



基于三维有限元的 DCM 平面布置对边坡稳定的影响

朱幸科，谢万东

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司，广东 广州 510230)

摘要：在应用于边坡稳定问题时，DCM(深层水泥搅拌桩)的平面布置形式直接关系到其受力的合理性，进而影响边坡的稳定和安全。针对当前工程实践中采用不同 DCM 平面布置形式解决边坡稳定问题时，其受力机理仍存在一定程度的认识不足，基于三维有限元方法，结合不同的 DCM 平面布置形式(桩式、横墙壁式、纵墙壁式、格栅式)，对加固后边坡从整体稳定、位移和应力等方面进行分析，探讨采用不同 DCM 平面布置形式加固边坡后的位移和应力分布规律及特点。研究表明：纵墙壁式和格栅式布置相对于桩式布置，边坡整体稳定安全系数显著提高，位移和应力明显减小且分布更为合理，其中纵墙壁式布置优势最为明显。

关键词：三维有限元；DCM；平面布置；边坡稳定

中图分类号：U655.54

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2024)03-0171-07

Influence of DCM layout on slope stability based on 3D finite element method

ZHU Xingke, XIE Wandong

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: While applied to improve the slope stability, layout of DCM (deep cement mixing) is directly related to the rationality of the structure, which in turn affects stability and safety of the slope. As for current engineering practice, it is noted that there is still a certain misunderstanding of the stress mechanism on condition that different DCM layouts are adopted to improve slope stability. Based on 3D finite element method and combined with different layout patterns of DCM (in columns, latitude walls, longitude walls and grids), overall stability, displacement and stress of the reinforced slope are analyzed. Displacement and stress distribution laws of the reinforced slope with different DCM layouts are studied. The research shows that DCM in longitude walls and grids are significantly improving the overall stability safety factor of the slope, reducing the DCM displacement and stress and making their distributions more reasonable compared with DCM arranged in columns. Of all the comparing layout patterns, DCM in longitude walls has the greatest advantages.

Keywords: 3D finite element; DCM (deep cement mixing); layout patterns; slope stability

随着工程建设的不断发展，DCM(深层水泥搅拌桩)在工程建设领域应用越来越广泛，由于其良好的抗压性能，在解决地基承载力和沉降等方面得到了广泛应用^[1-2]。然而 DCM 的抗剪强度显著低于抗压强度，因此在解决稳定问题方面应用相

对较少。近年来，由于边坡加固的需要，DCM 越来越多的应用于解决边坡稳定性问题^[3]。

DCM 的平面布置形式是在应用于边坡加固时首要考虑的问题。不同的布置形式，如桩式、壁式、格栅式等，DCM 的抗剪强度发挥程度不同。

收稿日期：2023-07-05

作者简介：朱幸科（1985—），男，硕士，高级工程师，从事岩土工程地基处理和基坑支护方面的科研、设计及技术管理等工作。

如何选择合理布置形式，既可充分发挥 DCM 的力学特性，又不大幅增加工程造价，对于工程建设具有重要意义。

国内《地基处理手册》^[4]对 DCM 在不同布置形式下的应用范围给出了建议，边坡加固建议采用壁式或格栅式布置，但是并未对不同布置形式下 DCM 受力机理进行阐述。目前关于 DCM 用于解决边坡稳定的问题国内外学者进行了研究，得出一些有益的研究成果。Han 等^[5]、Huang 等^[6] 和 Navin 等^[7]通过对 DCM 复合地基稳定性数值分析，对搅拌桩加固复合地基按桩体剪切破坏会过高估计复合地基稳定性。郑刚等^[8-9]指出在桩式布置情况下，路堤下绝大部分位置的加固体均按其抗弯承载力，而不是抗剪承载力控制复合地基的稳定性。Boathong 等^[10]采用有限元法对 DCM 采用壁式布置加固边坡的位移进行模拟，指出 DCM 在采用壁式布置且嵌固深度足够时表现为扭转变形；嵌固深度较小时表现为水平滑移，并给出不同位移模式时的临界嵌固深度值。

采用不同布置形式的 DCM 桩受力机理及破坏模式不尽相同，目前传统复合地基稳定性计算方法主要基于二维层面，仅考虑桩体与桩间土的加权平均抗剪强度，易高估其稳定安全系数。目前工程实践中采用不同 DCM 平面布置形式解决边坡稳定问题时受力机理仍存在一定程度上的认识不足，本文采用 Plaxis 三维有限元，针对边坡稳定问题中 DCM 不同的布置形式进行深入对比，探讨不同 DCM 平面布置形式的受力机理以及整体稳定、位移、应力分布规律。DCM 布置形式主要考虑桩式布置、横墙壁式布置、纵墙壁式布置、格栅式布置，采用理论分析和 Plaxis 三维有限元模拟的方法进行对比。壁式布置按照桩墙沿边坡走向(横墙壁式布置)与沿边坡倾向(纵墙壁式布置)两种情况进行分析。

1 理论分析

采用 DCM 对边坡进行加固时，将加固区作为

整体进行力学分析，加固区后方受到主动土压力作用，前方受到被动土压力作用，前后土压力的不均衡形成弯矩，导致加固区底部的压力分布不均^[11]，力学模型见图 1。

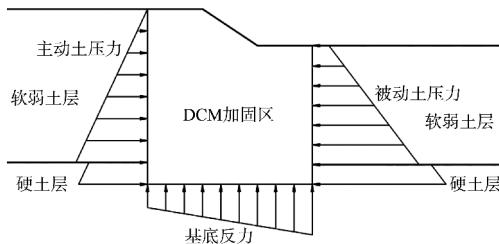


图 1 DCM 加固力学模型

采用桩式布置时，加固区后方主动土压力大部分由后方的桩体承担，边坡其他大部分区域桩体在参与承担水平荷载之前，处理区后方的桩体已经发生较大位移，导致岸坡后方边界位置的桩体最先遭受破坏，桩式布置的水泥土桩体主要表现为单桩的弯曲破坏和剪切破坏模式。边坡后方处理区与非处理区交界位置桩体破坏后，将由前方桩体继续承担后方土体位移产生的水平土压力，使得前方桩体进一步破坏，最终导致整个边坡失稳。采用横墙壁式布置(DCM 墙体沿边坡走向)受力机理与桩式布置类似。采用纵墙壁式布置(DCM 墙体沿边坡倾向)或格栅式布置，DCM 加固区的整体性较好，后方土压力大部分由全部桩体承担，分担到每根 DCM 桩体的弯矩及剪力将大为减小。由于沿边坡断面方向整个 DCM 加固体的截面面积与截面模量明显大于桩式布置中单根 DCM 桩的相应数值^[12]，使得 DCM 桩体截面剪应力和水平位移较桩式布置大幅减小，从而极大地提高了 DCM 桩体的抗剪切能力。因此在解决边坡稳定问题时，DCM 采用纵墙壁式和格栅式布置较桩式布置和横墙壁式布置受力更为合理。

2 三维有限元分析

2.1 模型建立

为便于分析，基于某海外岸坡疏浚开挖工程地质资料并对土层进行适当简化，选择垂直于边

坡走向宽 200.00 m、深 50 m 的场地进行分析。开挖边坡高度 5 m, 坡比 1:1.5。场地表层土为软黏土层, 下部分别为松散砂层和密实砂层。DCM 沿边坡倾向加固范围 22.50 m, 深度为穿透上部软土层进入下部松散砂层 6 m, 见图 2。

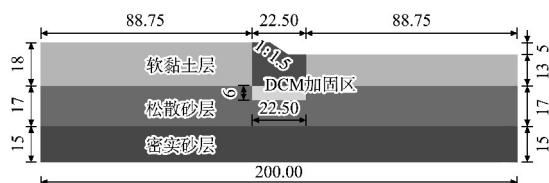


图 2 DCM 加固模型断面 (单位: m)

分别针对 DCM 桩式、横墙壁式、纵墙壁式、格栅式 4 种不同的平面布置形式建模, 简化为平面应变问题进行分析。兼顾不同平面布置形式的特点, 沿边坡走向取宽 13.50 m 作为计算单元。为避免 DCM 置换率对不同布置形式下边坡稳定的影响, 4 种不同的布置形式 DCM(图 3) 置换率均为 40%。

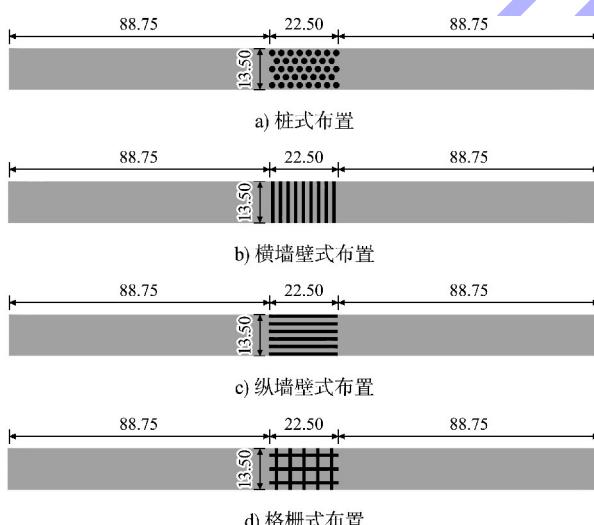


图 3 DCM 加固模型平面 (单位: m)

采用 Plaxis 建立三维计算模型, 见图 4。DCM 桩体、桩间软土及下卧层等均采用实体单元。原状地基采用 K_0 固结形成初始应力, 按实际工程施工顺序建立施工步骤, 分别为地应力平衡、DCM 施工、开挖边坡。采用塑性分析模拟整体变形, 安全性分析模拟失稳破坏。

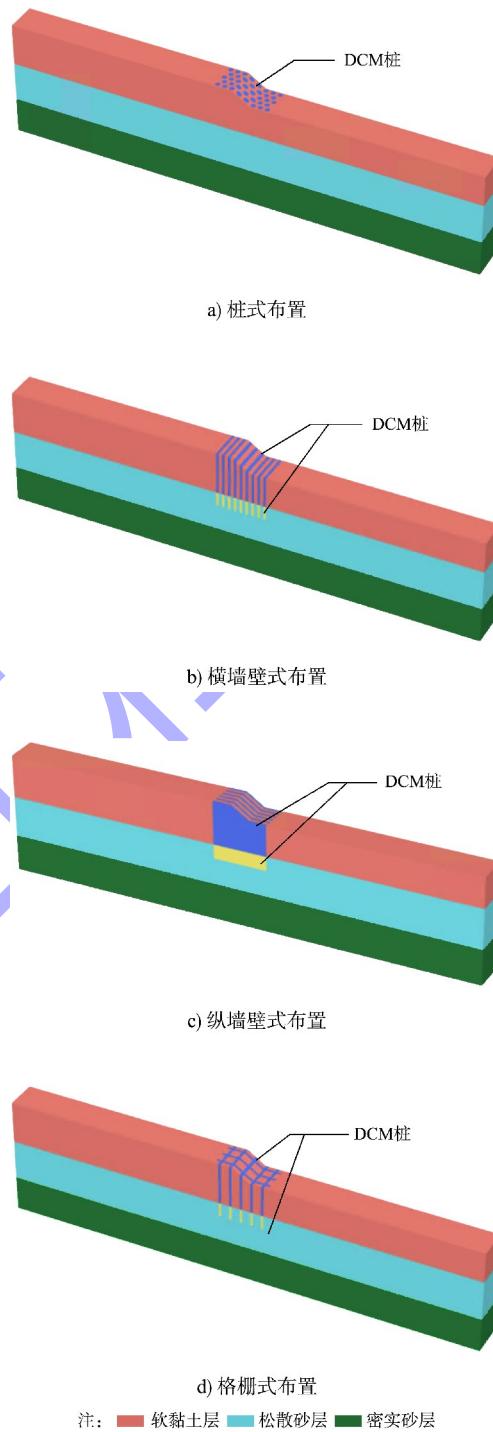


图 4 不同 DCM 布置形式 Plaxis 三维计算模型

2.2 材料及参数

数值模型使用的材料本构模型采用摩尔-库仑理想弹塑性模型。参数见表 1、2。在模型计算过程中, 仅平面布置形式不同, DCM 置换率及土层、DCM 桩物理力学参数不变。

表 1 土层物理力学参数

土层编号	土层名称	密度 $\rho/(t \cdot m^{-3})$	弹性模量 E/kPa	泊松比 ν	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 c/kPa	不排水抗剪强度 S_u/kPa
①	软黏土层	1.60	2 400	0.4	-	-	8
②	松散砂层	1.80	8 000	0.3	29	0	-
③	密实砂层	2.05	39 000	0.3	39	0	-

表 2 DCM 桩物理力学参数

土层 编号	处理 土层	DCM 密度 $\rho/(t \cdot m^{-3})$	DCM 弹性 模量 E/MPa	DCM 泊松比 ν	不排水抗剪 强度 S_u/kPa
①	软黏土层	1.60	120	0.3	400
②	松散砂层	1.80	300	0.3	600

2.3 计算结果分析

2.3.1 计算安全系数

不同工况下的整体稳定安全系数计算结果见图 5。可知在采用 DCM 进行加固后，横墙壁式布置安全系数最低，桩式布置次之。采用纵墙壁式和格栅式布置安全系数相对较高，其中纵墙壁式布置安全系数最高。

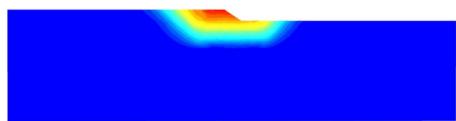
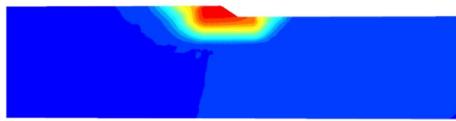
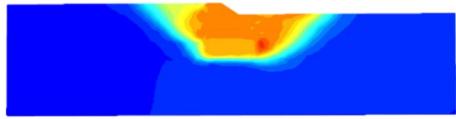
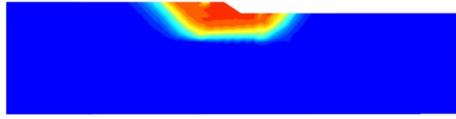
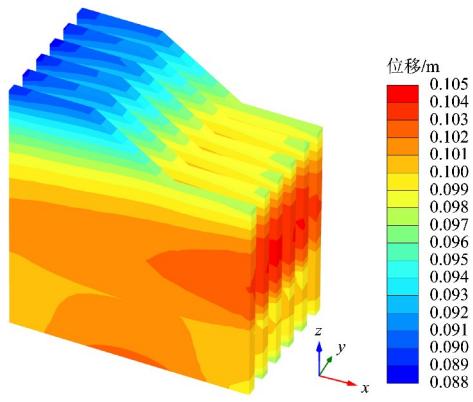
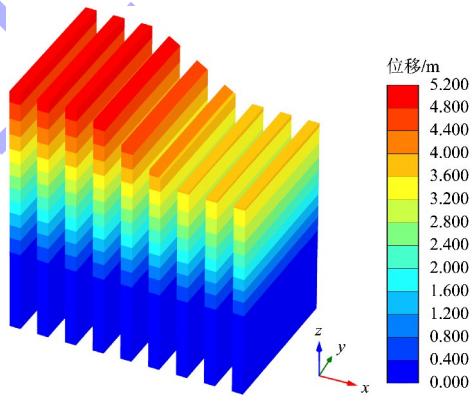
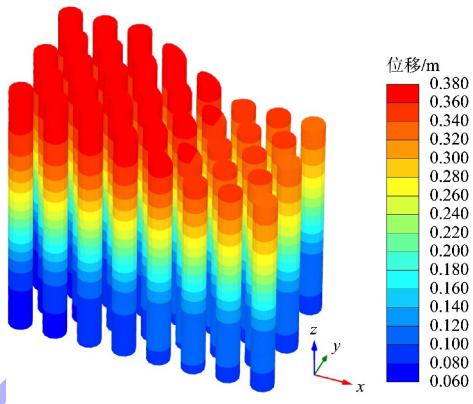
a) 桩式布置, $F_s=1.62$ b) 横墙壁式布置, $F_s=1.07$ c) 纵墙壁式布置, $F_s=3.55$ d) 格栅式布置, $F_s=3.12$

图 5 Paxis 3D 边坡稳定安全系数计算结果

2.3.2 水平位移

将 DCM 桩体进行隔离，“边坡开挖”施工步

DCM 桩体的水平位移计算结果见图 6。



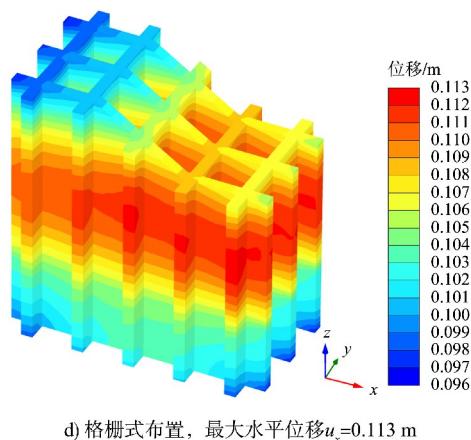
d) 格栅式布置, 最大水平位移 $u_x=0.113\text{ m}$

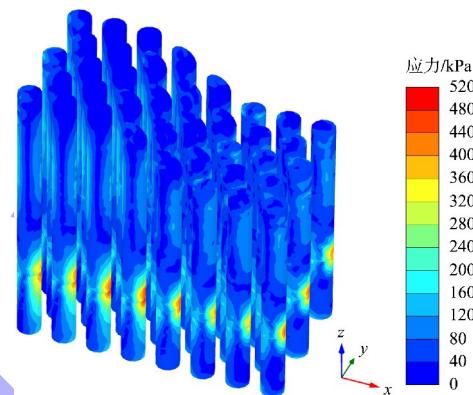
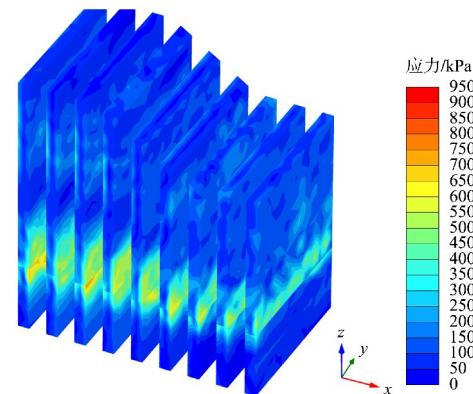
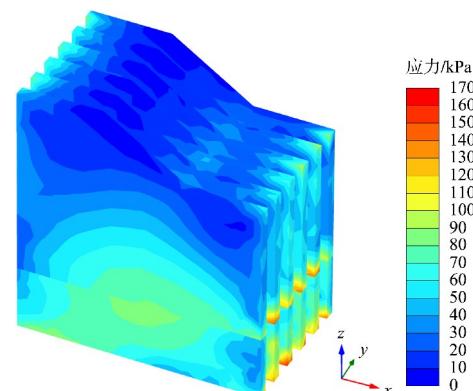
图 6 不同平面布置形式 DCM 桩水平位移分布

由图 6 可知, 采用不同布置形式的 DCM 桩处理边坡土体后, DCM 桩的最大水平位移以及分布规律并不相同。采用沿边坡走向的 DCM 桩横墙壁式布置桩体水平位移计算值最大可达 5.177 m, 发生在坡顶位置, 此时边坡发生大变形, 已经失稳破坏; 采用桩式布置最大水平位移为 0.379 m, 仍然发生在坡顶位置, 位移分布规律为从坡顶至处理区底部逐渐减小; 采用纵墙壁式布置最大水平位移为 0.104 m, 位于处理区前方靠近被动区的软土层深度范围内, 位移总体变化规律为坡顶及处理区底部位移较小, 中间软土区位移较大; 采用格栅式布置最大水平位移为 0.113 m, 位移分布规律与纵墙壁式布置类似。结果表明采用纵墙壁式布置对控制边坡的水平位移效果最好。

此外, 从水平位移沿桩体竖向分布规律来看, 采用桩式和横墙壁式布置, 最大水平位移出现在桩体的上部, 对于坡顶区域场地的使用不利; 采用纵墙壁式和格栅式布置, 总体水平位移得到有效控制, 并且最大位移发生在 DCM 桩处理区中间深度范围, 坡顶区域水平位移最小, 有利于场地使用。由于采用纵墙壁式和格栅式布置, 沿边坡滑移方向的整体性加强, DCM 桩墙沿边坡倾向的刚度较桩式和横墙壁式布置大为提高, 因此发生弯曲破坏的可能性降低, 处理区桩体表现为整体剪切破坏的模式。

2.3.3 DCM 桩体内力

由图 7 可知, 采用不同的布置形式, 最大剪应力发生在 DCM 桩底端以及上部软土层与下部砂层交界位置。采用桩式和横墙壁式布置最大剪应力分别为 517 和 945 kPa, 出现在砂层深度, 其中横墙壁式布置最大剪应力为 945 kPa, 大于 600 kPa, 超过 DCM 的抗剪强度, 桩体已经发生破坏。

a) 桩式布置, 最大剪应力 $\tau=517\text{ kPa}$ b) 横墙壁式布置, 最大剪应力 $\tau=945\text{ kPa}$ c) 纵墙壁式布置, 最大剪应力 $\tau=167\text{ kPa}$

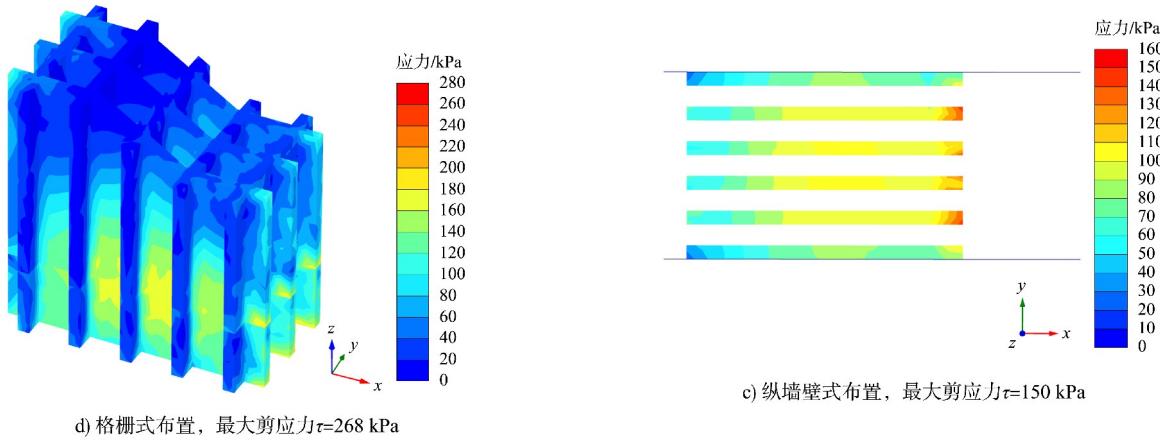


图 7 不同布置形式 DCM 桩剪应力分布

采用纵墙壁式和格栅式布置, 最大剪应力分别为 167 和 268 kPa。可见 DCM 桩体的最大剪应力相对较小, 其中纵墙壁式布置最大剪应力值最小。

由于桩体在上部软土段成桩强度相对较低, 软土段 DCM 桩的剪力对边坡稳定的影响最大。为了更加直观地反映上部软土层与下部砂层交界位置处剪应力的分布情况, 在上部软土层与下部砂层交界位置(位于上部软土侧)处取水平剖面, 得到该位置 DCM 桩体水平剪应力的分布情况, 见图 8。

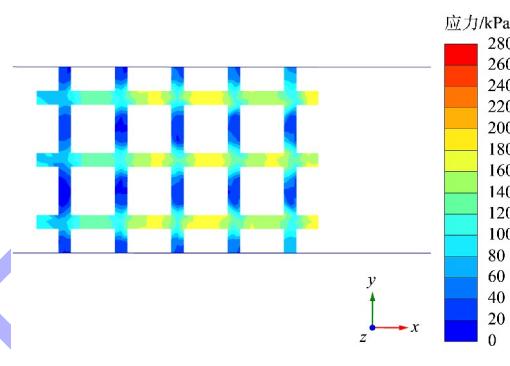
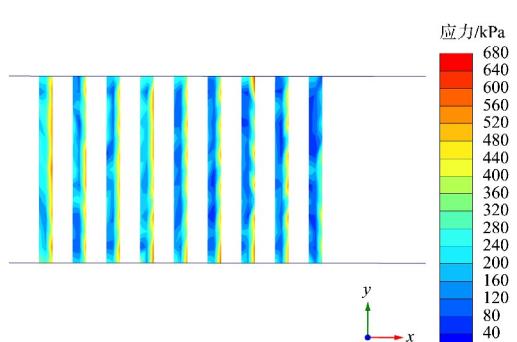
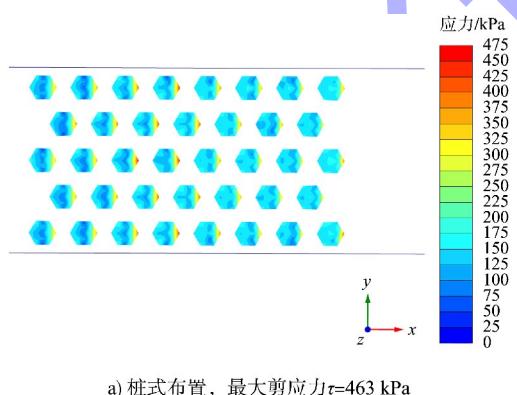


图 8 不同布置形式 DCM 桩在土层交界处剪应力分布

由图 8 可知, 桩式和横墙壁式布置的最大剪应力在加固区的中后方较为明显, 且靠近主动区, 由于桩式和横墙壁式布置整体性较差, 加固区后方的主动土压力主要由靠近主动区的桩体承担, 靠近主动区的桩体剪应力将大于其他区域桩体的剪应力。并且对于每单根 DCM 桩体或单幅 DCM 墙体, 剪应力在桩截面分布不均匀, 最大剪应力出现在该截面靠近被动区边缘位置。特别是桩式和横墙壁式布置最大剪应力均大于 DCM 在软黏土层的抗剪强度 400 kPa, 桩体在软黏土层深度已经发生剪切破坏, 结合 DCM 桩体水平位移和砂层中剪应力计算结果, 说明采用桩式布置和横墙壁式布置进行边坡加固效果并不理想, 这与理论分析的结论一致。

对于纵墙壁式和格栅式布置, DCM 桩体最大剪应力已经得到有效控制, 并且主要出现在加固区的中前方, 靠近被动区, 这与桩式和横墙式布置中单根桩或单幅墙体剪应力的分布规律类似。

由于纵墙壁式和格栅式布置桩体的整体较好, 加固区后方主动土压力基本可以由所有的 DCM 桩体承担, DCM 桩体受到的剪应力均大为减小。

3 结论

1) DCM 不同平面布置形式对提高边坡的整体稳定安全系数效果差别明显, 采用纵墙壁式布置受力最为合理, 对于提高边坡整体稳定安全性效果最好。

2) 桩式和横墙壁式布置最大位移出现在桩体上部, 对于坡顶场地的使用不利。纵墙壁式和格栅式布置最大水平位移出现在处理区中间深度区域, 坡顶位移较小, 有利于坡顶场地的使用。纵墙壁式布置对于控制边坡土体的水平位移效果最优。

3) 采用桩式和横墙壁式布置, 主动土压力大部分由加固区靠近主动区的桩体承担, 最大剪应力出现在靠近主动区的桩体。采用纵墙壁式和格栅式布置, 主动土压力基本由所有桩体承担, 最大剪应力出现在靠近被动区的桩体, 且最大剪应力明显小于桩式和横墙壁式布置。其中纵墙壁式布置在控制桩体剪应力效果最为明显。

4) 采用纵墙壁式和格栅式布置, 桩体共同承担后方主动土压力, 整体受力特性优于桩式和横墙壁式布置, 其中纵墙壁式布置优势最为明显, 因此边坡加固中的 DCM 桩体壁式布置一般默认为纵墙壁式布置。

参考文献:

- [1] 郝玉龙, 王立忠, 陈云敏, 等. 深厚软土水泥搅拌桩复合地基沉降分析及控制[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 345-349.
- [2] 张轩, 郝志斌, 林沛生. 广州港南沙四期工程轨道地基处理[J]. 水运工程, 2022(10): 120-123, 128.
- [3] 贝建忠, 赵瑞东, 李伟仪, 等. 水泥搅拌桩复合地基综合强度指标方法在岸坡设计中的适用性分析[J]. 水运工程, 2022(5): 184-190.
- [4] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 第三版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [5] HAN J, HUANG J, PORBAHA A. 2D numerical modeling of a constructed geosynthetic-reinforced embankment over deep mixed columns[C]// Proceedings of the Sessions of the Geo-Frontiers 2005 Congress. Virginia: ASCE, 2005: 1-11.
- [6] HUANG J, HAN J, PORBAHA A. Two and three-dimensional modeling of DCM columns under embankments [C]// Proceedings of Geo Congress 2006. Virginia: ASCE, 2006: 1-5.
- [7] NAVIN M P, FILZ G M. Numerical stability of analyses of embankments supported on deep mixed columns [C]// Proceedings of Sessions of Geo-Shanghai 2006. Virginia: ASCE, 2006.
- [8] 郑刚, 刘力, 韩杰. 刚性桩加固软弱地基上路堤的稳定性问题(I): 存在问题及单桩条件下的分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11) : 1648-1657.
- [9] 郑刚, 刘力, 韩杰. 刚性桩加固软弱地基上路堤的稳定性问题(II): 群桩条件下的分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(12) : 1811-1820.
- [10] BOATHONG P, JAMSAWANG P, MAIRANG W. Lateral movement of slope stabilized with DCM column rows[J]. electronic journal of geotechnical engineering, 2014(19): 1647-1664.
- [11] KITAZUME M, TERASHI M. The Deep Mixing Method[M]. London: CRC, 2013.
- [12] 孙训方. 材料力学[M]. 6 版. 北京: 高等教育出版社, 2019.

(本文编辑 赵娟)