International Conference on Engineering for Calcareous Sediments. Rotterdam: Balkema A A, 1999, 2: 401 - 432.

- Soil Mech. Found. Div., ASCE**, 1964, 90(5): 87 - 102.
- [2] BJERRUM L. Embankments on soft ground[C]//Proc. Special Conference on Performance of Earth and Earth Supported Structures. [S. l.]: ASCE, 1972: 1 - 54.
- [3] 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 366 - 409.
- [4] JTJ017 - 96 公路软土地基路堤设计与施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社.
- [5] 余湘娟, 殷宗泽, 董卫军. 荷载对软土次固结影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6): 913 - 916.
YU Xiang-juan, YIN Zong-ze, DONG Wei-jun. Influence of load on secondary consolidation deformation of soft soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(6): 913 - 916.
- [6] 余湘娟, 董卫军, 殷宗泽. 软土次固结系数与压力关系[J]. 河海大学学报, 2008, 36(1): 63 - 66.
YU Xiang-juan, DONG Wei-jun, YIN Zong-ze. Relationship between loads and secondary consolidation coefficients of soft clay soils[J]. **Journal of Hohai University (Natural Sciences)**, 2008, 36(1): 63 - 66.
- [7] YIN Jian-hua, GRAHAM J. Elastic visco-plastic modelling of one-dimensional consolidation[J]. **Geotechnique**, 1996, 46(3): 515 - 527.
- [8] 殷宗泽, 张海波, 朱俊高, 等. 软土的次固结[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 521 - 526.
YIN Zong-ze, ZHANG Hai-bo, ZHU Jun-gao, et al. Secondary consolidation of soft soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(5): 521 - 526.
- [9] 于新豹, 刘松玉, 缪林昌. 连云港软土蠕变特性及其工程应用[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 1001 - 1006.
YU Xin-bao, LIU Song-yu, MIAO Lin-chang. Creep properties of Lianyungang soft clay and its engineering application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(6): 1001 - 1006.
- [10] 李国维. 汕揭高速公路沉降与稳定现场观测总结报告[R]. 南京: 河海大学, 2007.

上接第 319 页

- [40] HUANG J T, AIREY D W. Effects of cement and density on artificially cemented sand[J]. **Geotechnical Engineering of Hard Soils and Soft Rocks**, 1993, 1: 553 - 560.
- [41] ARCÉS M, NOCILLA N, AVERSA S, et al. Geological and geotechnical features of the 'Calcarene di Marsala', The geotechnics of hard soils-soft rocks[C]//Proceedings of the 2nd International Symposium on Hard Soils-Soft Rocks, Naples, Italy. Rotterdam: Balkema A A, 1998, 1: 15 - 25.
- [42] BOLTON M D. The strength and dilatancy of sands[J]. **Geotechnique**, 1986, 36(1): 65 - 78.
- [43] LAGIOIA R, BORLAND J B, DELAGE P. Pre-yield behaviour of Gravina calcarenite at small strains. The Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks[C]//Proceedings of the 2nd International Symposium on Hard Soils-Soft Rocks, Naples, Italy. Rotterdam: Balkema A A, 1998b, 1: 629 - 636.
- [44] TATSUOKA F, SHIBUYA S. Deformation characteristics of soils and rocks from field and laboratory tests[C]//Proceedings of the 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Bangkok: South-East Asia Geotechnical Society, 1991, 2: 101 - 170.
- [45] YEOH C K, AIREY D W. Drained cyclic response of an artificially cemented calcareous sand[M]. Rotterdam: Balkema A A, 1998, 2: 935 - 942
- [46] MERRITT A. Characteristics of CIPS cemented sands[D]. Australia: Department of Civil Engineering, The University of Western Australia. 1988.
- [47] ZHAO M M, AIREY D W. Fatigue testing of an artificially cemented calcareous sand[C]//Proceedings of the 2nd International Offshore and Polar Engineering Conference. San Francisco: [s. n.], 1992, 1: 424 - 429.
- [48] YEOH C K, AIREY D W. Undrained cyclic loading of a cemented sand, pre-failure deformation of geomaterials[M]. Rotterdam: Balkema A A, 1994, 1: 95 - 100.
- [49] LADE P V, YAMAMURO J A, BOPP P. Significance of particle crushing in granular materials[J]. **Journal of Geotechnical Engineering-ASCE**, 1996, 122(4): 309 - 316.
- [50] WAN R, GUO P. Effect of microstructure on undrained behaviour of sands[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2001, 38(1): 16 - 28.