

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.146



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 上覆 CRSS 快速固化淤泥硬壳层厚度对淤泥地基承载特性的影响

王明明<sup>1</sup>, 方祥位<sup>1</sup>, 刘汉龙<sup>1</sup>, 王忍<sup>2</sup>, 申春妮<sup>3</sup>, 张熙晨<sup>1</sup>

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037;  
3. 重庆科技学院建筑工程学院, 重庆 401331)

**摘要:**复合型早强土壤固化剂(CRSS)具有快凝高强特性,利用自主研发的CRSS固化剂对表层淤泥快速固化并作为上覆硬壳层,通过模型试验研究不同上覆硬壳层厚度(3、6、9、12 cm)条件下硬壳层破坏形式、 $p-s$ 曲线特性、弯沉盆形状以及土压力分布规律,在现有弯沉盆变形理论基础上,结合试验结果,对弯沉盆变形形状函数进行修正。研究表明:随硬壳层厚度增大,硬壳层破坏形式由对折破坏过渡到冲切破坏;硬壳层厚度越大,扩散作用越明显,极限承载力越高,沉降相应增大;与荷载板中心点不同距离的沉降位移可用弯沉盆形状描述,提出了修正的对数弯沉盆假设变形计算公式,比线性弯沉盆假设变形计算公式更合理;土压力从中心向外呈下降趋势,沿深度方向逐渐减小;随硬壳层厚度增大,土压力分布更均匀。

**关键词:**淤泥地基;复合型早强土壤固化剂;快速固化;硬壳层;承载力;弯沉盆

**中图分类号:** TU472.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)02-0070-09

## Influence of the thickness of the overlying CRSS rapid solidifying sludge hard shell layer on the bearing characteristics of sludge foundations

WANG Mingming<sup>1</sup>, FANG Xiangwei<sup>1</sup>, LIU Hanlong<sup>1</sup>, WANG Ren<sup>2</sup>,  
SHEN Chunni<sup>3</sup>, ZHANG Xichen<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., Beijing 100037, P. R. China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, P. R. China)

**Abstract:** The composite early strength soil stabilizer (CRSS) has the characteristics of rapid setting and high strength. The independently developed CRSS stabilizer is used to rapidly solidify the surface sludge as the overlying hard shell layer. Through model tests, the failure mode of the hard shell layer,  $p-s$  curve characteristics, the shape of the deflection basin and the distribution law of soil pressure under different overlying hard shell layer thicknesses (3 cm, 6 cm, 9 cm and 12 cm) are studied. On the basis of the existing

**收稿日期:** 2022-10-17

**基金项目:** 科技创新项目(20-163-13-ZT-007-060-01)

**作者简介:** 王明明(1998-),男,主要从事淤泥固化研究, E-mail: 2446250985@qq.com。

方祥位(通信作者),男,博士,教授,博士生导师, E-mail: fangxiangwei1975@163.com。

**Received:** 2022-10-17

**Foundation item:** Science and Technology Innovation Project (No. 20-163-13-ZT-007-060-01)

**Author brief:** WANG Mingming (1998-), main research interest: sludge solidification, E-mail: 2446250985@qq.com.

FANG Xiangwei (corresponding author), PhD, professor, doctoral supervisor, E-mail: fangxiangwei1975@163.com.

deformation theory of the deflection basin, combined with the test results, deformation shape function of the deflection basin is modified. The results show that with increase of the thickness of the hard shell, the failure mode of the hard shell transits from folding failure to punching failure; The greater the thickness of the hard shell, the more obvious the diffusion effect, and the higher the ultimate bearing capacity, as well as the corresponding increase in settlement; the settlement displacement at different distances from the central point of the load plate can be described by the shape of the deflection basin. A modified formula for calculating the assumed deformation of the logarithmic deflection basin is proposed, which is more reasonable than the formula for calculating the assumed deformation of the linear deflection basin; the earth pressure decreases from the center outwards and gradually decreases along the depth direction; the distribution of earth pressure becomes more uniform with increase of the thickness of the hard shell.

**Keywords:** sludge foundations; composite early strength soil stabilizer (CRSS); rapid solidifying; hard shell layer; bearing capacity; deflection basin

中国幅员辽阔,海岸线长,内陆河流交错复杂,清淤与水环境治理工程产生大量疏浚淤泥,随着海洋强国战略的提出,填海造陆等工程项目对淤泥的处理需求也日益增加。淤泥具有三高两低(即高含水率、高孔隙比、高压缩性,低强度和低渗透性)的特点,难以被工程直接利用;经过改性或固化用于土木建筑领域一直是备受关注的热点问题<sup>[1]</sup>。

淤泥改性固化方法有很多,其中通过掺入水泥和工业废料等固化材料实现土体加固的化学加固法应用广泛,取得了诸多成果。Kim等<sup>[2]</sup>用转炉炉渣固化淤泥,对固化后的淤泥进行了XRD、SEM和EDS等分析,揭示了固化机理。王东星等<sup>[3]</sup>将氯氧镁水泥引入淤泥固化中,取得了良好的效果。Ma等<sup>[4]</sup>研究了不同氯氧镁水泥掺量对淤泥固化的影响,得出MgO/MgCl<sub>2</sub>的最佳比例为3:1,氯氧镁水泥固化淤泥的最低掺量为3:100。

淤泥表层通过化学加固后(相当于淤泥上覆硬壳层)可有效提高淤泥地基的承载力,目前主要通过模型试验研究上覆硬壳层淤泥地基的承载特性。已有研究表明硬壳层厚度、荷载板大小(尺寸)和硬壳层强度等对上覆硬壳层淤泥地基承载变形特性有重要影响<sup>[5-8]</sup>。刘青松等<sup>[9]</sup>通过模型试验研究了堆场淤泥制作人工硬壳层(MMC)的强度和厚度等因素对人工硬壳层双层地基极限承载力的影响规律。闫澍旺等<sup>[10]</sup>研究了硬壳层在吹填土真空预压中的应用。廖声浩<sup>[11]</sup>对滨海相软土地基人造硬壳层建造及其特性进行了研究,揭示了硬壳层厚度和宽厚比等对承载力的影响规律,分析了淤泥上覆硬壳层加载过程中的3个状态。

化学固化法加固淤泥和上覆硬壳层淤泥地基承载特性研究方面已取得丰硕成果。但存在两方面问题,一是固化材料多以硅酸盐水泥为基础胶凝材料,其固化效果可以满足一般工程需要,但是固

化周期较长,早期强度不高,在抢险救灾、应急道路抢通等需要对淤泥快速固化的紧急情况下难以发挥作用。二是在上覆硬壳层淤泥地基承载特性模型试验中,一般仅在荷载板中心点埋设土压力传感器与位移传感器等,较少监测与荷载板中心不同距离和深度的土压力和位移等,不能深入分析硬壳层扩散作用以及淤泥地基受力变形情况。

笔者自主研发了具有快硬高强特性的复合型早强土壤固化剂(CRSS)<sup>[12]</sup>,并对CRSS快速固化淤泥的力学特性和耐久性等进行了初步研究<sup>[13-14]</sup>;但对CRSS快速固化淤泥硬壳层的承载特性研究尚未开展。利用CRSS对表层淤泥进行快速固化并作为上覆硬壳层,通过模型试验研究上覆硬壳层厚度对淤泥地基承载特性的影响,深入分析硬壳层的扩散作用等,为CRSS的工程应用提供理论基础。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用淤泥取自福建省福州市长乐区首占镇福平铁路长乐站工地,天然孔隙比为1.524,天然含水率约为59.2%,土粒比重为2.625,塑限为23.6%,液限为42.8%,塑性指数为19.2,属于黏土。主要化学元素为Si、Al、Fe,主要矿物为石英(二氧化硅),黏土矿物则以高岭石为主<sup>[13-14]</sup>。淤泥相关物理特性参数如表1所示。

表1 淤泥物理特性参数  
Table 1 physical characteristics of sludge

天然孔隙比	天然含水率/%	塑限/%	液限%	塑性指数
1.524	59.2	23.6	42.8	19.2

试验所用固化剂为自主研制的CRSS<sup>[12]</sup>,其主要成分为硫铝酸盐水泥(CSA)、早强组分、膨胀组分及减薄双电层组分等。该固化剂具有快凝、快

硬、高强特点,可用于抢险救灾、应急道路抢通等紧急情况下对淤泥等土体快速固化。

## 1.2 试验模型装置

为使试验顺利进行,设计加工了特定的模型箱,如图 1 所示。模型箱主要由主体结构、加载结构和硬壳层制作结构 3 部分组成,可较好地解决固化淤泥硬壳层制作、脱模和加载等问题。

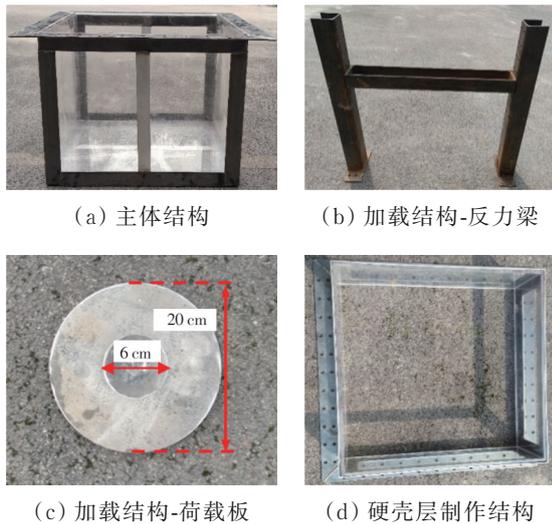


图 1 模型试验装置

Fig. 1 Model experimental device

主体结构(图 1(a))为 600 mm×600 mm×500 mm (长×宽×高)的亚克力箱体,外部加有角钢防止加载变形。

加载结构(图 1(b)、(c))主要由反力梁和荷载板组成。反力梁由横梁、竖梁和附属部件组成。荷载板由两块厚 1 cm 的圆形钢板和高 15 cm、直径 3 cm 的钢圆柱焊接而成,其中一面圆形钢板直径 6 cm,与硬壳层接触(此圆形钢板相当于真实的荷载板);另一面圆形钢板直径 20 cm,用于放置千斤顶。中间焊接的钢圆柱可以在加载变形前后保持荷载板与硬壳层的接触面积不变,确保试验的准确性。

硬壳层制作结构(图 1(d))为内径为 59.5 cm×59.5 cm×20 cm(长×宽×高)的亚克力箱体,外部有一层钢框架,底部为单独的钢板,栓接可拆卸,有利于硬壳层脱模。

## 1.3 试验方案

为研究硬壳层厚度对淤泥地基承载力、沉降和下部淤泥土压力等的影响,设计硬壳层厚度分别为 3、6、9、12 cm 四种工况。模型试验所用淤泥初始含水率均为 50%,上覆快速固化淤泥硬壳层固化剂掺量为 20%,固化时间为 24 h,荷载板直径均为 6 cm。试验方案如表 2 所示。

采用土压力盒测量土体内部土压力,采用位移

表 2 试验方案

Table 2 Test plan

试验序号	含水率/%	硬壳层厚度/cm	荷载板直径/cm	固化时间/h
1	50	3	6	24
2	50	6	6	24
3	50	9	6	24
4	50	12	6	24

传感器测量表面沉降。在距离承压板中心 0、5、10、15、20 cm 位置,深度 0、15、30 cm 处布置土压力盒采集土体内部土压力。在距离承压板中心 0、10、15、25 cm 硬壳层表面位置布置位移传感器测量沉降。传感器布置如图 2 所示。

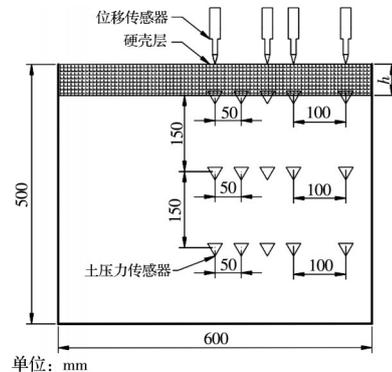


图 2 传感器布置图

Fig. 2 Schematic diagram of sensor layout

## 1.4 试验流程

试验流程主要包括硬壳层制作、底部淤泥填筑及传感器埋设和加载装置安装及加载试验 3 个步骤。

**硬壳层制作:**首先按要求准备好淤泥土样和 CRSS 固化材料,根据预设含水率、掺量和硬壳层厚度等将淤泥与 CRSS 拌和均匀,放入硬壳层制作结构箱体中,整平硬壳层表面至设计厚度,固化 24 h 后即得试验用硬壳层。

**底部淤泥填筑及传感器埋设:**根据设计的底部淤泥干密度和含水率等称量淤泥土和水,拌和均匀;分层装入模型箱中,每层淤泥用抹灰刀抹平,厚度约 5 cm;在传感器设计深度处埋设相应的传感器,所有传感器线均需理顺到模型箱每一角落,方便硬壳层的放置。

**加载装置安装及加载试验:**将固化好的硬壳层放置在淤泥土层表面,紧密贴合,保持水平,然后安装位移传感器、荷载板、千斤顶以及压力传感器。将传感器与数据采集箱系统连接好后数据清零,开始加载。图 3 为模型试验装置图。



图3 模型试验装置图

Fig. 3 Model experimental device

## 2 试验结果分析

### 2.1 破坏形式

不同上覆硬壳层厚度模型试验硬壳层的破坏形式如图4所示。从图中可以看出,当下部淤泥含水率超过液限时,上覆硬壳层厚度不同,其破坏形式呈现明显差异。当硬壳层厚度为3 cm时,硬壳层发生沿中心线的对折破坏。当硬壳层厚度为6 cm时,硬壳层发生以加载中心为中心点的十字对折破坏。当硬壳层厚度为9 cm时,硬壳层产生冲切破坏,同时伴有轻微的对折破坏裂隙。当硬壳层厚度为12 cm时,硬壳层同样发生冲切破坏,同时发生以加载中心为中心点的三线破坏,且破坏裂隙相对于硬壳层厚度9 cm时更明显,破坏线的夹角约为 $120^\circ$ 。

随着硬壳层厚度增大,上部硬壳层可承担的荷

载越大。当硬壳层厚度为3 cm时,上部硬壳层可承担荷载较小,加载时扩散作用面积小,底部淤泥在荷载的挤淤作用下向外流动,由于硬壳层厚度小,迅速从中间折断破坏。当硬壳层厚度为6 cm时,上部硬壳层可承担荷载增大,底部淤泥受到荷载作用向外挤淤,所能承受的竖向压缩沉降更大,破坏裂隙由一条变成垂直的两条,呈现十字对折破坏。当硬壳层厚度为9 cm时,硬壳层可承担荷载更大,封闭作用和扩散作用更强,荷载主要集中在荷载板上,破坏形式为冲切破坏,同时伴有一条轻微的对折破坏裂隙。当硬壳层厚度为12 cm时,硬壳层可承担荷载最大,荷载主要由硬壳层承担,硬壳层发生冲切破坏;由于所能承受的荷载更大,沉降更大,3条破坏裂隙更明显。

### 2.2 $p-s$ 曲线

不同上覆硬壳层厚度淤泥地基的 $p-s$ 曲线如图5所示。从图中可以看出,不同上覆硬壳层厚度淤泥地基 $p-s$ 曲线可大致分为3段:弹性阶段、弹塑性阶段以及破坏阶段。弹性阶段时,随着荷载增大,硬壳层产生轻微变形,底部淤泥压缩,沉降近似线性增大。当荷载继续增大,进入弹塑性阶段,硬壳层局部变形较大,产生裂缝,中心沉降速率增大。由于CRSS固化淤泥硬壳层强度高,当硬壳层出现裂缝后,随着上部荷载增大,裂隙迅速扩大,随后破坏,此阶段为极限阶段。

由图5可知,随着硬壳层厚度增大,地基极限承载力明显提升,沉降也随之增大。刘青松等<sup>[9]</sup>认为

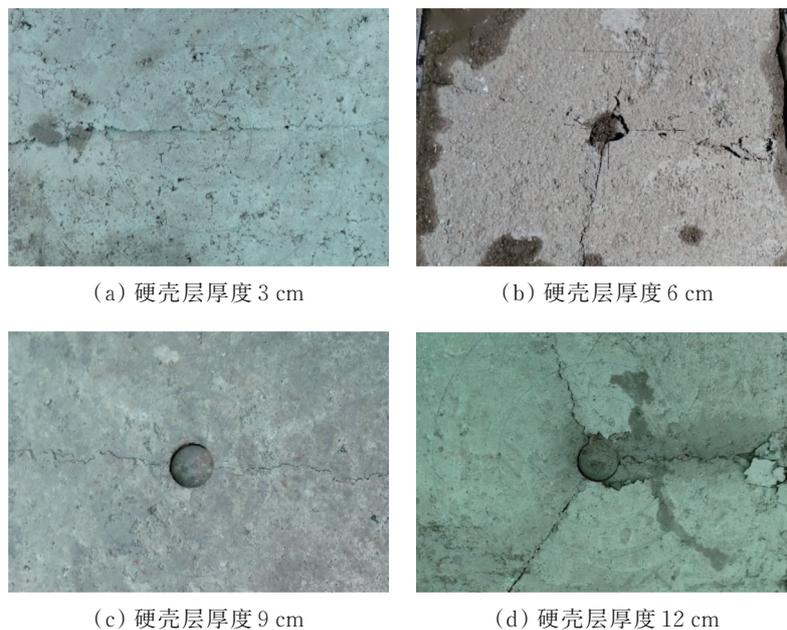
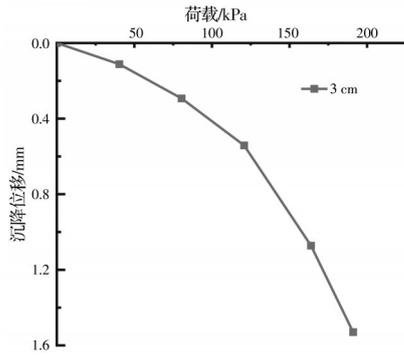
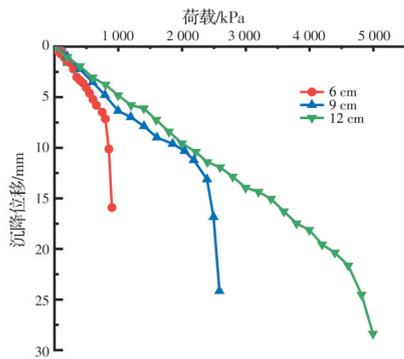


图4 硬壳层破坏形式

Fig. 4 Hard shell layers failure mode



(a) 硬壳层厚度 3 cm



(b) 硬壳层厚度 6、9、12 cm

图 5  $p-s$  曲线Fig. 5 Curves of  $p-s$ 

在硬壳层强度相同的情况下,增大硬壳层厚度只是增加了剪力的作用距离,对其所能承担的剪切变形没有任何贡献,所以不同硬壳层厚度沉降基本相同。但由于CRSS固化淤泥强度高,能承受更大的荷载,在封闭作用下底部淤泥的压缩变形更大,所以随着硬壳层厚度增大,沉降略有增大。

浅层平板载荷试验中,沉降特征可以利用第  $i$  阶段的变形模量来反映<sup>[15]</sup>

$$E_i = (1 - \mu^2) I_0 I_1 K_i D \quad (1)$$

式中: $\mu$ 为泊松比; $I_0$ 为承压板位于半空间表面的影响系数; $I_1$ 为承压板埋深 $z$ 时的修正系数; $K_i$ 为 $p-s$ 关系曲线直线段的斜率, $\text{kN}/\text{m}^3$ 。

由式(1)可知, $E_i$ 与 $K_i$ 呈线性关系,曲线分段斜率 $K_i$ 定义为

$$K_i = \frac{P_{i+1} - P_i}{S_{i+1} - S_i} \quad (2)$$

式中: $P_i$ 和 $P_{i+1}$ 分别为第 $i$ 级和第 $i+1$ 级荷载, $\text{kPa}$ ; $S_i$ 和 $S_{i+1}$ 分别为第 $i$ 级和第 $i+1$ 级荷载下的沉降值, $\text{mm}$ 。不同硬壳层厚度的分段斜率计算值如图6所示。

从图6可以看出,不同硬壳层厚度分段斜率大致可以分为2个阶段:波动上升阶段和波动下降阶段。第1阶段波动上升阶段为弹性压密阶段,此阶

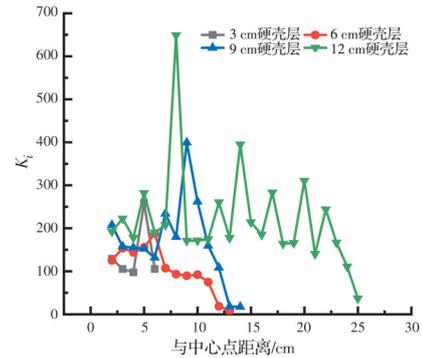


图 6 不同厚度硬壳层分段斜率

Fig. 6 Segmented slope of different hard shell layers

段,在荷载作用下,硬壳层与底部淤泥不断压密,接触更紧密,淤泥地基上部水分部分被挤出,前3级荷载分段斜率变化较小,接触紧密后分段斜率增大,对应弹性模量也随之增大,但由于底部淤泥含水率大于液限,流动性较强,所以该阶段弹性模量处于波动上升状态。随着荷载不断增大,硬壳层内部开始出现微小裂隙,随后进入第2阶段。第2阶段波动下降阶段为弹塑性阶段,在第2阶段中,硬壳层微小裂隙不断增大,扩散作用和封闭作用减弱,随着荷载增大,相应沉降快速增大,对应分段弹性模量减小,随后丧失承载力。对于3 cm硬壳层,由于硬壳层厚度小,分段斜率增大后迅速下降,相较于较厚的硬壳层,整个过程变化较为迅速。随着硬壳层厚度增大,分段斜率波动上升和下降阶段越明显。

### 2.3 弯沉盆分析

平板载荷试验中,与荷载板中心点不同距离的沉降连线类似于弯沉盆。弯沉盆的形状对Winkler地基模型以及双层地基的承载力有重要影响,谈至明等<sup>[16-17]</sup>和王秉刚<sup>[18]</sup>通过假设不同的弯沉盆函数形式计算了地基的承载力,取得了较满意的结果。笔者通过测量与中心点不同距离的沉降,对弯沉盆进行分析。图7为通过与中心点不同距离的沉降描述的不同厚度硬壳层的弯沉盆形状。

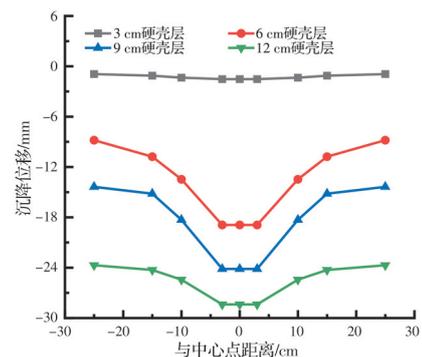


图 7 不同厚度硬壳层弯沉盆形状

Fig. 7 Shape of deflection basin with different thickness

从图 7 可以看出,硬壳层厚度不同,弯沉盆形状亦不同。当硬壳层厚度为 3 cm 时,弯沉盆形状不明显,其原因是硬壳层厚度小可承担荷载小,下部淤泥含水率超过液限,容易在挤淤作用下向边缘流动,硬壳层迅速破坏,失去承载力。

当硬壳层厚度不小于 6 cm (6、9、12 cm) 时,随硬壳层厚度增大弯沉盆形状越明显,中心点和边缘点的沉降均增大,但中心点和边缘点的沉降差距随硬壳层厚度增大而减小,原因是随硬壳层厚度增大,硬壳层可承担荷载变大,封闭作用变强,抵抗变形能力增强,在承受较大荷载时下部淤泥的压缩增大,所以整体沉降增大,中心与边缘处的沉降差异减小。

对于弯沉盆函数形式,谈至明等<sup>[17]</sup>采用线性假设(认为荷载板内部范围内沉降相等)计算与中心点不同距离处的沉降  $\omega$ 。

$$\omega = \omega_0 \left( 1 - \frac{\omega_0}{R} r \right) \quad (3)$$

式中: $R$ 为弯沉盆边界半径; $r$ 为距中心点的距离; $\omega_0$ 为中心荷载板的沉降。式(3)基于弯沉盆的线性假设在计算时比较简单,但并不完全符合实际。

Sneddon<sup>[19]</sup>在半无限固体受到矩形刚体的刻凿问题中提出了弯沉变形函数  $\omega$

$$\omega = \begin{cases} \omega_0 & r \leq a \\ \omega_0 \left( 1 - \frac{\ln \left( 2 \left( \frac{r}{a} \right)^2 - 1 \right)}{2 \ln 2} \right) & r > a \end{cases} \quad (4)$$

式中: $a$ 为荷载板半径。该式不能反映弯沉盆的边界,当  $r$  一直增大时,  $\ln \left( 2 \left( \frac{r}{a} \right)^2 - 1 \right)$  可能大于  $2 \ln 2$ , 沉降将会变为负值,式中表示为向上翘曲,经试验验证亦不合理;其次,该式也未考虑荷载作用下硬壳层的整体沉降  $c$ 。

笔者基于试验结果,将式(4)修正为

$$c = 0.5 \omega_{25} \ln \left( \frac{h}{a} \right) \quad (5)$$

$$\omega_1 = \omega_0 - c \quad (6)$$

$$\omega = \begin{cases} \omega_1 & r \leq a \\ \omega_1 \left( 1 - \frac{\ln \left( 2 \left( \frac{r}{a} \right)^2 - 1 \right)}{\ln \left( 2 \left( \frac{R}{a} \right)^2 - 1 \right)} \right) & a > r < R \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\omega_1$ 为中心点相对沉降; $\omega_{25}$ 为距中心点 25 cm 试验测得的沉降; $c$ 为硬壳层的整体沉降。

凌建明等<sup>[20]</sup>根据大量试验得出,  $R = 3.9l$ ,  $l$ 为 Winkler 地基的相对刚度半径。

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12k(1-\nu^2)}} \quad (8)$$

式中: $E$ 为硬壳层的弹性模量; $\nu$ 为硬壳层的泊松比; $h$ 为硬壳层的厚度; $k$ 为 Winkler 地基的反应模量。

本文中,不同硬壳层厚度的荷载板半径  $a$  均为 3 cm,  $E$  均为 1 600 MPa,  $\nu$  均为 0.2,  $\omega_0$ 、 $k$  及其他相关参数如表 3 所示。

表 3 相对刚度参数及半径

Table 3 relative stiffness parameters and radius			
$h/cm$	$\omega_0/mm$	$k/(MPa/cm)$	$l/cm$
3	1.530	1.248	7.404
6	15.910	0.567	15.166
9	24.158	1.070	17.539
12	28.387	1.759	19.219

利用表 3 中计算出的不同硬壳层厚度的相对刚度半径  $l$ , 可计算不同硬壳层厚度的弯沉盆边界半径  $R$ , 进而求出与中心点不同距离的沉降。将试验实测沉降数据代入线性弯沉盆假设变形公式(3)和对数假设变形公式(7)中, 并求相关性系数, 不同硬壳层厚度两种弯沉盆变形公式以及与试验实测沉降的相关性系数如表 4 所示。从相关性系数看, 除硬壳层厚度 3 cm 外, 其余硬壳层厚度的对数假设相关性系数均大于线性假设。由于 3 cm 硬壳层可承受荷载较低, 在荷载较小时即发生破坏, 不能充分变形, 所以相关性较低。

利用修正后的对数弯沉盆假设变形公式(7)计算出与中心点不同距离的沉降与试验实测的沉降对比如图 8 所示。从图 8 可以看出, 式(7)的计算值与试验结果相近。由此可见, 修正后弯沉盆形状函数更准确, 更能反映淤泥上覆硬壳层在中心点加载时的弯沉变形。

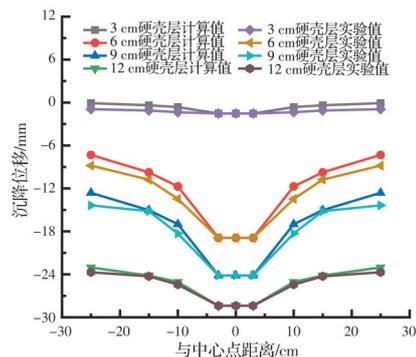


图 8 弯沉盆形状对比图

Fig. 8 Shape comparison of deflection basin

表 4 不同弯沉盆函数对比表

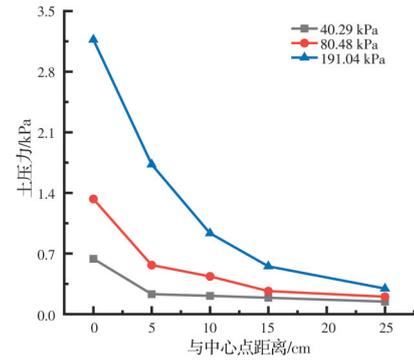
Table 4 Comparison of different deflection basin functions

硬壳层厚度	函数形式	拟合方程及相关系数 $R^2$
3 cm	线性	$\omega = -1.53 + 0.053r$ $R^2 = -2.898$
	对数	$\omega = -1.53 \left( 1 - \ln \left( 2 \left( \frac{x}{3} \right)^2 - 1 \right) / 5.22 \right)$ $R^2 = -7.369$
	线性	$\omega = -18.91 + 0.31r$ $R^2 = 0.7131$
6 cm	对数	$\omega = -3.05 - 15.86 \left( 1 - \ln \left( 2 \left( \frac{x}{3} \right)^2 - 1 \right) / 6.73 \right)$ $R^2 = 0.8881$
	线性	$\omega = -24.16 + 0.35r$ $R^2 = 0.6449$
9 cm	对数	$\omega = -7.89 - 16.26 \left( 1 - \ln \left( 2 \left( \frac{x}{3} \right)^2 - 1 \right) / 6.95 \right)$ $R^2 = 0.9393$
	线性	$\omega = -28.39 + 0.38r$ $R^2 = -1.102$
12 cm	对数	$\omega = -20.67 - 7.72 \left( 1 - \ln \left( 2 \left( \frac{x}{3} \right)^2 - 1 \right) / 7.13 \right)$ $R^2 = 0.9672$

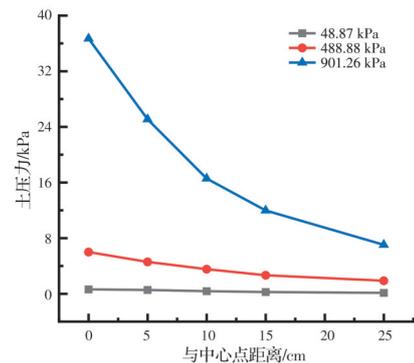
## 2.4 土压力分布规律

不同上覆硬壳层厚度淤泥地基第 1 层土压力(距硬壳层底部 0 cm)在不同荷载作用下的分布如图 9 所示。由图可知,随荷载增大,不同厚度的硬壳层第 1 层土压力均增大,随与中心点水平距离增大,土压力逐渐减小且减小幅度变缓。随硬壳层厚度增大,土压力分布更加均匀,与中心点不同距离之间的差异越小。其原因是随硬壳层厚度增大,硬壳层承担荷载增大,抵抗差异变形的能力不断增强,封闭作用增强;同时厚度越大,扩散作用也越强,使得下部土压力的分布更加均匀。

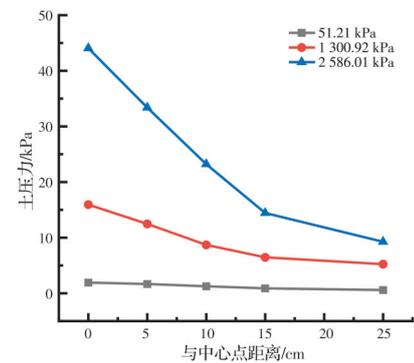
不同硬壳层厚度在极限荷载作用下,与硬壳层底部不同距离土压力分布如图 10 所示。从图中可以看出,硬壳层厚度越大对应的硬壳层底部土压力越大,下部淤泥不同深度的土压力也越大;深度越大,土压力越小。当硬壳层厚度为 3 cm 时,由于可承受荷载小,经硬壳层的扩散作用和封闭作用后传递到下部淤泥的土压力更小,土压力沿深度方向变化不明显。当硬壳层厚度大于 3 cm 时,土压力沿深度方向的减小速率基本相同;其原因是下部淤泥土性相同,传递规律几乎一致。



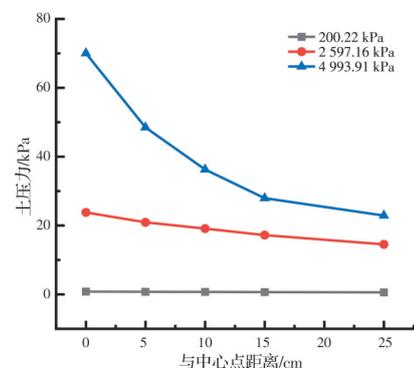
(a) 硬壳层厚度 3 cm



(b) 硬壳层厚度 6 cm



(c) 硬壳层厚度 9 cm



(d) 硬壳层厚度 12 cm

图 9 不同硬壳层厚度第一层土压力分布

Fig. 9 Earth pressure distribution of the first layer with different thickness of hard shell layer

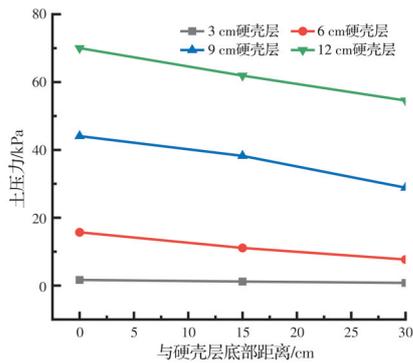


图10 极限荷载作用下不同深度土压力分布图

Fig. 10 Distribution of earth pressure at different depths under ultimate load

### 3 结论

进行了上覆不同厚度CRSS快速固化淤泥硬壳层的淤泥地基平板载荷模型试验,研究了硬壳层破坏形式、 $p-s$ 曲线特性、弯沉盆形状以及土压力分布规律,得到主要结论如下:

1)硬壳层厚度对硬壳层破坏形式有重要影响,硬壳层厚度为3、6 cm时呈以荷载板为中心的对折破坏和十字形破坏,硬壳层厚度为9 cm和12 cm时,硬壳层发生冲切破坏,并伴有破坏裂隙。

2)硬壳层厚度越大,扩散作用越明显,极限承载力越高,沉降相应增大;承压板中心沉降特征通过 $p-s$ 曲线分段斜率描述,可分为弹性和弹塑性两个阶段。

3)与荷载板中心点不同距离的沉降可用弯沉盆形状描述,提出了修正的对数弯沉盆假设变形计算公式,相对于线性弯沉盆假设变形计算公式更合理。

4)土压力从中心向外呈下降趋势,随硬壳层厚度增大,土压力分布更均匀;土压力沿深度方向逐渐减小,当硬壳层厚度大于3 cm时,由于淤泥性质相同减小速率基本相同。

### 参考文献

- [1] 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. 吉林: 延吉, 2011: 521-525.  
WANG N W, GAO Y, WANG Y M. Solidified layer of the foundation of the laboratory test [C]//The 8th Shenyang Science Academic Annual Conference, Yanji, Jilin, 2011: 521-525.
- [2] KIM E H, CHO J K, YIM S. Digested sewage sludge solidification by converter slag for landfill cover [J]. Chemosphere, 2005, 59(3): 387-395.
- [3] 王东星,陈政光. 氯氧镁水泥固化淤泥力学特性及微观

机制[J]. 岩土力学, 2021, 42(1): 77-85, 92.

WANG D X, CHEN Z G. Mechanical properties and micro-mechanisms of magnesium oxychloride cement solidified sludge [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42 (1): 77-85, 92. (in Chinese)

- [4] MA J L, ZHAO Y C, WANG J M, et al. Effect of magnesium oxychloride cement on stabilization/solidification of sewage sludge [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(1): 79-83.
- [5] 史文会,刘文白,吴丽颖. 固化疏浚泥双层地基承载性能室内模型试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(5): 65-71, 145.  
SHI W H, LIU W B, WU L Y. Indoor model test on the bearing capacity of double-layered foundation with upper solidified dredging sludge [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2015, 13(5): 65-71, 145. (in Chinese)
- [6] 刘文白,魏晓添,赵玉同. 软黏土上覆硬土层极限承载力室内模型试验研究[J]. 水运工程, 2011(5): 119-123.  
LIU W B, WEI X T, ZHAO Y T. On indoor model test about the ultimate bearing capacity of soft soil covered by hard solum [J]. Port & Waterway Engineering, 2011(5): 119-123. (in Chinese)
- [7] 姚超,贺玲凤. 淤泥质黏土层的室内模型试验研究与有效利用[J]. 施工技术, 2018, 47(Sup1): 39-42.  
YAO C, HE L F. Laboratory model test and effective utilization of mucky clay layer [J]. Construction Technology, 2018, 47(Sup1): 39-42. (in Chinese)
- [8] 刘文白,黄晓健,魏晓添,等. 基于DPDM技术的室内双层地基承载试验及变形场分析[J]. 水运工程, 2011 (8): 133-138.  
LIU W B, HUANG X J, WEI X T, et al. Indoor bearing experiments and deformation field analysis of double-layer soil foundation by the technique of DPDM [J]. Port & Waterway Engineering, 2011(8): 133-138. (in Chinese)
- [9] 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拟研究[J]. 岩土力学, 2008, 29 (Sup1): 667-670.  
LIU Q S, ZHANG C L, WANG S C, et al. Laboratory simulation study of the ultimate bearing capacity of the man-made crust over dredged wastes dump sites [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(Sup1): 667-670. (in Chinese)
- [10] 闫澍旺,郭炳川,孙立强,等. 硬壳层在吹填土真空预压中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1497-1503.  
YAN S W, GUO B C, SUN L Q, et al. Application of crust layer to vacuum preloading dredge fill [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (7): 1497-1503. (in Chinese)

- [11] 廖声浩. 滨海相软土地基人造硬壳层建造及其承载特性研究[D]. 江苏 徐州: 中国矿业大学, 2018.  
LIAO S H. Study on artificial hard crust construction and bearing characteristics [D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2018. (in Chinese)
- [12] 方祥位, 龙开荃, 刘汉龙, 等. 一种土壤固化剂材料和快速固化淤泥的方法: 202118001622.7 [P].  
FANG X W, LONG K Q, LIU H L, et al. A soil stabilizer and method for rapidly solidifying sludge: China 202118001622.7 [P]. (2021).
- [13] 龙开荃. 淤泥快速固化及力学特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.  
LONG K Q. Study on rapid solidification of sludge and mechanical properties of solidified sludge [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [14] ZHANG X C, FANG X W, LIU J L, et al. Durability of solidified sludge with composite rapid soil stabilizer under wetting-drying cycles [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: e01374.
- [15] 雷华阳, 刘广学, 周骏. 吹填场区双层软黏土地基承载特性及破坏模式 [J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 260-268, 394.  
LEI H Y, LIU G X, ZHOU J. Bearing property and failure mode of double-layer soft clay grounds in a dredger fill site [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40 (1): 260-268, 394. (in Chinese)
- [16] 谈至明, 姚尧, 郭晶晶. 文克勒地基板极限承载力的弹塑性解 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 730-733.  
TAN Z M, YAO Y, GUO J J. Elastic-plastic solution to ultimate bearing capacity of plate on winkler foundation [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(5): 730-733. (in Chinese)
- [17] 谈至明, 从志敏, 姚尧. 再论文克勒地基板极限承载力的弹塑性解 [J]. 中国公路学报, 2019, 32(11): 129-136.  
TAN Z M, CONG Z M, YAO Y. Re-discussion on elastic-plastic solution of the ultimate bearing capacity of a plate on a Winkler foundation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(11): 129-136. (in Chinese)
- [18] 王秉纲. 弹性半空间地基混凝土路(地)面的承载力分析 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 1986, 6(1): 8-14.  
WANG B G. Load-carrying capacity of concrete pavements on the semi-space elastic foundation [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 1986, 6(1): 8-14. (in Chinese)
- [19] SNEDDON I N. 富利叶变换[M]. 何衍璿, 张燮, 译. 北京: 科学出版社, 1958.  
SNEDDON I N. Fourier transformation[M]. Translated by HE Y X, ZHANG X. Beijing: Science Press, 1958. (in Chinese)
- [20] 凌建明, 刘诗福, 袁捷. 刚性道面弯沉盆重心距离法及回归模型 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46 (12): 1683-1689.  
LING J M, LIU S F, YUAN J. Improved area back-calculation method for rigid pavement and its regression model [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(12): 1683-1689. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)