

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.04.17

泸定大渡河桥冰碛土的结构及现场剪切试验研究

程 强¹, 郭喜峰²

(1. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610041; 2. 长江科学院重庆分院, 重庆 400026)

摘要: 泸定大渡河桥康定岸分布巨厚层冰碛土, 为研究土的抗剪强度特性, 在不同位置和深度进行了 6 组现场剪切试验, 基于地质勘察和试验结果分析土的结构特征、剪切强度和变形特性及其与土的结构的关系。研究表明: 冰碛土的颗粒以粗粒、巨粒粒组为主, 骨架颗粒呈悬浮状, 混杂、无序堆积, 骨架间充填杂基, 形成骨架悬浮密实结构。根据颗粒组成和骨架风化程度, 划分为骨架悬浮密实结构、软化骨架悬浮密实结构、砂砾土富集结构、大块石包绕结构等 4 种细观结构类型。冰碛土剪切破坏主要有剪切破碎带、包绕块石边界、锯齿状剪切和切穿软化骨架等 4 种模式, 剪切荷载作用下线弹性变形阶段明显, 剪切刚度大, 初始屈服历时短。颗粒骨架和杂基形成的悬浮密实结构, 是冰碛土强度与变形特性的内在控制因素, 剪切荷载作用下骨架颗粒与具有一定胶结的基质间相互作用, 剪切破坏时表现为基质的压碎与骨架的变位。骨架颗粒强度、大骨架颗粒分布、基质胶结程度的不同, 对冰碛土强度和变形特性都构成一定的影响。土的抗剪强度、剪切刚度和剪胀性随骨架强度和基质胶结程度的提高而增大, 而延性随之变差。

关键词: 冰碛土; 土体结构; 抗剪强度; 变形破坏机制; 现场剪切试验

中图分类号: TU459⁺.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)04-0126-08

Soil structure and in-site shear test of moraine soil near the Xingkang Bridge over the Daduhe River in Luding

CHENG Qiang¹, GUO Xifeng²

(1. Sichuan Provincial Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Co., Ltd, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. Chongqing Branch, Changjiang River Scientific Research Institute, Chongqing 400026, China)

Abstract: A thick layer of moraine sediments exists on the Kangding bank near the Xingkang Bridge over the Daduhe River in Luding along the Ya'an-Kangding Expressway. In order to study the shear strength characteristics of the moraine soils, six groups of field shear tests were carried out at different locations and depths. Based on the geological survey and test results, the structural characteristics, shear strength and deformation characteristics of the moraine soils and their relationship with soil structure were analyzed. The results show that the grain size of the moraine soil is mainly composed of coarse grain and huge granular group. Soil skeleton particles are suspended, mixed, disorderly accumulated and filled with matrix between the skeleton, forming a skeleton suspended compact structure. According to the composition of particles and weathering degree of skeleton, four types of mesoscopic structure can be divided, such as the suspended skeleton dense structure, weathered suspended skeleton dense structure, lenticular sand-gravel enrichment structure and boulder enveloped structure. There are four main shear failure modes of moraine soil: shear fracture zone, enclosing boulder boundary, serrated shear and cutting through weathering framework. Under

收稿日期: 2018-10-02; 修订日期: 2019-02-19

基金项目: 四川省交通运输科技项目“巨厚冰碛层上修建特大型桥梁基础稳定性研究”(2014 C-1); 交通运输部建设科技项目“四川藏区高海拔高烈度条件下公路建设减灾关键技术研究”(2013 318 800 020)

第一作者: 程强(1972-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事山区公路岩土工程勘察设计及研究工作。

E-mail: Chengqiangy@163.com

the shear load, the linear elastic deformation stage with large shear stiffness is obvious, and the yield stage is short. The suspension compaction structure formed by grain skeleton and matrix is the internal controlling factor of strength and deformation characteristics of the marine soil. Under the shear loading, the skeleton particles interact with the cemented matrix, when shear failure occurs, the matrix is crushed and the skeleton is dislocated. The strength and deformation characteristics of the marine soils are affected by the strength of skeleton particles, the distribution of large skeleton particles and the degree of matrix cementation. The shear strength, shear stiffness and dilatancy of the marine soils increase with the increasing skeleton strength and matrix cementation, while the ductility decreases.

Keywords: moraine soil; soil structure; shear strength; deformation and failure mechanism; field shear test

冰碛土是冰川搬运和堆积作用下,冰川融化后堆积的土体,多以碎石、块石、砂砾为主。冰碛土属于土石混合体,土石混合体的力学性质复杂,影响因素众多,许多学者通过原位试验、室内试验、数值模拟等方法研究石质含量、石质形状、岩性及应力状态等对土体强度和变形特性的影响^[1-5]。徐文杰等^[2]基于数字图像技术分析土体内部块石形态,制备试验样品,得到了剪切带特性及剪切强度参数与含石量的关系。张晓健等^[3]通过推剪试验研究分析了土石混合填料的剪切破坏特性。这些研究得出了石质含量、形态等与土体剪切性能之间的关系,为相关工程设计提供了参考依据。

冰碛土的力学特性与其它成因的土石混合体有一定相似性,也有所区别。对帕隆藏布流域冰碛土、川西高原某工程冰碛土、大渡河某冰碛土的研究表明冰碛土透水性差、胶结程度高,具有较好的力学性质和稳定性^[6-9]。张永双等^[10]提出了基于胶结程度和粒度组成的我国西南地区冰川堆积物二级分类方案。何迎红等^[11]通过室内试验,研究了瀑布沟冰碛土力学特性,得出了低围压和高围压下土体力学参数。上述研究表明冰碛土较其它土体胶结程度高,力学性质较好。但冰碛土的研究以室内试验为主,较难反映原状冰碛土体的结构特性,土体剪切强度特性与土体结构的关系还缺乏较为深入的分析。

为研究冰碛土的力学特性,分析研究冰碛土结构与剪切强度特性之间的关系,获取力学参数,为特大型工程建设提供参考依据,本文结合作为特大跨悬索桥基础持力层的某冰碛土,通过地质勘察、电镜扫描、现场剪切试验等研究土的结构及剪切变形与强度特征,分析剪切性能与土的结构之间的关系。

1 试验场地概况及冰碛土的基本特征

泸定大渡河桥是川藏高速公路四川省雅安至康定段控制性工程,桥梁跨越大渡河河谷,采用主跨

1 100 m的悬索桥,桥梁康定岸主塔及重力锚均布设于巨厚层冰碛体上,该冰碛体属山谷型冰川堆积物,图1为冰碛体影像图。由图1可见冰碛体呈近似四边形,横向宽度约1 800 m,纵向长度约1 150 m,被沟谷分割成大小不等的三个部分,桥梁主塔及重力锚布设在冰碛体的北东侧。图2为桥梁轴线工程地质剖面图,可见土体前缘为闪长岩体,岩土界面呈勺形,土体最大厚度187.1 m。根据钻孔ZK3岩芯样品ESR测年,26 m,57.7 m,68.10 m深度土的年龄分别为 2.8 ± 0.2 万年、 4.0 ± 0.4 万年、 4.7 ± 0.4 万年。



图1 冰碛体影像图 (Google Earth 截图)

Fig.1 Image map of the moraine deposits area
(Google screenshot)

场地冰碛土为碎石土,石质成分以闪长岩为主,少量花岗岩。冰碛土土体密实、含水率低、透水性差。土样密度 $1.99 \sim 2.35 \text{ g/cm}^3$,平均值为 2.21 g/cm^3 ;土样含水率 $2.23\% \sim 9.59\%$,平均值为 6.36% 。地质钻探岩芯分析表明冰碛土胶结程度较好,尤其是随着深度的增加,逐渐呈现半成岩特征,测得其天然状态单轴极限抗压强度为 $3.0 \sim 4.02 \text{ MPa}$,平均值为 3.46 MPa 。在图1中2条沟谷两侧冰碛土边坡高度一般在 $50 \sim 110 \text{ m}$,坡度均在 40° 以上(部分 65° 以上),边坡稳定,表明堆积体稳定性较好。

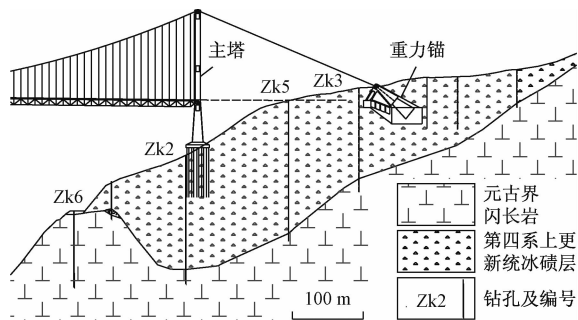


图2 典型工程地质剖面图(图1中A剖面)

Fig. 2 Typical geological section (Section A in fig. 1)

2 冰碛土的结构特征

土的结构主要包括颗粒的大小及其组合、形状和表面特征,颗粒间的排列和组合形式,颗粒间的连接关系和属性,以及宏观的结构面及其组合、整体结构等,包含了从宏观到细观、微观等不同尺度的含义^[12]。土的宏观结构主要指不同的沉积环境条件下,形成的层状、夹层状等结构。土的细观结构主要指颗粒及其组合体的排列和组合形式。微观结构主要指土中矿物及其集合体的排列和组合形式。

冰碛土属非重力分异沉积,土中巨粒、粗粒、细粒成分混杂无序堆积。宏观结构上,颗粒分选程度差、磨圆程度低、无成层性,局部夹透镜状砂砾土富集带、团块状风化带、悬浮状大块石。

根据冰碛土颗粒组成、风化程度等,从细观结构上冰碛土划分为:①骨架悬浮密实结构:是最有代表性的结构类型(图3a),骨架颗粒呈中—微风化状、强度高,悬浮状骨架颗粒和砂砾杂基形成的土结构密实。②软化骨架悬浮密实结构:因骨架颗粒的风化,而导致土骨架软化、强度降低,图3b可见土中的颗粒轮廓清晰,但部分土体颗粒呈全—强风化状。③砂砾土富集结构:土体中较细的砂砾颗粒呈透镜状富集(图3c),厚度一般不大于20 cm,延伸长度一般不大于5 m,延伸方向杂乱无序。一般胶结程度好,并不构成软弱带。④大块石包绕结构:冰碛土中大块石呈“悬浮”状,粒径大者可达3 m(图3d)。

细观结构尺度通常为室内外剪切试验研究的尺度,本次室内外剪切试验均避开冰碛土中的大块石,代表性样品颗粒分析结果见表1。由表1可见冰碛土以粗粒组(0.075~60 mm)和巨粒组(>60 mm)为主,细粒组(<0.075 mm)含量少,即使在砂砾土中(S1-2, S2-2),细粒组含量仍不足7%。

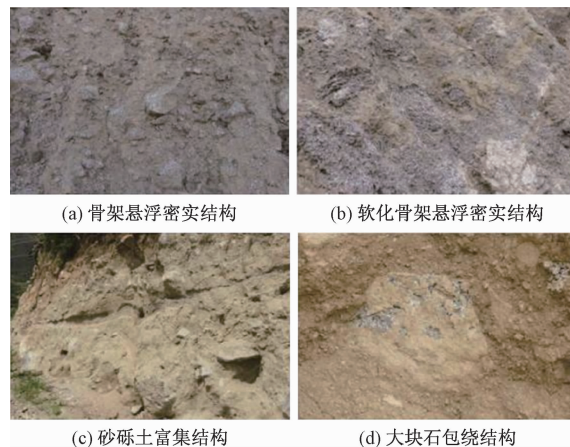


图3 冰碛土的典型图片

Fig. 3 Typical soil mini-structure picture of the moraine soil

表1 典型土样颗粒分析结果

Table 1 Results of particle-size analyses of the typical soil samples

样品 编号	粒组(mm)含量的百分含量/%					
	500 ~ 250	250 ~ 200	200 ~ 60	60 ~ 20	20 ~ 2	2 ~ 0.075 < 0.075
T5			22.9	21.0	29.6	25.4 1.1
T6-4	49.4	16.4	2.7	9.6	11.3	10.6
T6-3		22.9	11.9	13.9	26.6	24.7
T6-2		7.8	6.1	21.9	38.7	25.5
S1-2				28.8	37.6	29.2 4.4
S2-2					39.3	54.4 6.3

备注:表中20~60表示20 mm≤粒径≤60 mm。

为研究土的微观结构特征,选取土样中颗粒较细部分进行电镜扫描(图4)。图4a和图4b可见土颗粒呈悬浮状、局部点接触,粒间充填杂基;颗粒分选差、粗

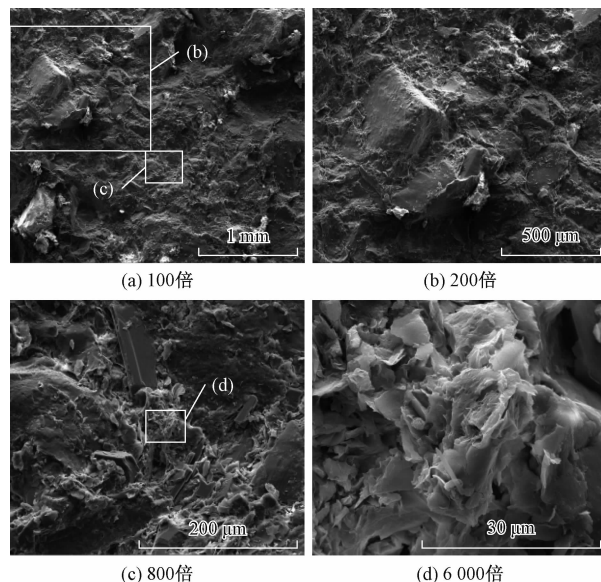


图4 冰碛土电镜扫描照片

Fig. 4 SEM scanning photos of the moraine soil

细混杂、磨圆差,颗粒边缘形态主要有亚圆状、次棱角状、棱角磨损和尖棱角状。图 4c 清晰可见颗粒间充填的泥质杂基情况;图 4d 可见泥质向蒙脱石转化(其它图片还可见向伊利石转化及伊蒙混层),伊利石和蒙脱石都起到一定的胶结作用。

电镜扫描分析表明,冰碛土在微观结构上与细观结构表现出一致性,即不同大小的颗粒混杂、密实堆积,形成骨架悬浮密实结构。冰碛土的这种结构特性,是具有较好力学特性的决定因素。

3 冰碛土剪切试验及分析

3.1 试验方法及试验点布置

试验参照《水利水电工程粗粒土试验规程》(DL/T5356-2006)相关规定进行,剪切面长边尺寸与试样中最大颗粒粒径之比不小于 5。现场剪切试验主要针对骨架悬浮密实结构和软化骨架悬浮密实结构的碎石土,制样避开大块石。室内剪切试验采用钻孔中的砂砾土样品。共进行 6 组现场试验,分别布置在地表试坑、试验平洞、重力锚基坑内,试验点布置见图 5,试验点距离地表的最大深度为 72 m。

3.2 抗剪强度参数

试验获得土的抗剪强度参数见表 2,可见不同结

构土的抗剪强度参数有较大的差异。试验参数代表细观结构尺度土的剪切强度参数,在研究边坡稳定性的宏观尺度上,土的抗剪强度还取决于边坡工程范围土的宏观结构,例如土是否有成层性,是否有软弱夹层等。根据对泸定大渡河桥冰碛土的调查及勘探,冰碛土无成层性,其中的风化骨架和砂砾土富集带呈透镜状、团块状无规律分布。因此在工程设计抗剪强度参数选取上,依据勘探揭示不同结构土的比例,按照加权平均的方法确定抗剪强度参数,建议工程设计用冰碛土天然状态峰值内摩擦角取 36.5°,黏聚力取 50 kPa。

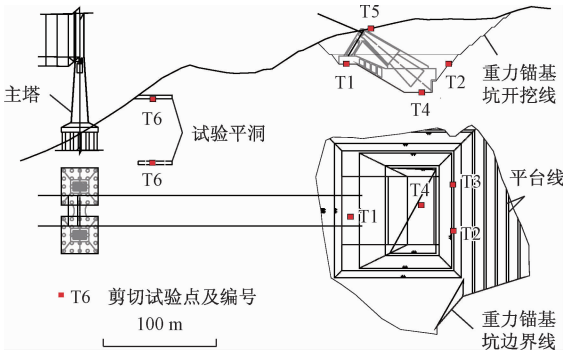


图 5 现场试验点布置图

Fig. 5 In-situ test point layout

表 2 现场及室内剪切试验参数汇总

Table 2 Parameter summary of the field shear strength test and laboratory shear strength test										
试验方法	试验 编号	土的结构	试样距地 表深度/m	试验位置	剪切盒 尺寸/cm	天然状态峰值抗剪强度		天然状态下屈服抗剪强度		切向剪切 刚度 $K_s/$ ($\text{kPa}\cdot\text{mm}^{-1}$)
						内摩擦角/ ($^{\circ}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	黏聚力/ kPa	
现场 剪切	T5	风化骨架悬浮 密实结构	3.50	地表试坑	70×70	30.3	52.8	29.9	20.0	28.0
	T2		60.00	基坑平台	50×50	30.9	70.0	29.6	20.0	80.4
	T3		60.00	基坑平台	50×50	31.5	70.0	29.3	50.0	60.6
	T1	骨架悬浮 密实结构	30.00	基坑平台	50×50	37.9	21.0	34.5	15.0	39.1
	T4		72.00	基坑底部	50×50	39.5	73.4	39.3	20.0	195.3
	T6		15.00	试验平洞	100×100	42.1	60.0	38.9	21.0	91.5
室内 剪切	S1-1	透镜状砂 砾土富集 结构	29.80~70.60		16×14	35.8	27.0	31.6	20.0	
	S1-2		48.90~54.20		16×14	39.6	44.2	33.8	36.3	
	S1-3		48.00~49.50		16×14	39.2	45.1	35.2	30.7	
	S1-4		38.20~44.00		16×14	31.9	59.3	29.0	30.7	
	S2-1~S2-11		4.74~55.00		Φ6.18	37.0~40.3	4.2~6.2			

备注:S1-1~S1-4 为 160 mm×140 mm×150 mm 的长方体试件,S2-1~S2-11 为直径 61.8 mm 的圆柱形试件。

3.3 剪切破坏特征

冰碛土的现场剪切破坏面呈波状起伏,起伏差最小 40 mm,最大 220 mm,各组试验起伏差的平均值在 102~138 mm。通过对 6 组现场剪切试验的 30 个试样的观察分析(典型剪切面照片及剪切面示意图如图 6 所示),冰碛土的剪切面主要有如下 4 种形态:

(1)剪切破碎带:石质骨架在剪切荷载作用下翻滚、错动,砂砾基质被压碎,剪切带呈散体状(图 6a)。图 6b 剪切面中部可见剪切破坏后呈定向排列的骨架颗粒。剪切破碎带主要出现在骨架悬浮密实结构冰碛土中,T1 组、T6 组和 T4 组中的部分剪切面,呈现压碎剪切特征。

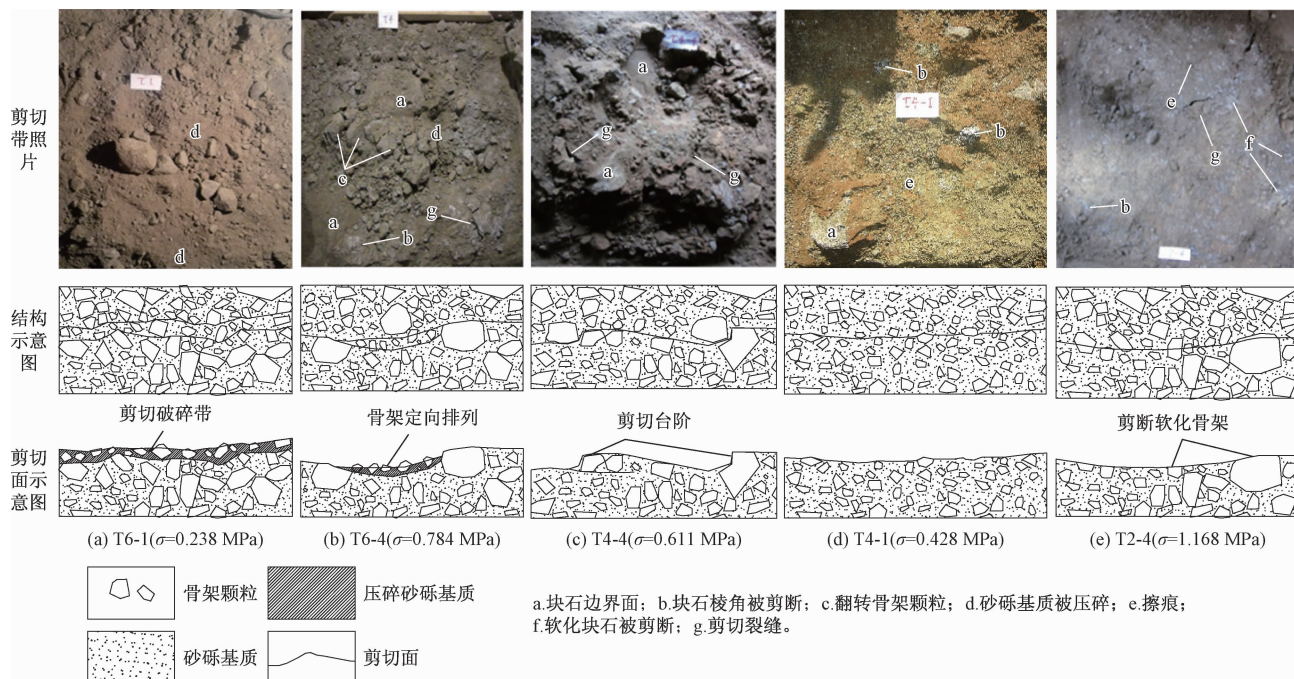


图 6 典型剪切面照片

Fig. 6 Typical shear plane photograph

(2) 台阶状剪切面: 由于土体中大粒径骨架的阻挡, 剪切面呈台阶状突变, 土体中常见剪切裂缝 (图 6b, c, e)。

(3) 锯齿状剪切面: 剪切面呈锯齿状, 面上有少量翻转的骨架和压碎的基质 (图 6d)。此类剪切面主要出现在胶结程度好的骨架悬浮密实结构冰碛土中, 试样翻开后基本呈整体状。

(4) 波状剪切面: 剪切面呈波状起伏, 擦痕明显, 可见剪切面切穿软化骨架颗粒 (图 6e), 此类剪切面主要出现在软化骨架悬浮密实结构冰碛土中。

3.4 剪切变形特性分析

现场剪切试验得到的典型剪应力-剪切位移关系曲线如图 7 和图 8 所示, 由图 7 和图 8 可以看出:

(1) 冰碛土剪切荷载作用下剪切刚度大、延性差, 表现为脆性变形的特征。图 7 可见土体初始屈服和应变硬化阶段很短, 有些直接由线性变形阶段进入破坏阶段, 这表明冰碛土的剪切破坏具有突发性, 工程应用中需要考虑适当的安全冗余。

(2) 冰碛土现场剪切试验的剪应力-水平位移关系曲线可以划分为如下 4 个阶段: ① 线弹性阶段。在这个阶段内, 土体的剪切变形主要表现为土体中骨架颗粒的剪切变形和砂砾基质的压缩变形, 没有出现土体颗粒间的翻滚、错动, 剪切变形量小, 曲线近于直线。② 初始屈服阶段。由图 7 可见初始屈服

阶段不明显, 多由线性变形直接进入应变硬化或破坏阶段。③ 应变硬化阶段。随着剪切荷载的增加, 土中的骨架颗粒和砂砾基质产生变形, 土的不断增长。在骨架悬浮密实结构冰碛土中, 由于砂砾基质压碎破坏后骨架颗粒快速翻转, 剪切带快速形成, 因此表现为应变硬化阶段较短, 甚至直接进入破坏阶段。而软化骨架悬浮密实结构冰碛土, 由于骨架强度低, 剪切荷载作用下裂隙逐步扩展, 表现出一定的强度缓慢增长过程。④ 破坏阶段。土达到峰值强度后, 变形快速发展而破坏。

(3) 冰碛土剪切荷载作用下的法向变形一般表现出先剪缩、再剪胀的特征, 图 8 中法向位移负值表示膨胀, 正值表示压缩。由图 8 可见在各级正应力下, 竖向位移一般呈现先增大、后减小的趋势 (先剪缩、后剪胀), 一般在屈服点附近出现拐点, 屈服后出现明显的剪胀过程。而图 8a 中部分样品破坏后表现为剪缩, 主要是剪切破坏后剪切破碎所致。冰碛土先剪缩、后剪胀的原因在于基质被压碎以前, 土中颗粒没有发生错动、翻滚, 因此表现为剪缩或很小的剪胀变形, 一旦颗粒压碎, 土中颗粒产生翻滚, 相互挤压错动, 则会表现出剪胀特征。

冰碛土剪切变形与破坏特征的分析表明, 骨架悬浮密实结构土体线弹性阶段明显, 剪切刚度大, 应变硬化阶段短, 剪切面上表现为砂砾基质压碎和骨架颗粒

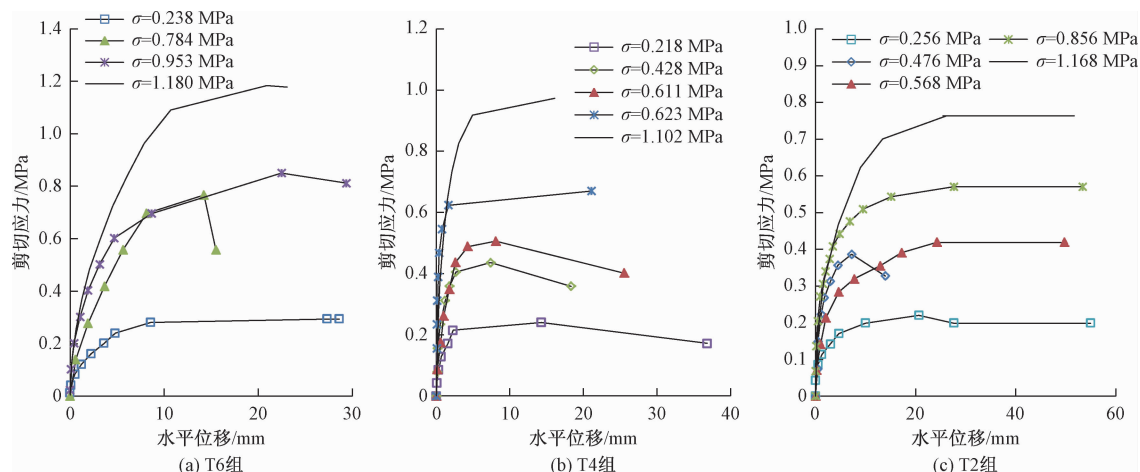


图7 典型冰碛土剪应力~水平位移曲线

Fig. 7 Relationship between shear stress and horizontal displacement of the typical marine soil

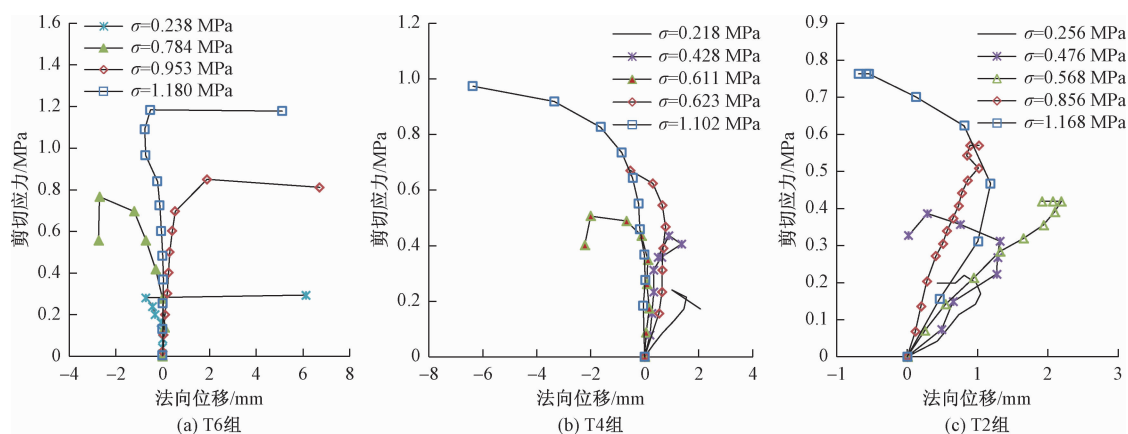


图8 典型冰碛土剪应力~竖向位移曲线

Fig. 8 Relationship between shear stress and vertical displacement of the typical marine soil

翻转,呈现压碎剪切和锯齿状剪切的破坏特征。而软化骨架悬浮密实结构剪切刚度较低,应变强化阶段明显,剪切面切穿骨架颗粒,剪切破坏面呈相对平滑的波状。

3.5 土的结构对剪切特性的影响分析

土的结构对冰碛土剪切特性有重要影响,可从强度参数、破坏模式和变形特征等方面进一步分析。

(1) 强度参数:由表2 试验成果可见,不同结构土的抗剪强度参数差异较大,主要表现在骨架强度对抗剪强度参数的影响。正应力 $0.5 \sim 1.0$ MPa 时,天然状态下软化骨架悬浮密实结构土的峰值抗剪强度为骨架悬浮密实结构土的 $74.8\% \sim 77.6\%$ 。

(2) 破坏模式:骨架颗粒对土石混合体变形破坏有重要控制作用,很多学者研究认为^[2,4-5]土石混合体的剪切变形在于土体颗粒的“推挤、翻转、咬合”作用。本次进行的原状冰碛土剪切试验表明,土的结构对土

的变形破坏有重要影响,冰碛土剪切破坏可归纳为剪切破碎带、包绕大骨架边界、锯齿状剪切、切穿软化骨架颗粒等4种模式。

① 剪切破碎带。冰碛土呈“骨架悬浮密实结构”,“石质骨架”悬浮于更细小的“具有一定胶结的基质”中,因此在剪切荷载作用下,骨架颗粒与胶结基质的相互作用,呈现出“骨架挤压—基质压碎”的破坏模式。图9a 表示单个骨架颗粒的情况,剪切荷载作用下,骨架颗粒因转动变形,在两侧形成受压区,当压应力超过基质抗压强度时,基质被压碎,颗粒转动变形,土产生破坏。图9b 中,在颗粒转动—基质压碎作用下,包绕骨架边界形成剪切带,在剪切带内,骨架颗粒转动变形、基质压碎,从而形成“压碎剪切带”。压碎剪切带一旦形成,则迅速破坏,因而表现出初始屈服和应变硬化阶段短的特点。

② 包绕大骨架边界。剪切荷载作用下很难造成大

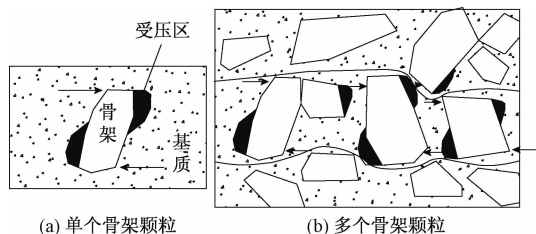


图 9 骨架颗粒与基质相互作用示意图

Fig. 9 Schematic diagram of interaction between skeleton and matrix

骨架颗粒翻转,剪切面一般包绕块石的边界面,突起部分因骨架间摩擦而剪断(图 6b),有些大骨架前形成台阶,台阶周边出现张裂缝(图 6c)。骨架颗粒的大小是相对试验剪切面的尺度而言,现场剪切试验统计表明,在骨架悬浮密实结构中,翻转的颗粒粒径一般在 12 cm 以下。而软化骨架悬浮密实结构中,翻转颗粒较少,最大粒径一般在 5 cm 以下。在剪切试验中,当剪切面刚好穿过骨架边界面时,可能造成试验强度偏低;当骨架阻挡剪切面形成台阶时,则会导致试验强度偏高。在实际的剪切破坏中,土中的大骨架颗粒显然有助于提高土体抗剪强度。

土中较大的骨架颗粒对剪胀性有较大的影响,当剪切面有较大骨架颗粒时,往往表现出明显的剪胀性,如在图 8b 和图 8c 中,T4 组试验中 $\sigma = 1.102$ MPa 样品和 T2 组试验中 $\sigma = 1.168$ MPa 样品因剪切面上较大块石影响,临近破坏时表现出较强的剪胀性。

③锯齿状剪切。T4 组试验位于基坑底部,埋深 72 m。由于砂砾基质胶结程度高,基质压碎比例低,土的破坏更多表现为砂砾基质的剪切错断破坏,剪切面上的骨架颗粒被错断或拔出,剪切面以锯齿状为主,土样剪断后基本保持完整状态(图 6d),形成“锯齿状剪切”破坏模式。

④切穿软化骨架颗粒。当土中骨架强度较低时,颗粒的骨架作用变弱,导致其抗剪强度参数降低,延性增大。剪切面较为平滑,面上可见软化石质骨架被剪断(图 6e),形成“切穿软化骨架”破坏模式。

(3) 剪切变形特征:张晓键等^[3]、徐文杰等^[13]通过页岩-黏土混合料及斜坡碎石土的剪应力-剪切位移关系曲线分析,表明土体在弹性变形阶段前有明显的压密阶段。冰碛土结构密实,因此现场剪切试验得到的剪应力-剪切位移关系曲线上没有呈现明显的压密变形阶段。

图 10 为不同结构土的代表性剪应力-水平位移曲线对比,可见 T2 组试验代表的软化骨架悬浮密实结构

土的剪切刚度较低,线弹性阶段较短,表现出更明显的应变硬化阶段,剪切变形量大。T6 和 T4 组试验曲线代表的骨架悬浮密实结构冰碛土,曲线近似呈折线状,表明土从初始破裂到最终破坏发展较快,尤其是胶结程度较好的 T4 组试验,剪切刚度更大,破坏更突然。

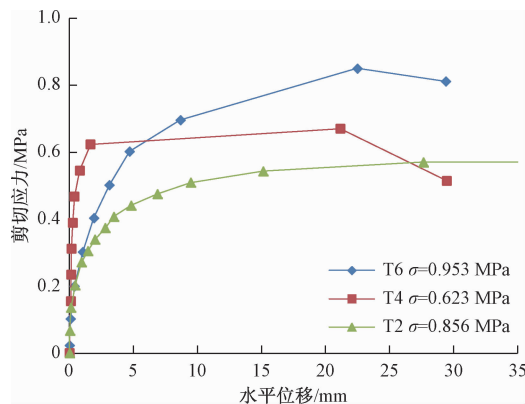


图 10 不同结构土体剪切变形特性对比图

Fig. 10 Contrast charts of shear deformation characteristics of soils with different structures

4 结论

(1) 冰碛土颗粒以粗粒、巨粒粒组为主,土的骨架颗粒呈悬浮状,混杂、无序堆积,骨架间充填杂基、无孔隙,形成骨架悬浮密实结构。

(2) 颗粒骨架和具有一定胶结的杂基形成的悬浮密实结构,是土的强度与变形特性的内在控制因素。剪切荷载作用下,除骨架颗粒间的相互作用外,更多表现为骨架颗粒与胶结基质的相互作用,呈现出“骨架挤压—基质压碎”的破坏模式。剪切破坏时表现为基质的压碎与骨架的翻转,使冰碛土表现为剪切强度高、延性差、先剪缩后剪胀的特性。

(3) 冰碛土剪切破坏模式主要有剪切破碎带、包裹大骨架边界、锯齿状剪切、切穿软化骨架等 4 种模式。骨架颗粒强度、大骨架颗粒分布、基质胶结程度等都对冰碛土强度和变形特性构成一定的影响。土的抗剪强度、剪切刚度和剪胀性随骨架强度和基质胶结程度的提高而增大,而延性随之变差。

(4) 研究表明冰碛土的结构密实、剪切强度参数较高,根据冰碛土的结构分析和现场剪切试验,堆积体和重力锚基坑稳定性计算用的剪切强度参数取值为 $c = 50$ kPa, $\varphi = 36.5^\circ$ 。

参考文献:

- [1] 徐文杰,胡瑞林. 土石混合体概念、分类及意义

- [J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(4): 50 - 56. [XU W J, HU R L. Conception, classification and significations of soil-rock mixture[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(4): 50 - 56. (in Chinese)]
- [2] 徐文杰, 胡瑞林, 岳中琦, 等. 基于数字图像分析及大型直剪试验的土石混合体块石含量与抗剪强度关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 996 - 1007. [XU W J, HU R L, YUE Z Q, *et al.* Research on relationship between rock block proportion and shear strength of soil-rock mixtures based on digital image analysis and large direct shear test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 996 - 1007. (in Chinese)]
- [3] 张晓键, 龚辉, 艾传井, 等. 泥质页岩-粉质黏土土石混合填料原位水平推剪试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(3): 79 - 85. [ZHANG X J, GONG H, AI C J, *et al.* Research on horizontal push-shear in-situ test of pelitic shale-silty clay mixture [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(3): 79 - 85. (in Chinese)]
- [4] 杨忠平, 雷晓丹, 王雷, 等. 含石量对土石混合体剪切特性影响的颗粒离散元数值研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(4): 1035 - 1045. [YANG Z P, LEI X D, WANG L, *et al.* Impact of stone content to shear properties of soil-rock mixture using particle flow code simulation [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(4): 1035 - 1045. (in Chinese)]
- [5] 邓华锋, 原先凡, 李建林, 等. 土石混合体直剪试验的破坏特征及抗剪强度取值方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊2): 4065 - 4072. [DENG H F, YUAN X F, LI J L, *et al.* Research on failure characteristics and determination method for shear strength of earth-rock aggregate in direct shear tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Sup 2): 4065 - 4072. (in Chinese)]
- [6] 袁广祥, 尚彦军, 林达明. 帕隆藏布流域堆积体边坡工程地质特征及稳定性评价[J]. 工程地质学报, 2009, 17(2): 188 - 193. [YUAN G X, SHANG Y J, LIN D M. Engineering geological properties and stability analysis of moraine debris slopes in Palong river drainage area along Sichuan-Tibet highway [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(2): 188 - 193. (in Chinese)]
- [7] 方学东, 黄润秋. 青藏高原典型冰碛土的物理力学特性研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 123 - 128. [FANG X D, HUANG R Q. Physical and mechanical properties of typical moraine soil on the Qinghai-Tibet plateau [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(1): 123 - 128. (in Chinese)]
- [8] 谢春庆, 邱延峻. 冰碛层水文地质特征及其对工程影响的研究[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(5): 90 - 94. [XIE C Q, QIU Y J. Hydrogeological characteristics of glacial till and its influence on engineering [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(5): 90 - 94. (in Chinese)]
- [9] 涂国祥, 黄润秋, 邓辉, 等. 某巨型冰水堆积体强度特性大型常规三轴试验[J]. 山地学报, 2010, 28(2): 147 - 153. [TU G X, HUANG R Q, DENG H, *et al.* Study on the strength and deformation behavior of a huge outwash deposits on large-scale triaxial tests [J]. Journal of Mountain Research, 2010, 28(2): 147 - 153. (in Chinese)]
- [10] 张永双, 曲永新, 王献礼, 等. 中国西南山区第四纪冰川堆积物工程地质分类探讨[J]. 工程地质学报, 2009, 17(5): 581 - 589. [ZHANG Y S, QU Y X, WANG X L, *et al.* On the engineering geological classification of quaternary glacial deposits in southwestern mountain area of China [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(5): 581 - 589. (in Chinese)]
- [11] 何迎红, 屈智迥. 冰碛土力学性质与微观结构的研究[J]. 成都科技大学学报, 1990(5): 57 - 62. [HE Y H, QU Z J. Mechanical property and microstructure research of glacial till [J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology, 1990(5): 57 - 62. (in Chinese)]
- [12] 张威恭, 王思敬, 张倬元, 等. 中国工程地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 69 - 76. [ZHANG X G, WANG S J, ZHANG Z Y, *et al.* China engineering geology [M]. Beijing, Beijing Science Press, 2000: 69 - 76. (in Chinese)]
- [13] 徐文杰, 胡瑞林, 谭儒蛟, 等. 虎跳峡龙蟠右岸土石混合体野外试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1270 - 1277. [XU W J, HU R L, TAN R J, *et al.* Study on field test of rock-soil aggregate on right bank of Longpan in Tiger-leaping gorge area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1270 - 1277. (in Chinese)]