

文章编号: 1672-6987(2017)06-0093-05; DOI: 10.16351/j.1672-6987.2017.06.015

海洋平台地基抗震适宜性诊断方法

辛峻峰, 韩兆林, 焦煜, 张子捷, 高冬月

(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061)

摘要: 对海洋平台的地基抗震适宜性诊断问题进行了系统分析并基于灰色理论结合模糊综合评判技术构建了诊断理论模型。该模型首先利用灰色统计技术建立测评矩阵, 继而使用灰色关联分析来确定相关指标的权重, 最后通过模糊方法进行综合评判, 使得诊断结果更为科学合理。为了验证该模型的科学性和合理性, 本工作结合 GIS 技术成功评估了渤海湾某海洋平台地基抗震适宜性。

关键词: 海洋平台; 地基抗震适宜性; 灰色关联分析; 灰色统计; 模糊诊断

中图分类号: TP 18 **文献标志码:** A

引用格式: 辛峻峰, 韩兆林, 焦煜, 等. 海洋平台地基抗震适宜性诊断方法[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2017, 38(6): 93-97.

XIN Junfeng, HAN Zhaolin, JIAO Yu, et al. Ocean platform foundation aseismic suitability diagnostic method research[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 38(6): 93-97.

Ocean Platform Foundation Aseismic Suitability Diagnostic Method

XIN Junfeng, HAN Zhaolin, JIAO Yu, ZHANG Zijie, GAO Dongyue

(College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: The paper carries on the system analysis of seismic resistance suitability and evaluates indicator system seismic resistance suitability about ocean platforms by a integrated method based on grey theory and fuzzy comprehensive evaluation method for the synthetic study. This method firstly establishes grey statistic technology evaluation matrix, and then uses the gray correlation analysis to determine the weights of related indicators, carries on the synthesis judgment with fuzzy method, so we can make the measure results more scientific and reasonable. In order to verify its scientificity and rationality, this paper finally demonstrates distribution map of land seismic resistance suitability in Bohai gulf successfully by the combination of this method and GIS technology.

Key words: ocean platforms; land seismic resistance suitability; grey correlation analysis; gray statistics; fuzzy appraisal

海底地基的抗震能力是影响海洋平台等海洋工程基础设施安全性的因素之一。只有科学合理地评估海底地基的抗震能力, 才能避免倾斜等事故的发生。

生, 保障海洋平台的正常运行。但是目前对海洋平台地基抗震能力的相关研究鲜见报道^[1-4]。

能用于评估海底地基抗震能力的方法可分为两

收稿日期: 2016-11-01

基金项目: 青岛市城乡建设委员会项目(JK2015-15)。

作者简介: 辛峻峰(1982—), 男, 博士。

类:一是基于知识和规则的数理逻辑推理方法,包括灰色理论、综合指数法、模糊综合评判法等;二是基于样本学习和数据驱动机制的自适应方法,如人工神经网络法、遗传算法等。目前,人们对海底地基抗震适宜性的认识还很模糊,诊断过程也受到许多已知和未知因素的影响,还处于一种灰色状态,具有典型的灰色和模糊认知特征,所以灰色和模糊理论更适合于评估海底地基的抗震状态^[2,4]。

本工作基于灰色理论结合模糊综合评判法提出一种定量的、更具可操作性的海洋平台地基抗震适宜性诊断方法,主要步骤为:确定诊断指标、基于专家知识评定使用灰色关联度来确定相关指标的权重、采用灰色统计技术确定相应的模糊评判矩阵,结合确定的权重和模糊评判矩阵给出最终诊断结果。

1 海底地基抗震适宜性诊断因素分析

1.1 地形地貌指标

地震灾害调查证实,条状突出的山嘴、高耸孤立的山丘和高陡斜坡地带或附近的构筑物,地震灾害一般都比平坦地基上构筑物的灾害严重^[2,5-6]。这种局部微地形地貌的影响,是震动促使孤突山体发生共振并发生地震波地形放大效应所导致;或是由于孤突山体和陡斜坡体内的体波,经过多次反射后引起地面的位移、速度和加速度放大所导致。

因此,海底的地形地貌对地震可能造成的危害会产生直接的影响,这也必然影响平台地基的抗震能力。海底的主要地形地貌有:1)海湾;2)绵延的海岭;3)深邃的海沟;4)平坦的深海平原。

1.2 断层分布指标

地震带与活动断层在成因上有着密切的联系。因此可通过地震带发现和研究活动断层带,而活动断层带的存在和断层作用又是决定地震和地震带分布的根本因素。断层严重影响着工程场地的稳定性,如果工程场地有活动断层通过,即使缓慢的蠕变,但长期积累的断裂位移也会使构筑物产生错裂破坏而发生灾害。如果活动断层出现突发性快速运动,则地表或靠近地表处可能发生强烈错动,造成场地失稳、地基变形,最终导致跨越发震断层的构筑物结构的极大破坏。这种破坏是无法抵御的,因此构筑物应该避开活动断层。

1.3 场地地质特征指标

工程场地对地震的响应特征也是影响抗震适宜性的因素,我国规定用弹性加速度反应谱表示工程

场地的地震响应特性。根据这一规定,只需要最大地震影响系数和特征周期两个地震参数,就可表示工程场地的设计谱曲线。

1.4 潜在液化现象指标

工程场地及其周围潜在的地震液化现象也会导致巨大的灾害。地震液化作用是指由地震导致饱和松散沙土或未固结岩层发生液化的作用,这种作用会导致喷砂冒水、地裂、地陷和边坡失稳等地面破坏现象^[2]。不同地区的液化程度分为轻微液化、中等液化、严重液化3个等级。

1.5 潜在滑坡现象指标

滑坡是一种严重的地质灾害。地震时,如发生海底滑坡,将会对海洋平台等构筑物产生致命的打击,所以工程场地潜在的地震滑坡现象也是诊断地基抗震性的重要因素。根据潜在的滑坡强度和规模,将其分为大型滑坡威胁、中型滑坡威胁、小型滑坡威胁3个等级。

2 灰色诊断模型构建

以上的分析表明,工程场地的地形地貌、断层分布、场地地质特征、潜在的液化作用、潜在的滑坡等都会影响地基的抗震能力。基于这些指标,结合灰色理论和模糊理论可以构建出评估海底地基抗震适宜性的模型。

2.1 诊断指标集

将影响地基抗震能力指标构成一个集合,称为诊断指标集 U 。

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}, \quad (1)$$

这里 $n=5$, u_1 、 u_2 、 u_3 、 u_4 、 u_5 分别对应地形地貌、断层分布、场地地质特征、潜在液化作用、潜在的滑坡。

2.2 诊断等级集合

海底地基的抗震能力可以分为若干个等级,这些等级构成诊断等级集合

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}, \quad (2)$$

这里 $m=4$, v_1 、 v_2 、 v_3 、 v_4 分别表示优、良、中、差4个等级。

2.3 灰色模糊评判矩阵

假设对目标场地抗震能力做出评判的专家人数为 r ,场地抗震能力的诊断指标共有 n 个,诊断的等级分为 m 级。将第 s 位专家对第 j 个指标的诊断记为 λ_{sj} ,则所有专家对目标场地的诊断记为样本矩阵 Λ ^[2,7]:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \cdots & \lambda_{1j} & \cdots & \lambda_{1n} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \cdots & \lambda_{2j} & \cdots & \lambda_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \lambda_{s1} & \lambda_{s2} & \cdots & \lambda_{sj} & \cdots & \lambda_{sn} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \lambda_{r1} & \lambda_{r2} & \cdots & \lambda_{rj} & \cdots & \lambda_{rn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

继而用灰色统计法确定各诊断标准函数, 求出 λ_{sj} 属于第 i 类诊断等级的权值 $f_i(\lambda_{sj})$, 并定义白化函数如式(4)~(7)所示。

$$f_1(\lambda_{sj}) = \begin{cases} \lambda_{sj}/\lambda_1, & \lambda_{sj} \in [0, \lambda_1], \\ 1, & \lambda_{sj} \in [\lambda_1, +\infty], \\ 0, & \lambda_{sj} \in [-\infty, 0]. \end{cases} \quad (4)$$

$$f_2(\lambda_{sj}) = \begin{cases} \lambda_{sj}/\lambda_1, & \lambda_{sj} \in [0, \lambda_1], \\ 2 - \lambda_{sj}/\lambda_1, & \lambda_{sj} \in [\lambda_1, 2\lambda_1], \\ 0, & \lambda_{sj} \notin [0, 2\lambda_1]. \end{cases} \quad (5)$$

$$f_3(\lambda_{sj}) = \begin{cases} \lambda_{sj}/\lambda_1, & \lambda_{sj} \in [0, \lambda_1], \\ 2 - \lambda_{sj}/\lambda_1, & \lambda_{sj} \in [\lambda_1, 2\lambda_1], \\ 0, & \lambda_{sj} \notin [0, 2\lambda_1]. \end{cases} \quad (6)$$

$$f_4(\lambda_{sj}) = \begin{cases} 1, & \lambda_{sj} \in [0, \lambda_1], \\ \frac{\lambda_2 - \lambda_{sj}}{\lambda_2 - \lambda_1}, & \lambda_{sj} \in [\lambda_1, +\infty], \\ 0, & \lambda_{sj} \in [-\infty, 0]. \end{cases} \quad (7)$$

式(4)~(7)中 λ_1 和 λ_2 为专家拟定的阈值。

根据白化函数求出评判矩阵的灰色统计数 n_{ji} 和总灰色统计数 n_j ,

$$n_{ji} = \sum_{s=1}^r f_i(\lambda_{sj}), \quad (8)$$

$$n_j = \sum_{i=1}^m n_{ji}. \quad (9)$$

由灰色统计数和总灰色统计数计算出评估数 r_{ji} , 由评估数构成灰色模糊评判矩阵

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1i} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2i} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ r_{j1} & r_{j2} & \cdots & r_{ji} & \cdots & r_{jm} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{ni} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix},$$

$$r_{ji} = \frac{n_{ji}}{n_i}. \quad (10)$$

2.4 指标的权重集合

诊断地基抗震能力的 n 个指标, 每一个指标对抗震能力的影响不同, 即权重不同。将第 j 个指标的权重记为 w_j , 则得指标权重集合 W 。

$$W = \{w_1, w_2, \cdots, w_j, \cdots, w_n\}, \quad \sum_{j=1}^n w_j = 1. \quad (11)$$

各个指标的权重可以由灰色理论中的灰色关联度来确定。

式(3)表示了专家对各个诊断指标的诊断分数。式(3)中每一列的值构成一个比较因素数列 U_j , 它表示不同专家对同一个指标的打分。

$$U_j = \{\lambda_{1j}, \lambda_{2j}, \cdots, \lambda_{sj}, \cdots, \lambda_{rj}\}. \quad (12)$$

取式(3)中每一行的最大值, 构成参考因素系列 U_0 , 它表示了每一个专家的最高评分。

$$U_0 = \{\lambda_{\max 1}, \lambda_{\max 2}, \cdots, \lambda_{\max s}, \cdots, \lambda_{\max r}\}. \quad (13)$$

其中: $\lambda_{\max s} = \max\{\lambda_{sj}\}, j=1, 2, \cdots, n$ 。

利用式(14)可以计算出 U_j 对 U_0 在第 s 位专家上的关联系数^[7-10]:

$$\zeta_j(s) = \frac{\min_j \min_s |U_0(s) - U_j(s)| + \varphi \max_j \max_s |U_0(s) - U_j(s)|}{|U_0(s) - U_j(s)| + \varphi \max_j \max_s |U_0(s) - U_j(s)|}, \quad (14)$$

其中 φ 为分辨系数, $\varphi \in [0, 1]$ 。

将关联系数代入式(15)求出关联度

$$k_j = \frac{1}{k} \sum_{s=1}^r \zeta_j(s), \quad (15)$$

由关联度求出各个因素的权重

$$w_j = \frac{r_j}{\sum_{j=1}^n r_j}. \quad (16)$$

2.5 模糊诊断

将模糊评判矩阵和权重集合代入式(17)可计算出相关海底地块的抗震适宜性的相关隶属度 B (打分法进行评估)。其中值得注意的是: 若各诊断等级相差较小, 还需再次计算。

$$B = W \cdot R. \quad (17)$$

为更加清晰地区分不同海底地块的评估等级, 可对已经计算出的诊断等级进一步打分 (Delphi 方法), 记为 $D = (d_1, d_2, \cdots, d_m)$, 即 v_i 等级的分值为 d_i , 用式(18)可计算出该相关海底地块的分值

$$Z = B \cdot D^T. \quad (18)$$

3 渤海湾平台地基抗震适宜性诊断

聘请 7 位专家 ($E_1 - E_7$) 对渤海湾某海洋平台地基的抗震适宜性进行诊断。诊断指标为 5 个 ($u_1 \sim u_5$), 打分范围为 $0 \leq \lambda_{sj} \leq 10$, 最终得到专家诊断样本, 并列入表 1 中。

表 1 专家诊断样本
Table 1 Expert evaluation sample

专家号	诊断指标				
	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5
E_1	10	9	9	8	8
E_2	9	8	10	9	8
E_3	9	6	8	7	8
E_4	8	8	8	8	7
E_5	8	9	8	6	6
E_6	8	8	8	8	5
E_7	10	6	6	7	8

根据前述的诊断等级集合, 设定的灰数及其白化函数见图 1。

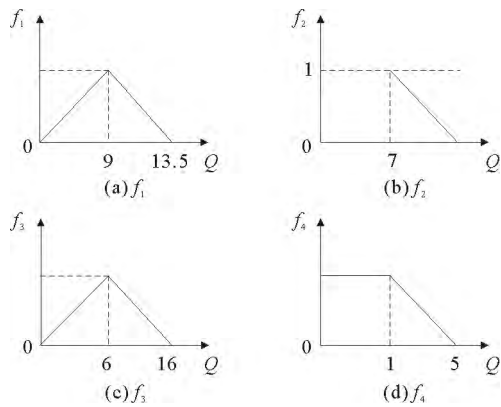


图 1 白化函数

Fig. 1 Whitenization function

以指标 u_1 为例, 应用式(4)~(8)可计算出该平台地基属于各灰类的统计数为

$$\begin{aligned} n_{11} &= f_1(10) + f_1(9) + f_1(9) + f_1(8) + f_1(8) + f_1(8) + f_1(10) = \\ &0.888\ 9 + 1 + 1 + 0.888\ 9 + 0.888\ 9 + 0.888\ 9 + 0.888\ 9 = 6.444\ 5, \end{aligned}$$

$$n_{12} = f_2(10) + f_2(9) + f_2(9) + f_2(8) + f_2(8) + f_2(8) + f_2(10) = 5.532\ 2,$$

$$n_{13} = f_3(10) + f_3(9) + f_3(9) + f_3(8) + f_3(8) + f_3(8) + f_3(10) = 1.975\ 2,$$

$$n_{14} = f_4(10) + f_4(9) + f_4(9) + f_4(8) + f_4(8) + f_4(8) + f_4(10) = 0.$$

应用式(9)可计算出总灰色统计数 $n_1 = 13.951\ 9$ 。应用式(10)可计算出属于各灰类的评估数: $r_{11} = 0.461\ 9, r_{12} = 0.396\ 5, r_{13} = 0.141\ 6, r_{14} = 0$ 。

同理可求其他指标的灰色统计数 n_{ji} 、总灰色统

计数 n_j 和评估数 r_{ji} , 进而得到所有指标诊断的灰色模糊评判矩阵

$R =$

$$\begin{bmatrix} 0.461\ 9 & 0.396\ 5 & 0.141\ 6 & 0 & 0 \\ 0.364\ 3 & 0.488\ 4 & 0.232\ 1 & 0 & 0 \\ 0.434\ 4 & 0.353\ 2 & 0.235\ 4 & 0 & 0 \\ 0.322\ 4 & 0.463\ 4 & 0.334\ 2 & 0 & 0 \\ 0.445\ 3 & 0.459\ 3 & 0.285\ 4 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T.$$

选取表 1 中每行的最大评分得到参考因素系列: $U_0 = \{10, 10, 9, 8, 9, 8, 10\}$, 以表 1 中的每一列作为比较因素系列, 可得如表 2 所示的绝对差序列, 表 2 中 $\Delta_j(s) = |U_0(s) - |U_j(s)|, s = 1, 2, \dots, 7; j = 1, 2, 3, 4, 5$ 。

表 2 绝对差序列

Table 2 Absolute difference

序号	$\Delta_1(s)$	$\Delta_2(s)$	$\Delta_3(s)$	$\Delta_4(s)$	$\Delta_5(s)$
1	0	1	1	2	2
2	1	2	0	1	2
3	0	3	1	2	1
4	0	0	0	0	1
5	1	0	1	3	3
6	0	0	0	0	3
7	0	4	4	3	2

在表 2 中, $\min_j \min_s |U_0(s) - |U_j(s)| = 0$, $\max_j \max_s |U_0(s) - |U_j(s)| = 4$ 。在式(14)中, 令分辨系数 $\varphi = 0.5$, 可计算出指标 j 在第 s 位专家上的关联系数。

以第 4 个指标、第 7 位专家为例, 因为 $|U_0(7) - U_4(7)| = \Delta_4(7) = 3$, 则

$$\zeta_4(7) = \frac{0 + 0.5 \times 4}{3 + 0.5 \times 4} = 0.4.$$

应用式(14)可以依次计算出所有的关联系数, 见表 3。

表 3 关联系数

Table 3 Correlation coefficient

序号	$\zeta_1(s)$	$\zeta_2(s)$	$\zeta_3(s)$	$\zeta_4(s)$	$\zeta_5(s)$
1	1	0.667	0.667	0.5	0.5
2	0.667	0.5	1	0.667	0.5
3	1	0.4	0.667	0.5	0.667
4	1	1	1	1	0.667
5	0.667	1	0.667	0.4	0.4
6	1	1	1	1	0.4
7	1	0.333	0.333	0.4	0.5

根据表3的关联系数,应用式(15)可求出关联度: $k_1=0.9049, k_2=0.7, k_3=0.762, k_4=0.6381, k_5=0.5191$ 。再利用式(16)计算得到指标的权重集合

$$W=$$

$$\{0.2568, 0.1986, 0.2162, 0.1811, 0.1473\},$$

根据得到的权重集合 W 和模糊诊断矩阵 R , 应用式(17)可计算出相关隶属度

$$B=W \cdot R=(0.3931, 0.4231, 0.1342, 0.1543)。$$

根据最大隶属度原则,该平台地基的诊断等级为“适宜”。最终,使用Java开发语言结合GIS技术将评估结果展现在卫星云图上,如图2所示。

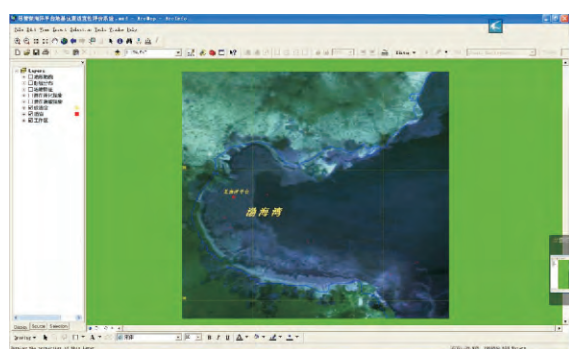


图2 海洋平台地基抗震适宜性诊断系统

Fig.2 Aseismic suitability evaluation system for jacket offshore platform foundation

图2中,左侧菜单栏依次列出了地形地貌、断层分布、场地特征、潜在液化现象、潜在滑坡现象等5个影响因素和诊断结果。

4 结 语

海底地基的抗震性能对海洋平台安全的影响巨大,本工作在分析海底地基抗震性能影响因素的基础上,采用灰色和模糊理论建立了海洋平台抗震适宜性诊断模型,继而将评估模型与GIS技术相结合

更直观和合理地显示了渤海某平台海底地基抗震状态,验证了其科学性和合理性。本模型使用方式更灵活、可操作性更强,而且能更有效地克服了人们对海洋平台海底地基抗震适宜情况认识的模糊性,为我国海洋平台地基安全性的评估提供了参考。

参 考 文 献

- [1] RAMOS L F, LOURENCO P B. Modeling and vulnerability of historical city centers in seismic areas: A case study in lisbon [J]. Engineering Structures, 2004, 26(9):1295-1310.
- [2] 辛峻峰. 城市用地抗震适宜性评价方法研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2009.
XIN Junfeng. Seismic Suitability Evaluation Method Research on Urban Land [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [3] 修宗祥. 深水导管架海洋平台安全可靠性及优化设计[D]. 青岛:中国石油大学,2012.
XIU Zongxiang. Deep Water Jacket Offshore Platform Security Reliability Analysis and Optimization Design [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2012.
- [4] 辛峻峰. 基于随机子空间法的海洋平台模态参数识别技术研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2012.
XIN Junfeng. Modal Parameter Identification Technology Research on Offshore Platform Based on the Stochastic Subspace Method [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [5] 中华人民共和国建设部. GB50011-2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国标准出版社,2001.
Ministry of Construction. GB50011-2001 Earthquake Resistant Design Code[S]. Beijing: Standards Press of China, 2001.
- [6] AGNESI V, CAMARDA M, CONOSCENTI C, et al. A multi-disciplinary approach to the evaluation of the mechanism that triggered the cerda landslide (Sicily, Italy) [J]. Geomorphology, 2005, 65 (1/2):101-116.
- [7] CHANG B R. Novel grey relational measurements[C]// International Joint Conference on Neural Networks, Washington USA, 2001, 3(3): 1615-1619.

(责任编辑 姜丰辉)