最优分段法在静探试验数据处理中的应用

刘全林[1,2] ,朱忠隆[2] ,张庆贺[2]
(1. 淮南工业学院土木工程系 ,淮南　232001 ;2. 同济大学地下建筑与工程系 ,上海　200092)

[摘　要]在研究盾构法隧道施工对地层扰动影响的课题中 ,采用了静力触探仪进行原位测试 ,测定了盾构动态推进引起周围土体的比贯入阻力 Ps 值的变化。针对测试时间、范围、数量有限的特点 ,利用最优分段法对试验数据进行了聚类处理 ,分析结果表明该方法在对地层受盾构施工扰动的一般规律认识上具有参考意义。

[关键词]静力触探　盾构法隧道　聚类分析　最优分段法
[中图分类号]TU413.9　[文献标识码]A　[文章编号]0495 - 5331(2001)06 - 0083 - 03

静力触探作为土体原位测试的一项重要技术 ,除了可用于土层划分、土类判别外 ,还可用于检验地基处理效果[1]。同时 ,静力触探还具有快速、数据连续、再现性好、操作省力等优点[2]。有鉴于此 ,在盾构法隧道施工对地层扰动影响的研究课题中 ,我们采用了静力触探测试技术作为研究的试验方法 ,在上海地铁二号线区间盾构法隧道工程中进行了原位测试 ,采集了一系列的静探孔的数据和曲线 ,取得了一定的规律认识[3]。

本文在结合了隧道工程地质勘察报告的基础上 ,对静探数据进行了聚类分析 ,由于静探数据属于有序样本集合 ,因此我们采用了最优分段法对数据进行了分析计算 ,结果表明该方法有一定的参考价值。

1　试验概况

本次试验选在上海地铁二号线浦东某区间隧道工程段 ,隧道穿越的地表无重要建筑物 ,地表覆土约 8.5 m～9.5 m。根据工程地质勘察报告 ,静力触探试验段隧道穿越上海地区海相沉积第 ③层淤泥质粉砂质粘土和第 ④层灰色淤泥质粘土 ,土层特征为饱和、流塑、土质均匀、夹极薄层粉砂土 ,属高压缩性土。

试验采用同济大学岩土工程实验室静力触探仪 ,使用电阻应变片式单桥金属触探头。试验随着盾构推进而进行 ,探头每进 10 cm 采集一次数据 ,试验累计触探孔 14 个 ,为了探索不同的施工效应对土体性质的影响 ,在盾构隧道前后左右不同位置布孔 ,如图 1。图中距离值是孔位离盾构隧道的距离相对值。由于隧道推进施工纵向坡度在 1 ‰左右 ,可以近似认为推进是水平进行的。表 1 为各触探孔深度表。

表 1　触探孔深度表

孔位	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14
深度(m)	18.3	18.3	18.3	12.7	9.0	9.2	9.3	14.3	15.9	16.3	6.5	16.2	15.5

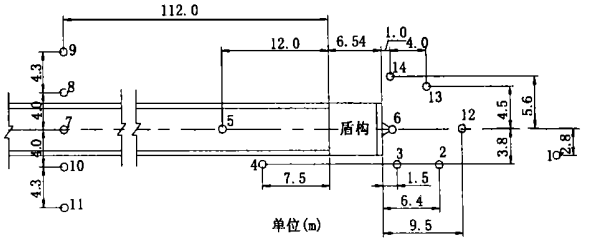

图 1　静力触探孔平面布置图

本次试验的数据及曲线通过多功能测量记录仪(JC - X3 型)采集后 ,除孔位 10 外 ,其余孔位的数据记录完整 ,无缺失。

由于试验段缺乏详细的勘察报告 ,试验区域的土层划分仅依赖该区间隧道工程的地质勘察报告(工程地质剖面图) ,而且试验还受时间、空间的限制 ,无法同时进行其它原位测试 ,因此试验研究的关键在于从有限的试验数据中分析出有价值的信息。

常规的作法是根据现有的工程地质勘察报告 ,近似定出静探试验段的位置 ,根据土层的分层(类)情况 ,计算出各触探孔分层土的 Ps 均值 ,并进一步研究比较各土层性质参数的变化趋势 ,从而可以看出地层受施工扰动的影响变化情况。采用这种方法所取得的研究成果在文献[3]中已有论述 ,在此不再赘述。本文讨论的是采用聚类分析方法来对试验数据进行整理研究 ,方法的优点在于受人为划分土类因素影响小 ,能够直接从试验数据中提取有代表性的信息。

[收稿日期]2001 - 01 - 02 ;[修订日期]2001 - 07 - 18 ;[责任编辑]王　玉。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2 最优分段聚类分析法

聚类分析是研究如何用数学的方法将事物进行分类的科学,也是数理统计中研究"物以类聚"的一种多元分析方法。许多分类问题中,如测井曲线的分段,地质时间序列的分段等,由于存在次序的约束,使得可能的分类数目大大减少,将分裂法(Splitting)用在这种分类场合中,可以求得精确最优解,这种解法称为最优分段法。

设待分类的样本集合为:

$$X = \{X_1, X_2 \cdots\cdots X_n\}$$

样本是观测采样点,同类的样本是互相邻接的,因此类的形式为:$\{X_i, X_{i+1}, \cdots\cdots X_{i+k}\}$,其中 $1 \le i < n, k \ge 1, i + k \le n$。

最优分段聚类分析法的一般步骤为[4]:

1) 定义类的直径:设某一类是$\{X_i, \cdots\cdots X_j\}$,$1 \le i < j \le n$,它们的均值向量记成 $\bar{X}_{ij}$,即

$$\bar{X}_{ij} = \frac{1}{j - i + 1}\sum_{l=i}^{j} X_l \tag{1}$$

类的直径用 $D(i, j)$ 表示,例如可取

$$D(i, j) = \sum_{l=i}^{j}(X_l - \bar{X}_{ij})'(X_l - \bar{X}_{ij}) \tag{2}$$

2) 定义分类函数:将 n 个有序样本分成 K 类,设某一种分类是

$$D(n, k): \{i_1 = 1, i_1 + 1, \cdots\cdots, i_2 - 1\}, \{i_2, i_2 + 1, \cdots\cdots, i_3\}, \cdots\cdots, \{i_k, i_{k+1}, \cdots\cdots, n\}$$

其中,$i_1 = < i_2 < \cdots < i_k < n$,定义这种分类法的分类函数

$$\bar{V}[P(n, k)] = \sum_{j=1}^{k} D(i_j, i_{j+1} - 1) \tag{3}$$

当 n, k 固定时,$\bar{V}[P(n, k)]$ 越小,表示各类的离差平方和越小,分类就比较合理。因此要寻求一种分类使得 $\bar{V}[P(n, k)]$ 达到极小,此时的值记为 $e[P(n, k)]$。

3) $e[P(n, k)]$ 的递推公式

$$e[P(n,2)] = < \min_{2 \le j \le n} > \{D(1, j - 1) + D(j, n)\} \tag{4}$$

$$e[P(n, k)] = < \min_{k \le j \le n} > \{e([P(j - 1, k - 1)] + D(j, n)\} \tag{5}$$

4) 精确最优解的求法:由公式(5) 求 j_k,使之达到极小,即有

$$e[P(n, k)] = e([P(j_{k-1}, k - 1)] + D(j_k, n)\} \tag{6}$$

可得第 K 类 $G_k = \{j_k, j_{k+1}, \cdots\cdots, n\}$,然后找 j_{k-1},使之满足

$$e([P(j_{k-1}, k - 1)] = e([P(j_{k-1}, k - 2)] + D(j_{k-1}, j_k - 1)\} \tag{7}$$

得到第 K - 1 类 $G_{k-1} = \{j_{k-1} - 1, \cdots\cdots, j_k - 1\}$,依次下去可得所有的类:$G_1, G_2, \cdots\cdots G_k$。

根据静探试验数据的分布情况,并结合工程地质勘察报告的土体分层和分类情况,在采用 C 语言编制程序实现上述聚类分析算法的过程中,作了以下考虑:

1) 由于每个样本只有一个指标,类的直径计算公式为:

$$D(i, j) = \sum_{l=i}^{j} X_l^2 - \frac{1}{j - i + 1}\left(\sum_{l=i}^{j} X_l\right)^2 \tag{8}$$

2) 在聚类递推算法中,每一类的距离大于 2.0 m,也即每类样本数在 20 个以上,分类数依数据样本选为 3 或 4 类;

3) 个别异常点位作了"削峰"处理;

4) 数据样本不分土类,只计分类数,这与常规作法按土层(类)进行分类的不同之处,其结果必然会出现一类数据穿越二层土(类)的现象,计算应属正常。

3 聚类计算结果分析

根据每一触探孔的试验数据的聚类计算,并计算各类的 P_S 均值,分类情况见表 2。

根据表中数据可以从以下几个孔位的对比来分析聚类计算的结果。

1) 孔位 1、2、3 的对比分析:从各类样本的土层 $\bar{P}_S$ 比较可以看出,①类土的比贯入阻力 $\bar{P}_S$ 值呈现递减的趋势,这类土的厚度在 2.5 m～3.0 m 之间,说明该层土随着盾构推进处在不断松动变化中,而②类土的变化是越靠近盾构前方 $\bar{P}_S$ 值反而受到盾构的挤压作用呈现上升变化(从 0.8845 MPa 上升到 1.0169 MPa),但这层土的 $\bar{P}_S$ 值要小于原样未扰动土(孔位 1) 相应的值。③、④类土的变化也很明显显示土体是处在受挤压的情况,而这两层土均处在盾构正前方的右测。以上对比与文献[3]中关于盾构施工对侧向土体的影响认识结果基本一致。

2) 孔位 1 与孔位 4、孔位 5 的对比:在盾构推进施工的这个过程中,从孔位 1 与孔位 4 和孔位 1 与孔位 5 的对比可以发现施工对地层扰动是很明显的,特别反映在距离隧道越近的土层,如②、③类土,埋深都较靠近隧道和盾构周围,$\bar{P}_S$ 值的下降很快,

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

如从 1.7585 MPa 下降到 1.3009 MPa 以及从 0.32797 MPa 下降到 0.2203MPa。

表 2　分类情况

分类数	孔 1		孔 2		孔 3		孔 4		孔 5		孔 6		孔 7	
	分类间距(cm)	璃$_S$ (MPa)	分类间距(cm)	璃$_S$ (MPa)	分类间距(cm)	璃$_S$ (MPa)	分类间距(cm)	璃$_S$ (MPa)	分类间距(cm)	璃$_S$ (MPa)	分类间距(cm)	璃$_S$ (MPa)	分类间距(cm)	璃$_S$ (MPa)
①	310	0.6694	290	0.6172	250	0.5808	330	0.6715	350	0.775	270	0.5626	320	0.8566
②	210	1.7585	290	0.8845	340	1.0169	210	1.3009	220	1.2532	290	1.7966	220	1.2995
③	940	0.3280	830	0.4119	920	0.4439	720	0.2203	320	0.3103	360	0.4769	330	0.4655
④	360	0.5881	380	0.5826	250	0.6723								

分类数	孔 8		孔 9		孔 11		孔 12		孔 13		孔 14	
	分类间距(cm)	璃$_S$ (MPa)	分类间距(cm)	璃$_S$ (MPa)	分类间距(cm)	璃$_S$ (MPa)	分类间距(cm)	璃$_S$ (MPa)	分类间距(cm)	璃$_S$ (MPa)	分类间距(cm)	璃$_S$ (MPa)
①	290	0.8128	280	0.5264	290	0.7690	320	0.5709	390	0.5559	220	0.3395
②	320	1.4503	610	0.3897	260	1.4585	280	1.9425	320	0.5484	450	1.5821
③	820	0.3780	460	0.2130	960	0.4453			860	0.2407	920	0.3257
④			240	0.3675								

注:分类间距即为每类静探数据的样本数。

3) 孔位 7、孔位 8、孔位 9、孔位 11 的对比:这 4 个沿隧道横向的点位是在盾构推进完成后 10～12 天布设的,可以看出在相当长的时期里,受扰动的土体的强度仍维持在正常不受扰动土体之下,并可能影响到土体的固结和蠕变过程。孔位 9 的 ②类土璃$_S$ 值出现低值,与孔位 13 出现类似的情况一样,可能与试验操作过程有关。

4) 孔位 13 与孔位 14 的比较:根据对称的原理,孔位 13、14 的 ①类土和 ③类土与盾构右侧的孔位 2、3 有相同的扰动影响变化,即 ①类土的璃$_S$ 值是减小, ③类土的值璃$_S$ 是增加的。尽管孔位 13 中 ②类土值璃$_S$ 过于偏低,但可以预测,该类土的璃$_S$ 也应处于递增的变化阶段。

其余孔位参数的相互比较类同,不再此详细讨论。

4　结　论

1) 聚类计算结果表明采用最优分段法能够有效地、快速地对有序样品进行归类,用编制的 C 语言程序进行测试表明,对每一孔位的分类数在 20 左右,数据样本在 150 个以上的数据处理时间不超过 1 秒钟。

2) 尽管在聚类计算分析前对数据的个别异常样本进行了削峰处理,但通过对计算结果的相互比较,个别点的异常对计算结果通常影响不大,这与用相关函数法求静探曲线相关距离的结论是吻合的[5]。

3) 在聚类分析中对各类土的距离(样本数)规定最小容量很有必要,特别在对静探曲线波动幅度大的区域,如 ②类土的分段中。

4) 本文的研究工作再次验证了我们已取得的盾构施工对地层影响的一般规律认识,实践也证明采用静力触探试验来研究地层受扰动影响的方法是可行的。

[参考文献]

[1] 唐世栋,朱小林. 用孔隙水压力 —静力触探试验实测场地打桩前后的变化[J]. 工程勘察,1987(6):15～19.

[2] 林宗元主编. 岩土工程试验监测手册[M]. 辽宁:辽宁科学技术出版社,1994:352～385.

[3] 朱忠隆,张庆贺. 盾构法施工对地层扰动的试验研究[J]. 岩土力学,2000,21(1),49～52.

[4] 方开泰,潘恩沛. 聚类分析[M]. 北京:地质出版社,1982,134～175.

[5] 徐斌,王大通,高大钊. 用相关函数法求静探曲线相关距离的讨论[J]. 岩土力学,1998,19(1):55～58.

APPLICATION OF OPTIMUM GROUPING METHOD IN PROCESSING DATA OF STATIC CONE PENETRATION TESE

LIU Quan - lin, ZHU Zhong - long, ZHANG Qing - hou

Abstract: Static cone penetration test has been done to study the effect of shield tunneling on the ground in our research project, and the variation of Ps (specific penetration resistance) also has been measured. In the paper, optimum grouping method is introduced to cluster the test data. The analysis results show the method is effective in data process and also can be for reference on the understanding of the general laws of shield tunneling.

Key words: static cone penetration test, shield tunnel, clustering analysis, optimum grouping method

[第一作者简介]

刘全林(1964 年 -),男,1990 年毕业于淮南矿业学院,获工学硕士学位,主要从事结构工程、岩土工程以及土木工程信息技术等方面教学和研究工作。

通讯地址:上海市同济大学地下建筑与工程系　邮政编码:200092

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net