

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201904043



# 海蚀槽发育导致的软质海崖 滑塌计算与分析

常方强, 梁康康

(华侨大学 岩土工程研究所, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 对福建省平潭岛东北部软质海崖进行现场调查和量测, 在约 1 km 的岸线上发现 9 处滑塌, 滑塌物的堆积距离、堆积高度和滑塌物体积均随海崖高度的增大而增大. 滑塌包括剪切破坏和顶部破坏两种类型, 剪切破坏的破坏面几乎完全垂直, 顶部破坏的破坏面呈 L 形. 针对这两种滑塌类型, 分别建立理论计算模型. 结果表明: 经理论计算模型得到的海蚀槽最大槽深(蚀退距离)为 0.51~1.30 m; 海崖稳定性随槽深的增大而降低; 海崖顶部破坏的滑塌临界水深为 0.22~0.61 m.

**关键词:** 海蚀槽; 稳定分析; 软质海崖; 滑塌; 平潭岛

**中图分类号:** P 753      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2020)03-0299-08

## Collapse Calculation and Analysis of Soft Sea Cliff Induced by Sea-Eroded Notch Development

CHANG Fangqiang, LIANG Kangkang

(Institute of Geotechnical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** The soft sea cliffs at northeast of Pingtan Island in Fujian Province are investigated and measured in situ. Nine collapses are found on the length of about 1 km cliffs. The deposition distance, deposition height and volume of collapse increase with cliff height. There are two types of collapse: shear failure and top failure. The failure surface of shear failure is almost vertical, and the failure surface of top failure is L-shaped. For both types of collapse, the theoretical calculation models are established. The results show the maximum depths of sea-eroded notch (retrograded distance) are 0.51-1.30 m calculated by the theoretical calculation models. The stability of cliffs decreases with the increase of the depths of sea-eroded notch. The critical water depth of collapse on the top of cliffs are 0.22-0.61 m.

**Keywords:** sea-eroded notch; stability analysis; soft sea cliff; collapse; Pingtan Island

海崖侵蚀是自然界中普遍存在的现象, 英国东海岸、波罗的海周边、北海南部、美国科德角、北美大不列颠湖和加利福尼亚州西海岸等地区的海崖均遭受严重的侵蚀, 最大蚀退速率达  $1\sim2\text{ m}\cdot\text{a}^{-1[1-3]}$ . 我国浙江、福建、广东、广西和海南也存在类似的海崖侵蚀问题. 海崖侵蚀不仅使陆地面积逐渐减小, 也对工程设施的安全性产生威胁. 在海崖侵蚀过程中, 崖脚发育的海蚀槽起着重要的作用, 海蚀槽的逐渐发育降低了海崖的稳定性, 往往导致大规模的滑塌<sup>[1]</sup>. 海蚀槽槽顶上覆土体类似悬臂梁, 当海蚀槽发育到一定程度时, 上覆土体会出现拉裂缝, 直至剪切破坏. 岩质海崖由于崖体强度较高, 当海蚀槽发育到较大深度时, 海崖才会出现滑塌; 而软质海崖由于崖体强度较低, 当海蚀槽槽深不太大时, 上覆土体就会丧

**收稿日期:** 2019-04-24

**通信作者:** 常方强(1980-), 男, 副教授, 博士, 主要从事海岸与海洋工程地质研究. E-mail: changfq@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41306051)

失稳定性. 因此,软质海崖海蚀槽尺寸比岩质海崖小很多. 此外,软质海崖一般不受节理裂隙的影响,与岩质海崖的滑塌机制存在差异. 目前,关于岩质海崖海蚀槽发育对崖体稳定性影响方面的计算分析已有一些报道<sup>[4-7]</sup>,但关于软质海崖计算分析的研究却相对较少.

福建省平潭岛东北部软质海崖每年遭受强台风波浪作用,侵蚀后退十分严重. 该区海崖主要由风积砂、老红砂和花岗岩风化残积土等组成,在崖脚处曾观测到若干海蚀槽和多处滑塌,海崖滑塌面几乎完全垂直,通过分析滑塌物尺寸和海崖高度,认为这些滑塌主要是由海蚀槽发育导致土体发生剪切破坏引起的<sup>[8]</sup>. 孙全等<sup>[9]</sup>假定海蚀槽为圆弧形,分析软质海崖的稳定性,理论计算模型的结果表明,海蚀槽发育每次可导致 0.67~0.90 m 厚度的海崖滑塌. 本文在分析滑塌物特征和海崖土体工程性质的基础上,对海蚀槽发育导致的软质海崖滑塌进行计算分析.

## 1 研究区概况

福建省平潭岛位于台湾海峡西北部,地处中亚热带海洋季风气候区,多台风、大风天气,年均气温为 19.0~19.8℃,降水丰沛,年降雨量为 900~1 200 mm<sup>[10]</sup>. 研究区地理位置,如图 1 所示. 图 1 中:S1~S9 为滑塌处.

研究区为平潭岛东北部大澳湾流水镇至石楼村一带,大澳湾海岸呈近东西向延伸的月牙形,面向东海,东西岬角均为燕山期花岗岩,中间为向南凹退的阶地(台地)海岸<sup>[10]</sup>. 1973—2008 年,影响平潭岛的台风达 157 次,平均每年 4.5 次<sup>[11]</sup>;5—11 月是台风影响的集中时间段,而 7—9 月的台风次数约占台风总次数的 70%. 平潭海洋站(119°51'E,25°27'N)监测的 21 年波浪统计资料<sup>[12]</sup>显示:在台风期间,研究区的最大波高大多为 7.1~9.5 m,最大可达 16.0 m,平均波浪周期为 5.3~5.4 s;潮流为半日潮流,表层涨潮流的最大流速为 83 cm·s<sup>-1</sup>,流向 252°,落潮流的最大流速为 78 cm·s<sup>-1</sup>,流向 93°;底层涨潮流的最大流速为 76 cm·s<sup>-1</sup>,流向 272°,落潮流的最大流速为 78 cm·s<sup>-1</sup>,流向 90°;最高潮位为 7.32 m,最低潮位为 -0.22 m,平均高潮为 5.85 m,平均低潮为 1.78 m,平均海面为 3.76 m.

该海岸土体强度较低,水动力作用较强,蚀退速率较大. 1961—1983 年,海岸平均蚀退速率为 1.25 m·a<sup>-1</sup>;1983—2009 年,平均蚀退速率为 1.46 m·a<sup>-1</sup><sup>[10]</sup>. 该海岸发育的海崖高度不等,从几米至十几米,崖面几乎完全垂直.

## 2 软质海崖滑塌特征

### 2.1 滑塌物形态

现场调查发现,研究区约 1 km 的岸线上共有 9 处滑塌. 软质海崖滑塌图,如图 2 所示. 由图 2 可知:滑塌物覆盖在崖脚,大多呈松散状,少数因土体较高的粘聚力而呈块状,部分滑塌物滚落至较远处;滑塌面一般为竖直,有的仅出现在崖顶,有的贯穿整个崖面.

滑塌物有的从崖顶塌落,有的整个崖面塌落. 一些滑塌物经海水搬运,在坡脚形成小的陡坎. 此外,在崖顶观测到多处裂缝和滑塌面,S1 存在多个小型顶部滑塌面,S3,S6 各存在 2 个和 1 个顶部滑塌面.

### 2.2 滑塌类型

根据边坡滑塌机制和现场调查结果可知,研究区的滑塌主要包括剪切破坏和顶部破坏两种类型,未发现圆弧滑动破坏的迹象.

1) 剪切破坏. 剪切破坏是滑塌物在重力作用下沿破坏面发生剪切滑动. 破坏面包括拉裂缝面和剪切面,破坏从崖顶发育的裂缝开始,随着裂缝向下扩张,破坏面上抵抗剪切破坏能力越来越弱,直至发生剪切滑动. 海蚀槽发育后,上覆海崖类似悬臂梁,上覆土体的重力在海蚀槽后方的竖直面上形成弯矩,在

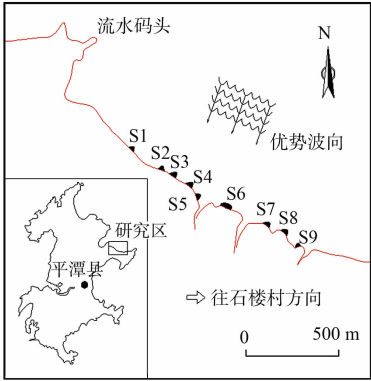


图 1 研究区地理位置  
Fig. 1 Geographical location  
of research area

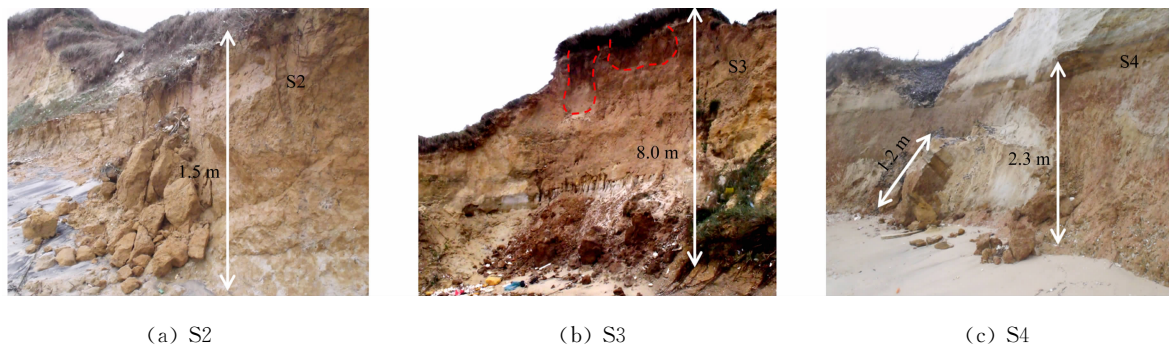


图 2 软质海崖滑塌图

Fig. 2 Collapse diagram of soft sea cliff

崖顶处引起较大的拉应力,当拉应力超过土体的抗拉强度时,崖顶产生裂缝.除 S3 外,其他滑塌处均存在剪切破坏.

2) 顶部破坏. 一般情况下,海崖底部的海蚀槽不会直接影响顶部土体的稳定性,但由于悬臂拉伸作用或干湿交替作用在海崖顶部形成裂缝,若遇强降雨时,裂缝内部可能充满雨水,此时,裂缝雨水对上部崖体形成一个水平向的推力,使裂缝底部的水平面上产生弯矩,若弯矩过大,则会产生拉裂破坏,导致顶部土体滑塌. S1, S3 和 S6 均存在顶部破坏.

### 3 现场量测

#### 3.1 尺寸量测

采用激光测距仪和皮尺测量滑塌物的尺寸. S7 的塌块滚落到距崖面 7.4 m 处,堆积坡度为  $31.4^{\circ}\sim 53.2^{\circ}$ ; S8 的滑塌物主要呈松散状; S2 的滑塌物主要呈块状;其余塌落处均是松散土体和块状土体的混合物,一些较大的块状滑塌物分布在外侧,滑塌后有向外滚动的迹象,滑塌块大小不等,小的边长几厘米,大的边长约 1 m.

此外,对海崖上部发育的裂缝和滑塌面的形状进行量测. 裂缝的深度一般为 0.5~2.6 m,裂缝距崖面的距离一般为 0.1~0.7 m; S1, S3 和 S6 的顶部存在明显的滑塌面,滑塌面呈长条形,长轴方向可为水平向或竖直向,滑塌面距离崖面的水平距离(滑面宽度)为 0.11~0.36 m.

#### 3.2 土体工程性质质量测

研究区的花岗岩风化残积土粘粒含量较高,处于超固结状态,具有较高的强度;老红砂长期处于压实状态,具有一定粘粒含量;风积砂覆盖在顶部,呈现松散状态. 在 9 处滑塌位置的海崖崖面上取残积土原状土样运回实验室,测量其主要的工程性质. 采用环刀法测量其重度,采用直剪(快剪)试验测量其粘聚力和内摩擦角,采用烘干法测量其含水量,各试验方法皆参照 GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》中的相关规定.

### 4 滑塌理论计算模型

分别建立两种滑塌类型的理论计算模型,分析滑塌形成的条件,预测软质海崖的稳定性及蚀退距离. 在滑塌计算分析中,海蚀槽的形状会影响计算结果. 根据现场调查结果,可将海蚀槽大致分为 V 型槽和 U 型槽<sup>[13-14]</sup>,为便于计算,文中皆简化为 V 型槽<sup>[15]</sup>.

#### 4.1 剪切破坏计算模型

由于剪切破坏是从崖顶裂缝的产生开始的,故采用悬臂梁模型进行分析. 目前,悬臂梁模型已应用于河流堤岸<sup>[16-17]</sup>、岩质海崖<sup>[4-6]</sup>的内部受力研究中. 软质海崖剪切破坏示意图,如图 3 所示. 图 3 中:  $\beta$  为崖前海滩坡度;  $H_c$  为海崖高度;  $d_w$  为海蚀槽槽高;  $d_n$  为海蚀槽槽深; ABCD 为海蚀槽上方悬臂体;  $F$  为悬臂体 ABCD 的重力引起的下滑力;  $y$  为裂缝深度;  $O$  为拉压应力零点;  $\sigma_{t,max}$  为最大拉应力;  $\sigma_{c,max}$  为最大压应力.

海蚀槽上方悬臂体 ABCD 的重力在海蚀槽后方的竖直面形成弯矩,上半部形成拉应力,下半部

形成压应力,在崖顶处,弯矩作用引起的拉应力最大.

根据材料力学原理,有

$$\sigma_{t,max} = M/W, \tag{1}$$

$$M = FI, \tag{2}$$

$$F = \frac{1}{2}(2H_c - d_w - d_n \tan \beta) d_n \gamma, \tag{3}$$

$$I = \frac{(3H_c - 2d_w - d_n \tan \beta) d_n}{3 \times (2H_c - d_w - d_n \tan \beta)}, \tag{4}$$

$$W = \frac{1}{6}(H_c - d_n \tan \beta)^2. \tag{5}$$

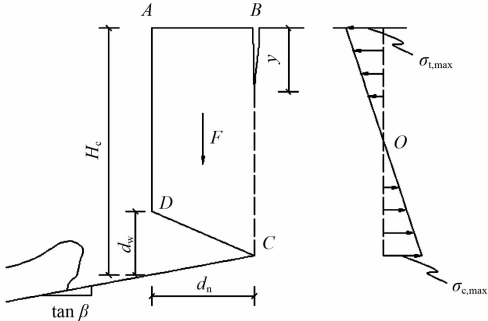


图 3 软质海崖剪切破坏示意图

式(1)~(5)中: $M$ 为悬臂体  $ABCD$  的重力在面  $BC$  引起的弯矩; $W$ 为抗弯截面系数; $I$ 为滑塌体重力作用点至面  $BC$  的水平距离; $\gamma$ 为海崖土体重度.

将式(3),(4)代入式(2),可得

$$M = \frac{1}{6}(3H_c - 2d_w - d_n \tan \beta) d_n^2 \gamma. \tag{6}$$

将式(5),(6)代入式(1),可得

$$\sigma_{t,max} = \frac{(3H_c - 2d_w - d_n \tan \beta) d_n^2 \gamma}{(H_c - d_n \tan \beta)^2}. \tag{7}$$

若此拉应力超过土体的抗拉强度  $s_t$ ,则崖顶出现裂缝.

根据线性摩尔库伦包线模型,拉应力在崖顶处最大,向下逐渐减小,其拉应力深度  $z_0$ <sup>[18-19]</sup>为

$$z_0 = \frac{2c}{\gamma} \tan \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right). \tag{8}$$

式(8)中: $c, \varphi$ 分别为土体的粘聚力和内摩擦角.

如果土体抗拉强度  $s_t$  为零,则裂缝深度与拉应力深度相同;反之,裂缝深度  $y$ <sup>[19]</sup>为

$$y = z_0 \left( 1 - \frac{s_t}{\sigma_{t,max}} \right), \tag{9}$$

$$s_t = c \cdot \tan \varphi. \tag{10}$$

裂缝的产生降低了滑动面的抗滑力,当悬臂体  $ABCD$  的重力引起的下滑力  $F$  超过面  $BC$  土体抗剪强度提供的抗剪力  $T$  时,发生滑动,则海崖稳定的安全系数  $K$  可表示为

$$K = \frac{T}{F} = \frac{2 \times (H_c - d_n \tan \beta - y) \tau_{cr}}{(2H_c - d_w - d_n \tan \beta) d_n \gamma}. \tag{11}$$

式(11)中: $\tau_{cr}$ 为土体的抗剪强度,根据库伦抗剪强度理论,  $\tau_{cr} = c + \sigma_n \tan \varphi$ ,对于竖直破坏面,正应力  $\sigma_n$  等于零<sup>[15]</sup>,因此,  $\tau_{cr} = c$ .

当安全系数  $K$  小于 1.0 时,海崖发生竖直剪切破坏;反之,海崖稳定.令安全系数  $K=1.0$ ,求解  $d_n$ ,即可得到蚀退距离.

4.2 顶部破坏计算模型

当海崖顶部的裂缝灌入雨水时,裂缝内的雨水对上部崖体形成水平向的推力,使裂缝底部的水平面  $CD$  产生弯矩,面  $CD$  的后半部产生拉应力,面  $CD$  的前半部产生压应力.软质海崖顶部破坏示意图,如图 4 所示.图 4 中:点  $C$  处的拉应力最大,若弯矩过大,点  $C$  会产生拉裂破坏,导致顶部土体滑塌.裂缝雨水产生的水压力  $p_w$  为

$$p_w = \frac{1}{2} \gamma_w h_w^2. \tag{12}$$

式(12)中: $\gamma_w$ 为雨水的重度; $h_w$ 为裂缝中雨水的深度.

根据材料力学原理,在面  $CD$  上产生的最大拉应力  $\sigma_{t,max}$  为

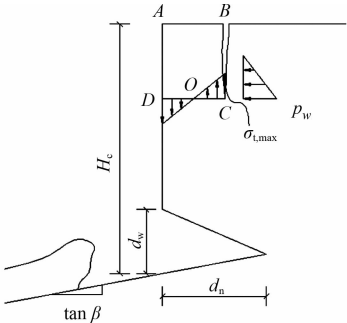


图 4 软质海崖顶部破坏示意图

Fig. 4 Diagram of top failure of soft sea cliff

$$\sigma_{t,\max}=\frac{\gamma_w h_w^3}{L^2}=\gamma_{\text{sat}} h_w+s_t.$$

(13)

式(13)中: $L$ 为裂缝距崖面的水平距离; $\gamma_{\text{sat}}$ 为土体饱和重度.

需要指出以下 2 点. 1) 崖顶裂缝形成后, 拉裂缝的开展和面  $BC$  上的应力分布将不断进行动态调整, 调整过程较为复杂, 剪切破坏计算模型对应力的重新分布调整进行简化处理. 2) 波浪力对海崖的稳定性也有影响, 当波浪朝向海崖运动或波峰作用时, 海崖受到波浪压力, 这对海崖稳定性有利; 反之, 当波浪远离海崖运动或波谷作用时, 海崖受到波浪拉力, 这对海崖稳定性不利. 然而, 此拉力作用的大小尚无法通过计算确定, 也无经验可参照, 故在建立剪切破坏和顶部破坏计算模型时, 仅考虑崖体重力和水体的推力作用, 并未考虑波浪力的作用.

## 5 应用与讨论

### 5.1 计算结果及分析

根据建立的计算模型分析平潭岛东北部 9 处滑塌的形成条件. 在计算模型中, 海蚀槽的槽高是一个重要的影响因素. 槽高与波浪条件、土质条件有关, 当波浪侵蚀力大于土体抗侵蚀力时, 侵蚀才会发生, 海蚀槽开始发育<sup>[1]</sup>. 一般情况下, 在静水位处, 波浪压力最大, 向上或向下则波浪压力减小. 现场观测的 4 个海蚀槽, 槽高为 0.56~1.20 m<sup>[8]</sup>. 由 S4 滑塌物堆积高度和崖高可知, 槽高约为 1.1 m. 对于某一波浪, 槽高可视为定值, 故假定槽高为 1.0 m, 崖前海滩坡度为 5.0°.

当海蚀槽的槽深发展到一定程度时, 海崖发生滑塌, 因此, 海蚀槽的最大槽深即每次滑塌造成的海崖蚀退距离. 为了验证计算模型的可靠性, 将蚀退距离(最大槽深)的计算值与实测值<sup>[20]</sup>进行比较.

软质海崖剪切破坏的相关参数, 如表 1 所示. 表 1 中:  $L_a$  为堆积距离;  $H_a$  为堆积高度;  $\omega$  为含水量;  $d_m, d_{n,\max}$  分别为蚀退距离的实测值和计算值;  $e$  为蚀退距离误差,  $e=|d_{n,\max}-d_m|/d_m\times 100\%$ .

表 1 软质海崖剪切破坏的相关参数

Tab. 1 Parameters related to shear failure of soft sea cliff

滑塌位置	滑塌物及海崖形态参数			土体性质参数				蚀退距离参数		
	$L_a/\text{m}$	$H_a/\text{m}$	$H_c/\text{m}$	$\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	$\omega/\%$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{^\circ})$	$d_m/\text{m}$	$d_{n,\max}/\text{m}$	$e/\%$
S1	3.0	3.5	7.5	18.9	18.5	14	17	0.58	0.80	37.9
S2	1.2	1.2	1.5	19.2	32.3	17	15	0.50	1.30	>100
S3	1.5	2.0	8.0	19.1	22.1	20	16	—	—	—
S4	1.6	1.7	3.5	19.0	24.6	22	15	0.32	0.51	59.3
S5	1.0	1.2	6.0	19.1	25.3	18	15	0.08	0.90	>100
S6	7.4	4.8	12.0	19.1	20.4	24	12	1.23	1.22	0.8
S7	4.6	4.5	13.0	18.8	31.5	15	17	0.89	0.87	2.2
S8	3.5	2.8	5.3	18.9	25.3	23	19	0.77	1.05	36.4
S9	1.8	1.1	2.0	18.5	17.6	13	20	0.41	0.91	>100

由表 1 可知: 海崖高度为 1.5~13.0 m, 滑塌物堆积高度为 1.1~4.8 m, 堆积距离多为 1.0~4.6 m, 少数塌块滚落至距崖面 7.4 m 处; 理论计算模型的蚀退距离为 0.51~1.30 m; S1, S6, S7 和 S8 的误差较小, 而 S2, S5 和 S9 的误差超过 100%. 由于 S4 的海崖顶部为风积砂, 厚度约为 1.2 m, 重度为 18 kN·m<sup>-3</sup>, 呈现疏松状态, 无粘聚力, 内摩擦角较小, 故忽略其破坏面上的抗剪强度, 但其重力加剧了下部花岗岩风化残积土的剪切破坏.

表 2 软质海崖顶部破坏的计算结果

Tab. 2 Calculation results of top failure of soft sea cliff m

滑塌位置	$h_c$	$h_s$	$b_s$	$h_{s0}$
S1	0.5~2.3	1.7~2.0	0.11~0.23	0.22~0.40
S3	2.3~2.6	2.2 1.2	0.13 0.15	0.26 0.30
S6	—	2.5	0.36	0.61

对于 S1, S3, S6 的顶部破坏, 当裂缝中的雨水累积到一定深度时, 顶部土体因悬臂形式弯矩过大而出现破坏. 软质海崖顶部破坏的计算结果, 如表 2 所示. 表 2 中:  $h_c$  为裂缝深度;  $h_s$  为滑面高度;  $b_s$  为滑面宽度;  $h_{s0}$  为滑塌临界水深. 由表 2 可知: 海崖顶部破坏的灌入裂缝的滑塌临界水深为 0.22~0.61 m.



5.2 滑塌物形态与海崖高度的关系

堆积距离  $L_a$ 、堆积高度  $H_a$ 、滑塌物体积  $V_a$  等滑塌物形态与海崖高度  $H_c$  之间具有一定的相关性。滑塌物形态与海崖高度的关系,如图 5 所示。图 5 中: $R$  为相关系数。

由图 5 可知:如果不考虑 S3,S5 的滑塌,滑塌物形态与海崖高度的相关性更为明显,相关关系可用指数形式表示。

将滑塌物的堆积形态视为三角形,则  $V_a$  为

$$V_a = 0.5L_aH_aL_{0a}.$$
 (14)

式(14)中: $L_{0a}$ 为纵向堆积长度。

由此可知,滑塌物的堆积距离、堆积高度和堆积体积均随崖高的增大而增大;崖高越大,在相同的蚀退距离情况下,滑塌物的体积越大,滑动到崖脚的惯性越大,堆积的距离也越大。未考虑 S3,S5 的原因是,S3 的崖高

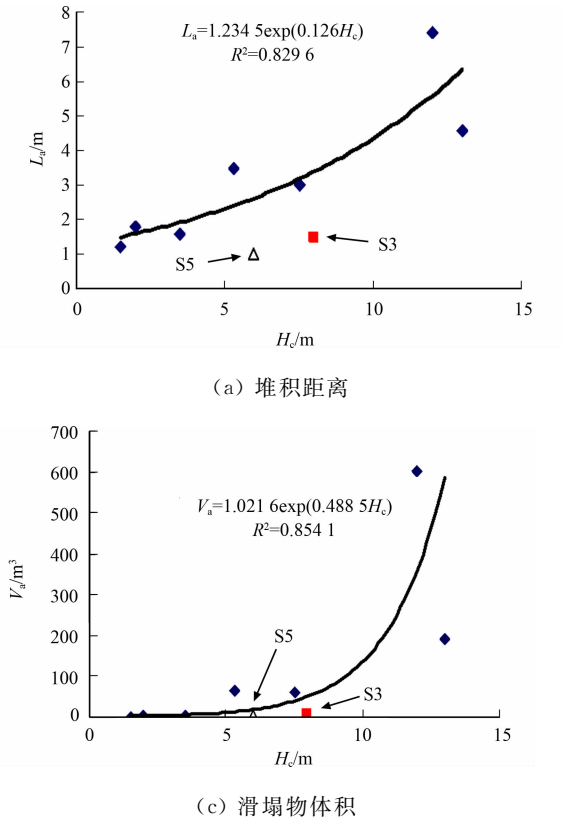


图 5 滑塌物形态与海崖高度的关系

Fig. 5 Relationship between form of collapse and height of sea cliff

虽然为 8.0 m,但仅为顶部破坏形式,而其他位置滑塌均为剪切破坏形式;S5 的堆积距离和堆积高度均较小,这是因为该处滑塌可能时间较长,滑塌物下部在强波浪作用下已有部分被搬运,导致堆积距离减小,上部滑塌物向下移动,堆积高度减小,而其他位置的滑塌物,由于波浪作用较小而忽略了波浪对滑塌物的搬运作用。

5.3 海蚀槽槽深与滑塌的关系

海蚀槽槽深对滑塌的影响较大,随着海蚀槽逐渐发育,上覆土体的重力越来越大,即下滑力越大,海崖越容易发生剪切破坏,产生滑塌。当安全系数  $K$  小于 1.0 时,海崖发生剪切破坏。以 S1,S5 和 S7 为例,海蚀槽槽深与安全系数的关系,如图 6 所示。由图 6 可知:随着槽深的增大,安全系数明显降低;当 S1,S5 和 S7 处滑塌发生时,其临界槽深分别为 0.80,0.90 和 0.87 m。

5.4 破坏过程

通过分析滑塌物特征、滑动面形态和滑塌计算理论,可以总结出该研究区滑塌的主要模式及过程。

1) 剪切破坏过程。剪切破坏过程示意图,如图 7 所示。该类破坏形式从崖脚海蚀槽的形成开始,在台风天气下,崖前出现增水,强烈的破碎波冲击到崖脚处,对海崖的作用力有波浪对崖面的循环冲击压力、水流方向改变形成的涡流力和波浪携带的泥砂对崖面的磨蚀力。这些作用力导致海崖崖脚土体侵蚀,进而形成海蚀槽。当海蚀槽发育到一定程度时,槽顶上覆土体在重力作用下类似悬臂梁,顶部处于受拉状态,下部处于

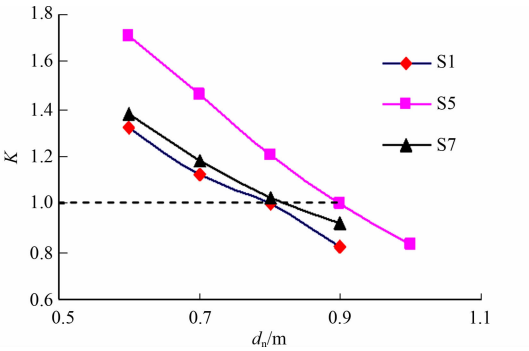


图 6 海蚀槽槽深与安全系数的关系

Fig. 6 Relationship between depth of sea-eroded notch and safety factor

受压状态,当崖顶处的最大拉应力超过了土体抗拉强度时,产生一竖直裂缝.当裂缝向下延伸到一定深度时,滑塌体在重力作用下沿竖直面发生剪切破坏.滑塌物堆积在坡脚,对海崖临时起到保护作用,但滑塌物由于受到扰动,其强度比原状土低,相对容易发生侵蚀,因此,滑塌物脚部容易出现陡坎或小型海蚀槽.随着滑塌物的侵蚀,上部的滑塌物发生下移,使堆积高度减小(如 S5),最终全部滑塌物被波浪搬运掉.至此,一个完整的剪切破坏过程结束,待下一轮破坏开始.

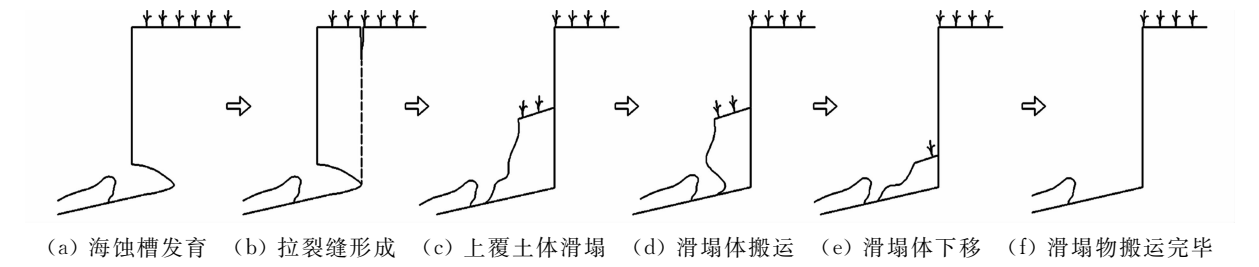


图 7 剪切破坏过程示意图

Fig. 7 Diagram of shear failure process

2) 顶部破坏过程. 顶部破坏过程示意图,如图 8 所示. 顶部破坏从崖顶裂缝形成开始,崖顶土体在降雨和日晒作用下,由于干湿循环作用,容易形成拉裂缝.雨水灌入拉裂缝内,对临空面方向的土体产生水平推力,使滑塌体顶部形成拉应力,当拉应力过大时,滑塌体坠落在崖脚处.此后遇到波浪作用时,滑塌物同样发生侵蚀和搬运,搬运完毕后,崖脚处可能开始发育海蚀槽.

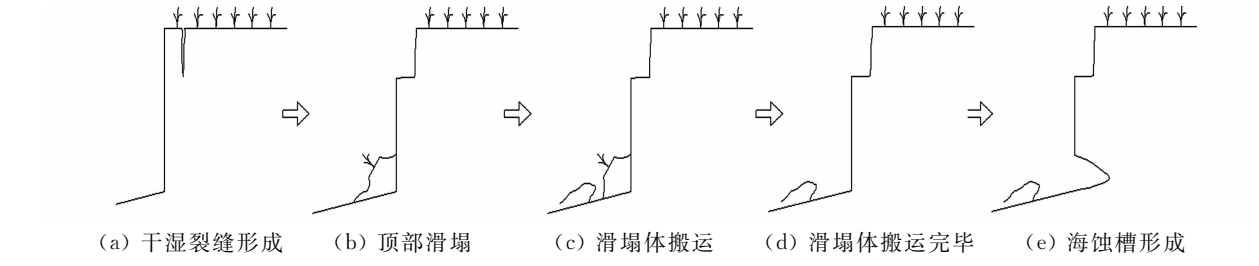


图 8 顶部破坏过程示意图

Fig. 8 Diagram of top failure process

## 6 结论

对福建省平潭岛东北部软质海崖的滑塌状况进行现场调查,量测崖脚滑塌物的堆积距离、堆积高度和堆积体积,分析土体工程性质;建立两类滑塌的理论计算模型,分析海蚀槽发育的最大深度,预测每次滑塌的蚀退距离;最后,讨论滑塌具体过程.由此得到以下 5 个结论.

- 1) 研究区共发现 9 处滑塌,海崖高度主要为 1.5~13.0 m,滑塌物堆积高度为 1.1~4.8 m,堆积距离多为 1.0~4.6 m,少数塌块滚落至距崖面 7.4 m 处,堆积坡度为 31.4°~53.2°.
- 2) S1, S3 和 S6 滑塌处顶部存在竖直的裂缝和滑塌面,裂缝的深度一般为 0.5~2.6 m,裂缝距崖面的距离一般为 0.1~0.7 m.滑塌面距离崖面的水平距离为 0.11~0.36 m.
- 3) 研究区的滑塌包括剪切破坏和顶部破坏两种类型,剪切破坏的破坏面几乎完全垂直,主要是由海蚀槽发育导致崖顶形成拉裂缝后的剪切作用引起的;顶部破坏的破坏面呈 L 形,主要是由崖顶干湿收缩裂缝遇到雨水灌入后引起的.
- 4) 通过理论计算模型得到的蚀退距离(最大槽深)为 0.51~1.30 m,海崖顶部破坏的灌入裂缝的滑塌临界水深为 0.22~0.61 m,海崖稳定性随着海蚀槽槽深的增大而降低.
- 5) 滑塌物的堆积距离、堆积高度和滑塌物体积与海崖高度有较强的相关性,可以用指数形式表示它们之间的关系.

## 参考文献:

[1] SUNAMURA T. The geomorphology of rocky coasts[M]. Chichester: Wiley, 1992.

- [2] LEE E M. Landslide risk management: Key issues from a British perspective[M]//Landslide Risk Assessment. Rotterdam: Balkema, 1997. DOI:10.1201/9780203749524-13.
- [3] LEE E M, HALL J W, MEADOWCROFT I C. Coastal cliff recession: The use of probabilistic prediction methods[J]. *Geomorphology*, 2011, 40(3/4): 253-269.
- [4] KOGURE T, AOKI H, MAEKADO A, *et al.* Effect of the development of notches and tension cracks on instability of limestone coastal cliffs in the Ryukyus, Japan[J]. *Geomorphology*, 2006, 80(3): 236-244. DOI:10.1016/j.geomorph.2006.02.012.
- [5] KOGURE T, MATSUKURA Y. Critical notch depths for failure of coastal limestone cliffs: Case study at Kuroshima Island, Okinawa, Japan[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(9): 1044-1056. DOI:10.1002/esp.1940.
- [6] KOGURE T, MATSUKURA Y. Threshold height of coastal cliffs for collapse due to tsunami: Theoretical analysis of the coral limestone cliffs of the Ryukyu Islands, Japan[J]. *Marine Geology*, 2012, 323/324/325: 14-23. DOI:10.1016/j.margeo.2012.07.014.
- [7] YOUNG A, ASHFORD S A. Instability investigation of cantilevered seacliffs[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2008, 33(11): 1661-1677. DOI:10.1002/esp.1636.
- [8] 常方强, 孟希, 罗才松. 激光测距仪在海崖剖面形态快速测量中的应用[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2015, 36(2): 215-220. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.02.0215.
- [9] 孙全, 常方强. 极端海况下软质海崖大规模蚀退计算模型研究[J]. *应用海洋学学报*, 2015, 34(3): 334-339. DOI:10.3969/J. ISSN.2095-4972.2015.03.005.
- [10] 刘建辉. 福建砂质海岸侵蚀机制及影响因素分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [11] 刘建辉, 蔡锋, 雷刚, 等. 福建软质海崖蚀退机理及过程分析: 以平潭岛东北海岸为例[J]. *海洋环境科学*, 2010, 29(4): 525-530.
- [12] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志: 第七分册[M]. 北京: 海洋出版社, 1991.
- [13] WZIA TEK D, VOUSDOKAS M V, TERE FENKO P. Wave-cut notches along the Algarve coast, S. Portugal: Characteristics and formation mechanisms[J]. *Journal of Coastal Research*, 2011, 64: 855-859. DOI:10.1080/15459624.2011.569314.
- [14] PIRAZZOLI P A, MARINE N. Sea-level research: A manual for the collection and evaluation of data[M]. Norwich: Geo Books, 1986.
- [15] ERIKSON L H, LARSON M, HANSON H. Laboratory investigation of beach scarp and dune recession due to notching and subsequent failure[J]. *Marine Geology*, 2007, 245(1/2/3/4): 1-19. DOI:10.1016/j.margeo.2007.04.006.
- [16] THORNE C R, TOVEYN K. Stability of composite river banks[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1981, 6(5): 469-484. DOI:10.1002/esp.3290060507.
- [17] ABAM T K S. Genesis of channel bank overhangs in the Niger Delta and analysis of mechanisms of failure[J]. *Geomorphology*, 1997, 18: 151-164.
- [19] LOHNES R, HANDY R. Slope angles in friable loess[J]. *Journal of Geology*, 1968, 76(3): 247-258. DOI:10.1086/627327.
- [20] 常方强. 福建省平潭岛东北部软质海崖蚀退特征研究[J]. *海洋科学*, 2016, 40(4): 100-107.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)