

李程程,李兆焱,袁晓铭.基于多元自回归样条的液化侧移灾害评估模型[J].地震工程学报,2019,41(5):1355-1360.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1355

LI Chengcheng, LI Zhaoyan, YUAN Xiaoming. An Estimation Model of Liquefaction-induced Lateral Spread Based on a Multivariate Adaptive Regression Spline[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(5): 1355-1360. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1355

# 基于多元自回归样条的液化侧移灾害评估模型

李程程, 李兆焱, 袁晓铭

(中国地震局工程力学研究所 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 为了将液化侧移计算方法本土化,本文基于 Youd 等人收集的液化侧移数据库,采用擅长处理复杂参数维度问题的多元自适应样条回归法(MARS)建立液化侧移计算模型。经验证,该方法建立的模型精度和可靠性都可以通过检验。本文主要内容包括:(1)在本土化过程中,本文选取峰值加速度  $PGA$  作为地震动参数,替代现有模型中的  $M$  和  $R$ ,计算结果并未影响液化侧移计算精度;(2)在 MARS 方法进行建模过程中,对临空和缓坡两种情况的影响因素进行重要性程度计算和筛选;(3)建立两种情况下的液化侧移计算模型,并用  $F$  检验法和  $t$  检验以及新西兰 2010—2011 年系列地震中液化侧移数据进行检验,证明本文方法的合理性和可靠性。本文的结果能满足我国相关规范、工程师以及岩土地震工程防灾减灾等方面的需求,还可为地震液化侧移灾害小区划提供理论基础。

**关键词:** 液化侧移; 多元样条自回归模型; 影响参数; 可靠性检验

中图分类号: P642.2, TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)05-1355-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1355

## An Estimation Model of Liquefaction-induced Lateral Spread Based on a Multivariate Adaptive Regression Spline

LI Chengcheng, LI Zhaoyan, YUAN Xiaoming

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Agency, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

**Abstract:** To build a liquefaction-induced lateral spread estimation model, the multivariate adaptive regression spline (MARS) method, which can better deal with multidimensional parameters, is used in this paper. Through verification, we found the accuracy and reliability of the model bears examination. In this paper, (1) in the process of localization,  $PGA$  was selected as the seismic parameter to replace  $M$  and  $R$  in present models, and the calculation accuracy was not affected; (2) in modeling with MARS method, the impacts of various parameters were studied, and the main influencing factors under the two conditions of free face and mild slope were screened; (3) two estimation models were built under the two conditions, then tested by the  $F$  and  $t$  testing method using the liquefaction-induced lateral spread data from Christchurch earthquakes during 2010-2011. The rationality and reliability of the method were

收稿日期: 2018-08-12

基金项目: 中央级公益性研究所基本科研业务费专项(2018A01); 省自然科学基金联合引导项目(LH2019E100); 政府间国际科技合作重点专项(2016YFE0105500)资助

第一作者简介: 李程程(1987—), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事岩土地震工程防灾减灾研究。E-mail: lichengcheng113@126.com。

通信作者: 李兆焱(1982—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事岩土地震工程、土动力学研究。E-mail: hkjlizhaoyan@163.com。

proved. Results of this paper can satisfy the demands of disaster prevention and reduction engineering of geotechnical earthquake engineering, and can also provide a theoretical basis for the disaster zoning of liquefaction-induced lateral spread.

**Keywords:** liquefaction-induced lateral spread; multivariate adaptive regression model; influence parameters; reliability test

## 0 引言

液化是一种典型的地震灾害现象,以往震害经验表明,液化会导致工程结构、基础设施的巨大破坏。液化引起的震害通常包括土体侧移、震陷、管涌以及砂沸等,其中最常见的是液化引起的侧移。侧移是由液化引起一种破坏力很强的地面失效形式,其造成的破坏往往比其他类型的地面失效要更为严重。

液化侧移分析方法分为以下3大类:(1)数值模拟方法;(2)模型试验方法;(3)基于震害数据的经验方法。有关液化侧移分析和预测的经验方法在我国研究尚少,目前主要是一些国外的成果,如最初由 Hamada 等<sup>[1]</sup>提出的侧移与液化层厚度以及地面坡度或液化层底面坡度的简约经验公式,Youd 和 Perkins<sup>[2]</sup>也给出了 LSI 液化严重性指数法,将侧移与震级和震中距联系起来。后来 Youd 等<sup>[3]</sup>收集与侧移相关的数据组建数据库,并用多元线性回归法(MLR, Multiple Linear Regression)对侧移进行了多元线性回归,且进行了数据的增补和公式的修正<sup>[4]</sup>。Mohammad 等<sup>[5]</sup>对侧移运用渐进的多项式回归法(EPR)进行了回归。其中应用最广泛的是 Youd 等<sup>[2-3]</sup>提出的 MLR 方法,该方法主要分为以下两种情况:

(1) 临空情况,代表河岸、水渠、挡土墙等在地震中由于液化使整个土体向河或海中侧移,计算公式为:

$$\lg D_h = -16.713 + 1.532M - 1.406 \lg R^* - 0.012R + 0.592 \lg W_{ff} + 0.540 \lg T_{15} + 3.413 \lg(100 - F_{15}) - 0.795(D_{50_{15}} + 0.1 \text{ mm}) \quad (1a)$$

(2) 缓坡情况,即倾斜场地由于液化使液化土层及上覆土层整体滑移,公式为:

$$\lg D_h = -16.213 + 1.532M - 1.406 \lg R^* - 0.012R + 0.338 \lg S + 0.540 \lg T_{15} + 3.413 \lg(100 - F_{15}) - 0.795(D_{50_{15}} + 0.1 \text{ mm}) \quad (1b)$$

式中: $D_h$ 为水平方向地面位移(m); $M$ 为震级; $R$ 为距震中距离(km); $R^*$ 是修正的震源距离(km),

$R^* = R_0 + R, R_0 = 10^{(0.89M - 5.64)}$ ;  $W_{ff}$ 是岸高  $H_{ff}$  与变形发生处至堤岸的距离  $L_{ff}$  的百分比(%);  $S$  为缓坡坡度(%);  $T_{15}$  为标贯击数小于 15 的可侧移层的累积厚度(m);  $F_{15}$  为该可侧移层的平均细粒土含量(%);  $D_{50_{15}}$  为该可侧移层的平均粒径(mm)。

虽然该方法数学模型简便,输入变量概念明确,但模型中用一个公式描述跨度非常大的液化侧移范围,难以兼顾各个等级下液化侧移的计算精度。且最主要的是国外的液化侧移计算方法中,地震动因素采用震级和震中距表示,而我国地震动强度采用加速度表示,因而我们需要对液化侧移计算方法进行本土化方能满足我国相关规范、工程师以及岩土工程防震减灾等方面的需求,还可为地震液化侧移灾害小区划提供理论基础。本文基于 Youd 等收集的液化侧移数据库,采用精度更高的多元自适应样条回归法(MARS, Multivariate Adaptive Regression Spline)计算液化侧移。

## 1 多元自适应样条回归(MARS)模型

多元自适应样条回归(MARS)是1991年首次由统计学家 Jerry Friedman<sup>[6-7]</sup>提出的一种非线性、非参数的回归方法。MARS 模型最初是受递归分割算法中的分类回归树和广义加性模型思想启发建立的,具有连续导数,是一种连续性模型。该模型善于寻找最优的变量交互性和变形变量,因此可以处理隐藏高位数据的复杂数据结构,并且高效地揭示重要的数据形式和数据关系。因此非常适用于本文液化侧移多维参数的回归模型建立。

MARS 方法是一种局部回归方法,通过样条函数(又称为基函数 Basis functions,简称 BF)来模拟复杂非线性关系。它将整个非线性模型划分为若干区域,在每个特定区域内由一段线性回归直线来拟合。样条函数的斜率在每个特定区域内是不变的,而在不同区域之间是不同的,如图 1 所示。

MARS 模型定义如式(2)所示:

$$\hat{y} = \hat{f}_M(x) = a_0 + \sum_{m=1}^M a_m S_m(x) = a_0 + \sum_{m=1}^M a_m \prod_{k=1}^{k_m} [S_{km}(x_{v(k,m)} - t_{km})]_+ \quad (2)$$

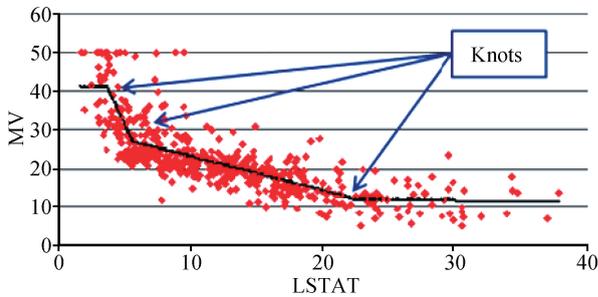


图 1 MARS 模型基函数原理示意图

Fig.1 Schematic diagram for basis function principle of MARS model

其中:  $\hat{y}$  是依赖变量的预测值,  $a_0$  是参数,  $a_m$  是第  $m$  个样条函数的系数,  $S_m(x)$  是第  $m$  个样条函数,  $M$  是模型中含有的样条函数的数目。区域之间的线性回归线的交点称为结点,  $k_m$  是结点数。  $S_{km}$  的值取为 1 或 -1, 表示右侧或左侧的样条函数,  $v(k, m)$  是独立变量的标识,  $t_{km}$  表示结点的位置。每个基函数代表依赖变量的给定的区域。MARS 的基函数或者是单一的样条函数, 或者是两个(或多个)样条函数的交互结果。式(3a)和式(3b)的样条函数分别介绍如下:

$$[S_{km}(x_{v(k,m)} - t)]_+ = \begin{cases} [(x - t_{km})_+] & \text{当 } x > t_{km} \text{ 时} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3a)$$

$$[S_{km}(x_{v(k,m)} - t)]_+ = \begin{cases} [(t_{km} - x)_+] & \text{当 } t_{km} > x \text{ 时} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3b)$$

其中:  $t$  是结点的位置,  $(x - t_{km})_+$  和  $(t_{km} - x)_+$  是描述给定  $t$  时右侧和左侧区域的样条函数。“+”代表对于负值取 0。

当模型建立后, 就可以估计解释变量对于模型的重要性。由于每个解释变量可以加入到不同的基函数中, 因此变量的重要性可以通过它对模型的拟合程度来评价。对变量重要性的评级利用了广义交互验证(GCV)标准进行计算。每次, 它去掉一个变量, 保留其他变量, 然后计算这个去掉的变量对于模型拟合程度的减少量。造成模型拟合度的减少最大的那个变量被赋予最重要的权重。MARS 对最重要的变量赋予 100% 的权重, 对其他变量则根据它对模型拟合度的贡献度赋予相应的权重, 对模型不重要的变量赋予 0% 的权重, 且这些变量将不列为 MARS 模型的考虑之列<sup>[5,9]</sup>。

MARS 模型具有以下优点<sup>[6-7]</sup>:

(1) 无需较强的模型假设。与多元判别分析和 Logistic 回归不同, MARS 不需要较强的模型假设

就可以处理复杂的非线性变量关系。

(2) 数据驱使的建模过程。与传统的用户驱使的建模方法不同, MARS 是数据驱使的建模过程。它在设定依赖变量和一系列的候选独立变量后, 通过搜索算法自动地让数据确定函数的形式。有时, 过度的数据驱使并不适合, 所以也会需要一些先验知识确定最优模型。

(3) 可以确定变量的贡献度。与神经网络不同, 当我们考虑很多潜在的独立变量时, MARS 可以确定独立变量对依赖变量影响结果的重要性, 从而筛选出有价值的独立变量。

(4) 运算快捷。与神经网络不同, MARS 不需要长时间的训练样本过程, 因此可以节约大量的建模时间。

(5) 较好的模型解释能力。这是 MARS 相比其他分类方法具有较大优势的原因。MARS 对于模型的分类结果有较好的解释能力, 它不仅指出哪个变量对于分类结果是重要的, 而且当建模规则令人满意时, 还可以预测观察对象的具体分类。这更有助于我们根据模型结果做出合理的决策。

## 2 基于 MARS 的液化侧移计算模型

### 2.1 采用的数据库

该方法采用的数据库为 Bartlett 和 Youd 等<sup>[3]</sup>建立的有关液化侧移及其影响因素的历史数据库, 总共有 484 个历史数据点, 主要来自于美国西部和日本等国家的多次地震数据记录, 其中对于缓坡情况 ( $0 < S \leq 2.5\%$ , 即倾斜场地由于液化使液化土层及上覆土层沿坡面整体滑移) 有 255 条记录, 对于临空面情况 ( $1.5\% < W_{ff} \leq 25\%$ , 河岸, 水渠, 挡土墙等在地震中由于液化使整个土体向河或海中侧移) 有 281 条记录(缓坡和临空面有一部分交叉, 在 Youd 等人的回归公式中, 两种情况都对交叉的部分进行计算, 取较大值)。收集的影响侧移的因素主要包括地震动、地形地貌、地质以及土体特性等因素, 其所包含的参数及其范围如表 1 所列。

本文将在此数据库基础上, 采用多元自适应样条回归模型, 对影响因素进行筛选, 采用适合我国本土的液化侧移影响参数, 建立自由面和缓坡两种情况下的液化侧移计算模型。

### 2.2 建立模型

利用 Youd 等建立的数据库, 采用 Salford-Systems 出版的包括 MARS 算法的 SPM 软件, 为了将

液化侧移计算模型在我国本土化,选取地震动参数中的峰值加速度  $PGA$ ,而未使用国外的  $M$  和  $R$  参数。原因是对于一个需要进行液化侧移预测的场地,一般无法给出未来地震的震级和震中距。同时,目前的地震危险性分析水平已经有大幅提高,就中国大陆情况而言,经过大量研究,新一代地震动区划图已经给出我国各地区的地震动参数,而且很多重要地区已经完成了地震动小区划,采用  $PGA$  可以直接应用这些成果,同现有的基础工作进行很好的衔接。其余的影响参数,与 MLR 方法一致,地形地貌因素为  $S$  或  $W_{ff}$ 、土体特性因素为  $F_{15}$  以及  $D_{50_{15}}$  和地质因素  $T_{15}$  为预测变量,以液化侧移大小为目标变量,得出各参数对液化侧移的贡献度,建立临空和缓坡两种情况下的液化侧移回归模型。

表 1 Youd 等(2002)数据库中影响侧移的各因素所包含的参数及其范围

Table 1 Parameters and their range for affect factors of liquefaction-induced lateral spread in the database built by Youd, et al

影响侧移的因素	范围	
地震动因素	矩震级 $M_w$	6.4~9.2
	震中距 $R/km$	0.2~100
	峰值加速度 $PGA(g)$	0.11~0.55
地形地貌因素	缓坡坡度 $S/\%$	0.05~2.5
	临空面坡度 $W_{ff}/\%$	1.5~56.8
地质因素	可侧移层的累积厚度 $T_{15}/m$	0.01~19.7
土体特征因素	细粒土含量 $F_{15}/\%$	0~50
	平均粒径 $D_{50_{15}}/\%$	0.036~1.98

对于临空情况,通过软件进行运算,我们可得知,液化侧移的五个影响因素的重要性程度分别为,坡度  $W_{ff}$  为 100,可侧移层厚度  $T_{15}$  为 70.22,细粒土含量为 50.43,峰值加速度  $PGA$  为 48.73,平均粒径  $D_{50_{15}}$  为 22.11,模型的拟合优度  $R^2$  为 0.758,平均粒径的重要性程度最低,当我们去掉该参数后,剩余四个参数对液化侧移模型的拟合优度  $R^2$  为 0.746。如果去掉  $D_{50_{15}}$  这一参数,且不是很影响拟合优度,便可为液化侧移评估工作带来很大便利,因为这一参数仅通过地质资料无法获取,需要通过实验室试验获得。因此对于临空情况,本文将只选取  $W_{ff}$ 、 $T_{15}$ 、 $F_{15}$  以及  $PGA$  这四个参数进行液化侧移模型拟合。这也与作者先前的研究结果相一致<sup>[8]</sup>。

由 SPM 软件计算结果可得临空情况以及缓坡情况下的液化侧移计算公式,以及基函数分配结果。导出的结果如下所述。

临空情况模型如式(4)所示,得到的基函数如表 2 所列。

$$D_h = -13.2211 - 10.1166BF_1 - 0.187085BF_2 - 0.371299BF_3 - 63.4549BF_4 + 109.727BF_5 + 0.157982BF_6 + 0.0499777BF_7 + 4.16998BF_8 + 93.9215BF_9 - 32.19BF_{10} \quad (4)$$

表 2 临空情况下 MARS 模型的基函数

Table 2 Basis function for MARS model under free face condition

编号	基函数
$BF_1$	$\max(0, T_{15} - 15.60)$
$BF_2$	$\max(0, 15.60 - T_{15})$
$BF_3$	$\max(0, 12.01 - W_{ff})$
$BF_4$	$\max(0, PGA - 0.35)$
$BF_5$	$\max(0, 0.35 - PGA)$
$BF_6$	$\max(0, F_{15} - 46.99)$
$BF_7$	$\max(0, 46.99 - F_{15})$
$BF_8$	$\max(0, T_{15} - 15)$
$BF_9$	$\max(0, PGA - 0.21)$
$BF_{10}$	$\max(0, PGA - 0.51)$

对于缓坡情况,液化侧移的五个影响因素的重要性程度分别为,可侧移层厚度  $T_{15}$  为 100,细粒土含量为 65.93,坡度  $S$  为 40.44,峰值加速度  $PGA$  为 32.15,平均粒径  $D_{50_{15}}$  为 0,模型的拟合优度  $R^2$  为 0.719。因此对于缓坡情况,本文将选取  $T_{15}$ 、 $F_{15}$ 、 $S$  以及  $PGA$  这四个参数进行液化侧移模型拟合。

缓坡情况模型如式(5)所示,得到的基函数如表 3 所列。

$$D_h = 3.5397 - 0.2450BF_1 + 0.1225BF_2 + 0.3075BF_3 - 1.0042BF_4 + 0.6241BF_5 - 2.3626BF_6 - 0.1003BF_7 - 0.1941BF_8 + 1.7469BF_9 \quad (5)$$

表 3 缓坡情况下 MARS 模型的基函数

Table 3 Basis function for MARS model under mild slope condition

编号	基函数
$BF_1$	$\max(0, T_{15} - 11.30)$
$BF_2$	$\max(0, 11.30 - T_{15})$
$BF_3$	$\max(0, F_{15} - 24.00)$
$BF_4$	$\max(0, S - 0.90)$
$BF_5$	$\max(0, 0.90 - S)$
$BF_6$	$\max(0, T_{15} - 9.10)$
$BF_7$	$\max(0, T_{15} - 11.00)$
$BF_8$	$\max(0, F_{15} - 9.00)$
$BF_8$	$\max(0, T_{15} - 5.60)$
$BF_9$	$\max(0, PGA - 0.14)$

### 3 模型可靠性检验

#### 3.1 $F$ 检验法和 $t$ 检验法

可通过  $F$  检验法(回归方程)和  $t$  检验法(回归系数检验)对所建立的模型进行检验。临空情况和

缓坡情况的检验结果如表 4、表 5 所示。

表 4 临空情况下 MARS 模型检验

Table 4 MARS model test under free face condition

编号	$t$ 统计量	显著水平 $\alpha$
常数	-3.724	0.000 25
$BF_1$	-6.899	0.000 00
$BF_2$	-6.457	0.000 00
$BF_3$	-14.854	0.000 00
$BF_4$	-2.342	0.020 13
$BF_5$	4.845	0.000 00
$BF_6$	3.585	0.000 42
$BF_7$	3.918	0.000 12
$BF_8$	6.321	0.000 00
$BF_9$	3.614	0.000 38
$BF_{10}$	-2.351	0.019 64

表 5 缓坡情况下 MARS 模型检验

Table 5 MARS model test under mild slope condition

编号	$t$ 统计量	显著水平 $\alpha$
常数	7.355	0.000 00
$BF_1$	1.812	0.001 42
$BF_2$	-4.552	0.000 01
$BF_3$	5.015	0.000 00
$BF_4$	2.027	0.027 50
$BF_5$	-4.094	0.000 06
$BF_6$	5.039	0.000 00
$BF_7$	-2.100	0.004 31
$BF_8$	1.307	0.000 00
$BF_9$	3.614	0.000 38
$BF_{10}$	-2.351	0.000 00

$\alpha$  为给定的显著水平,通过  $t$  统计量检验  $H_0$ ,若  $|T| > t_{\frac{\alpha}{2}}(n-2)$ ,则拒绝  $H_0$ ,否则接受  $H_0$ 。

由表 4、表 5 可知,大部分基函数的  $\alpha$  值都低于 0.01,剩余的基函数  $\alpha$  也都  $< 0.03$ ,且都能通过  $t$  检验,说明基函数对液化侧移的影响显著。同时,通过回归方程对  $\alpha$  检验,并且显著水平  $\alpha < 0.01$ ,能够通过  $F$  检验说明整体预测模型对液化侧移也是显著的。

### 3.2 新实测数据检验

2010—2011 年新西兰系列地震中,有明显的液化侧移灾害,造成了巨大的人员伤亡和财产损失。Bowen 等<sup>[9]</sup>收集了 2010 年 9 月 4 日 7.1 级地震震中沿着 Christchurch 的 Aven 河和 Horseshoe 湖的侧移,以及标准贯入试验(SPT)、静力触探试验(CPT)的等数据。经过分析,筛选出数据齐全,适用于计算侧移的钻孔资料。由于进行侧移勘察的区域,SPT 数据非常有限,但 CPT 数据比较丰富。细粒土含量  $F_{15}$  需要 CPT 数据中的  $I_c$  值进行经验关系转换,最终得到 27 条自由面数据,18 条缓坡情况的数据。本文采用这些数据对由多元样条回归法得

到的液化侧移计算模型进行检验。将临空情况和缓坡情况采用本文 MARS 模型的计算结果与实测数据和 MLR 法进行对比,结果如图 2、图 3 所示。

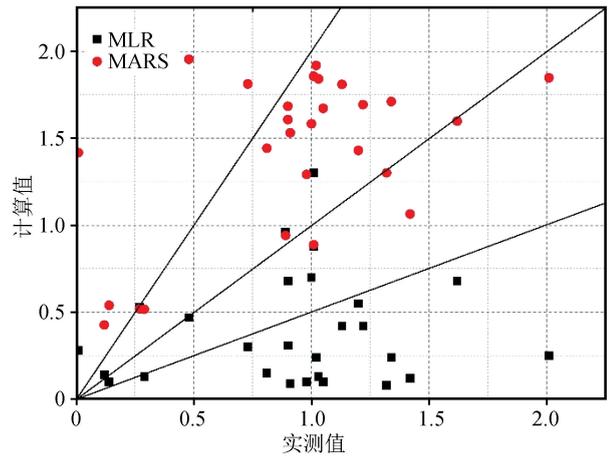


图 2 临空情况 MARS 法和 MLR 法与实测侧移的对比

Fig.2 Field measurements versus the results of MARS and MLR under free face condition

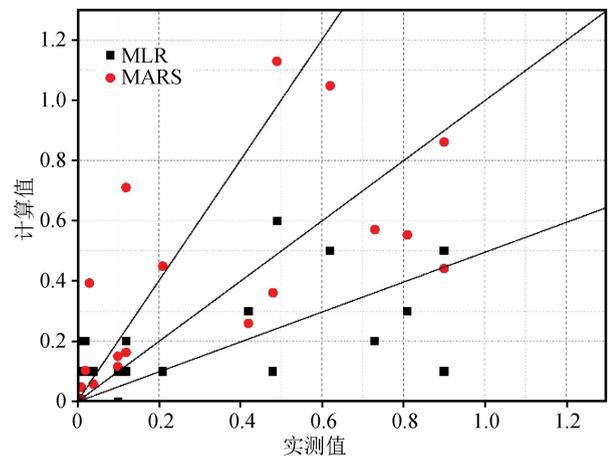


图 3 缓坡情况 MARS 法和 MLR 法与实测侧移的对比

Fig.3 Field measurements versus the results of MARS and MLR under mild slope condition

考虑到实测液化侧移数据的误差问题以及由钻孔数据转换成可用参数过程中出现的偏差,本文重点将计算结果与 MLR 方法的计算结果进行对比,结果处于 0.5~2 倍实测位移之间以及偏保守一些为宜。由图 2 可知,MARS 法计算的临空情况下的侧移结果大多处于 0.5~2 倍实测位移之间,且稍偏大,偏保守一些但未过于保守,这种结果对灾害预防有利。而 MLR 法的计算结果估计过低,大部分数据点都处于 2 倍实测位移之外。由图 3 可知,通过

MARS法计算的缓坡情况下液化侧移结果也大多处于0.5~2倍实测位移之间,偏差较小,精度与MLR法相近甚至优于MLR法。以上几点都表明本文提出基于MARS的液化侧移计算方法是合理可靠的,可用于液化侧移预测等工作。

缓坡情况下发生的侧移大多数比较小,而建模基于的数据库中,侧移<1.5 m的数据缺失比较严重,导致各种算法在此情况下精度不高,并且本文中检测数据较少,可能规律不太明显,所以本文的MARS算法以及MLR算法结果都比较离散。鉴于此,今后须多注意收集较小的液化侧移数据,以弥补该方面的不足。

#### 4 结论

本文基于Youd等人收集的液化侧移数据库,采用精度更高的多元自适应样条回归法(MARS, Multivariate Adaptive Regression Spline)对液化侧移计算方法进行本土化,能满足我国相关规范、工程师以及岩土地震工程防灾减灾等方面的需求,还可对地震液化侧移灾害小区划提供理论基础。主要结论如下所述:

(1) 在本土化过程中,本文地震动参数选取峰值加速度 $PGA$ 替代国外的 $M$ 和 $R$ 参数,计算结果并未影响液化侧移计算精度。说明这种本土化方法是可行的。

(2) 通过MARS方法进行建模过程中,对于临空情况和缓坡情况,平均粒径 $D_{50.15}$ 贡献度最小,分别为22.11和0,经分析略去该影响因素并不影响拟合优度,因此两种情况下的模型都未使用该参数。

(3) 对于临空情况,参数的重要性程度分别为,坡度 $W_{ff}$ 为100,可侧移层厚度 $T_{15}$ 为70.22,细粒土含量为50.43,峰值加速度 $PGA$ 为48.73;对于缓坡情况,可侧移层厚度 $T_{15}$ 为100,细粒土含量为65.93,坡度 $S$ 为40.44,峰值加速度 $PGA$ 为32.15。

(4) 临空情况的拟合优度 $R^2$ 为0.746,缓坡情况的拟合优度 $R^2$ 为0.719。模型通过 $F$ 检验法(回归方程)和 $t$ 检验法的检验,且通过新西兰2010—2011年系列地震中液化侧移数据的检验,本文提出的基于多元样条回归模型的液化侧移计算方法不论是临空情况还是缓坡情况,模型计算结果大多处于

0.5~2倍实测位移之间,结果合理可靠,证明了本文方法的合理性和可靠性。

致谢:非常感谢美国工程院院士、杨百翰大学T. Leslie Youd教授提供宝贵的液化侧移数据库资料。

#### 参考文献(References)

- [1] HAMADA M, KUBO K, ISOYAMA R. Earthquake Damage Caused by Liquefaction Induced Permanent Ground Displacement[M]//Developments in Geotechnical Engineering.[s.n.]: Elsevier,1987:3-19.
- [2] YOUD T L, PERKINS D M. Mapping of Liquefaction Severity Index[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 113(11): 1374-1392.
- [3] Bartlett S F, Youd T L. Empirical Analysis of Horizontal Ground Displacement Generated by Liquefaction-induced Lateral Spread[R]. National Center for Earthquake Engineering Research Technical Report NCEER-92-0021, 1992, 114.
- [4] YOUD T L, HANSEN C M, BARTLETT S F. Revised Multilinear Regression Equations for Prediction of Lateral Spread Displacement[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(12): 1007-1017.
- [5] REZANIA M, FARAMARZI A, JAVADI A A. An Evolutionary Based Approach for Assessment of Earthquake-induced Soil Liquefaction and Lateral Displacement[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2011, 24(1): 142-153.
- [6] 杜元园. 基于多元自适应回归样条的民营企业信用评级研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.  
DU Yuanyuan. The Research of Private Enterprises Credit Scoring Based on Multivariate Adaptive Regression Splines[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [7] 王盛慧, 张亭亭. 基于多元自适应回归样条的室内温度影响因素分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(26): 200-206.  
WANG Shenghui, ZHANG Tingting. Analysis of Influence Factors of Electric Geothermal Indoor Temperature Based on Multivariate Adaptive Regression Spline[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(26): 200-206.
- [8] 李程程, 曹振中, 李瑞山. 场地液化侧移等级判别标准及其可靠性分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(9): 1668-1677.  
LI Chengcheng, CAO Zhenzhong, LI Ruishan. Assessment Criterion for Level of Liquefaction-induced Lateral Spread and Its Reliability Analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(9): 1668-1677.
- [9] CUBRINOVSKI M, ROBINSON K. Lateral Spreading: Evidence and Interpretation from the 2010-2011 Christchurch Earthquakes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 91: 187-201.