

# 基于修正剑桥模型的真空预压表面硬壳层 不排水抗剪强度分析

陈富<sup>1,2</sup>, 李宁<sup>2</sup>

(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:** 真空预压是一种广泛应用的深厚软土地基处理方法, 表面硬壳层对于真空预压的沉降量和地基稳定性有着重要影响。本文基于修正剑桥本构模型分析表面硬壳层抗剪强度较高的原因。表面硬壳层的成因主要包括真空预压加固前天然形成和真空预压固结过程中形成。天然形成的表面硬壳层主要是由于地下水位降低和水分蒸发等因素使表层土体处于超固结状态, 通过调整超固结比 OCR 沿深度的变化能够很好拟合十字板不排水剪切强度曲线, 从而将不排水抗剪强度引入到岩土工程有效应力分析中。真空预压过程中形成的表面硬壳层是由于竖向排水距离和塑料排水板弯折等因素导致在相同时间内深层土层的固结度小于表层土层。随着真空预压固结时间的增加, 深层土层固结度逐渐增大, 抗剪强度随之增长, 真空预压的表面硬壳层现象变得不明显。

**关键词:** 真空预压; 修正剑桥本构模型; 表面硬壳层; 固结度; 超固结

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)04-0271-06

## Analysis of the undrained shear strength of hard crust in vacuum preloading based on Modified Cam Clay (MCC) constitutive model

CHEN Fu<sup>1,2</sup>, LI Ning<sup>2</sup>

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

**Abstract:** Vacuum preloading is a widely used technology for deep soft soil foundation treatment. The hard crust has an important impact on the settlement and foundation stability of vacuum preloading. Based on Modified Cam Clay (MCC) constitutive model, the reason of higher shear strength of hard crust is analyzed. The hard crust is formed by two ways, which includes the naturally weathering before vacuum preloading, and consolidation in the process of vacuum preloading. The naturally formed hard crust is mainly due to the reduction of groundwater level and water evaporation, which makes the surface soil in an over consolidated state. By adjusting the change of over consolidation ratio (OCR) along the depth, the undrained shear strength profile of vane is well fitted, so that the undrained shear strength is introduced into the effective stress analysis of geotechnical engineering. The hard crust which is formed in the process of vacuum preloading is due to the consolidation degree of deep soil layer which is less than that of surface soil layer because of the factors such as vertical drainage distance and bending of plastic drainage plate. With the increase of consolidation time of vacuum preloading, the consolidation degree of deep soil layer gradually increases, the shear strength increases accordingly, and the hard crust phenomenon of vacuum preloading becomes unobvious.

**Key words:** vacuum preloading; Modified CamClay (MCC) constitutive model; hard crust; consolidation degree; overconsolidation

## 0 引言

真空预压是一种广泛应用的软土地基处理方法, 尤其在处理深厚软黏土方面有着独特的优势。

真空预压法最早由瑞典皇家地质学院的 W·Kjellman 提出, 自 1980 年开始, 交通部一航局科研所开展了大面积的现场试验, 与天津大学联合进行了室内试验及理论研究, 并且研究出了合适的

抽真空装置和真空预压密封膜等关键工艺,获得了国家发明专利<sup>[1]</sup>,此后真空预压在港口、铁路、公路等建设中得到了广泛的推广应用,取得了巨大的经济效益和社会效益。

在软土地区由于自然因素形成一定厚度的表面硬壳层,虽然表面硬壳层的厚度不大,但可以明显减小地基沉降并提高路基稳定性,因此在数值计算中应该充分考虑表面硬壳层的影响,并在实际工程中充分利用该表面硬壳层以节省工程造价<sup>[2]</sup>。针对新近吹填的软土处理尚未形成表面硬壳层的难题,孙立强、闫澍旺等<sup>[3]</sup>研究了二次插板真空预压技术,采用浅层真空预压提高表层新近吹填土的抗剪强度,在新近吹填土地基处理中取得了良好效果。

本文基于修正剑桥模型对于表面硬壳层的抗剪强度进行了分析,并结合实际工程案例对真空预压加固前天然形成的硬壳层和真空预压过程中形成的硬壳层的抗剪强度进行计算,供相关设计和施工人员参考。

## 1 基于修正剑桥本构模型的不排水抗剪强度计算

十字板剪切试验是一种广泛应用于软黏土不排水抗剪强度的原位测试方法,具有对软土扰动小、测试结果准确的特点。十字板剪切试验的不排水抗剪强度在地基稳定性验算等总应力分析中可以直接使用,但在软土的地基固结沉降或基坑支护等有效应力分析中不能直接使用,给岩土精确计算带来了困难。

修正剑桥本构模型 (Modified Cam Clay constitutive model) 能够较好模拟软土的强度和变形特性,广泛地应用于软土岩土工程有效应力分析。该模型包括 5 个输入参数,分别为 3 个压缩试验参数 ( $v_1, \kappa, \lambda$ )、抗剪强度参数 ( $\phi'_{cs}$ ) 和弹性模量 ( $G$ ) 等。

修正剑桥本构模型中并不直接包括不排水抗剪强度  $S_u$ , 可以通过引入应力状态参数 (OCR 和  $K_0$ ), 推导出软土不排水抗剪强度  $S_u$ <sup>[4]</sup>, 见式 (1)。

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

其中:

$$B = \frac{\sqrt{3}(1-K_0^{\text{NC}})}{g(-30^\circ)(1+2K_0^{\text{NC}})}$$

$$K_0^{\text{NC}} = 1 - \sin \phi'_{cs}$$

$$K_0^{\text{OC}} = K_0^{\text{NC}} \cdot \text{OCR}^{\phi'_{cs}}$$

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

式中: OCR 为超固结比;  $K_0^{\text{NC}}$  为正常固结状态下的水平侧向压力系数;  $K_0^{\text{OC}}$  为超固结状态的水平侧向压力系数;  $\phi'_{cs}$  为内摩擦角;  $\sigma'_{vi}$  为竖向有效应力;  $\kappa$  为膨胀曲线  $e-\ln(p')$  的斜率;  $\lambda$  为压缩曲线  $e-\ln(p')$  的斜率;  $\theta$  为洛德 (Lode) 角, 取为  $-30^\circ$ 。

通过室内三轴试验和固结试验获得内摩擦角  $\phi'_{cs}$  和压缩曲线  $e-\ln(p')$  等, 然后通过不同深度处的超固结比 OCR、上覆有效竖向应力  $\sigma'_{vi}$  等参数, 可以对现场实测的十字板不排水剪切强度  $S_u$  进行拟合。

## 2 天然形成的表面硬壳层

在软土地区会天然形成表面硬壳层, 以河北省黄骅港散杂货码头堆场地基处理工程为例, 人工吹填后经 2~3 年晾晒后形成的表面硬壳层见图 1。由于日晒和水位变化, 软土表面的硬壳层出现较多干缩裂缝, 裂缝深度约 10~20 cm。

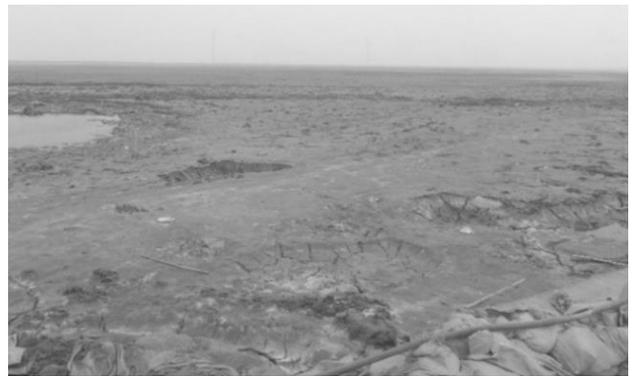


图1 黄骅港吹填土地形成的表面硬壳层

Fig. 1 Hard crust layer at Huanghua Port

徐永福等<sup>[2]</sup>将软土天然形成的表面硬壳层成因归结为应力因素和非应力因素两大类, 见图 2。

国内学者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对软土表面的天然硬壳层的应力状态进行了研究<sup>[5-6]</sup>, 表明由于地下水位降低和表面水分蒸发干缩固结等应力因素引起表面硬壳层处于超固结状态。沪宁高速公路路基软土表层土的超固结比高达

7.0<sup>[2]</sup>。沪宁高速昆山软黏土试验段地表硬壳层的平均超固结比高达 6.8, 而且发现表层软土的 OCR 值易受到土层结构性影响<sup>[7]</sup>。

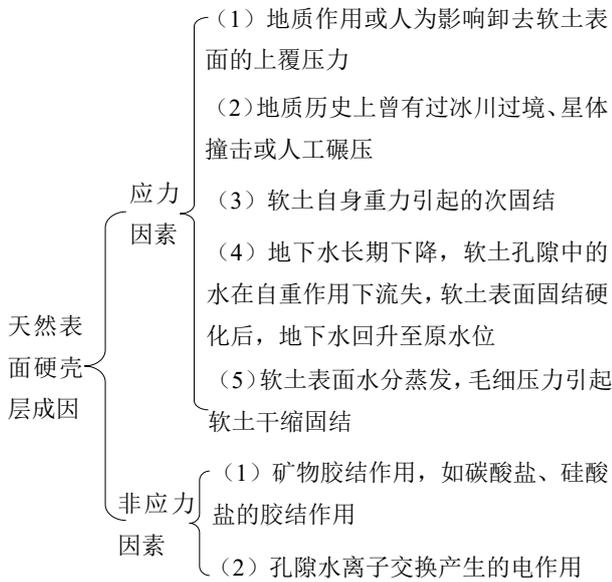


图 2 软土表面硬壳层的成因分类<sup>[2]</sup>

Fig. 2 Cause of formation of hard crust layer<sup>[2]</sup>

软土表面硬壳层的抗剪强度明显高于下卧原状软土层。曼谷新国际机场工程的十字板抗剪强度沿深度分布见图 3<sup>[8]</sup>。该场地的地下水位埋深大约为 2 m, 地下水位以上的深度范围内十字板不排水剪切强度约 20 ka, 其下的超软黏土层的抗剪强度只有 10 kPa 左右, 并随深度增加而逐渐增大。

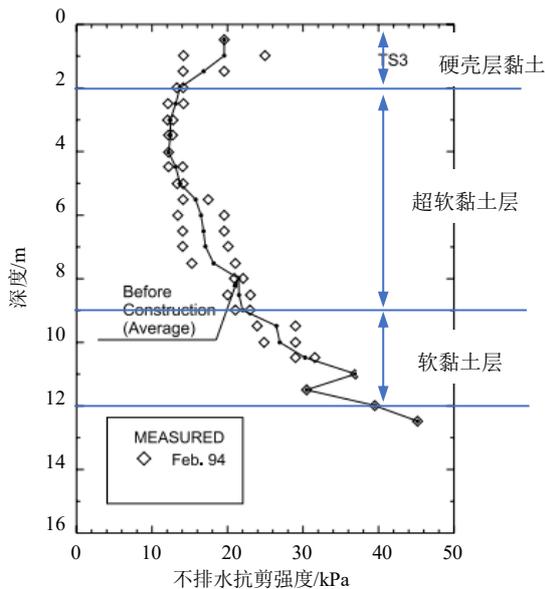


图 3 曼谷新国际机场的十字板不排水剪切强度<sup>[8]</sup>

Fig. 3 Undrained shear strength profile of vane of Suvarnabhumi Airport Project<sup>[8]</sup>

根据修正剑桥本构模型推导的不排水抗剪强度计算公式 (1), 通过不断调整不同深度的超固结

比 OCR 取值拟合出的十字板剪切试验的不排水抗剪强度沿深度的变化。其中, 曼谷新机场的相关土层划分和相应的修正剑桥模型输入参数见表 1<sup>[9]</sup>。拟合得到的超固结比 OCR 数值沿深度变化见表 2。十字板剪切试验沿深度的拟合值和实测值对比见图 4。

表 1 曼谷新机场的土层分布及其修正剑桥模型输入参数<sup>[9]</sup>

Table 1 Soil layer distribution of Suvarnabhumi Airport Project and input value for its MCC model<sup>[9]</sup>

土层名称	深度范围/ m	总重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi'_{cs}$ / (°)	$\kappa$	$\lambda$
硬壳层黏土	0~2.0	18.5	23.0	0.036	0.357
超软黏土	2.0~9.0	14.3	20.7	0.087	0.693
软黏土	9.0~12.0	15.0	27.7	0.049	0.486

表 2 曼谷新机场的超固结比沿深度变化

Table 2 OCR of Suvarnabhumi Airport Project varies along the depth

深度/m	OCR	深度/m	OCR
0.0	6.60	1.6	2.30
0.1	6.10	2.0	1.90
0.2	5.60	2.2	1.80
0.4	4.80	3.0	1.45
0.8	3.70	9.0	1.40
1.2	2.90	12.5	1.40

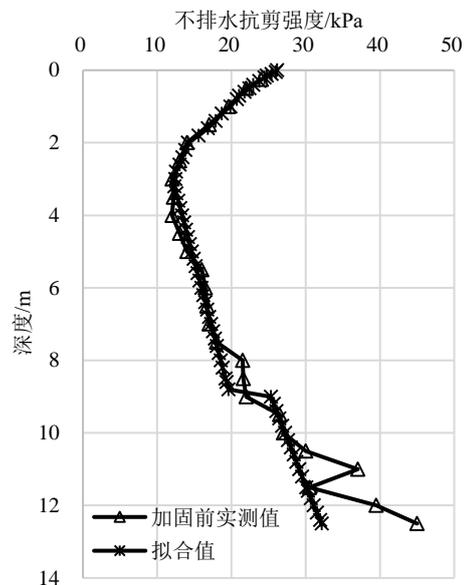


图 4 十字板剪切试验实测值和拟合值

Fig. 4 Comparison between measured and fitted values of vane shear test

由表 2 和图 4 可以发现, 拟合值和实测值比较接近, 超固结比 OCR 数值随深度增加而不断减小,

表面 2 m 范围硬壳层的 OCR 数值为 1.9~6.6, 为超固结土, 其下的超软黏土层的 OCR 为 1.4~1.8, 为正常固结土-轻微超固结土。通过拟合方法得到的曼谷新机场硬壳层的超固结比 OCR 最大值与沪宁高速公路硬壳层的 6.8~7.0 比较接近<sup>[2,7]</sup>。

利用上述超固结比 OCR 拟合方法将十字板抗剪强度引入到路堤填筑的数值模拟中, 提供较为准确的现场土层的有效应力状态及应力历史, 从而提高路堤填筑数值模拟的沉降、水平位移、孔隙水压力和地基稳定系数的准确性。

### 3 真空预压过程中的表面硬壳层

新近吹填土由于自身含水率高、孔隙比大, 所以真空预压过程中发生很大的压缩变形, 从而引起塑料排水板弯折造成排水效率降低。大量的工程案例表明对于新近吹填土一次真空预压很难达到预期的加固效果, 尤其是深层土层的强度增长较小。孙立强等<sup>[3]</sup>研究了新近吹填土的二次插板真空预压工艺, 每次插板加固后的十字板抗剪强度沿深度的变化见图 5。

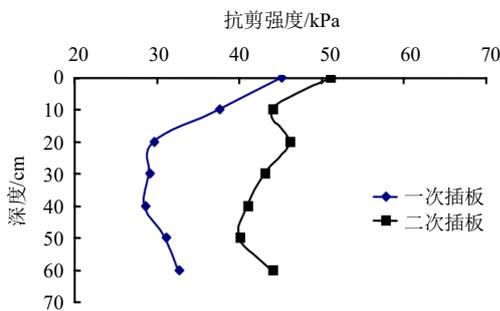


图 5 距板 15 cm 处两次插板十字板强度剪切随深度变化<sup>[3]</sup>  
Fig. 5 Undrained shear strength of the vane inserted twice at a distance of 15 cm from the plate changes with depth<sup>[3]</sup>

该试验采用的是重塑软黏土, 因此在加固前不存在表面硬壳层。根据图 5 的试验结果, 一次插板加固后的表层土体抗剪强度明显大于深层土体, 形成明显的“表面硬壳层”。二次插板真空预压过程中深层土体的抗剪强度增长幅度大于表层土体, 二次插板后的表面土层与深层土体的抗剪强度对比将不如一次插板加固后明显, 即表面硬壳层现象变得不明显。

陈环<sup>[10]</sup>指出真空预压是保持土体中初始条件与预压前相同, 用降低边界孔隙水压力形成水力梯度和渗流, 真空预压的固结过程就是孔隙水压力不断降低而有效应力不断增加的过程, 随着固结度的增大, 有效应力逐渐增大, 因而土层的不排水抗剪

强度提高。陈环<sup>[10]</sup>在大模型槽真空预压试验中发现经 10 d 抽气后表层有 10 cm 厚的硬壳层, 同时现场试验中由于抽气时间更长, 真空预压结束后发现 30 cm 厚的硬壳层, 推测硬壳层的形成可能有汽化因素的贡献。吴跃东等<sup>[11]</sup>从非饱和土的角度分析真空预压中表面硬壳层的成因, 认为真空预压过程中较高的孔隙负水压力加快了土体中孔隙水的蒸发, 增加了基质吸力, 使处理区上部土体形成约 1.5~2.0 m 厚度的硬壳层。

笔者认为真空预压过程中的表面硬壳层可能是由于汽化和固结度不同两方面因素导致的。由于汽化因素机理较为复杂, 难以进行定量研究, 也超出了软土固结的研究范畴, 因此本文主要从表层和深层固结度角度分析表面硬壳层的成因。

对于表层土体, 由于距离地表的中粗砂排水垫层较近, 在真空预压中可以发生双向固结, 即向塑料排水板的径向固结和向表层水平砂垫层的竖向固结。深处土体距离地表的中粗砂排水垫层较远, 只能发生向塑料排水板的径向固结, 因此相同固结时间的固结度小于表层土体。同时真空预压过程中塑料排水板弯折现象减弱了塑料排水板内真空度传递和纵向通水量, 更加不利于深处土体的排水固结。

由于表层土体的固结度较大, 因此其抗剪强度增长幅度要大于深层土体, 形成了“表面硬壳层”现象。二次插板真空预压中塑料排水板产生较少的弯折, 有利于深层土体的超静孔隙水压力通过塑料排水板消散, 因此在一次插板加固中固结度较小的深处土体可以更容易完成排水固结, 不排水抗剪强度增长较大。

土体中某位置点的超静孔隙水压力可以由竖向超静孔隙水压力和径向超静孔隙水压力来表达<sup>[12]</sup>, 即:

$$U=1-\frac{u_{rv}}{u_0}=1-\frac{u_r}{u_0} \cdot \frac{u_v}{u_0} \quad (2)$$

其中:

$$u_v=\frac{4}{\pi} u_0 \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{1}{2n+1} \sin \left[ \frac{(2n+1)\pi z}{2H} \right] e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 T_v}{4}} \right)$$

$$u_r=\frac{4u_0 e^{-\lambda}}{d_c^2 F(n)} \left[ r_c^2 \ln \frac{r}{r_w} - \frac{r^2 - r_w^2}{2} \right]$$

$$T_v=C_v t/H^2$$

$$\lambda=\frac{8}{F(n)} T_r$$

$$T_r=C_r t/d_c^2$$

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$$

$$n = \frac{d_e}{d_w}$$

式中： $U$  为土体内某位置的单点固结度； $u_0$  为加荷开始时的超静孔隙水压力； $u_v$  为某时刻的竖向超静孔隙水压力； $u_r$  为某时刻的径向超静孔隙水压力； $T_v$  为竖向时间因素； $C_v$  为竖向固结系数； $T_r$  为径向时间因素； $C_r$  为径向固结系数； $t$  为固结时间； $H$  为土层的排水距离； $d_w$  为竖向排水通道的等效直径； $d_e$  为竖向排水通道的等效间距。

为更好地比较真空预压固结过程中的表层和深层土层的固结度及其不排水抗剪强度随时间的变化，选取上文中的曼谷软黏土作为算例，分别选取深度  $z=0.2、1.0、5.0、10.0$  m 的 4 个不同深度的位置点进行计算。土体可以同时发生径向固结和竖向固结，为了计算方便不考虑涂抹区和井阻的影响，塑料排水板参数及土层固结系数见表 3。

表 3 曼谷软黏土算例的输入参数  
Table 3 Input value of Bangkok soft soil

参数	输入值
排水板宽度/mm	100
排水板厚度/mm	3
排水板等效直径/mm	51.5
插板间距/mm	1 000
插板等效直径/mm	1 130
水平固结系数/(cm <sup>2</sup> /s)	1.8×10 <sup>-3</sup>
竖向固结系数/(cm <sup>2</sup> /s)	1.8×10 <sup>-3</sup>

根据表 3 中的参数，通过式 (2) 计算不同时刻的浅层和深层的土层平均固结度随时间的变化曲线，见图 6。

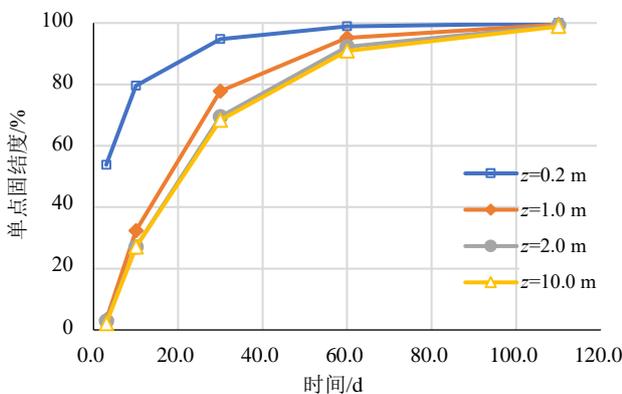


图 6 表层和深层土层的固结度随时间的变化曲线对比  
Fig. 6 Comparison of consolidation degree with time between surface and deep soil layers

由图 6 可以发现，浅层土层由于距离表面排水砂垫层距离较近，因此可以发生向水平砂垫层的竖向固结和向塑料排水板的径向（水平）固结，固结度增长较快，大约用 20 d 可以基本完成固结（以固结度 90% 为标准），而同一时刻深层土层的固结度仅有 50%。随着固结时间的增长，深层土体可以缓慢地完成固结，大约需要 60 d 基本完成固结。如果考虑固结沉降过程中塑料排水板弯折造成纵向通水量减小等因素，深层土层的固结速率会更慢。

完成上述单点固结度的计算后，可以得出该点的有效应力  $\sigma'_{vi}$  的增加值，再根据不排水抗剪强度公式 (1) 计算不同时刻的浅层和深层土体的抗剪强度，以表 1 中第二土层的曼谷超软黏土为例，假设真空预压的负压为 80 kPa，土的有效重度为 10 kN/m<sup>3</sup>，由于在真空预压中软黏土处于正常固结状态，因此 OCR 取值为 1.0。分别计算真空预压前、真空预压 3、10、30、60、110 d（完成固结）对应的 0~10.0 m 深度范围内的不排水抗剪强度，见图 7。

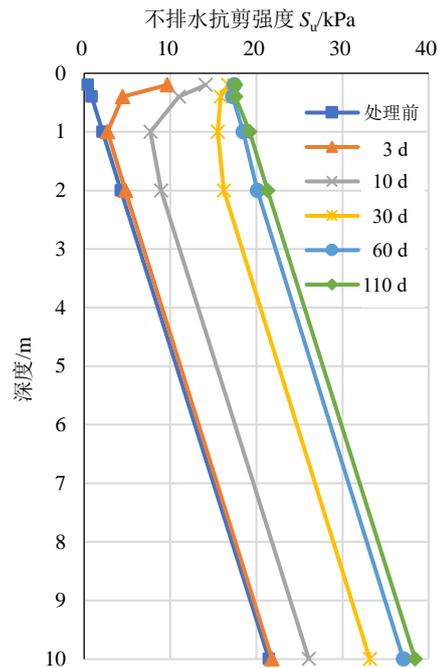


图 7 不同时刻的浅层和深层土不排水抗剪强度变化  
Fig. 7 Variation of undrained shear strength of shallow and deep soil at different consolidation times

由图 7 可以发现，0~10 d 时间段内浅层土体的固结度快速增长，不排水抗剪强度大于深层土层，形成厚度大约 1.0 m 厚的表面硬壳层。随着固结时间的增加，深层土层的固结逐渐完成，由于深层自重竖向有效应力较大，因此深层土层的不排水抗剪强度大于表层土层，表面硬壳层现象变得不明显。这与图 5 中新近吹填土真空预压过程中的一次

插板和二次插板后的不排水抗剪强度变化趋势相一致。

## 4 结 论

(1) 真空预压加固后出现的表面硬壳层现象可能是加固前天然的超固结状态和真空预压过程中表层固结度大等因素共同作用引起的。

(2) 通过修正剑桥本构模型可以对现场实测的十字板不排水剪切强度  $S_u$  进行拟合, 实现将十字板剪切试验结果引入到有效应力分析中, 提高软土工程数值分析的准确性。

(3) 真空预压加固前的表面硬壳层的成因主要是地下水位变动和水分蒸发等因素使表面土层处于超固结状态, 超固结比大约为 1.9~6.6。

(4) 真空预压过程中的表面硬壳层现象的原因主要是由于表层的固结度大于深层, 也有表层汽化的贡献。由于竖向排水距离和塑料排水板弯折通水量下降等因素, 相同时刻的深层土层的固结度小于浅层土层, 造成浅层土层的抗剪强度高于深层土层。随着固结时间的延长, 深层土体逐渐完成固结, 表面硬壳层现象变得不明显。

## 参考文献

- [1] 叶柏荣. 真空预压加固软基研究报告[C]// 真空预压加固软土地基论文汇编. 天津, 1986: 1-21.  
YE Bo-rong. Research report on vacuum preloading for soft foundation reinforcement[C]// Compilation of Papers on Soft Soil Improvement by Vacuum Preloading. Tianjin, 1986: 1-21.
- [2] 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.
- [3] 孙立强, 闫澍旺, 李伟, 等. 超软土真空预压室内模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 984-990.  
SUN Li-qiang, YAN Shu-wang, LI Wei, et al. Study of super-soft soil vacuum preloading model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 984-990.
- [4] POTTS D M, ZDRAVKOVIC L. Finite element analysis in geotechnical engineering[M]: London: Thomas Telford, 1999.
- [5] 简文彬, 吴振祥, 童文德, 等. 静力触探判别软土固结历史[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2166-2168.  
JIAN Wen-bin, WU Zhen-xiang, TONG Wen-de, et al. Consolidation state of soft soil differentiated by static cone sounding[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2166-2168.
- [6] 周全能, 那同伶. 肖甬铁路宁波段淤泥质软土的工程地质特性探讨[J]. 路基工程, 1997(2): 30-33.  
ZHOU Quan-neng, NA Tong-ling. Investigate on the engineering characteristics of the soft soil in Xiao-Yong Railway Ningbo Section[J]. Subgrade Engineering, 1997(2): 30-33.
- [7] 张诚厚, 等. 高速公路软基处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [8] 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.
- [9] CHEN F. Numerical analysis of thermo-consolidation problems[D]. London: Imperial College London, 2017.
- [10] 陈环. 真空预压法机理研究十年[J]. 港口工程, 1991(4): 17-26.  
CHEN Huan. Reviews of mechanism of vacuum preloading method[J]. China Harbor Engineering, 1991(4): 17-26.
- [11] 吴跃东, 石晓燕, 刘坚, 等. 真空预压加固区硬壳层的水分运移解析解[J]. 岩土力学, 2013, 34(S2): 110-114.  
WU Yue-dong, SHI Xiao-yan, LIU Jian. Analytical solution of moisture migration in crust layer of vacuum preloading zone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S2): 110-114.
- [12] 高志义. 真空预压法的理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.