



# 强浪作用下土体液化的土质海堤稳定性分析\*

刘江娇<sup>1,2</sup>, 郑建国<sup>1,2</sup>, 王奎峰<sup>3</sup>, 王强<sup>3</sup>, 许国辉<sup>1,2</sup>

(1. 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100;

2. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 3. 山东省地质科学研究院, 山东 济南 250000)

**摘要:** 在台风、风暴潮等海况中的强风浪作用下, 土质海堤常发生破坏甚至决堤。考虑海堤土体在高水位波浪作用时发生液化的情况, 用 Geo-slope 软件计算海堤整体滑动稳定性的安全系数, 并与高水位静水状态、无波浪作用低水位时和波浪作用液化后低水位时 3 个工况计算的海堤安全系数进行比较分析。4 个工况计算的安全系数分别为 2.226、2.392、2.082 和 2.056。结果表明, 波浪作用造成土体液化时, 对海堤整体稳定性的影响并不明显, 而临海侧低水位时对海堤整体稳定性的影响则很显著; 强风浪情况下海堤的决口等破坏并不是由于波浪作用造成土体强度降低引起海堤整体滑动所导致的, 具体机制仍需进一步研究。

**关键词:** 土质海堤; 波浪作用; Geo-slope 软件; 土体液化

**中图分类号:** P 753; U 65

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2016)07-0128-06

## Stability of soil seawall suffering soil liquefaction under action of strong wave

LIU Jiang-jiao<sup>1,2</sup>, ZHENG Jian-guo<sup>1,2</sup>, WANG Kui-feng<sup>3</sup>, WANG Qiang<sup>3</sup>, XU Guo-hui<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology of Ministry of Education, Qingdao 266100, China;

2. Ocean University of China College of Environmental Science and Engineering, Qingdao 266100, China;

3. Geological Scientific Research Institute of Shandong Province, Ji'nan 250000, China)

**Abstract:** Under the action of strong wind wave in the sea conditions of typhoon, storm surge and so on, soil seawall is often damaged or even broken. Considering the situation that the soil mass of seawall will be liquefied under the action of high water-level wave, Geo-slope software was used to calculate the safety factor for the overall sliding stability of seawall. The calculation result was compared with the safety factors calculated in other three conditions including high water level at calm water state, low water level with wave action, and low water level after liquefaction under wave action. The safety factors calculated in the four cases were 2.226, 2.392, 2.082 and 2.056 respectively. The results show that when the wave action is causing soil liquefaction, it doesn't produce a significant influence on the overall stability of seawall, but it produces a significant influence on the stability of seawall which is at the low level of sea side; the destructions such as seawall breach under strong wind wave are not caused by the overall seawall sliding due to reduction of soil strength under wave action, and its specific mechanisms still need further study.

**Keywords:** soil seawall; wave action; geo-slope software; soil liquefaction

为了保护沿岸人民和财产免受风浪和海潮危害, 我国海岸线大部分地方都建有海堤, 到 2006 年

已建有 13 830 km<sup>[1]</sup>。虽然筑堤的技术和标准都在不断提高, 但考虑经济成本和就地取材方便, 很

收稿日期: 2016-01-26

\*基金项目: 山东省地勘基金项目(鲁勘字(2013)055)

作者简介: 刘江娇(1988—), 男, 硕士研究生, 从事海岸工程地质、海岸工程等研究。

多海堤的筑堤材料都为粉质土<sup>[2-3]</sup>。土质海堤在台风、风暴潮期间很容易发生破坏。20世纪70年代中期到90年代,江苏沿海因为风暴潮发生了6起较大的垮堤事故<sup>[4]</sup>。1992年16号台风风暴潮期间黄河三角洲胜利油田海堤遭海浪严重破坏<sup>[5]</sup>,浙江苍南县江南海堤也部分损毁<sup>[6]</sup>。2005年卡特里娜飓风期间,美国新奥尔良IHNC东岸第九选区西北角决口76 m<sup>[7]</sup>。这些事故都发生在强风浪期间的土质海堤上,这不能不引起思考。

以往海堤整体抗滑稳定性计算,主要考虑的是临海侧设计低潮位的工况条件<sup>[8]</sup>,而实际却是在台风、风暴潮等海况下高水位时的强风浪情况下,土质海堤发生破坏甚至决口。根据土动力学,在循环荷载作用下土体强度会降低,发生弱化。波浪作为循环荷载,其作用也会使粉质土强度发生明显降低<sup>[9-11]</sup>。在强风大浪期间,高水位时的海浪对海堤的作用力很大。海浪的持续作用,相当于循环荷载作用在海堤上,而循环荷载的持续作用,会引起海堤地基土的强度下降,甚至引起土的液化。这样会对海堤的稳定性产生不利影响,可能会导致海堤破坏甚至发生整体滑动。本文重点考虑在强浪导致海堤土体发生液化的情况下,建立波浪作用下的土质海堤模型,考虑波浪循环荷载对海堤地基土的液化、弱化作用,计算波浪作用下发生液化时土质海堤的安全系数,并与高水位静水状态、无波浪作用低水位时和波浪作用液化后低水位时的工况进行比较,分析波浪作用对海堤整体稳定性的影响。

## 1 计算方法

本文主要考虑波浪作用对土质海堤整体滑动稳定性的影响。对于海堤整体滑动稳定性计算,采用 Morgenstern-Price 法。具体计算通过 Geo-slope 软件实现。

### 1.1 Morgenstern-Price 法

Morgenstern-Price 法是 Morgenstern 和 Price 在 1965 年提出的一种类似于斯宾塞法的土坡稳定性

分析方法。与斯宾塞方法不同的是,该方法有多种形式的条间力表示函数。在 Geo-slope 软件中可以用到的条间力函数有:常量、半正弦、半余弦、梯形、离散数据点等。工程上常沿用简单的瑞典条分法,但这种方法不考虑土条两侧的剪力和法向力,并且力的多边形闭合很差,土条不处于力的平衡状态。用该方法计算得到的结果具有潜在的不确定性。而 Morgenstern-Price 法的优点是考虑了条间剪力和正应力,同时满足力的平衡和力矩平衡,并且 Geo-slope 中提供了多种条间力函数可供选择<sup>[12]</sup>,所以本文采用 Geo-slope 软件中的 Morgenstern-Price 法计算海堤整体稳定性的安全系数。

### 1.2 高水位波浪作用发生液化时海堤稳定性计算模型(工况 1)

在海水涨潮的高水位时,波浪对海堤斜坡面产生冲击力,即产生波压力作用。不管何种形式的海堤,波压力都会通过迎浪面的防护传递到堤内,从而影响海堤内的土体。堤内填土基本为就地取材,主要为粉质土<sup>[2-3]</sup>。作用于海堤上的波压力可看作循环荷载,循环荷载的作用会引起海堤土体弱化,从而对海堤稳定性产生影响。计算波浪作用下海堤整体稳定性的安全系数时,首先需计算作用于海堤上波压力的大小和作用范围,再考虑波压力作为循环荷载对海堤土体弱化的影响,最后计算海堤土体的弱化对海堤稳定性的影响。作用于海堤上的波压力的计算,可查相关规范进行。循环荷载对土体强度的弱化可通过其他研究者的研究给出,而土强度的降低表现为内聚力和内摩擦角的减小,根据土剪切强度的摩尔库伦公式可按比例求出。

1) 波浪作用于海堤坡面上的波压力。

波浪对海堤坡面的波压力可根据严恺《海岸工程》中所给的公式计算<sup>[13]</sup>。当  $\cot\alpha=3$ , 计算水位  $h=3$  m, 最大破波波高  $H=0.78h$ , 计算得  $p_2=50.14$  kPa,  $z_2=0.52$  m,  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 、 $l_4$  分别为 0.56、1.44、1.18、3.00 m。波压力分布<sup>[13]</sup>见图 1。

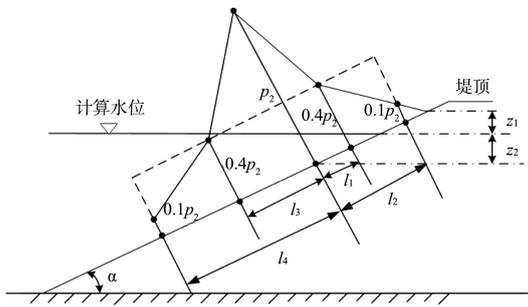


图1 斜坡面上波压力分布

作用于斜坡堤面上的波压力分布是不规则的,为计算方便对波压力进行简化。将不均匀荷载简化为均布荷载,简化的基本原则就是波压力分布图的面积前后基本相同,这样就保证了作用于斜坡上的总压力不变。简化结果为长 $l_2$ 和 $l_4$ 之间4.44 m范围的波压力都为 $0.4p_2 = 20.06$  kPa,其他部分忽略,见图1虚线。这样作用于堤面上的波压力就可看作条形荷载。

## 2) 循环荷载引起土体强度的弱化与分层。

波压力作为一种循环荷载作用于海堤上,会影响海堤内土体。将波压力简化为条形荷载后,其产生的附加应力可根据土力学中给出的公式 $\sigma_z = K_z p_0$ 计算,其中 $K_z$ 为条形基础下的附加应力系数(可查表得到), $p_0$ 为基底应力,在这里基底应力为 $\sigma_z = 0.4p_2 = 20.06$  kPa。

对于粉土循环荷载后的强度特性,有研究给出了循环荷载后不排水强度比与动孔压比的关系曲线(图2)<sup>[11]</sup>。其中 $q_{jm}$ 、 $q_{jpc}$ 分别为单调加载和循环荷载后单调加载的粉土强度, $u_d$ 是动孔压, $\sigma_3$ 是围压。从图2可以看出,当土体液化(即 $u_d/\sigma_3 = 1$ )时,土的循环荷载后的强度最小,为静强度的0.76倍。该研究未考虑循环振次的影响,考虑循环振次后,最终粉土的动强度约为静强度的0.35倍<sup>[9]</sup>。循环荷载达到土体破坏临界荷载时会破坏土体结构,引起土体强度急剧下降,并随着循环振次的增加,土体强度逐渐降低;而未达到临界荷载时,对土体强度影响较小。所以本文将波压力作用下的土体分为两层,一层为液化层,一层为未液化弱化层。

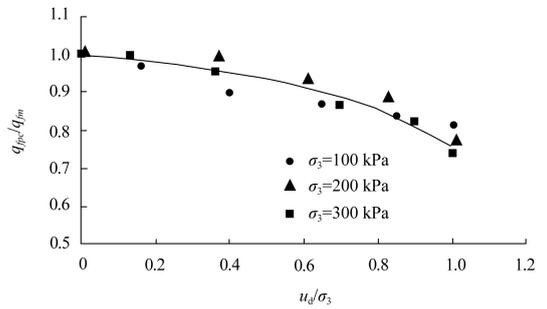


图2 循环荷载后不排水强度比与动孔压比关系曲线

对于液化层,粉土的液化深度可通过临界循环应力比确定。有研究将循环应力比公式改造为 $K = (\sigma_d + \sigma_1) / \sigma_3$ ,计算时取 $\sigma_1 = \sigma_3$ ,最后给出原状粉土的临界循环应力比为1.40<sup>[10]</sup>。据此,液化深度计算取临界循环应力比为1.40。该层强度取为静强度的0.35倍。对于未液化弱化层的厚度,取条形荷载中心处附加应力等于基底压力一半时的深度,为5.1 m。对于该层强度,根据图2曲线,液化时动强度为静强度的0.76倍,而未液化时动强度变化较小,取其平均值即动强度为静强度的0.88倍,作为该层土体的强度。

土强度降低表现为土的内聚力和内摩擦角的减小,本文用Geo-slope软件计算海堤整体稳定性的安全系数,需要以内摩擦角 $\varphi$ 和内聚力 $c$ 来计算,所以需要根据土强度的变化计算出 $\varphi$ 和 $c$ 的变化。根据土的剪切强度的摩尔库伦公式 $\tau = \sigma \tan \varphi + c$ ,假设土动强度为原来的0.35倍,则将内摩擦角 $\varphi$ 和内聚力 $c$ 按比例计算得 $\tan \varphi$ 和 $c$ 都为原来的0.35倍,就可计算出 $\varphi$ 和 $c$ 的值。

## 3) 波浪作用下的海堤模型。

根据黄河三角洲地区海堤实际形式<sup>[14]</sup>,建立海堤基本模型,见图3。右侧提高5 m,斜坡比1:3;左侧提高3 m,斜坡比1:2;堤面道路宽9 m。右侧静水位为3 m,左侧地下水位2 m,之间画出地下水位线。其中垂直高度0~12 m部分都为初始状态粉土,成图时这部分截掉了,只显示12 m以上的部分(下同)。假设堤的材料都为粉土,初始状态土的参数为饱和密度为 $2 \text{ t/m}^3$ ,内聚力为10 kPa,内摩擦角为 $20^\circ$ 。

由于波浪循环荷载作用引起海堤土体强度弱

化, 液化层和未液化弱化层需要分别计算厚度与弱化程度。

对于液化层:

$$\sigma_z = K_d p_0 \text{ (取条形荷载中心处计算附加应力)} \quad (1)$$

$$K = (\sigma_d + \sigma_1) / \sigma_3 \quad (2)$$

对于式 (2),  $\sigma_z = \sigma_d$ ,  $\sigma_1 = \sigma_3 = \rho g z_3$ , 计算得  $K = 1.4$ 。

试算得该层厚度  $z_3 = 2.1 \text{ m}$ 。该层强度取为静强度的 0.35 倍, 计算得内摩擦角  $\varphi$  和内聚力  $c$  分别为  $7.3^\circ$  和  $3.5 \text{ kPa}$ 。对于未液化弱化层, 底面距地面  $5.1 \text{ m}$ , 取该层强度为静强度的 0.88 倍, 计算得内摩擦角  $\varphi$  和内聚力  $c$  分别为  $17.8^\circ$  和  $8.8 \text{ kPa}$ 。再向下土强度基本不受循环荷载影响, 认为土处于初始状态。建立的海堤模型见图 3, 各层土的土参数见表 1。

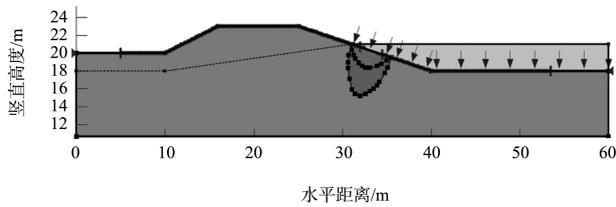


图 3 波浪作用下海堤模型

表 1 波浪作用下各层土的参数

分层	层底距海堤 斜坡面距离/m	密度/ ( $t/m^3$ )	内聚力 $c/kPa$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
液化层	2.1	2	3.5	7.3
未液化弱化层	5.1	2	8.8	17.8
初始状态		2	10.0	20.0

### 1.3 其他工况

海堤土体在波浪作用下发生液化时作为工况 1, 为了与该工况相比较, 又计算了其他几种工况时的安全系数。

1) 工况 2: 高水位静水状态下海堤安全系数计算。

高水位静水状态下, 海堤土体处于初始状态, 没有弱化土层, 具体海堤模型见图 4 (已截掉竖直高度 0~12 m 部分)。静水状态即未受波浪作用时海堤所处的状态, 与波浪作用发生液化时海堤稳定性计算得到的安全系数比较, 更能突出波浪的作用。

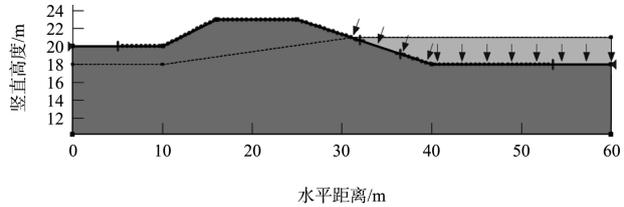


图 4 静水状态海堤模型

2) 工况 3: 无波浪作用低水位时海堤的安全系数计算。

模拟无波浪作用低水位时的海堤, 海堤内土体都处于初始状态。与工况 2 的海堤模型相比较, 该工况右侧临海侧无水, 渗流方向由堤内向临海侧, 其他都一致。由于是刚退潮, 粉土的渗透系数又很小, 因此右侧水位线起点仍在原静水位 3 m 水深位置, 即刻度 20 m 位置。

3) 工况 4: 波浪作用液化后低水位时海堤安全系数计算。

该工况模拟的是强风浪作用下海堤土体发生液化后刚退潮后的海堤。海堤模型与工况 1 的模型相似, 只是右边临海侧无水, 弱化土层边界没变, 但土体参数有所改变。在高水位的强风浪作用过程中, 土体发生液化或弱化, 如工况 1。而强风浪作用后, 退潮过程中, 土体强度会有所恢复。在对黄河三角洲粉质土研究中发现, 循环荷载作用会使土体强度降低, 而作用停止后, 土体强度会有所恢复, 甚至超过初始强度, 但一定深度下的土体即使经过 24 h 的恢复, 其强度仍恢复很少<sup>[15]</sup>。海堤退潮到低水位的过程中, 土体强度会有一些的恢复, 但具体恢复多少, 却难以确定。工况 1 中, 根据他人的研究确定了液化层取静强度的 0.35 倍, 未液化弱化层取静强度的 0.88 倍; 工况 4 计算时所用的参数是在工况 1 的基础上, 估计确定。为了计算危险的情况, 土体强度只是略有增加, 液化层取静强度的 0.5 倍, 未液化弱化层取静强度的 0.95 倍, 这样计算得到内摩擦角  $\varphi$  和内聚力  $c$  具体参数见表 2。需要注意的是, 这里给出的计算参数只是估计值, 在工程应用时, 需要根据实际情况, 开展具体试验确定参数取值。

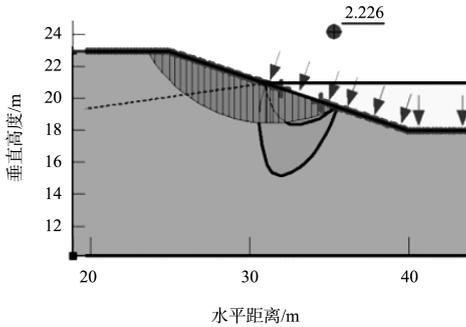
表2 波浪作用液化后退潮时各层土的参数

分层	层底距海堤 斜坡面距离/m	密度/ ( $t/m^3$ )	内聚力 $c/kPa$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
第1层	2.1	2	5.0	10.3
第2层	5.1	2	9.5	19.1
初始状态		2	10.0	20.0

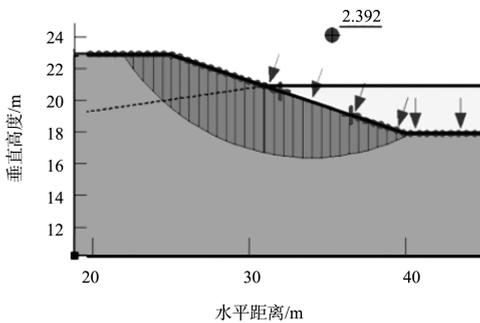
## 2 计算结果与讨论

### 2.1 计算结果

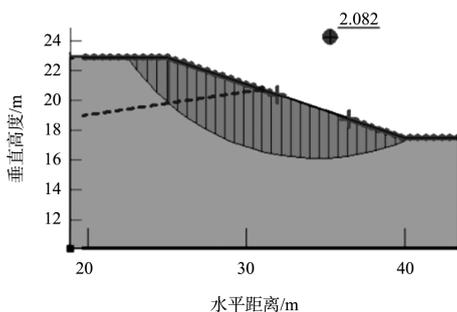
模型设置完，检查无误后，用 Geo-slope 软件进行计算。计算 4 种工况得到的海堤安全系数见表 3，海堤整体稳定性计算的结果见图 5（已截掉垂直高度 0~12 m 的部分）。计算所得各工况的安全系数见表 3。



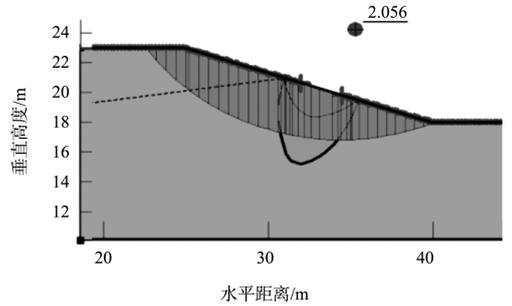
a) 工况1 (高水位波浪作用发生液化时)



b) 工况2 (高水位静水状态时)



c) 工况3 (无波浪作用低水位时)



d) 工况4 (波浪作用液化后低水位时)

图5 4种工况计算结果

表3 各工况计算所得的安全系数

工况	工况1	工况2	工况3	工况4
安全系数	2.226	2.392	2.082	2.056

### 2.2 分析讨论

工况 1 为高水位波浪作用发生液化时的海堤情况，其安全系数与工况 2 高水位静水状态下海堤的相比，下降了 0.166，表明波浪作用对海堤稳定性有一定影响，会危害海堤的稳定性，但对海堤的整体稳定性影响并不明显，这主要是由于海堤坡度较缓，而且土体强度降低的范围相对于整个滑动面较小，部分土体强度减少值较小。

工况 3 为无波浪作用低水位时的海堤情况，其安全系数是在工况 2 的基础上，退潮到低水位以后计算得到的，安全系数减小了 0.31。表明临海侧水位对海堤的稳定性有较大的影响，在低水位情况下，海堤的安全系数较小。与工况 1 相比，工况 3 的安全系数更小，表明波浪作用对海堤整体稳定性的影响没有临海水位降低的影响大。由此分析认为，高水位强风浪情况下，海堤的决口等破坏并不是由于波浪循环荷载作用造成土体强度降低引起海堤整体滑动所导致的，可能是由于强浪不断冲刷引起的，或者由于局部液化后的土体更加易于被冲刷带走所导致，但这仍需要进一步研究。

工况 4 为波浪作用液化后低水位时的海堤情况，其安全系数在所有计算的 4 种工况中是最小的，但与静水低水位时的安全系数相差不大。主要是由于滑动面虽然穿过未液化软化层，但所穿过

的范围与整个滑动面相比较小, 并且该层的土体强度变化很小, 所以该工况的安全系数减小值也很小。

海堤工程设计规范中, 计算海堤整体稳定性所要求考虑的工况条件主要是临海侧低水位的情况, 这与本文的计算结果是一致的。波浪作用所引起的土体液化对海堤的整体稳定性影响相对较小, 如无必要可不考虑。

但是土质海堤在高水位时的强烈波浪作用下发生损毁的问题, 如果以冲刷机制来进行分析的话, 尚应开展是否会由于局部液化后的土体更加易于被冲刷方面的研究工作。

### 3 结论

1) 波浪作用对海堤整体稳定性有一定影响, 但单独考虑波浪作用时, 对海堤的整体稳定性影响并不明显, 如无必要可不考虑。

2) 临海侧水位对海堤的稳定性有较大的影响, 在低水位情况下, 海堤的安全系数较小。

3) 强风浪情况下海堤的决口等破坏, 并不是由于波浪循环荷载作用造成土体强度降低引起海堤整体滑动所导致的, 可能是由于强浪不断冲刷引起的, 或者由于局部液化后的土体更加易于被冲刷带走所导致, 但这仍需要进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 刘琦波, 陈伟国, 胡明华, 等. 我国海堤建设与景观生态问题[J]. 人民长江, 2006, 37(11): 93-97.
- [2] 吴光豪. 粉砂土基堤坝地震液化及稳定分析研究[J]. 今日科技, 2000(11): 15.

- [3] 张从联, 朱峰, 李维涛, 等. 上海、浙江、福建三省市海堤现状调查[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(2): 51-55.
- [4] 陈才俊. 从近期几例垮堤分析江苏的海堤工程[J]. 海洋通报, 1997, 16(2): 37-42.
- [5] 窦春先. 胜利油田海堤的修复与加固[J]. 石油工程建设, 1995(5): 25-27.
- [6] 卢声明, 吴绍镇, 林孝悌. 互花米草对海岸的保护[J]. 浙江水利科技, 1996(2): 40-43.
- [7] 黄岳文, 余雄. 新奥尔良防洪工程体系破坏原因分析与研究[J]. 海洋工程, 2008, 26(2): 112-118.
- [8] SL 435—2008 海堤工程设计规范[S].
- [9] 冯秀丽, 叶银灿, 马艳霞, 等. 动荷载作用下海底粉土的孔压响应及其动强度[J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(3): 429-433.
- [10] 刘会欣. 黄河三角洲不同黏粒含量粉土的动力特性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [11] 陈存礼, 马少雄, 李雷雷, 等. 饱和黄河岸滩粉土循环荷载后的变形强度特性[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 801-808.
- [12] John K. Stability modeling with SLOPE/W an engineering methodology[M]. Canada: GEO-SLOPE/W International Ltd, 2004: 32-49.
- [13] 严恺, 梁其荀. 海岸工程[M]. 北京: 海洋出版社, 2002: 269-270.
- [14] 刘清涛, 蒲高军, 刘芸. 黄河三角洲莱州湾西岸防潮工程海堤断面块体稳定性实验研究[J]. 海洋科学进展, 2003, 21(2): 219-225.
- [15] 许国辉. 波浪导致粉质土缓坡海底滑动的研究—以黄河水下三角洲为例[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.

(本文编辑 武亚庆)

## · 消 息 ·

### 上航局获 1 项国家发明专利

日前, 经国家知识产权局评定, 上航局申报的“摊铺船”项目获得国家发明专利授权。

此项发明专利依托马来西亚巴生港吹填工程等耙吸船舫吹施工项目, 系统研究了舫吹精细化分层吹填技术, 形成了专用摊铺船设计方案, 并对摊铺船中的泥浆速度以及泥浆入水后运动规律等关键技术进行研究, 用来配合耙吸挖泥船进行水上吹填和水上吹填, 实现了摊铺船辅助耙吸船进行精细化分层吹填, 既减少吹填土流失, 又有效提高施工效率, 增加经济效益。此项专利在疏浚吹填工程领域具有较强的应用价值和推广前景。

[http://en.ccccltd.cn/pub/ccccltd/xwzx/zgsdt/201606/t20160627\\_48989.html](http://en.ccccltd.cn/pub/ccccltd/xwzx/zgsdt/201606/t20160627_48989.html) (2016-07-04)