

· 地基与基础 ·



高震区斜坡式护岸的岸坡稳定性分析

卢生军，郭隆洽

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司，广东 广州 510290)

摘要：对位于菲律宾高震区的某斜坡式护岸结构的岸坡进行稳定性评估，分析国际上主流抗震设计规范，结合该工程的具体设计条件，提出合适的地震岸坡稳定分析方法、稳定标准和分析流程，并采用 Newmark 法和非线性动力分析对该护岸的震后残余位移进行计算。结果表明：高震区的岸坡稳定分析宜以控制位移为目标，水准 1、2 地震下的残余位移宜分别不超过 5、30 cm；当采用 Newmark 法计算时宜取其上限位移，而通过非线性动力分析可获得岸坡残余位移和最大剪应变等的分布，从而对地震下的岸坡稳定做更为全面的设计和评估。

关键词：高震区；岸坡稳定；Newmark 法；非线性动力分析

中图分类号：U656.3

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2024)03-0159-06

Slope stability of sloping revetment under high seismic zone

LU Shengjun, GUO Longqia

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: For the slope stability evaluation of a sloping revetment located in a high seismic zone in Philippines, we analyze the study of these international seismic design codes, propose an appropriate seismic slope stability analysis method, stability criteria, and analysis process based on the specific design conditions of the project, and use the Newmark method and non-linear dynamic analysis to calculate the lateral deformations of the sloping revetment after earthquakes. The results indicate that the stability analysis of sloping revetment in high seismic zones should aim to control the lateral deformations, which under Level 1 and Level 2 earthquakes are advised not to exceed 5 cm and 30 cm respectively. When using the Newmark method for calculation, its upper bound displacement should be taken, and the distribution of residual displacement and maximum shear strain obtained from the nonlinear dynamic analysis can provide a more comprehensive design and evaluation of the seismic slope stability.

Keywords: high seismic zone; slope stability; Newmark method; non-linear dynamic analysis

对建在高震区的斜坡式护岸，基于拟静力法的岸坡地震稳定性分析往往难以达到满足要求的安全系数，因而基于位移(性能)的抗震设计理念逐步在高震区的岸坡稳定性分析中得到广泛应用。一方面原因是基于位移的抗震设计起步较晚，自 20 世纪 90 年代才逐步发展成为国际抗震领域普遍接受的新理念^[1]；另一方面，与该新的设计理念所对应的抗震设计方法也还在不断的发展完善中，

且将性能要求量化为位移标准本身就比较困难。因而，目前国内外规范中关于高震区岸坡地震稳定性的评估，在分析方法、稳定标准和分析流程等方面还未统一。

本文以位于高震区的菲律宾 Pasay 填海开发工程为例，对其护岸岸坡的地震稳定性分析方法、标准和分析流程进行介绍，并采用不同方法对其震后残余位移进行计算分析，相关设计经验可供

收稿日期：2023-07-13

作者简介：卢生军（1986—），男，硕士，高级工程师，从事海工结构设计与研究。

类似工程参考。

1 岸坡稳定分析方法

1.1 拟静力法

常用于岸坡稳定分析的确定性方法有拟静力法、Newmark 法和非线性动力分析等。

拟静力法最早由 Terzaghi 于 1950 年引入到岸坡地震稳定性分析中，其以极限平衡法为基础，将地震动荷载等效成恒载施加在滑体上，计算得到安全系数作为岸坡地震稳定性评价指标^[2]。

拟静力法概念清晰、计算简单，且能给出物理意义明确的安全系数指标，因而被各国规范广泛采用。但是该方法也存在一些不足，比如将滑体假定为刚体、忽略了地震的动荷载特征等。

1.2 Newmark 法

该方法由 Newmark 于 1965 年首次提出，其以极限平衡理论为基础，通过对屈服加速度 a_y （安全系数为 1.0 时的临界加速度）的二次积分得到震后残余位移，以该残余位移是否超出容许值作为岸坡失稳与否的评判标准^[3]。基于 Newmark 法的滑块理论，后续学者总结出了许多用于计算地震残余位移的经验公式，比如 Ambraseys、Jibson、Saygili 和 Bray 公式等。

Newmark 法在一定程度上弥补了拟静力法的不足，比如考虑了时间因素的影响。但 Newmark 法同样假定滑体为刚体，无法获得岸坡不同位置的位移，且不同经验公式的计算结果差异较大，因此多用于岸坡地震稳定性的前期评估。

1.3 非线性动力分析

非线性动力分析直接以地震加速度时程为输入条件，可以考虑地震幅值、频谱和持续时间等动荷载特征，且其以土体单元为分析对象，弥补了拟静力法和 Newmark 法的不足。通过非线性动力分析能够获得地震作用下土体在任何时刻的动响应，比如应力、应变、孔隙水压等，以及震后岸坡任意位置的残余位移，因此近年来在高震区工程中得到广泛应用。

2 稳定标准

2.1 安全系数

该标准以计算得到的安全系数小于规范值作为判断岸坡失稳的条件，关于安全系数的取值各国规范存在一定差异。

我国 JTS 146—2012《水运工程抗震设计规范》^[4]采用拟静力法计算岸坡的地震稳定性，在对水平向地震力乘以 0.25 的综合影响系数折减后，要求岸坡整体稳定验算的抗力分项系数不应小于 1.0。

加拿大的 *Seismic Design Guidelines for Dikes*^[5] 指出，当采用拟静力法计算岸坡地震稳定性，水平向地震系数取地震峰值加速度 PGA 的 1/2 时，安全系数在 1.1~1.3 是可接受的。

美国长滩码头设计标准 *Wharf Design Criteria*^[6] 及美国标准 *Seismic Design of Piers and Wharves*^[7] 规定，当采用拟静力法计算岸坡地震稳定性，水平向地震系数取 PGA 的 1/2 时，安全系数等于 1.1 时的岸坡位移介于 25~50 mm，该量级的位移将不至于对岸坡上的结构（比如桩基、挡墙等）产生不利影响。此外，美国标准规定设计地震后考虑土体强度折减（砂土液化、黏土循环剪切后的强度降低等）的静力分析安全系数应大于 1.1。

2.2 震后残余位移

关于震后残余位移的允许值，目前国内外规范中并没有统一的规定。加拿大的 *Seismic Design Guidelines for Dikes*，针对不同抗震设防水准下的允许堤顶位移见表 1。其中等级 A 表示堤身无明显损坏，震后防洪能力不受影响；等级 B 表示堤身产生一些可修复的损坏，震后防洪能力不受影响；等级 C 表示堤身产生显著损坏，震后防洪能力很可能受到影响。

表 1 *Seismic Design Guidelines for Dikes* 的堤顶允许位移

等级	抗震等级	堤顶最大允许位移/cm	
		竖向	水平向
A	100 a 一遇	<3	<3
B	475 a 一遇	15	30
C	2 475 a 一遇	50	90

此外, *Seismic Design Guidelines for Dikes* 中堤顶竖向位移主要从影响防洪的安全超高考虑, 其不是导致堤防丧失整体稳定的关键因素。

美国陆军工程兵团 2010 年会议报告^[8], 针对城市堤防工程震后残余位移标准见表 2。

表 2 美国陆军工程兵团 2010 年会议报告的堤顶允许位移

总位移/m	结构显著破坏可能性	震后防洪功能受损程度
<0.3	无	功能无损失
0.3~<0.9	有可能	功能无损失
0.9~<3.0	非常可能	功能将受损

Port of Long Beach Wharf Design Criteria 规定,

当岸坡震后残余位移在运营水平(72 a一遇)地震小于 75 mm、偶遇水平(475 a一遇)地震小于 300 mm、设计水平(2 475 a一遇)地震小于 900 mm 时, 可忽略岸坡变形对其上方桩基的影响。

3 稳定性分析流程

目前, 高震区岸坡的稳定性分析流程并未统一, 这主要因为各规范在抗震设防标准、评估方法和失稳判据等方面本身就存有差异。然而, 总结现阶段比较前沿的抗震设计经验, 概括出的高震区岸坡稳定分析流程如图 1 所示。

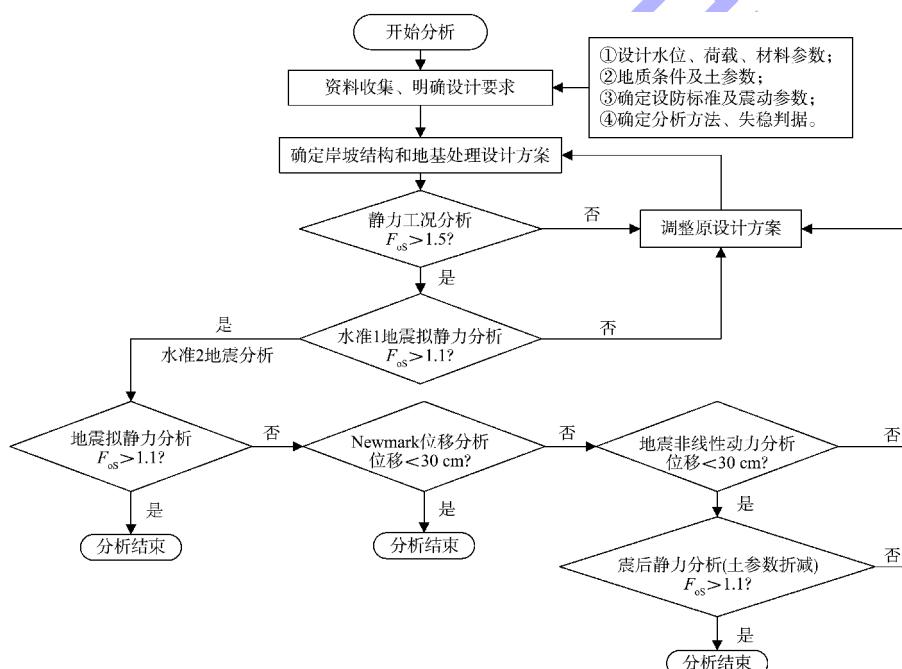


图 1 高震区岸坡稳定分析流程

- 1) 收集与岸坡设计有关的资料、明确设计技术要求, 确定初步的岸坡结构及地基处理方案。
- 2) 开展静力工况分析, 如安全系数 F_{ss} 小于规定值(比如 1.5), 则调整设计方案重新分析, 否则进入水准 1 地震下的岸坡稳定性分析。
- 3) 采用拟静力法对水准 1 地震下岸坡稳定性进行分析, 如安全系数 F_{ss} 小于规定值(比如 1.1), 则调整设计方案重回静力分析, 否则开始水准 2 地震下的岸坡稳定性分析。
- 4) 开展水准 2 地震下的岸坡稳定性分析:
①首先开展拟静力分析, 如安全系数 F_{ss} 大于规定

值(比如 1.1), 则岸坡稳定满足要求, 分析结束; 否则进行下一步骤。②采用 Newmark 法对震后残余位移做初步评估, 如位移小于规定值(比如 30 cm)则岸坡稳定满足要求, 分析结束; 否则进行下一步骤。③采用非线性动力时程法进一步验证震后残余位移, 如位移超出规定值(比如 30 cm)则调整方案重回静力分析; 否则进行下一步骤。④采用静力分析对震后考虑土参数折减的岸坡稳定做进一步验证, 如安全系数 F_{ss} 大于规定值(比如 1.1)则岸坡稳定满足要求, 分析结束; 否则, 调整方案重回静力分析。

4 工程案例分析

4.1 护岸结构方案

依托工程位于菲律宾马尼拉湾内海域，为特大型填海造陆工程，陆域形成总面积为 396 万 m²，回填砂量近 1 亿 m³，而为回填砂提供防护的斜坡

式护岸结构总长达 12.5 km。

工程受强浪、强震及软土地质条件限制，地震震级最大可达 8.2 级。在综合考虑越浪、护面块石稳定性及岸坡地震稳定等要求后，最终设计了带宽肩台的大缓坡砂芯“贴面式”护岸结构，如图 2 所示。

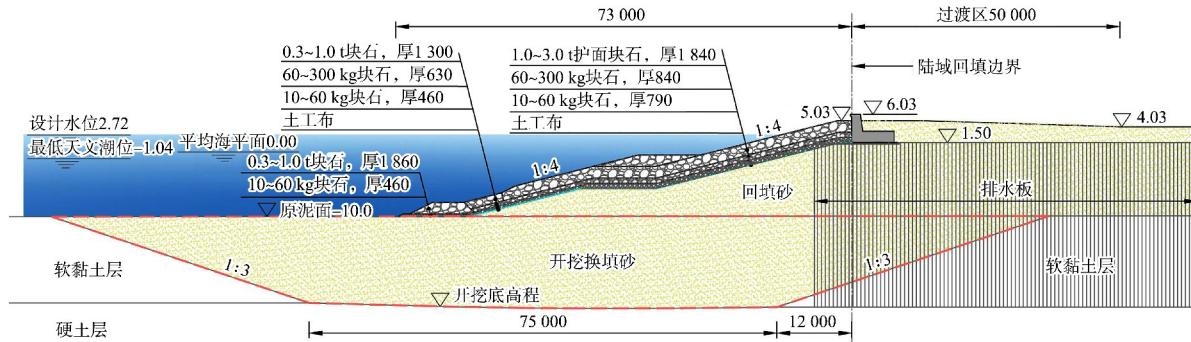


图 2 护岸典型断面 (高程: m; 尺寸: mm)

“贴面式”护岸结构的特点为：1) 护岸下方软黏土通过开挖换填砂消除残余沉降和提高岸坡稳定性；2) 回填砂采用振冲密实工艺避免地震下液化；3) 采用 1:4 的缓坡结构，可大幅降低堤顶越浪量和减小所需护面块石的稳定质量，更是有利于地震下护岸岸坡的稳定性；4) 宽肩台可进一步起到消浪效果，使得 1~3 t 护面块石在波高 H_s 超过 5 m 的情况下仍能满足稳定要求；5) “贴面式”护岸结构极大减少了块石的用量，从而节省工程费用。

4.2 抗震设计要求

工程位于高震区，采用基于位移的抗震设计理念，考虑 2 个水准的地震：1) 水准 1 为 50 a 超越概率 50% (72 a 重现期) 的地震，地表 PGA 为 0.24g，该地震不应导致护岸结构的破坏和丧失功能，与此对应的岸坡稳定安全系数为不小于 1.1；2) 水准 2 为 50 a 超越概率 10% (475 a 重现期) 的地震，地表 PGA 为 0.39g，该地震下允许护岸结构发生一些可修复的损坏，但使用功能仍应不受影响，与该性能要求相对应的位移标准为震后堤顶前沿处残余位移不超过 30 cm。

4.3 Newmark 法位移评估

拟静力分析结果显示该斜坡式护岸水准 1 地震下的安全系数大于 1.1，而水准 2 地震下的安全

系数为 0.64 小于 1.1，因此需要对岸坡的震后残余位移做进一步评估。

拟静力计算得到安全系数等于 1.0 时的屈服加速度 a_y 为 0.26g，采用 Ambraseys、Jibson、Saygili 和 Bray 等 4 个 Newmark 法经验公式计算得到的岸坡震后残余位移结果见表 3。

表 3 Newmark 法计算的水准 2 地震位移值

方法	位移/cm		
	下限	上限	均值
Ambraseys 公式	4.7	18.8	9.4
Jibson 公式	3.0	24.4	8.6
Saygili 公式	3.3	31.6	10.2
Bray 公式	44.8	189.1	92.0
平均值	14.0	66.0	30.1

由表 3 可以看出，Newmark 法不同公式计算结果差异显著，且即使同一公式的上限、均值和下限的差异也较大。此外，水准 2 地震下的 Newmark 法位移均值和上限超过了 30 cm 的位移标准，因此考虑采用非线性动力分析对地震位移做进一步评估。

4.4 非线性动力时程法位移评估

采用 PLAXIS 2D 软件建立非线性动力时程分析模型，模型中土体本构选择小应变土体硬化 (HSS) 模型，模型底部动力边界采用吸收边界。

选择 FKS 地震台等 7 组具有代表性的实测地

震加速度时程, 在进行目标谱匹配及基线校正后, 得到用于计算的地震加速度时程曲线, 如图3所示, 其中目标谱采用菲律宾国家规范 *Notional Structural Code of the Philippines 2010*^[9] 的设计谱。

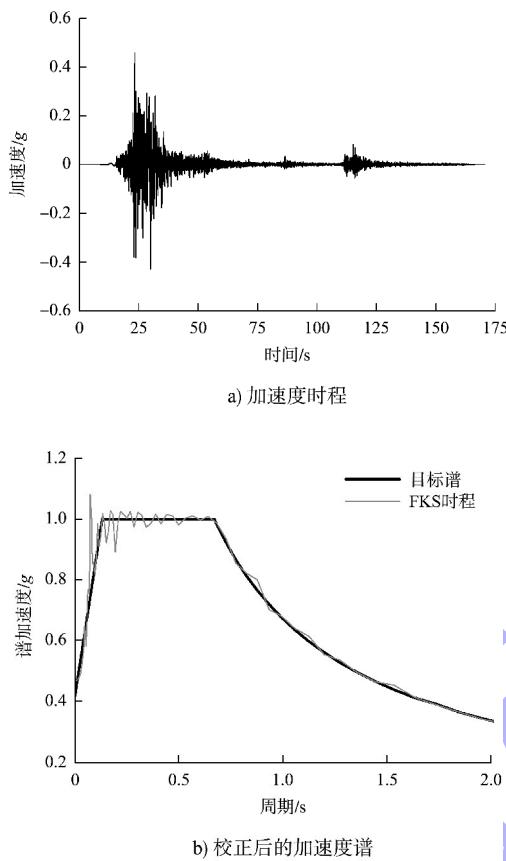


图3 FKS时程输入地震加速度

通过非线性动力时程分析得到水准2地震下该斜坡式护岸堤顶位置地震残余位移见表4。可以看出, 震后堤顶总位移、水平位移和竖向位移的平均值分别为27.9、24.1和13.5 cm, 满足小于30 cm的位移标准要求。

表4 震后岸坡残余位移值

地震 时程	堤顶位移/cm		
	总位移	水平位移	竖向位移
Darfield	20.9	14.9	14.7
Duzce	33.8	28.3	18.5
Manjil	23.7	21.3	10.4
Stika	30.1	27.1	13.1
Romania	30.4	28.1	11.6
Hokkaido	30.7	28.0	12.6
FKS	25.4	21.3	13.8
平均值	27.9	24.1	13.5

4.5 位移结果分析

对比Newmark法和非线性动力分析计算结果发现: Newmark法的Ambraseys、Jibson和Saygili公式计算结果的均值和上限分别为9.4和24.9 cm, 均值明显小于非线性动力分析结果而上限与之相当; Newmark法的Bray公式无论是下限、均值还是上限均远大于非线性动力分析结果。

此外, Newmark法假定滑体为刚体, 计算得到的震后残余位移为刚体位移。然而, 非线性动力时程分析结果表明地震作用下的岸坡残余位移不同位置处的结果不同。以Hokkaido波动力分析的震后残余位移为例, 见图4。可以看出: 该斜坡式护岸的最大位移发生在岸坡坡脚外侧的开挖换填砂边缘, 约为80 cm, 然后往岸坡方向逐渐减小; 护岸斜坡面上的残余位移相对均匀且在30 cm以下, 但也存在局部区域超过40 cm; 震后残余位移在坡顶往后方陆域方向逐渐减小, 50 m距离外位移小于15 cm, 此时地震对后方陆域建筑的影响已很小。

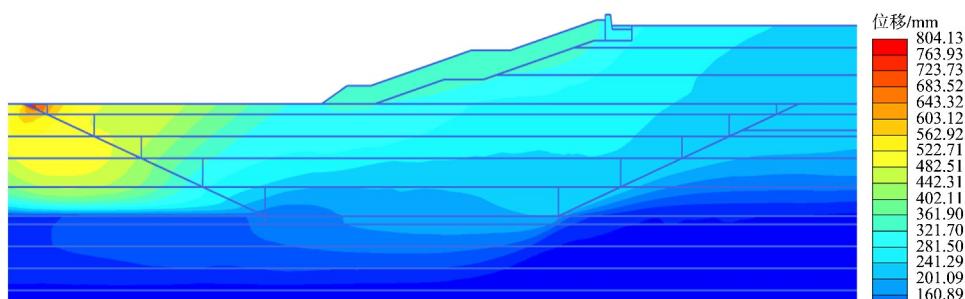


图4 Hokkaido 波动力分析的震后残余位移

通过非线性动力分析还可获得震后土体的最大剪应变分布，据此可判断滑动破坏面发展情况。以 Hokkaido 波动力分析的土体最大剪应变分布见图 5(仅列出潜在破坏面位置)。可以看出，海床面以下软土底部在地震作用下将发生较大的剪切变形，接近或达到土体的破坏极限从而形成滑动破坏面，而通过采用开挖换填砂的软基处理方案可以有效阻断高剪应变区的发展从而避免贯穿性滑动破坏面的形成。

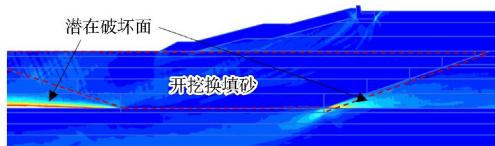


图 5 Hokkaido 波动力分析的土体最大剪应变分布

5 结论

1) 针对国外高震区的斜坡式护岸建议采用基于位移的抗震设计理念，以震后残余位移作为岸坡稳定判别标准。水准 1 地震下位移宜不超 5 cm 或安全系数大于 1.1，水准 2 地震下位移宜不超 30 cm。

2) 除 Bray 公式外，Newmark 法其他公式的均值位移明显小于非线性动力分析结果而上限位移与之相当，建议采用 Newmark 法计算时取上限位移。

3) 非线性动力分析结果显示，地震残余位移由坡脚向坡顶及后方陆域方向逐渐减小，斜坡面上位移分布相对均匀无较大差异，且通过最大剪应变分布可较清楚判断滑动破坏面发展情况，从

而有针对性地设计地基处理方案。

参考文献：

- [1] 余神光, 陈墨翟. 高桩码头岸坡地震位移计算方法比较[J]. 水运工程, 2019(9): 160-163, 190.
- [2] 郑静. 滑坡稳定性评价的方法及标准[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 13(7): 53-57.
- [3] 张兆鹏. 岸坡地震稳定性的数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2018.
- [4] 中交水运规划设计院有限公司. 水运工程抗震设计规范: JTS 146—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [5] Ministry of Forests, Lands and Natural Resource Operations. Seismic design guidelines for dikes [S]. 2nd ed. Victoria: Ministry of Forests, Lands and Natural Resource Operations, 2014.
- [6] Port of Long Beach. Wharf design criteria : POLB WDC V5[S]. Los Angeles: Port of Long Beach, 2015.
- [7] American Society of Civil Engineers. Seismic design of piers and wharves: ASCE61-14 [S]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2014.
- [8] KOESTER J P. Seismic activity and vulnerabilities to levees, 2010 Missouri River/Texoma Regional and Midwest Levee Conference[R]. Washington: the US Army Corps of Engineers, 2010.
- [9] Association of Structural Engineers of the Philippines. Notional structural code of the Philippines 2010: NSCP C101-10 [S]. Quezon City: Association of Structural Engineers of the Philippines, 2010.

(本文编辑 王璁)

· 消息 ·

安徽引江济淮东淝河船闸项目主体完工

近日，二航局承建的安徽引江济淮东淝河一线船闸改造项目主体完工。该项目位于江淮沟通段的末端，地处淮南市寿县，距入淮口 2.5 km，按Ⅱ级船闸建设，闸室有效尺度长 280 m、宽 34 m，设计通过最大船舶吨位为 2 000 t。闸室墙采用整体式钢筋混凝土坞式结构，沿闸室长度方向分为 15 个节段，与蜀山复线船闸并列安徽最宽内河船闸。该项目建成后，将充分发挥引江济淮工程整体的供水灌溉作用，助力沿线地区港口航运发展，推动沿线城市加速融入长江经济带。

https://www.ccccltd.cn/news/jcxw/jx/202402/t20240205_212958.html (2023-02-05)