

DOI: 10.11779/CJGE201609014

场地液化侧移等级判别标准及其可靠性分析

李程程, 曹振中*, 李瑞山

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

摘要: 基于 Youd 等建立的液化侧移数据库, 研究提出一种新的场地液化侧移等级预测方法和判别标准。研究了数据库中各参量对液化侧移的影响程度并从中筛选出主要影响参数, 构建了液化侧移灾害等级分类决策树, 提出了一套液化侧移等级判别标准 LLSL (liquefaction lateral spread level)。通过实际震害中各参数对液化侧移影响趋势分析、分类决策树中各参数耦合性研究以及与 MLR 法的对比, 验证了方法和标准的合理性和可靠性。研究结果表明: 对液化侧移的主要影响参数包括峰值加速度、临空(缓坡)坡度、液化层厚度和细粒土含量, 液化层平均粒径影响可以略去; 临空情况下, 参数影响排序和权重为临空坡度(0.343)、液化层细粒土含量(0.322)、液化层厚度(0.176)和峰值加速度(0.159), 缓坡情况下, 排序为液化层细粒土含量(0.324)、液化层厚度(0.277)、缓坡坡度(0.214)和峰值加速度(0.185); 比较 MLR 法中各参数相互独立假设, LLSL 考虑了各参数对液化侧移影响的耦合性, 使整体回判成功率提高了 6%, 且对各液化侧移等级回判成功率表现较为均衡, 克服了 MLR 法在轻微等级判别中成功率较低的弱点; 提出的 LLSL 标准, 可减少对钻孔的依赖, 比 MLR 法更适于液化区划工作, 且与中国现有灾害评估基础工作有很好衔接。文中所提出的方法和标准, 可为场地液化侧移等级预测和液化区划技术中液化侧移等级判别提供技术支持。

关键词: 液化侧移; LLSL 标准; MLR; 可靠性分析

中图分类号: TU43; P642.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)09-1668-10

作者简介: 李程程(1987-), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事岩土地震工程研究。E-mail: lichengcheng113@126.com。

Assessment criterion for level of liquefaction-induced lateral spread and its reliability analysis

LI Cheng-cheng, CAO Zhen-zhong, LI Rui-shan

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

Abstract: An assessment criterion for the level of field liquefaction-induced lateral spread is created based on the liquefaction-induced lateral spread database built by Youd et al. The impact of various parameters on the level of lateral spread is studied, and the main factors are determined. A classification tree is constructed for the estimation of liquefaction-induced lateral spreads severity level (LLSL). The rationality and reliability of the criterion are verified through the analysis of changing trend and decoupling of influence factors for lateral spreads and compared with those of MLR based on the damage of actual earthquakes. The research results show that (1) The main influence factors including PGA, W_{ff} or S , T_{15} and F_{15} , and the average mean grain size $D_{50_{15}}$ can be removed. The sort and impact weights of these influence factors for free face condition are W_{ff} (0.334), F_{15} (0.322), T_{15} (0.176) and PGA (0.159); for gently sloping ground conditions, the results are F_{15} (0.324), T_{15} (0.277), S (0.214) and PGA (0.185); (2) The verification results of the proposed method are 6% higher than those of MLR, because the decoupling is considered in CART, but the influence factors are assumed to be independent in MLR. The distribution of discriminant results is relatively homogeneous, and the low success problem of MLR for the low level hazard is overcome; (3) The new method has less dependency on borehole data than MLR and more applicable to the liquefaction zoning map, which is well-matched to the current damage assessments; (4) The proposed method and criterion may provide technical support for hierarchical prediction and division map of liquefaction-induced lateral spread.

Key words: liquefaction-induced lateral spread; LLSL criterion; MLR; reliability analysis

0 引言

侧移是由液化引起一种破坏力很强的地面失效形式, 液化侧移造成的破坏往往比其他类型的地面失效要严重。通常情况下, 液化侧移表现形式主要有两种:

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAK17B01); 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2016A02)

收稿日期: 2015-07-20

*通讯作者(E-mail: iemczz@163.com)

其一是可液化土体在地震作用下产生侧向的液化大变形, 表现出地表土体开裂等; 其二是完整的地表土体在重力或地震作用下将沿液化层中的剪切带发生滑动, 或是沿着坡降或向着自由面(河流, 渠道, 或陡峭的地形块垒)发生位移。液化侧移一旦发生, 将会对所处区域的工程结构产生巨大破坏^[1-3]。

研究侧移的方法可以分为以下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。Newmark于20世纪60年代提出的以屈服加速度概念为基础的滑动体位移计算方法是最早用于计算坡体位移的方法, 后来有很多学者在此基础上对其进行了改进。随着计算机的发展和有限元方法的成熟, 通过数值模拟的方法来探究模拟侧移问题是一种行之有效的手段。关于液化侧移的数值模拟方法, 已经有一些研究成果。Elgama等^[4]建立了一个多屈服面的塑性本构模型来描述液化土的特性, 同时用土体—液体耦合有限元程序来计算位移。蔡晓光^[5]基于对近岸水平场地侧向大变形机制的认识, 应用软化模量法, 采用动力有限元分析和静力有限元分析相结合分析出液化的发展与分布对近岸水平场地侧向大变形的作用。除了计算机仿真, 在实验室内通过开展模型试验也可以认识液化侧移的影响因素和规律^[6-7]。Hamda等^[8]利用振动台实验研究了小坡度倾斜场地液化侧移机制, 且通过一维数值计算和二维有限元和边界元方法对该问题进行了模拟。Yasuda等^[9]考虑了可能影响液化场地水平侧移的各因素, 并在此基础上开展了一系列的振动台试验。在液化大变形的本构关系上, 刘汉龙等^[10]基于试验结果提出了一个描述砂土液化后应力应变关系的双曲线模型。张建民^[11]发展了一个有物理基础的、适用于描述液化后不排水单调加载条件下砂土应力应变关系的弹塑性循环本构模型。针对一个具体对象或一个重大工程, 数值模拟方法和模型试验方法在分析其液化侧移发展过程方面有着明显优势, 但由于数值模拟和模型试验的复杂性, 很难在抗震规范中实现, 特别是在液化震害预测技术方面, 难以使用数值模拟和模型试验方法进行较大区域的研究, 这时采用实际震害资料的经验方法就体现出了较大优越性。

有关液化侧移分析和预测的经验方法在中国研究尚少, 目前主要是一些国外的成果, 其中应用最广泛的是Youd等提出的多元线性回归法(MLR, multiple linear regression)^[12-14]。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, 同时采用了各变量相互独立的假定, 难以反映出地震动、地形和土层特性之间的相互作用和关联性。另外, 近来随着计算机技术的应用, Wang等^[15]、Chiru-Danzer等^[16]运用ANN神经网络模型对

Youd的侧移数据库进行了分析, 能够捕捉和表现出众因素之间的相互作用的非线性, 不需要假设各因素之间的关系形式, 但它的局限性是其可解释性差、计算强度大、收敛速度快和过模拟问题等。García等^[17]建立了液化侧移的模糊神经模型NEFLAS (NEuro-Fuzzy estimation of liquefaction induced lateral spread), 该方法精确度较高, 却是以舍弃一百多条其认为冗余或矛盾的历史记录为代价。Goh等^[18]运用多元自适应回归(MARS, multivariate adaptive regression splines)模型对MLR方法进行了改进。它是一种非线性、非参数的回归方法, 模型处理速度好并且可以估计输入变量的重要性。但该方法的缺陷是逻辑表达不清晰, 且仍需要对数据进行预处理。以上这些方法都无法提供公式或分类树, 无法进行参数分析, 可解释性差, 工程难以直接应用。

液化区划技术已经是国际上目前很重要的研究课题, 美国和日本等多个国家已经编制了基于GIS的各种形式液化区划图^[19], 而中国这方面明显落后。场地区划技术和场地震害预测技术有相通之处, 即一般使用经验方法, 但对场地区划技术本身另外还有一些特殊要求。场地破坏区划技术中, 不是追求单个点评价结果的精度, 而是正确合理地给出整个区域的评价结果, 原则上应直接从一个面(地质单元)出发, 使用有限的最佳控制钻孔(包括虚拟钻孔)控制土层分布和与其相关的参数, 如每个土层的液化层厚度和细粒土含量, 结合已有的地震动区划和提取的地形地貌分布区划图, 就能给出区域的场地破坏整体评价。美国液化侧移区划技术中, 首先采用MLR法计算每个钻孔点液化侧移大小, 然后统计每个地质单元中各个钻孔点液化侧移大小, 通过累计给出地质单元侧移等级, 这是一种从由点要素(高密度土工钻孔数据)到面要素(地质单元)的工作方式, 结果好坏主要依赖于钻孔数量, 当某一地质单元没有高密度钻孔数据时, 就无法给出区域液化侧移等级科学合理的评估结果, 甚至给出错误的评估结果。

鉴于以上问题和客观需求, 本文研究一种新的场地液化侧移等级预测方法和判别标准。根据Youd等人建立的的最新液化侧移数据库的全部数据, 采用回归决策树(CART, classification and regression tree), 研究数据库中各参量对液化侧移的影响程度并从中筛选主要影响参数, 构建液化侧移灾害等级分类决策树, 提出一套液化侧移等级判别标准。通过实际震害中各参数对液化侧移影响趋势分析, 分类决策树中各参数耦合性研究以及与MLR法的对比, 论证所提出标准的合理性和可靠性, 目标是为场地液化侧移等级预测和液化区划技术中液化侧移等级判别提供技术支持。

1 数据库和 MLR 法简介

1.1 数据库

Youd 等^[7-9]建立了有关液化侧移震害的数据库，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，如表 1 所示，该数据库是经过多次筛选的结果。其中新泻地震中的侧移数据原有 377 个，将某一特有因素影响突出情况去掉后，剩下的 299 个数据具有普遍意义，临空、缓坡等情况下的侧移等级由低到高都囊括在内，这样就不存在某一特有因素影响突出的情况。该数据库中对于缓坡情况 ($0 < S \leq 2.5\%$ ，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 (缓坡和临空有一部分交叉，在 Youd 等的回归公式中，两种情况都对交叉的部分进行计算，取较大值)。该数据库中影响液化侧移的因素主要包括①地震动因素：矩震级 M_w ，震中距 R (km)，峰值加速度 PGA (g)，其中 PGA 是 Youd 等根据美国和日本各个地区现有的地震动衰减关系得到的各个场地的峰值加速度；②地形地貌因素：临空坡度 W_{ff} (%) 和缓坡坡度 S (%)；③地质因素：可侧移层的累积厚度 T_{15} (m)；④体特性因素：细粒土含量 F_{15} (%) 和平均粒径 $D_{50_{15}}$ (mm)。其中 W_{ff} 是临空面岸高 H_{ff} 与变形发生处至堤岸的距离 L_{ff} 的百分比； S 是缓坡的坡度，如图 1 所示。侧移及其部分影响参数的数据分布频度

图如图 2 所示。

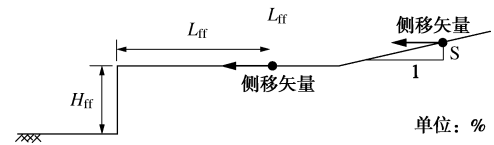


图 1 W_{ff} 和 S 的几何定义

Fig. 1 Geometrical definitions in free face and gently sloping ground conditions

表 1 Youd 等数据库资料来源

Table 1 Sources of database built by Youd et al

地区	地震事件	时间	震级	采集个数
美国	San Francisco	1906 年	7.9	2
	Alaska	1964 年	9.2	7
	San Fernando	1971 年	6.4	23
	Imperial Valley	1979 年	6.5	31
	Nihonkai-Chubu	1983 年	7.7	72
	Borah Peak Idaho	1983 年	6.9	4
	Superstition Hills	1987 年	6.6	6
日本	Loma Prieta	1989 年	6.8~7.0	7
	Niigata	1964 年	7.5	299
	Japan cases by Ambraseys	1988 年	6.4~7.8	19
	Hyogo-Ken Nanbu	1995 年	6.8	14
合计				484

1.2 MLR 法

MLR 法由 Bartlett 等提出^[12]，Youd 等又对此进行了数据的增补和公式的修正^[13-14]，最终采用的是如上所述的数据库，提出了两种情形下的侧移经验公式。

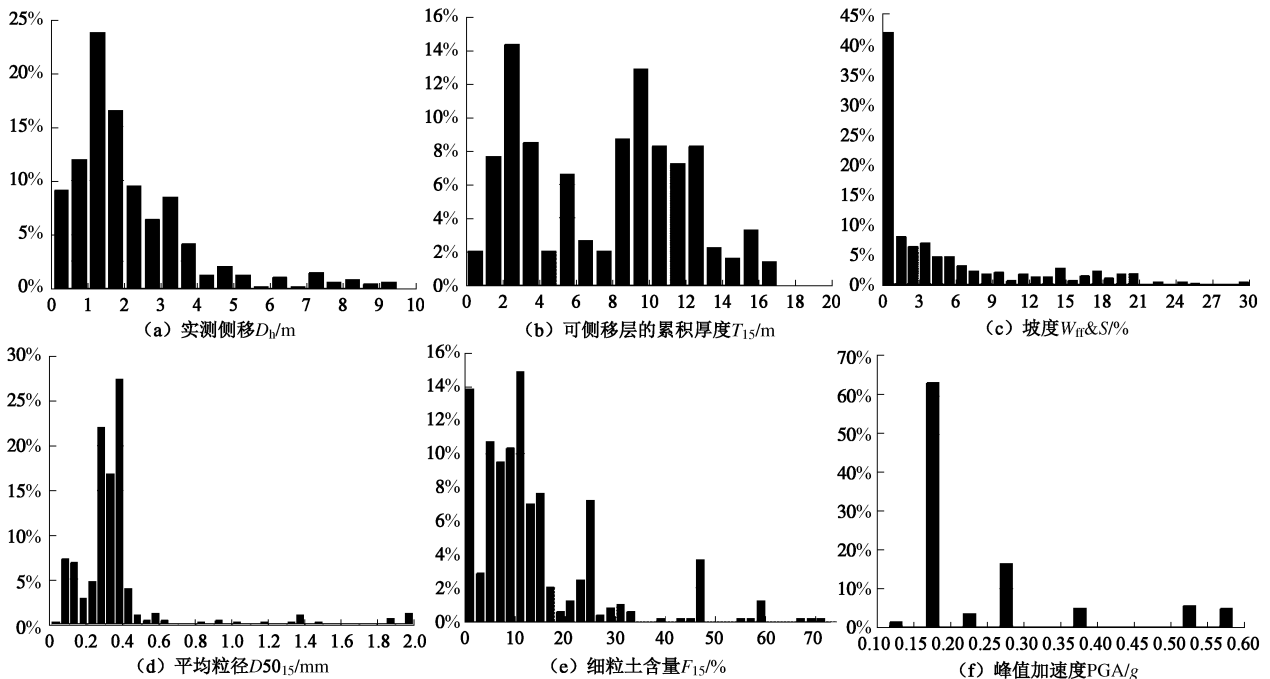


图 2 Youd 等(2002)数据库中影响侧移的各因素的频度分布

Fig. 2 Frequency distribution for each lateral spread influence factor in database built by Youd et al.

(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

$$\lg D_h = -16.713 + 1.532M - 1.406 \lg R^* - 0.012R + 0.592 \lg W + 0.540 \lg T_{15} + 3.413 \lg(100 - F_{15}) - 0.795(D50_{15} + 0.1 \text{ mm}) \quad (1)$$

(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, 计算公式为

$$\lg D_h = -16.213 + 1.532M - 1.406 \lg R^* - 0.012R + 0.338 \lg S + 0.540 \lg T_{15} + 3.413 \lg(100 - F_{15}) - 0.795(D50_{15} + 0.1 \text{ mm}) \quad (2)$$

式中 D_h 为水平方向地面位移; 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 (%); $D50_{15}$ 为该可侧移层的平均粒径 (mm)。

MLR 法优点是公式简单, 工程应用十分方便。但是, 其中采用了各变量相互独立假定, 无法体现和发现各变量对液化侧移的敏感程度, 而且在一些情况下精度不高, 特别是在侧移小于 1.5 m 时。另外, MLR 法公式中地震动参数采用的是震级和震中距, 在应用上受到很大限制, 为此 Youd 等借鉴 Idriss 等^[20]的方法给出了数据库中缺失的水平峰值加速度值, 但并没有对其计算公式进行修改。

在美国液化侧移区划技术中, 规定 4 个液化侧移灾害等级, 采用 MLR 法进行液化侧移计算^[18]。计算中, 通过统计每个地质单元中 4 种灾害等级钻孔个数, 以累积超越概率 85% 为界限, 即某一或某些等级的个数未超过总体的 15%, 则判定该等级的前一等级为这一地质单元的侧移灾害等级, 以此得出各地质单元的灾害等级并绘制成图。本质上讲, 这是一种从由点到面的工作方式, 严重依赖于钻孔数量, 当缺少高密度钻孔数据时, 难以给出科学合理结果, 甚至会出现错误。

2 CART 方法简介

CART (classification and regression tree) 算法是 1984 年由 Leo Breiman 等^[21]提出的一种数据分类和预测算法, 它可以进行两种类型的决策树的建立, 即分类决策树和回归决策树, 前者适用于处理分类变量, 后者适于处理连续变量, 本文选择分类决策树建立模型。CART 算法包含两个过程, 分枝过程和修剪过程。分枝过程是对数据进行分裂, 创建树的结构, 修剪过程是为了防止过度拟合, 控制树到合适的深度。

在树的分枝过程中, CART 算法最常用的是 GINI 分类准则, 是一种“杂质函数”。CART 算法在对一个结点进行分枝时首先要确定一个最佳的分枝预测变量以及该预测变量的最佳分枝阈值点。然后把性质相同的对象分在同一个结点中, 并且同一个父结点的两个子结点间具有显著的差异性。

对于某个结点 T , GINI 指数表示为

$$\text{gini}(T) = 1 - \sum_{j=1}^J P[j|T] \quad (3)$$

其中, T 是结点, J 是总的分类个数, $P[j|T]$ 是第 j 个分类在子结点 T 处出现的概率。

则在该结点的分裂 GINI 指数为

$$GI(T, X, Q) = \text{gini}(T) - \sum_{k=1}^K \{P[q_k(X)|T] \cdot \text{gini}(T_k)\} \quad (4)$$

其中, X 是分裂归因, Q 是结点 T 的分裂归因处的分枝数据集, K 是结点 T 处所包含的子结点的个数, T_k 是第 k 个子结点, $P[q_k(X)|T]$ 是从 T 结点分裂到第 k 个子结点的概率。

在修剪过程中采用后剪枝的方法, 利用代价复杂度最小 (minimal cost-complexity) 原则, 本文采用 V-fold 交叉验证法, 该方法适合于数据集较小的情况, 对生成的一系列得嵌套的分类树进行测试, 从中选择最优的分类树。代价复杂度最小原则如下:

$$R_\alpha(T) = R(T) + \alpha |\tilde{T}| \quad (5)$$

其中, $R_\alpha(T)$ 是结点 T 处的分类错误率, $|\tilde{T}|$ 是子结点个数, 也可以认为是树的规模, α 是复杂度代价。

利用 CART 算法, 可以研究引起分类现象发生的变量及变量之间的作用。通过建立决策树和决策规则对类型未知的对象的影响液化侧移的各个参数变量进行类别预测, 即通过类型未知的对象的某些相关变量值就可以对其做出类型判定, 且 CART 可以根据实际震害数据, 对各变量根据其对模型拟合度的重要性程度赋予不同的值, 它将重要性程度最大的因素赋值 100, 重要性程度最小的赋值为 0, 这与专家评分法、层次分析法等权重分析方法有本质的不同, 前者更多的是靠经验, 而 CART 是根据实际数据进行重要性程度分析, 更科学合理。

CART 法不需要对数据进行预处理和筛选, 保留了数据的真实性和完整性, 且对输入数据没有任何统计分布的假设要求, 可直接给出侧移等级的重要性程度, 也可得到各影响因素之间耦合性的分析结果, 结构清晰, 可解释性强。

3 液化侧移主要影响参数的筛选

本文采用 PGA 为地震动因素的参变量。原因是

于一个需要进行液化侧移预测的场地或区划的区域, 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中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, 同现有的基础工作有很好的衔接。

对于数据库中的影响因素参变量, 包括 PGA, S 或 W_{ff} , F_{15} , T_{15} 以及 $D50_{15}$, 理论上对液化侧移的贡献应是不同的, 本文首先进行筛选。如果从中提取主要影响参数, 抓住主要矛盾, 既可对问题有更深入的认识, 也可对方法进行精简。为此, 本文利用 Youd 等人建立的数据库, 采用 CART 法给出在临空和缓坡两种情况下各个参数对液化侧移的重要性程度, 如图 3 (a) 和 3 (b) 所示。结果发现, 砂土层的平均粒径 $D50_{15}$ 在两种情况下对液化侧移的重要程度都是最小的, 且图中结果与 Anthony 等^[17]运用多元适应性样条回归法 (MARS) 进行液化侧移预测时得到的结果定性一致。如果所有参数的贡献度之和为 1, 则 $D50_{15}$ 在临空和缓坡时的权重分别为 0.05 和 0.06, 这种影响在岩土工程中可以作为略去处理。

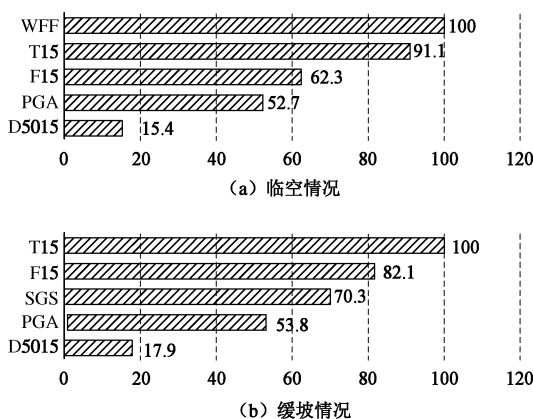


图 3 Youd 公式中 5 个参数对液化侧移的重要性程度

Fig. 3 Relative importance of five input variations for lateral spread under gently sloping terrain

因此, 经过比对和筛选, 本文最终选取 4 个变量参数, 即 PGA 代表地震动因素, S 或 W_{ff} 代表地形地貌因素, T_{15} 代表地质因素, F_{15} 代表土体特性因素。

4 液化侧移等级分类决策树的建立

本文规定侧移大小为 0~0.5 m 时是轻微液化侧移灾害 (low), 0.5~1.0 m 为中等液化侧移灾害 (moderate), 1.0~2.0 m 为严重液化侧移灾害 (high), >2.0 m 为非常严重液化侧移灾害 (very high), 并分别对液化侧移分级赋值为 LEVEL=1, 2, 3, 4 以便于进行等级辨识从而得出分类结果。

利用 Youd 等人建立的数据库, 采用 CART 法, 以 PGA, S 或 W_{ff} , F_{15} 和 T_{15} 为预测变量, 以液化侧移分级 (LEVEL) 为目标变量, 建立了临空和缓坡两种情况下的液化侧移等级预测分类决策树, 如图 4 所示, 并同时得到了两种情况下各参数对液化侧移的重要性程度, 如图 5 所示。

5 液化侧移等级判别标准

依据于上面的液化侧移等级分类决策树, 可得到终端叶结点液化侧移判别等级, 通过对分类决策树的每个枝干, 即从根结点到子叶结点最终到终端叶结点的系统分析和解读, 即可形成临空和缓坡两种情况下的液化侧移等级判别标准 LLSL (liquefaction lateral spread level), 分别如表 2 和表 3 所示。

6 判别标准的可靠性分析

6.1 参量对液化侧移的影响趋势分析

4 个参数对液化侧移的影响趋势, 整体而言, 液化侧移与 PGA, S 或 W_{ff} 和 T_{15} 成正相关关系, 即随着坡度、液化层厚度、加速度的增大而增大, 与 F_{15} 成负相关关系, 随着细粒土含量的增大而减小。从本文建立的液化侧移等级分类决策树中, PGA, S 或 W_{ff} , F_{15} 和 T_{15} 对液化侧移的影响也反映了这一趋势, 例如, 临空情况, 对于每个枝干深层的端结点, 如端结点 1 和 2 (Terminal Note 1 和 Terminal Note 2), 当上部其他因素情况相同即两个结点在同一分枝上, $W_{ff} \leq 3.72\%$ 时液化侧移等级为严重, $W_{ff} > 3.72\%$ 时液化侧移等级为非常严重, 即临空坡度越大液化侧移等级越高, W_{ff} 与液化侧移等级成正相关关系; 分类决策树的第三层深度子结点 6 (Note 6) 下, $PGA \leq 0.24g$ 时为轻微灾害, $PGA > 0.24g$ 时为中等破坏, PGA 与液化侧移等级正相关关系。同样, 缓坡情况, 如端结点 1 和 2 (Terminal Note 1 和 Terminal Note 2), 当液化层厚度 $T_{15} \leq 3.5$ m 时为轻微灾害, $T_{15} > 3.5$ m 时为中等灾害, T_{15} 与液化侧移等级成正相关关系; 分类决策树的第三层深度中, 细粒土含量 $F_{15} > 18.00\%$ 时为中等灾害, $F_{15} \leq 18.00\%$ 时为严重灾害, F_{15} 与液化侧移等级成负相关关系。

对于本文的其他情况, 分类决策树整个分裂过程在同一枝干下都遵循上述影响规律, 这从一个方面说明本文建立液化侧移等级标准评价方法及过程是可靠的, 不违背人们对液化侧移规律的现有认识。

6.2 参量耦合性影响分析

分类决策树中, 当两结点不在同一分枝上时, 就可以体现各参量之间耦合作用。

例如, 临空情况下对右侧分枝端结点 8 (Terminal

Note 8), 细粒土含量较大 ($F_{15} > 19.50\%$), 当加速度 $PGA > 0.24g$, $W_{ff} \leq 6.3\%$ 时一共有 15 个液化侧移记录,

其中 1 例液化侧移等级为低级, 9 例为中等, 2 例为严

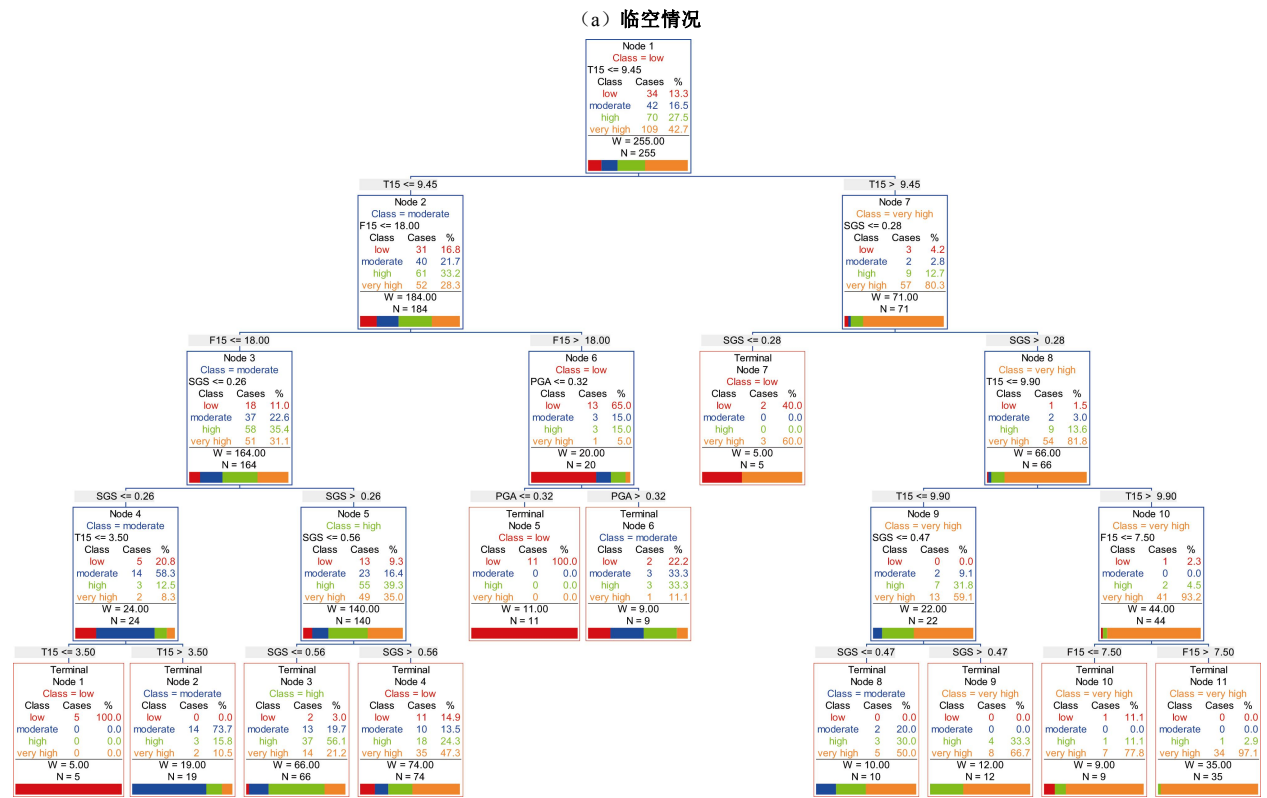
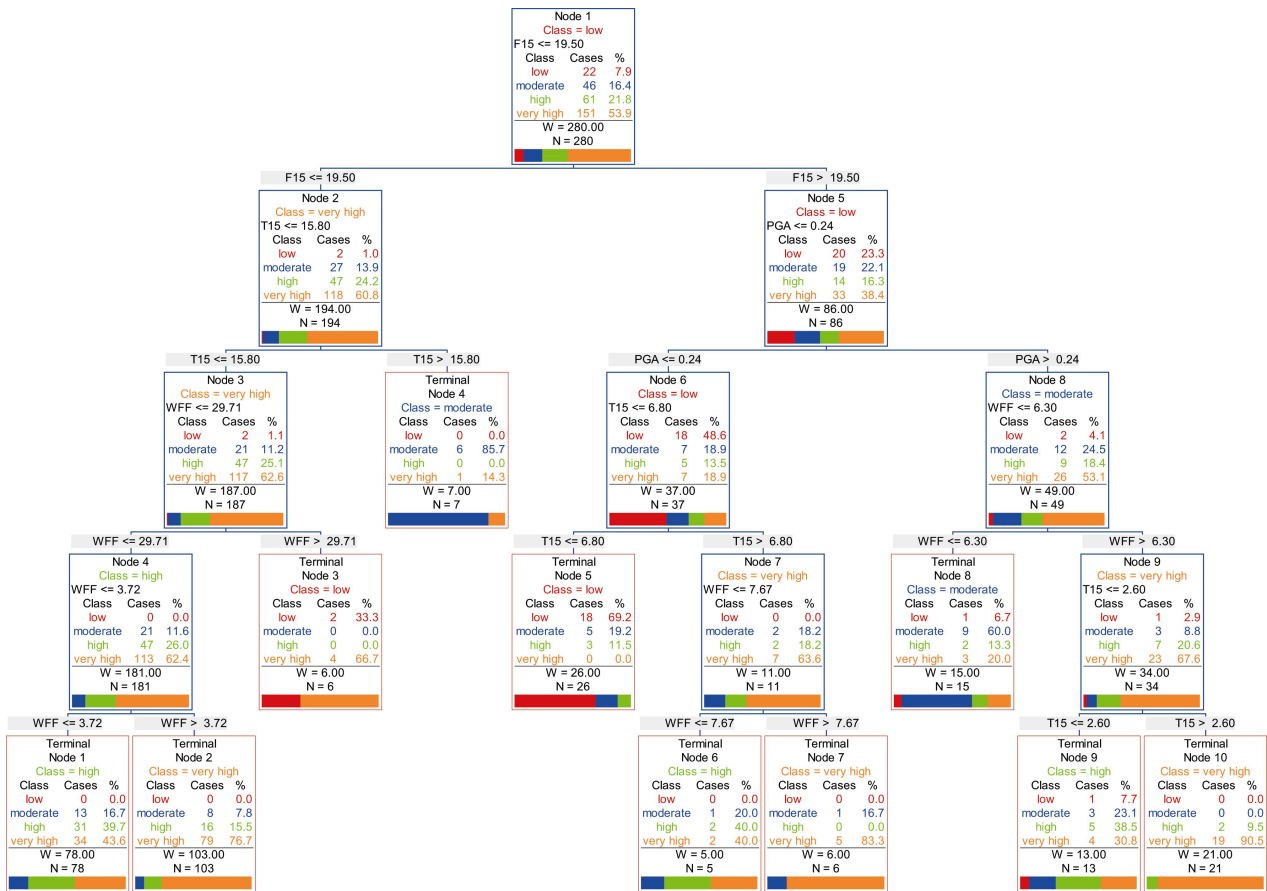


图 4 液化侧移等级预测分类决策树

Fig. 4 Classification tree for prediction of lateral spread level

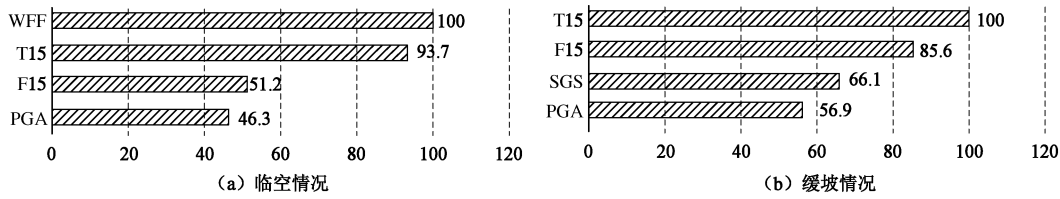


图5 各预测变量对液化侧移的贡献度

Fig. 5 Relative importance of each input variation for lateral spread

表2 临空情况下的液化侧移等级评价标准

Table 2 Prediction rules for lateral spread level under free face condition and gently sloping terrain

液化侧移等级	评价标准
轻微灾害(0~0.5 m)	当 $F_{15} > 19.5\%$, $PGA \leq 0.24g$, 且 $T_{15} \leq 6.8$ m时
中等灾害(0.5~1.0 m)	当 $F_{15} > 19.5\%$, $PGA > 0.24g$, 且 $W_{ff} \leq 6.3\%$ 时
严重灾害 (1.0~2.0 m)	当 $F_{15} \leq 19.5\%$, $T_{15} \leq 15.8$ m, 且 $W_{ff} \leq 3.72\%$ 时 当 $F_{15} > 19.5\%$, $PGA \leq 0.24g$, $T_{15} > 6.8$ m, 且 $W_{ff} \leq 7.67\%$ 时 当 $F_{15} > 19.5\%$, $PGA > 0.24g$, $W_{ff} > 6.3\%$, 且 $T_{15} \leq 2.6$ m时
非常严重灾害 (>2.0 m)	当 $F_{15} \leq 19.5\%$, $T_{15} \leq 15.8$ m, 且 $3.72\% < W_{ff} \leq 20.0\%$ 时 当 $F_{15} > 19.5\%$, $PGA \leq 0.24g$, $T_{15} > 6.8$ m, 且 $W_{ff} > 7.67\%$ 时 当 $F_{15} > 19.5\%$, $PGA > 0.24g$, $W_{ff} > 6.3\%$, 且 $T_{15} > 2.6$ m时

表3 缓坡情况下的液化侧移等级评价标准

Table 3 Prediction rules for lateral spread level in gently sloping terrain

液化侧移等级	判别标准
轻微灾害(0~0.5 m)	当 $T_{15} \leq 3.5$ m, $F_{15} \leq 18.00\%$, 且 $S \leq 0.26\%$ 时 当 $F_{15} > 18.00\%$, $PGA \leq 0.32g$, 且 $T_{15} \leq 9.45$ m时
中等灾害 (0.5~1.0 m)	当 $T_{15} > 3.5$ m, $F_{15} \leq 18.00\%$, 且 $S \leq 0.26\%$ 时 当 $F_{15} > 18.00\%$, $PGA > 0.32g$, 且 $T_{15} \leq 9.45$ m时
严重灾害 (1.0~2.0 m)	当 $T_{15} \leq 9.45$ m, $F_{15} \leq 18.00\%$, 且 $S > 0.56\%$ 时 当 9.45 m $< T_{15} \leq 10.00$ m, $F_{15} \leq 18.00\%$, 且 $0.28\% < S \leq 0.47\%$ 时
非常严重灾害 (>2.0 m)	当 $T_{15} > 9.45$ m, 且 $S > 0.28\%$ 时

重, 3 例为非常严重。采用 MLR 法, 计算结果 9 例轻微, 6 例中等, 结果偏于轻微, 按非耦合方法, 通常会将这种情况下的灾害等级判成轻微, 与实际偏差较大; 本文 LLSL 的判别结果为中等灾害, 判别结果与实际更加接近。MLR 法与本文方法结果的区别, 来源于本文方法能够考虑细粒土含量较大同时峰值加速度较大时的耦合作用。

同样, 临空情况下对右侧分枝细粒土含量较大 ($F_{15} > 19.50\%$), 按非耦合方法通常灾害程度会被判别成低等。但本文分类决策树的方法的结果表明, 若地震动 PGA 足够大, 端结点 7 (Terminal Note7) 液化侧移等级也可以是非常严重, 甚至比左侧分枝 $F_{15} \leq 19.50\%$ 的某些等级判别都要高。端结点 7 的实际情况是, 6 个实测数据中, 液化侧移等级 1 个为中等, 5 个为非常严重, 采用 MLR 法, 计算结果为 3 个轻微, 3 个中等, 与实际偏差较大。而本文方法判定为非常严重, 结果非常接近实际。

6.3 参量对液化侧移的影响程度分析

本文不仅得到液化侧移等级终极判别标准, 而且可以通过决策树分裂过程, 从中得到各个参数对液化侧移等级的控制程度和过程, 最终自动给出各参数对

液化侧移等级重要性程度的定量结果。该方法将重要性程度最大的因素赋值 100, 重要性程度最小的赋值为 0, 最终给出的各参数对液化侧移等级的重要性程度如图 5 所示。如果设所有参量的贡献度之和为 1, 则可以得到临空和缓坡两种情况下的因素变量对液化侧移等级的影响权重, 如表 4 所示。

表4 各参量对液化侧移等级的重要性程度和影响权重

Table 4 Relative importance and impact weights of four input variations

因素变量	重要性程度	影响权重
临空情况	W_{ff} 100	0.343
	T_{15} 93.7	0.322
	F_{15} 51.2	0.176
	PGA 46.3	0.159
缓坡情况	T_{15} 100	0.324
	F_{15} 85.6	0.277
	S 66.1	0.214
	PGA 56.9	0.185

由表 4 可以得出:

(1) 在临空情况下, 对侧移起最主要控制作用的是地形条件, 即河岸或渠道的坡比 W_{ff} , 对液化侧移的影响权重为 0.343。因为对于临空情况, 土体至少有

表5 本文液化侧移等级判别标准与 MLR 法的回判成功率对比

Table 5 Discriminant success for lateral spread level under free face condition

液化侧移等级	临空情况				缓坡情况					
	原始个数	正确个数		成功率/%		原始个数	正确个数		成功率/%	
		本文	Youd	本文	Youd		本文	Youd	本文	Youd
轻微	22	18	12	81.8	54.5	34	21	19	61.7	55.9
中等	46	29	32	63	69.5	42	38	30	90.4	71.4
严重	61	56	52	91.8	85.2	70	54	52	77.1	74.3
非常严重	151	137	140	90.7	93.3	109	103	107	94.5	98.1
平均成功率				81.8	75.6				80.9	74.9

一侧是自由面, 所受约束小, 坡比越大, 抗滑移能力越差, 则抵抗液化侧移的能力越差。而在缓坡情况下, 缓坡坡度 S 影响权重为 0.214, 排名第三, 这是由于缓坡情况下, 土体四周受约束, 且缓坡坡度之间的差距也较小, 在力学机制上相对于临空情况, 缓坡坡度的影响削弱很多, 此时土体的敏感性如可侧移层总厚度 T_{15} 和细粒土含量 F_{15} 对缓坡情况下的液化侧移发挥主控作用, 分别为 0.324 和 0.277。

(2) 对于临空情况, 可侧移层总厚度 T_{15} 贡献没有排在首位, 但所占权重还是很大的, 为 0.332, 仅次于地形 W_{H} 的影响权重 0.343, 这说明液化侧移大小对土体敏感程度依赖较大。

(3) 不论对于哪种情况, 峰值加速度 PGA 的重要性程度都排在最后, 临空和缓坡情况下的影响权重分别为 0.159 和 0.185。本文推测, 造成此现象原因有以下两点: 一是数据库中 PGA 的数据离散性不大, 数据分布过于集中导致分类不明显; 二是从液化侧移发生的动力学机制出发, 对于敏感土体, 只要 PGA 值足以触发液化, 则 PGA 大小对液化引起侧移大小的控制能力将不太明显。事实上, 从汶川地震场地液化调查分析结果看^[22-23], 汶川地震场地液化有 100 余处, 分布在很广的区域, VIII 度内液化的发生与 PGA 大小关系不大, IX 度区内的液化点及破坏程度并不比 VIII 度和 VII 度内的多和严重, 从一个侧面说明 PGA 大小对液化的触发作用要大于对液化严重程度的影响。

从以上液化侧移发生的机制方面出发, 各参量对液化侧移等级影响程度的分析结果看, 本文建立的液化侧移等级分类决策树科学合理, 与现有认识一致, 具有较强的解释性和说服力。同时, 得出的各参量的影响权重还可以供发展液化区划技术参考。

6.4 与 MLR 法的对比

将本文建立的液化侧移等级判别标准 LLSL (表 2 和表 3), 与 Youd 等人采用的 MLR 法的计算结果进行对比, 对原始数据回判成功率的比较结果如表 5 所示。

由表 5 可见, 对于临空与缓坡两种情况, 本文的液化侧移等级判别标准总体成功率都在 81% 左右。而 MLR 法为 75% 左右, 两种情况下本文建立的液化侧移等级判别标准成功率均比 MLR 法高出 6% 左右。另外,

采用本文的液化侧移等级判别标准, 对各个液化侧移等级实测数据的回判成功率表现较为均衡, 而 MLR 法在轻微等级判别中有较为明显的缺欠, 对于临空与缓坡两种情况的成功率均只有 55% 左右, 这也是其他学者对 MLR 法最不满意之处, 本文的液化侧移等级判别标准成功率则分别为 82% 和 62%, 在这方面有较大改进。从表 5 中还可以看出, 本文判别标准中采用 PGA 替代 Youd 公式中的 M 和 R , 并略去了平均粒径 $D_{50_{15}}$ 这一项, 并没有影响精度, 说明这些做法是合理的。同时本文认为, Youd 的 MLR 法虽有计算简便的优点, 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, 不能很好地考虑各变量的耦合作用, 导致结果“顾高顾不了低”。

比较 MLR 法, 本文建立的液化侧移等级判别标准不仅精度有较大提高, 而且对于液化区划工作有更好的适用性。首先, 本文的判别标准使用了 PGA 代替震级和震中距, 非常适用于场地地震害区划; 其次, 根据本文的分析结果, 判别标准中去掉了平均粒径 $D_{50_{15}}$ 这一参数, 这为区划工作带来了很大便利, 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, 至于本文的判别标准中的细粒含量 F_{15} , 可以通过工程地质勘察资料中土性的描述换算得到, 这样本文的液化侧移等级判别标准在液化区划的基础上可不增加额外的工作量; 最后, 本文建立的液化侧移等级判别标准本身还能更好地满足场地破坏区划技术一些特殊要求。场地破坏区划技术中, 不是追求单个点评价结果的精度, 而是正确合理给出整个区域的评价结果, 原则上应直接从一个面 (地质单元) 出发, 针对这一地质单元中各个影响液化侧移等级的参数的数值范围, 采用类似本文这样的液化侧移等级判别标准直接判断, 而尽可能少依赖钻孔。本质上讲, Youd 的 MLR 法是用来估计一个场地液化侧移大小的, 不是为场地破坏区划技术而设计的, 用于地震区划时理所当然地依赖于地质单元中高密度钻孔, 才能得到液化侧移灾害等级。而本文液化侧移等级判别标准研究的初衷就是为场地破坏区划工作专门建立的方法, 克服 MLR 法的弱点。

需要注意的是, 本文的液化侧移等级判别标准对个别等级回判成功率一般, 如临空情况下中等灾害的判别成功率为 63%, 缓坡情况下轻微灾害的判别成功率为 62%。综合前人的研究结果^[7-9], 可以发现造成这一结果的原因主要是现有数据库在这两个等级方面的数据相对偏少, 当侧移较小时, 数据的不足会造成方法判别的失误。

7 结 论

基于 Youd 等的液化侧移数据库, 采用 CART 分类决策树法, 研究数据库中各参量对液化侧移的影响程度并从中筛选出主要影响参数, 构建了液化侧移灾害等级分类决策树, 得到了各参数对液化侧移贡献的权重, 从中提出了一套液化侧移等级判别标准 (LLSL)。通过分类决策树中各参数与实际震害情况的液化侧移影响趋势对比、分类决策树中各参数耦合性分析以及判别标准与 MLR 法的回判成功率对比, 论证了本文提出的 LLSL 标准的合理性和可靠性。主要结论如下:

(1) 研究表明液化侧移层的平均粒径对液化侧移的影响程度很低可以略去, 同时使用峰值加速度 PGA 代替 MLR 法中的震级和震中距, 本文筛选出的用于液化侧移等级判别标准的影响参数包括峰值加速度 PGA、临空 (缓坡) 坡度 W_f 或 S 、液化层厚度 T_{15} 和细粒土含量 F_{15} 。

(2) 从决策树分裂进程可看出各参数对液化侧移等级的影响过程及大小, 临空情况下, 影响大小排序为临空坡度 (0.343)、细粒土含量 (0.322)、液化层厚度 (0.176) 和峰值加速度 (0.159); 缓坡情况下, 排序为细粒土含量 (0.324)、液化层厚度 (0.277)、缓坡坡度 (0.214) 和峰值加速度 (0.185)。

(3) 分类决策树同一分枝上结点分裂中各参数对液化侧移的影响趋势与实际震害数据一致, 即液化侧移与坡度、液化层厚度、加速度成正相关关系, 与细粒土含量成负相关关系; 不同分枝上结点判别结果体现了各参数对液化侧移等级影响的耦合性, 与实际震害数据基本一致, 这比 MLR 法的各参数相互独立假设前进了一步, 计算精度也得到较大提高。

(4) 无论对于临空还是缓坡情况, 本文的液化侧移等级判别标准 LLSL 的总体回判成功率都在 81% 左右, 比 MLR 法均高出 6% 左右, 而且对各个液化侧移等级实测数据的回判成功率表现较为均衡, 弥补了 MLR 法在轻微等级判别中成功率较低的弱点。

(5) 本文提出的液化侧移等级判别标准 LLSL, 依据的是各因素不同范围内的判定, 即可以从一个地质单元出发直接判定, 减少了对钻孔的依赖, 是一种

与区划技术要求相宜的方法, 而且筛去了 MLR 法中平均粒径一项。并使用 PGA 代替了震级和震中距, 分析表明参数筛选和变动合理可行, 这也为液化灾害区划工作带来了很大的便利, 与中国现有灾害评估基础工作有更好的衔接。

(6) 虽然各种验证表明本文提出的 LLSL 标准合理可靠, 精度比 MLR 法还有所提高, 但该标准对缓坡轻微灾害判别成功率一般, 原因主要是现有数据库在轻微和和中等这两个级别方面的数据不足, 特别是中国液化侧移调查数据基本空白, 这都提示以后要注重调查, 积累更多第一手资料。

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:

- [1] 陈龙伟, 袁晓铭, 孙 锐. 2011 年新西兰 Mw6.3 地震液化及岩土震害评述[J]. 世界地震工程, 2013, 29(3): 1 - 9. (CHEN Long-wei, YUAN Xiao-ming, SUN Rui. Review of liquefaction phenomena and geotechnical damage in the 2011 New Zealand Mw6.3 earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2013, 29(3): 1 - 9. (in Chinese))
- [2] 孙 锐, 袁晓铭. 第 11 届国际地动力学和地震工程会议及第 13 届世界地震工程会议砂土液化研究综述[J]. 世界地震工程, 2006, 22(1): 15 - 20. (SUN Rui, YUAN Xiao-ming, Summarization of earthquake liquefaction on 13th WCEE and 11th SDEE[J]. World Earthquake Engineering, 2006, 22(1): 15 - 20. (in Chinese))
- [3] 李兆焱, 王永志, 袁晓铭. 适用于新疆巴楚地区的 CPT 液化判别新方法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 1): 140 - 145. (LI Zhao-yan, WANG Yong-zhi, YUAN Xiao-ming. New CPT-based prediction method for soil liquefaction applicable to Bachu region of Xinjiang[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1): 140 - 145. (in Chinese))
- [4] ELGAMAL A W, YANG Z H. Numerical modeling of liquefaction - induced lateral spreading[C]// 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, 2000.
- [5] 蔡晓光. 液化土层两种机制下侧向大变形分析[D]. 北京: 中国地震局工程力学研究所, 2004. (CAI Xiao-guang. Liquefaction-induced lateral spreading of soil layer under two mechanisms[D]. Beijing: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2004. (in Chinese))
- [6] 汪云龙, 袁晓铭, 殷建华. 基于光纤光栅传感技术的测量模型土体侧向变形一维分布的方法[J]. 岩土工程学报, 2013, 10: 1908 - 1913. (WANG Yun-long, YUAN Xiao-ming, YIN

- Jian-hua. A measurement method for 1-D distribution of lateral deformation of soils in shaking table tests using FBG technique[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **10**: 1908 - 1913. (in Chinese)
- [7] 汪云龙, 王维铭, 袁晓铭. 基于光纤光栅技术测量模型土体内侧向位移的植入梁法[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 1): 181 - 185. (WANG Yun-long, WANG Wei-ming, YUAN Xiao-ming. Embedded-beam approach for measuring interior lateral displacement of soils using FBG technique[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S1): 181 - 185. (in Chinese))
- [8] HAMADA M, YASUDA S, ISOYAMA R, et al. Study on liquefaction-induced permanent ground displacement[J]. Report for the Association for the Development of Earthquake Prediction. 1986.
- [9] YASUDA S, NAGASE H, KIKU H, et al. Appropriate Countermeasures against Permanent Ground Displacement due to Liquefaction[C]// 10th World Conference on Earthquake Engineering. Madrid, 1992: 1471 - 1476.
- [10] 刘汉龙, 周云东, 高玉峰. 砂土地震液化后大变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(2): 142 - 146. (LIU Han-long, ZHOU Yun-dong, GAO Yu-feng. Study on the behavior of large ground displacement of sand due to seismic liquefaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(2): 142 - 146. (in Chinese))
- [11] 张建民. 地震液化后地基大变形的实用预测方法[C]// 第八届土力学及岩土工程学术会议论文集. 南京, 1999: 573 - 576. (ZHANG Jian-min. Practical prediction method for large foundation deformation after earthquake[C]// 8th Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Academic Conference. Nanjing, 1999: 573 - 576. (in Chinese))
- [12] BARTLETT S F, YOUD T L. Empirical analysis of horizontal ground displacement generated by liquefaction-induced lateral spread[C]// National Center for Earthquake Engineering Research Technical Report NCEER-92-0021, 1992, 114.
- [13] YOUD T L, HANSEN C M, BARTLETT S F. Revised MLR equations for predicting lateral spread displacement," Proceedings[C]// 7th U S-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Liquefaction, Seattle, Washington, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research Technical Report MCEER-99-0019, 1999: 99 - 114.
- [14] YOUD T L, HANSEN C M, BARTLETT S F. Revised MLR equations for prediction of lateral spread displacement[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, ASCE, 2002, **128**(12): 1007 - 1017.
- [15] WANG J, RAHMAN M S. A neural network model for liquefaction-induced horizontal ground displacement[J]. Soil Dyn Earthq Eng, 1999, **18**(8): 555 - 568.
- [16] CHIRU-DANZER M, JUANG C H, CHRISTIPHER R A, et al. Estimation of liquefaction induced horizontal displacements using artificial neural networks[J]. Can Geotech J, 2001, **38**(1): 200 - 207.
- [17] GARCÍA S R, ROMO M P, BOTERO E. A neurofuzzy system to analyze liquefaction-induced lateral spread[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2008, **28**(3): 169 - 180.
- [18] GOH A T C, ZHANG W G. An improvement to MLR model for predicting liquefaction-induced lateral spread using multivariate adaptive regression splines[J]. Engineering Geology, 2014, **170**: 1 - 10.
- [19] Michael J. Olsen, Steven F. Bartlett and M.EERI, Lateral spread hazard mapping of the northern salt lake valley[J]. Utah, for aM7.0 Scenario Earthquake. Earthquake Spectra, 2007, **23**(1): 95 - 113.
- [20] IDRIS I M. Response of soft soil sites during earthquakes[C]// Proceedings H Bolton Seed Memorial Symposium. California, 1990, **2**: 273 - 290.
- [21] XU Bin. An empirical study of classification and regression tree and random forests[D]. New York: State University of New York at Stony Brook, 2004.
- [22] 袁晓铭, 曹振中, 孙锐, 等. 汶川 8.0 级地震液化特征初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(6): 1288 - 1296. (YUAN Xiao-ming, CAO Zhen-zhong, SUN Rui, et al. Preliminary research on liquefaction characteristics of Wenchuan 8.0 Earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(6): 1288 - 1296. (in Chinese))
- [23] 王维铭. 场地液化特征研究及液化影响因素评价[D]. 北京: 中国地震局工程力学研究所, 2013. (WANG Wei-ming. Study on liquefaction characteristics and liquefaction-influencing factors assessment. Institute of Engineering Mechanics[D]. Beijing: China Earthquake Administration, 2013. (in Chinese))