

文章编号: 1000-7598 (2012) 05-1467-07

劈裂真空法加固软土地基的效果分析

章定文, 韩文君, 刘松玉, 杜广印

(东南大学 交通学院, 南京 210096)

摘 要: 针对常规真空预压法加固软土地基中存在的问题, 介绍了最新研制开发的气压劈裂真空预压法及其施工工艺, 并通过现场试验段测试结果分析了劈裂真空法加固软土地基的效果。测试结果表明, 较常规真空预压法而言, 劈裂真空法可以提高真空荷载向深层土体中的传递效率和加速超静孔隙水压力的消散, 既可改善深层软土的加固效果又可加速地基固结, 缩短工程工期; 劈裂真空法加固地基的沉降效率大于常规真空预压法处理地基, 沉降易于收敛, 有利于工后沉降的控制。通过加固前后孔压静力触探试验测试结果对比和取样室内试验土性参数变化分析, 论证了劈裂真空法加固深层软土地基的有效性和优越性。

关 键 词: 劈裂真空法; 软土; 现场监测; 加固效果

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

Effect analysis of a soft ground reinforced by a combined vacuum preloading and pneumatic fracturing method

ZHANG Ding-wen, HAN Wen-jun, LIU Song-yu, DU Guang-yin

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing, 210096, China)

Abstract: To overcome the problems of traditional vacuum preloading method, vacuum preloading and pneumatic fracturing are combined to reinforce the performance of ground improvement. The mechanism and construction procedures of the combined method are introduced firstly. The reinforcement effect of the combined method is validated through a pilot highway embankment on soft clay in Jiangsu, China. Comparing to the traditional vacuum preloading method, the combined vacuum preloading and pneumatic fracturing method would enhance the transfer efficiency of vacuum into deep soil layers and accelerate the dissipation of excess pore water pressure. Therefore, the strength increase of soft soil layers improved by the combined method is much larger than that of ground reinforced by the traditional vacuum preloading method. The combined method also can reduce the construction period than the traditional vacuum preloading method. The test results of cone penetration tests and engineering properties tests of soft soils also indicate the superior of the combined vacuum preloading and pneumatic fracturing method.

Key words: combined vacuum preloading and pneumatic fracturing method; soft soil; field monitoring; reinforcement effect

1 引 言

真空预压法自 1952 年由瑞典皇家地质学院 Kjellman^[1]提出以来, 得到了诸多学者和工程技术人员的关注^[2]。前期的工程实践主要集中在改善抽真空设备^[3]、密封材料^[4]、垂直排水通道^[5]等关键技术; 理论研究方面, 对真空预压的加固机制^[6]、加固效果分析^[7]、数值模拟方法^[8-9]、室内模型试验^[10]等都取得了较为丰富的成果。最近, 真空预压法在与其他方法联合使用上也取得了较大进展, 如真空联合堆载预压法^[11]、真空电渗法^[12]、真空井点降水

法^[13]和高真空击密法^[14]等。由于真空预压法具有造价低、施工方便、加固效果明显等优势, 在港口工程吹填淤泥加固、高速公路工程软基加固等方面得到了广泛应用, 取得了良好的经济效益和社会效益^[15]。但真空预压法处理地基也存在一些局限性, 一是排水固结时间相对较长、沉降速率难稳定、工后沉降难以控制, 如江苏省某高速公路真空预压段抽真空时间超过 1 a; 二是真空度沿深度衰减, 对深厚软土地基加固效果不理想, 处理深度有限^[16-17]。其主要原因是真空度传递深度有限和深部土体渗透性难以提高的问题。针对上述问题, 在参考环境修复工程

收稿日期: 2010-11-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50808046, No. 51078083); 江苏省交通科技项目 (No. 08Y34)。

第一作者简介: 章定文, 男, 1978 年生, 博士, 副教授, 主要从事特殊地基加固等方面的研究工作。E-mail: zhangdw@seu.edu.cn

中气压劈裂技术的特点,研制出气压劈裂真空预压法(以下简称“劈裂真空法”)加固软土地基新技术^[18]。劈裂真空法是在常规真空预压法的基础上,增加一套气压劈裂系统,在土体中形成裂隙,增加深层软土的渗透性,从而提高真空荷载向深层的传递效率与超静孔隙水消散速率,提高真空预压加固深层软土地基的加固效果。本文介绍了劈裂真空法在江苏省江海高速公路试验段的试验情况,对劈裂真空加固软土地基的效果进行分析。

2 劈裂真空法简介

劈裂真空法的基本原理如图 1 所示。在常规真空预压法的基础上增加了一套气压劈裂系统。在土体内部先施加高压气体,当高压气体压力超过某一临界值以后,土体发生劈裂,土体中产生大量裂隙,裂隙与预先打设的塑料排水板组成有效的排水导气网络,一方面可以提高真空荷载向深层土体的传递效率,有效克服地表施加的附加应力随深度衰减的局限性;另外,还可大大加速超静孔隙的消散、缩短固结时间、缩短地基处理的施工工期。

劈裂真空法的施工工艺如下:①平整场地;②铺设砂垫层;③打设塑料排水板和喷气管;④埋设现场监测仪器等;⑤铺设喷气管路和抽真空管路;⑥安装喷气设备,试喷、检查,进行抽真空前的气压劈裂施工;⑦铺设砂垫层、无纺土工布;⑧挖密封沟、铺密封膜、回填密封沟、安装喷气和抽真

空设备;⑨地表沉降标移至膜上,试抽气、检查、正式喷气和抽真空;⑩真空度稳定一段时间后,可进行堆载或路堤填筑等其他项目施工。

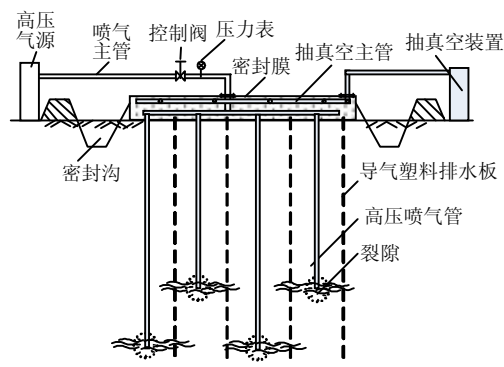


图 1 气压劈裂真空预压加固软土原理示意图
Fig.1 Sketch of combined vacuum preloading and pneumatic fracturing method

3 试验段设计与施工

3.1 试验工程场地条件

试验段工程位于江苏省江海高速公路姜堰北互通 CK0+810~CK0+887。根据现场勘察,该段落位于里下河沼积平原,典型的地层剖面如图 2 所示。埋深 4.0~6.8 m 为浅层软土层②-2;埋深 12.5~21.7 m 为深层软土层⑤。软土层物理力学指标见表 1。可以看到,试验段土层②-2 和土层⑤为软土,含水率较高、压缩性高、强度较低,软土的力学性质差,

表 1 试验段软土层物理力学指标
Table 1 Physico-mechanical parameters of soft soils

层号	层底埋深 / m	重度 / (kN/m ³)	含水率 / %	孔隙比	液限 / %	塑限 / %	固结快剪		压缩系数 / MPa ⁻¹	压缩模量 / MPa
							c_q / kPa	ϕ_q / (°)		
②-2	4.0~4.4	18.8	32.2	0.95	38.8	20.0	16.3	14.7	0.55	3.55
⑤	21.4~21.7	18.0	41.5	1.15	40.8	23.5	12.9	2.4	0.76	2.85

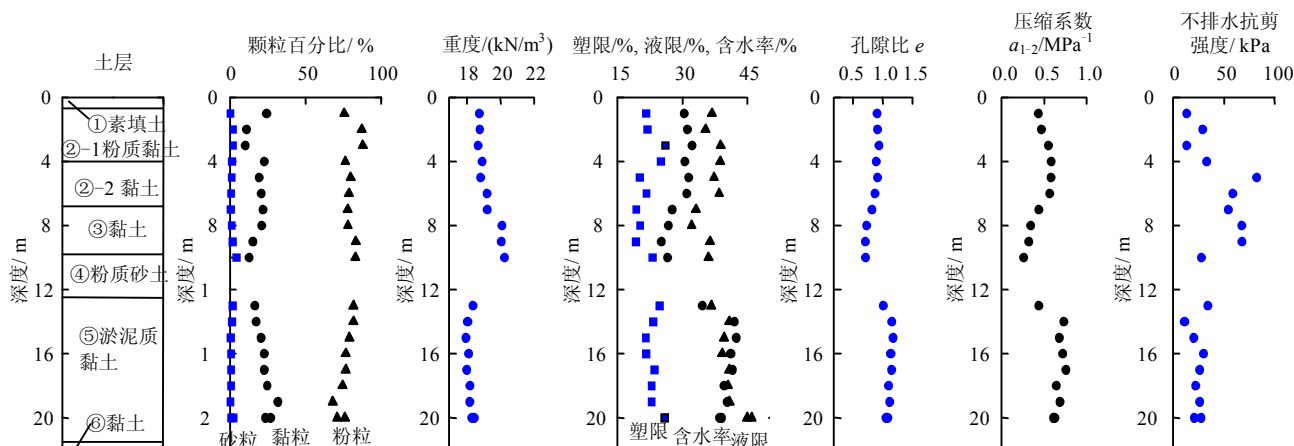


图 2 试验场地质剖面图
Fig.2 Geological profile of test site

需进行地基处理。

3.2 试验段布置与试验内容

现场试验段分为两个试验区, CK0+810~CK0+849 段落采用劈裂真空法进行处理; CK0+849~CK0+887 为对比试验区, 采用常规的真空预压法处理。两试验区塑料排水板均按梅花形布置, 间距为 1.2 m, 排水板打设深度为 23 m, 塑料排水板在砂垫层面上外露 30 cm。砂垫层厚度为 40 cm。劈裂真空段中的喷气管按正三角形布置, 间距为 4.8 m, 打设深度分别为 14、16、18、20 m, 外露 60 cm, 平面为梅花形布置, 与塑料排水板嵌打。

试验场地埋深为 9.5~12.5 m, 是粉质砂土层。采用相互搭接的高压旋喷桩对该土层进行隔离, 高压旋喷桩打设范围为 8~14 m, 水泥用量为 180 kg/m, 水灰比为 1.0, 浆液相对密度为 1.50, 注浆压力大于 20 MPa, 提升速度小于 15 cm/min。

为了分析劈裂真空加固深厚软土地基处理的效果, 在试验区进行了以下项目的监测工作: 膜下真空度、地表和深层沉降、孔隙水压力、侧向位移、地下水位等。为了分析劈裂真空法与常规真空预压法加固效果的差异, 在加固前后分别取样进行室内试验, 分析处治前后土性参数变化情况, 并采用现场原位孔压静力触探 (CPTU) 测试的方法评价加固效果。

3.3 施工情况

注气劈裂的施工顺序为: 首先对深度为 20 m 的注气管喷气, 时间为 30 min; 然后对深度分别为 18、16、14 m 喷气, 时间相同。在这一轮喷气完成后, 进行下一轮喷气施工。注气劈裂时间为 2009 年 7 月 1 日至 2009 年 7 月 7 日。

试验区预压荷载主要分为两部分, 一部分为真空荷载, 另一部分为路堤荷载。常规真空预压段抽真空时间为 2009 年 7 月 1 日至 2010 年 1 月 20 日, 历时 203 d; 劈裂真空段抽真空时间为 2009 年 7 月 7 日至 2010 年 1 月 6 日, 历时 183 d。路堤开始填筑时间为 2009 年 8 月 20 日。膜下真空度和路基填筑荷载分别见图 3。劈裂真空法和常规真空预压膜下真空度均达到设计荷载 80 kPa, 且保持较好的稳定性。图中真空度下降点为雨季暴雨导致现场停电引起真空度下降。两个试验区的路堤荷载也基本相当, 劈裂真空段路堤高度略高于常规真空预压段。

4 加固效果的测试分析

4.1 地表沉降观测

加固区沉降随时间变化如图 4 所示。由图可知,

在整个加固期内, 劈裂真空段地表沉降均大于常规真空预压段; 在抽真空初期, 劈裂真空段地基沉降速率高达 25 mm/d, 而常规真空预压处理段地基沉降速率最高为 12 mm/d, 且加固前期劈裂真空区沉降速率大于常规真空预压区; 劈裂真空段的地基处理时间较常规真空预压段缩短约 10%以上。可见劈裂真空法可加速超静孔隙水压力的消散, 缩短地基处理工期。形成两者之间差异的主要原因在于, 劈裂真空段场地在抽真空之前进行了气压劈裂, 土层中形成了大量的裂隙, 裂隙和竖向排水板组成的排水导气网络为真空荷载的传递和孔隙水的消散提供了通道。

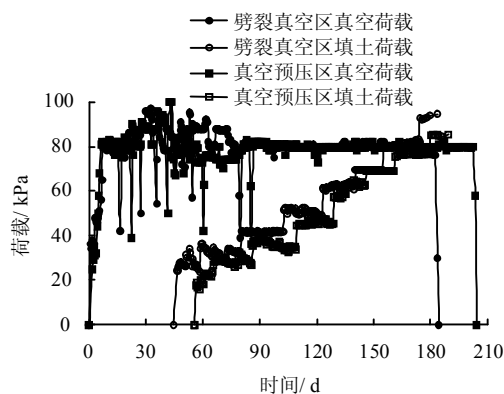
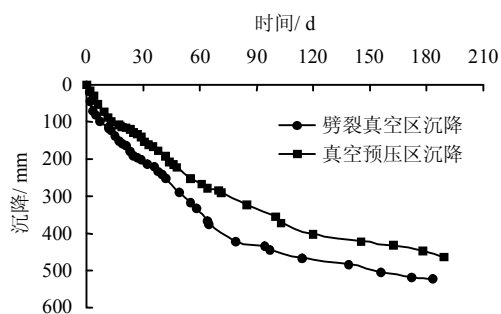
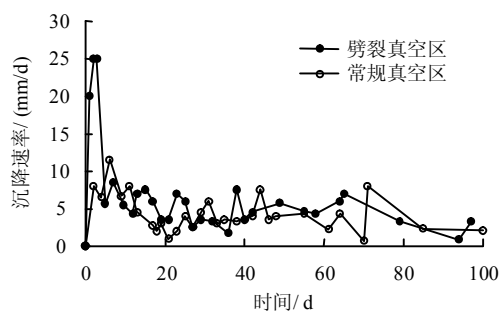


图3 荷载-时间关系曲线

Fig.3 Relationships between loading and time



(a) 地表沉降



(b) 沉降速率 (前 100 d)

图4 沉降和沉降速率随时间变化曲线

Fig.4 Variations of settlement and settlement rate with time

土体劈裂后再施加真空荷载土体裂隙会有所闭合,但由于土颗粒之间的错位、滑动等作用,不会完全闭合^[19],现场沉降速率曲线也反映了这一特点。如果抽真空过程中多次间断性的加气劈裂,土体的渗透性也会周期性地进一步增加。

至真空卸载时,劈裂真空段实测沉降为 521 mm,常规真空预压法段落实测沉降为 463 mm。两者之间的沉降差为 58 mm,这很有可能是由于前期气压劈裂时产生的超静孔隙水压力消散引起的附加沉降。

4.2 水平位移观测

试验段土体深层水平位移监测结果如图 5 所示。

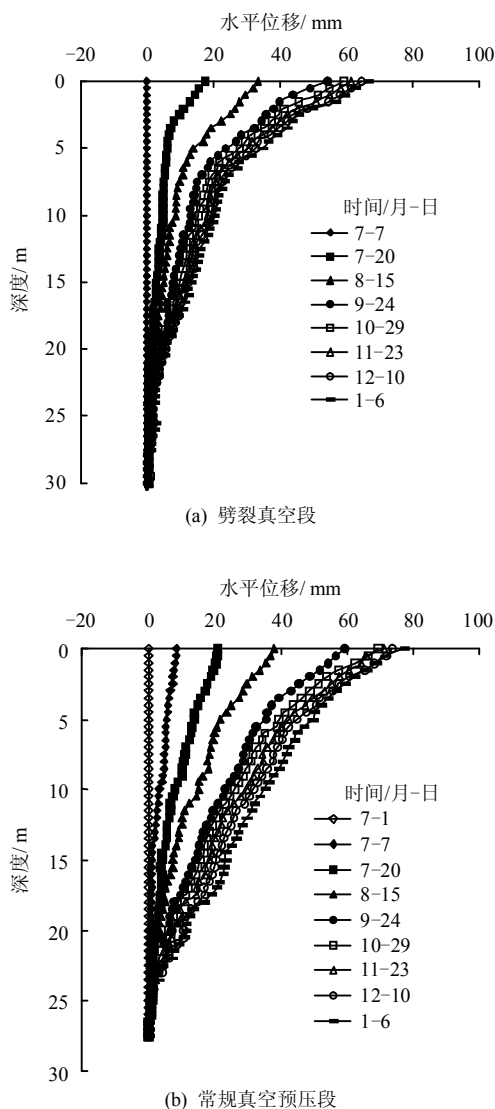


图 5 水平位移随时间变化曲线

Fig.5 Variations of lateral displacement with time

由图 5 可知,截止到 2010 年 1 月 6 日,两个试验段的水平位移较小,均不超过 80 mm,这可能与高压旋喷桩隔离帷幕的存在有关;抽真空期间,土

体水平位移整体上是向加固场地内移动的,最大位移发生在地表。随着深度的增加,水平位移减小;填筑路堤荷载后水平位移速率开始减小,路堤填筑可限制真空预压引起的侧向变形;劈裂真空法引起的水平位移略小于常规真空预压法引起的侧向位移,这是由于劈裂真空法区土体强度增长较快,从而减小了土体侧向变形的发展。

4.3 原位 CPTU 试验

原位试验采用东南大学引进的现代多功能 CPTU 设备,该设备可获得多项原位测试参数,并用经验公式求得其他力学指标。本次试验的主要目的在于加固深层软土层⑤,因此,这里仅给出了加固前后软土层⑤的不排水抗剪强度和压缩模量(见图 6)。由图可知,加固后土体的不排水抗剪强度和压缩模量均得到了较大提高;劈裂真空区软土层⑤的不排水抗剪强度和压缩模量较常规真空区的提高幅度大,分别提高了 93.5%和 51.6%;常规真空区软土层⑤的不排水抗剪强度和压缩模量分别提高了 77.9%和 39.1%;前者的提高幅度约为后者的 1.2~1.3 倍。这一测试结果更突出了气压劈裂真空预压法技术的优势性——改善深部土体处理效果,扩大处理深度。

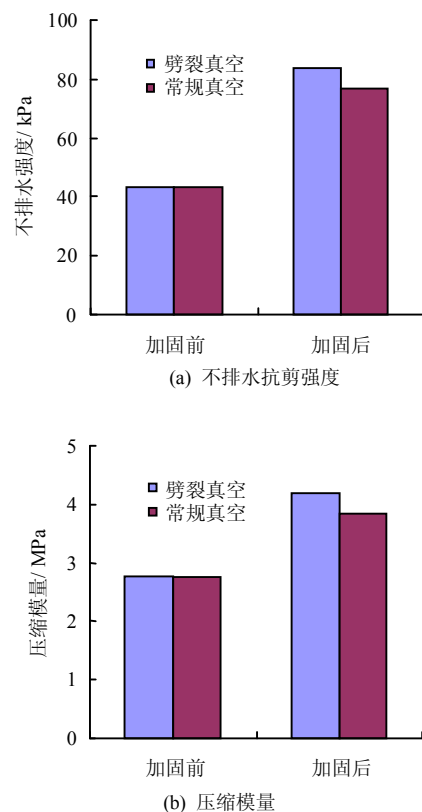


图 6 软土层⑤加固前后 CPTU 试验结果对比分析

Fig.6 CPTU results of soft soil layer ⑤ before and after ground reinforcement

4.4 地基土体物理力学指标变化

地基处理前后分别在劈裂真空区和常规真空区取样进行室内常规物理力学指标对比分析。两次取样的地点尽可能接近, 试验结果见图 7。由图可知:

(1) 劈裂真空区和常规真空区加固前的地基条件较为一致, 两个区域土体物理力学指标基本相同。另外, 通过现场取样室内测得的土体不排水抗剪强度略低于由现场 CPTU 估算的不排水抗剪强度, 这与取样和室内试验中的扰动有关。

(2) 加固前后土体的含水率、密度、无侧限抗压强度和压缩模量等均发生了较大的变化。加固后土体的含水率较加固前的有明显降低, 加固后土体的密度较加固前有一定增加, 加固后土体的无侧限

抗压强度和压缩模量变化增加幅度较大。

(3) 总体而言, 劈裂真空区土体的物理力学性质改善程度明显优于常规真空预压区, 尤其是深部软土层⑤表现更为明显。其原因是由于真空度在沿竖向排水体向深部土体的传递过程中, 由于塑料排水体和土体的阻力使得真空度有衰减, 所以常规真空预压法对土体的加固效果随深度衰减; 劈裂真空法由于气压劈裂裂隙和塑料排水板组成的排水导气网络提高了真空荷载的传递效率和改善深层软土的加固效果。

这说明劈裂真空法加固软土地基时, 可以克服常规真空预压法加固深层软土时深层部位加固效果欠佳的局限性, 改善深层软土的加固效果, 提高真空预压的处理深度。

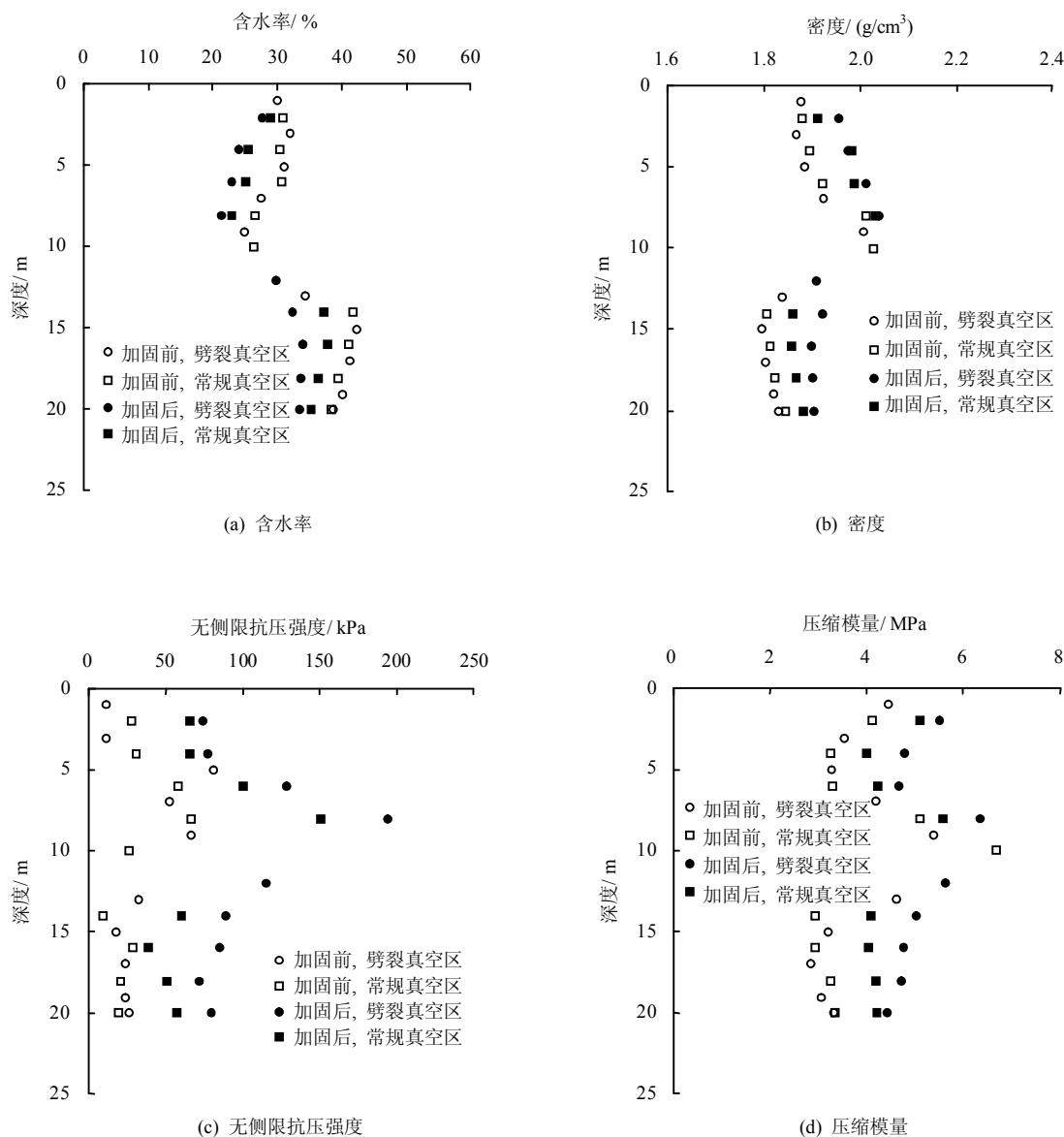


图 7 加固前后工程特性指标对比

Fig.7 Engineering properties of soils in test site before and after ground reinforcement

5 结 论

(1) 劈裂真空法加固地基的沉降速率大于常规真空预压法的沉降速率, 沉降曲线易于收敛, 有利于工后沉降的控制; 劈裂真空法还可以缩短地基处理工期。

(2) 由于劈裂真空法加速地基强度的增长, 劈裂真空加固区域的深层水平位移较常规真空预压区小, 施工对周围环境的影响范围较小。

(3) 加固前后 CPTU 测试结果和取样室内土体物理力学指标对比结果证实了劈裂真空法加固软土地基的有效性; 此方法可以提高真空荷载向深层土体的传递效率, 提高深层软土的加固效果, 增加真空预压法的处理深度; 劈裂真空法还可以加速地基固结, 缩短地基处理工期, 能产生较大的经济效益和社会效益。劈裂真空法的技术优势在深厚软土地基加固中体现尤为明显。

参 考 文 献

- [1] KJELLMAN W. Consolidation of clayey soils by atmospheric pressure[C]//Proceedings of a Conference on Soil Stabilization, Massachusetts Institute of Technology. Boston: [s. n.], 1952: 258—263.
- [2] 娄炎. 真空排水预压法加固软土技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [3] 刘润, 闫澍旺, 苗中海, 等. 水下真空预压中真空产生机制的研究[J]. 中国港湾建设, 2003, (5): 29—35.
LIU Run, YAN Shu-wang, MIAO Zhong-hai, et al. Study of mechanism of vacuumization in underwater vacuum preloading[J]. **China Harbour Engineering**, 2003, (5): 29—35.
- [4] 胡利文, 王永平. 真空预压淤泥搅拌墙气密性试验分析与应用技术[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 427—431.
HU Li-wen, WANG Yong-ping. Test study and application technique for airtight capacity of mixing silt wall under vacuum preloading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(3): 427—431.
- [5] CHAI J C, MIURA N, BERGADO D T. Preloading clayey deposit by vacuum pressure with cap-drain: Analyses versus performance[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2008, 26(3): 220—230.
- [6] 龚晓南, 岑仰润. 真空预压加固软土地基机制探讨[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, 35(2): 7—10.
GONG Xiao-nan, CEN Yang-run. Mechanism of vacuum preloading[J]. **Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture**, 2002, 35(2): 7—10.
- [7] 陈环, 严弛, 鲍秀清, 等. 真空预压加固软基效果分析[J]. 天津大学学报, 1991, (增刊 2): 63—67.
CHEN Huan, YAN Chi, BAO Xiu-qing, et al. Effect analysis of using vacuum pre-loading to strengthen soft foundation[J]. **Journal of Tianjin University**, 1991, (Supp.2): 63—67.
- [8] 董志良, 陈平山, 莫海鸿, 等. 真空预压法有限元计算比较[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2347—2353.
DONG Zhi-liang, CHEN Ping-shan, MO Hai-hong, et al. Comparison of numerical simulation with finite element method for vacuum preloading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(11): 2347—2353.
- [9] INDRARATNA B, BAMUNAWITA C, KHABBAZ H. Numerical modeling of vacuum preloading and field applications[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2004, 41(6): 1098—1110.
- [10] 闫澍旺, 傅海峰, 刘润, 等. 真空预压机制模拟装置及典型示范结果[J]. 天津大学学报, 2005, 38(7): 611—614.
YAN Shu-wang, FU Hai-feng, LIU Run, et al. Device for demonstrating the mechanism of vacuum preloading[J]. **Journal of Tianjin University**, 2005, 38(7): 611—614.
- [11] 刘汉龙, 李豪, 彭劫, 等. 真空-堆载联合预压加固软基室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 1455—149.
LIU Han-long, LI Hao, PENG Jie, et al. Laboratory test on vacuum preloading combined with surcharge[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(1): 145—149.
- [12] 房营光, 徐敏, 朱忠伟. 碱渣土的真空-电渗联合排水固结特性试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2006, 34(11): 70—75.
FANG Ying-guang, XU Min, ZHU Zhong-wei, Experimental investigation into draining consolidation behavior of soda residue soil under vacuum preloading-electro-osmosis[J]. **Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)**, 2006, 34(11): 70—75.
- [13] 谢弘帅, 宰金璋, 刘庆华. 真空井点降水堆载联合加固软土路基机制[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 119—121.

- XIE Hong-shuai, ZAI Jin-zhang, LIU Qing-hua. Mechanism of improving soft clay ground by the combined-method of vacuum dewatering and preloading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(1): 119—121.
- [14] 楼晓明, 徐士龙, 朱亚娟. 高真空击密法加固大面积钢材堆场地基[C]//中国土木工程学会第十届土力学及岩土工程学术会议论文集(下册). 重庆: 重庆大学出版社, 2007: 97—100.
- [15] CHU J, YAN S W, INDRARANATA B. Vacuum preloading techniques-recent developments and applications[C]//Proceedings of GeoCongress 2008: Geosustainability and Geohazard Mitigation. New Orleans: American Society of Civil Engineers, 2008: 586—595.
- [16] 闫澍旺, 侯晋芳, 程栋栋. 真空预压有效加固深度的探讨[J]. 水利学报, 2007, 38(7): 774—778.
- YAN Shu-wang, HOU Jin-fang, CHENG Dong-dong. Effective depth of vacuum preloading for reinforcing soft soil[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2007, 38(7): 774—778.
- [17] 朱超, 张季超, 刘晨. 真空预压处理广州南沙区软基的加固深度探讨[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 2): 422—425.
- ZHU Chao, ZHANG Ji-chao, LIU Chen. Soft ground treatment effective reinforced depth by vacuum preloading method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(Supp.2): 422—425.
- [18] 刘松玉, 洪振舜, 章定文. 气压劈裂真空预压法加固软土地基操作方法: 中国, ZL 200510038644.0[P]. 2007-10-03.
- [19] KING T C. Mechanism of pneumatic fracturing[D]. Newark: New Jersey Institute of Technology, 1993.