

岩溶区高铁线路优选的模糊层次分析法

陈永贵^{1,2}, 叶为民¹, 江席苗¹, 杨 坪¹

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 提出了岩溶区高速铁路线路优选的模糊层次分析法. 在对影响岩溶区铁路线路方案的各因素进行分析和调查基础上, 选取4个一级指标、13个二级指标构建综合评价指标体系; 通过层次分析法建立层次关系, 构造阶层结构, 采用模糊理论建立判断矩阵, 确定权重向量; 通过专家调查和室内外试验等方式确定各因素得分, 采用逻辑运算确定相对优属度矩阵, 建立模糊综合评判模型, 评判备选线路方案的优劣. 利用该模型对贵广高速铁路雄村—贺州段3条备选线路方案进行比选, 得出备选方案的相对优属度分别为0.131, 0.889和0.581, 从而确定第二方案最优, 为实际工程建设提供了决策依据.

关键词: 岩溶; 高速铁路; 线路选择; 层次分析法; 模糊数学
中图分类号: TU 443 **文献标识码:** A

A Fuzzy AHP Approach to Selecting Express Railway Location in Karst Region

CHEN Yonggui^{1,2}, YE Weimin¹, JIANG Ximiao¹, YANG Ping¹

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Sciences and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: A fuzzy analytic hierarchy process(AHP) method was proposed to determine the rational express railway location in a karst region. Based on the analysis and investigation of factors affecting the express railway location in karst region, 4 first grade indexes and 13 second grade indexes were conducted to establish the index system for synthesis evaluating project. The AHP method was used to construct the hierarchy relationship with the influence factors and to set up their hierarchy structures, and then the weight of every influence factors was computed based on the judge matrix fuzzy sets method. After all grades were acquired by means of geological investigations and laboratory or field tests, the matrix of the membership comparative degree was calculated by iterative logical arithmetic. A synthetic assessment model was made to estimate the express railway location. The comparative

synthetic superior degrees for the location of Xiongcu—Hezhou section in Guizhou-Guangzhou express railway are 0.131, 0.889 and 0.581 respectively according to this method, and the second location becomes best. The results show distinctly that the fuzzy-AHP method is valid and feasible to select the express rail location in karst regions.

Key words: karst; express railway; location selecting; analytic hierarchy process (AHP); fuzzy mathematics

近年来, 随着我国经济的快速发展, 高速铁路建设逐步向西部山区扩展. 在岩溶区高速铁路建设中, 由于岩溶地质条件的复杂性、地质参数的不确定性以及统计方法的局限性, 线路方案的选择非常关键, 它将直接影响到整个工程的成败. 影响岩溶区高速铁路线路方案选择的因素众多, 既有能够定量描述的因素, 也有只能定性而不能定量描述的因素, 还有一些不可预见的因素, 使得线路方案选择具有极大的模糊性, 它的推理和判断大多是模糊推理和模糊判断, 因而它是一个涉及多层次、多因素、多目标、多指标的模糊决策过程.

传统的铁路线路方案选择仅仅是由单个影响因素或几个因素各自直观地评价而确定^[1-2], 带有极大的经验成分, 容易受到经验的影响而不能正确反映实际情况. 针对这些问题, 许多学者^[3-5]进行了深入研究, 如郭文军等提出将地理信息系统(GIS)作为辅助决策工具应用于铁路线路方案优化选择^[3], 李远富等开发了基于多目标模糊综合优选模型的铁路线路方案综合优选决策系统软件^[4], 高传东等在山区灾害多发区段路线方案选择中引入了多级模糊综合评价方法^[5], 这些方法在减少人为因素影响方面取得了一定效果. 但是, 在岩溶区段新建高速铁路, 影响线路选择的因素是多方面、多层次的, 不仅每个

收稿日期: 2009-09-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40802064, 41030748); 上海市重点学科建设基金资助项目(B308); 湖南省教育厅科研资助项目(09B006); 中铁二院工程集团有限责任公司开发项目(080839)

作者简介: 陈永贵(1976—), 男, 博士后, 主要研究方向为地质工程与环境岩土工程. E-mail: cyg@tongji.edu.cn

因素的影响程度各不相同,而且这些因素相互关联、相互制约,致使这些方法不能直接地应用于岩溶区铁路线路方案的优选和评价.

为此,本文在深入调查和研究岩溶工程地质和生态环境特征基础上,通过剖析影响高速铁路线路方案决策的各种定性和定量因素,建立铁路线路方案综合评价指标体系,用层次分析法^[6]确定各因素的权重,再根据模糊数学理论^[7-8]建立模糊综合评判,从而确定最优的高速铁路线路方案.

1 线路方案综合评价指标体系构建

1.1 线路比选的基本原则

在岩溶区进行高速铁路线路方案的比选遵循如下原则^[9]:(1)坚持以人为本.就是首先考虑如何使选出的线路,能更好地建设和运营,确保贵广铁路发挥出更好的社会、经济和环境效益.(2)综合考虑工程建设与地质环境的相互作用.不仅要研究该区岩溶发育规律,岩溶工程地质特征、岩溶地质灾害类型及其对

铁路工程的影响,还需要评价铁路工程施工运营对沿线岩溶生态环境造成的影响.(3)系统分析地质、设计与施工全建设过程.方案比选中必须充分调查场地地质条件及可能存在的问题,系统分析设计方案的可行性和施工方法的有效性,而不是单纯地将地质条件作为唯一选线标准.(4)依据目标及地形放线—地质条件圈线—技术比较选线—综合分析定线的工作步骤.在复杂地质环境中进行线路比选,重点是地质条件圈线,同时也考虑了工程设计部门技术比选方面的新成果.(5)重点由与岩溶有关的要素进行线路优选评判.在方案比选中进行了工程地质条件、水文地质条件、岩溶、物探、钻探、土力学等方面的综合调查研究,取得一系列指标参数,作为线路优选评判的基本依据.

1.2 构建综合评价指标体系

根据以上原则,在对拟建岩溶区域详细调查和深入研究的基础上,综合分析岩溶地质特点、生态环境特征和工程建设要求,利用层次分析法基本原理,可建立岩溶区高速铁路线路方案综合评价指标(U)体系,见图1.

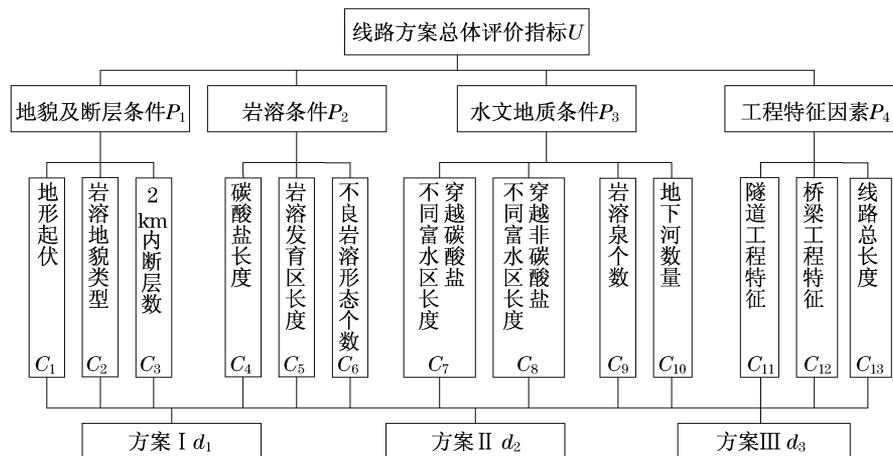


图1 综合评价指标体系

Fig.1 Index system for synthesis evaluating project

2 模糊层次分析法模型的建立

2.1 模糊层次分析法的基本原理^[10]

根据模糊数学理论,多目标系统模糊决策可用 $WR = B$ 模式进行描述.其中, W 为输入的参评因子权重集; R 为模糊变换器,即由各单因子评价行矩阵组成 $m \times n$ 阶模糊关系矩阵(n 为评价级别数), B 为输出,即为综合评价结果.

2.2 建立综合评判的集合

设系统内有 m 个可供选择的方案满足约束集

形成决策集 D .

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\} \quad (1)$$

设优选系统中有 n 个综合评价指标组成对决策集 D 的评价指标集 C .

$$C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\} \quad (2)$$

n 个评价指标对 m 个方案的评价可用下面的目标特征值矩阵 X 表示.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} = [x_{ij}] \quad (3)$$

其中: $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; x_{ij}$ 为第 i 个方案的第 j 个指标的特征值.

2.3 建立相对优属度矩阵

优选过程中,取方案集 D 中对指标 i 而言最大特征值 $\vee x_{ij}$ 与最小特征值 $\wedge x_{ij}$ 作为上下界限的相对值,由此构成参考连续统的两极.方案(或决策)通常分为特征值越大越优型、特征值越小越优型,其相对优属度公式采用式(4)和(5)进行计算.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \wedge_j x_{ij}}{\vee_j x_{ij} - \wedge_j x_{ij}} \quad (4)$$

$$r_{ij} = \frac{\vee_j x_{ij} - x_{ij}}{\vee_j x_{ij} - \wedge_j x_{ij}} \quad (5)$$

式中, r_{ij} 为方案 j 相对指标 i 的相对优属度. \wedge 和 \vee 分别为取大、取小符.采用式(4)和(5)将目标特征矩阵变换为目标相对优属度矩阵^[11]:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} = [r_{ij}] \quad (6)$$

2.4 层次分析法确定评价因素权重向量

2.4.1 构造比较判断矩阵

在建立了图 1 所示的综合评价指标体系后,可运用层次分析法确定各因素的权重分配问题.采用 Satty 教授提出的 1~9 级标度法给予数量标度^[8],从第 2 层开始,对上一层某个元素与下一层相关的元素,进行两两对比,按其重要程度等级,得到由 a_{ij} 构成的 $n \times n$ 阶矩阵即为判断矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, a_{ij} 为因子 i 相对因子 j 的重要性.

2.4.2 层次单排序及一致性检验

层次单排序是据判断矩阵去推算本层次所有元素对上一层次某一元素而言的权重.假设有一 n 阶正规向量 $W: AW = \lambda_{\max} W$,其中 λ_{\max} 为矩阵 A 的最大特征根, W 为对应 λ_{\max} 的正规化特征向量.可采用方根法近似计算 A 的特征值 λ_{\max} 和特征向量 W ^[12].

为使判断结果更好地与实际状况相吻合,需进行一致性检验.评价判断矩阵一致性的检验指标为: $C_R = C_1/R_1$.其中 C_1 为一致性检验指标, $C_1 = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1)$; n 为判断矩阵的阶数; R_1 为平均随机一致性指标,取值见表 1.

表 1 随机一致性指标表^[12]

Tab.1 Values of average stochastic coincidence indicators

判断矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R_1	0	0	0.58	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.45

当 $C_1 = 0$ 时,判断矩阵具有完全一致性,当 C_1 值越大,说明判断矩阵的一致性越差.当 $C_R < 0.1$ 时,判断矩阵具有满意的一致性;否则就需要对判断矩阵进行调整.

2.4.3 层次总排序及其一致性检验

从层次结构模型的第 2 层开始,逐层计算各层相对于最高层(目标层)相对重要性的排序权值,称为层次总排序.假设第 k 层包含 m 各因素 A_1, A_2, \dots, A_m ,相应的层次总排序权值分别为 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$;第 $k + 1$ 层包含 n 个因素 B_1, B_2, \dots, B_n ,它们对 $A_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 的层次单排序为 $\beta_{1j}, \beta_{2j}, \dots, \beta_{nj}$;则第 $k + 1$ 层因素 B_i 的层次总排序权值为

$$\beta_i = \sum_{j=1}^m \alpha_j \beta_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

层次总排序也需要进行一致性检验,公式为

$$C_R = \frac{\sum_{j=1}^m \alpha_j C_{1j}}{\sum_{j=1}^m \alpha_j R_{1j}} \quad (9)$$

当 $C_R < 0.1$ 时,该层次总排序计算结果具有满意的一致性.

2.4.4 计算权重向量

在判断矩阵满足一致性检验条件下,可计算得到因素权重集 $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)$,且满足 $0 < W_k < 1, \sum_{k=1}^n W_k = 1$,它反映了各因素对于拟选定方案而言的重要性及影响程度.

2.5 模糊综合评价

在相对优属度矩阵 R 与因素权重矩阵 W 求出后,可得模糊方案集 D 的模糊综合评价为

$$B = WR = (W_1, W_2, \dots, W_n) \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (10)$$

B_i 表示方案 d_i 的综合满意度或综合优越度.方案评选可据方案的综合优越度对方案 D 进行排序.

3 工程实例分析

贵广铁路是规划的西南至华南沿海地区铁路通

道的骨干线路,跨黔、桂、粤三省区,处于我国典型岩溶发育区域.广西境内雄村至贺州段有 3 大方案,为了科学选定最佳方案,研究中利用上述模糊层次法综合评价模型对该路段拟选出的 3 个备选方案进行综合评判,为实际工程提供决策依据.

3.1 建立层次结构模型

按照图 1 层次结构,结合实际情况,通过专家调查、现场测试、室内试验和数值分析等多种手段,获得各因素的评价指标参数.由于各个评价指标存在量纲、量级上的差异,为消除此在方案评价中的影响,将评价指标分为越大越优、越小越优、中性指标三大类,对其进行规格化处理^[13],处理结果见表 2^[14].

表 2 各方案的综合评价指标体系

Tab.2 Synthetic assessment indexes system of schemes

项目		方案 I	方案 II	方案 III
准则层	指标层			
P ₁	C ₁	0.380	0.359	0.262
	C ₂	0.307	0.347	0.347
	C ₃	0.326	0.347	0.326
P ₂	C ₄	0.245	0.377	0.377
	C ₅	0.282	0.369	0.349
	C ₆	0.304	0.397	0.299
P ₃	C ₇	0.212	0.396	0.391
	C ₈	0.541	0.238	0.221
	C ₉	0.218	0.429	0.354
	C ₁₀	0.248	0.475	0.277
P ₄	C ₁₁	0.428	0.311	0.262
	C ₁₂	0.324	0.313	0.363
	C ₁₃	0.321	0.346	0.333

3.2 确定指标权重

对于确立的指标体系(见图 1),邀请多位专家对各因素的相对重要程度给予建议,综合分析各种情况后构造目标层对于准则层 $U-P$ 因素的判断矩阵(见表 3),同理可求得各准则层对于指标层 $P-C$ 判断矩阵,见表 4~表 7,同时通过方根法计算相应权重并列于表中.

表 3 $U-P$ 判断矩阵

Tab.3 Judgment matrix of $U-P$ membership

$U-P$	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	权重
P ₁	1	1/2	1/3	1	0.141
P ₂	2	1	1/2	2	0.263
P ₃	3	2	1	3	0.455
P ₄	1	1/2	1/3	1	0.141

根据表 3~表 7 的计算结果,由式(8)可确定 P 层对 U 层的总排序值 $\mathbf{W} = (0.056, 0.056, 0.028, 0.066, 0.066, 0.132, 0.182, 0.091, 0.091, 0.091, 0.056,$

$0.056, 0.028)$,经式(9)计算满足一致性检验要求.

表 4 P_1-C 判断矩阵

Tab.4 Judgment matrix of P_1-C membership

P_1-C	C ₁	C ₂	C ₃	权重
C ₁	1	1	2	0.40
C ₂	1	1	2	0.40
C ₃	1/2	1/2	1	0.20

表 5 P_2-C 判断矩阵

Tab.5 Judgment matrix of P_2-C membership

P_2-C	C ₄	C ₅	C ₆	权重
C ₄	1	1	1/2	0.25
C ₅	1	1	1/2	0.25
C ₆	2	2	1	0.50

表 6 P_3-C 判断矩阵

Tab.6 Judgment matrix of P_3-C membership

P_3-C	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	权重
C ₇	1	2	2	2	0.40
C ₈	1/2	1	1	1	0.20
C ₉	1/2	1	1	1	0.20
C ₁₀	1/2	1	1	1	0.20

表 7 P_4-C 判断矩阵

Tab.7 Judgment matrix of P_4-C membership

P_4-C	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	权重
C ₁₁	1	1	2	0.40
C ₁₂	1	1	2	0.40
C ₁₃	1/2	1/2	1	0.20

3.3 建立相对优属度矩阵

根据层次结构模型(见表 2),通过式(4)和式(5)计算可得到相对优属度矩阵:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0.822 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0.770 \\ 0.051 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0.973 \\ 0 & 0.947 & 1 \\ 0 & 1 & 0.645 \\ 0 & 1 & 0.128 \\ 1 & 0.295 & 0 \\ 0.220 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0.48 \end{bmatrix}$$

3.4 确定最优方案

由以上确定的权重向量 \mathbf{W} 和相对优属度矩阵

R ,根据式(10),可得方案集 D 的综合评判向量为

$$B = WR = (0.131, 0.889, 0.581) \quad (11)$$

根据最大优属度原则,由计算结果可知,方案 II 得分最高,为 0.889,其次为方案 III,得分 0.581,最差为方案 I,得分仅 0.131,因此方案 II 为最佳方案。

4 结论

(1) 基于层次分析和模糊决策理论,根据岩溶区的工程地质特点和生态环境特性,选取 13 个二级指标、4 个一级指标建立了新建高速铁路线路方案综合评价指标体系,构造出岩溶区高速铁路线路方案优选的评价与决策模型。

(2) 用层次分析法和模糊数学理论建立模糊综合评判模型对贵广铁路雄村—贺州段进行实例分析,得出综合评判向量为 $(0.131, 0.889, 0.581)$,从而选择方案 II,为实际工程建设提供决策依据。

参考文献:

- [1] 吕仁志,杜通道.乌锡铁路线路走向方案研究[J].铁道工程学报,2007(12):5.
LV Renzhi, DU Tongdao. Study on route selection of Wulan Hot—Xilin Hot Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007(12):5.
- [2] 蒋登伟.铁路选线方案比选探讨[J].四川建材,2007(1):80.
JIANG Dengwei. Discussion on railway route [J]. Sichuan Building Materials, 2007(1):80.
- [3] 郭文军,曾学贵.铁路线路环境影响评估及高速铁路线路方案优化选择的研究[J].铁道工程学报,2002(1):74.
GUO Wenjun, ZENG Xuegui. Study on environmental impact assessment of railway route and optimal selection of route alignment for high speed railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2002(1):74.
- [4] 李远富,薛波,易思蓉.铁路线路设计方案综合优选决策系统的研究[J].系统工程学报,2001,16(2):151.
LI Yuanfu, XUE Bo, YI Sirong. Development of system for synthetic optimal selection and decision making of variant projects in railway location [J]. Journal of Systems Engineering, 2001, 16(2):151.
- [5] 高传东,崔鹏,吴国雄.山区灾害多发区段路线方案的多级模糊综合评价[J].重庆交通学院学报,2006,25(2):70.
GAO Chuandong, CUI Peng, WU Guoxiong. Route plan of selection and two-stay comprehensive fuzzy assessment in mountain hazardous areas [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2006, 25(2):70.
- [6] Azadeh A, Ghaderi S F, Izadbakhsh H. Integration of DEA and AHP with computer simulation for railway system improvement and optimization [J]. Applied Mathematics and Computation, 2008, 195(2):775.
- [7] 张跃,邹寿平,宿芬.模糊数学方法及其应用[M].北京:煤炭工业出版社,1992.
ZHANG Yue, ZOU Shouping, SU Fen. Utilization of fuzzy mathematics method [M]. Beijing: Coal Industry Press, 1992.
- [8] 陈守煜.系统模糊决策理论与应用[M].大连:大连理工大学出版社,1994.
CHEN Shouyu. Theory and application of system fuzzy decision-making [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1994.
- [9] 贵广铁路雄村—贺州段岩溶咨询项目组.贵广铁路雄村—贺州段岩溶地质与线路比选咨询研究[R].桂林:中国地质科学院岩溶地质研究所,2008.
Project Team of Consulting Research on Karst Geology and Location Selecting of Xiongcu—Hezhou Section in Guizhou-Guangzhou Express Railway. Research reports for karst geology and location selecting of Xiongcu—Hezhou section in Guizhou-Guangzhou express railway [R]. Guilin: Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, 2008.
- [10] 陈永贵,邹银生,张可能.坝基防渗治理的多目标模糊决策方法[J].湖南大学学报:自然科学版,2008,35(3):15.
CHEN Yonggui, ZOU Yinsheng, ZHANG Keneng. Multi-objectives fuzzy decision-making method for dam foundation seepage control engineering [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2008, 35(3):15.
- [11] 黄贯虹,方刚.系统工程方法与应用[M].广州:暨南大学出版社,2005.
HUANG Guan hong, FANG Gang. System engineering method and application [M]. Guangzhou: Ji'nan University Press, 2005.
- [12] 王新民,赵彬,张钦礼.基于层次分析和模糊数学的采矿方法选择[J].中南大学学报:自然科学版,2008,39(2):875.
WANG Xinmin, ZHAO Bin, ZHANG Qinli. Mining method choice based on AHP and fuzzy mathematics [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2008, 39(2):875.
- [13] 李希灿,朱俊芳,杨学昌,等.模糊模式识别在乔店水库水质评价中的应用[J].山东农业大学学报:自然科学版,2006,37(3):444.
LI Xican, ZHU Junfang, YANG Xuechang, et al. The fuzzy recognition model and application in water quality evaluation for Qiaodian reservoir [J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Sciences, 2006, 37(3):444.
- [14] 同济大学土木工程学院.贵广铁路雄村—贺州段岩溶地质与线路比选咨询研究专题报告之四——线路综合比选[R].上海:同济大学土木工程学院,2008.
College of Civil Engineering of Tongji University. Research report for karst geology and location selecting of Xiongcu—Hezhou section in Guizhou-Guangzhou express railway (Part IV): synthetic selecting of location [R]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2008.