

# 舟山大陆连岛工程西堠门大桥北塔位 天然岩质边坡的稳定性

潘永坚

(浙江省工程勘察院, 浙江 宁波 315012)

**摘 要:** 舟山大陆连岛工程西堠门大桥为一主跨跨度 1 650 m 的悬索桥, 其北塔位于海中的老虎山上。因老虎山山体略显单薄, 山体受数条断层及其他构造裂隙的影响, 整体完整性中等到一般。在大量现场地质调查基础上, 对老虎山南侧天然边坡稳定性进行分析研究, 并提出相应加固建议措施。

**关键词:** 西堠门大桥; 岩体结构; 边坡稳定

中图分类号: X141

文献标识码: A

舟山大陆连岛工程西堠门大桥为连接册子岛与金塘岛屿之间的主跨跨度为 1 650 m 的悬索桥, 悬索桥的南北锚碇位于金塘岛和册子岛上, 北塔位于海中的老虎山上, 南塔位于金塘岛上。从地形地貌上看, 老虎山四面临空, 平面上总体呈 NW~ SE 向展布(长轴方向), 长 200 m、宽一般为 50 m。老虎山山体略显单薄, 山体因受数条断层及其他构造裂隙的影响, 整体完整性中等—一般, 再加之因海浪淘蚀作用, 沿部分断层带在边坡浅表部淘空, 因此老虎山山体整体稳定性将在很大程度上控制整个西堠门大桥的整体布置。

## 1 研究区工程地质概况

### 1.1 地层岩性

研究区地层主要由晚侏罗世九里坪组酸性流纹斑岩和第四纪松散堆积层组成, 除山体顶部有少量坡残积层, 厚度一般 < 0.5 m, 四周边坡主要为裸露基岩, 且近海边缘山体以强—弱(中)风化特点。

### 1.2 地形地貌

老虎山山峰海拔高程一般 30 m 左右, 山坡坡度变化较大, 南侧山坡较缓, 约 25°~ 30°, 其余部位

边坡较陡, 一般在 45°~ 60°。另在部分断层及长大裂隙部位, 因受海浪冲刷, 海蚀地貌较发育, 以海蚀崖和海蚀沟(槽)为主, 局部见海蚀洞。海蚀崖高一般 5~ 15 m, 海蚀沟(槽)一般宽 2~ 5 m, 长 5~ 15 m。从空间分布上看, 海蚀沟(槽)一般沿断裂破碎带或长大裂隙发育。根据水域物探成果, 本区水下地形自老虎山往南呈逐步降低趋势, 边坡部分北陡南缓, 标高由 0 m 降至- 80 m, 坡度由 29°变为 4°, 构成水下边坡地貌。

### 1.3 地质构造

野外地质调查及物探成果表明, 研究区内主要见 4 条较大规模的断层, 集中发育于老虎山中间鞍部~ 南侧山体, 地貌上除 F7、F12 外, F5 和 F8 在山体两侧露头处均表现为海蚀沟洞。F12 位于山体东南海域基岩陡缓坡交接部位。这 4 条相对较大规模的断裂构造, 在很大程度上控制着山体的岩体结构及其完整性。

### 1.4 岩石物理力学特性

微风化流纹斑岩天然密度 2.54~ 2.56 g/cm<sup>3</sup>, 颗粒密度 2.63 g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.67, 饱和单轴极限抗压强度 > 60 MPa, 岩石天然抗拉强度 3.3 MPa, 饱和抗拉强度 2.6 MPa, 属坚硬岩。

收稿日期(Received date): 2004- 03- 15; 改回日期(Accepted): 2004- 05- 20。

作者简介(Biography): 潘永坚(1963- ), 男, 汉族, 浙江新昌人, 工学学士, 高级工程师, 主要从事工程地质、环境地质的生产和科研工作。  
[Pan Yongjian, men, 41 years old, baccalaureate, senior engineering, graduating from Chengdu University of Technology, experting in researching of engineering geology or environmental geology.]

1.5 水文地质条件

区内地下水类型有基岩裂隙水和局部赋存松散堆积层孔隙潜水两大类。基岩裂隙水赋存于流纹斑岩岩体中,接受大气降水下渗补给,由山坡向海里排泄。基岩裂隙水出水量一般很小,多富集于断层破碎带及长大裂隙部位。地下水排泄条件良好,因地形坡度较陡,老虎山山体地下水埋藏较深。根据钻孔压水试验成果,岩体透水率一般 0.26~ 1.72 Lu,局部断层破碎带附近为 5.11~ 9.17 Lu,渗透系数一般  $1.15 \times 10^{-6} \sim 4.83 \times 10^{-7}$  cm/s,局部为  $2.88 \times 10^{-5} \sim 5.25 \times 10^{-5}$  cm/s,说明尽管节理裂隙发育,但多为闭合,岩体渗透性为微透水-弱透水。

2 老虎山南部山体边坡工程地质分段及稳定性定性分析

老虎山临海坡脚强-弱风化基岩裸露,岩体节理裂隙发育,根据边坡裂隙发育状况及坡体结构类型,结合边坡出露位置,对老虎山 F5 以南山体基岩露头分别按西侧、西南侧、南侧和北东侧部位进行了大量的节理裂隙测量统计(图 1),绘制了各自的节理裂隙极点图及等密度图(图 2~ 5)。

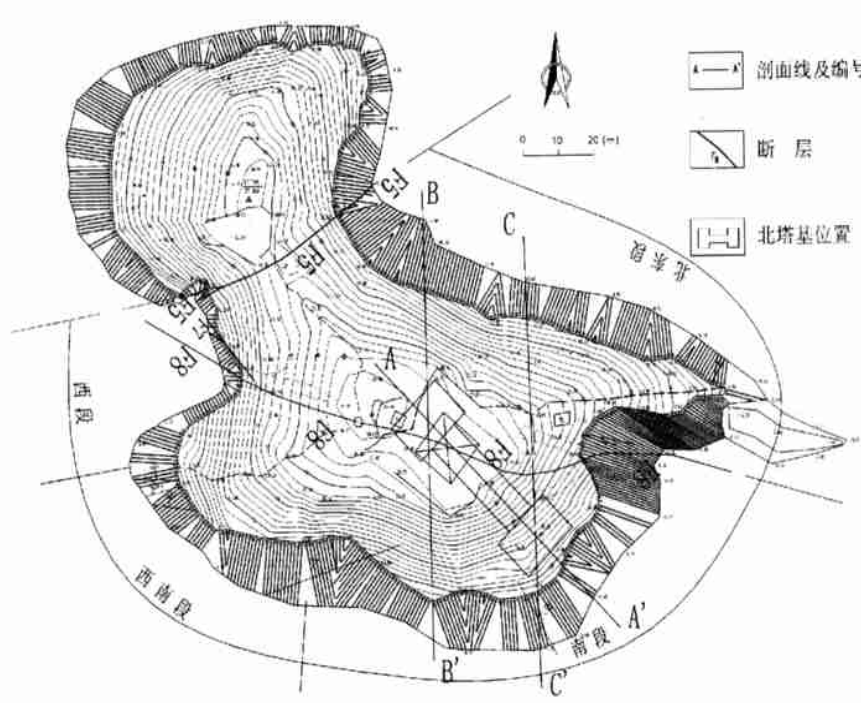


图 1 老虎山南部山体边坡工程地质平面图

Fig. 1 Engineering geological plan in Laohushan south mountain

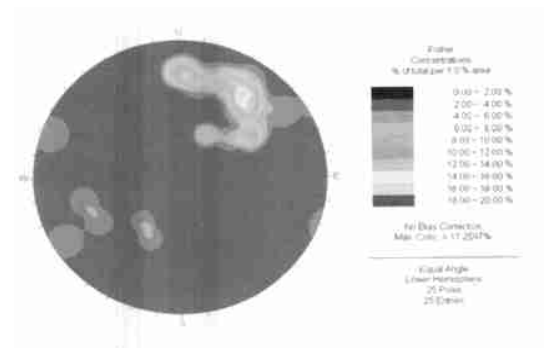


图 2 老虎山西侧山体边坡实测裂隙极点等密图

Fig. 2 Isodense map of joint pole in Laohushan west slope

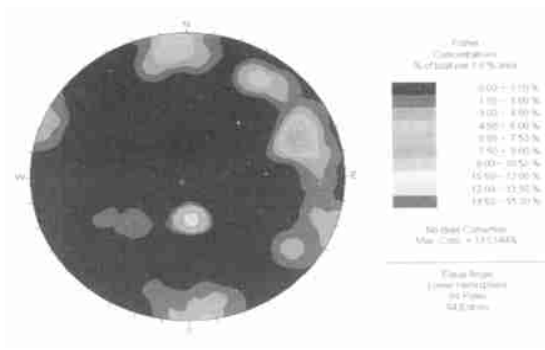


图 3 老虎山西南侧山体边坡实测裂隙极点等密图

Fig. 3 Isodense map of joint pole in Laohushan southwest slope

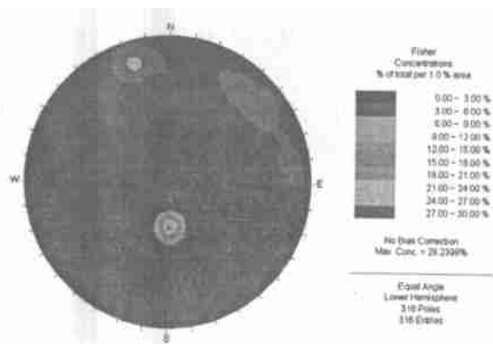


图 4 老虎山南侧山体边坡实测裂隙极点等密图

Fig. 4 Isodense map of joint pole in Laohushan south slope

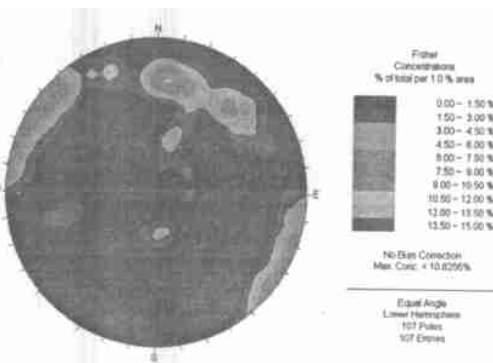


图 5 老虎山北东侧山体边坡实测裂隙极点等密图

Fig. 5 Isodense map of joint pole in Laohushan northeast slope

## 2.1 西侧边坡

北起 F5, 南至 F8 以南约 25 m (平距) 的山脊部位, 岸坡线累计长约 70 m, 地形坡度  $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 。岸坡岩体中等完整, 次块-镶嵌结构(断层带附近呈碎裂结构)。此段边坡以近垂直岸坡的 F5-F8 断裂为主, 同时随机发育其他节理, 主要优势结构面为: ① $N55^{\circ}W/NE \angle 70^{\circ}$  (F7 为代表); ②近  $EW/N \angle 73^{\circ}$  (F8 为代表); ③ $N33^{\circ}W/NE \angle 60^{\circ}$  (其他随机节理)。其中①、②两组主要代表 F7、F8 两组断裂构造。上述 3 组裂隙均与岸坡呈直交或大角度斜交, 且间距较大, 一般不易构成不稳定块体, 边坡整体稳定。

## 2.2 西南侧边坡

西侧边坡以南, 岸坡线累计长约 70 m, 地形坡度  $45^{\circ} \sim 55^{\circ}$ , 可见 2 条近平行于 F8 的陡坡裂隙, 该裂隙局部也见海蚀空缝, 且具渗水现象。此段岸坡裂隙较发育, 但无明显优势的结构面, 从这点看, 有利于边坡的稳定, 从裂隙统计资料看, 大致有以下明显节理: ① $N20^{\circ}W/NE \angle 70^{\circ}$ ; ② $N17^{\circ}E/SE \angle 81^{\circ}$ ; ③ $N85^{\circ}E/SE \angle 31^{\circ}$ ; ④ $N74^{\circ}E/NW \angle 79^{\circ}$ ; ⑤ $N45^{\circ}W/SW \angle 50^{\circ}$ 。

上述裂隙可见延伸长普遍  $< 5$  m, 间距较大。岸坡岩体完整性一般, 以镶嵌结构为主, 随机裂隙较

发育, 但无很优势结构面, 这反而对边坡稳定有利。除浅表层边坡因受倾坡外中陡倾角裂隙发育具碎裂结构, 可能会造成倾倒破坏外, 边坡整体稳定性良好。

## 2.3 南侧边坡

从西南侧边坡边界至坡体东侧凸起体, 此段岸坡线累计长约 120 余 m, 地形坡度  $29^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 。岸坡岩体完整性一般或较差, 以层状镶嵌结构为主, 局部为碎裂结构。主要优势结构面为: ①近  $EW/S \angle 30^{\circ}$ ; ② $N72^{\circ}E/NW \angle 78^{\circ}$ ; ③ $N30^{\circ}W/SW \angle 77^{\circ}$ 。其中①组最具优势, 可见延伸长普遍 3~5 m, 个别  $> 10$  m 间距 10~40 cm 不等, 裂面一般表现为平直粗糙, 且无软弱物质充填, 属硬质结构面, 总体性质良好。从钻孔岩芯和钻孔电视观测, 该缓倾角裂隙在岩体深部也存在, 发育程度与地面接近。②、③两组随机, 局部发育。上述 3 组裂隙局部可构成“两陡一缓”潜在滑动块体, 是整个老虎山岸坡稳定性分析中最具控制意义的一段, 也是本文研究的重点。分析表明, 此段岸坡现状整体稳定, 局部因海水侵蚀会发生顺层滑移失稳。

## 2.4 北东侧边坡

从东端至 F5 断层, 岸坡线累计长  $> 150$  m, 边坡陡峭, 地形坡度  $55^{\circ} \sim 65^{\circ}$ 。岩体完整性中等-较好, 以块状-次块状结构为主, 主要优势结构面为: ① $N83^{\circ}E/NW \angle 73^{\circ}$ ; ② $N75^{\circ}E/NW \angle 83^{\circ}$ ; ③ $N7^{\circ}E/NW \angle 87^{\circ}$ 。其中①、②两组最为常见, 且延伸长大, 而③组侧延伸短小。因①、②组陡裂近平行于岸坡, 故对岸坡稳定的控制作用明显, 但从现场看, 此 2 组节理大部分在坡脚处常见, 山体顶部少见, 因此总体上看, 上述结构面不易构成不稳定块体。整段岩坡稳定性良好。

综上所述, 老虎山南部山坡所划分的 4 段边坡, 现状条件下除局部存在零星掉块落石外, 稳定性总体均较好。结合桥基设计位置, 在考虑工程荷载作用下, 未来边坡最易发生失稳的部位应是南侧边坡, 其余地段发生较大规模失稳的可能性小。

## 3 老虎山南部山体南侧边坡稳定性定量分析与评价

### 3.1 影响边坡稳定性因素分析

从南侧工程边坡范围所在地质条件分析, 整个边坡除表层零星分布有第四系松散坡积土外, 主要由一套以弱风化为主的流纹斑岩组成。从自然边坡坡面与坡体内主控节理倾向关系上看, 南侧工程边坡属典型的顺向坡。由于坡体内节理发育, 岩体完

整性较差,在工程荷载及其特殊条件下,边坡岩体发生顺层下滑的可能性较大。

显然,影响南侧工程边坡稳定性的内在因素是坡体内普遍发育的顺层裂隙和其他随机陡倾结构面,它们构成边坡稳定的潜在边界;而外在因素则是降雨、地震、工程荷载及风荷载等的作用。

3.2 计算工况

根据上述影响边坡稳定性因素分析,结合边坡现场的具体地质条件,本次计算对天然边坡分别按两种工况进行,即: 1) 天然状态; 2) 持续降雨( 饱水)。

3.3 计算参数

根据现场进行的控制性结构面在天然含水及饱水( 泡水) 状态下的现场大剪试验结果, 即:

- 天然含水状态: 抗剪断  $f' = 1.14$ ,  $C = 0.29$  MPa
- 抗 剪:  $f = 1.12$ ,  $C = 0.28$  MPa。
- 饱水( 泡水) 状态: 抗剪断  $f' = 0.90$ ,  $C = 0.21$  MPa
- 抗 剪:  $f = 0.77$ ,  $C = 0.13$  MPa。

参照与此边坡相类似地质条件的有关工程结构面及岩体强度参数<sup>[1-3]</sup>, 可综合确定计算所需的岩体及结构面的物理力学性质, 见表 1。

表 1 边坡稳定性计算参数

Table 1 Physical and mechanical parameter of slope rock mass

岩土类型	重度(kN/m³)		天然状态强度参数		饱水状态强度参数	
	天然含水	饱水	C(MPa)	φ(°)	C(MPa)	φ(°)
缓倾结构面			0.30	31.00	0.10	26.53
流纹斑岩岩体	25.5	26.0	0.80	38.61	0.64	32.57

3.4 潜在滑面及剪出口位置的确定

鉴于老虎山南侧边坡的地形地貌、地质条件及稳定性现状,尤其是水下地形坡度与缓倾坡外裂隙相近,即约 3° 的具体状况(即两者近平行),显然在工程荷载作用下,若要发生边坡失稳破坏,不可能完全沿缓倾坡外裂隙滑移剪出,最有可能出现的情况是后缘沿此面下滑、前缘将沿岩体中剪出,而前缘剪出段的位置则根据缓倾节理与随机陡倾节理相互组合,并形成“折线形”破裂面。同时结合摩尔-库仑定律,可得出破裂面倾角,但其总体倾角要小于缓倾节理倾角。

大量的试算结果显示,桥基荷载作用后,南侧边坡可能出现的失稳模式是:在两塔基基础之间沿缓倾节理面下滑、而在右塔基以下部分仍将沿缓倾节理面下滑(形成第一下滑面),然后在一定高程部位即沿岩体剪出(形成第二破裂面),剪出口位置在海

底最低高程在海底最低高程附近,即- 40~ - 80 m 间。

计算显示剪出口位置在- 80 m 附近剪出的可能性最大,因此下面的计算将以- 80 m 剪出口为基础进行计算。

3.5 计算结果及分析评价

计算代表性剖面见图 6。

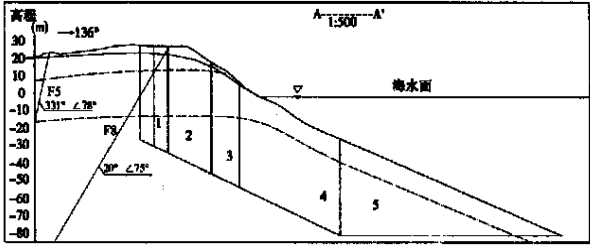


图 6 老虎山南部山体南侧边坡稳定性计算 A- A' 剖面  
Fig. 6 Computational figure of A- A' section slope stability in Laohushan south slope

1. A- A' 剖面现状天然边坡稳定性分析

鉴于 A- A' 剖面走向与缓倾节理走向之间不垂直,主要代表桥台左、右塔基,即横梁延伸方向上。故在剖面图上,缓倾节理按视倾角表示,后缘下滑面也将按此倾角计算。

计算结果显示,在两种工况中,岩质边坡稳定性系数均在 2.666 以上,即从工况 1(天然含水)的 2.853<sup>→</sup>工况 2(持续降雨(饱水))的 2.666,降低幅度(以工况 1 的 2.853 为准)为 6.55%。从中可见,该段现状边坡总体是稳定的,但是持续降雨所引起的潜在滑面饱水,会导致稳定性系数降低,但不明显。

2. B- B' 剖面天然边坡稳定性分析

B- B' 剖面走向与缓倾节理走向之间呈相互垂直,主要以右塔基所在断面为代表。在剖面图上,缓倾节理按真倾角表示,后缘下滑面将按真倾角计算。

计算结果显示,在两种工况中,岩质边坡稳定性系数均在 2.646 以上,即从工况 1(天然含水)的 2.851<sup>→</sup>工况 2(持续降雨(饱水))的 2.646,降低幅度(以工况 1 的 2.851 为准)为 7.19%。从中可见,性状变化与 A- A' 剖面相似。但从总体上看,沿 B- B' 剖面方向所得的稳定性系数,在相同工况条件下均比 A- A' 剖面要小一些。

3. C- C' 剖面天然边坡稳定性分析

如同 B- B' 剖面, C- C' 剖面走向也与缓倾节理走向之间呈相互垂直,并主要以左塔基所在断面为代表。后缘下滑面将按真倾角计算。

计算结果(表 2)显示,在两种工况中,天然岩质边坡稳定性系数均在 3.124 以上,即从工况 1(天然含水)的 3.259 $\rightarrow$ 工况 2(持续降雨(饱水))的 3.124,降低幅度(以工况 1 的 3.259 为准)为 4.14%。总体上看,沿 C-C' 剖面方向所得稳定性系数,在相同工况条件下均比 A-A' 和 B-B' 剖面稍高。

表 2 老虎山南侧边坡各剖面天然边坡稳定性计算结果汇总  
Table 2 Computational results of different section slope stability

剖面	天然状态	持续降雨
A-A'	2.853	2.666
B-B'	2.851	2.646
C-C'	3.259	3.124

结果显示,老虎山天然边坡在不同工况条件下是稳定的。

另对该工程边坡施工运营期间所进行的不同工况条件稳定性计算(另文发表),表明稳定性系数均在 1.90 以上,满足工程要求。

4 结论

1. 据南部山体所出露的地形坡度、岸坡结构,主要控制结构面发育状况等,可将其分成西侧、西南侧、南侧和东北侧 4 段边坡。总体上看,4 段岸坡现状整体稳定性均良好。
2. 综合比较显示,尽管西侧边坡坡脚有海蚀洞,西南侧边坡浅表部有板裂式潜在不稳定块体,但它们均离桥基位置较远,对其影响较小或小。对桥

基稳定影响最为显著的是南侧边坡,分析表明,缓倾坡外裂隙(近 EW/S  $\angle 31^\circ$ )可能会构成南侧边坡稳定的潜在底滑面,并在一定程度上影响今后桥梁运行后该段边坡的稳定。

3. 通过大量的稳定性计算结果显示,根据设计所提供的桥台基础埋深条件下对南侧天然边坡所进行的不同滑面组合、不同工况条件稳定性计算结果显示,天然边坡稳定性系数均在 2.64 以上,老虎山南侧天然边坡整体稳定。

4. 天然边坡稳定性计算结果表明,在老虎山上可以设置塔基并架桥通过。不过为了确保大桥的正常施工和运营,建议塔基位置尽可能远离临空面,设置在老虎山南侧山体内侧;同时对以 F5 为边界的南侧山体四周处于最高和最低海水位变幅带的浅表层岩体进行整体加固,以增大浅表部岩体及整个桥基工程边坡稳定性。

参考文献(References):

[1] Hu Xiewen, Zhong Peilin. Effect of weak interbed thickness on deformation modulus of rock mass with quasi-lamellar structure[J]. *Chinese journal of rock mechanics and engineering*, 2002, 21(4): 1302~ 1306. [胡卸文, 钟沛林. 似层状结构岩体变形参数的软弱层带厚度效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 1302~ 1306.]

[2] Hu Xiewen. Shear strength parameter of no-clay weak interbed[J]. *Journal of mountain science*, 1999, 18(1): 52~ 56. [胡卸文. 无泥型软弱层带的强度参数[J]. 山地学报, 1999, 18(1): 52~ 56.]

[3] Hu Xiewen, Chen Mingdong, Liu Hanchao. Developed characteristics and stability evaluation of Zhengzhuba landslide on Jinsha River[J]. *Chinese journal of geological hazard and control*, 1996, 7(3): 60~ 65. [胡卸文, 陈明东, 刘汉超. 珍珠坝滑坡发育特征及稳定性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1996, 7(3): 60~ 65.]

Rock-Slope Stability of Xihoumen Bridge Foundation  
in Zhoushan Island Mainland Link Project

PAN Yongjian  
(Zhejiang Engineering Prospecting institute, Ningbo, 315012)

**Abstract:** Xihoumen Bridge is a rope-suspension bridge with span of 1 650 m, in Zhoushan Island mainland Link Project. Its north tower lies in Laohushan Mountain on the sea. The mountain is thin and influenced by faults and fissures, the rock mass integrity is relatively bad. Based on investigation, engineering geology segments of the slope is studied. Losing steady is to happen most by the southern slope among these segments because of development along slope to incline the joint slowly slope by the southern side. The southern slope stability are calculated and analysed especially under natural state and rain falling continuously on the southern side. The result shows that the shope is stable.

**Key words:** Xihoumen Bridge; laohushan mountain; rock mass structure; slope stability

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net