

## “纳沙”台风对乌石渔港引起的台风浪的数值研究

侯文昊, 张瑞瑾\*, 席彦彬, 张鹏, 马全强 (大连海洋大学海洋科技与环境学院, 辽宁大连 116023)

**摘要** 利用 MIKE21 SW 波浪模型, 对台风“纳沙”过境期间台湾宜兰县乌石渔港附近波浪特征进行数值模拟。结果表明, 在“纳沙”影响下, 在渔港近岸海域形成了最大有效波高超过 5.5 m 的巨浪, 持续时间长达 12 h。乌石渔港在多级防波堤的掩护下, 港内有效波高逐渐减小, 乌石渔港内有效波高低于 0.5 m 的有效避风面积达到总港域面积的 24.2%。

**关键词** 台风“纳沙”; MIKE21 SW; 数值模拟; 波浪特征; 乌石渔港

中图分类号 P 732 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)05-0217-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.05.061

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Numerical Study on the Typhoon Wave around Wushi Fishing Port by Typhoon NESAT

HOU Wen-hao, ZHANG Rui-jin, XI Yan-bin et al (College of Marine Science and Environment, Dalian Ocean University, Dalian, Liaoning 116023)

**Abstract** The MIKE21 SW wave model was used to simulate the wave characteristics of the Wushi fishing port in Yilan County, Taiwan Province during the typhoon “NESAT” period. The results showed that under the influence of “NESAT”, huge waves with a maximum significant wave height of more than 5.5 m were formed in the coastal waters of the fishing port for a duration of up to 12 hours. Under the shelter of the double breakwater, the significant wave height of the Wushi fishing port was gradually decreasing. The effective sheltered area in Wushi fishing port where the significant wave height was below 0.5 m was 24.2% of the total port area.

**Key words** Typhoon NESAT; MIKE21 SW; Numerical simulation; Wave feature; Wushi fishing port

我国拥有漫长的海岸线, 每年在近海地区都会遭受不同程度的台风侵袭<sup>[1]</sup>。在台风过境期间, 巨大台风浪严重制约近海渔业捕捞作业和观光旅游<sup>[2-3]</sup>; 同时, 台风浪引起的海底泥沙冲淤也直接影响近岸港口、航道运输通行<sup>[4-5]</sup>, 据统计, 台风每年对我国近岸捕捞和海水养殖业造成的损失就超过 260 亿元<sup>[6-7]</sup>。随着卫星监测系统的使用和海洋台风预报水平的提高, 也极大地降低了台风浪等强风暴过程造成的损失<sup>[8-9]</sup>, 保障了沿岸港口居民的生命财产安全。近年来, 国内外学者利用数值模拟的方法多次有效模拟了台风过境期间的近岸波浪变化, 为海洋预报和防灾减灾提供了参考, 孔令双等<sup>[10]</sup>采用 MIKE21 SW 波浪模型对长江口海域在凤凰台风期间的波浪场进行了模拟计算, 分析了该海域的波浪特征, 为泥沙数学模型提供了波浪动力条件。谭风等<sup>[11]</sup>基于 WRF 和 SWAN 数学模型, 较好地模拟“韦帕”台风过程中海浪的演化和传播过程, 模型验证良好, 为大风天三维泥沙数学模型提供准确的波浪动力条件。Sirisha 等<sup>[12]</sup>利用 MIKE21 SW 模型, 准确地评估了印度洋热带气旋条件下波浪预报系统的性能。Hall<sup>[13]</sup>利用三维海洋数值模型 FVCOM 与气象模型一起运行, 模拟了爱尔兰海利物浦湾地区的风暴潮引起海面变化情况, 计算结果较为准确地反映了风暴潮期间利物浦湾附近的波浪状况。刘秋兴等<sup>[14]</sup>利用浪潮耦合模型(ADCIRC+SWAN), 在洞头中心渔港附近建立了高分辨率的天文潮、风暴潮和近岸浪耦合数值预报系统, 较好地模拟天文潮的演进, 准确地反映台风过境期间风暴潮、海浪的传播过程。

台风“纳沙”为 2017 年第 9 号台风, 于 2017 年 7 月 29 日

19:40 在台湾宜兰县东部沿海正面登陆, 台风中心经过宜兰县乌石渔港。乌石渔港是台湾宜兰县重要渔港, 港域面积约 64 万 m<sup>2</sup>, 由于常年遭受台风袭扰, 港口建立了二级防波堤用以避风防灾。因此阐明台风过境期间渔港周边波浪特征, 对渔港避风防灾有重要的指导意义。笔者利用 MIKE21 SW 波浪模型, 对“纳沙”台风过境期间乌石渔港附近台风浪情况进行数值模拟, 阐述了渔港周围波浪特征, 并简要分析了该渔港避风效果, 以期为我国近海台风数值预报及渔港防灾减灾提供参考和数据支持。

## 1 资料与方法

### 1.1 波浪模型及参数设置

**1.1.1 SW 波浪控制方程。**波浪要素采用丹麦水力研究所(DHI Water & Environment)研制的计算软件 Mike21 SW (spectral waves) 模型进行推算。该软件可以用来进行大范围的波浪场推算, 也可以满足大尺度波浪推算的要求。它的优势在于能考虑波浪的折射、底部损耗、波浪破碎、波流联合作用及风等因素对波浪传播的影响。

SW 模型基于波作用守恒方程, 采用波作用密度谱  $N(\sigma, \theta)$  来描述波浪。模型的自变量为相对波频率  $\sigma$  和波向  $\theta$ 。波作用密度与波能谱密度  $E(\sigma, \theta)$  的关系:

$$N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma \quad (1)$$

在笛卡尔坐标系下, Mike21 SW 的控制方程即波作用守恒方程可以表示:

$$\partial N / \partial t + \nabla \cdot (\vec{V}N) = S / \sigma \quad (2)$$

其中,  $\vec{V}$  为波群速度,  $\vec{V} = (C_x, C_y, C_\sigma, C_\theta)$ ;  $C_x, C_y$  分别表示波作用在地理空间  $(x, y)$  中传播时的变化;  $C_\sigma$  表示由于水深和流速变化造成的相对频率的变化;  $C_\theta$  表示由水深和流速引起的折射。S 为能量平衡方程中以谱密度表示的源函数, 其公式:

**基金项目** 国家自然科学基金项目(31302232); 辽宁省教育厅优秀人才项目(LJQ2015017); 国家自然科学基金项目(51779038)。  
**作者简介** 侯文昊(1994—), 男, 甘肃金昌人, 硕士研究生, 研究方向: 物理海洋学。\* 通信作者, 副教授, 博士, 硕士生导师, 从事物理海洋学研究。  
**收稿日期** 2018-11-02

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad (3)$$

式中,  $S_{in}$  为风输入的能量,  $S_{nl}$  为波与波之间的非线性作用引起的能量耗散,  $S_{ds}$  为有白帽引起的能量耗散,  $S_{bot}$  为由底摩擦引起的能量耗散,  $S_{surf}$  为由于水深变化引起的波浪破碎产生的能量耗散。式中传播速度均采用线性波理论计算。

**1.1.2 计算网格及参数设置。**该研究采用美国国家地球物理数据中心 NOAA(national geophysical data center)提供的岸线及水深数据,使用 Mike21 SW 模型,利用有限体积法进行空间离散。使用网格生成器生成三角形网格,插值后得到地形文件。计算区域如图 1 所示,计算范围  $1\ 100\ \text{km} \times 1\ 200\ \text{km}$ ,网格尺度  $10\ \text{km}$ ,网格数  $60\ 587$ ,研究对象位于计算域内台湾宜兰县乌石渔港。为了研究乌石渔港附近的波浪情况,在台湾省宜兰县附近海域使用局部加密的方法来细化网格,在港内最小网格尺度达  $8\ \text{m}$ ,以提高重点研究区域的模拟精度。

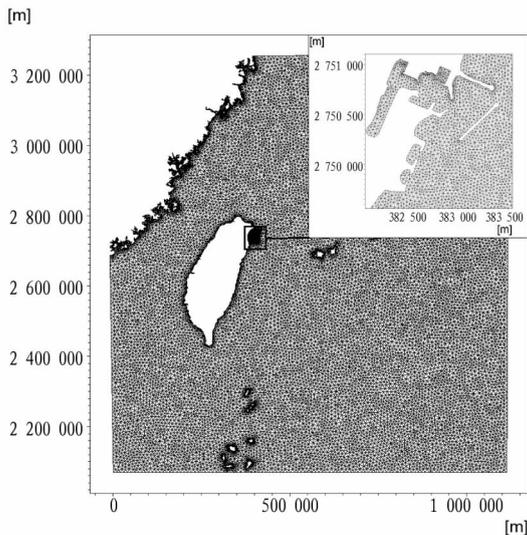


图 1 计算海区网格分布

Fig. 1 Distribution of calculating mesh

**1.2 风场文件计算设置** 在利用 MIKE21 SW 模型进行台风浪数值计算时,需要输入背景风场,该文件需要风场参数和地形文件合成得到。选取台风“纳沙”作为背景风场,“纳沙”为 2017 年第 9 号台风,于 2017 年 7 月 21 日在帕劳附近 ( $127.9^\circ\text{E}, 15.7^\circ\text{N}$ ) 海面上生成并向北移动,25 日升格为热带低压,26 日升格为热带风暴,27 日升格为强热带风暴,中心气压  $990\ \text{hPa}$ ,开始向西北方向行进;28 日升格为台风,最强达到台风级 ( $40\ \text{m/s}$ , 13 级),29 日 19:40 在台湾宜兰东部沿海登陆,台风中心经过宜兰县乌石渔港,在该港附近较大台风浪;30 日 06:00 在福建福清沿海再次登陆 ( $33\ \text{m/s}$ , 12 级),14:00 减弱为热带低压,20:00 中央气象台对其停止编号。

选取“纳沙”台风影响台湾时间段 2017 年 7 月 28 日 17:00—30 日 14:00 的台风参数,风场参数包括经纬度、最大风速、最大风速半径、中心移动速度、台风中心气压,正常气压。其中最大风速半径利用 Graham 和 Nunn 提出的台风经验公式(4)得到<sup>[15]</sup>。

$$R = 28.52 \text{th} [0.0873(\varphi - 28^\circ)] + 12.22 \exp [ (P_0 - 1013.2) / 33.86 ] + 0.2V_f + 37.22 \quad (4)$$

式中,  $V_f$  为台风中心移动的速度 ( $\text{km/h}$ ),  $\varphi$  为地理纬度,  $P_0$  为台风中心气压 ( $\text{hPa}$ )。

## 2 结果与分析

通过建立 MIKE21 SW 模型,输入地形文件和风场文件,设置模拟时间为台风生成后 54~99 h,时间步长为  $60\ \text{s}$ ,结果输出间隔为  $1\ \text{h}$ ,最终计算得到台风作用下波浪结果。

**2.1 Mike21 SW 模型验证** 收集“纳沙”台风期间 ODIN-WESTPAC 发布的波浪要素数据,利用北碕(BSG)站 ( $120.3^\circ\text{E}, 26.7^\circ\text{N}$ ) 数据对 Mike21 SW 台风波浪模型结果进行验证,图 2 为有效波高对比图,模型计算得到的有效波高与实测值的最大误差小于  $0.5\ \text{m}$ ;图 3 为有效波周期对比图,模型计算得到的有效波周期与实测值最大误差小于  $1\ \text{s}$ 。结果表明模型计算得到的有效波高和波周期与北碕(BSG)站实测数据总体吻合较好,可见该台风浪模型可以用来模拟“纳沙”台风过境期间台湾乌石渔港海域的波浪分布情况和演变过程。

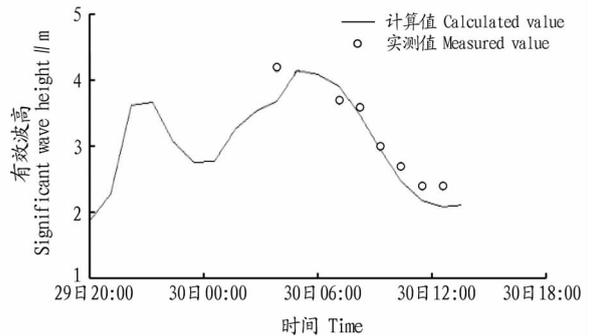


图 2 2017 年 7 月 29—30 日有效波高对比

Fig. 2 Comparison of significant wave height from July 29 to 30, 2017

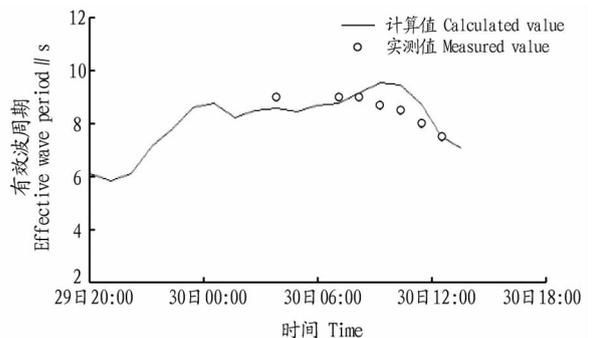


图 3 2017 年 7 月 29—30 日有效波周期对比

Fig. 3 Comparison of effective wave period from July 29 to 30, 2017

**2.2 台湾周边海域波浪特征分析** 图 4 为台湾附近海域有效波高包络图,“纳沙”台风过境期间,在台湾东部海域形成了怒涛,最大有效波高超过  $16\ \text{m}$ ;在台湾西部海域,由于台风受到大陆阻挡消散,有效波高相对较低,最大有效波高不足  $12\ \text{m}$ ,且从东北到西南有效波高等值线较密集,说明波能消散较快。图 5 为宜兰县乌石渔港附近海域有效波高包络图,结果显示,在乌石渔港附近海域形成巨浪,最大有效波高达

5.5 m。计算结果显示,乌石渔港附近海域巨浪持续时间较长,有效波高超过 4 m 的时间超过 12 h。在乌石渔港南部和东北部,有效波高等值线较密集,最大有效波高从 5.5 m 迅速降至 1.5 m,这与港口周围地形有关。台风过境期间,在近岸海域,随着水深变浅,有效波高由海向陆变化梯度明显,离风圈越远有效波高越低,破波带以内水域波浪衰减速度加快,这与该海域属于淤泥质海岸类型相吻合。

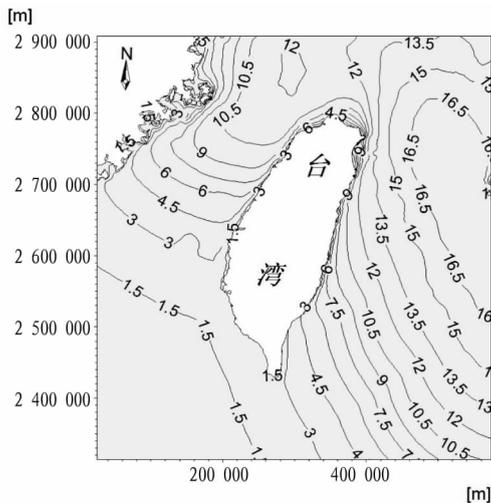


图4 “纳沙”过境期间台湾附近海域有效波高包络图

Fig.4 Enveloping graph of significant wave height around Taiwan Island during the transit period of “NESAT”

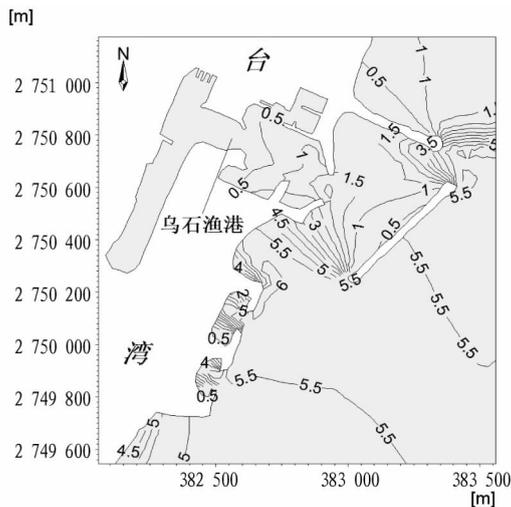


图5 “纳沙”过境期间乌石渔港附近海域有效波高包络图

Fig.5 Enveloping graph of significant wave height around Wushi fishing port during the transit period of “NESAT”

**2.3 台风影响下乌石渔港波浪特征分析** 为研究港内不同区域的波浪特征,在乌石渔港离岸防波堤外部,乌石渔港离岸防波堤内部,乌石渔港港口处和乌石渔港最内侧分别取 A、B、C、D 4 点(图6)。

图7为“纳沙”台风影响下乌石渔港附近有效波高变化图,以乌石渔港离岸防波堤外部(A点)海域波浪情况为例,第1阶段从开始模拟到7月29日05:00,“纳沙”距离乌石渔港较远,渔港附近离岸防波堤外为轻浪,有效波高普遍在

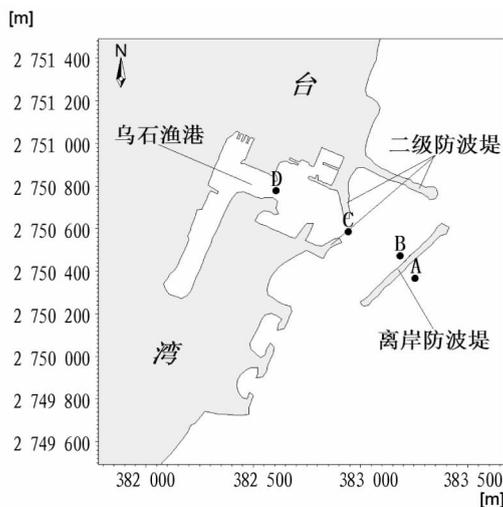


图6 乌石渔港内外取点位置

Fig.6 Location of the study sites around Wushi fishing port

1.25 m 以下。第2阶段,7月29日05:00—19:00,“纳沙”逐渐开始影响乌石渔港,波高逐渐上升;在29日21:00,台风中心风眼前壁抵达乌石渔港处,在渔港附近形成巨浪,有效波高达到最大值 5.5 m。第3阶段(7月29日19:00—23:00),由于台风中心经过乌石渔港,有效波高先降低至 4.08 m,从7月29日21:00左右又开始升高,到29日23:00有效波高达到新高峰 5.29 m,说明此时台风中心风眼后壁抵达乌石渔港处。第4阶段(7月29日23:00—30日14:00),“纳沙”穿过台湾,继续往西北方向移动,30日06:00登陆福建,随后逐渐削弱直至消失;此阶段乌石渔港附近海域受台风控制逐渐减弱,有效波高也随之降低,浪级由巨浪逐渐降至轻浪。

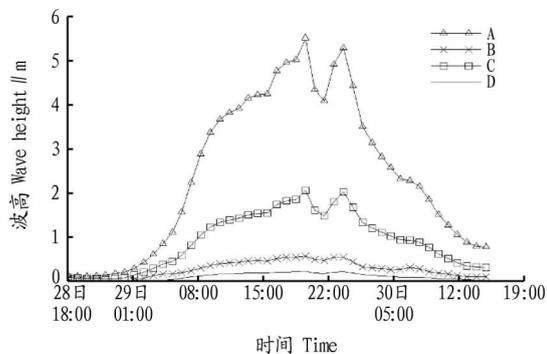


图7 2017年7月28—30日“纳沙”过境期间离岸防波堤内外波高对比

Fig.7 Comparison of wave height inside and outside the offshore breakwater during the transit period of “NESAT”

图7表明,在“纳沙”台风过境期间,乌石渔港外侧的离岸防波堤有效地阻挡了台风引起台风浪对港岸的冲击破坏。“纳沙”台风正面登陆台湾时,经过乌石渔港处,在离岸防波堤外侧 A 点处有效波高达 5.50 m,波浪经过离岸防波堤阻挡耗散后,在离岸防波堤背风侧 B 点处有效波高降为 0.57 m,在离岸防波堤背风侧可有效避风。然而,由于在港口南部和东北部没有防波堤的阻挡掩蔽,部分波能由此传入使得 C 点处在出现中浪,有效波高约 2.06 m。由于二级防波堤的掩护

作用,波能到达D点时,波能大大减弱,有效波高仅0.39 m。港内有效波高0.5 m等值线以内的区域可有效避风,面积约15.5万m<sup>2</sup>,占港域面积的24.2%。

### 3 结论

(1)该研究利用Mike21 SW(spectral waves)模型计算的台风浪参数与实测数据拟合较好,可以依据台风风场资料应用Mike21 SW模型推算波浪参数。

(2)“纳沙”过境期间,由于台风眼经过乌石渔港,该渔港附近波高经历了升高、降低、再升高、再降低4个阶段,在渔港近岸海域形成了最大有效波高超过5.5 m的巨浪,持续时间长达12 h。

(3)“纳沙”过境期间,乌石渔港处两级防波堤对渔港起到了一定掩蔽效果,最大有效波高从外到里逐渐降低,波浪经过离岸防波堤时,有效波高由5.50 m降为0.57 m;在二级防波堤的掩护下,在乌石渔港最内部的有效波高等值线0.5 m区域内可有效避风,港口24.2%的区域可有效避风。

### 参考文献

[1] 牛海燕,刘敏,陆敏,等.中国沿海地区台风灾害损失评估研究[J].灾害学,2011,26(3):61-64.

- [2] 于杰,陈国宝,陈作志,等.台风“启德”对粤西渔场渔业的影响分析[J].海洋环境科学,2015,34(3):411-419.
- [3] 黄卓,廖雪萍.2016年台风“莎莉嘉”对广西的影响评估[J].气象研究与应用,2017,38(1):40-42.
- [4] 杨静思,张庆河,张金凤,等.“韦帕”台风过程中南海海域流场研究[J].水道港口,2013,34(3):225-231.
- [5] 邱桔斐,马越,徐新华.长江口外海域波浪场数值模拟[J].水运工程,2011(10):11-14.
- [6] 中国气象局.热带气旋年鉴[M].北京:气象出版社,2007.
- [7] 丁一汇.中国气象灾害大典:综合卷[M].北京:气象出版社,2008.
- [8] 陈述彭.台风防灾减灾信息系统[J].地球信息科学学报,2006,8(4):1-3.
- [9] 姬翔,王新.风云卫星高时空分辨率资料在热带气旋监测预报中的应用[J].气象科技,2014,42(4):647-651.
- [10] 孔令双,戚定满,万远扬,等.长江口海域波浪场模拟研究[J].水运工程,2010(2):46-49.
- [11] 谭凤,张庆河,庞启秀,等.基于WRF-SWAN模式的韦帕台风波浪场模拟[J].水道港口,2012,33(1):14-18.
- [12] SIRISHA P, REMVA P G, NAIR T M B, et al. Numerical simulation and observations of very severe cyclone generated surface wave fields in the north Indian Ocean[J]. Journal of earth system science, 2015, 124(8): 1639-1651.
- [13] HALL P. Modelling a storm surge event in Liverpool Bay with FVCOM[M]. Vienna, Austria: EGU General Assembly Conference, 2012:4736.
- [14] 刘秋兴,李明杰,吴玮,等.温州洞头中心渔港精细化浪潮耦合数值预报系统研究[J].海洋预报,2015,32(6):10-18.
- [15] 邱大洪.工程水文学[M].4版.北京:人民交通出版社,2011.

(上接第212页)

边坡稳定的关键,对于地层为卵石的高陡边坡,坡脚宜用挡墙加固支护,既能防止坡脚挤压破坏,又能起到避免受强降雨或地表径流等雨水作用的冲刷,坡体宜用预应力锚索格构加固,并在格构内填充片石,既能防止坡体在自重或外力作用下的失稳变形,又能防止坡面被雨水冲刷,另外,预应力锚索之锚固段在卵石地层中的锚固效果较好。

(3)经实践证明,对于地层为卵石的高陡边坡,采用坡脚挡墙支护、坡体预应力锚索格构加固和坡面浆砌片石护面的治理方案合理可行,治理效果良好。

### 参考文献

- [1] 郑颖人,陈祖煜,王恭先,等.边坡与滑坡工程治理[M].北京:人民交通出版社,2010:5-7.
- [2] 王恭先.高边坡设计与加固问题的讨论[J].甘肃科学学报,2003,15(S1):5-9.
- [3] 马惠民,吴红刚.山区高速公路高边坡病害防治实践[J].铁道工程学报,2011(7):34-41.
- [4] 杨永兵,施斌,杨卫东,等.边坡治理中的植物固坡法[J].水文地质工程地质,2002(1):64-67.
- [5] 胡华敏,胡杰刚,俞敏,等.桩锚支挡体系在广西寨一任二级公路高边坡

- 治理工程中的应用[J].中国地质灾害与防治学报,2006,17(3):150-153.
- [6] 张泽鹏,朱凤贤,黄放军,等.复杂地质条件下高边坡加固设计与综合治理研究:以梅河高速公路某高边坡治理为例[J].中山大学学报(自然科学版),2006,45(4):44-48.
- [7] 卢坤林,朱大勇,甘文宇,等.一种边坡稳定性分析的三维极限平衡法及应用[J].岩土工程学报,2013,35(12):2276-2282.
- [8] 郑颖人.岩土数值极限分析方法的发展与应用[J].岩石力学与工程学报,2012,31(7):1297-1316.
- [9] ZHENG Y R, DENG C J, ZHAO S Y, et al. Development of finite element limiting analysis method and its applications to geotechnical engineering[J]. Engineering sciences, 2007, 5(3): 10-36.
- [10] 邓琴,郭明伟,李春光,等.基于边界元法的边坡矢量和稳定分析[J].岩土力学,2010,31(6):1971-1976.
- [11] JING L. A review of techniques advances and outstanding issues in numerical modeling for rock mechanics and rock engineering[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2003, 40(3): 283-353.
- [12] 王贵荣,韩飞.基于有限差分强度折减法的略阳电厂边坡稳定性分析[J].工程地质学报,2007,15(3):346-349.
- [13] WANG J D. The analysis of loess slope instability based on fuzzy method[J]. BUSEFAL, 1993, 53: 83-92.
- [14] 赵尚毅,郑颖人,时卫民,等.用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J].岩土工程学报,2002,24(3):343-346.