

福建省平潭岛东北部软质海崖蚀退特征研究

常方强

(华侨大学 岩土工程研究所, 福建 厦门 361021)

摘要: 为了揭示软质海崖的侵蚀机制, 现场利用量测方法研究了福建省平潭岛东北部软质海崖的蚀退特征、蚀退模式和影响因素, 并利用自制崩解仪测试了砂土和粉质黏土的崩解速率。结果表明, 软质海崖滑塌物体积、堆积距离均随海崖高度增加而增大, 每次滑塌海崖蚀退距离位于 0.08~1.23 m; 滑塌物覆盖住崖脚后具有临时保护崖脚的作用, 但由于其受到扰动较易发生再次蚀退; 崖脚海蚀槽的形成对滑塌起到重要控制作用; 降雨、海洋水动力、强风和人为活动是造成蚀退的四大因素; 在土体抗侵蚀方面, 砂土的抗侵蚀能力最弱, 粉质黏土的居中, 黏土的最强; 现场干燥粉质黏土的崩解速率为 2.4 cm/min。

关键词: 软质海崖; 蚀退; 崩解

中图分类号: P642.5 文献标识码: A
doi: 10.11759/hyxx20140312003

文章编号: 1000-3096(2016)04-0100-08

软质海崖蚀退是一个全球性的问题, 全球蚀退的海岸类型多样, 其中软质海岸因其蚀退速率较快、规模较大而成为一种重要的蚀退海岸类型。软质海岸一般由第四纪沉积层、基岩风化层、残坡积层或风成砂地等软性或疏松地层组成^[1], 相对于岩质海岸而言, 软质海岸强度较低, 在波浪作用下容易发生侵蚀, 蚀退速率较高。世界上许多软质海崖的蚀退已引起了众多学者的关注, 文献[2-4]调查研究了美国加利福尼亚州软质海崖的蚀退, 分析了蚀退速率和诱发因素; 文献[1]调查测试了福建省平潭岛软质海崖的蚀退速率, 并分析了侵蚀原因。

然而, 我国对于软质海崖的蚀退研究仍相对比较落后, 对于蚀退规模、过程和机制等缺乏较为系统的研究。因此, 本文以福建省平潭岛东北部软质海崖为例, 利用现场调查与测试的手段, 研究我国东南沿海软质海崖的蚀退特征与过程, 为更深层次的机理研究奠定基础。

1 蚀退特征

1.1 滑塌概述

本次调查研究集中在平潭岛流水码头至大澳村(下称研究区)一段海岸线上, 见图 1 所示, 着重调查海崖的几何尺寸、滑塌特征、土层分布和土性等。研究区断裂带发育较为密集, 约 1 km 的海崖上发育了两条断裂带, 形成了高约几米的冲沟, 沟底与海滩齐平, 上宽下窄,

宽度从几米至十几米不等。冲沟两侧土体侵蚀严重, 每逢降雨冲沟土体还受降雨雨水的冲刷作用。软质海崖高度不等, 低的为 2~3 m, 高的达到 13.0 m。研究区存在 9 处滑塌堆积体, 位置见图 1 所示。滑塌物主要为粉质黏土(花岗岩残积土)和砂土, 大都呈现松散状, 少数为块状, 并且具有棱角, 尺寸大小不等, 小的十几厘米, 大的将近 1 m, 滑塌物大都呈干燥状态。研究区软质海崖土体种类包括粉质黏土、砂土和黏土 3 种, 粉质黏土为花岗岩残积土, 主要分布在海崖顶部, 离流水码头 440~540 m 距离处, 粉质黏土顶部覆盖有砂土, 砂土松散、灰白色、含水量较低, 为海滩上的砂土经大风吹到海崖顶部形成的风积砂。少量黏土和花岗岩分布在海崖底层, 其强度较高, 抗侵蚀能力较强, 向海洋方向凸出。

1.2 滑塌规模

现场量取海崖高度 H_0 和堆积在崖脚的各处滑塌物几何尺寸, 包括滑塌物的堆积高度 H 、堆积宽度 W 和堆积距离 L , 计算滑塌物的体积 V , 结果列于表 1, 海崖高度与滑塌物体积、堆积距离 R_c 的关系绘制于图 2 中。

收稿日期: 2014-03-12; 修回日期: 2014-08-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41306051); 福建省自然科学基金项目(2015J01625)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41306051; Natural Science Foundation of Fujian Province, No. 2015J01625]

作者简介: 常方强(1980-), 男, 山东青州人, 博士, 副教授, 从事海岸与海洋工程地质研究及教学工作, 电话: 15359227011, E-mail: changfq@hqu.edu.cn

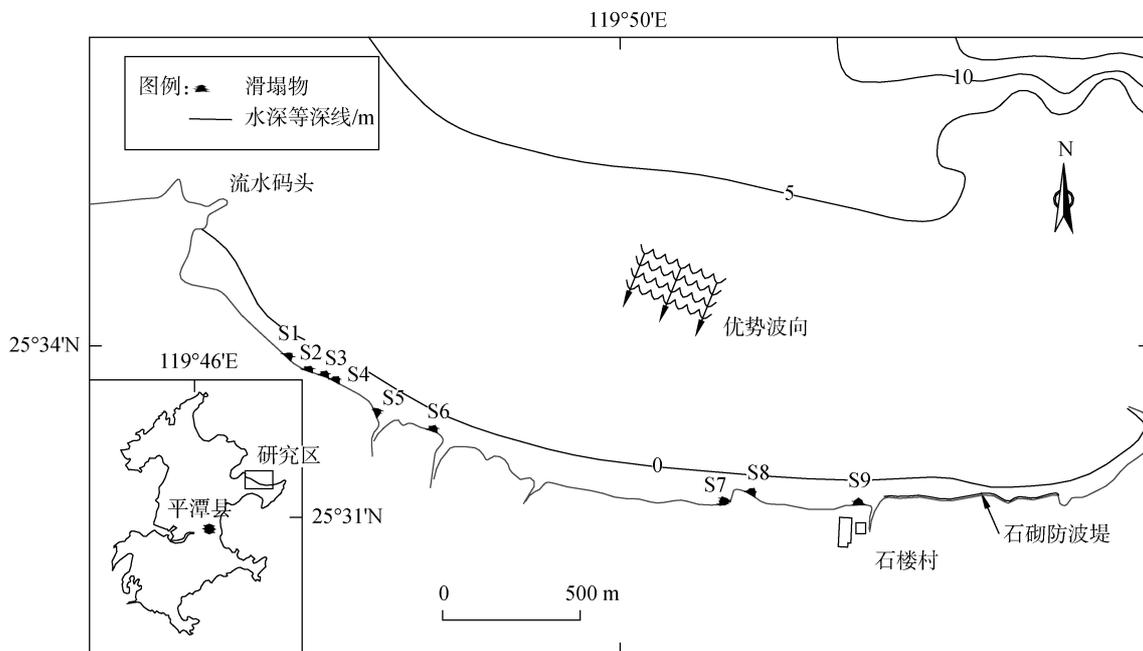


图1 研究区及各滑塌物位置图

Fig. 1 Location of the study area and slumps

表1 研究区各滑塌物特征

Tab. 1 Characteristics of the slumps in the study area

滑塌物位置	L (m)	H (m)	H_0 (m)	L/H_0	W (m)	V (m ³)	R_c (m)
S1	3	3.5	7.5	0.40	12.0	63	0.58
S2	1.2	1.5	1.5	0.80	1.0	0.9	0.50
S3	1.5	2.0	8.0	0.19	6.5	9.75	0.16
S4	1.6	1.7	3.5	0.46	2.2	2.992	0.32
S5	1.0	1.2	6.0	0.17	4.4	2.64	0.08
S6	7.4	4.8	12.0	0.62	34.0	603.84	1.23
S7	4.6	4.5	13.0	0.35	18.5	191.475	0.89
S8	3.5	2.8	5.3	0.66	13.0	63.7	0.77
S9	1.8	1.1	2.0	0.90	3.0	2.97	0.41

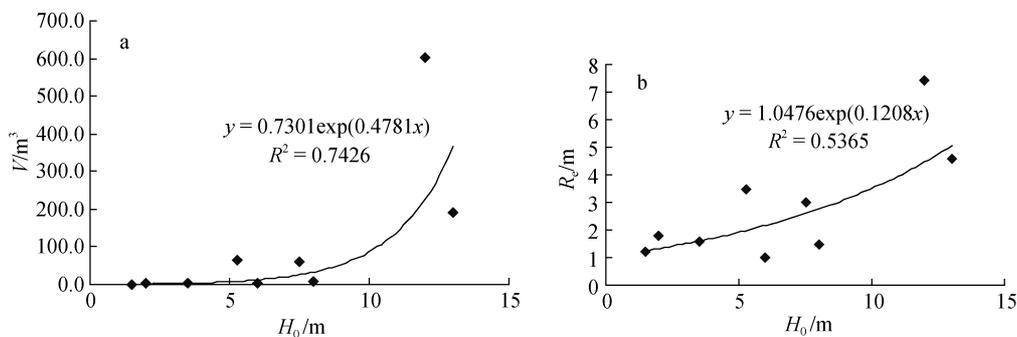


图2 平潭岛海崖高度与滑塌物特征的关系

Fig. 2 Relationship between the sea-cliff height and the characteristics of slump on the Pingtan Island

a. 海崖高度与滑塌物体积的关系; b. 海崖高度与堆积距离的关系

a. Relationship between the sea-cliff height and volume of the slump; b. Relationship between the sea-cliff height and the accumulating distance

可以看出,滑塌物体积变化较大,从不到 1 m^3 至 600 多 m^3 ,滑塌物体积随海崖高度的增加而增大,两者近似呈指数关系,当海崖高度较小时,滑塌物体积也较小,但当海崖高度为 4 m 以上时,滑塌物体积随海崖高度的增大而迅速增大。滑塌物堆积距离与海崖高度也有关,也随海崖高度的增加而增大。 L 与 H_0 的比值 L/H_0 反应出海崖土体的结构强度, L/H_0 的大小与土性有关,土质越疏松,其结构强度越低,流动性越好, L/H_0 越大。研究区内 L/H_0 位于 0.17~0.90,平均值为 0.50。文献[5]指出英国苏塞克斯东部海崖 L/H_0 位于 1.0~1.3,比平潭岛东北部软质海崖的要大,表明其流动性比平潭岛的要好。

为了分析一次滑塌导致的海崖蚀退距离,根据滑塌物的 V 和滑动体高度 H_1 、 W 进行计算,海崖蚀退距离可表示为:

$$R_e = \frac{V}{KH_1W} \quad (1)$$

式中, K 为堆积体积膨胀系数。

滑塌体散落到海滩上后,其堆积体积比滑塌体实际体积要大,文献[2-3]通过研究滑坡的体积膨胀系数,指出堆积体体积约增大 16%~30%,因此本文取 20%进行计算,即 $K=1.2$ 。大部分滑动面基本贯穿于整个坡面上,因此假定 $H_1=H_0$ 。经计算,每次滑塌海崖的蚀退距离位于 0.08~1.23 m,见表 1 所示。

1.3 滑塌物再次蚀退

滑塌物堆积在海崖坡脚处,短期内可以保护崖脚,防止海崖受到海水的侵蚀。这些滑塌物大部分为砂土和粉质黏土,其中砂土呈松散状,粉质黏土为花岗岩残积土,呈现块体,位于堆积体的最外侧,S4、S6 和 S7 位置处的滑塌块体直径均达到 1 m。滑塌块体的直径与粉质黏土层的厚度与土体黏粒含量有关,厚度和土体黏粒含量越高,胶结性越强,滑塌块体的直径越大。块体直径也反应出了每次的蚀退距离,即蚀退距离大于或等于块体直径。滑塌物在日晒和风吹作用下,含水量较低,处于坚硬状态,强度较高。S2 处滑塌体处于潮湿状态,对应海崖处的土体也比较潮湿,由此判断该滑塌体在几天内刚刚发生的。

处于干燥状态的滑塌物在遇到水分时,包括海水和降雨,容易产生崩解,崩解后的土体被水流带走。每天高潮期间,海水到达滑塌物下部,滑塌物产生崩解后,在水动力作用下搬运到它处,导致滑塌

物的再次蚀退,在滑塌物底部形成陡坎,S6 处的滑塌物及陡坎,如图 3 所示。极端海况下,风浪引起海崖前方增水,滑塌物可能全部被增水淹没,引起更大体积的滑塌物发生崩解与运移,其蚀退量与波浪强度、持续时间与土体性质等有关。

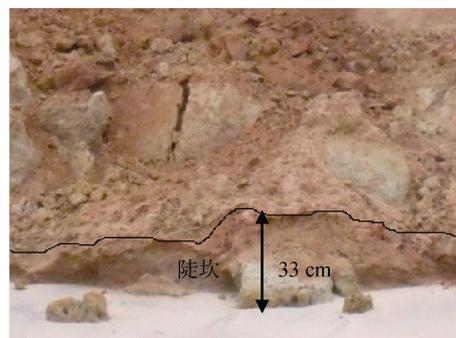


图 3 滑塌物再次蚀退形成的陡坎
Fig. 3 Scarp formed by the slump re-erosion

滑塌物滑落到坡脚以后形成坡积体,覆盖住坡脚,保护后方未滑动的海崖免受侵蚀;滑动体相对于滑动前,内部结构受到扰动,强度降低,更易遭受侵蚀;大块的滑塌物,在水流作用下可能以滚动的形式滚入深水中;随着滑动体的逐渐侵蚀,未滑动体的坡脚暴露出来后,新一轮的海崖蚀退过程又会开始。

1.4 滑塌模式

研究区海崖坡体的滑塌首先是在坡脚位置处开始的,波浪和潮流垂流向崖面时,遇到崖面后方向改变,在崖脚处形成涡流,涡流加大土体的侵蚀,形成海蚀槽,研究区内,在发现的一处粉质黏土坡脚处,观测到一深度为 0.6 m,高度为 1.0 m 的海蚀槽,呈现 U 型。海蚀槽形成后,上部土体失去支持,在重力作用下,下部滑塌体牵引上部滑塌体,当滑动体沿某一面上的下滑力超过了抗滑力,发生滑塌,因此该处海崖滑塌属于牵引式滑塌。滑塌面有两种形式,一种是滑动面通过海崖的顶部,另一种是滑动面通过海崖的坡面面,其形成过程如图 4 所示。研究区内的 9 处滑塌均属于第一种情况,但在大埕村一段海岸处存在着第二种滑塌面。波浪作用下海蚀槽的发育是海崖一个蚀退过程的首步,至滑塌物完全搬运掉结束,所以软质海崖的蚀退过程可以概括为:海蚀槽发育→上覆土体滑塌→滑塌物侵蚀→海蚀槽再次发育。

相比岩质海崖,软质海崖强度较低,一次极端

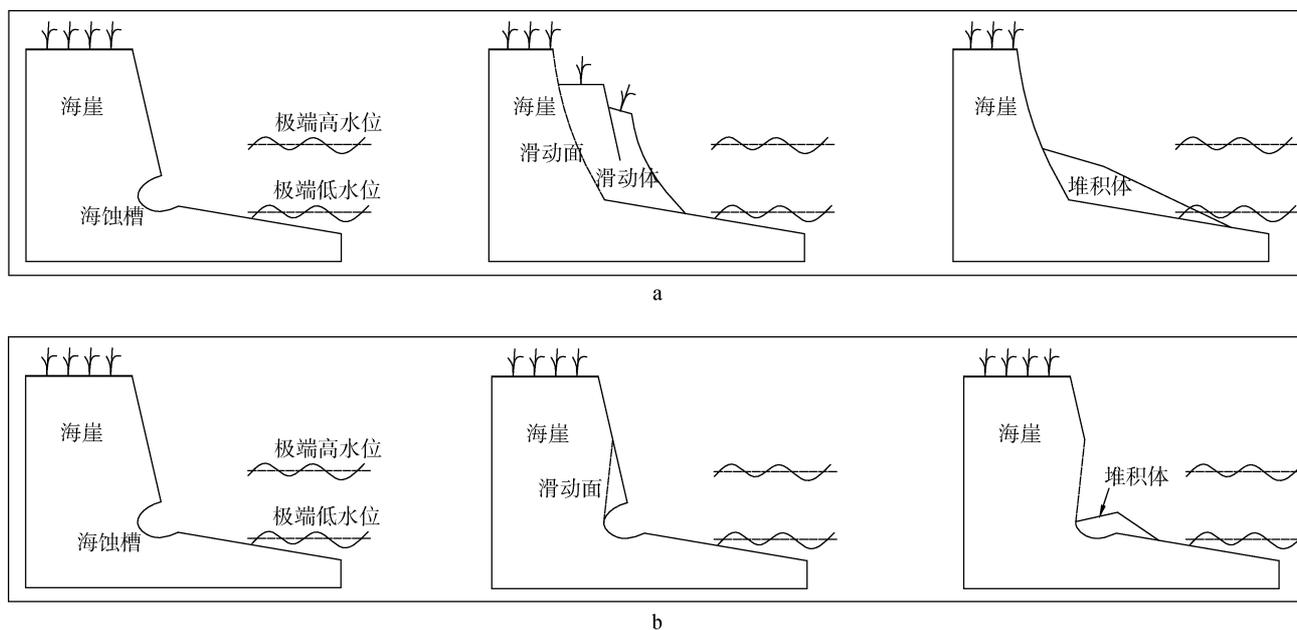


图 4 极端海况下软质海崖的滑塌模式

Fig. 4 Slump patterns of the soft sea cliff at extreme sea conditions

a. 滑动面通过海崖顶部; b. 滑动面通过海崖面部

a. Sliding surface through the top of the sea cliff; b. Sliding surface through the sea-cliff face

海况的波浪作用容易导致上覆土体出现滑塌，导致海蚀槽消失，所以软质海崖的海蚀槽相对较为少见。调查中的岸段存在 9 处滑塌，仅 1 处海蚀槽。文献[6]调查葡萄牙奥格乌 28 km 的岩质海崖，发现了 244 处海蚀槽，平均 115 m 长度存在 1 处，其中 58% 呈现 U 型，40% 呈现 V 型，其余呈 W 型等。

2 蚀退影响因素

影响平潭岛软质海崖蚀退的因素包括两大类，即外部因素和内部因素，外部因素包括降雨、海洋水动力、强风和人为活动 4 个方面；内部因素包括土体种类、强度、颗粒粒径大小与组成等。

2.1 外部因素

2.1.1 降雨

研究区雨量充沛，且多集中于梅雨季节，连续降雨时间较长。年平均降水日数为 100~130 d，3~9 月占 64%，10~2 月占 36%。全年暴雨平均日数约 3.0~4.5 d，主要是梅雨暴雨和台风暴雨。暴雨多出现在 5~9 月，其中 5~6 月梅雨季暴雨占 41.4%；7~9 月，台风季暴雨占 42.8%；大暴雨以 6 月最多，占全年总次数的 44.7%，7、8、9 三个月占 50%。暴雨强度以 9 月为最大，历年平均在 100 mm/d 以上；6、7 月次之，接近 100 mm/d^[1]。

降雨诱发软质海崖蚀退机制有三：(1)加剧表层土体侵蚀，雨水沿坡面流动时，对土体表面形成剪应力，若该剪应力超过了土体抗侵蚀临界剪应力，土体发生侵蚀，进而形成侵蚀沟槽。现场调查中发现，某些海崖坡面上存在几乎平行的沟槽，沟槽深度约为几厘米至十几厘米，大多存在于砂土层中，如图 5 所示，其他土体，如花岗岩残积土、黏土中则较少出现，表明砂土易遭受雨水的侵蚀；(2)雨水渗入海崖后，导致土体重量增大和抗剪强度的降低，增大了土体的下滑力，减低了抗滑力，容易诱发海崖沿某一面发生滑动；(3)雨水进入海崖后，形成地下水，地下水沿坡体薄弱通道流动，从坡面处流出，若沿着砂土流动，如图 5 所示，可能导致流砂，加剧海崖的蚀退。

降雨在地表形成的集中水流能够切割海崖，在海崖上形成较大的冲沟，破坏了海崖在纵向上的连续性，这种现象也存在于美国加利福尼亚州西海岸。

2.1.2 海洋水动力

该区水动力作用较强，据统计 1973~2008 年间，影响平潭的台风达 157 次，平均每年为 4.5 次^[1]。每年 5 月到 11 月是台风影响的集中时间段，特别是每年的 7~9 月，约占总次数的 70%。根据平潭海洋站 (119°51'E, 25°27'N) 监测的 21 a 波浪统计资料，该区

在台风期间一般最大波高 H_{\max} 为 7.1~9.5 m, 最大可达 16.0 m, 平均波浪周期 T 为 5.3~5.4 s^[7]。

根据历年统计资料, 该区潮流属半日潮流, 表层涨潮流流速最大可达 83 cm/s, 流向 252°, 落潮流最大流速为 78 cm/s, 流向 93°; 底层涨潮流流速最大可达 76 cm/s, 流向 272°, 落潮流最大流速为 78 cm/s, 流向 90°。最高潮位 7.32 m, 最低潮位 -0.22 m, 平均高潮 5.85 m, 平均低潮 1.78 m, 平均海面 3.76 m^[7]。

在极端海况下, 风暴潮引起海崖处的水深激增, 破碎波拍打在海崖面上, 对海崖形成一动力作用, 造成砂土液化、黏土软化, 强度降低, 在重力和波浪剪应力作用下发生破坏。破坏的土体滑落到海崖底部, 在水动力作用下搬运到其他位置, 搬运的过程中, 还可对下部土体产生磨蚀作用, 加剧下部海滩土体的侵蚀。

极端海况下的海洋水动力作用要比正常海况下的大很多, 故一次强台风诱发的蚀退量巨大, 但是

正常海况下每天潮水的涨落对海崖蚀退也有重要影响, 尤其是滑塌后的砂土, 遇到潮水后, 容易产生崩解, 崩解后在潮水作用下容易发生运移。

2.1.3 强风

平潭岛上的强风对海崖蚀退也有影响, 在某些强度较低的崖面上, 强风可能吹走某些黏性较小的细小砂土颗粒。在调查中, 发现一迎风崖面上发育有众多密集的圆锥凸起, 直径一般小于 1.0 cm, 高度小于 3.0 cm, 凸起的方向刚好与来风方向平行, 如图 5 所示。强风一方面对海崖蚀退有贡献, 另一方面又能将砂土吹到海崖顶面, 形成风积砂层, 或形成砂坝, 但这些风积砂层往往处于干燥状态, 强度较低, 在强风作用下可进一步向背离海崖的方向移动; 遇到降雨或强风浪, 又极易容易侵蚀, 重新回到海滩上。

2.1.4 人为活动

在调查中发现, 海滩上有若干取砂车, 图 5 所示, 将滩面上沉积的砂土取走, 用以做建筑材料。取砂活动降低了海滩面的高度, 能够加剧海崖的蚀退。



图 5 平潭岛软质海崖蚀退的外部影响因素实景图

Fig. 5 Photos of external influencing factors relating to the soft sea-cliff retreat on the Pingtan Island

2.2 内部因素

2.2.1 土体种类与强度

土体工程性质影响海崖的蚀退速率, 包括土体种类、重度、含水量、颗粒组成和强度等。通过调

查发现, 研究区软质海崖土体主要为砂土、粉质黏土和黏土 3 种, 其主要工程性质见表 2 所示。

这 3 种土体的抗侵蚀能力不同, 砂土的最低、粉质黏土居中、黏土最强, 在同样水动力条件下, 蚀退

表 2 3 种土体的主要物理力学性质指标

Tab. 2 Physical and mechanical indices of three soil types

土体	重度(kN/m ³)	含水量(%)	中值粒径(mm)	不排水抗剪强度(kPa)
砂土	-	8.2~13.0	0.092	-
粉质黏土	18.2~19.3	23.2~30.1	0.035	33.5~63.1
黏土	18.9~20.1	25.3~30.6	0.002	58.4~93.3

注：“-”表示无数据

量也不同。砂土主要为风积砂，主要矿物为石英、长石和黑云母，由于无黏性，在水动力作用下极易发生崩解和运移；粉质黏土和黏土主要是花岗岩风化残积土，具有较高的强度，特别是位于海崖下部的黏土，黏粒含量较高，可塑性较强，在上覆几米至十几米高土体的重力作用下，固结程度较高，超固结比 OCR 位于 5.5~9.1，强度可达 58.0 kPa 以上，在水动力作用下不易遭到侵蚀。

调查中还发现同一海崖断面上从上到下分别为砂土、粉质黏土和黏土层，其中，砂土的蚀退量最大，粉质黏土的居中，黏土层的最小，最下部的黏土层向海洋方向延伸出形成台地，如图 6 所示。海滩上形成有黏土残留体，图 6 所示，该残留体长度为 8.71 m，宽度为 1.33 m，高度为 0.34 m。海崖坡角处的黏性土具有的较强抗侵蚀能力，能够有效保护坡脚免受侵蚀，海崖蚀退速率相对缓慢。

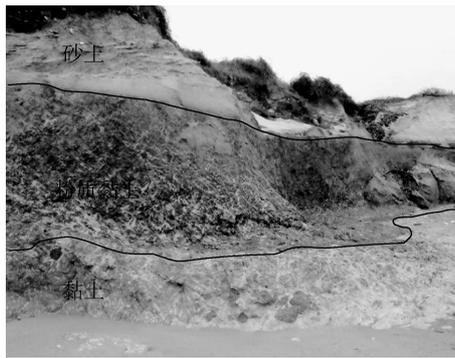


图 6 蚀退过程中形成的黏土台阶和黏土残留体

Fig. 6 Clay steps and residues after retreat

2.2.2 土体崩解性

土体在受到降雨或海洋水动力作用时，水分进入土体内部后，可产生崩解作用，进而加剧海崖蚀退。土体崩解后，强度丧失，随之土颗粒脱离出来进入水体内部。该调查中，同时进行了土体崩解试验以测试不同土体的崩解性。试验装置包括支架、弹簧秤、绳索、金属网、水桶和计时器，其结构形式如图 7 所示。研究区内风速较大，为了避免大风对试验的影响，试验选在废弃的船体内部进行。将一根木棍固定在船体上作为支架，利用包皮电线作为绳索，将弹簧秤固定在支架上，弹簧秤采用电子数显式的，金属网为铁丝编制的网子，网格大小为 1.0 cm × 1.0 cm，金属网呈正方形，边长为 20 cm，水桶为塑料桶，直径和高度均为 30 cm，计时器采用手表。

在海崖上取土样，将土样削成立方体，边长、宽均为 10 cm，高度为 15 cm；将绳索绑扎在金属网的

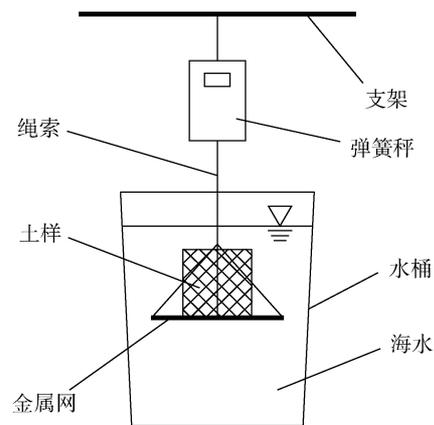


图 7 崩解试验装置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the disintegration of test device

4 个角上，并将土样放置在金属网上；然后用弹簧秤称取重量后，将弹簧秤挂在支架上，使得土样全部淹没在海水中，开始计时读数，每 10 s 钟读取

一次弹簧秤读数；随着土样的崩解，弹簧秤读数逐渐降低，其差值即为土样的崩解量。试验中测试的土样分别为干燥粉质黏土、潮湿粉质黏土、潮湿黏土和潮湿砂土，其中，干燥粉质黏土和潮湿砂土随着时间 t 的测试结果绘制于图 8 中。其中崩解率 a 定义为：

$$a = \Delta m / m_0$$

式中， Δm 为土样不同时间崩解的质量， m_0 为土样崩解前的质量。

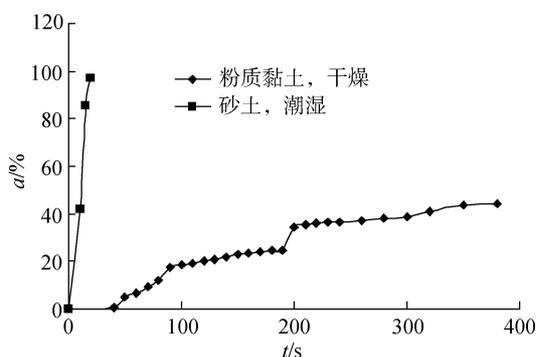


图 8 试验土样随时间的崩解率
Fig. 8 Disintegration rate of soil samples

可以看出，潮湿砂土的崩解速度非常快，放入海水中后约 20 s，土样完全崩解；干燥粉质黏土的崩解较快，约 1 min 后崩解率达到 44%。潮湿粉质黏土和黏土的崩解速度非常慢，经历 0.5 h 后，土样几乎没有任何质量丧失，后来将土样放置到潮水中，测试水动力作用下的崩解量，经历 0.5 h 后，也几乎没有崩解。

试验中，干燥粉质黏土和砂土放入海水中后，大量气泡冒出，随之海水变得浑浊。这是因为干燥的粉质黏土土样存在众多孔隙，内部填充有空气，当进入水后，海水将孔隙内部的空气挤出，产生气泡冒出水面；气泡的冒出带动崩解的细小颗粒运动，使得海水变得浑浊；而潮湿的粉质黏土和潮湿黏土土样试验时，没有气泡产生，海水仍十分清澈。试验结束后，砂土散落在水桶的底部，而干燥粉质黏土土样崩解成球形，如图 9 所示，滚落到水桶底部，试验结束。

试验中的土样崩解是从 6 个面发生的，而海崖土体产生崩解时，只有临空面产生崩解，其余 5 个面由于周围土体的覆盖不会崩解。土样每个面上的崩解速率视为相同，则经过换算知每个面在 1 min 后约崩解的厚度为 2.4 cm，即得到干燥粉质黏土的崩解速率为 2.4 cm/min，即对于海崖坡面的干燥粉质黏土，每分钟崩解的厚度为 2.4 cm。

某些海崖坡面或滑塌物暴露的空气中，随着时



图 9 土样崩解后形成的球形体
Fig. 9 Spherical soil sample bodies after disintegration

间逐渐变得干燥，在遇到海水时，从表层开始往里逐渐崩解，而随着崩解的发生，里层的土体含水量逐渐增大，可以推测其崩解速率逐渐减小；某些海崖坡面由于地下水的存在，土体潮湿，其崩解速率也较小。

3 进一步开展的研究

迄今为止，对于软质海崖的蚀退研究，大都集中在蚀退量的确定方面，一般借助于不同时间的卫星遥感图对比资料或现场监测，或简单理论推算，尚处于研究的初级阶段，对于下述问题可开展深入研究。

(1) 海崖蚀退水动力条件方面，研究极端海况下软质海崖的水动力荷载特征，包括海崖不同位置处的波浪在坡面上的循环动应力、水流流速及方向，通过现场布设仪器监测可获得比较准确的数据，如在坡面上固定孔隙水压力计，压力传感器朝向来浪方向，可监测到坡面上的循环动应力大小、周期等，但监测难度较大，监测仪器也可能随着坡面的滑塌而丢失；

(2) 海崖滑塌过程试验模拟方面，在室内利用大型水槽试验模拟波浪作用下海崖的滑塌过程，在水槽一端人工堆砌一定高度和坡度的海崖，同时在海崖内部和表面安装孔压传感器，制作波浪，监测波浪导致的土体内部孔压变化和崖面波压力大小；利用安装在海崖一侧的摄像机记录海蚀槽的形成发育过程、上覆土体的滑塌过程和滑塌物的搬运过程等。

(3) 在蚀退机制方面，研究土体在动水压力作用下的动力响应特征，包括土体崩解、液化、侵蚀与滑塌等，这些响应特征受土体种类、密实度、含水量、强度，以及外力作用的影响，通过试验或理论方法建立外力作用与土体响应特征的关系，对于定量分析与预测海崖蚀退具有重要意义。海崖蚀退是以侵蚀和滑塌形式

表现出来的, 土体的崩解与液化能够加剧侵蚀与滑塌过程, 明确土体崩解与液化随波浪持续作用的变化过程, 及由此导致的海崖侵蚀和滑塌量也具有重要意义。

(4) 海崖蚀退量确定与预测, 确定过去和预测未来若干年后海崖蚀退的尺度及土体损失量。通过打设观测桩或利用 GPS、或对比卫星遥感图片等手段, 得到海崖蚀退量; 利用过去数据或蚀退物理模型, 预测未来若干年后海崖蚀退的尺度及土体损失量, 为土地规划和城市建设提供理论依据。

(5) 研究海蚀槽(洞)的发育过程、边坡滑塌条件、滑塌物对坡脚的保护作用及再侵蚀过程。研究海蚀槽(洞)随着波浪持续作用的发展尺度, 分析海蚀槽(洞)的发育对边坡稳定性的影响, 获得边坡的滑塌条件; 当滑塌物堆积到坡脚时, 分析滑塌物的侵蚀过程, 随着侵蚀滑塌物粒度成分的变化及侵蚀完毕的时间。可通过水槽试验模拟海崖这一系列变化过程。

致谢: 感谢张肖在现场调查和试验中做出的辛苦劳动。

参考文献:

[1] 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.

- Liu Jianhui, Cai Feng, Lei Gang, et al. Recession mechanics and process analysis of soft cliff in Fujian Coast- In case of northeast coast of Pingtan Island[J]. Marine Environmental Science, 2010, 29(4): 525-530.
- [2] Benumof B T, Storlazzi C D, Seymour R J, et al. The relationship between incident wave energy and seacliff erosion rates[J]. Journal of Coastal Research, 2000, 16(4): 1162-1178.
- [3] Griggs G B, Patsch K, Savoy L. Living with the Changing California Coast[M]. Berkeley, California: University of California Press, 2005: 540.
- [4] Cheryl J, Hapke C J, Reid D, et al. Rates and trends of coastal change in California and the regional behavior of the beach and cliff system[J]. Journal of Coastal Research, 2009, 5: 603-615.
- [5] Mortimore R N, Lawrence J, Pope D, et al. Coastal cliff geohazards in weak rock: the UK Chalk cliffs of Sussex[C]// Mortimore R N, Duperret A. Coastal Chalk Cliff Instability. London: Engineering Geology Special Publications, 2004: 3-31.
- [6] Wziatek D, Voudoukas V, Terefenko P. Wave-cut notches along the Algarve coast, S. Portugal: Characteristics and formation mechanism[J]. Journal of Coastal Research, 2011, SI64: 855-859.
- [7] 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: 162-169.
- China Gulf Compilation Committee. China Gulf, Vol.7[M]. Beijing: Ocean Press, 1991: 162-169.

Study on the retreat of soft sea cliff in the northeast Pingtan Island, Fujian Province

CHANG Fang-qiang

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

Received: Mar. 12, 2014

Key words: soft sea cliffs; retreat; disintegration

Abstract: To reveal the retreat mechanism of soft sea cliff (SSC), the characteristics, retreat patterns, and influencing factors of the retreat of SSC in the northeast Pingtan Island, Fujian Province, were measured and studied. Moreover, the disintegration rate of the sand and silty clay of the island were tested using a developed disintegration instrument. The study found that the volume and accumulation distances of slumping soil increases with the height of the SSC and that each slump leads to a retreat distance of between 0.08 and 1.23 m. The covering slump at the foot of the SSC temporarily protects the cliff; however, it is more prone to erosion as it is disturbed when sliding. The sea cliff notch at the foot of cliff greatly controls slump formation. Rainfall, ocean waves, strong winds, and human activities are responsible for the retreat. The anti-erosion ability of soil proceeds from weak to strong in sand, then silty clay to clay. Moreover, the disintegration rate of dry silty clay in-situ is 2.4 cm/min.

(本文编辑: 刘珊珊)