

天津市滨海新区工程地质适宜性研究^{*}

张长生^{1,2,3}, 张伯友², 王连元⁴, 孙 铁⁵, 李晓茹⁵

(1. 中国科学院研究生院, 北京 100039;

2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640;

3. 铁道部科学研究院深圳研究设计院, 广东 深圳 518034;

4. 黑龙江科技学院, 黑龙江 150027;

5. 天津地质工程勘察院, 天津 300000)

摘 要: 应用 AHP-Fuzzy 多级模糊综合评判方法对天津市滨海新区工程地质适宜性进行了综合评价和分区。规定用建筑安全等级(I、II、III)进行评价。安全等级为 II、III 级建筑通常采用天然地基和软土地基, 对 I 级建筑均需采用桩基。工程地质适宜性评价因子的选择以土性因子为主, 权重用 AHP 层次分析法确定, 单因素隶属度用割分面积元的办法来确定。通过 AHP-Fuzzy 两极模糊综合评判最后确定出的 II、III 及 I 级建筑适宜性分区是符合实际的, 具有较强的实用性。

关键词: 适宜性; 稳定性; 地基; 权重; 层次分析法; 多级模糊综合评判

中图分类号: P642.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579(2004)SI-0212-05

1 滨海新区概况

天津市于 1994 年确定了“用 10 年左右时间基本建成滨海新区”的战略目标。滨海新区是天津市的经济增长点和重要发展地区, 但存在软土地基、砂土液化、地面沉降等众多的工程地质问题。因此综合评价它的工程地质适宜性并分区非常必要。为满足未来发展的需要, 评价范围在原有 350 km² 的基础上扩展到塘沽、汉沽、大港的全区, 达到 2 270 km²。它的构造、水文及工程地质条件较复杂。沧东、海河和汉沽断裂对本区影响明显。综合 40 m 以内浅土层的力学特征、固结特征及利用情况, 概化为浅部、中部、深部三个工程地质段。根据沉积时代、成因自上而下分为 4 大工程地质层, 据土性特征进一步划分为若干亚层。

2 AHP Fuzzy 模糊综合评判步骤

2.1 工程地质适宜性评价因素选择

城市工程地质适宜性的影响因素从大的方面包括: 地壳、地面及地基稳定性。对每项内容只选择一些起决定作用的因素进行评价。据地质构造特征, 选取活动断裂和基本烈度作为评价影响地壳稳定性的因素。由实测统计数据及以往文献资料, 汉沽断裂以北为 8 度区; 以南为 7 度区。由于评价范围大且钻孔分布不均, 地面及地基稳定性评价因子

的选择以土性因子为主才具有全区对比性。评价区地基土经初步判别属于可能液化土, 选用 15 m 以上粉土厚度可以定性地评价沙土液化的危险性。为保证预测的准确和方法的简便并与全区评价精度相吻合, 选择上覆硬壳层厚度和软土厚度 2 个因子综合评价软土震陷。在水位下降趋势得到控制之后, 欠固结软土的固结沉降便成为评价区地面沉降的主要原因, 按软土层厚度进行分区便可评价未来地面沉降量的差异性。借鉴以往评价的经验方法, 并结合本区实际情况, 对于天然和软土地基质量评价对象为第 II 和第 III 工程地质层, 评价因子为: ①第 II 工程地质层顶板埋深; ②第 II 工程地质层厚度; ③第 II 工程地质层土性; ④第 III 工程地质层淤泥质土厚度; ⑤地下水侵蚀性。对于桩基质量评价对象为第 IV、V、VI 工程地质层, 评价因子为: ①持力层土性; ②持力层厚度; ③下卧层土性; ④第 III 工程地质层淤泥质土厚度。

2.2 工程地质适宜性评价等级划分

据《建筑地基基础设计规范》和《天津沿海地区建筑地基基础设计规范》, 结合滨海新区的实际情况和建筑适宜性评价需要, 综合采用表 1 的评价安全等级, 对滨海新区安全等级为 II、III 级的建筑通常采用天然和软土地基, 适宜性取决于地面和地基稳定性因素。对 I 级建筑均需采用桩基, 评价取决于地壳和桩基稳定性因素。

^{*} 收稿日期: 2003-09-22

作者简介: 张长生(1970年生), 男, 博士生; E-mail: changsheng@gig.ac.cn

2.3 工程地质适宜性单因素评价准则

内有关分级标准和经验，评价区单因素指标分级标准作了如下的划分（表 2，3）。

目前国内外关于建筑适宜性评价等级划分尚无

统一的标准，在综合前人研究的基础上，并考虑国

表 1 建筑适宜性评价规定的安全等级

Tah 1 Security grade of construction suitability estimate

安全等级	破坏后果	建筑类型
I 级	很严重	①重要工业与民用建筑物；②8 层以上高层建筑；③对沉降有严格限制的建筑
II 级	严重	①一般的工业与民用建筑；②4—8 层的住宅建筑；③对沉降较敏感的建筑
III级	不严重	①3 层及 3 层以下的住宅建筑；②次要的建筑，如一般仓库、辅助车间等

表 2 天然地基和软土地基评价因子指标分级标准

Tah 2 Nature foundation and soft clay foundation's estimate factor grade criterion

评价因子		分级标准		
		I 区	II 区	III区
地面 稳定性 U1	15 m 以上粉土分布（U11）< 1.0	1.0~2.0	> 2.0	
	软土层厚度（U12）	< 6.0	6.0~8.0	> 8.0
	硬壳层厚度（U13）	< 1.5	1.5~2.0	> 2.0
地基 稳定性 U2	第II 工程地质层顶板埋深（U21）	< 1.5	1.5~2.0	> 2.0
	第II 工程地质层厚度（U22）	> 2.0	2.0~1.5	< 1.5
	第II 工程地质层土性（U23）	粘土	粉质粘土	淤泥质粘土
	第III工程地质层淤泥质土厚度（U24）	< 4.0	4.0~6.0	> 6.0S
	地下水侵蚀性（U25）	中等	强烈	严重

表 3 桩基持力层单因子评价指标分级标准

Tah 3 Single factor estimate grade criterion of stake foundation support layer

评价因子		分级标准		
		I 区	II 区	III区
地壳稳 定性 U1	活动断裂（U11）	没有或一般断裂	微弱全新活动断裂	中等、强烈全新活动断裂
	基本烈度（U12）	7 度区	7 度至 8 度区交界	8 度区
桩基稳 定性 U2	持力层土性（U21）	粉土（砂）	粉土+粘土	粘土
	持力层厚度（U22）	> 3.0	3.0~2.0	< 2.0
	下卧层土性（U23）	粉土（砂）	粉质粘土	粘土
	第III工程地质层淤泥 质土厚度（U24）	< 4.0	4.0~6.0	> 6.0

2.4 工程地质适宜性评价单因素隶属度的确定

模糊关系运算中的隶属度是指分类指标从属于某种类别的程度大小，一般是以隶属函数来刻画的，多数情况下是以正态函数替代，使用起来很不方便，物理意义也不明显。结合工作区的实际情况，采取剖分面积元^[9]的办法来确定单因素的隶属度。即将单因素（1:100 000）评判图进行 2.5 km×2.5 km 网格化，共分 320 个单元，则有

$$\alpha_{ik} = \begin{cases} 0 & i \text{ 个单因素在单元中第 } k \text{ 项评语所占面积为 } 0 \\ S_k / S & i \text{ 个单因素在单元中第 } k \text{ 项评语所占面积为 } S_k \\ 1 & i \text{ 个单因素在单元中第 } k \text{ 项评语所占面积为 } S \end{cases}$$

其中， α_{ik} 是第 i 个单因素在第 n_{ij} 个单元对第 k 项评语的隶属度。

2.5 工程地质适宜性评价影响因素的权重确定

对工程地质适宜性评价指标都一视同仁是不科学的，不同指标对评价结果的重要程度不同，选用可以较大幅度地减少主观因素的层次分析法^[9]（analytic hierarchy process，简称 AHP 法）确定各因素的权重。它是通过分析复杂系统所包含的因素及其相互关系，将系统分解为不同的要素，并将这些要素划归不同层次，从而客观上形成多层次的分析结构模型。将每一层次的各要素相对于其上一层次某要素进行两两比较判断，得到其相对重要程度的比较标度，建立判断矩阵。通过计算判断矩阵的最大特征根及其相对应的特征向量，得到各层要素对上层某要素的重要性次序，建立相对权重向量，经

过多次比较调整和检验，得出滨海新区 II、II 级及 I 级建筑工程地质适宜性评价的权重分配（表 4，5）。

表 4 II、III 级建筑适宜性评价的权重分配

Tah 4 Weight distribution of II, III grade construction suitability estimate

R	U ₁	U ₂	$\sum_{i=1}^n W_{ui} \circ W_{ii}$
	0.5000	0.5000	
U11	0.3529	0	0.1765
U12	0.3529	0	0.1765
U13	0.2942	0	0.1471
U21	0	0.2099	0.1050
U22	0	0.2615	0.1308
U23	0	0.2411	0.1206
U24	0	0.1982	0.0991
U25	0	0.0089	0.0045

检验: $CI = 0.0467$, $RI = 0.82$, $CR = 0.0570 < 0.1$

表 5 I 级建筑适宜性评价的权重分配

Tah 5 Weight distribution of I grade construction suitability estimate

R	U ₁	U ₂	$\sum_{i=1}^n W_{ui} \circ W_{ii}$
	0.6667	0.3333	
U11	0.6667	0	0.4445
U12	0.3333	0	0.2222
U21	0	0.2684	0.0895
U22	0	0.3189	0.1063
U23	0	0.2064	0.0688
U24	0	0.2064	0.0688

检验: $CI = 0.0033$, $RI = 0.29$, $CR = 0.0111 < 0.1$

2.6 AHP Fuzzy 模糊综合评判式的建立

AHP Fuzzy 模糊综合评判式的建立主要有以下的几个步骤:

模糊综合评判将工程地质适宜性评价这一问题, 定义为有限论域 U , 把影响适宜性评价的 m 个因素 ($u_1, u_2, u_3, \dots, u_j, \dots, u_m$) 作为有限论域 U 中的各元素, 可表示为:

$$U = (u_1, u_2, u_3, \dots, u_j, \dots, u_m) \quad j = 1, 2, \dots, m$$

模糊综合评判将工程地质适宜性分级的评价定义为评价集 V , 其中每个级别 (I 级, II 级, III 级, $\dots, n$ 级) 为 V 中的一个元素, 可表示为:

$$V = (v_1, v_2, v_3, \dots, v_j, \dots, v_n) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

各种不同的影响因素指标, 取其对应的权重值, 既权重分配后的模糊子集 A 为:

$$A = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_j, \dots, a_m)$$

$$0 \leq j \leq 1, a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_j + \dots + a_m = 1$$

适宜性分级可用 V 的模糊子集 B 来评定, B 为分级的模糊向量, 表示为:

$$B = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_j, \dots, b_n)$$

对因素集内诸因素的评定是一种模糊映射 $f: U \rightarrow V$; 单因素评价就是相对于评价因素 u_i 分别作出评价 v_j 的隶属度, 记作 γ_{ij} . 因为有 n 个评语等级, 所以对第 i 个评价指标 u_i 就有一个相应的隶属度向量 R_i [$R_i = (\gamma_{i1}, \gamma_{i2}, \dots, \gamma_{in})$; $i = 1, 2, \dots, m$]. 因此, 整个因素集内诸因素的隶属度组成隶属度矩阵 R .

根据模糊集理论的综合评定概念, 若已知因素集内诸因素的隶属度向量 R , 以及因素集的权重分配向量 A , 则综合评定结果为:

$$B = A \circ R = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_j, \dots, b_n)$$

式中, A 为权重向量; $\circ$ 合成关系; R 为从 U 到 V 的隶属度矩阵; B 为综合评定结果.

就理论上而言 $B = A \circ R$, 模糊合成运算有无穷多种, 而本评判主要依权重大小考虑所有因素的影响, 因此选用了加权平均型 $M(\circ, +)$ 模型进行评判. 求得的综合评判结果 B , 若其中 B_k 很大, 则可按最大接近度原则来判定等级.

3 AHP Fuzzy 两级模糊综合评判

由 AHP Fuzzy 评判的步骤及滨海新区工程地质适宜性评价的层次可以看出, 只需进行两极模糊综合评判就可对分区作出评价. 以 II、II 级建筑适宜性评价为例来进行说明.

3.1 一级模糊综合评判

按单元序号分别将每个单元在 U_1 、 U_2 准则层下的隶属度值组成的模糊关系矩阵 R_j^1 , 与权重矩阵 A_j^1 合成, 按照式: $B_j^1 = A_j^1 \circ R_j^1$ 进行模糊合成, 既得到各准则下评价值:

$$B_1^1 = A_1^1 \circ R_1^1 = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) \left\{ \begin{matrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \gamma_{23} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \gamma_{33} \end{matrix} \right\} = (b_{11}^1, b_{12}^1, b_{13}^1)$$

$$B_2^1 = A_2^1 \circ R_2^1 = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5) \left\{ \begin{matrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \gamma_{23} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \gamma_{33} \\ \gamma_{41} & \gamma_{42} & \gamma_{43} \\ \gamma_{51} & \gamma_{52} & \gamma_{53} \end{matrix} \right\} = (b_{21}^1, b_{22}^1, b_{23}^1)$$

其中, b_{ij}^1 为准则层 U_i 下各因素评价值对 U_i 的隶属度.

3.2 二级模糊综合评判

同样, 在 U 准则下, 由 B_1^1 、 B_2^1 组成的模糊

关系矩阵 R^2 ，与权重矩阵 A^2 合成，按照式： $B^2 = A^2 \circ R^2$ 进行模糊合成，得到该网格的最终二级模糊综合评判结果 B ，即：

$$B = B^2 = A^2 \circ R^2 = A^2 \circ \left\{ B_1^1, B_2^1 \right\}^T = (\alpha_1, \alpha_2) \begin{pmatrix} b_{11}^1 & b_{12}^1 & b_{13}^1 \\ b_{21}^1 & b_{22}^1 & b_{23}^1 \end{pmatrix} = (b_1, b_2, b_3)$$

其中， b_i 既为该总评价值隶属于最终工程地质适宜性评价等级的隶属度，并依最大隶属度原则确定评价等级。将所有网格按照适宜性等级连片成图，最后得到 II、III 级和 I 级建筑工程地质适宜性分区图，如图 1 所示。

3.3 工程地质适宜性分区简述

3.3.1 II、III 级建筑工程地质适宜性分区

I 区：主要沿蓟运河、海河河道带及南部大港地区分布。持力层为粘土，局部为粉质粘土，持力层厚度一般大于 2.0 m，发生沙土液化和软土震陷的可能性小，地下水侵蚀性较弱，顶板埋深小于 1.50 m，具有开挖深度小、承载力高等优点。在满

足上部荷载的强度及变形要求的条件下，可做为多层建筑物或一般中—轻工业厂房的天然地基持力层使用。

II 区：持力层为粉质粘土，厚度一般在 1.5 ~ 2.0 m，发生沙土液化和软土震陷的可能性较小，地下水侵蚀性较强，顶板埋深大于 1.5 m。本层可作为 4 层以下建筑物及轻型厂房的天然地基持力层，但因粉土下部为淤泥质土，需进行软弱下卧层的强度及变形验算。若不能满足拟建物采用天然地基的要求，可采用不同手段的复合地基方式对地基土进行加固处理（处理深度浅、造价低）。方法有：深层搅拌桩、砂桩、碎石桩、废渣桩等等。也可采用换土垫层、强夯法、真空预压法、排水固结法等。

III 区：I、II 区以外地区大面积分布，本区持力层以粉质或淤泥质粘土组成，持力层厚度小，埋深大，其难以满足大荷载建筑物对地基土的强度及变形要求。故仅可对低矮建筑、临建及对变形不敏感的轻型厂房等做天然地基持力层使用。

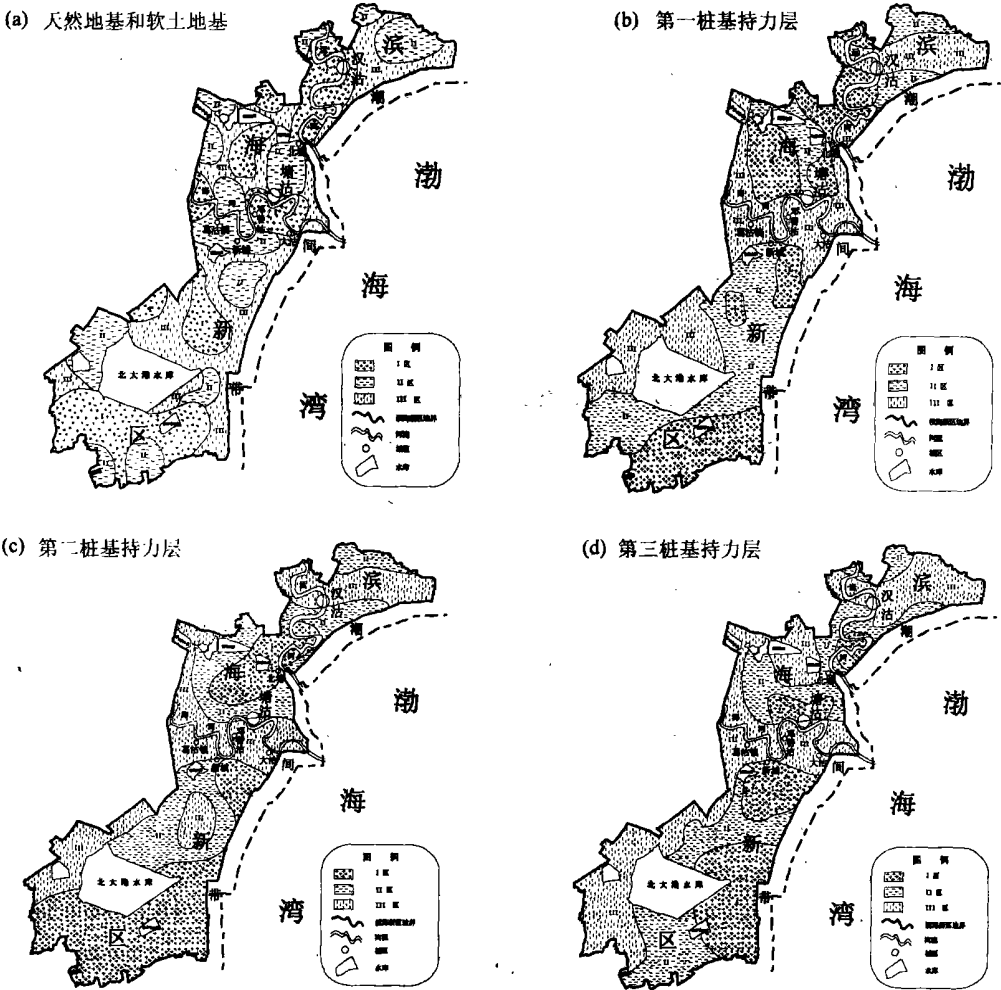


图 1 各类型地质适宜性分区图

Fig 1 All types engineering geology suitability subarea

3.3.2 I 级建筑工程地质适宜性分区（以钻孔灌注桩为例，桩径 $\Phi=600\text{ mm}$ ）

I 区：以粉土（砂）做持力层，持力层厚度大于 3.0 m ，下卧层土性为粉土（砂），区内无活动断裂通过，地壳稳定性好。对于第一桩基持力层，单桩承载力极限值为 $1\,000\sim1\,200\text{ kN}$ ，若想获得较大的承载力，可扩大桩径。对于第二桩基持力层，桩周侧摩阻力 $\sum q_s=1\,600\text{ kPa}$ ，桩端阻力 $q_p=900\text{ kPa}$ ，单桩极限承载力可达 $1\,800\text{ kN}$ （ $\Phi\,600\text{ mm}$ ） $\sim2\,200\text{ kN}$ 。而越往深部的第三桩基持力层，其单桩极限承载力越大，达到 $2\,000\sim2\,400\text{ kN}$ ，宜建高层建筑及相应荷载的工业建筑。

II 区：以粉质粘土（或粉土）做持力层，持力层厚度在 $2.0\sim3.0\text{ m}$ 之间，下卧层土性为粉质粘土，区内没有活动断裂通过，地壳稳定性较好。对于第一桩基持力层，该层单桩承载力极限值比 I 区小，在 $800\sim1\,000\text{ kN}$ 。对于第二桩基持力层，桩周侧摩阻力 $\sum q_s=1\,300\sim1\,600\text{ kPa}$ ，粘性土的桩端阻力 $q_p=600\text{ kPa}$ ，粉土的桩端阻力 $q_p=900\text{ kPa}$ 。单桩极限承载力可达 $1\,600\sim2\,000\text{ kN}$ 。而深部的第三桩基持力层，其单桩极限承载力约为 $1\,700\sim2\,200\text{ kN}$ ，宜建中高层建筑及相应荷载的工业建筑。

III 区：持力层为粘土，持力层厚度小于 2.0 m ，下卧层土性也为粘土，区内有微弱或中等全新活动断裂通过，地壳稳定性差。有全新活动断裂通

过的地方是 I 级建筑的避让区，既不适宜区。而其它地方的桩基持力层条件也不好，与其它区比较单桩承载力小，故本区不宜建高层建筑及相应荷载的工业建筑。

从评判成果图可以看出，I 级分区明显地受活动断裂的控制，符合重要工程对活动断裂的避让原则，与实际情况是完全相符的。而 II、III 分区是与古地理环境和沉积相吻合的，沿蓟运河、海河河道带及南部大港地区受黄河作用，土体强度较好，为本区较好的天然地基持力层，而沿海为新近沉积土层，土体强度较差，未经处理不可作为天然地基持力层使用。

参考文献:

[1] 李智毅, 扬裕云. 工程地质学概论 [M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1994.

[2] 张咸恭, 李智毅. 专门工程地质学 [M]. 北京: 地质出版社, 1994.

[3] 张跃. 模糊数学方法及其应用 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992.

[4] 张俊, 等. 环境工程地质质量多级模糊综合评判的基本思想与步骤 [J]. 西安地质学院学报, 1991 (8): 67—72.

[5] 杜东菊. 城市环境工程地质研究路线及综合评价方法 [J]. 水文地质工程地质, 1989 (5): 3—6.

[6] 许树柏. 层次分析法原理 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.

Suitability Study of Engineering Geology in Coastal New Developed Area in Tianjin City

ZHANG Chang sheng^{1,2,3}, ZHANG Bo you², WANG Lian yuan⁴, SUN Tie⁵, LI Xiao ru⁵

- (1. The Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;
- 2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
- 3. China Academy of Railway Sciences Shenzhen Research and Design Institute, Shenzhen 518034, Guangdong, China;
- 4. Heilongjiang Institute of Science and Technology, Heilongjiang 150027, China;
- 5. Tianjin Investigation & Research Institute, Tianjin 300000, China)

Abstract: The suitability of engineering geology in coastal new developed area in Tianjin city be synthetic assessed and districted by the method of AHP Fuzzy in the paper. The paper provides the assessed standard is the building safety grade (I, II, III). The II, III grade building adopt natural and soft soil foundation, but I is pile foundation. The assessed factor of engineering geology's suitability uses soil factor, weight is defined by AHP, single factor subjection degree is defined by dividing area. The building suitability defined in the last according to two stage fuzzy synthetic assessment is consistent with practice, it has quite pleased practicability.

Key words: suitability; stability; foundation; weight; AHP (analytic hierarchy process); multi stage fuzzy synthetic assessment