

·地基与基础·



固化软土双层地基室内模型试验数值模拟研究*

刘文白, 蒋宏鸣, 刘春林, 奚秀丹
(上海海事大学 海洋环境与工程学院, 上海 201306)

摘要: 利用有限元软件ABAQUS对上覆硬壳层双层地基室内模型试验进行数值模拟。通过分析等效塑性应变分布云图与位移矢量分布图, 确定了双层地基的破坏形式为冲剪破坏; 硬壳层厚度的增加减缓了下卧软土层变形区的开展, 但是地基承载能力增加不明显; 加入纤维素的固化剂提高了硬壳层的强度, 增加了地基的承载能力。在地基破坏特征和极限承载力方面, 数值模拟与模型试验所得结果的吻合程度较高。

关键词: ABAQUS; 双层地基; 破坏形式; 纤维素; 地基极限承载力

中图分类号: TU 447

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)11-0173-06

Numerical simulation of indoor model test of double-layered soil with upper curing soft soil

LIU Wen-bai, JIANG Hong-ming, LIU Chun-lin, XI Xiu-dan

(College of Ocean Environment and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: This paper uses ABAQUS to make a numerical simulation of the indoor model test of double-layered soil with upper crust. Through the analysis of the contours of equivalent plastic strain and displacement vector, the failure mode of double-layered soil is proved to be punching failure. With the increase of upper crust thickness, the expansion of plastic deformation area in sub-soil delays while double-layered soil bearing capacity slightly improves. The curing agent which contains cellulose enhances the strength of upper crust, so that it helps to increase the bearing capacity. In terms of the failure characteristics and ultimate bearing capacity, the results of numerical simulation close to that of indoor model test.

Key words: ABAQUS; double-layered soil; failure mode; cellulose; ultimate bearing capacity

软土在我国滨海、湖沼、谷地和河滩等地区有着广泛的分布, 虽然它们的成因各有不同, 但是天然含水率高、压缩性高、承载能力低等较差的工程性状是其普遍具有的特点, 因此软土地基在工程中作为地基土时一般都需要经过地基加固处理, 地基加固的方法在软基处理技术成熟的今天也是方法各异, 特点不一。其中, 土壤固化技术是一种快速将土壤或淤泥硬化的新技术, 该技术能为工程中的软基处理节省大量的时间^[1]。土壤固化剂由多种有机和无机材料配制而成, 其成分

可以根据固化对象进行调整^[2-3]。对软土地基进行固化处理, 在地基表层形成一层厚度较小、强度较高、覆盖面积较大的人工硬壳层^[4], 硬壳层具有良好的物理力学性质和抗变形能力, 如果充分发挥软基中硬壳层的作用, 就可以有效地控制和减小软基的沉降量, 有利于软基的变形与稳定^[5]。

本文是基于有限元分析软件ABAQUS, 对王宁伟的固化软土双层地基承载性能室内模型试验^[6]进行数值模拟, 通过与模型试验结果的对比和分析, 对不同强度和厚度的硬壳层对于上覆硬壳层双层地基极限承载力和破坏形式的影响进行了研究。

收稿日期: 2012-03-29

***基金项目:** 国家自然科学基金(51078228); 海洋公益性行业科研专项经费项目(201105024-5); 上海海事大学校级重点学科建设项目(A290209002)

作者简介: 刘文白(1955—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程和港口结构工程的教学和科研工作。

1 模型试验

1.1 试验材料

试验所用材料取自大连渤海湾内的海相沉积软土，该土的主要物理性质指标如表1所示。根据土的分类方法，该土为粉细砂（MLO）^[7]，固化软土所用材料主要为沈阳天和水泥厂生产的C32.5普通硅酸盐水泥。

表1 试验用海相沉积软土物理性质指标

含水率/ %	密度/ (kg·m ⁻³)	黏粒含量 ^① / %	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 ψ/(°)
48.5	1 520	2.6	9.1	12.2

注：①粒径小于5 μm。

1.2 试验方法

为研究不同硬壳层强度和厚度对双层地基承载力的影响，在室内进行不同上覆硬壳层双层地基的承载性能室内模型试验，同时通过无侧限抗压强度试验测定硬壳层的无侧限抗压强度，无侧限抗压试验根据《公路土工试验规程》^[8]中有关规定进行。采用圆柱型钢试模（ $D \times H = 102 \text{ mm} \times 116 \text{ mm}$ ）制备试块，经过击实、脱模、养护等步骤后，测得不同固化剂的各试块在14d的无侧限抗压强度，如表2所示。室内平板载荷试验的具体方案见表3。

表2 试验土的无侧限抗压强度和弹性模量

试验土	无侧限抗压强度/MPa	弹性模量/MPa
软土		4.20
固化剂1固化的硬壳层	0.533	24.58
固化剂2固化的硬壳层	0.984	68.35

注：固化剂1未加纤维素，固化剂2加了占土重1%的纤维素。

表3 试验方案

固化剂	硬壳层厚度/mm	承载板尺寸/mm	龄期/d
固化剂1	30	60 × 60	14
固化剂1	30	60 × 60	14
固化剂2	40	60 × 60	14

承载性能室内模型试验如图1所示。上覆硬壳层双层地基的模型箱为边长600 mm的无盖立方箱，海相软土层厚度为420 mm，上部为不同厚度经过固化的硬壳层。

1.3 试验结果

室内模型试验在上覆硬壳层不同强度和厚度条件下所得的极限承载力值见表4。

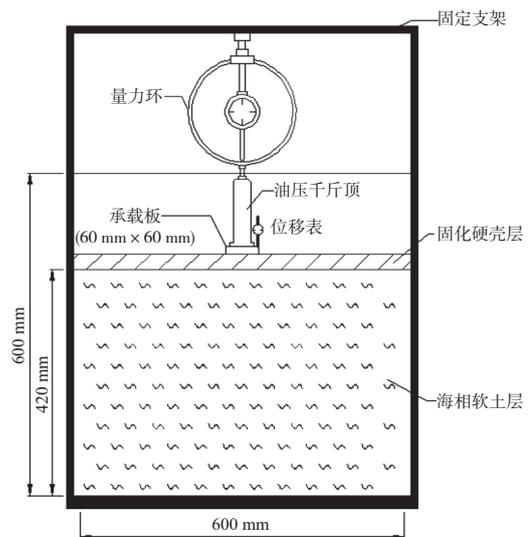


图1 室内模型试验

表4 模型试验双层地基极限承载力

地基类型	固化厚度/mm	极限承载力/kPa
软土		50
固化剂1固化双层地基	30	120
	40	120
固化剂2固化双层地基	40	280

双层地基的破坏形式均为冲剪破坏，承载板刺入了固化剂1固化的硬壳层中，并与硬壳层整体陷入到软土层中，而固化剂2固化的硬壳层上仅在承载板周围出现了一些裂缝，承载板有一角出现倾斜，但并未刺入硬壳层内。

2 平板载荷模型试验的数值模拟

本文应用有限元分析软件ABAQUS建立了3个三维模型，分别模拟完全软土模型、上覆30 mm硬壳层的双层地基模型和上覆40 mm硬壳层的双层地基模型。

2.1 有限元模型的建立

数值模拟模型的几何尺寸等比模拟模型试验，3个数值模拟模型的几何尺寸见表5。

数值模型中土的本构模型采用弹塑性本构模型，即弹性部分采用线弹性模型，塑性部分采用Mohr-Coulomb模型来模拟^[9]。物理模型试验中的承载板是一块规则的钢板，数值模拟承载板采用相对土刚度较大的线弹性材料进行模拟。

数值模型边界条件的设置是完全模拟模型试验的情况进行设定的。限制土四周侧面的水平

表5 模型几何尺寸

模型	长 × 宽 × 高/mm		
	硬壳层	软土层	承载板
完全软土模型		600 × 600 × 450	
上覆30 mm双层地基模型	600 × 600 × 30	600 × 600 × 420	60 × 60 × 20
上覆40 mm双层地基模型	600 × 600 × 40	600 × 600 × 410	

位移自由度, 土的底面则限制其垂直方向的自由度。表层的硬壳层和底层的软土层之间, 以及硬壳层与平板之间都采用完全粘结 (Tie) 的链接模式, 使接触面上各个方向上的位移变形成为连续一致的。荷载是以均布力的形式加压在荷载平板上, 以尽可能模拟出模型试验中的加荷方式。

模型网格划分采用C3D8R (八结点线性六面体单元, 减缩积分, 沙漏控制) 单元类型, 为了减少计算代价, 采取全局布置网格种子, 结构化划分方法总共划分了6 000个单元 (图2)。

模型考虑了自重的影响, 在施加荷载之前模拟了地应力平衡。所采取的地应力平衡的方法是为整个模型施加与重度方向一致的体积力, 随后修改关键字, 在geostatic分析步之前设置了土自重和土压力的参数, 最终使模型地应力平衡达到了 10^{-6} 的良好效果。

模型单位的选择: 长度 (m)、面积 (m^2)、

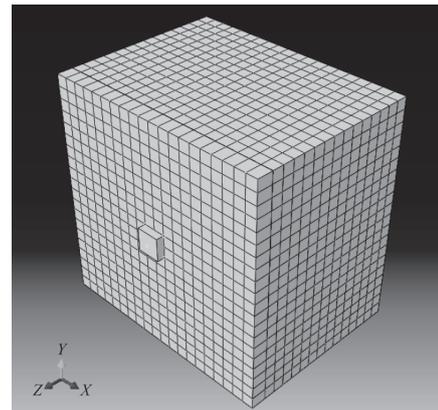


图2 ABAQUS中网格划分示意

弹性模量 (kPa)、应力 (kPa), 模拟计算后再换算为所需量纲。

2.2 有限元模型参数

数值模型所用力学参数 (密度、弹性模量、泊松比、摩擦角和粘聚力) 主要依据为表1和表2的数据, 最后所确定的数值模拟土的力学参数见

表6 数值模拟土的力学参数

试验土	密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)	弹性模量/kPa	泊松比	摩擦角/ ($^\circ$)	粘聚力/kPa
软土	1 520	4 200	0.45	12.2	3.5
固化剂1固化的硬壳层	1 950	24 580	0.27	20.5	20.0
固化剂2固化的硬壳层	1 950	68 350	0.27	41.6	64.0

表6。

3 数值模拟成果与分析

3.1 数值模拟的场分析

图3~5是上覆固化剂1固化30mm厚硬壳层、上覆固化剂1固化40mm厚硬壳层和上覆固化剂2固化40mm厚硬壳层双层地基受压过程的等效塑性应变云图 (PEEQ), 图6是3种形式双层地基破坏时位移矢量分布图, 地基极限破坏时的滑动面形式可以从等效塑性应变的分布云图以及位移矢量分布图看出, 土体中一点的等效塑性应变定义为该点的塑性应变的累积值^[10]。

由图3~5观察发现, 3种形式下的双层地基土塑性变形区的发展过程相似, 塑性变形区最先出现的位置是在承载板边缘垂直下方并与硬壳层交界的软土中, 随着荷载的增加, 该位置的塑性变



a) 刚出现塑性应变阶段



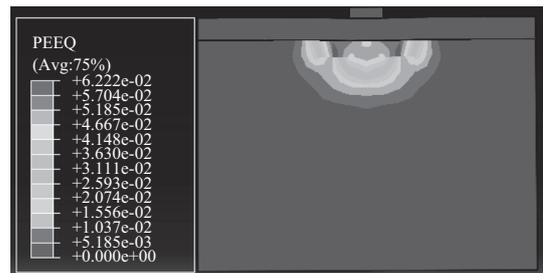
b) 塑性应变不断扩大阶段



a) 刚出现塑性应变阶段



c) 破坏阶段

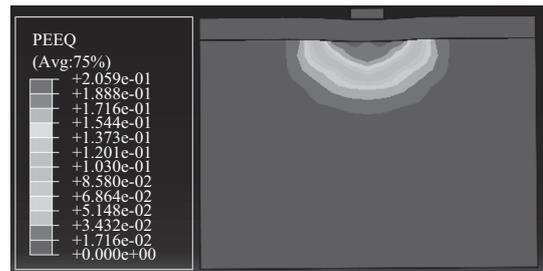


b) 塑性应变不断扩大阶段

图3 30 mm-固化剂1等效塑性应变分布云图



a) 刚出现塑性应变阶段



c) 破坏阶段

图5 40 mm-固化剂2等效塑性应变分布云图



b) 塑性应变不断扩大阶段

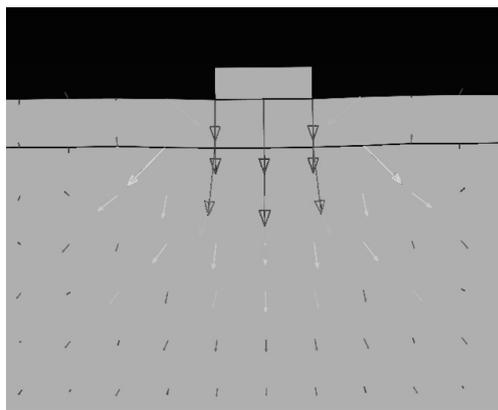


c) 破坏阶段

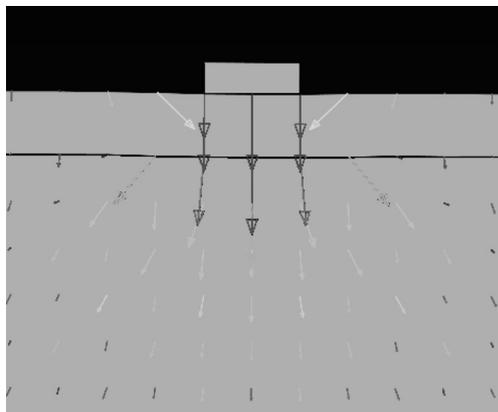
图4 40 mm-固化剂1等效塑性应变分布云图

形区开始逐渐扩大，在整个水平方向上，变形区扩展到承载板板宽的3~4倍范围，竖直方向上变形区开展到硬壳层厚度的2~3倍深处，承载板垂直下方并与硬壳层交界处的软土上的塑性变形区由边缘向中心处逐渐连成一片，最终随着承载板垂直下方的地基交界面上的软土中出现一个倒三角状的破坏面，荷载达到极限承载力；由固化剂1固化的上覆硬壳层双层地基在地基破坏阶段之前，硬壳层始终处于弹性阶段，直到荷载达到极限承载力时位于承载板垂直下方的硬壳层上才出现了塑性变形，而固化剂2固化的硬壳层在荷载增加的过程中始终处于弹性变形阶段。

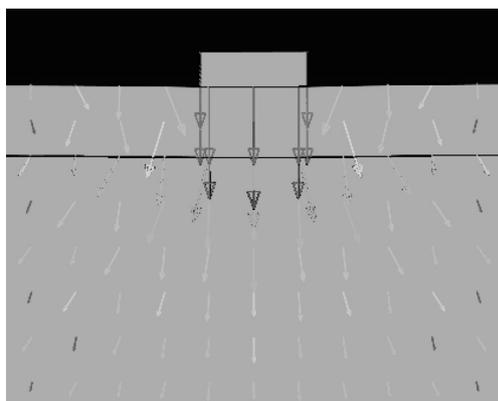
由图6的位移矢量图可见，承载板覆盖范围内的硬壳层在竖直荷载作用下发生垂直刺入软土地基的破坏形式，底层软土在硬壳层刺入作用下向四周扩散，出现整体滑动破坏。



a) 30 mm-固化剂1



b) 40 mm-固化剂1



c) 40 mm-固化剂2

图6 双层地基破坏时位移矢量分布

由图3~6中双层地基的破坏特征来看, 双层地基的破坏形式属于完全冲剪破坏^[10], 其特点是基础下土体类似于刚性土柱一样作用在下层软土层上, 使下卧软土发生整体滑动破坏。数值模拟结果与模型试验结果相吻合。

观察图3~5可知, 固化剂1固化的硬壳层在地基破坏时, 承载板覆盖范围内的硬壳层进入了塑

性变形阶段, 而固化剂2固化的硬壳层未出现塑性变形区, 这对模型试验所呈现的破坏现象做出了解释, 即固化剂1固化的硬壳层在压力作用下发生碎裂并刺入了软土地基内, 而硬壳层2固化的硬壳层上仅出现了一些裂缝。

比较图3和图4发现, 30 mm厚双层地基在破坏时软土层内的塑性变形区已经出现倒三角状的破坏面, 而40 mm厚情况下的软土层还未出现完整的破坏面, 随着硬壳层厚度从30 mm增加到40 mm, 下卧软土层塑性变形区的开展有所减缓, 上覆固化剂1固化40 mm厚硬壳层双层地基的破坏原因主要是由于硬壳层在承载板垂直压力的作用下发生碎裂并刺入软土地基内, 使软土层发生局部剪切破坏。

比较图4和图5发现, 双层地基破坏时固化剂1固化的硬壳层上出现了塑性变形区而固化剂2固化的硬壳层上未出现塑性变形区, 相比固化剂1, 加入纤维素的固化剂2增加了硬壳层的强度。

3.2 数值模拟的*p-s*曲线

利用ABAQUS通过模拟完全软土模型、上覆30 mm厚硬壳层(固化剂1固化)的双层地基模型、上覆40 mm厚硬壳层(固化剂1固化)的双层地基模型和上覆40 mm厚硬壳层(固化剂2固化)的双层地基模型, 得到了4条荷载-位移曲线, 并以固化剂和板厚作为变化量分列在图7和图8的*p-s*曲线图中, 以进行分析比较。

极限承载力的获取参考《土工试验方法标

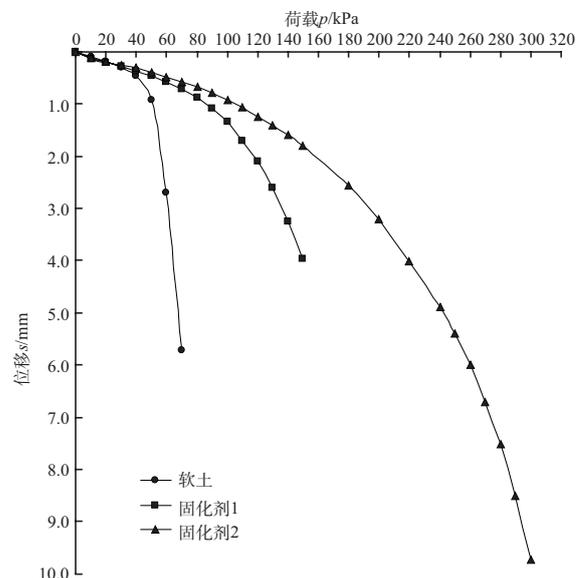


图7 2种不同固化剂固化40 mm厚硬壳层的荷载-位移曲线

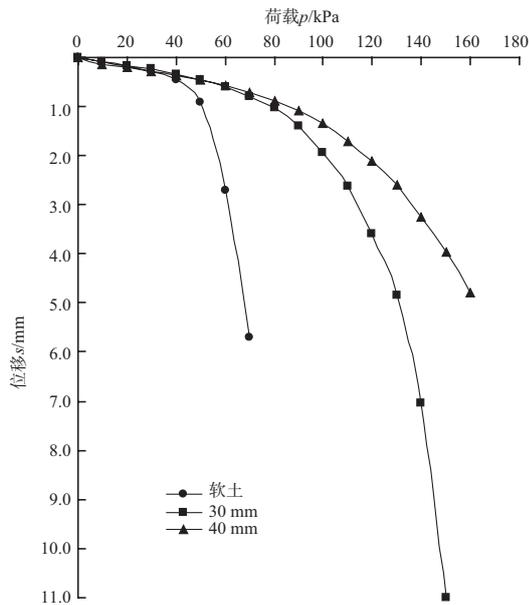


图8 固化剂1固化2种不同厚度硬壳层的荷载-位移曲线

准》^[11]进行，所采用的取值方法为：当荷载-位移曲线有明显拐点时，取拐点对应的荷载为极限承载力，当荷载-位移曲线没有明显的拐点时，采用卡萨格兰德（Casagrade）的经验图解法，即“C”法。根据此原则，找到各条曲线上特征点对应的荷载，将其作为该条件下地基的极限承载力值，并列入表7。

表7 数值模拟双层地基极限承载力 kPa

地基形式	厚30 mm	厚40 mm
上覆固化剂1固化硬壳层	125	135
上覆固化剂2固化硬壳层		275
完全软土	50	

3.3 数值模拟与模型试验结果的对比

由表7的数据与模型试验的数据进行对比发现，2组数据结果吻合程度较高，软土地基承载力和模型试验结果完全一致；由固化剂1固化的30 mm和40 mm厚硬壳层双层地基的极限承载力分别与试验结果相差4.2%和12.5%；由固化剂2固化的40 mm厚硬壳层双层地基的地基承载力与试验结果相差1.8%。

观察3种双层地基形式下的地基极限承载力发现，上覆硬壳层厚度从30 mm增加到40 mm，地基极限承载力增加了8%，上覆固化剂2固化硬壳层双层地基比上覆固化剂1固化硬壳层双层地基的地基极限承载力增加了104%。

4 结论

1) 在荷载不断增加的过程中，由固化剂1固化的硬壳层在承载板垂直下方的硬壳层内出现了塑性变形，由固化剂2固化的硬壳层始终处于弹性变形阶段。

2) 上覆硬壳层双层地基的破坏特征为基础下土体类似于刚性土柱一样作用在下层软土层上，使下卧软土发生整体滑动破坏，属于冲剪破坏。

3) 硬壳层厚度由30 mm增加到40 mm后，下卧软土层塑性应变区的开展有所减缓；相比固化剂1，加入纤维素的固化剂2增加了硬壳层的强度。

4) 经过比较数值模拟与模型试验所得数据，两种结果得到的双层地基的极限承载力在数值上相接近，吻合程度较高。

参考文献:

- [1] 刘青松, 张春雷, 汪顺才, 等. 淤泥堆场人工硬壳层地基极限承载力室内模型研究[J]. 岩土力学, 2008, 29: 667-670.
- [2] 邵玉芳, 龚晓南, 郑尔康, 等. 疏浚淤泥的固化试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 191-194.
- [3] Kolay P K, Aminur M R, Taib S N L, et al. Stabilization of tropical peat soil from Sarawak with different stabilizing agents[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2011, 29(6): 1 135-1 141.
- [4] 王宁伟, 卢淑雯. 人造硬壳层对固化滩涂地基附加应力的影响[C]//冯夏庭, 李海波. 第十一次全国岩石力学与工程学术大会论文集, 2010: 445-450.
- [5] 彭月明, 张铁壮, 窦远明. 硬壳层对软土地基沉降特性影响的研究[J]. 河北工业大学学报, 2007, 36(1): 101-105.
- [6] 王宁伟, 高园, 王玉梅. 固化软土地基的室内平板载荷试验[C]//第八届沈阳科学学术年会论文集, 2011: 447-451.
- [7] GBJ 145—1990 土的分类标准[S].
- [8] JTG E40—2007 公路土工试验规程[S].
- [9] Johnson K, Lemcke P, Karunasena W, et al. Modelling the load-deformation response of deep foundations under oblique loading[J]. Environmental Modelling & Software, 2006: 1 375-1 380.
- [10] 梁永辉. 上覆硬壳层软土地基的工程特性实验研究及数值分析[D]. 上海: 同济大学, 2007: 56-60.
- [11] SL 237—1999 土工试验方法标准[S].