文章编号:1674-2974(2024)11-0104-11 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024112

含碎石芯软黏土复合试样大三轴试验研究

应宏伟[1,2],陈雨[1],王阳扬[1†],刘冠[1]
(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;
2. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心,浙江 杭州 310058)

摘 要:以拟建的某水电站碎石桩地基处理为背景,研发了能提高重塑软黏土固结效率、减小试样扰动的含碎石芯软黏土复合试样的室内试验制样方法,开展了不同围压和碎石芯置换率的复合试样室内大三轴试验研究.研究表明,复合试样在较小围压下表现出应变硬化特性,在较高围压下则基本呈现软化特征,且碎石置换率越小,软化特征越明显,相同围压时,复合试样的初始变形模量随试样面积置换率的增大而增大;在高围压和低置换率时,软黏土碎石芯复合试样的剪切破坏面明显,在低围压和高置换率时,复合试样中部出现较明显的鼓胀现象,碎石芯最大鼓胀量总体随着围压和置换率的提高而增大.规范方法高估了复合试样(地基)的内摩擦角,面积置换率越大,规范计算值与试验结果的差值越大.高围压下传统应力叠加法高估了软黏土振冲置换碎石桩复合地基的承载能力,低估了复合地基的沉降,置换率越高,相同轴向应变时与复合试样大三轴试验的偏应力误差越大.

关键词:软黏土;碎石桩复合地基;三轴试验;抗剪强度;应力叠加法
中图分类号:TU431 **文献标志码**:A

Study on Large Triaxial Test of Soft Clay Composite Samples with Gravel Core

YING Hongwei[1,2], CHEN Yu[1], WANG Yangyang[1†], LIU Guan[1]
(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Taking the foundation treatment of gravel pile in a proposed hydropower station as the background, an indoor experimental sample preparation method of soft clay composite samples with gravel core was developed, which can improve the consolidation efficiency of remolded soft clay and reduce the disturbance of the samples. The large triaxial tests of composite samples with different confining pressures and gravel core replacement rates were carried out. The results show that composite specimens exhibit strain hardening characteristics under small confining pressures, while they generally exhibit softening characteristics under high confining pressures, and the softening

* **收稿日期**:2023-12-09
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678523), National Natural Science Foundation of China(51678523);中央高校基本科研业务费资助项目(B200201012), Fundamental Research Funds for the Central Universities (B200201012);浙江省建设科研项目(2018K119), Zhejiang Province Construction Research Project(2018K119)
作者简介:应宏伟(1971—),男,江西萍乡人,河海大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail: 15189833628@163.com

characteristics are more pronounced with a smaller gravel replacement rate. At the same confining pressure, the initial deformation modulus of the composite specimen increases with the increase of the sample area replacement rate. At high confining pressure and low replacement rate, the shear failure surface of the soft clay gravel core composite sample is obvious. At low confining pressure and high replacement rate, there is a more obvious bulging phenomenon in the middle of the composite sample. The maximum bulge amount of the gravel core generally increases with the increase of confining pressure and replacement rate. The current code method overestimates the internal friction angle of the composite specimen (foundation), and the larger the area replacement rate, the greater the difference between the calculated values and the experimental results. Under high confining pressures, the traditional stress superposition method overestimates the bearing capacity of the soft clay vibroflotation replacement gravel pile composite foundation and underestimates the settlement of the composite foundation. The higher the replacement rate, the greater the deviation stress error between the stress superposition method and the large triaxial test of the composite sample.

Key words: soft clay; gravel pile composite foundation; triaxial test; shear strength; stress superposition method

我国沿海地区广泛分布着软黏土，由于特殊的沉积环境，这类土层呈现出高孔隙比、高含水量以及低透水性等特性，致使在这些土层上进行建设时，工程性质相对较差，因此需要对天然地基进行必要的处理与加固. 近年来随着我国水利事业和地基处理技术的不断发展，国内已有一些在深厚软土地基上修建土石坝工程的实例[1-3]. 振冲碎石桩因具有良好的排水和置换功能，且工艺成熟，开始广泛应用于水利工程大坝深厚软黏土地基处理. 因此，研究碎石桩在水利工程中的应用具有重要的现实意义.

目前，已有众多国内外学者对碎石桩复合地基进行研究. 其中理论研究主要集中在碎石桩复合地基承载力[4-7]、桩土应力比[8-9]和沉降的计算[10-11]三方面. 数值分析方法多为结合本构模型模拟碎石桩复合地基的沉降和侧向变形[12-14]，研究碎石桩刚度、桩数以及长径比等因素的影响. 由于碎石桩与桩周软黏土共同工作机制的复杂性，试验是进行碎石桩复合地基研究的重要手段. Bergado 等[15]通过对碎石桩的现场载荷试验，发现碎石桩鼓胀位置约出现在 0.5 倍桩径处. 现场原位试验难以控制试验条件，很多学者对碎石桩复合地基进行了室内模型试验. 陈建峰等[16-17]通过模型试验研究加筋情况对于碎石桩复合地基的影响. Kumar 等[18]通过单桩室内模型试验，分析了单桩沉降与面积置换率、碎石桩材料特性、桩周土体不排水抗剪强度三者之间的关系. 王家辉等[19]采用大型叠环剪切仪开展了碎石桩复合地基模型试验，指出在研究加固作用机理时不仅要考虑置换率，还要考虑其对复合地基排水效果的影响. 张玲等[20]通过室内大型直剪试验研究了法向应力等对箍筋碎石桩桩土截面摩擦特性的影响.

由于含碎石芯复合土样制样困难，国内外三轴试验相关研究较少. Sivakumar 等[21]进行了一系列含砂桩软黏土复合试样的小三轴不排水剪切试验，提出当碎石桩超过 5 倍桩径的临界长度时，承载能力提升不再明显. Black 等[22]通过三轴试验发现 30%~40% 之间的面积置换率对于控制沉降变形是最优的. 江洎洧等[23]分别对碎石原料和成桩体进行大三轴试验，指出碎石原料强度大于成桩体整体强度，应选取修正后的成桩体强度进行复合地基的等效抗剪强度计算.

碎石桩复合地基可有效提高软黏土地基的承载力并减小地基沉降已在工程界达成共识. 在土石坝深厚软黏土地基上采用碎石桩复合地基时，地基的应力水平和碎石桩置换率比一般的路堤情况更高，在采用复合地基理论确定复合地基的变形和强度参数，进行沉降和稳定计算时，目前常采用的《水电水利工程振冲法地基处理技术规范》(DL/T 5214—2016)[24]方法的适用性有待研究. 本文以某水电站土石坝碎石桩复合地基处理项目为工程背景，研发了能提高重塑软黏土固结效率、减小试样扰动的含碎石芯软土复合试样的制样方法，开展了含碎石芯软

黏土复合试样室内大三轴剪切试验,对较高围压和碎石置换率条件下的含碎石芯软黏土复合土样的受力变形特性进行研究.

1 试验设计

1.1 工程背景

某水电站位于非洲某国北部省与南部省交界的干流上,最大坝高约59 m,坝顶长363 m、坝顶宽8 m,坝址附近覆盖层深厚,硬壳层以下的软黏土及泥炭质土层厚度最大约30 m.

1.2 试验材料

由于工程现场原状土取样较为困难,采用重塑高岭土代替现场软黏土进行试验.采用细度(-2 μm)为85%的高岭土粉,加水充分搅拌,对预固结完成的重塑高岭土进行简单物理试验,得到重塑高岭土基本力学参数,如表1所示,经比较,重塑高岭土物理力学性质与现场原状土[26]基本相似.

表1 重塑土基本力学参数

Tab.1 Basic mechanical parameters of remolded soil

饱和重度/(kN·m^{-3})	饱和度S_r/%	含水量w_s/%	液限/%	塑限/%	塑性指数/%	c'/kPa	φ'/(°)
16.37	100	64	68.7	31.6	37.1	20	17.22

采用江苏镇江句容的碎石料代替现场碎石料进行试验.试验所用碎石料最大粒径为20 mm,满足《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)[25]规定的大三轴试样最大粒径要求.测量得到碎石料粒径分布曲线,如图1所示,根据碎石料密度、复合试样面积置换率及复合试样体积计算出一次三轴试验所需的碎石料质量,如表2所示,表中m为含碎石芯软黏土复合试样面积置换率,m=1.00代表纯碎石试样.

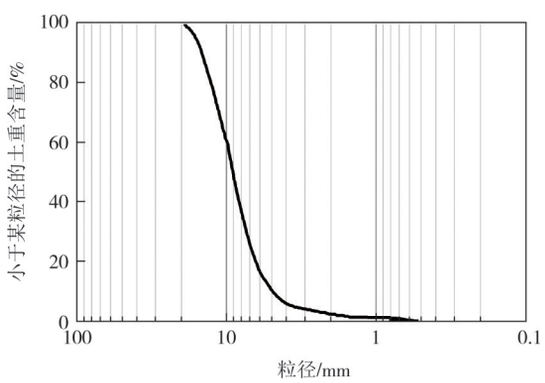


图1 碎石料颗粒级配曲线

Fig.1 Gradation curve of gravel particles

表2 试样所需各级配碎石料质量

Tab.2 The mass of gravel at all levels required by the sample

颗粒粒径/mm	所占质量/kg				
	m=0.05	m=0.15	m=0.25	m=0.35	m=1.00
1~2	0.07	0.22	0.36	0.50	1.44
2~5	0.29	0.86	1.44	2.02	5.76
5~10	1.80	5.40	9.00	12.60	36.00
10~20	1.44	4.32	7.20	10.08	28.80

1.3 试验设备

采用河海大学与长春朝阳试验仪器厂联合研制的LSW-1000型大型三轴剪切试验仪(图2)进行试验.该三轴剪切试验仪采用油缸下置、四柱式加载框架.仪器的最大轴向压力为1 000 kN,最大围压为3 MPa,轴向变形的测量范围为-150~0 mm.圆柱体试样直径为300 mm、高为600 mm.



图2 LSW-1000型大型三轴剪切试验仪

Fig.2 LSW-1000 large-scale triaxial shear apparatus

1.4 试验方案

选取碎石桩复合地基一个典型单元进行试验研究,包含碎石芯及软黏土,由于原状碎石桩颗粒较大,为减小缩尺效应引起的试验误差,选择试样直径为0.3 m、高度为0.6 m的大型三轴剪切试验仪进行含碎石芯软黏土复合试样三轴剪切试验.由于碎石桩复合地基排水效果较好,且大坝填筑工期较长,施工较慢,在施工阶段地基排水较为充分,因此采用三轴固结排水剪模拟现场排水条件.试验中对于试验围压及面积置换率的确定应与实际工程相符.参考

已建浙江汤浦水库大坝[2]和云南务坪水库[3]碎石桩布桩经验,在不同坝基处设计不同面积置换率的碎石桩复合地基,其中,在大坝坝高1/2以上部位坝基处采用0.35的置换率,大坝坝高1/2以下坝基处采用0.30的置换率,下游压坡靠坝体40 m范围内采用0.25的置换率.试验选取复合试样面积置换率分组为0.05、0.15、0.25、0.35,对应的碎石芯直径依次为67.1 mm、116.2 mm、150.0 mm、177.5 mm.根据大坝填筑阶段碎石桩埋深,确定试验围压为300 kPa、600 kPa、900 kPa三组.

为研究不同面积置换率的复合试样与纯碎石、纯软黏土试样力学特性之间的联系,每一组试验围压下分别各添加一组纯碎石和一组纯软黏土试样,进行大三轴剪切对比试验.

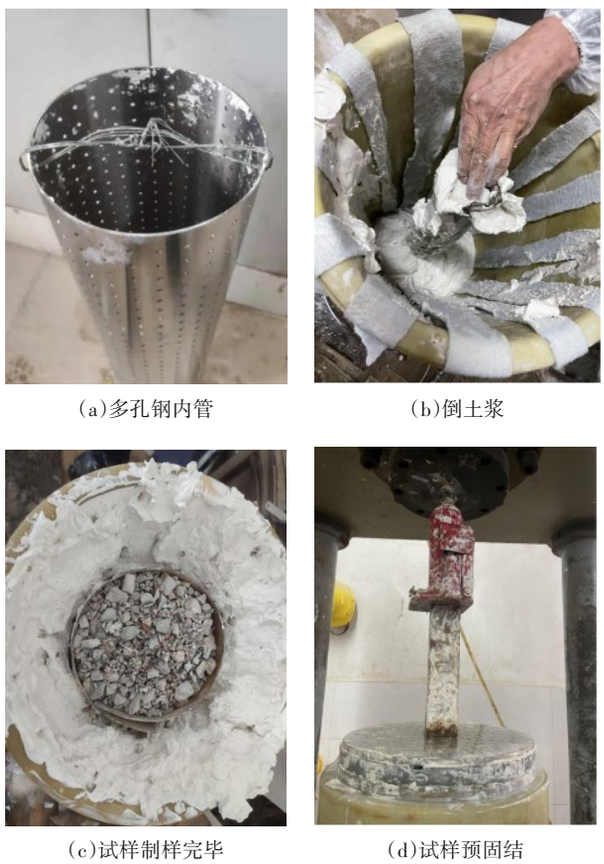
2　试验过程

2.1　制样

首先布置好成型筒、滤布、乳胶膜,并将滤布剪成条状,沿着乳胶膜内侧垂直放置.制备纯碎石试样时,将提前称好的碎石料均匀地分成5份,再拌匀后分5次装入成型筒内,每一层用锤子击实并用钢尺进行测量,保证每层击实高度相等,保证试样碎石颗粒的均匀性,再整平表面,放上滤布和试样帽,连接试样帽至抽真空泵.制备复合试样时,提前放置用于碎石芯制备的多孔钢内管[图3(a)],将称好的碎石料拌匀后分层装入多孔钢内管内并击实.碎石颗粒间孔隙相较于复合试样软黏土颗粒间孔隙更大,因此碎石芯有助于水快速排出,当复合试样承受荷载时,产生的超孔隙水压力能很快消散;同时避免了碎石芯插入过程对周围软黏土的扰动问题.再将提前制备好的重塑软黏土浆沿碎石芯外侧倒入[图3(b)],直至土浆超过碎石芯表面30 mm处[图3(c)],依次铺上滤纸、滤布、透水板.在制备纯软黏土试样时,提前制备1%~3%面积置换率的辅助碎石芯,此时碎石芯的存在能提高试样固结效率,经验证该做法不会对试样应力应变曲线产生大的影响[27],步骤同复合试样制备.最后将装载试样的大三轴底座推至大三轴仪轴向加载装置上,利用千斤顶连接试样与大三轴仪加载板[图3(d)].

2.2　试样预固结

重塑软黏土大三轴试样的预固结有两大难点:一是没有现成的符合大三轴试样尺寸的固结装置;二是试样尺寸大,若按常规方法进行重塑软黏土大三轴试样的固结,耗时很长.在重塑软黏土预固结开始前就制好的贯通试样上下底面的碎石芯,能极大提高排水效率,缩短重塑软黏土预固结时间.



(a)多孔钢内管　(b)倒土浆　(c)试样制样完毕　(d)试样预固结

图3　复合试样制样过程

Fig.3　Preparation process of composite sample

试样装载完毕后需进行试样预固结.根据各组试验围压确定预固结轴压大小,确保最大预固结轴压稍小于试验围压,用于模拟软黏土的正常固结.由于水电站大坝填筑阶段需经历一段时间,为符合工程实际,本试验采用分级加载的加载方式进行简化,利用大三轴仪主机控制轴压施加,每一级预固结轴压维持至大三轴仪排水管中不再有水排出,即在该级荷载下,重塑软黏土固结充分.在第3级轴压加载完毕后,拔出多孔钢内管,补充重塑软黏土浆至超过碎石芯表面30 mm.此时经过三级轴压预固结的重塑软黏土已具备一定的硬度和结构性,拔出钢管后施加与第3级轴压大小一致的第4级预固结轴压,防止钢管拔出后桩土交界面处土体发生较大扰动,进而影响碎石芯及复合试样强度.第4级预固结轴压施加完毕后,碎石芯鼓胀变形已不明显,该方法能保证预固结完成后碎石芯面积置换率不发生较大变化.

对于复合试样及纯软黏土试样,完成试样的预固结常需要3~4 d,面积置换率越小的复合试样,试

样预固结所需时间越长.

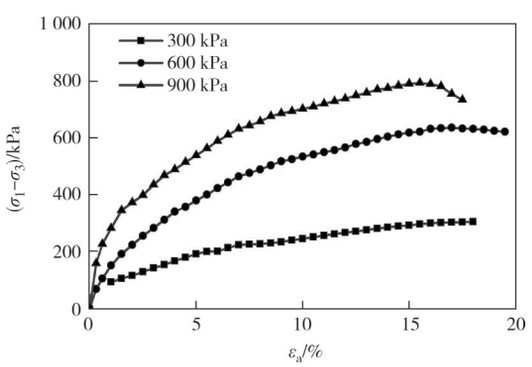
2.3 试样饱和、固结与剪切

装样进行水头饱和.固结控制以0.01 MPa/s的速率施加围压,直至加至指定围压大小.逐渐增大轴压,控制剪切速率为0.25 mm/min,剪切应至少进行到试样高度的15%,即轴向位移为90 mm时终止,完成一个复合试样的固结剪切通常需2 d.

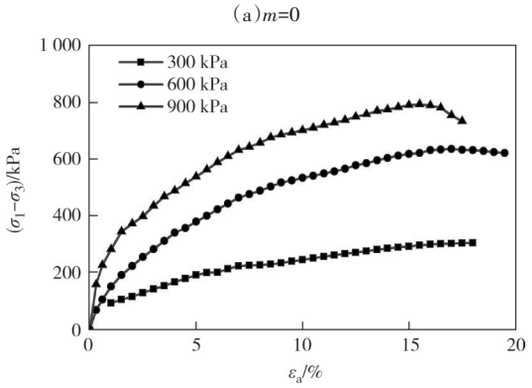
3 试验结果与分析

3.1 应力应变规律

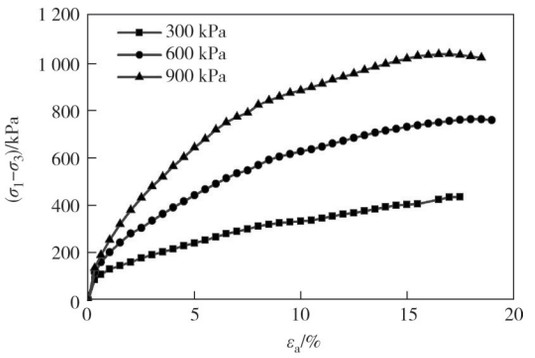
图4为不同试验围压下的重塑软黏土、纯碎石及复合试样的应力应变关系曲线.从三轴试验结果可以发现随着围压增加,各试样达到相同轴向应变时的偏应力增大.重塑纯软黏土试样(m=0)在300 kPa的小围压下呈硬化特性,在600 kPa和900 kPa较大围压下的应力应变曲线出现峰值偏应力点,试样发生破坏.复合试样在300 kPa和600 kPa围压下表现出硬化特性;在900 kPa围压下则大多存在峰值偏应力,对应的轴向应变基本在16%~18%之间变化,基本呈现应变软化特征,且碎石置换率越小,软化特征越明显.纯碎石试样在3个围压下均呈现应变硬化特性,偏应力随着轴向应变的增加持续增加,未出现明显峰值应力.



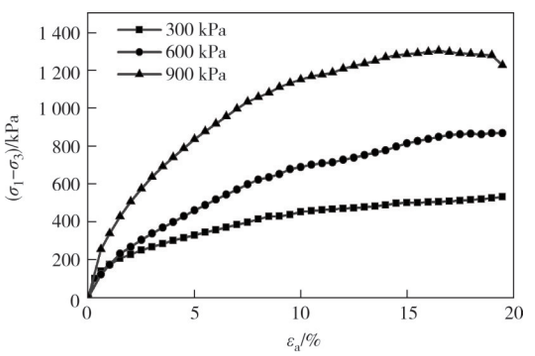
(a)m=0



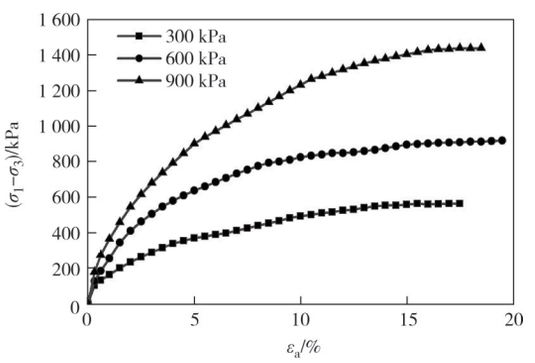
(b)m=0.05



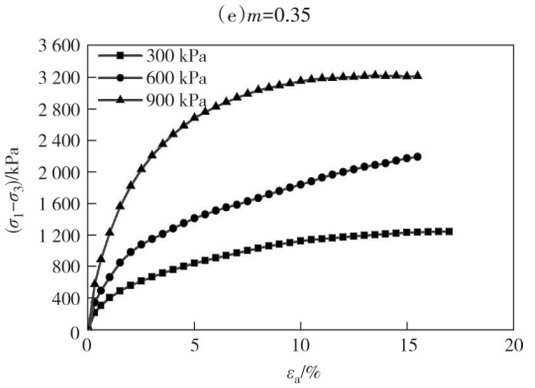
(c)m=0.15



(d)m=0.25



(e)m=0.35



(f)m=1.00

图4 试样偏应力与轴向应变关系

Fig.4 Relationship between deviation stress and axial strain of sample

绘制不同面积置换率的软黏土碎石芯复合试样初始变形模量E_i与试验围压σ_3关系曲线图,如图5所示.可以看到,相同面积置换率时,初始变形模量

随围压近似呈线性增长;相同围压时,面积置换率越大,其初始变形模量也越大,这是因为复合试样中碎石芯材料的刚度明显大于桩周软土.

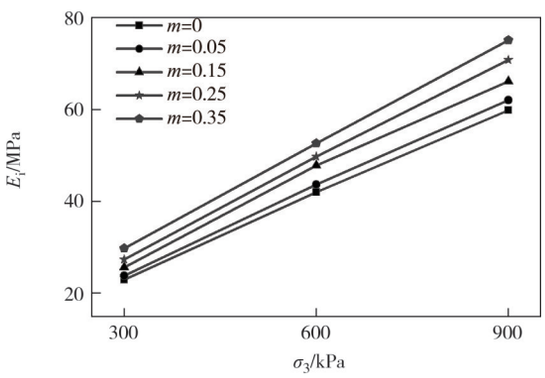


图 5　复合试样 E_i–σ_3 关系曲线

Fig.5　The E_i–σ_3 relationship curve of composite samples

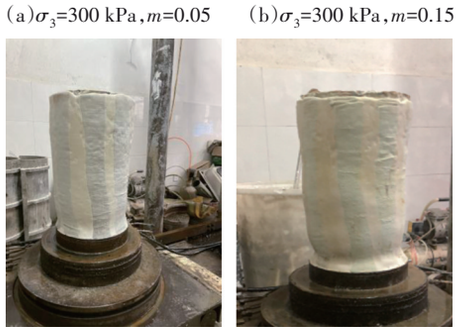
3.2　复合试样破坏形态及碎石芯变形特征

图 6 为复合试样的典型破坏形态. 在较高围压和低置换率时[图 6(i)(j)],可以看到试样出现了明显的剪切破坏面,试样表面土体随着剪切面发生了错动,剪破面附近出现一系列小裂纹,剪切面起始位置约在试样顶部以下 2~8 cm 处,表明高围压和低置换率时,软黏土碎石芯复合试样易发生剪切破坏. 同时也可看出,在低围压和高置换率时,试验终止时的复合试样剪切面相对不明显,试样中部出现较明显的鼓胀现象.

将试验结束后的复合试样沿直径方向切开,试验结束后碎石芯仍处于复合试样正中间,且碎石芯整体连续,如图 7 所示,说明本文提出的含碎石芯软黏土复合试样的研制方法是合理的. 试验结束后试样高度缩小,必然导致碎石芯径向发生鼓胀,通过观察测量发现碎石芯呈现“中间鼓,两头紧”的形状,且鼓胀最明显的位置出现在距试样底部约 1/3~1/4 处,此处碎石芯与软黏土交界面凹凸不齐,部分碎石颗粒嵌入软黏土中.



(a)σ_3=300 kPa,m=0.05　(b)σ_3=300 kPa,m=0.15



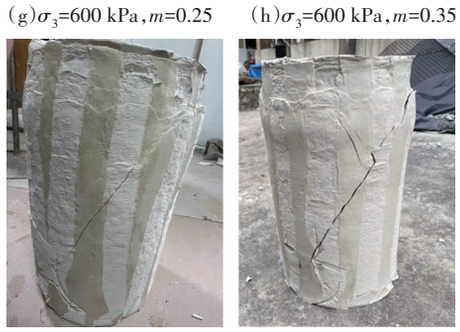
(c)σ_3=300 kPa,m=0.25　(d)σ_3=300 kPa,m=0.35



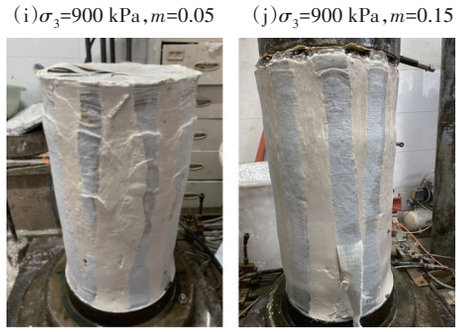
(e)σ_3=600 kPa,m=0.05　(f)σ_3=600 kPa,m=0.15



(g)σ_3=600 kPa,m=0.25　(h)σ_3=600 kPa,m=0.35



(i)σ_3=900 kPa,m=0.05　(j)σ_3=900 kPa,m=0.15



(k)σ_3=900 kPa,m=0.25　(l)σ_3=900 kPa,m=0.35

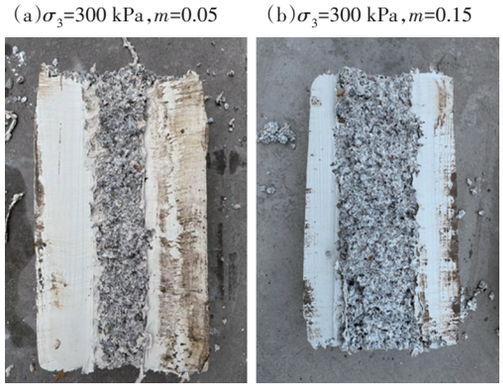
图 6　复合试样破坏面

Fig.6　Failure surface of composite sample

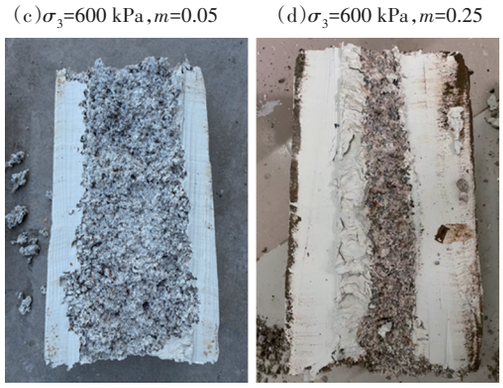
从表 3 对试验终止时碎石芯纵向剖面最大鼓胀处的量测结果可知(其中 m=0.15、围压分别为 600 kPa



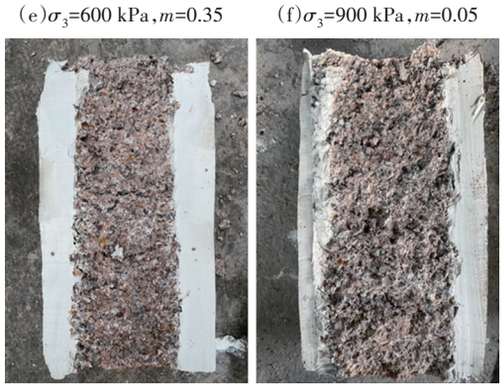
(a)σ_3=300 kPa,m=0.05 (b)σ_3=300 kPa,m=0.15



(c)σ_3=600 kPa,m=0.05 (d)σ_3=600 kPa,m=0.25



(e)σ_3=600 kPa,m=0.35 (f)σ_3=900 kPa,m=0.05



(g)σ_3=900 kPa,m=0.25 (h)σ_3=900 kPa,m=0.35

图7 试验结束后的复合试样碎石芯

Fig.7 Composite sample gravel core after the test

和900 kPa的两个试样量测过程不理想而未获得有效数据),相同试验围压下,碎石置换率越大,碎石芯的最大侧向鼓胀量越大;置换率相同时,碎石芯最大鼓胀量总体随着围压增大而增大.

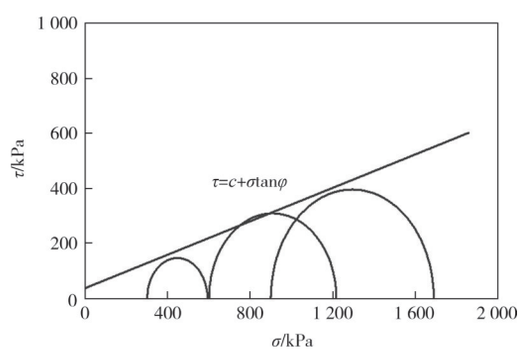
表3 复合试样碎石芯的侧向鼓胀量

Tab.3 Lateral bulging value of composite sample gravel cores

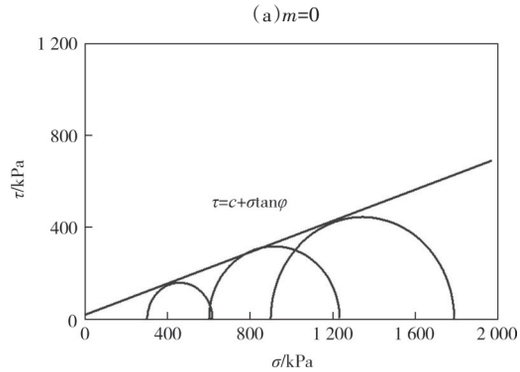
试验围压/kPa	鼓胀量/mm			
	m=0.05	m=0.15	m=0.25	m=0.35
300	2.9	3.8	10.0	19.5
600	5.9	—	15.0	22.5
900	7.9	—	20.0	22.5

3.3 抗剪强度参数分析

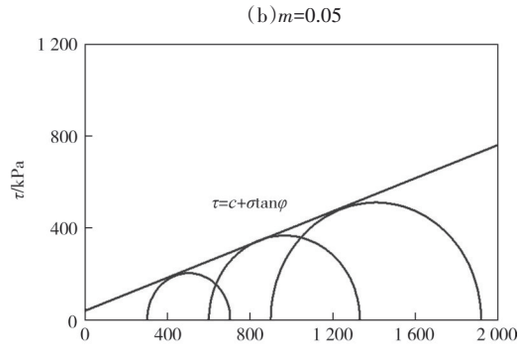
分别绘制不同置换率的含碎石芯软黏土复合试样、重塑软黏土试样、纯碎石试样在不同围压下的莫尔应力圆,获得相应的莫尔-库伦强度包络曲线,各试样的莫尔圆及强度包络线如图8所示.并由此得到重塑软黏土的抗剪强度参数c_s=20 kPa、内摩擦角φ_s=17.22°,纯碎石试样的抗剪强度参数c_p=78 kPa、φ_p=37.6°,其余复合试样的抗剪强度参数c_c、φ_c试验结果见表4.



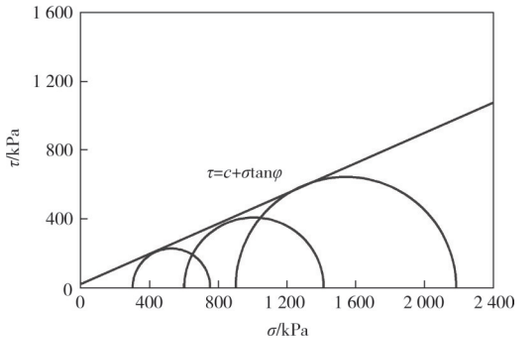
(a)m=0



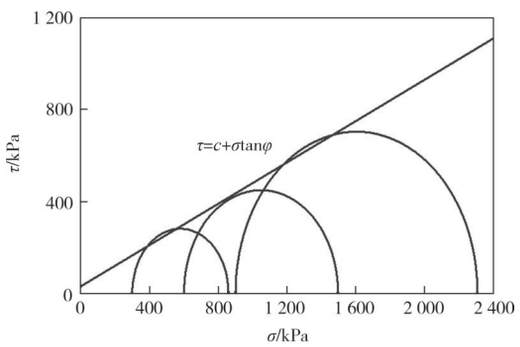
(b)m=0.05



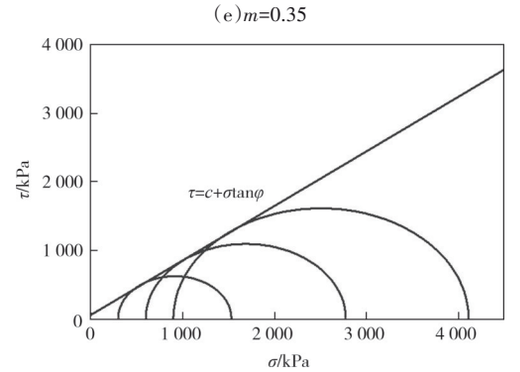
(c)m=0.15



(d)m=0.25



(e)m=0.35



(f)m=1.00

图 8　试样的莫尔-库伦强度包络曲线

Fig.8　Mohr-Coulomb strength envelope curve of samples

规范[24]方法，已知纯软黏土和纯碎石强度指标，可按下式计算复合试样强度指标：

$$\tan\varphi_{sp} = m\mu_p \tan\varphi_p + (1 - m\mu_p)\tan\varphi_s \quad (1)$$

$$c_{sp} = (1 - m\mu_p)c_s \quad (2)$$

$$\mu_p = \frac{n}{1 + m(n - 1)} \quad (3)$$

式中：n为桩土应力比；μ_p为应力集中系数.

按规范[24]方法计算得到的复合试样抗剪强度参数，与试验得到的复合试样抗剪强度参数值进行比较，对比结果见表4，表中c_{sp2}、φ_{sp2}和c_{sp3}、φ_{sp3}分别为桩土应力比n取2和3时的复合试样抗剪强度参数. 由表4可见，与水泥桩复合试样等效摩擦角和桩间软黏土基本一致的结论[28]不同，碎石桩复合试样的等效摩擦角均大于桩间软黏土；复合试样的面积置换率越大，本次试验和规范[24]方法得到的复合试样(地基)的内摩擦角φ值越大，主要原因是在剪切过程中碎石颗粒的挤压咬合作用在复合试样中占主导地位，碎石置换率越高，提供的咬合力越大；同时也可发现，试验得到的复合试样内摩擦角低于规范[24]方法，且随着置换率的提高，两者差值变大. 规范[24]方法假设纯碎石的c_p=0，只考虑桩间土的黏聚力，且桩土应力比不随碎石面积置换率变化而变化，由式(2)得到的复合地基的黏聚力c_{sp}随碎石置换率的提高而呈减小趋势，而本文试验得到的纯碎石试样的c_p大于0，这里为了方便比较，没有考虑碎石料强度包线的非线性特征，而仍采用线性的库伦强度包线确定试验碎石料的强度参数，其在纵坐标轴上的截距c_p值可视为似黏聚力，是碎石颗粒间相互摩擦和颗粒间咬合作用的结果，与黏性土的黏聚力有着本质的区别. 由于规范[24]方法未考虑碎石料的咬合作用，计算得到的各复合试样的黏聚力随置换率的增大而减小.

4　应力叠加法适用性分析

在进行工程设计时，碎石桩复合地基的力学性质是关系上部建筑稳定性的重要因素，而碎石桩在受剪状态下的力学性质和变形特征是碎石桩复合地基力学性质中的重要组成部分. 限于室内大直径复合试样三轴试验的难度和复杂性，对软黏土碎石桩复合地基的强度参数和压缩模量，以往工程上一般

表 4　复合地基强度参数规范计算值与复合试样试验值的比较

Tab.4　Comparison of calculated values of composite foundation strength parameters with test values of composite samples

置换率	本文试验值		规范[24]方法(n=2)		规范[24]方法(n=3)	
	c_c/kPa	φ_c/(°)	c_{sp2}/kPa	φ_{sp2}/(°)	c_{sp3}/kPa	φ_{sp3}/(°)
0.05	21	18.26	18	19.48	17	20.44
0.15	22	20.81	15	23.27	13	25.14
0.25	28	22.78	12	26.29	10	28.37
0.35	35	24.70	10	28.75	8	30.72

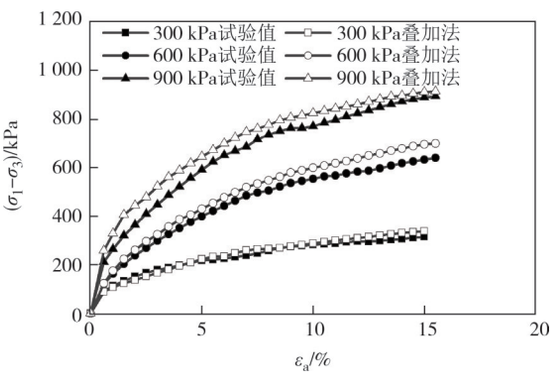
先通过室内三轴试验得到碎石和软黏土的强度参数和压缩模量,用纯碎石试样和软黏土试样的应力应变曲线按碎石置换率叠加(又称应力叠加法,本文简称叠加法),以描述不同碎石置换率下复合地基的应力应变曲线.

$$(\sigma_1-\sigma_3)'_{sp}=m\cdot(\sigma_1-\sigma_3)_p+(1-m)\cdot(\sigma_1-\sigma_3)_s \tag{4}$$

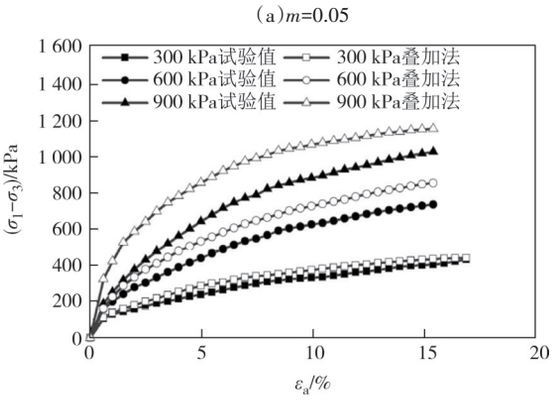
式中:$(\sigma_1-\sigma_3)'_{sp}$为复合试样偏应力;$(\sigma_1-\sigma_3)_p$为纯碎石试样偏应力;$(\sigma_1-\sigma_3)_s$为重塑软黏土试样偏应力;$m$为面积置换率.

采用应力叠加法计算得到的应力应变曲线与本文复合试样大三轴试验得到应力应变曲线的对比如图9所示.

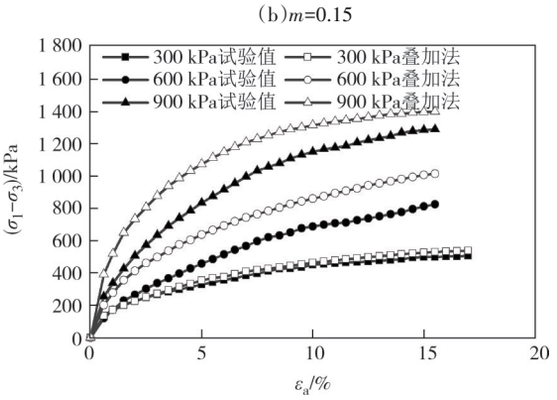
由图9可以看出,在300 kPa围压下,相同面积置换率的复合试样试验得到的应力应变曲线与应力叠加法计算得到的近似.但在600 kPa和900 kPa围压下,相同面积置换率的复合试样用应力叠加法计算得到的应力应变曲线始终在试验得到的曲线上方,说明应力叠加法高估了复合地基的承载能力,在面积置换率和偏应力相同的情况下,低估了复合地基的沉降,并且面积置换率越大,两者差别越明显.



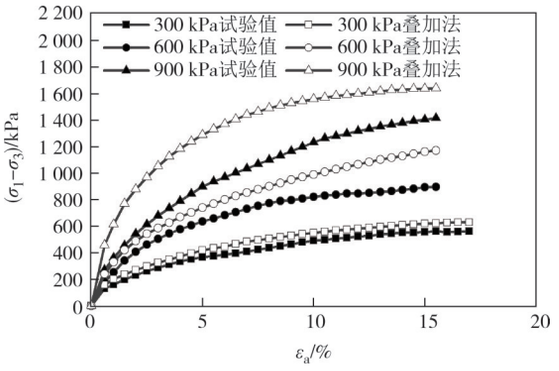
(a)m=0.05



(b)m=0.15



(c)m=0.25



(d)m=0.35

图9 叠加法与复合试样试验值应力应变曲线对比

Fig.9 Comparison of stress-strain curve between the superposition method and the composite sample experimental results

以面积置换率m=0.25的复合试样为例,按式(5)计算试样在剪切至某轴向应变时叠加法与复合试样大三轴试验的偏应力误差w,得到轴向应变ε_a=15%时不同置换率与围压下的误差值,见表5.

$$w=\frac{(\sigma_1-\sigma_3)'_{sp}-(\sigma_1-\sigma_3)_{sp}}{(\sigma_1-\sigma_3)_{sp}} \tag{5}$$

式中:$(\sigma_1-\sigma_3)_{sp}$为复合试样三轴试验得到的偏应力.

从表5中可以看出,取轴向应变为15%时的偏应力为峰值偏应力,由应力叠加法和复合试样试验得到的偏应力值最大误差为26.79%,对应σ_3=600 kPa、m=0.35的复合试样.相同试验围压的试组,剪切至同一轴向应变时,置换率越高,叠加法和复合试样试验得到的偏应力误差越大,这是因为对于复合试样大三轴试验,碎石芯直径越大,在桩土界面处因碎石芯鼓胀产生的径向位移也越大(详见图7和表3);同时,由于桩土界面距离试样截面圆心更远,软黏土产生的环向变形也更大,其环向应力降低更明显.而应力叠加法本质是把复合地基简单视为碎石和软黏土均匀拌和而成的混合土,不存在这种削弱作用,这是图9中复合试样三轴试验得到应力应变曲线位于应力叠加法曲线下方的主要原因.

表5　叠加法与复合试样试验值的偏应力误差(ε_a=15%)

Tab.5　Deviation stress error between the superposition method and the test values of compositespecimens (ε_a=15%)

围压/kPa	偏应力误差/%			
	m=0.05	m=0.15	m=0.25	m=0.35
300	7.39	7.48	6.53	11.25
600	9.82	16.39	20.44	26.79
900	2.03	9.53	7.53	13.84

5　结 论

以某水电站振冲置换碎石桩复合地基处理为工程背景,开展了含碎石芯软黏土复合试样室内大三轴试验,主要结论如下:

1)提出了提高重塑软黏土固结效率、减小试样扰动的含碎石芯软土复合试样的制样方法,制得的复合试样碎石芯整体连续性好,试验效率提升明显.

2)复合试样在较小围压下的应力应变曲线表现出硬化特性;在高围压下则基本呈现应变软化特征,且碎石置换率越小,软化特征越明显.相同围压时,复合试样的初始变形模量随试样面积置换率的增大而增大.

3)在高围压和低置换率时,软黏土碎石芯复合试样的剪切破坏面明显;在低围压和高置换率时,复合试样中部出现较明显的鼓胀现象,碎石芯最大鼓胀量总体随着围压和置换率的提高而增大.

4)规范[24]方法高估了复合试样(地基)的内摩擦角,面积置换率越大,试验结果与规范计算值的差值越大.

5)在高围压下传统的应力叠加法高估了软黏土振冲置换碎石桩复合地基的承载能力,低估了复合地基的沉降,置换率越高,相同轴向应变时与复合试样大三轴试验的偏应力误差越大,实际工程应用时应注意应力叠加法的适用条件.

参考文献

[1] 李进元.振冲碎石桩法地基处理在阴坪水电站中的应用[J].岩石力学与工程学报,2013,32(增刊1):2968-2976.
LI J Y. Application of foundation treatment with vibro-replacement stone piles to Yinping Hydropower Station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Sup.1): 2968-2976.(in Chinese)

[2] 郎小燕,来妙法,金小玲. 振冲法对多层软弱坝基的处理[J].浙江水利科技,1998(4):36-39.
LANG X Y, LAI M F, JIN X L. Treating multilayer soft dam foundation by vibroflotation method[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 1998(4):36-39.(in Chinese)

[3] 陈祖煜,周晓光,陈立宏,等. 务坪水库软基筑坝基础处理技术[J].中国水利水电科学研究院学报,2004,2(3):167-171.
CHEN Z Y, ZHOU X G, CHEN L H, et al. Foundation improvement techniques applied on a soft clay foundation of Wuping Dam[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2004,2(3):167-171.(in Chinese)

[4] 谭鑫,冯龙健,胡政博,等. 竖向荷载下软土中碎石单桩破坏模式及承载力计算[J].湖南大学学报(自然科学版),2021,48(9):10-19.
TAN X,FENG L J,HU Z B,et al. Failure mode and calculation method of ultimate bearing capacity of a single stone column in soft soil under vertical loading[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(9): 10-19.(in Chinese)

[5] ZHOU H Z, DIAO Y, ZHENG G, et al. Failure modes and bearing capacity of strip footings on soft ground reinforced by floating stone columns [J]. Acta Geotechnica, 2017, 12(5): 1089-1103.

[6] 郑刚,周海祚,刁钰,等. 饱和黏性土中散体桩复合地基极限承载力系数研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(3):385-399.
ZHENG G,ZHOU H Z,DIAO Y,et al. Bearing capacity factor for granular column-reinforced composite ground in saturated soft clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(3):385-399.(in Chinese)

[7] SIAHAAN F, INDRARATNA B, NGO N T, et al. Influence of particle gradation and shape on the performance of stone columns in soft clay [J]. Geotechnical Testing Journal, 2018, 41(6): 1076-1091.

[8] 曹文贵,刘海涛,张永杰. 散体材料桩复合地基桩土应力比计算新方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2009,36(7):1-5.
CAO W G, LIU H T, ZHANG Y J. A new pile-soil stress ratio calculation method of composite foundation with friable material piles[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2009, 36(7):1-5.(in Chinese)

[9] 赵明华,牛浩懿,刘猛,等. 柔性基础下碎石桩复合地基桩土应力比及沉降计算[J]. 岩土工程学报,2017,39(9):1549-1556.
ZHAO M H, NIU H Y, LIU M, et al. Pile-soil stress ratio and settlement of composite ground with gravel piles in flexible foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017,39(9):1549-1556.(in Chinese)

[10] ZHANG L, ZHAO M H, SHI C J, et al. Settlement calculation of composite foundation reinforced with stone columns [J]. International Journal of Geomechanics, 2013, 13(3): 248-256.

[11] 张秀勇,王海龙,李杰. 碎石桩复合地基在大丽高速公路软土地基处理中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):455-459.
ZHANG X Y, WANG H L, LI J. Application of gravel pile composite foundation in improving soft subgrade of Da-Li Highway [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5): 455-459.(in Chinese)

[12] RAYAMAJHI D, ASHFORD S A, BOULANGER R W, et al. Dense granular columns in liquefiable ground. I: shear reinforcement and cyclic stress ratio reduction [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(7): 601-623.

[13] 陈昌富, 王纯子, 曹虹, 等. 岸边软土区碎石桩复合地基沉降正交数值试验分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(11):3824-3831.
CHEN C F, WANG C Z, CAO H, et al. Settlement of gravel pile composite foundation in shore based on orthogonal design and numerical analysis [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(11): 3824-3831. (in Chinese)

[14] SHAHU J T, REDDY Y R. Estimating long-term settlement of floating stone column groups[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014,51(7):770-781.

[15] BERGADO D T, LAM F L. Full scale load test of granular piles with different densities and different proportions of gravel and sand on soft Bangkok clay [J]. Soils and Foundations, 1987, 27(1): 86-93.

[16] 陈建峰, 王波, 魏静, 等. 加筋碎石桩复合地基路堤模型试验[J]. 中国公路学报, 2015, 28(9):1-8.
CHEN J F, WANG B, WEI J, et al. Model test of embankment on composite foundation reinforced with geosynthetic-encased stone columns[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(9): 1-8. (in Chinese)

[17] 陈建峰,李良勇,徐超,等. 套筒长度对加筋碎石桩复合地基路堤变形和稳定性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019,50(7):1662-1669.
CHEN J F, LI L Y, XU C, et al. Influence of encasement length on deformation and stability of embankments on composite foundation reinforced with geosynthetic-encased stone columns [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(7): 1662-1669. (in Chinese)

[18] KUMAR G, SAMANTA M. Experimental evaluation of stress concentration ratio of soft soil reinforced with stone column [J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2020, 5(1): 18-23.

[19] 王家辉,饶锡保,江洎洧,等. 振冲碎石桩复合地基抗剪机制的模型试验研究[J]. 岩土力学,2021,42(4):1095-1103.
WANG J H, RAO X B, JIANG J W, et al. Model experimental study of the shear mechanism of vibroflotation stone column composite foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(4): 1095-1103. (in Chinese)

[20] 张玲, 徐泽宇, 赵明华. 循环荷载作用下筋箍碎石桩复合地基工作性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(12): 2198-2205.
ZHANG L, XU Z Y, ZHAO M H. Experimental research on behaviors of geogrid-encased stone column-improved composite foundation under cyclic loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(12): 2198-2205. (in Chinese)

[21] SIVAKUMAR V, MCKELVEY D, GRAHAM J, et al. Triaxial tests on model sand columns in clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(2): 299-312.

[22] BLACK J A, SIVAKUMAR V, BELL A. The settlement performance of stone column foundations [J]. Géotechnique, 2011, 61(11): 909-922.

[23] 江洎洧, 王小华, 饶锡保, 等. 振冲桩法碎石原料与实际成桩体抗剪强度差异试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增刊1):156-160.
JIANG J W, WANG X H, RAO X B, et al. Experimental study on difference of shear strength between gravel materials and actual vibroflotation piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(Sup.1): 156-160. (in Chinese)

[24] 水电水利工程振冲法地基处理技术规范: DL/T 5214—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017: 6-9.
Technical specification for vibroflotation ground treatment of hydroelectric and water resources projects: DL/T 5214—2016[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2017: 6-9. (in Chinese)

[25] 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019:349.
Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019: 349. (in Chinese)

[26] 闫旭政,应宏伟,周建,等. 堆筑期土石坝软土碎石桩复合地基固结有限元分析[J]. 地基处理,2023, 5(3): 205-214.
YAN X Z, YING H W, ZHOU J, et al. FEM analysis on consolidation of stone-column improved soft soil composite foundation during earth-rock dam construction period[J]. Journal of Ground Improvement, 2023, 5(3): 205-214. (in Chinese)

[27] 徐晗,黄斌,饶锡保,等. 三轴试样钻孔灌砂固结排水效果试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(11):3242-3248.
XU H, HUANG B, RAO X B, et al. Consolidation and drainage effect of drilling and sand replacement samples in consolidated drained triaxial tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3242-3248. (in Chinese)

[28] 叶观宝,黄弋烜,张振,等. 静荷载下水泥土桩复合单元体大型三轴试验研究[J]. 岩土工程学报,2021,43(增刊2):60-63.
YE G B, HUANG Y W, ZHANG Z, et al. Large-scale triaxial tests on unit cell of composite soil with cement-soil columns under static loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021,43(Sup.2): 60-63. (in Chinese)