

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.10.018

线性和非线性去趋势化对土性波动范围影响分析

吴杰, 吴道祥, 林飞, 李文修

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章基于合肥市黏土层静力触探(Cone Penetration Test, CPT)数据建立土性剖面随机场模型,探究线性和非线性去趋势化对土性波动范围计算结果的影响。利用线性和非线性去趋势方法对原始CPT数据进行去趋势化处理,对得到的波动分量进行平稳性和遍历性检验,采取相关函数法和空间递推法计算波动分量对应的土性波动范围,并讨论计算方法和取样间距对不同去趋势化方法的敏感性。结果表明:对于具有非线性趋势的数据,采用线性去趋势来处理会使得到的波动分量平稳性变差,导致最终计算得到的波动范围均值、标准差和变异系数增大,计算结果稳定性明显变差;相比于线性去趋势,非线性去趋势的适应性更强;此外相关函数法对不同去趋势化方法的敏感性要大于空间递推法,而取样间距不会影响数据整体的趋势性及对去趋势化处理方法的选择。

关键词:静力触探(CPT);去趋势化;波动范围;相关函数法;空间递推法

中图分类号:TU432 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)10-1412-08

Analysis of the influence of linear and nonlinear detrending on scale of fluctuation of soil properties

WU Jie, WU Daoxiang, LIN Fei, LI Wenxiu

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Based on cone penetration test (CPT) data of the clay layer in Hefei City, a soil profile random field model was established to explore the influence of linear and nonlinear detrending on the calculated scale of fluctuation of soil properties. Linear and nonlinear detrending methods were used to detrend the original CPT data, and the stationary and ergodic tests were performed on the obtained fluctuation components. Correlation function method and spatial recursion method were used to calculate the scale of fluctuation of soil properties corresponding to the fluctuation components. The sensitivity of calculation methods and sampling spacing to different detrending methods was discussed. The results show that for the data with nonlinear trend, linear detrending will make the stability of the obtained fluctuation components worse, resulting in the increase of the mean value, standard deviation and coefficient of variation of the final calculated scale of fluctuation, and the stability of the calculated results is obviously worse. Compared with linear detrending, nonlinear detrending has better adaptability. In addition, the sensitivity of the correlation function method to different detrending methods is greater than that of the spatial recursion method, and the sampling spacing does not affect the overall trend of the data and the choice of the detrending method.

Key words: cone penetration test (CPT); detrending; scale of fluctuation; correlation function method; spatial recursion method

收稿日期:2023-02-07;修回日期:2023-04-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42372302);合肥工业大学产学研校企合作资助项目(W2019JSFW0733)

作者简介:吴杰(1997—),男,河南新县人,合肥工业大学硕士生;

吴道祥(1975—),男,湖北洪湖人,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者, E-mail: daoxiang-w@126.com

0 引 言

研究表明,一定空间范围内土体中任意两点之间的性质存在相关性,这种相关性会随着两点间距离的增大而减小,当两点间的距离超过某一限值时,相关性便可忽略不计,这个距离称为土性波动范围^[1-3]。该距离是描述土体空间变异性的关键参数,主要应用于各类建(构)筑物基础及边坡的岩土工程设计与可靠度评价,解决了传统可靠度分析方法无法考虑土性参数空间变异性问题。

近年来,国内外学者针对岩土参数空间变异性开展了大量研究工作。文献[4]首先提出岩土参数具有空间变异性;文献[5]提出用波动范围定量描述岩土体参数的空间变异性。在此基础上,多数学者针对影响波动范围计算结果的因素进行分析和研究,并取得丰硕成果。文献[6]针对计算波动范围的相关函数法提出 5 种符合实际工程需要的相关函数模型;文献[7]研究认为样本数量和取样间距的大小能够控制波动范围的精度,并提出能够用较少数据量得到精度较高的水平波动范围的相关函数;文献[8]研究认为对相关函数前半部分拟合所得到的拟合效果更好;文献[9]对随机场法和地质统计学法计算过程中遇到的问题进行分析;文献[10]从定义出发对空间递推法进行改进;文献[11]分析半变异函数法计算波动范围结果不稳定的原因并提出改进方法;文献[12-13]通过理论推导证明当数据量足够大时,空间递推平均法和相关函数法得到的计算结果是一致的;文献[14]提出当取样间距等于相关距离会得到更加准确的计算结果。

目前,关于波动范围影响因素的研究主要集中在计算方法、取样间距和样本容量等方面,而关于数据的去趋势化方法对波动范围影响的研究较少。部分研究人员在进行土性波动范围计算时,根本不考虑实际数据的趋势性,简单化的统一采用线性去趋势方法对研究数据进行去趋势化处理。而在实际应用中,即便是同一个场地内同一土层的数据,其趋势性也可能并不相同。若忽视部分数据的非线性趋势,采用线性去趋势方法处理数据,可能会对波动范围的最终计算结果产生影响。

本文以合肥市老黏土为例,选取静力触探(cone penetration test, CPT)数据为研究对象,分别采用线性和非线性去趋势方法对数据去趋势化

处理,对比 2 种去趋势化方法处理后波动分量的平稳性和遍历性,利用相关函数法和空间递推法计算相应的波动范围,比较不同因素对原始 CPT 数据采用不同去趋势方法处理的敏感性。

1 数据的趋势性和去趋势化处理

1.1 数据趋势性

由于沉积历史和上覆压力的影响,土性参数往往具有沿土层深度方向的趋势性。一般而言,岩土性质参数 $t(x)$ 可以表示为:

$$t(x) = m(x) + \omega(x) \quad (1)$$

其中: x 为深度坐标; $m(x)$ 为趋势分量; $\omega(x)$ 为波动分量。

与室内土工试验及其他原位测试方法相比,CPT 能够获得原状土体连续等间距的土体参数,稳定性强、精度高^[15]。对合肥某工程场地 2 个钻孔 CPT 实测数据分别进行线性和非线性拟合,如图 1 所示,图 1 中 R_1^2 和 R_2^2 分别为线性和非线性拟合相关系数。从图 1a 可以看出,对应钻孔贯入阻力 p_s 值的线性拟合更优,从图 1b 可以看出,对应钻孔 p_s 值的非线性拟合更优,表明同一场地的 2 个钻孔 CPT 实测数据沿深度呈现出不同的趋势性。

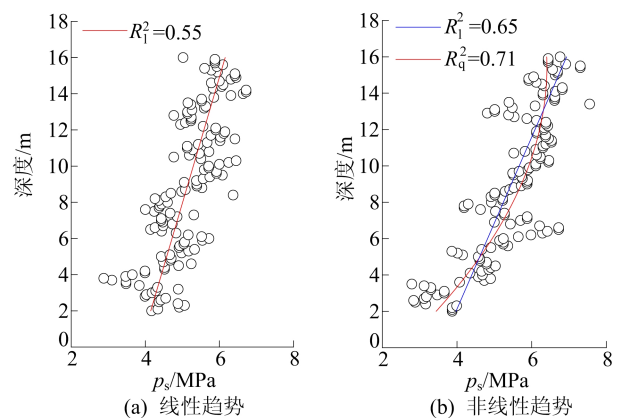


图 1 贯入阻力 p_s 沿深度方向的趋势性

现对收集到的合肥市某工程场地老黏土层 28 个 CPT 孔 p_s 值(取样间距为 0.1 m)分别沿深度进行线性和非线性函数拟合,得到的相应拟合相关系数对比见表 1 所列,所形成的曲线如图 2 所示。

对比后发现,除 23 号孔 p_s 值线性和非线性拟合的相关系数 R^2 相等外,其余各孔 p_s 值非线性拟合的相关系数都大于线性拟合相关系数,数据整体呈现出显著的非线性趋势。

表 1 不同拟合函数对应的相关系数

钻孔编号	R_1^2	R_q^2	钻孔编号	R_1^2	R_q^2	钻孔编号	R_1^2	R_q^2	钻孔编号	R_1^2	R_q^2
1	0.30	0.43	8	0.51	0.58	15	0.65	0.71	22	0.14	0.36
2	0.47	0.56	9	0.59	0.67	16	0.50	0.65	23	0.55	0.55
3	0.50	0.59	10	0.30	0.53	17	0.45	0.63	24	0.29	0.49
4	0.21	0.28	11	0.55	0.74	18	0.28	0.50	25	0.54	0.63
5	0.27	0.45	12	0.56	0.74	19	0.32	0.48	26	0.27	0.56
6	0.22	0.41	13	0.47	0.60	20	0.53	0.71	27	0.37	0.64
7	0.40	0.60	14	0.48	0.57	21	0.34	0.58	28	0.40	0.56

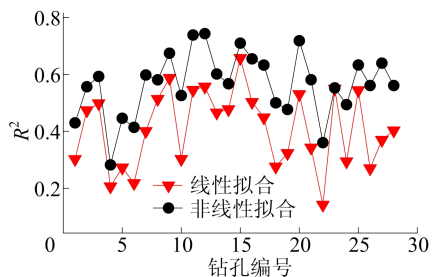


图 2 不同拟合函数对应的相关系数

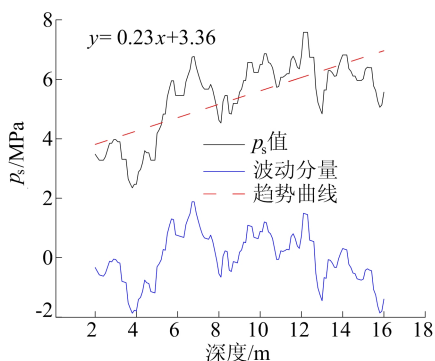
1.2 数据去趋势化处理

为比较线性和非线性去趋势化处理对 CPT

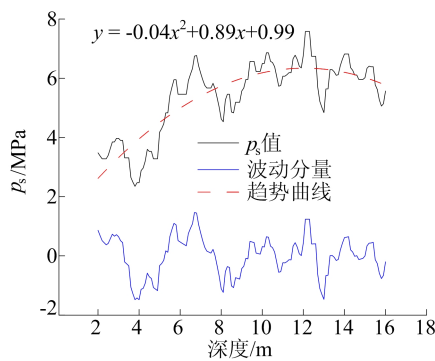
数据波动范围的影响,需要对上述工程场地 28 个孔 p_s 值分别进行线性去趋势和非线性去趋势处理得到各孔 p_s 值沿深度方向的波动分量。

由于 p_s 值沿深度方向的非线性趋势并不复杂,通过二次函数足以表达。

文献[16]同样指出去趋势所采用的多项式阶数不易过高,最高可为 2 阶。因此,非线性去趋势处理时,拟合函数采用二次函数。以 20 号孔为例, p_s 值采用不同去趋势化处理的结果如图 3 所示。



(a) 线性去趋势



(b) 非线性去趋势

图 3 p_s 值采用不同去趋势化处理的结果

2 平稳性和遍历性检验

随机场模型实际上是用齐次正态随机场来模拟土性剖面的,因此去趋势化处理得到的波动分量还需符合随机场条件,即具有平稳性和遍历性^[17]。波动分量的平稳性可以根据集平均 $\mu(h)$ 和自相关函数 $R(h, h + \Delta h)$ 是否与深度有关来判断,遍历性根据深度平均 $\mu(n)$ 和深度自相关函数 $R_n(h, h + \Delta h)$ 是否与钻孔间距有关来判断。下面对各孔 p_s 值经 2 种去趋势方法处理得到的波动分量进行平稳性与遍历性检验,并对检验结果比较分析。结果显示:在平稳性方面,线性去趋势处

理得到的波动分量的平稳性更差;在遍历性方面,采用这 2 种去趋势处理方法的差别不大。总体上,这 2 种去趋势方法得到的波动分量都符合建立随机场的条件。

2.1 平稳性检验

在平稳性检验中, $\mu(h)$ 表示各孔 p_s 值在深度 h 下对应的波动分量的均值, $R(h, h + \Delta h)$ 表示各孔 p_s 值在深度 h 和 $h + \Delta h$ 下对应波动分量乘积的均值。

不同去趋势化处理下, $\mu(h)$ 随深度变化情况和 $R(h, h + \Delta h)$ 随深度变化情况如图 4、图 5 所示。

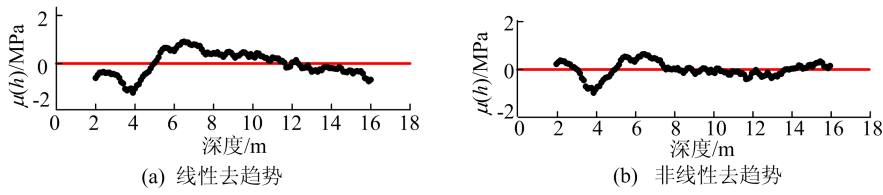


图 4 $\mu(h)$ 随深度的变化

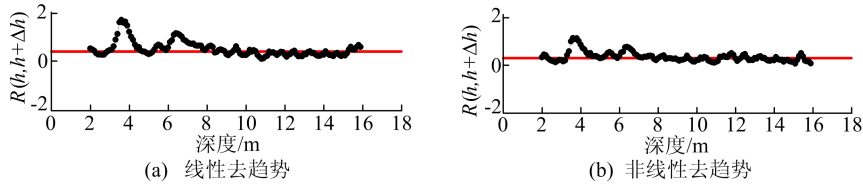


图 5 $R(h, h+\Delta h)$ 随深度的变化

从图 4 可以看出,相比于非线性去趋势,经过线性去趋势处理得到的波动分量的 $\mu(h)$ 值沿着深度坐标轴摆动的幅度更大。从图 5 可以看出,经过线性去趋势处理得到的波动分量的 $R(h, h+\Delta h)$ 值沿着深度坐标轴摆动的幅度也更大。综上所述,各孔 p_s 值经过线性去趋势处理得到的波动分量的平稳性更差。

2.2 遍历性检验

由于现场勘察的 CPT 孔并不是严格按照等间距排列,因此在进行遍历性检验时,只能以孔号

代替各孔之间的水平距离。 $\mu(n)$ 表示 n 号孔波动分量的均值, $R_n(h, h+\Delta h)$ 表示 n 号孔在深度 h 和 $h+\Delta h$ 下对应波动分量乘积的均值。 $\mu(n)$ 随孔号变化情况和 $R_n(h, h+\Delta h)$ 随孔号变化情况如图 6 和图 7 所示。

由图 6 可知,2 种去趋势方法得到的波动分量的 $\mu(n)$ 值都随孔号坐标轴上下摆动,而相比于非线性去趋势,线性去趋势得到的各孔波动分量的 $\mu(n)$ 值沿孔号坐标轴的摆动幅度更小,并且更接近 0。但由于数量级非常小,总体上差别并不大。

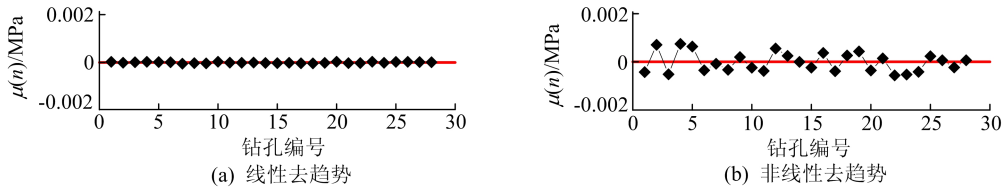


图 6 $\mu(n)$ 随孔号变化

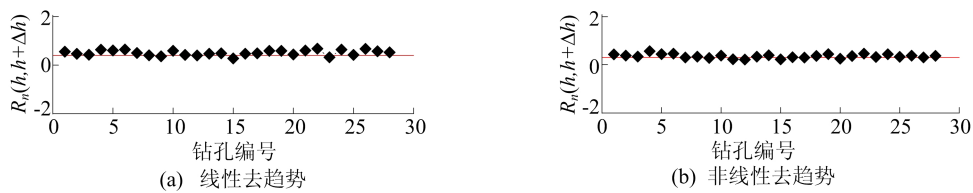


图 7 $R_n(h, h+\Delta h)$ 随孔号变化

从图 7 可以看出,2 种去趋势方法得到的各孔波动分量的 $R_n(h, h+\Delta h)$ 值基本都沿着 $R_n = 0.3$ 轻微摆动,且摆动幅度差别不大。综上所述可知,这 2 种去趋势方法得到的波动分量的遍历性差别不大。

3 波动范围计算分析

3.1 相关函数法

在利用相关函数法进行波动范围计算时,需

选择合适的相关函数型式拟合自相关函数。常见的相关函数型式有指数型(single exponential, SNX)、指数平方型(squared exponential, SQX)、指数余弦型(cosine exponential, CSX)和二阶自回归型(second-order Markov, SMK)^[18-19]。

不同型式的相关函数所对应的表达式及相关的波动范围大小见表 2 所列。表 2 中: b 为计算参数; $\Delta z=i\Delta z(i=1,2,3,\dots,n)$, Δz 为样本取样间距。

表 2 常见的相关函数型式

相关函数型式	表达式	波动范围
SNX	$\rho(\Delta z) = \exp(-\Delta z/b)$	$2b$
SQX	$\rho(\Delta z) = \exp[-(\Delta z/b)^2]$	$\pi^{0.5}b$
CSX	$\rho(\Delta z) = \exp(-\Delta z/b)\cos(\Delta z/b)$	b
SMK	$\rho(\Delta z) = (1 + \Delta z/b)\exp(-\Delta z/b)$	$4b$

相关函数型式的正确选择对计算结果非常重要,因此本文根据自相关函数计算结果,选取表 2 所列的 4 种相关函数型式对各孔自相关函数值进行拟合,选择拟合相关系数 R^2 最高的相关函数计算得到的波动范围值作为最终结果。以 1 号孔为例,相关函数拟合结果如图 8 所示。经过线性去趋势处理得到的波动分量拟合最优相关函数型式为 SNX,波动范围计算结果为 0.59 m;经过非线性去趋势处理得到的波动分量拟合最优相关函数型式为 SQX,波动范围计算结果为 0.38 m,差异明显。

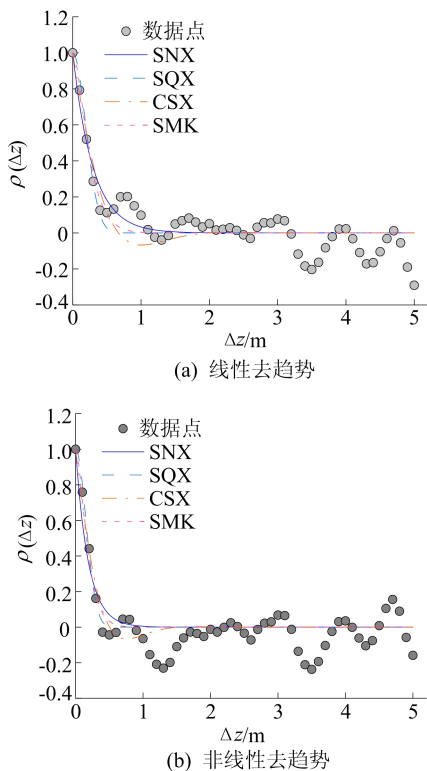


图 8 相关函数拟合结果

3.2 空间递推法

当采用传统空间递推法计算波动范围时,方差折减函数的平稳点通常难以确定,计算结果易受人为因素影响,因此本文根据改进空间递推法计算波动范围。同样以 1 号孔为例,线性和非线性去趋势化处理下空间递推法计算结果如图 9 所

示,以曲线的峰值点作为波动范围的最终计算结果。从图 9 可以看出,经过线性去趋势处理计算得到的波动范围为 0.51 m;经过非线性去趋势处理计算得到的波动范围为 0.35 m,同样具明显差异。

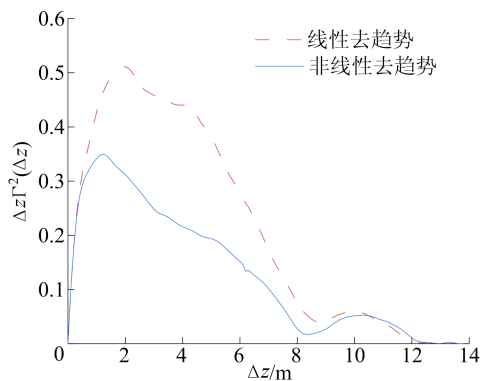


图 9 空间递推法计算结果

3.3 计算结果比较分析

采用相关函数法和空间递推法计算得到的各孔 p_s 值在不同去趋势化处理下的波动范围如图 10 所示。

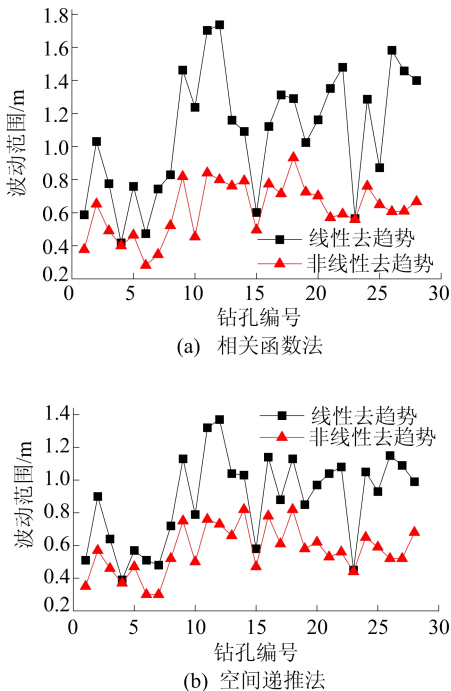


图 10 各孔波动范围计算结果

从图 10 可以看出,无论采用相关函数法还是空间递推法,基本上除了 23 号孔外,其余各孔 p_s 值经过线性去趋势处理后计算得到的波动范围都高于经过非线性去趋势处理得到的。

出现这种现象的主要原因是除了 23 号孔外,其余各孔 ρ_s 值沿深度方向具有非线性趋势,仅通过线性去趋势对其进行处理会使得到的波动分量中还保留了部分趋势分量没有完全去除,因此导致计算结果产生偏差。而 23 号孔的 ρ_s 值沿深度方向具有线性趋势,非线性趋势并不明显,采用非线性去趋势处理时,拟合函数的 2 次项系数接近于 0,因此去趋势效果与线性去趋势效果基本一致,这也体现出非线性去趋势方法具有更好的适应性。因此,当某场地原始数据沿深度方向的趋势不明确或者趋势形式不单一时,采用非线性去趋势对数据进行去趋势化处理效果会更好,得到的波动范围与实际值更接近。

4 相关因素对去趋势化方法敏感性分析

影响土性波动范围计算结果的因素有很多,对波动范围的影响角度和程度也各不相同。计算方法和取样间距是其中 2 种被研究和讨论较多的影响因素。本文分别探讨这 2 种因素对去趋势化方法的敏感性,从不同角度分析去趋势化方法对土性波动范围的影响。

4.1 计算方法对不同处理方法的敏感性分析

本文分别采用相关函数法和空间递推法计算得到的上述各孔 ρ_s 值对应的波动范围的均值、变异系数及标准差见表 3 所列。从表 3 可知,无论采用哪种计算方法,相比于非线性去趋势处理,各孔经过线性去趋势处理得到的波动范围的均值、变异系数和标准差明显增大。 ρ_s 值采用线性去趋势

处理时,相关函数法计算得到的波动范围均值为 1.09 m,空间递推法计算得到的波动范围均值为 0.88 m,结果相差较大。而 ρ_s 值采用非线性去趋势处理时,相关函数法计算得到的波动范围均值为 0.62 m,空间递推法计算得到的波动范围均值为 0.57 m,2 种方法得到的波动范围结果比较接近,与文献[12]研究结果相符。

进一步对比采用线性去趋势和非线性去趋势得到的波动分量所对应的波动范围均值、标准差和变异系数的差值,可以发现通过相关函数法计算得到各项差值都大于空间递推法所得到的。结果表明对于具有非线性趋势的 ρ_s 值,采用线性去趋势化进行去趋势化处理时,相关函数法计算得到的结果与实际结果的偏差更大,即相关函数法对不同去趋势处理方法的敏感性要大于空间递推法。

由于相关函数法与空间递推法在计算波动范围时的计算逻辑不同,相关函数法需要选择合适的相关函数型式对自相关函数值进行拟合。对于具有非线性趋势的 ρ_s 值,采用不同去趋势方法处理得到波动分量会存在明显的差异,由波动分量计算得到的自相关函数值也会因此存在差异。当采用相关函数法计算波动范围时,这种差异会导致同一孔数据的拟合最优相关函数型式不同,进而导致同一孔数据最终计算得到的波动范围值相差较大。而改进的空间递推法从定义出发,计算过程并不复杂,因此受不同去趋势化方法的影响相对较小。

表 3 不同去趋势化处理下波动范围计算结果

统计指标	相关函数法			空间递推法		
	线性去趋势	非线性去趋势	差值	线性去趋势	非线性去趋势	差值
均值/m	1.09	0.62	0.47	0.88	0.57	0.31
变异系数	0.35	0.27	0.08	0.31	0.26	0.05
标准差/m	0.38	0.17	0.21	0.27	0.15	0.12

4.2 取样间距对不同处理方法的敏感性分析

为讨论取样间距对不同去趋势化下波动范围计算结果的影响,对上述工程现场 3 孔 CPT 实测数据分别按照 0.1、0.3、0.5、0.7 m 的间距进行取样,对各孔在不同取样间距下得到的 ρ_s 值进行线性和非线性去趋势化处理,然后采用空间递推法计算相应的波动范围。

波动范围随取样间距变化曲线如图 11 所示。从图 11 可以看出,波动范围计算结果随着取样间

距的增大而显著增大,但不论取样间距如何变化,经线性去趋势处理后计算得到的波动范围都明显大于经过非线性去趋势处理所得到的结果。

对各孔采用不同取样间距得到的 ρ_s 值进行线性和非线性函数拟合,得到相应拟合相关系数见表 4 所列。从表 4 可以看出,对同一 CPT 孔数据而言,2 种拟合方法得到的相关系数随取样间距的变化而改变,但总体上非线性拟合相关系数仍大于线性拟合相关系数。

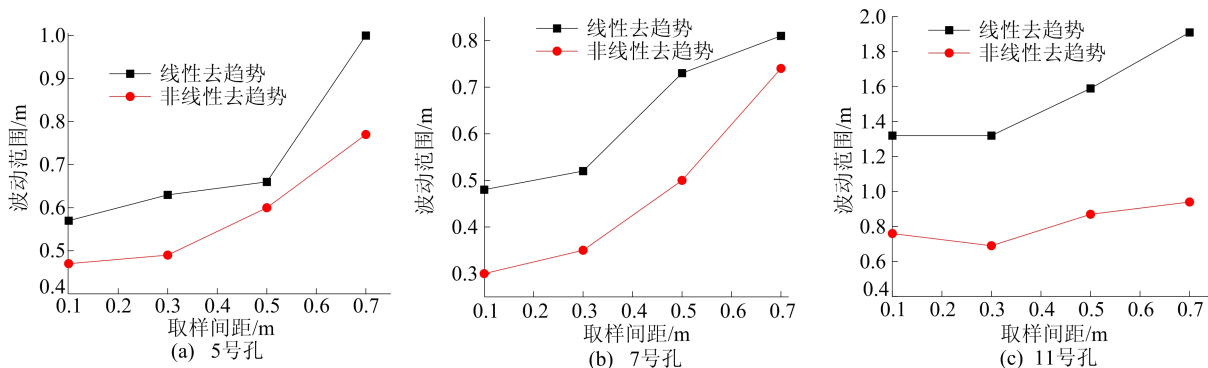


图 11 不同取样间距下各孔波动范围计算结果

表 4 不同取样间距下 ρ_s 值线性和非线性拟合相关系数

拟合函数 类型	钻孔 编号	取样间距/m			
		0.1	0.3	0.5	0.7
线性	5	0.27	0.27	0.30	0.33
	7	0.40	0.42	0.39	0.58
	11	0.30	0.54	0.63	0.65
非线性	5	0.45	0.44	0.47	0.52
	7	0.60	0.60	0.61	0.65
	11	0.53	0.74	0.80	0.81

综上所述,样本取样间距对去趋势化方法的敏感性弱,其大小并不影响数据整体的趋势性,因此也不会影响去趋势化处理方法的选择。

从本文研究来看,不同因素对于去趋势化方法的敏感性是不同的,但这些不同因素并不会影响到非线性去趋势化方法相对于线性去趋势化方法的优势。

5 结 论

本文对收集到的具有非线性趋势的实际工程 CPT 数据,采用线性去趋势进行去趋势化处理,并以非线性去趋势处理作为对照组,分别利用相关函数法和空间递推法计算相应的土性波动范围,探讨线性和非线性去趋势化处理对土性波动范围的影响,主要结论如下。

1) 虽然采用线性去趋势方法来处理具有非线性趋势的数据得到的波动分量也符合建立随机场的条件,但波动分量的平稳性更差。

2) 相比于线性去趋势,非线性去趋势的适应性更强。即使采用非线性去趋势处理仅具有线性趋势的数据,同样能够得到和线性去趋势处理相近的波动范围计算结果。

3) 去趋势处理需考虑数据真实的趋势性,若对具有非线性趋势的数据进行线性去趋势处理,

无论采用相关函数法还是空间递推法,都会导致最终得到的波动范围均值、变异系数和标准差增大,计算结果稳定性降低。

4) 不同因素对去趋势化方法敏感性不同。相关函数法对数据采用不同去趋势化方法处理的敏感性要大于空间递推法。而样本取样间距不会影响数据整体的趋势性以及去趋势化处理方法的选择。

[参 考 文 献]

- [1] 高大钊. 岩土工程设计安全度指标及其应用[J]. 工程勘察, 1996, 24(1): 1-6.
- [2] PHOON K K, KULHAWY F H. Characterization of geotechnical variability[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(4): 612-624.
- [3] 冷伍明, 赵善锐. 土工参数不确定性的计算分析[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 68-74.
- [4] LUMB P. The variability of natural soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1966, 3(2): 74-97.
- [5] VANMARCKE E H. Probabilistic modeling of soil profiles [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division Asce, 1977, 103(11): 1227-1246.
- [6] JAKSA M B, BROOKER P I, KAGGWA W S. Inaccuracies associated with estimating random measurement errors[J]. Journal of Geo-technical & Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(5): 393-401.
- [7] LLORETCABOT M, FENTON G A, HICKS M A. On the estimation of correlation distance in geostatistics [J]. Georisk (Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards), 2014, 8(2): 129-140.
- [8] 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): 55-59.
- [9] 谭晓慧, 杜林枫, 费锁柱, 等. 土性参数波动范围的计算方法及影响因素[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 91-98.
- [10] 张梅, 丁继辉, 宋向东. 对求解土性相关距离的空间递推平均法的分析与改进[J]. 河北农业大学学报, 1999, 22(1): 87-91.

钢梁贯通型装配式混凝土框架梁柱节点具有一定的通用性。

4 结 论

1) 将新型钢梁贯通型装配式节点 6 个试件的骨架曲线无量纲化处理, 结合试验现象可以将其分为 3 个阶段, 分别为仅节点核心区混凝土出现细微裂缝的弹性阶段、试件开始屈服的强化阶段和到达峰值荷载后节点核心区混凝土破坏脱落的退化阶段。

2) 根据无量纲骨架曲线所划分的 3 个阶段, 结合三折线模型对其进行分段拟合, 拟合结果较好, 与试验吻合度高。

3) 根据试验数据分别拟合出试件在正负向加卸载过程中的刚度退化方程, 在由三折线模型拟合出的计算骨架曲线基础上, 结合滞回规则, 拟合出计算滞回曲线。与试验滞回曲线进行比较, 吻合程度较高, 即本文恢复力模型可为该类装配式节点的抗震性能分析提供理论参考。

4) 采用另一种钢梁贯通型装配式节点对本文恢复力模型进行验证, 所得计算滞回曲线与试验滞回曲线吻合程度较高, 即本文恢复力模型对该类节点具有一定的通用性。

[参 考 文 献]

[1] IVERSON J K, HAWKINS N M. Performance of precast/prestressed concrete building structures during northridge earthquake[J]. *Pci Journal*, 1994, 39(2): 38-55.
 [2] NORTON J A, KING A B, BULL D K, et al. Northridge earthquake reconnaissance report[J]. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 1994, 27(4): 235-344.

(上接第 1418 页)

[11] 杨阳, 李飒, 孙立强, 等. 半变异函数计算波动范围的方法研究[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2021, 54(7): 618-626.
 [12] 闫澍旺, 朱红霞, 刘润, 等. 关于土层相关距离计算方法的研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(8): 1581-1586.
 [13] 闫澍旺, 朱红霞, 刘润. 天津港土性相关距离的计算研究和统计分析[J]. *岩土力学*, 2009, 30(7): 2179-2185.
 [14] 李新生, 刘超. 相关距离分析与勘察钻孔取样间距的合理确定[J]. *水文地质工程地质*, 2011, 38(4): 74-77.
 [15] 吴道祥, 单灿灿, 钟轩明, 等. 静力触探的发展及其在岩土工程中的应用[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2008, 31(2): 211-215.
 [16] 郭林坪, 孔令伟, 徐超, 等. 静力触探参数自相关距离确定方法与影响因素分析[J]. *岩土力学*, 2017, 38(增刊 1):

[3] 阿热帕提·艾斯凯尔, 陈国新. 预制装配式混凝土结构节点连接方式研究综述[J]. *结构工程师*, 2020, 36(5): 224-233.
 [4] RODRIGUES H, ROMAO X, ANDRADE-CAMPOS A, et al. Simplified hysteretic model for the representation of the biaxial bending response of RC columns[J]. *Engineering Structures*, 2012, 44: 146-158.
 [5] DU Y S, ZHANG Y T, CHEN Z H, et al. Seismic behavior of CFRP confined rectangular CFST columns using high-strength materials: numerical analysis and restoring force model[J]. *Structures*, 2021, 34: 4237-4253.
 [6] 朱旦, 李升才, 朱永甫. 不同轴压比 RCS 梁柱组合件恢复力模型研究[J]. *世界地震工程*, 2021, 37(2): 143-152.
 [7] 张鹏, 孙仁中, 邓宇, 等. 型钢混凝土受拉柱恢复力计算模型试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2021, 41(3): 549-557.
 [8] 杨勇, 闫长旺, 贾金青, 等. 钢骨超高强混凝土柱-混凝土梁节点恢复力模型[J]. *土木工程学报*, 2014, 47(增刊 2): 193-197.
 [9] 徐金俊, 陈宗平, 薛建阳, 等. 型钢混凝土 T 形柱框架节点恢复力模型研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2018, 26(3): 605-619.
 [10] 武立伟, 陈海彬, 郭雪源, 等. 装配式内置钢管混凝土异形柱 T 形节点滞回性能及恢复力模型研究[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(增刊 2): 117-124.
 [11] 魏春明, 温志坡, 鞠彦忠, 等. 高强钢筋高强混凝土空间梁柱组合体抗震性能试验与恢复力模型研究[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(11): 145-154.
 [12] 中国建筑科学研究院. 金属材料拉伸试验: GB/T 228. 1—2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010: 11-19.
 [13] 中国建筑科学研究院. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 15-20.
 [14] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 286-288.
 [15] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 10-16.

(责任编辑 吴 亮)

271-276.

[17] 闫澍旺, 贾晓黎, 郭怀志, 等. 土性剖面随机场模型的平稳性和各态历经性验证[J]. *岩土工程学报*, 1995, 17(3): 1-9.
 [18] STUEDLEIN A W, KRAMER S L, ARDUINO P, et al. Geotechnical characterization and random field modeling of desiccated clay[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, 138(11): 1301-1313.
 [19] UZIELLI M, VANNUCCHI G, PHOON K K. Random field characterisation of stress-normalised cone penetration testing parameters[J]. *Geotechnique*, 2005, 55(1): 3-20.

(责任编辑 吴 亮)