

软土表面硬壳层超固结比对路堤填筑影响 数值模拟

陈富^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461)

摘要: 由于自然晾晒和地下水位变化等因素, 软土地表会形成一定厚度的硬壳层, 该硬壳层土体处于超固结状态, 有利于提高路堤修筑的稳定性。本文以曼谷新机场工程为例, 利用修正剑桥模型从十字板剪切试验结果分析地表硬壳层的超固结比沿深度的分布, 将十字板剪切试验结果引入到路堤填筑的有效应力分析中。考虑塑料排水板涂抹区对于固结排水的阻碍作用, 采用 Hird 等效关系公式将三维塑料排水板固结分析转换为二维分析。固结过程分析中采用可变渗透系数, 渗透系数随着孔隙比的减小而减小, 保证了固结过程模拟的准确性。通过与曼谷新机场工程实测值对比, 该数值模拟方法能够较好地模拟表面硬壳层对于路堤填筑的沉降量、坡脚水平位移的影响, 坡脚水平位移在硬壳层中明显收缩。

关键词: 塑料排水板; 软土; 数值模拟; 表面硬壳层; 路堤填筑

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2020)06-0497-07

Numerical simulation of overconsolidation ratio of hard crust layer in soft soil on the embankment construction

CHEN Fu^{1,2}

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

Abstract: Due to natural drying and groundwater level changes, soft soil surfaces form a certain thickness of hard crust layer, which is in the state of over-consolidation. And the hard crust layer is of importance in improving the stability of embankment construction. Taking Bangkok new airport project as an example, the vane shear test results are used to analyze the distribution of over-consolidation ratio along the depth in the surface hard crust layer based on Modified Cambridge Clay constitutive model; thus, the vane shear test results can be introduced into the effective stress analysis of embankment construction. Considering the hindering effect of prefabricated vertical drains smear zone, the Hird formula is used to transform the three-dimensional consolidation analysis into two-dimensional analysis. The variable permeability coefficient, which decreases with the decrease of void ratio during consolidation, is used in the consolidation process analysis, and it ensures the accuracy of consolidation process simulation. By compared with the measured value of Bangkok new airport project, the results indicate that the influence of hard crust layer on horizontal displacement of slope bottom can be proper simulated by this method, especially the horizontal displacement of the slope toe shows a significant shrinkage trend in the hard crust layer.

Key words: prefabricated vertical drains (PVD); soft soil; numerical simulation; hard crust layer; embankment construction

0 引言

软土抗剪强度低, 压缩性大, 因此软土地基上修筑路堤会遇到边坡失稳和工后沉降过大的问题。

填筑过程中需要对路堤的沉降量、坡脚水平位移、孔隙水压力等参数进行监测, 控制填筑速度。

天然软土或者人工吹填的软土表面由于自然晾晒或者地下水位变化等因素会形成一定厚度的

硬壳层。该硬壳层的压缩性和抗剪强度均优于下卧软土，有利于提高路堤填筑的稳定性。

国内学者对表面硬壳层的附加应力扩散和沉降量进行了研究，王晓谋^[1]将表面硬壳层简化成弹性体，分析硬壳层的厚度、变形模量、泊松比和荷载宽度等因素对硬壳层扩散应力的影响规律。梁永辉^[2]将硬壳层认为是超固结土，采用修正剑桥模型研究上覆硬壳层对地基沉降的影响规律。

本文以曼谷新机场工程为例，根据采用修正剑桥模型分析硬壳层的超固结比沿深度的分布，将十字板剪切试验结果引入到路堤填筑的有效应力分析中。考虑塑料排水板涂抹区对于固结排水的阻碍作用，采用 Hird 等效关系公式将三维塑料排水板固结分析转换为二维分析。通过与曼谷新机场工程实测值对比，表明该数值模拟结果能够较好的模拟表面硬壳层对于路堤填筑的影响，尤其是坡脚水平位移在硬壳层中呈明显收缩的趋势。

1 表面硬壳层的固结比研究

软土地区由于地下水位降低和表面水分蒸发干缩固结等因素在地表形成一定厚度的硬壳层。徐永福^[3]在国内高速公路和铁路等项目中采用室内试验、静力触探试验和现场十字板剪切试验证明表面硬壳层处于超固结状态，超固结比 OCR 最大可达 7.0 左右。由于现场取土扰动的限制，室内试样得到的超固结比 OCR 结果误差较大。本文以曼谷新国际机场工程路堤填筑为实例，介绍一种通过十字板剪切原位试验判定地基土体超固结比的方法。

曼谷新机场位于曼谷东侧 30 km，场地主要为湄南河冲积平原，软土大多处于正常固结状态，具有压缩性高和抗剪强度低等特点，主要矿物成分为蒙脱石伊利石（54%~71%）、高岭石（28%~36%）和云母。曼谷软黏土的物理指标见表 1^[4]。

与我国沿海软土相比，曼谷软黏土的最大特点是塑性指数大（ $I_p=60$ ），远大于我国沿海软土常见的 20~30 范围，因此排水固结法的处理时间大于国内工程。

路堤填筑前的十字板抗剪强度沿深度的变化见图 1^[5]。

从图 1 可以发现表面硬壳层主要在表层 2.0 m 深度范围内，十字板剪切强度约 15~20 kPa，深度 2.0~9.0 m 范围为超软黏土层，抗剪强度的 10 kPa，9.0 m 以下的软土抗剪强度超过 20 kPa。

表 1 曼谷软土的物理指标^[4]

Tab. 1 Physical parameters for Bangkok clay

物理指标	数值
液限/%	103
塑性指数	60
天然含水量/%	90~95
液性指数	0.62
黏粒含量/%	69
粉粒含量/%	28
砂粒含量/%	1
湿重度/(kN/m ³)	14.3
干重度/(kN/m ³)	7.73
颗粒比重	2.68

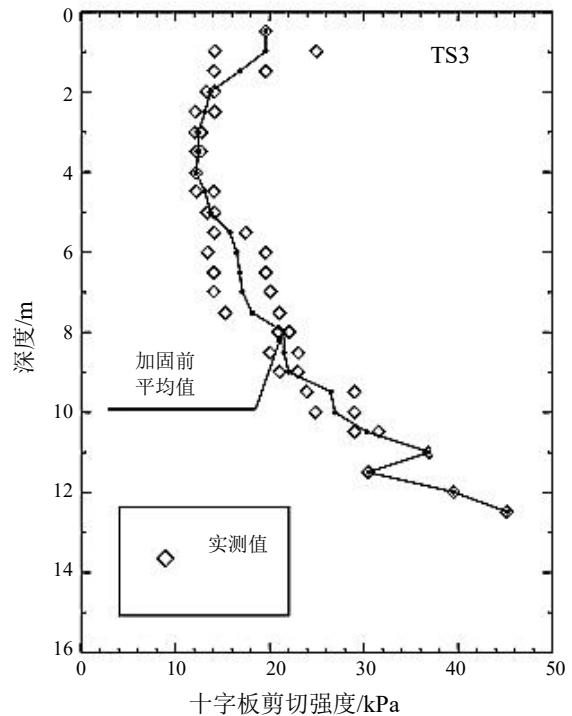


图 1 曼谷新机场的十字板剪切试验结果^[5]

Fig. 1 Vane shear test result with depth at new Bangkok international airport project

根据修正剑桥模型，土体的不排水抗剪强度 S_u 与超固结比 OCR、内摩擦角 ϕ'_{cs} 、竖向有效应力 σ'_{vi} 和压缩性相关，计算公式见式（1）^[6]。

$$S_u = OCR \cdot \sigma'_{vi} \cdot g(\theta) \cdot \cos \theta \cdot \frac{1+2K_0^{NC}}{6} \cdot (1+B^2) \left[\frac{2(1+K_0^{OC})}{(1+2K_0^{NC}) \cdot OCR \cdot (1+B^2)} \right]^{\frac{k}{\lambda}} \quad (1)$$

式中：

$$B = \frac{\sqrt{3}(1-K_0^{NC})}{g(-30^\circ)(1+2K_0^{NC})} \quad K_0^{NC} = 1 - \sin \phi'_{cs}$$

$$K_0^{OC} = K_0^{NC} \cdot OCR^{\lambda}$$

$$g(\theta) = \frac{\sin \phi'_{cs}}{\cos \theta + \frac{\sin \theta \sin \phi'_{cs}}{\sqrt{3}}}$$

λ 为 $v\text{-ln}(p')$ 压缩曲线的斜率; K_0^{NC} 为正常固结土的侧向土压力系数; k 为 $v\text{-ln}(p')$ 膨胀曲线的斜率; K_0^{OC} 为侧向水平压力系数。

根据室内三轴剪切试验, 硬壳层软土的内摩擦角 ϕ'_{cs} 为 23° , 超软土的内摩擦角 ϕ'_{cs} 为 20° , 其他土层的内摩擦角 ϕ'_{cs} 为 27° , 地下水位深度为 -2.0 m ^[7]。

根据式 (1) 对图 1 的十字板剪切试验沿深度曲线进行拟合, 实测值和拟合值对比见图 2。

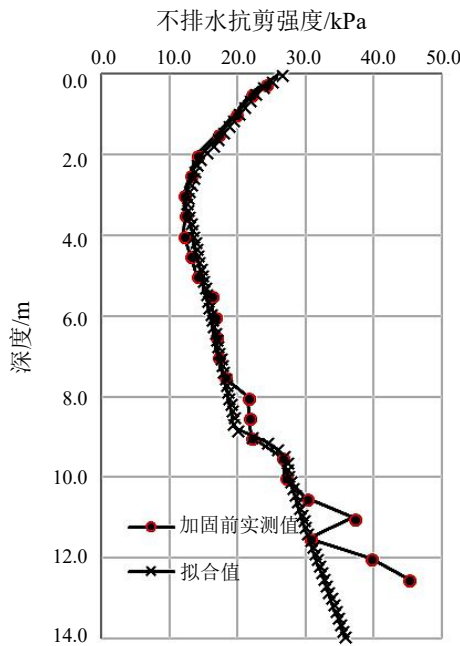


图 2 十字板剪切试验实测值和拟合值

Fig. 2 Comparison of vane shear test measured value and fitting value

相应的超固结比 OCR、侧向水平压力系数 K_0^{OC} 沿深度变化分别见图 3 和图 4。

通过图 3 和图 4 可知, 超固结比 OCR、侧向水平压力系数 K_0^{OC} 沿深度逐渐减小, 地表以下 2 m 范围的超固结比 OCR 为 $6.6\sim 1.9$, 侧向水平压力系数为 $1.3\sim 0.8$; 其下土层超软土为正常固结土或轻微固结土, 超固结比在 1.40 左右, 侧向水平压力系数为 0.7。

十字板剪切试验原位测试确定的超固结比和侧向水平压力系数比较准确, 可为后续的软土路堤填筑、基坑开挖等岩土设计计算提供准确输入参数, 提高岩土变形计算的准确性。

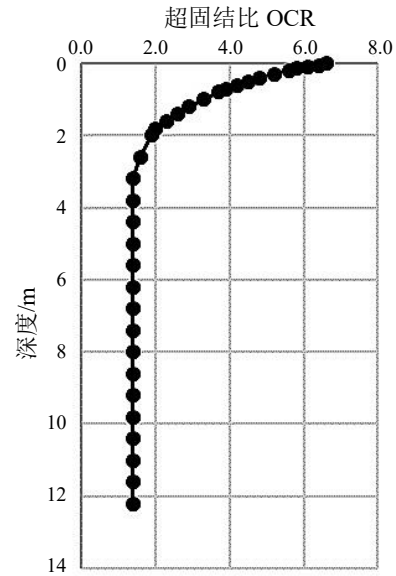


图 3 超固结比 OCR 拟合值沿深度分布

Fig. 3 The fitting value of over consolidation ratio with depth

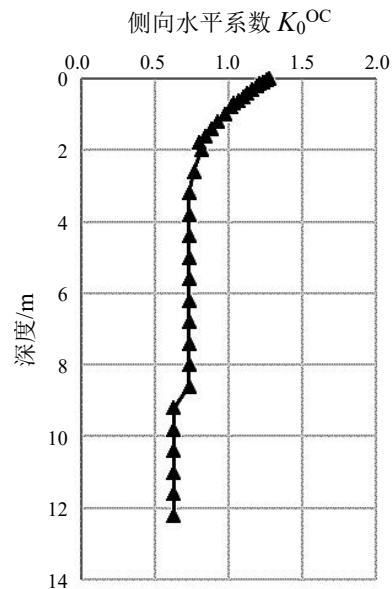


图 4 侧向水平压力系数 K_0^{OC} 拟合值沿深度分布

Fig. 4 The fitting value of coefficient of earth pressure at rest in the over-consolidated condition with depth

2 曼谷新机场路堤修筑的数值模拟

2.1 路堤填筑过程

曼谷新机场建设过程中, 进行堆载预压法对软土地基进行处理, 采用塑料排水板加速固结过程。曼谷新机场 TS3 试验路堤采用 Mebra (MD-7007) 塑料排水板 ($4\text{ mm}\times 100\text{ mm}$), 正方形布置, 排水板间距为 1.0 m , 打设深度为 12.0 m 。三个试验路堤段 TS1~TS3 坡顶宽度为 14 m , 坡脚宽度为 40 m , 总填筑高度为 4.2 m , 按四层分阶段填筑, 加载过程

和相应的沉降量监测曲线见图5^[5]。

根据图5，整个路堤的加载高度和加载时间见表2。

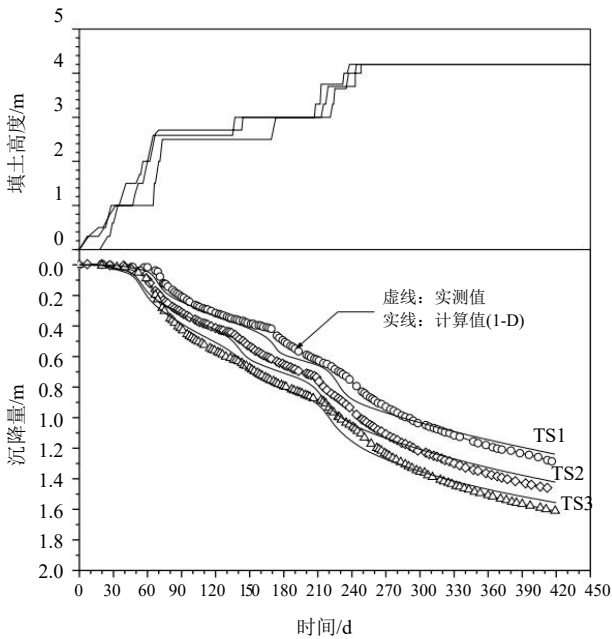


图5 路堤修筑加载过程和相应的沉降量监测曲线^[5]

Fig. 5 The filling height and corresponding settlement during embankment construction

表2 路堤分级加载高度和加载持续时间

Tab. 2 The height and duration of embankment construction

加载级数	累计高度/m	加载时间/d
第1级	1.0	1~15
第2级	2.5	45~60
第3级	3.0	90~105
第4级	4.2	210~223

2.2 有限元模型建立

(1) 网格划分

塑料排水板打设过程中，会对周围土体造成扰动形成涂抹区，该区域土体的渗透系数明显减小，阻碍孔隙水的排出。涂抹区内渗透系数的减小幅度还与土性有关，在黏土中的减小幅度要大于砂土中^[8]。在实际工程中要尽量采用截面尺寸尽量小的插板套管，与国内常用的圆形套管不同，国外常用的套管有菱形和矩形，可以在打设过程中减小土体的扰动，见图6。

三维数值分析中，涂抹区土体和非干扰区土体在有限元网格中分别表示，在二维分析中，通过调整塑料排水板的等效距离 B 来考虑涂抹区的不利影响，不专门在二维网格中体现涂抹区。

为了将三维有限元分析转换为二维分析，Hird提出需要考虑塑料排水板的间距和涂抹区的影响，

等效转换关系见式(2)^[10]。

$$\frac{B}{R} = \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \left[\ln\left(\frac{n}{s}\right) + \frac{k}{k_s} \ln(s) - \frac{3}{4} \right]} \quad (2)$$

其中：

$$n = \frac{R}{r_w}$$

$$s = \frac{r_s}{r_w}$$

$$r_w = \frac{a+b}{2}$$

B 为换算成二维分析后的有效排水距离(排水板间距的一半); R 为塑料排水板的加固土体的有效排水半径,正方形布置时取1.13倍间距,三角形布置时取1.05倍间距; r_w 为塑料排水板的等效直径; r_s 为塑料排水板周围的涂抹区的等效直径; k 为非扰动区土体的渗透系数; k_s 为涂抹区土体的渗透系数。

通过式(2)可以发现,涂抹区的取值直接影响了塑料排水板等效间距,根据参考文献^[7]对路堤固结实测沉降量的反分析拟合出曼谷软黏土涂抹区取值, $k/k_s=2.0$, $d_s/d_w=1.5$,代入式(2)计算可得,二维分析中的塑料排水板间距 $2B=1.970$ m。

整个地基划分为4层,各土层的名称及深度范围见表3^[5]。

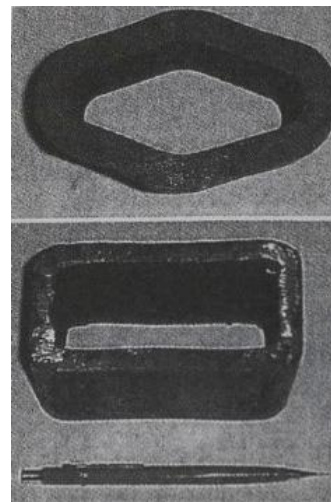


图6 塑料排水板打设套管截面^[9]

Fig. 6 Cross section of mandrel for PVD installation

表3 土层划分

Tab. 3 Soil classification

土层划分	深度/m
硬壳层黏土	0.0~2.0
极软黏土	2.0~9.0
软黏土	9.0~12.0
可塑黏土	10.0~16.0

根据上述输入条件,划分的有限元二维网格见图 7。

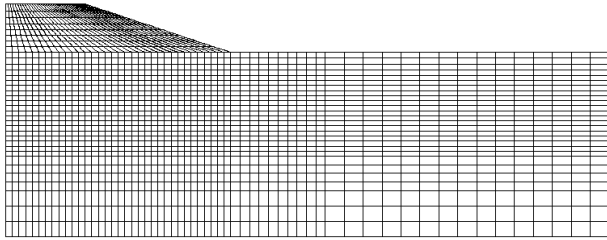


图 7 路堤修筑的有限元模型网格

Fig. 7 Finite element mesh for embankment construction simulation

(2) 初始应力条件

地下水位设置为地表下 2.0 m, 4 个土层的孔隙比和密度见表 4。

表 4 初始应力表

Tab. 4 Initial stress conditions

土层	初始孔隙比 e_0^*	密度 $\rho/(g/cm^3)$
硬壳层黏土	1.350	1.85
极软黏土	2.389	1.43
软黏土	1.800	1.50
可塑黏土	1.460	1.57

*注: 在非线性本构模型中上述土层的初始孔隙比会被重置。

(3) 边界条件

二维分析模型的位移边界条件见图 8。

孔隙水压力边界划分为透水面和不透水面, 塑料排水板、水平排水砂垫层和外侧地表都设置为透水面, 即在固结过程中孔隙水压力保持不变。

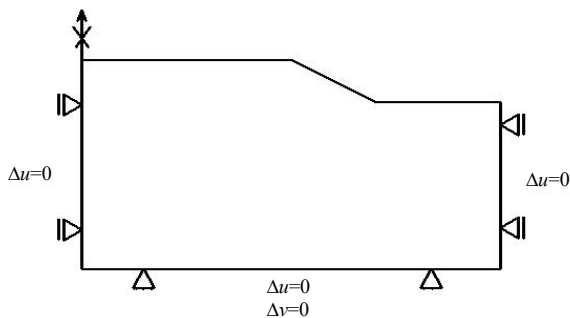


图 8 位移边界条件

Fig. 8 Prescribed displacement boundary condition for embankment

(4) 本构模型

采用 8 节点等参元, 每个单元 4 个积分点。地基土层采用修正剑桥模型 (MCC), 堆载填土层采

用摩尔库仑模型 (M-C)。相关本构模型的输入参数见表 5~表 6。图 3 中的超固结比 OCR 沿深度的变化也作为修正剑桥模型的输入参数。

表 5 修正剑桥模型输入参数^[11]

Tab. 5 Input parameters for MCC model

土层	λ	k	N	M	μ
硬壳层黏土	0.357	0.036	3.11	0.9	0.3
极软黏土	0.693	0.087	6.31	0.8	$G/p_0'=16.0$
软土	0.486	0.049	4.76	1.1	0.3
可塑黏土	0.321	0.032	3.86	1.1	0.3

表 6 摩尔库仑模型输入参数^[11]

Tab. 6 Input parameters for M-C model

土层	$c/(kPa)$	$\varphi/^\circ$	$\psi/^\circ$
堆载填土层	0.0	38.0	19.0

(5) 渗透系数 k

各层的渗透系数见表 7^[11]。

表 7 土层渗透系数^[11]

Tab. 7 Permeability coefficient

土层	渗透系数/(m/s)
硬壳层黏土	8.125×10^{-9}
极软黏土	$k=e^{-26.62+3.32e}$
软土	9.745×10^{-9}
可塑黏土	9.745×10^{-9}

为了更好地模拟固结过程中孔隙比减小对渗透系数的影响, 对固结过程中压缩量大的曼谷极软黏土层采用了变化的渗透系数模型, 能够更好地表征软土在固结过程中渗透系数的变化对于固结速率的影响^[10]。

2.3 数值模拟结果与监测结果对比分析

(1) 路堤中心处沉降量比较

TS3 路堤中心处的地表沉降量实测值和模拟值比较见图 9。

从图 9 可以发现, 沉降量模拟结果能够较准确的模拟填筑期沉降量快速增大的趋势, 但由于观测期较短 (约 420 d), 实测值未能达到沉降的平缓阶段, 所以无法对比最终沉降量。但从实测沉降量发展趋势上看, 实测值要大于模拟值, 这可能是由于软土的次固结沉降或者不排水条件下侧向位移蠕变引起的沉降量。

(2) 坡脚水平位移比较

由于参考文献^[5]没有提供 TS3 号路堤的坡脚水平位移, 只有 TS1 号路堤的坡脚水平位移实测数值。TS1 路堤的地质条件与填筑过程与 TS3 基本相

同，只是塑料排水板与 TS3 稍有不同。TS1 的塑料排水板正方形布置，间距 1.5 m，比 TS3 的间距大。由于两者的固结速率稍有不同，所以实测值和模拟值的比较只能是示意性的，见图 10。

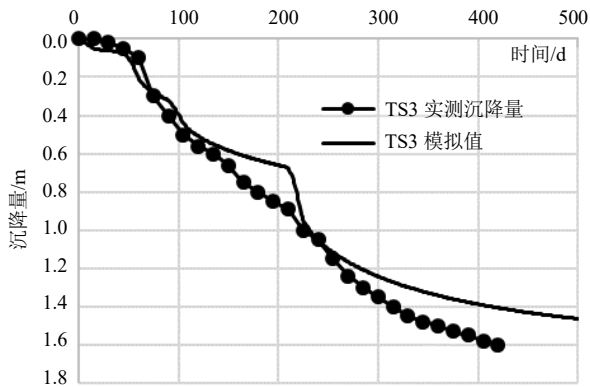


图 9 路堤中心处沉降量比较

Fig. 9 Comparison of settlement between measured and simulated results

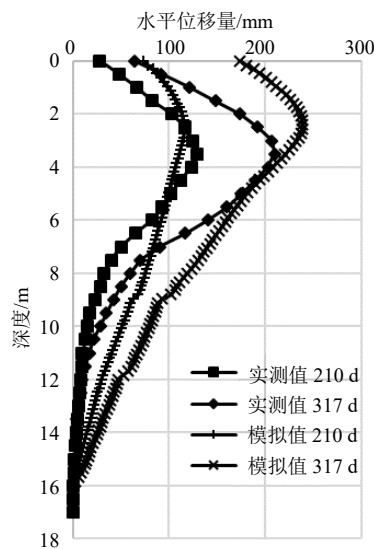


图 10 坡脚处水平位移沿深度分布比较

Fig. 10 Comparison of horizontal displacement with depth

从图 10 可以发现，填筑开始后第 210d 和 317d 的坡脚处水平位移沿深度的分布，两者的形态比较吻合，9 m 以下的黏土土层的水平位移量很小，极软黏土层的水平位移量增长明显加快，表面硬壳层对水平向位移有限制作用，在硬壳层里水平位移量逐渐减小，地表的水平位移量要小于极软黏土层的水平位移。

地表硬壳层的水平位移模拟值大于实测值，两者最大水平位移的差值不大，210 d 的最大水平位移量约为 120~130 mm，317 d 的最大水平位移量约 210~240 mm。实测值的最大水平位移点的对应深度比模拟值大约深 1.0 m。

(3) 不排水抗剪强度比较

随着固结排水的进行，土体被压缩，孔隙比减小，因此不排水抗剪强度会增大，见图 11。

根据现场实测值，曼谷极软土层的十字板剪切强度由加固前的 10~20 kPa 增长到加固后的 20~35 kPa，在极软曼谷软土层中加固后的十字板剪切强度模拟值稍小于实测值，其他 3 个土层中吻合较好。

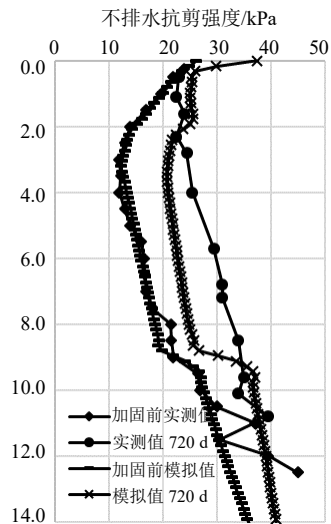


图 11 十字板剪切强度沿深度分布比较

Fig. 11 Comparison of vane shear strength with depth

3 结论与建议

(1) 表面硬壳层的成因主要包括地下水位变动和日晒风化等因素，表面硬壳层属于超固结土，超固结比约 2.0~6.0，具有较高的抗剪强度和抗变形能力，有利于提高路堤修筑的稳定性。

(2) 采用修正剑桥模型的不排水抗剪强度的公式，根据十字板剪切试验结果分析地表硬壳层的超固结比，将十字板剪切试验结果引入到路堤填筑的有效应力分析中，岩土数值模拟分析的结论更为准确。

(3) 采用等效关系将三维有限元分析转换为二维有限元分析，并考虑塑料排水板涂抹区对于固结排水的重要影响。路堤的沉降量、水平位移、加固后十字板剪切强度模拟结果与实测值比较吻合。表面硬壳层能够减小坡脚处水平位移。

参考文献

[1] 王晓谋, 尉学勇, 魏进, 等. 硬壳层软土地基竖向附加应力扩散的数值分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版,

- 2007, 27(3): 37-41.
- WANG Xiao-mou, WEI Xue-yong, WEI Jin, et al. Numerical analysis of vertical additional stress spreading on soft clay foundation with dry crust[J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2007, 27(3): 37-41.
- [2] 梁永辉. 上覆硬壳层软土地基的工程特性试验研究及数值分析[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- LIANG Yong-hui. Model tests and numerical study for engineering properties of soft subsoil with upper crust[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [3] 徐永福, 陈冠军. 高速公路路基软土的特性及其处理方法比较[J]. *山西交通科技*, 1998(4):23-28.
- XU Yong-fu, CHEN Guan-jun. Comparison between the characteristics and treatment means of freeway subgrade soft soil[J]. *Shanxi Traffic Science & Technology*, 1998(4): 23-28.
- [4] ABUEL-NAGAH, BERGADO D T, RAMANA G V, et al. Experimental evaluation of engineering behavior of soft Bangkok clay under elevated temperature[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering*, 2006, 132(7): 902-910.
- [5] BERGADO D T, BALASUBRAMANIAM A S, FANNIN R J, et al. Prefabricated vertical drains (PVDs) in soft Bangkok clay: a case study of the new Bangkok international airport project[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39(2), 304-315.
- [6] POTTS D M, ZDTAVKOVIC L. Finite element analysis in geotechnical engineering[M]. London: Thomas Telford, 1999.
- [7] LAM L G, BERGADO D T, HINO T. PVD improvement of soft Bangkok clay with and without vacuum preloading using analytical and numerical analyses[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2015, 43(6): 547-557.
- [8] WELKER A L, HERDIN K M. Evaluation of four equivalent diameter formulations for prefabricated vertical drains using flow rates[J]. *Geosynthetics International*, 2003, 10(3): 103-109.
- [9] BO M W, CHU J, LOW B K, et al. Soil Improvement: prefabricated vertical Drain Technique[M]. Singapore: Thomson Learning, 2003.
- [10] HIRD C C. Finite element modelling of vertical drains beneath embankments on soft ground[M]. England: 1992.
- [11] CHEN F. Numerical analysis of thermo-consolidation problems[D]. London: Imperial College London, 2017.