

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221398

高应力下碎石桩复合地基强度参数 DEM 模拟研究

侯 靖¹, 蒋熠诚^{2,3}, 韩华超¹, 周 建^{2,3}

(1. 中国电建集团华东勘测设计院有限公司, 浙江 杭州 311122; 2. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310012; 3. 浙江大学浙江省城市地下空间开发工程技术研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要: 碎石桩复合地基中,常用 Priebe 参数叠加法计算复合地基等效抗剪强度。现有研究多基于常规路堤低应力下展开,少见在高应力作用下该方法适用性研究。对此,依托卢旺达某粘土心墙堆石坝坝基处理工程,利用离散元数值方法(DEM),模拟碎石桩复合地基单桩室内试验,研究了不同面积置换率下碎石桩复合试样的应力应变特性、细观破坏机理及等效抗剪强度,并与广泛使用的参数叠加法进行了对比。研究表明,高应力时碎石桩复合地基应力应变特性区别于低应力状态,呈应变硬化趋势;复合试样强度在高应力状态下呈现明显非线性趋势;参数叠加法计算所得的抗剪强度参数对复合地基强度有所高估,建议在工程运用中进行折减。

关键词: 碎石桩; 地基处理; 高应力; 参数叠加法; 离散元

中图分类号: TV553; TU443

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)05-0130-05

1 概况

卢旺达某粘土心墙堆石坝工程坝基处地质条件较差,坝轴线上下游侧均分布有深厚湖积软土,含水率高达 70%,承载能力弱,需进行地基处理,拟采用振冲碎石桩对坝基全断面加固。在工程设计与有限元验算大坝位移及稳定性时,发现碎石桩复合地基强度参数选取较为困难。传统采用的 Priebe 参数叠加法^[1]多集中于路堤荷载^[2]研究,在高应力状态下的适用性尚待研究。鉴此,本文采用开源离散元软件 Yade,对不同面积置换率的复合试样开展多个应力条件下的大型三轴固结排水试验三维模拟,探寻高应力作用下应力应变特性,并讨论参数叠加法的适用性。

2 参数叠加法

碎石桩对软土地基的加固主要通过置换作用实现。复合地基承受外荷载后,刚度较大的碎石桩相较桩周土分担更大的荷载,增强了地基承载能力,减小沉降。同时,碎石桩体作为良好的排水

通道,促进了桩周土体排水固结,强度得以进一步提升。在进行碎石桩复合地基稳定性及位移有限元计算时,为简化建模运算量常采用将碎石桩与桩间土等效为一层均匀土体的方式进行建模。在《水电水利工程振冲法地基处理技术规范》^[3]中,推荐无现场试验资料时,可确定振冲复合土体的等效抗剪强度指标:

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

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

$$\mu_p = n/[1 + m(n - 1)] \quad (3)$$

式中, φ_{sp} 为复合土体的等效内摩擦角; m 为面积置换率; μ_p 为应力集中系数; φ_p 为桩体材料的内摩擦角; φ_s 为桩间土体的内摩擦角; c_{sp} 为复合土体的等效粘聚力; c_s 为桩间土体粘聚力; n 为桩土应力比。

基于碎石桩面积置换率和桩土应力比将碎石料与桩间土的强度参数进行叠加,从而计算复合土体等效抗剪强度。该方法建立在刚性基础、地基土各向同性、桩体已达硬土层的假设基础上,最初用于压缩模量的等效计算,后逐步推广至抗剪强度及渗透系数^[4]的计算中。针对本项目坝高较大,坝基处应力较高的特点,利用离散元数值方法

收稿日期: 2022-07-10, **修回日期:** 2022-08-21

作者简介: 侯靖(1972-),男,教授级高级工程师,研究方向为水电水利和岩土工程项目管理和设计,E-mail:hou_j@ecidi.com

通讯作者: 周建(1970-),女,博士、教授、博导,研究方向为软粘土力学、地基处理、土工数值分析等,E-mail:Zjelim@zju.edu.cn

研究高应力状态下 Priebe 参数叠加法的适用情况。

3 碎石桩复合地基数值模型

3.1 碎石桩及软土模型建立

离散元法主要用以研究颗粒状物体的运动及相互作用。碎石桩作为散体材料桩,其变形特性相对刚性桩而言差别极大。与常规有限元模拟相比,采用离散单元法可以较好地模拟碎石颗粒的变化特性,反映碎石与软土间的相对关系。使用离散元法模拟时,首先需标定模拟材料。

碎石选择球形颗粒模拟,引入抗转动刚度及抗扭转刚度限制球形颗粒的自由转动。依据现场碎石料情况,选取粒径范围在 10~30 mm 之间,经多次标定尝试,最终碎石材料的摩擦角约为 39° ,符合碎石料强度要求。

软粘土模拟对象为淤泥质粘土,对于软粘土真实颗粒,粒径一般小于 0.075 mm,且多呈片状或板状结构。若按原尺寸模拟,在离散元中极难实现室内试验尺度模拟。参考文献[5]的方法简化软粘土颗粒。首先软粘土颗粒粒径放大至 5.5 mm;同时,选取可以反映粘聚特性的材料模型模拟粘土颗粒,赋予其较小的接触刚度和一定的粘聚力;最后以软粘土的宏观力学特性指标——粘聚力和内摩擦角为标准,通过数值三轴试验反复标定其细观参数,使之能反映桩土的应力变化情况,同时兼顾计算时间在合理范围内。数值三轴试验所得软土强度特性与现场土层强度接近,可用于复合土体模拟。碎石颗粒及软粘土颗粒的细观力学参数见表 1。

表 1 碎石材料、软粘土材料细观参数

Tab. 1 Parameters of the stone particle material and soft soil material

细观参数	单位	取值	
		碎石	软粘土
密度	g/cm^3	2.6	1.7
摩擦角	$^\circ$	60	15
法向刚度	N/m	1.0×10^8	5.0×10^7
切向刚度	N/m	4.0×10^7	1.0×10^7
抗转动刚度		5	
抗扭转刚度		5	
颗粒粒径	mm	10~30	5.5
目标孔隙率		0.35	
法向粘聚力	Pa		5.0×10^3
切向粘聚力	Pa		5.0×10^3

3.2 软土地基碎石桩复合试样模型

利用标定的材料模拟碎石桩复合试样。考虑试样高宽比对碎石桩桩身变形性状的影响,最终确定三维复合试样总体尺寸长宽均为 0.50 m,高 0.80 m,如图 1 所示为试样剖面图,中间较大颗

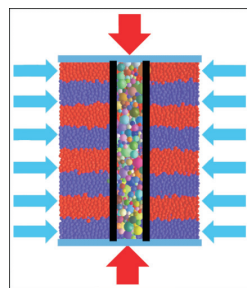


图 1 离散元复合试样模型剖面图

Fig. 1 Cutaway view of the DEM model

粒处为碎石桩桩体,周围区域为软粘土颗粒。

针对高应力作用下不同面积置换率的碎石桩应力应变展开研究,分别建立面积置换率为 0.30、0.20、0.10 的复合试样,如图 2 所示,总体尺寸维持 0.50 m 不变,通过生成半径为 0.154、0.126、0.09 m 的碎石桩分别模拟面积置换率为 0.30、0.20、0.10 的情况。

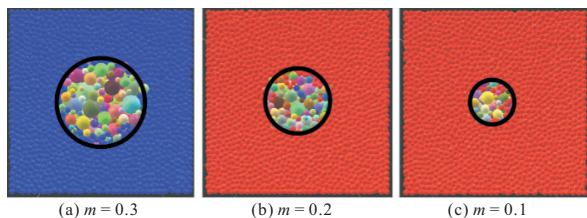


图 2 离散元复合试样模型俯视图

Fig. 2 Top view of specimens with different replacement

每个置换率下均对 300、500、800 kPa 三种不同应力状态进行模拟,共计进行 9 组模拟。模拟中最高围压选取为 800 kPa,是在对该大坝及坝基进行有限元模拟后,碎石桩所受最大竖向应力所决定。各组试样的生成及模拟过程如下:①在指定区域生成互不重叠的颗粒,并赋予颗粒相应的材料参数。为保证碎石颗粒与软土颗粒界面清晰,在颗粒生成阶段先在界面上生成一筒状墙边界,将碎石与软土颗粒分离。②使各颗粒接触并产生相互作用力,待四周刚性壁上应力达到目标围压,且孔隙率达到预定值后,优化颗粒分布,并确保试样处于拟静态。③试样上下两端加载板以应变控制的方式加载复合试样,剪切速率足够小使试样整体维持在拟静态。与此同时,试样四周的刚性壁以应力控制方式进行水平方向移动,使其保持围压不变。

基于此模型分析高应力下不同面积置换率对碎石桩应力应变及桩土特性的影响。

4 模拟结果与分析

4.1 应力应变特性

不同面积置换率的复合试样在各级围压下的应力应变关系曲线见图 3。可以发现面积置换率

一定时,复合土样最大偏应力随围压的增大而增大;同时围压一定时,复合土样最大偏应力随面积置换率的增大而增大。当面积置换率为 0.30 时,复合土样在各级围压下均呈应变硬化趋势,且 300、500 kPa 围压下曲线趋势较为接近,而围压为 800 kPa 时偏应力在应变较小时增长较为缓慢,且在应变达到 15% 时依然呈不断增长趋势;面积置换率为 0.20 时,在 300 kPa 围压下逐渐呈现出应变软化趋势;置换率较小时,各组围压下均呈软化趋势。

对比参数叠加法结果,本研究采用闫旭政^[6]

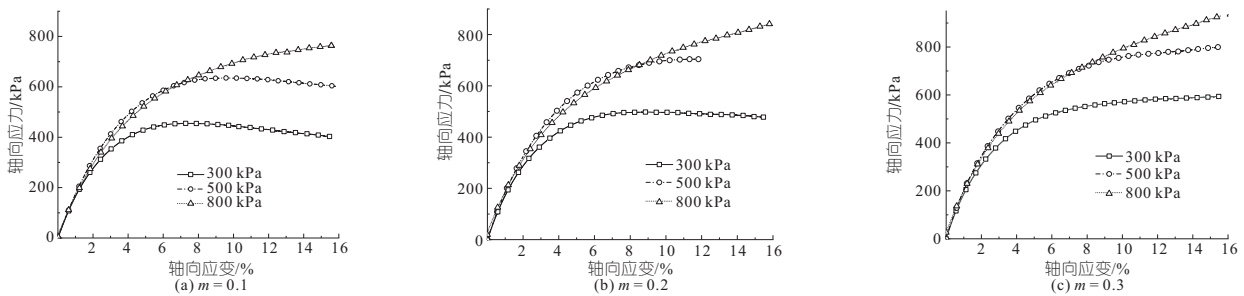


图 3 不同置换率下复合试样应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves with different replacement ratios

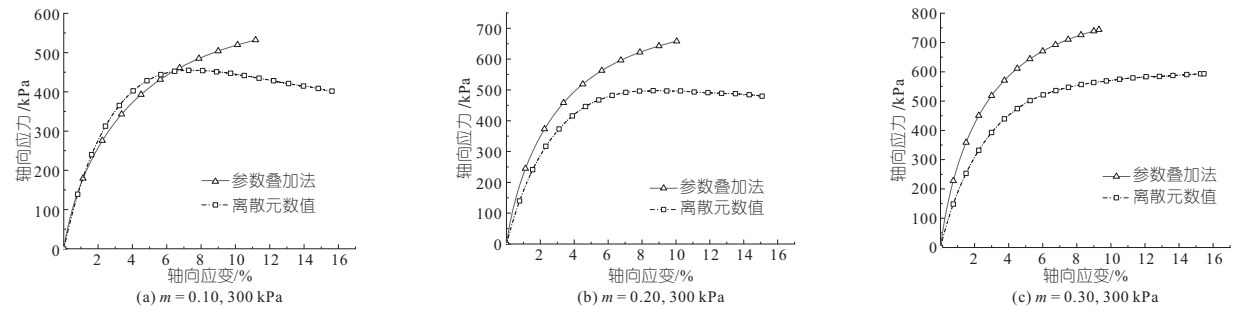


图 4 参数叠加法与离散元数值模拟结果对比

Fig. 4 Comparison of parametric composite method and DEM simulation results

对于置换率为 0.30 的试样,在 300 kPa 时碎石桩加固可提高土体极限应力约 145.7%,但与参数叠加法预测值相比约有 30.35% 的差距。在置换率为 0.20 时,离散元结果与参数叠加法相比仍有 20.88% 的差距。在小应变时两条曲线更为接近。而置换率为 0.10 时,轴向应变小于 6% 时两者结果较为吻合,但当应变大于 6% 后,离散元结果显示试样出现应变软化趋势,强度逐渐减少,但参数叠加法预测曲线仍持续增长。结果表明,参数叠加法在低应力下较为适用,但随着应力的增长,估算结果会高估复合地层强度。

4.2 细观结果分析

从复合试样加载过程中的细观受力机理出发研究离散元与参数叠加法结果的差异,选取面积置换率为 0.10,围压 500 kPa 的情况进一步分析。图 5 为该组离散元计算得到的应力应变曲

的模拟成果进行对比。该研究基于 PLAXIS 3D 软件利用有限元模拟了均匀化土层的室内三轴试验,得到一组相应的应力应变曲线。均匀化土层所用抗剪强度参数即通过参数叠加法计算所得,其碎石颗粒与软土参数与本研究一致。

图 4 为不同置换率下离散元模拟与参数叠加法的应力应变曲线对比示意图。图 4 表明,参数叠加法预测结果远大于离散元法模拟结果,在相同围压下参数叠加法高估了土体的极限应力,同时相同偏应力下参数叠加法的应变小于离散元模拟结果,即参数叠加法高估了土体承载力。

线,针对曲线的斜率变化,将该曲线分为四个阶段,这四个阶段分别对应应力应变曲线线性增长阶段、增长减缓并逐渐到达峰值、应变软化阶段及最后的破坏。

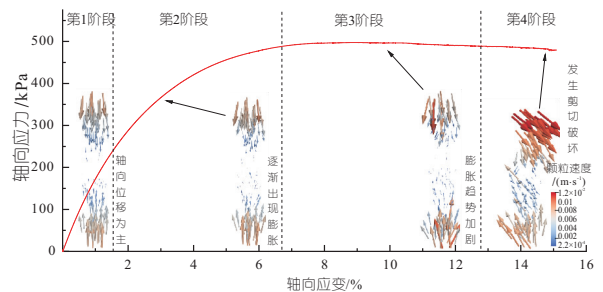


图 5 各阶段桩体颗粒速度示意图

Fig. 5 The velocity of the aggregate at each stage

图 5 为各阶段碎石颗粒位移情况,每一个箭头对应一个碎石颗粒。由图 5 可知,初始阶段桩体颗粒主要以轴向位移为主,软土对碎石颗粒能

提供足够的约束作用,在这一阶段碎石复合试样强度增长较快。而后,桩端的碎石颗粒运动方向逐渐向径向发展,即在桩端下部一些区域发生膨胀趋势。最终桩体出现剪切破坏,失去承载能力。加载各阶段土体位移情况见图 6。图 6 中隐去了软土颗粒,以箭头反映其位移方向,中间较大的球形颗粒为碎石颗粒,颜色深浅反映其粒径大小。可以发现,加载初期土体变形偏向试样中心,在宏观上表现为桩周土为碎石桩体提供了良好的约束作用。随着加载的进行,土体颗粒位移方向逐渐向碎石桩外侧发展且出现明显的剪切带,并与碎石桩体的破坏相贯穿。

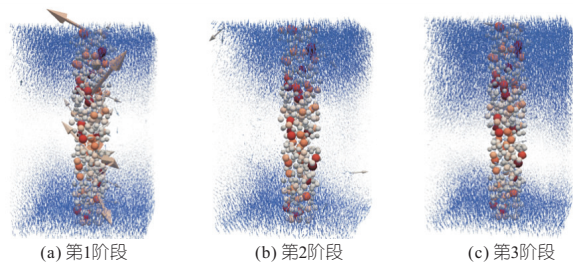


图 6 各阶段土体位移情况示意图

Fig. 6 Soil displacement in each stage

4.3 等效抗剪强度

利用所得应力应变曲线,绘制摩尔应力圆可获得复合试样的抗剪强度包络线,进而获得复合试样的内摩擦角及粘聚力抗剪强度指标。离散元模拟复合土样与不同桩土应力比下参数叠加法获得的土体抗剪强度指标见表 2。由表 2 可知,复合土样的等效内摩擦角接近于桩土应力比为 1.80 时参数叠加法所计算的内摩擦角。同时,在置换率较低的情况下两者相差较小,但随着置换率的增加,两者差距逐渐加大,在置换率为 0.3 时差距达到 4°左右。说明参数叠加法在低置换率下较为适用,该结果与数值三轴模拟所得的应力应变曲线结果及长期的实践认知一致。规范建议^[3]碎石桩桩土应力比的范围为 2~4,即此时的桩土应力比取值低于规范要求。进一步地,将离散元模拟结果与桩土应力比取 3 时的参数叠加法等效强度参数对比可以发现,数值模拟结果普遍

表 2 等效强度参数对比

Tab. 2 Comparison of equivalent strength parameters

土样	c'/kPa		φ'/(°)	
	复合土样 (DEM)	参数叠加 n=3 n=1.8	复合土样 (DEM)	参数叠加 n=3 n=1.8
碎石	0	0 0	39.80	39.80 39.80
软粘土	10.00	10.00 10.00	15.00	15.00 15.00
m=0.30	82.53	4.37 5.65	23.54	30.36 27.21
m=0.20	63.67	5.71 6.89	21.93	27.02 23.91
m=0.10	52.91	7.5 8.33	19.43	25.25 19.91

注:表中 n 为桩土应力比。

比参数叠加计算结果低 6°左右。可见高应力作用下,参数叠加法高估了土体的强度参数,建议在实际应用时取较小的桩土应力比,或对参数叠加法求得的强度参数进行折减。

由于参数叠加法并不考虑桩与土体的相互作用,所以通过该方法计算所得的粘聚力预测值明显低于数值模拟得到的结果。这一部分的粘聚力主要由于桩周土对碎石桩体的包裹作用,使复合试样表现出较大粘聚力,这一结果与 TAN X 等^[7]的模拟结果一致。同时,考虑到在模拟时将软土颗粒进行了一定放大,也会导致这一“假粘聚力”的产生。

此外,高应力下土体强度呈现明显的非线性趋势。围压达到 800 kPa 时,剪应力增长明显下降,反映到强度指标上则表现为内摩擦角下降、粘聚力进一步提高。虽然简化模型时将粘土颗粒放大到 5.5 mm,对等效粘聚力会有一定影响,但模拟结果所反映的非线性趋势,及高应力下参数叠加法计算所得强度参数对土体的高估依然不可忽视。

5 结论

- a. 碎石桩复合试样低应力状态下,应力应变发展曲线呈软化趋势;高应力状态下曲线呈硬化趋势,但增长较为缓慢。
- b. 高应力状态下复合试样强度呈明显非线性,由于粘土颗粒带来的影响,试样表现出较大的粘聚力。
- c. 参数叠加法计算所得的等效强度参数在高应力下偏高,致使复合地基承载能力偏大,建议估算时进行一定强度折减。

参考文献:

[1] PRIEBE H. Abschätzung des setzungsverhaltens eines durch stopfverdichtung verbesserten baugrundes [J]. Die bautechnik, 1976,55(9):281-284.

[2] 赵明华, 邓岳保, 杨明辉. 路堤荷载作用下碎石桩复合地基桩土应力比计算及试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9):2623-2628.

[3] 国家能源局. 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.

[4] 毕佳蕾, 沈振中, 且增赤列. 振冲碎石桩复合地基的等效渗透系数计算方法[J]. 水电能源科学, 2017,35(11): 87-90.

[5] GU M, CUI J, YUAN J, et al. The stress and deformation of stone column-improved soft clay by discrete element modelling[J]. European journal of environmental and civil engineering, 2022,26(4):

