

文章编号:1671-8879(2006)01-0020-04

高速公路软基最终沉降预测的范例推理方法

王东耀^{1,2}, 折学森¹, 叶万军¹, 王琛²

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 西安 710064;

2. 陕西省高速公路建设集团公司, 西安 710086)

摘要:针对高速公路软基沉降的复杂性和不确定性,充分利用地质资料,运用模糊相似优先的概念,构造了高速公路软基最终沉降预测模型。对每个影响软基沉降的因素,分别建立了软基目标范例与源范例之间的模糊相似优先关系。经过影响因素之间的两两比较,获得了不同影响因素下软基的目标范例与源范例之间的相似性序列,计算得到软基目标范例和源范例之间的综合相似性序列,从而找到与软基目标范例最相似的源范例,实现了软基最终沉降预测。实例评价结果与实际沉降观测结果一致,这为预测软土地基路基隆降提供了一种新的方法。

关键词:道路工程;高速公路;软基;最终沉降;模糊相似比;范例推理;预测

中图分类号:U416.1

文献标识码:A

Case-based Reasoning Approach to Settlement of Expressway on Soft Foundation

WANG Dong-yao^{1,2}, SHE Xue-sen¹, YE Wan-jun¹, WANG Chen²

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Shaanxi Expressway Construction Group Company, Xi'an, 710086, China)

Abstract: Based on fuzzy analogy preferred ratio, a predication model of expressway settlement on soft foundation is set up. In this model, the fuzzy analogy preferred relationship between soft foundation target case and soft foundation base case is determined, and the similar series between the two cases with different affecting factor on soft foundation is given. The factor weights, the comprehensive similar series between the two cases is determined, and the most similar base case to the soft foundation target case in the base cases of soft foundation is found out. So the highway settlement on soft foundation can be predicted. It is shown from examples that the results calculated with this method agree with the practical settlement. 3 tabs, 8 refs.

Key words: road engineering; expressway; soft foundation; final settlement; fuzzy preferred ratio; case-based reasoning; prediction

0 引言

公路软基沉降问题是在软弱土地区修筑公路时

需要解决的一个关键问题。公路软基沉降现有多种预测方法^[1-4],但由于问题的复杂性而难以完全符合实际。鉴于沉降量预测评价方法的特殊复杂性,研

收稿日期:2005-03-10

基金项目:陕西省交通科技项目(03-18K)

作者简介:王东耀(1959-),男,陕西富平人,陕西省高速公路建设集团公司高级工程师,长安大学工学博士研究生。

究人员已经注意到地质资料的重要性,强调理论、方法、技术的一体化研究。为此,本文提出了一种新的高速公路软基最终沉降预测方法——高速公路软基最终沉降预测范例推理方法,从而实现了高速公路软基最终沉降预测。

1 最终沉降预测范例模型

1.1 模糊相似优先比

设 A 为论域 U 中的有 K 个对象组成的集合, $A = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$ 。令 $\forall a_i, a_j (i, j = 1, 2, \dots, K)$, 并与对象 a_0 进行比较, 则模糊相似优先关系 R 为如下映射

$$R = (r_{ij})_{K \times K}, r_{ij} \in [0, 1], (i, j = 1, 2, \dots, K)$$

$$R: A \times A \rightarrow [0, 1]$$

且 r_{ij} 满足以下条件:

$$(1) r_{ii} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, K)$$

$$(2) r_{ij} + r_{ji} = 1 \quad (i \neq j, i, j = 1, 2, \dots, K)$$

条件(1)表明: a_i 与自己相比较, 无所谓优先, 故 $r_{ii} = 0$ 。条件(2)表明: 如果 a_i 比 a_j 的优先程度为 r_{ij} , 那么 a_j 比 a_i 的优先程度就为 $r_{ji} = 1 - r_{ij}$ 。若 $r_{ij} = 1$, 表明 a_i 与 a_j 相比, 同 a_0 相似的多。若 $r_{ij} = 0.5$, 表明 a_i 与 a_j 的形似程度相等。因此, 称 r_{ij} 为 a_i 比 a_j 同 a_0 的模糊相似优先比, 称 R 为模糊相似优先关系^[5]。

1.2 最终沉降因素模糊相似优先关系

1.2.1 软基沉降范例的表示

设 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$

$$C = [c_1(x), c_2(x), \dots, c_n(x)]^T$$

式中: x_i 为影响公路软基沉降的因素; $c_i(x)$ 为软基在因素 x 影响下的沉降。

软基沉降目标范例表示为

$$C_0 = (x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0j}, \dots, x_{0n})$$

式中: $x_{0j} (j = 1, 2, \dots, n)$ 为软基沉降目标范例的影响因素。

1.2.2 因素之间的相似性度量

设软基源范例 $C_p, C_q \in C$, 且 $C_p \neq C_q, C_0$ 为软基的目标范例。由软基范例的表示, 则有

$$C_p = (x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{pj}, \dots, x_{pn})$$

$$C_q = (x_{q1}, x_{q2}, \dots, x_{qj}, \dots, x_{qn})$$

$$C_0 = (x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0j}, \dots, x_{0n})$$

C_p 第 j 个因素与 C_0 第 j 个因素之间的海明距离为

$$d(C_{pj}, C_{0j}) = |x_{pj} - x_{0j}| \quad (1)$$

C_q 第 j 个因素与 C_0 第 j 个因素之间的海明距离为

$$d(C_{qj}, C_{0j}) = |x_{qj} - x_{0j}| \quad (2)$$

当采用两范例间的海明距离表示其相似程度时, 可以认为, 海明距离愈小, 2 个因素就愈相似。

1.2.3 模糊相似优先关系 $D(j)$ 的构造

设软基源范例 C_p, C_q 的第 j 个因素 C_{pj}, C_{qj} , 与 C_0 的第 j 个因素 C_{0j} 的海明距离分别为 $d(C_{pj}, C_{0j})$ 和 $d(C_{qj}, C_{0j})$, 则 C_p 的第 j 个因素 C_{pj} 比 C_q 的第 j 个因素 C_{qj} 与 C_{0j} 的模糊相似优先比定义为

$$D_{pq} = \frac{d(C_{qj}, C_{0j})}{d(C_{pj}, C_{0j}) + d(C_{qj}, C_{0j})} \quad (3)$$

显然, $D_{pq} \in [0, 1]$, 同样 $D_{qp} = 1 - D_{pq} \in [0, 1]$, D_{pq} 愈大, C_p 的第 j 个因素 C_{pj} 比 C_q 的第 j 个因素 C_{qj} 同 C_0 的第 j 个因素愈相似。相应于第 j 个因素的模糊相似优先的关系 $D(j)$ 构造步骤为

令 $p = 1, q = 2, 3, \dots, K$, 可求得

$$D_{12}, D_{13}, \dots, D_{1K}$$

同样, 令 $p = 2, q = 1, 3, \dots, K$, 可求得

$$D_{21}, D_{23}, \dots, D_{2K}$$

一次取 $p, q = 1, 2, \dots, K$, 同时令 $p = q$ 时, 有 $D_{pp} = 0$, 因此形成如下矩阵

$$D(j) = \begin{bmatrix} 0 & D_{12} & \dots & D_{1K} \\ D_{21} & 0 & \dots & D_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{K1} & D_{K2} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$(j = 1, 2, \dots, n)$$

该矩阵就称为第 j 个因素的软基沉降预测的模糊相似优先关系。依次取 $j = 1, 2, \dots, n$, 可求出对应于 n 个因素的模糊相似优先关系, 共有 n 个。

1.3 最终沉降预测

对于 $D(j)$ 取各 λ 截集, 可得到 K 个软基源范例第 j 个因素与目标范例 C_0 的相似程度序列。

(1) 对于 $D(j)$ 取各 λ 截集。在区间 $[0, 1]$ 中, 从大到小取一系列值, 对每一相似优先矩阵 $D(j)$ ($j = 1, 2, \dots, n$), 依次作一系列相应的 λ 截矩阵, 其中最大的 λ 值应小于等于最大的相似优先比, 可得到 K 个软基源范例第 j 个因素与目标范例 C_0 的相似程度序列。

(2) 确定目标范例的绝对有限序号。约定: 与 C_0 最为相似的排在序列的最前面, 顺序号为 1; 与 C_0 最不相似的排在最后面, 顺序号为 K 。则 K 个软基源范例的顺序号可组成如下序号集

$$T_j = (t_{1j}, t_{2j}, \dots, t_{Kj}) \quad (5)$$

则第 k 个软基沉降在源范例库中与 C_0 相似程度序列中的序号为

$$t_k = \sum_{j=1}^n w_j t_{kj} \quad (6)$$

式中: w_j 为 n 个因素的权重 ($j = 1, 2, \dots, n$)。

按式(7)、式(8)计算

$$\xi_{0i}(k) = [\min_k \min_i |x_0(k) - x_i(k)| + p \max_k \max_i |x_0(k) - x_i(k)|] / [\min_k \min_i |x_0(k) - x_i(k)| + p \min_k \min_i |x_0(k) - x_i(k)|] \quad (7)$$

$$w_j = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^n \xi_k(k) \quad (8)$$

2 工程实例

以文献[4]提供的 18 条高速公路的 100 余个路段的软土路基为实例,限于篇幅,从中仅选择不处理的公路地基 16 个软土路基作为研究对象。前 12 个为源范例,后 4 个为目标范例。其余的可按本文的

方法进行预测计算。沉降影响因素见表 1。由式(7)、式(8)可得软基各影响因素权重分配(表 2)。

对目标范例 C_{11} ,按下列步骤预测其沉降。

(1) 建立相似优先比矩阵。由式(1)、式(2)计算海明距离

$$d_{11} = |x_{011} - x_{11}| = |15.0 - 4.2| = 10.8$$

$$d_{12} = |x_{011} - x_{21}| = |15.0 - 5.5| = 9.5$$

.....

$$d_{12} = |x_{011} - x_{121}| = |15.0 - 15| = 0$$

由式(3)计算模糊相似优先比得

$$D_{12} = \frac{d_{12}}{d_{11} + d_{12}} = \frac{9.5}{10.8 + 9.5} = 0.468$$

.....

$$D_{112} = \frac{d_{112}}{d_{111} + d_{112}} = \frac{0}{4 + 0} = 0$$

由式(4)建立 C_{01} 的相似优先矩阵

表 1 软土地基沉降实例及其最终沉降

源范例 C_i	目标范例 C_0	软土层厚 H_1/m	软土压缩模量 E_0/MPa	硬层厚度 H_2/m	硬层压缩模量 E_2/MPa	路堤高宽比 λ	施工工期 t/d	竣工时沉降量 S'/mm	最终沉降量 S/mm	与 C_0 最相似的源范例
C_1		4.2	2.84	1.90	4.000	0.119	165	25.00	47.00	
C_2		5.5	1.61	2.04	9.950	0.196	180	59.00	102.00	
C_3		15.0	2.00	2.00	6.000	0.109	540	38.00	72.00	
C_4		2.0	2.40	4.20	0.115	0.115	384	27.60	45.47	C_{04}
C_5		15.0	2.00	2.40	4.200	0.113	435	10.60	20.16	
C_6		11.0	2.00	2.00	6.000	0.064	210	2.10	5.00	
C_7		15.0	2.00	2.40	4.200	0.154	270	36.00	59.00	C_{01}
C_8		5.0	2.00	3.90	6.000	0.075	225	5.00	19.00	
C_9		10.0	2.00	2.00	6.000	0.098	330	20.00	42.00	C_{03}
C_{10}		10.0	2.00	2.80	6.000	0.071	180	8.50	13.60	
C_{11}		8.0	1.60	2.00	3.100	0.179	72	5.75	48.21	
C_{12}		15.0	2.00	2.40	4.200	0.135	549	22.60	32.66	C_{02}
	C_{01}	15.0	2.00	2.00	6.000	0.108	540	38.00	70.00	
	C_{02}	10.0	2.00	2.00	6.000	0.081	300	14.00	30.00	
	C_{03}	12.0	1.80	2.00	5.400	0.098	330	20.00	42.00	
	C_{04}	14.0	2.30	2.30	4.000	0.085	570	24.60	44.66	

表 2 软基目标范例的权重 w_i

软基沉降影响因素	软土层厚 x_1	软土压缩模量 x_2	硬层厚度 x_3	硬层压缩模量 x_4	路堤高宽比 x_5	施工工期 x_6	竣工时沉降量 x_7
权重	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7
	0.378 923	0.384 129	0.172 012	0.097 113	0.667 61	0.110 352	0.335 378

$D(1) =$	0.000	0.468	0.000	0.000	0.000	1.000	0.556	0.667	0.333	1.000	1.000	0.000
	0.532	0.000	0.000	0.000	0.000	0.704	0.345	0.513	0.345	0.000	0.424	0.000
	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000
	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000	0.000
	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000	0.000
	0.000	0.296	0.000	0.000	0.000	0.000	0.455	0.714	0.556	0.000	0.636	0.000
	0.444	0.655	0.000	0.000	0.000	0.545	0.000	0.636	0.500	0.000	0.583	0.000
	0.553	0.487	0.000	0.000	0.000	0.286	0.364	0.000	0.333	0.000	0.411	0.000
	0.667	0.655	0.000	0.000	0.000	0.444	0.500	0.667	0.000	0.000	0.583	0.000
	0.000	1.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000
	0.000	0.576	0.000	0.000	0.000	0.000	0.364	0.417	0.589	1.000	0.000	0.000
	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000

依次建立每个目标的相似优先矩阵 $D(j)$ ($j = 2, 3, \dots, 7$)

(2) 作 λ 截矩阵。由前述确定 λ 截矩阵, 取 λ 有如下关系

$$D_{ij} = \begin{cases} 0 & D_{ij} < \lambda \\ 1 & D_{ij} > \lambda \end{cases}$$

对 $D(1)$ 做 λ 截矩阵, 可以确定出各相似程度的优先顺序: $t_{1,1} = 9; t_{1,2} = 10; t_{1,3} = 4; t_{1,4} = 3; t_{1,5} = 2; t_{1,6} = 11; t_{1,7} = 7; t_{1,8} = 8; t_{1,9} = 9; t_{1,10} = 5; t_{1,11} = 12; t_{1,12} = 1$ 。同理, 依次作相关矩阵的 λ 截矩阵, 确定出各相似程度的优先顺序, 见表 3。

从表 3 可以看出, 目标范例 C_{01} 与源范例 C_7 最相似, 而 C_7 最终沉降为 69 mm, 可在最终沉降为 65 mm 与 75 mm 之间再取范例作预测, 可确定 C_{01} 的最终沉降量。 C_{01} 的实际最终沉降量为 70 mm, 本文方法预测的沉降接近工程实际^[6-8]。

按同样方法, 可得 C_{02} 、 C_{03} 、 C_{04} 的沉降(表 1)。

3 结 语

针对影响沉降的诸多因素的不完整性和不确定性, 本文提出一种新的高速公路软基最终沉降预测方法——高速公路软基最终沉降预测范例推理方法, 本方法推理原理直观, 在以往的软基沉降和当前的软基沉降预测之间建立了合理的推理关系。实例表明, 预测结果与实际接近, 且易于计算机进行规范化评价, 排除了人为因素对分析、评定结果的干扰, 具有较强的识别评判能力和简便、定量严密的特点, 该方法对其他综合评价工作也有一定的借鉴意义。制约该方法准确性的关键是范例的充足性。可以相信, 随着范例的不断增多, 软基沉降的预测精度会进一步得到提高。

表 3 目标范例 C_{0i} 与源范例 C_j 的相似程度序列

C	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	t_i	综合顺序
C_1	9	11	5	1	6	2	2	13.49	6
C_2	10	12	7	5	7	8	7	17.99	11
C_3	4	5	6	12	2	10	6	10.08	2
C_4	3	4	12	4	12	1	5	14.92	7
C_5	2	3	11	8	10	9	8	14.93	8
C_6	11	6	1	3	1	11	9	11.84	4
C_7	7	1	2	7	5	6	4	9.40	1
C_8	8	10	8	6	4	7	10	15.62	9
C_9	9	8	4	2	8	4	1	13.48	5
C_{10}	5	2	3	10	3	3	11	10.17	3
C_{11}	12	9	9	11	11	12	3	20.29	12
C_{12}	1	7	10	9	9	5	12	16.24	10

参考文献:

References:

- [1] 周焕云, 黄晓明. 高速公路软土地基沉降预测方法综述[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(4): 7-10.
ZHOU Huan-yun, HUANG Xiao-ming. Summary of Forecasting Methods of Expressway Settlement on Soft Ground[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(4): 7-10.
- [2] 张慧梅, 李云鹏, 毛 成. 人工神经网络在软土地基沉降预测中的应用[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2002, 22(4): 20-22.
ZHANG Hui-mei, LI Yun-peng, MAO Cheng. Settlement Prediction of Roadbed in Soft Ground by Using Artificial Neural Networks[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22(4): 20-22.

只需要建立施工模型便可求出有关的解,模型用图形的方式表达直观、易操作。进一步还可以对该模型进行仿真求出其他需要的参数。在下一步的工作中,作者将对模型匹配等算法及相关的工具进行研制,最终形成高速公路施工仿真系统。

参考文献:

References:

- [1] 季 节, 胡长顺, 郭黎明. 公路施工组织网络资源优化的启发式算法[J]. 西安公路交通大学学报, 2001, 21(1):37-41.
JI Jie, HU Chang-shun, GUO Li-ming. Heuristic Algorithms of the Network Resource Optimization for Highway Construction[J]. Journal of Xi'an Highway University, 2001, 21(1):37-41.
 - [2] 张伟波. 大型地下洞室群施工系统仿真理论与应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2002.
ZHANG Wei-bo. Research on System Simulation Theory and Application for Construction Processes of Large-Scale Underground Structure Group[D]. Tianjin: Tianjin University, 2002.
 - [3] 毕玉峰, 王选仓, 孙立军. 公路工程中多种资源均衡优化的遗传算法设计[J]. 中国公路学报, 2004, 17(1): 86-89.
BI Yu-feng, WANG Xuan-cang, SUN Li-jun. GA's Design of Multi-Resources Equilibrium Optimization in Highway Engineering[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(1): 86-89.
 - [4] 冯 勇, 侍克斌. 多资源均衡的模糊综合相似选择法研究[J]. 兰州理工大学学报, 2004, 30(1):106-108.
FENG Yong, SHI Ke-bin. Resources Equilibrium Base on Fuzzy Comprehensive Similar Selection Method[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2004, 30(1):106-108.
 - [5] 马荣国, 刘艳妮. 公路建设项目综合评价权重确定方法[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(2):110-112.
MA Rong-guo, LIU Yan-ni. Weight Value Determination Method of Highway Construction Comprehensive Evaluation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(2):110-112.
 - [6] 李潘武, 李慧民. 链杆平衡模型在建筑施工管理中的应用[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(3):66-69.
LI Pan-wu, LI Hui-min. Application of Chain-pole Equilibrium Model to Construction Management[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(3):66-69.
- ~~~~~
- (上接 23 页)
- [3] 钟才根, 丁文其, 王茂和, 等. 神经网络模型在高速公路软基沉降预测中的应用[J]. 中国公路学报, 2003, 16(2):31-34.
ZHONG Cai-gen, DING Wen-qi, WANG Mao-he, et al. Application of Artificial Neural Network in Settlement Prediction of Highway Soft Foundation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(2): 31-34.
 - [4] 折学森. 软土地基沉降计算[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
SHE Xue-sen. Settlement Calculation for Soft Foundation[M]. Beijing: People's Communications Press, 1998.
 - [5] 叶观宝, 司明强, 赵建忠, 等. 高速公路沉降预测的新方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2003, 31(5): 540-543.
YE Guan-bao, SI Ming-qiang, ZHAO Jian-zhong, et al. New Prediction Method on Final Settlement in Express Highway[J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2003, 31(5):540-543.
 - [6] 杨志法, 尚彦军, 刘 英. 关于岩土工程类比法的研究[J]. 工程地质学报, 1997, 5(4):299-305.
YANG Zhi-fa, SHANG Yan-jun, LIU Ying. Study on the Analogism in Geotechnical Engineering[J]. Journal of Engineering Geology, 1997, 5(4):299-305.
 - [7] 刘沐宇, 朱瑞德. 基于模糊相似优先的边坡稳定性评价范例推理方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1188-1193.
LIU Mu-yu, ZHU Rui-geng. Case-based Reasoning Approach to Slope Stability Evaluation Based on Fuzzy Analogy Preferred Ratio[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8):1188-1193.
 - [8] 冯仲仁, 陈向阳, 鄢恒珍. 基于范例推理的公路软基处理方案决策模型[J]. 岩土力学, 2004, 25(11):1779-1781.
FENG Zhong-ren, CHEN Xiang-yang, YAN Heng-zhen. Decision Method of Soft Ground Improvement of Expressways Using Case-based Reasoning[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11):1779-1781.