

高原湖相弱固结砂岩次生砂层形成 演化与浸湿变形特征

闫常赫¹, 韩涛¹, 王世明², 丁选明³, 袁冉², 骆赵刚^{2,3}

(1. 中铁工程设计咨询集团有限公司, 北京 100005;

2. 西南交通大学, 四川 成都 610031; 3. 重庆大学, 重庆 400045)

摘要: 青藏高原及邻区分布有大量的新近纪湖相沉积弱固结砂岩, 受地壳快速抬升、物源及沉积环境影响, 石英含量少, 矿物质成熟度低, 其次生砂层保留了原岩的矿物成分, 体现出极强的水敏性特征。为了揭示藏西南区札达盆地内砂层的形成演化, 首先介绍了其沉积环境与形成过程, 再通过岩土微观测试, 系统分析了该砂土的矿物成分、孔隙、粒径及含水率特征, 并进行浸水标贯试验、三轴试验和浸湿变形试验。结果表明: 该次生砂层颗粒分选性差、矿物成熟度低, 亲水性黏土矿物以团聚物或附着包裹在砂颗粒周边的形式存在, 表现出明显的含黏砂土特征; 该次生砂层具有极强的水敏性, 表现出区别于传统湿陷性的复杂浸湿变形特征。根据次生砂层呈现的浸湿变形特征及影响因素分析, 提出了高海拔寒旱区含黏砂土工程勘察应开展水敏性评价的建议。

关键词: 高原湖相; 弱固结砂岩; 含黏砂土; 浸湿变形

中图分类号: TU42

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)05-0172-09

Formation Evolution and Wetting Deformation of Secondary Sand Layer in Plateau Lake-phase Weakly Cemented Sandstone

YAN Changhe¹, HAN Tao¹, WANG Shiming², DING Xuanming³, YUAN Ran², LUO Zhaogang^{2,3}

(1. China Railway Engineering Design and Consulting Group, Beijing 100005, China;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 3. Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: A large number of weakly consolidated sandstones of Neoproterozoic lacustrine deposits are distributed in the Tibetan Plateau and neighboring areas. Influenced by rapid crustal uplift, material sources and depositional environments, the region has low mineral maturity. Its secondary sandstone layer retains the mineral composition of the original rock, reflecting strong water-sensitive characteristics. To reveal the formation and evolution characteristics of the sand layer within the Zada Basin in Southwest Tibet, the formation process and depositional environment were firstly introduced. Further, the mineral composition, porosity, grain size and water content characteristics of this sandy soil were systematically analyzed through geotechnical micro-testing, and the deformation law under the wetting condition was revealed based on the scalar test, triaxial experiment and wetting test. According to the results, the secondary sand layer has poor particle sorting, low mineral maturity, and hydrophilic clay minerals are wrapped around the sand particles by agglomerates or attachment, reflecting obvious characteristics of clay-bearing sandy soil. The secondary sand layer has strong water sensitivity, reflecting complex wetting and deformation characteristics that are different from the traditional wetting and trapping. According to the analysis of the wet deformation characteristics and influencing factors presented by the secondary sand layer, it is further proposed that the water sensitivity evaluation should be carried out for the engineering investigation of clayey sandy soil in high-altitude cold and dry areas.

Keywords: plateau lake-phase; weakly consolidated sandstone; clay-containing sandy soil; wetting deformation

为应对全球资源日渐紧缺和生态环境持续恶化的严峻形势,我国《“十三五”国家科技创新规划》中明确指出亟需开展极端气候环境下的岩土工程问题预防与治理。青藏高原是地球上最高且最年轻的高原,不仅影响全球的气候变化,而且记录着地球演化史上壮观的地质事件^[1]。受地壳快速抬升作用及高海拔地区频繁冻融和干湿循环作用影响,区域内地层岩性混杂、地质灾害问题显著。复杂的地质环境导致高原工程规划和建设面临着重大挑战,给工程勘察赋予了新的内涵,特别是遇到了大量与第四纪地质作用及其产物相关的疑难或重大工程地质问题^[2]。

当前的研究表明,青藏高原是在新生代以来陆-陆碰撞与持续挤压作用下形成的全球最高的面状隆起,尤其是在新近系上新统(N_2)的青藏运动以来^[3],在喜马拉雅运动 I 幕强烈裂陷、拗陷的基础上,青藏高原大面积迅速抬升,形成众多高原湖,并快速堆积了一套弱固结砂、泥、砾岩层,之后随伴随着板块的持续抬升及气候的持续变干、变冷,在河流阶地及现代湖泊附近形成弱固结碎屑岩的次生层,物质来源、沉积环境和物理力学性质明显区别于内陆河流、滨海及风积砂层,岩土工程勘察评价面临新的难题。

青藏高原新生代经历了始新世(E_2)—更新世(Q_p)初的造山事件,整个青藏高原地区发生了迅速的抬升,在高原内部及周缘形成了众多湖泊。在高原腹地及周边,新近系、更新世河湖相堆积物广布,是周围山体快速隆升背景下就近风化剥蚀堆积的产物,野外呈现“似土非土、似岩非岩”的特征,水敏性强,水稳性弱,呈现一定的分散性、流变性、蠕变性特征,带来的工程危害主要有边坡滑坡、路基渗水开裂、路堑软化流变、隧道涌砂或变形等^[4-5],处理难度极大,一度成为工程人“闻之色变”的地层。成昆线穿越的昔格达组,兰渝铁路穿越的咸水河组,中兰客专穿越的红柳沟组^[6],阿里地区札达组均属同一背景下形成的地层,其次生层在一定程度上继承了原岩的矿物成分和水敏性特征,浸湿变形特征复杂。

天然状态承载能力及抗变形性能较好的砂层在遇水后发生系统性沉降变形是一个典型的非饱和土力学问题。近 40 年来,国内外学者基于室内试验、模型试验、数值模拟及理论分析等研究手段,在基质吸力应力理论、强度及变形演化规律、土水特征曲线及渗透特性、水气渗流与变形耦合分析、试验及测试技术等领域取得较大的进步^[7-10],并创建了适用于

描述复杂应力路径条件下含黏砂土力学行为的 CASM-SG 本构模型等^[11-16]。

本文根据地质分析法对高原湖相弱固结砂岩次生砂层的形成过程进行分析,通过微观测试分析该类砂土的矿物成分及物理特征,并基于原位测试和室内试验,研究其浸湿变形规律,对高海拔寒旱区含黏砂土工程勘察评价工作有参考价值。

1 高原湖相弱固结砂岩次生砂层形成背景

本研究依托项目位于西藏阿里地区的札达盆地,该盆地地处青藏高原西南缘,是发育于喜马拉雅山内部的盆地,其南侧为喜马拉雅山脉,北侧为阿伊拉日居山脉,盆地长 150 km,宽度 20 km~60 km,面积约 7 000 km²。两侧山脉海拔均在 5 000 m~6 000 m,中间札达盆地地势 3 500 m~4 000 m,发育有 2006 年才被命名的“古格地貌”^[17-18],被列为“中国的唯一,世界的典型”,是在青藏高原内部裂陷、整体快速抬升、周缘风化物迅速堆积、河流不断下切并伴随着气候环境不断变化背景下形成的高海拔寒旱区内陆盆地间的土林地貌类型,古格地貌如图 1 所示。



图 1 古格地貌实景图

1.1 古生代至中生代地层与演化

札达盆地在区域上位于喜马拉雅次级构造单元的被动陆缘盆地地块,属于喜马拉雅—冈底斯板块 I 级构造单元,其北侧为班公湖—怒江深断裂,南侧为印度板块,该区结晶基底形成较晚,以前寒武系中—深变质岩系为主,上部发育古生代至中生代相对连续的海相沉积盖层,岩性为滨海—浅海—深海相碎屑岩、碳酸盐岩、硅质岩和火山碎屑岩组合,岩浆活动频繁^[19],札达盆地地质平面如图 2 所示。

时在高耸的喜马拉雅山挡住印度洋湿热气流和冰期作用影响下,气候变干、变冷^[23],河流下切,湖水外泄,现代水系形成,札达地区形成了独特的古格地貌,同时在河流两岸阶地沉积了第四系松散堆积层。

1.3 上新世至更新世地层沉积

现有研究表明,上新世至更新世对于青藏高原是一个极特殊的时期,在青藏运动和昆黄运动作用下,青藏高原迅速隆起 1 500 m 以上。同时此时期地层沉积受地壳运动、古地貌、地质构造、古气候、古水系、物质来源等多因素共同影响,体现出沉积期高程不断隆升、气象逐渐变干变冷、物质来源不断变化、浅水-深水-浅水不断演化的特征,札达盆地上新世至更新世地层及沉积特征^[24-25]如图 4 和表 1 所示。

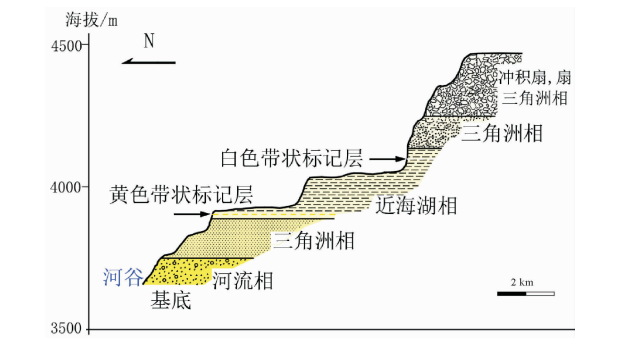


图 4 札达盆地上新世地层及沉积相

1.4 第四纪地层沉积

进入第四纪以来,在青藏运动 B 幕、C 幕及后期的昆黄运动及共和运动等作用下,青藏高原板块持续间歇式抬升,直至早更新世后期,青藏高原整体进入冰冻圈,在地壳运动、气候变化、水文演化多维度因素影响下,青藏高原第四纪沉积变得异常复杂,受制于人迹罕至的自然条件和稀少的规模化工程建设影响,青藏高原第四系地层格架、地层沉积环境、沉积年代缺少系统工作,其高程敏感性其他区域无法

比拟。最新的研究显示青藏高原第四纪沉积序列及古气候与古地理特征^[26-27]如表 2 所示。

札达盆地象泉河岸两侧发育砂卵二元结构阶地,如图 5 所示,下部卵石层粒径范围极广,一般粒径 2 cm~10 cm,最大可达 50 cm 以上,分选度差,以粉砂质充填为主。其大颗粒与小颗粒混杂分布,无明显排列规律,也没有明显的冰蚀痕迹,呈压密状态,如图 6 所示。较北部香孜组(Q_p^{1xz})冰积砾岩胶结明显较弱,推测为 Q_2-Q_3 洪积三角洲产物,下与托林组弱固结砂岩直接接触;上部砂层为细砂、粉砂层互层,偶夹粉土团块,局部含少量砾石,单层厚度一般 2 cm~6 cm,最大不超过 10 cm,发育明暗相间的水平层理。砂层干燥,扰动易散,为静水沉积产物,根据发育位置、与现代河流关系、密实状态、与周边地层接触关系及当时气候条件推断为 Q_p^3 静水沉积产物,且物源主要来自札达盆地湖相弱固结砂岩。

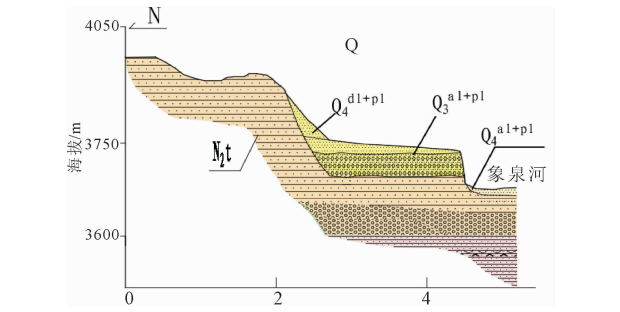


图 5 象泉河岸阶地地质图



图 6 下部卵石与上部砂层剖面

表 1 札达盆地上新世至更新世地层沉积

序号	时间阶段 /Ma	沉积地层	厚度 /m	沉积相	沉积期高程 /m	气象	物质来源
1	5.4~4.4	砾岩、含砾长石岩屑砂岩	90	冲积扇相、辫状河相	1000	湿热	北部或东部
2	4.4~3.5	含砾粉细砂,钙质黏土	130	滨湖三角洲-浅湖相,沼泽相	2000~2500	温暖-偏凉潮湿	南部
3	3.5~3.2	含粉砂质钙质粘土岩夹中细粒钙质长石岩屑砂岩	280	湖相-半深湖相	2500	温暖潮湿	不显著
4	3.2~2.57	含砾粉砂岩、细粒钙质岩	100	浅湖相-滨湖相	3000	偏冷潮湿-干旱	不显著
5	2.57~1.36	冰积砾石土	210	冲积扇相	>3600	寒冷干旱	南部或西部

表 2 青藏高原第四纪沉积特征

序号	年龄/Ma	地质时代	沉积特征	气候特征
1	2.6 ~ 1.8	早更新世早期(Q ₁)	周缘多冰川,山麓以冲洪积、冰水沉积为主,盆地湖相沉积	湿凉~寒冷
2	1.8 ~ 0.8	早更新世中晚期(Q ₁)	河湖沉积	—
3	0.8 ~ 0.4	中更新世早期(Q ₂)	山地冰川发育,东北缘湖相沉积	进入冰冻圈
4	0.4 ~ 0.128	中更新世晚期(Q ₂)	湖相沉积	温湿~凉干
5	0.128 ~ 0.0117	晚更新世(Q ₃)	冰川相、断陷湖相	冰期与间冰期交替
6	0.0117 ~	全新世(Q ₄)	混杂堆积	冷干为主波动

2 阿里地区高原湖相弱固结砂岩次生砂层的物理特征

札达地区砂层是高原湖相弱固结砂岩在高海拔、寒冷、干旱、反复冻融等特殊环境下伴随着地壳的持续抬升背景作用,经近源搬运后静水沉积而成。其含水率极低,固结不充分,颗粒混杂,且有黏土、粉土附着,颗粒结构呈亚稳定状态。

2.1 砂土的矿物成分

取样开展砂土层的薄片鉴定,代表性图像如图 7 所示,薄片显示其呈现典型的砂状结构,矿物磨圆度差,多为棱角或次棱角状。其次,结构成熟度及成分成熟度都较差,碎屑颗粒主要为石英、长石,可见少量方解石颗粒,含少量的黑云母和形状不规则的岩屑。颗粒表面由散粒化黏土、粉土、砂包裹,长石颗粒有风化现象,表面浑浊,局部显示出高岭土化,经对比测试发现其与托林组弱固结砂岩矿物成分高度相似。经易溶盐分析试验该砂层易溶盐含量 0.0714%~0.0977%,pH 值 8.91~9.19,呈明显的碱性特征。

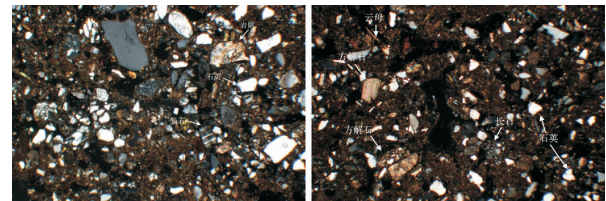
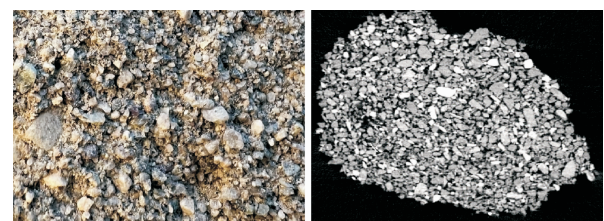


图 7 砂土样薄片鉴定图

2.2 砂土体的微观结构特征

现场试坑壁拍摄的砂层如图 8(a) 所示,场区内砂层颗粒以深灰色、黄褐色为主,磨圆度较差,粒径范围广,多呈棱角至次棱角状,颗粒间镶嵌排列,相对紧密。因其棱角接触,颗粒间多留有小孔隙,部分被黏土或粉土颗粒充填。对砂层取样开展 CT 扫描分析,代表性 CT 图像如图 8(b) 所示,砂颗粒磨圆度差,颗粒间呈棱角接触的镶嵌结构,小孔隙较多,偶

见大孔隙,整体密实度较低。



(a) 砂层实景 (b) 砂层 CT 扫描图像

图 8 试坑砂层图片

不同放大倍数的砂土样 TEM 图像如图 9 所示。从图 9 可以看出,该砂层与常规河流相砂层有明显的区别,颗粒间可见明显的架空孔隙,棱角至次棱角状,无磨圆,砂颗粒被黏土矿物附着包裹,部分呈絮状。结合少量的易溶盐,形成一定厚度的黏土矿物胶结,在干燥状态下产生的黏聚力对周围颗粒有一定吸力作用,体现出一定的黏聚强度,形成开放的亚稳定结构,如图 9(a)、图 9(b) 所示。当含有一定水分时,颗粒周边黏土矿物吸水泥化,水膜切入力增强,将弱胶结的颗粒分开,颗粒间引力减弱,凝聚力降低至颗粒散化,砂土体的亚稳定结构发生破坏,如图 9(c) 和图 9(d) 所示。

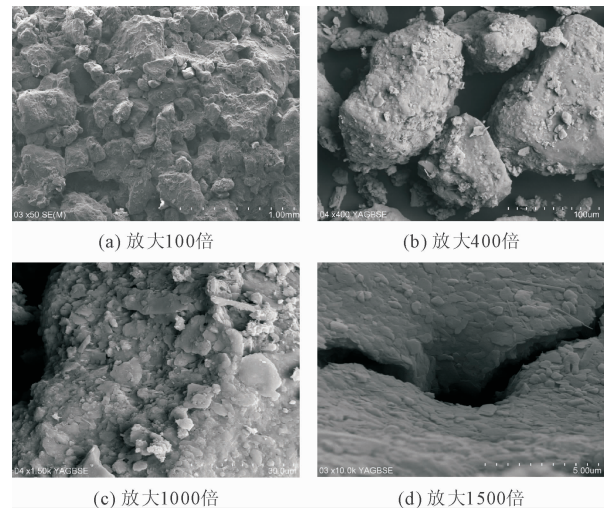


图 9 砂土的透射电镜扫描(TEM)图像

2.3 砂土的粒径、孔隙及含水率特征

通过挖探取样开展室内物理性质试验,该砂土体各试验参数离散性较强,颗粒粒径特征及细粒与含水率的关系如图 10 所示,从图 10(a)可以看出,各级颗粒粒径差异较大,粒径分布范围广,均有较多的细颗粒存在,小于 0.075 mm 粒径比例 19.4%~44.5%,明显高于激光粒度仪实测的细颗粒比例 3%~13%,如图 10(b)所示。由于部分黏土矿物以团聚物形式存在,是一种明显的砂黏混合物,其实测孔隙比 0.5~1.13,平均值 0.739,处于稍密-中密状态。如图 10(c)所示,其含水率 2.6%~12%,且受黏土矿物持水能力影响,含水率随细颗粒含量的增加而增大。

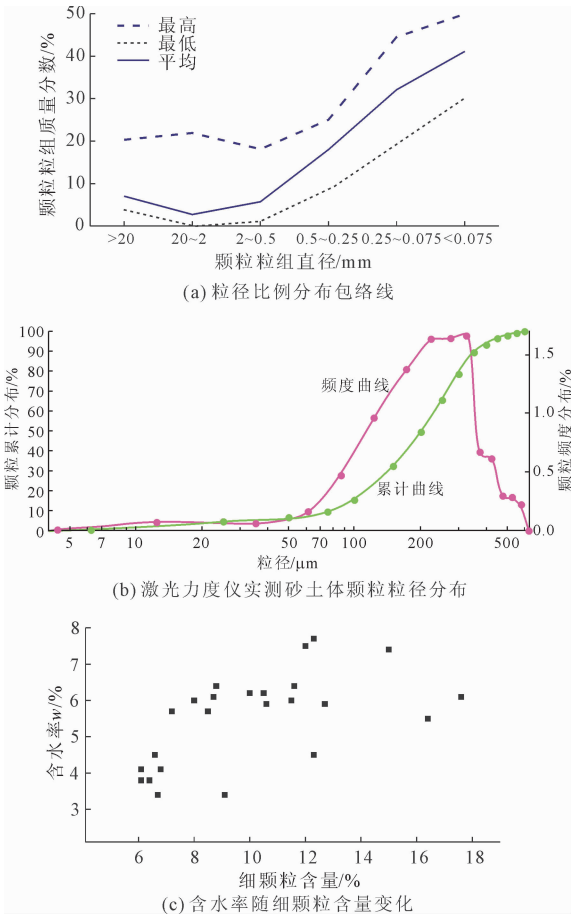


图 10 颗粒粒径特征及细粒与含水率的关系

3 阿里地区高原湖相弱固结砂岩次生砂层的浸湿变形特征

3.1 砂土体的浸水标贯试验

分别对砂层天然状态和浸水状态开展钻探并进行标准贯入原位测试,随深度和潮湿程度不同的标贯击数如图 11 所示。潮湿-饱和状态下平均击数

5.2,对应《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)中的松散状态;稍湿-潮湿状态下平均击数 11.4,对应为稍密状态;干燥-稍湿状态下平均击数 19,对应为中密状态。可见砂层宏观力学特征随深度变化不明显,随含水率变化显著,显示出极强的水敏性特征。

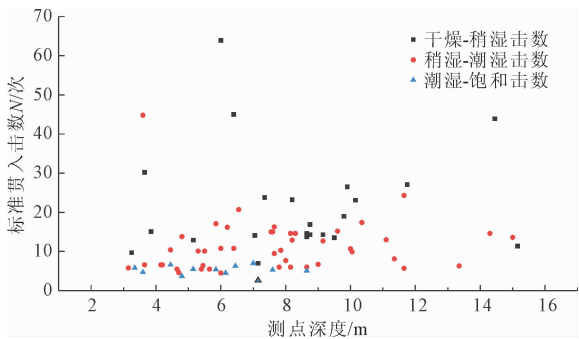


图 11 标贯击数随深度、潮湿程度变化

3.2 三轴试验

为准确测得实际侧向约束条件下砂土的强度特征,采用三轴压缩试验实测绘制砂土样的应力-应变关系曲线,分别于 2 m、4 m、6 m、8 m 深度现场取样,并分别施加 20 kPa、40 kPa、60 kPa、80 kPa 的围压,在压缩条件下获取其应力应变特征,并与浸水状态进行对比分析,如图 12 所示。

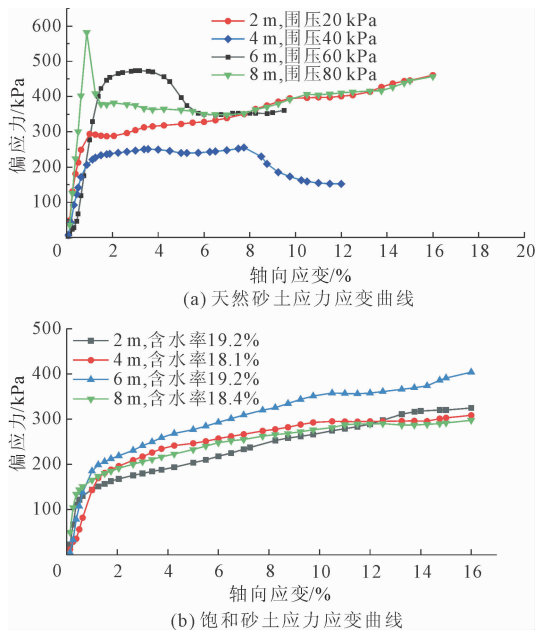


图 12 天然及浸水状态下三轴压缩试验

在天然低含水率状态下,先是随着应变的增加应力逐渐增大,达到临界值后开始破坏,砂样的临界变形应力随着围压(深度)的增大成明显增大趋势,

多数试样在破坏后依然保留较高的残余强度。应力-应变曲线呈软化型,破裂面与试件轴向夹角约 45° ,显示为压剪破坏特征,如图 13(a)所示。

在浸水状态下,如图 13(b),先是随着应变的增加应力逐渐增大,达到极大值后开始破坏,砂样的极限强度随着围压(深度)的增大成增大趋势,但增加不明显。受挤密效果作用影响,多数试样在破坏后依然保留较高的残余强度,应力-应变曲线峰值不明显,呈现硬化型。试样侧向变形较为明显,呈现出塑性变形状态,试样受压缩呈现为鼓形。

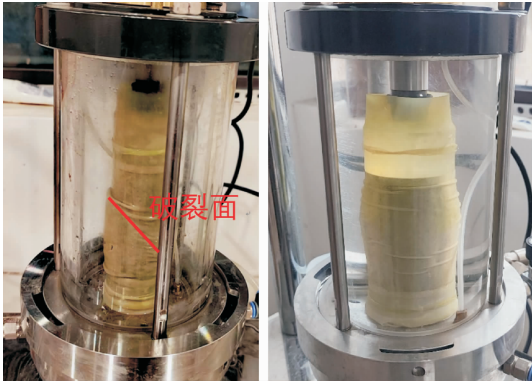


图 13 天然及浸水状态砂土体破坏形式

对比天然状态和浸水状态的三轴试验结果,二者有着不同的破坏形式。随着含水率的增加,同一深度位置的土体,其应力-应变曲线也由软化型变为硬化型,浸水残余强度折减至 $23\% \sim 75\%$,如图 12 和 13 所示。天然和浸水状态下不同深度处临界点剪切应力如图 14 所示,由图 14 可知,同一位置处的土样剪切强度明显折减。不同深度位置土样的浸湿变形系数如图 15 所示,由图 15 可知,在轴向应力 150 kPa 以下时,垂向浸湿变形系数 $0.0005 \sim 0.0092$,且随围压的深度变化不大。 200 kPa 轴向应力作用下垂向浸湿变形系数 $0.0046 \sim 0.0427$,因部分样已达到破坏,无实际比较意义。

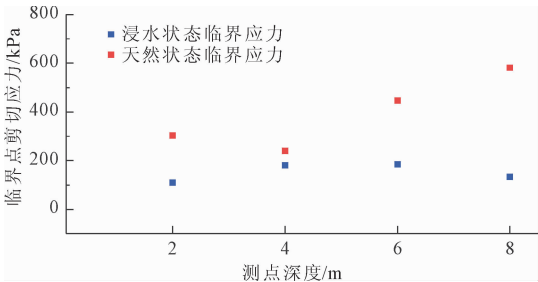


图 14 天然和浸水状态下不同深度处临界点剪切应力

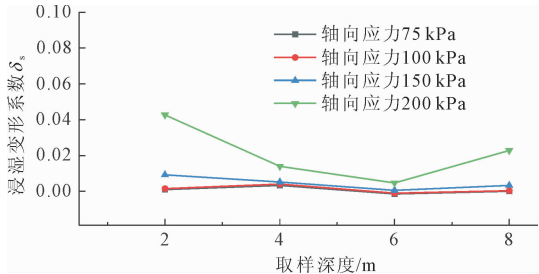


图 15 不同深度位置土样的浸湿变形系数

3.3 浸湿变形试验

为深入研究砂土体的浸湿变形特征,在大型试坑内采用环刀取样,并参照湿陷性开展室内土工试验。同步开展孔隙比、含水率及颗粒分析,实测浸湿变形系数与孔隙比和含水率的对应关系如图 16 所示。 200 kPa 作用下浸湿变形系数在 $0.008 \sim 0.119$ 之间,平均值 0.062 ;孔隙比 $0.5 \sim 1.13$,平均值 0.739 ;含水率 $2.6\% \sim 12\%$,平均值 5.66% 。试验结果未表明浸湿变形系数与孔隙比及含水率存在直接对应关系。

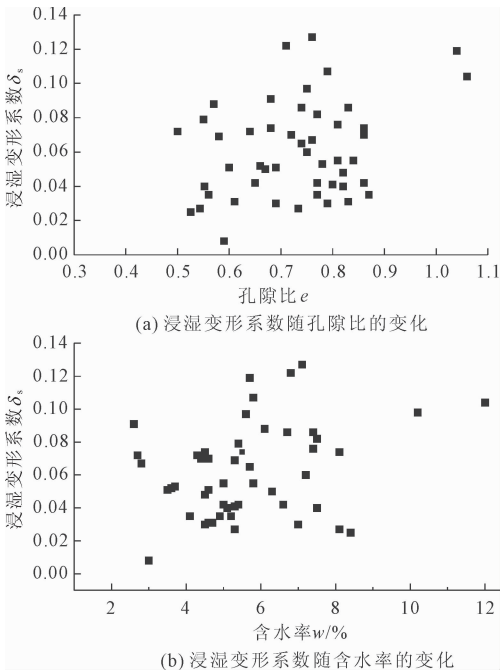


图 16 浸湿变形系数随孔隙比及含水率的变化

考虑到粉细砂的浸湿变形特征受孔隙比及含水率两项强相关参数影响,试验结果具有较大的离散性。为了进一步挖掘天然状态及孔隙比对浸湿变形系数的影响,将含水率和孔隙比分别分成 4 个典型的区间进行分析,同时考虑砂层取样困难导致的取样离散性,采用 95% 置信带进行统计分析,统计结果如图 17、图 18 所示,浸湿变形系数随孔隙比的增加而增大,随着含水率的增加有增大趋势。对比含水率与颗粒分析试验结果,浸湿变形系数随细颗粒含量增加而增大。

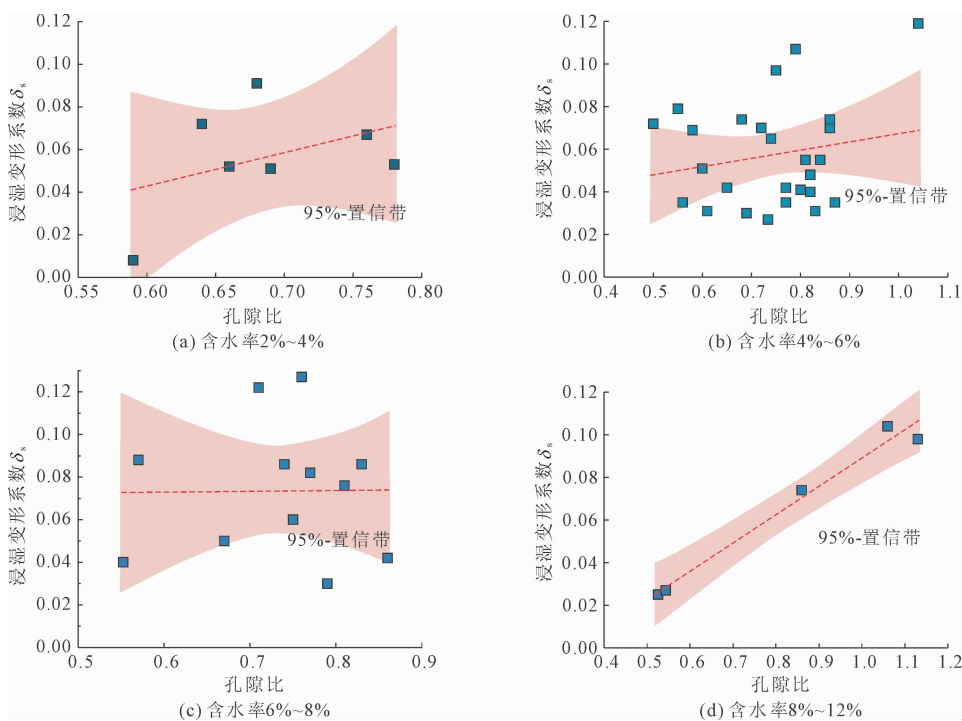


图 17 不同含水率区间下浸湿变形系数与土体孔隙比的关系

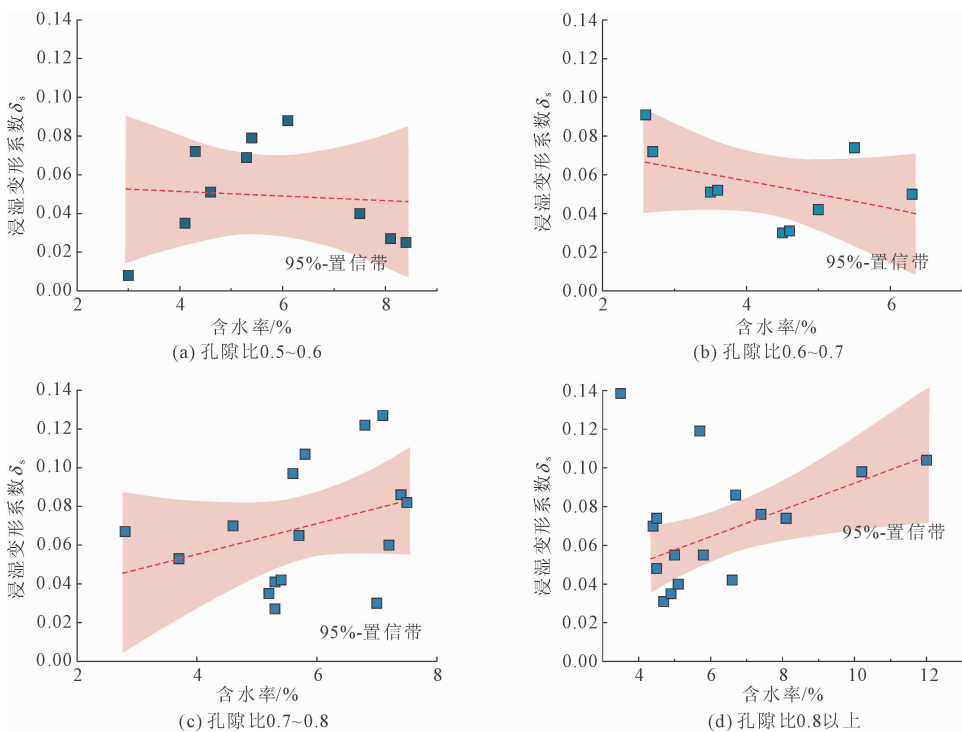


图 18 不同孔隙比区间下浸湿变形系数与含水率的关系

砂土体的浸湿变形和砂层的初始结构性、矿物成分及颗粒空间状态相关,在矿物成分相同的情况下分析初始结构与颗粒状态对浸湿变形特征的影响,采用扰样同步开展浸湿变形试验,实测该地区扰样浸湿变形系数平均值 0.063,与大型试坑内采用环刀取得的原状样浸湿变形系数基本相同,可以推

断该类砂土浸湿变形系数与初始结构无明显关联。

4 结 论

本文基于地质过程分析方法、岩土体微观测试、原位测试手段和土工试验,推演了高原湖相弱固结砂岩次生砂层的形成演化过程,分析了该砂层的浸

湿变形特征,得出结论如下:

(1) 托林组弱固结砂岩是一套上新世(N_2)湖相沉积地层,是前序以“近源”、“浊积”为特征的复理石建造及火成岩地层经近源搬运快速再沉积地层,沉积过程中伴随着地壳的快速隆升,固结不充分,且含有极地型黏土矿物,具水敏性强、水稳性差等特征。

(2) 阿里札达地区砂层是托林组弱固结砂岩的次生地层,是在高海拔、寒冷、干旱、反复冻融环境下经近源搬运后的静水沉积地层,该砂层继承了托林组地层矿物成分及水敏性特征。

(3) 托林组弱固结砂岩次生砂层颗粒分选性差,矿物成熟度低,亲水性黏土矿物以团聚物或附着包裹在砂颗粒周边的形式存在,体现出明显的含黏砂土特征,天然状态下体现较高的视结构强度,随浸水状态发展黏土颗粒软化导致强度急剧降低,传统的标贯试验无法判断其真实的密实状态。

(4) 托林组弱固结砂岩次生砂层具有极强的水敏性,在外荷载作用下体现出复杂的浸湿变形特征。区别于传统湿陷性,砂土体的浸湿变形系数与原砂土体结构无明显影响,受微观特征控制,随密实度增大减小,随黏土矿物含量增加而增大。

结合当前初步的研究结果,建议高海拔寒旱区含黏砂土岩土工程勘察应进行水敏性专项评价。

参考文献:

- [1] 项树元,王 岸,王国灿,等. 青藏高原及邻区第四纪地质与地貌图及说明书[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2013.
- [2] 张永双,曲永新,赵希涛,等. 青藏高原东南缘第四纪工程地质概论[M]. 武汉:地质出版社,2010.
- [3] 彭建兵,马润勇,卢全中,等. 青藏高原隆升的地质灾害效应[J]. 地球科学进展,2004,19(3):457-466.
- [4] 李 纯,王煜斌,王 刚. 层状土体变特性及变形计算方法研究进展[J]. 水利与建筑工程学报,2023,21(4):1-9.
- [5] 周 平. 昔格达地层长大铁路隧道变形-灾变特征及失稳机理研究[D]. 成都:西南交通大学,2018.
- [6] 赵彦君. 中兰铁路香山隧道极软岩地区掌子面变形机理与超前加固技术研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2023.
- [7] 王 静,胡金虎,杨亚源,等. 分级循环荷载下粉土动力特性研究[J]. 水利与建筑工程学报,2024,22(6):166-171.
- [8] 陈正汉. 非饱和土研究的新进展[C]//中加非饱和土学术研讨会文集. 1994:145-152.
- [9] 陈正汉,卢再华,朱元青. 非饱和土的理论与实践[J]. 力学与实践,2001,23(5):8-15.
- [10] 陈正汉,郭 楠. 非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的新进展[J]. 岩土力学,2019,40(1):1-54.
- [11] 王悠予,王丽琴,朱俊涛,等. 黄土结构性对其压缩-回弹变形特性的影响[J]. 水利与建筑工程学报,2024,22(4):106-111.
- [12] 杨文腾. 不同配比砂黏土混合物强度特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2021.
- [13] 苗强强,张 磊,陈正汉. 非饱和含黏砂土的广义土-水特征曲线试验研究[J]. 岩土力学,2010,31(1):102-107.
- [14] 邱松楠,黎晓冬. 基于 DEM-CFD 耦合方法的砂土渗透破坏强度劣化模型研究[J]. 水利与建筑工程学报,2023,21(5):71-77.
- [15] 苏志鹏. 基于细粒含量和矿物成分的含黏砂土静动力特性试验研究[D]. 广州:华南理工大学,2021.
- [16] 崔 凯,王孝文,贾政鹏,等. 砂黏统一本构模型的一种简单广义化方法[J]. 西南交通大学学报,2024,59(1):1-10.
- [17] 陈 宝,林明琛,饶红玉. 土力学教学中三相指标计算实用程序开发[J]. 水利与建筑工程学报,2024,22(5):213-218.
- [18] 孟宪刚,朱大岗,邵兆刚,等. 西藏札达盆地古格地貌的特征与成因初探[J]. 地质通报,2006,25(21):295-301.
- [19] 王维亮,张进江,张 波. 西藏札达盆地构造与沉积特征[J]. 北京大学学报(自然科学版),2004,40(6):872-878.
- [20] 刘增乾,徐 宪,潘桂棠. 青藏高原大地构造与形成演化[M]. 北京:地质出版社,1990.
- [21] 郭铁鹰,梁定益,张宜智,等. 西藏阿里地质[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1991.
- [22] 邹定邦,饶荣标,陈永明,等. 南巴彦喀拉山三叠系油积岩[C]//青藏高原地质文集. 北京:地质出版社,1984:27-41.
- [23] 彭建兵,马润勇,卢全中. 青藏高原隆升的地质灾害效应[J]. 地球科学进展,2004,19(3):457-466.
- [24] 朱大岗,孟宪刚,邵兆刚,等. 西藏阿里札达盆地上新世-早更新世的古植被、古环境与古气候演化[J]. 地质学报,2007,81(3):295-307.
- [25] Kempf O, Blisniuk P M, Wang S F. Sedimentology, sedimentary petrology, and paleoecology of the monsoon-driven, fluvio-lacustrine Zhada Basin, SW-Tibet[J]. Sedimentary Geology, 2009,222(1/2):27-41.
- [26] 朱大岗,孟宪刚,邵兆刚,等. 西藏札达盆地形成演化与喜马拉雅山隆升[J]. 地球学报,2006,27(3):193-200.
- [27] 王 永,邓绵平,凌 媛,等. 青藏高原及周边第四纪综合地层、生物群与古地理演化[J]. 中国科学:地球科学,2024,54(4):1379-1410.