

DOI: 10.11779/CJGE201903005

适于不同深度土层液化的剪切波速判别公式

孙 锐, 袁晓铭*

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

摘要: 剪切波速测试是工程上常用的现场技术, 正逐步成为液化判别方法的基本指标之一。利用早期的 Andrus 数据库对中国《岩土工程勘察规范》方法和 Andrus 方法进行检验, 发现了二者存在的问题。提出了双曲线形式的剪切波速判别模型和公式。采用新的 Kayen 数据库对三者进行了对比检验, 并讨论了提高判别精度的可能性和方式。结果表明: 中国现行的《岩土工程勘察规范》中剪切波速判别液化方法, 无论对浅层还是深层土, 判别结果均严重保守, 甚至会把十分密实的砂土判成液化, 十分不合理; 国际上应用广泛的 Andrus 方法对浅层土判别结果过于保守, 对深层土判别成功率可以接受, 但其临界剪切波速曲线在深处存在回弯的不合理现象; 所提出的双曲线液化判别模型和公式, 能够深浅兼顾, 无论对浅层还是深层土都能给出较好的判别结果, 克服了中国规范方法和 Andrus 方法的弊端, 且形式简单便于工程应用; 采用剪切波速进行液化判别时, 应采取多次测试, 以降低数据离散性, 提高判别的准确性。

关键词: 液化; 剪切波速; 判别; 深层土

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)03-0439-09

作者简介: 孙 锐(1972-), 女, 研究员, 博士, 主要从事岩土地震工程研究。E-mail: iemsr@163.com。

Depth-consistent v_s -based approach for soil liquefaction evaluation

SUN Rui, YUAN Xiao-ming

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

Abstract: The shear wave velocity tests have been commonly used as an engineering field testing technique, and are gradually becoming a basic index for soil liquefaction evaluation. The shortcoming of the Andrus' method and Chinese code method has been found by using the database from Andrus, and the new hyperbolic model and formula V_s -based for estimating liquefaction potential of liquefiable layer are proposed. The reliability of the above three methods is verified through the data newly collected by Kayen, and the possibility and approach of improving the discrimination accuracy are discussed. The results indicate that the Chinese code method is significantly conservative for both shallow soil layer and deep soil layer and will predict the dense sand as liquefiable. The Andrus' method is conservative for shallow soil layer, and an irrational phenomenon of back bending occurs in the deep soil layer. The proposed hyperbolic model can provide good results for both shallow soil layer and deep soil layer and solve the deficiency of Chinese code method and Andrus' method. When the in-situ shear-wave velocity tests are used to predict soil liquefaction for a specific site, multiple tests should be taken to reduce data discreteness.

Key words: liquefaction; shear wave velocity; discrimination; deep soil layer

0 引言

土体地震稳定性一直是工程抗震中的重要研究课题, 土体液化是其中的重要问题^[1-3]。实际工程中, 土体液化判别是减轻液化灾害的首要任务, 目前常用的是以标准贯入试验为基本技术的半经验方法^[4-6], 其中最具代表性的为中国《建筑抗震设计规范》中采用的方法。虽然基于标贯的方法已得到广泛应用, 但该试验对土层扰动大, 连续性差, 对一些场地也不适用^[7]。

土体剪切波速是衡量土的力学性能的综合指标之一, 可给出场地性能连续性测试结果, 作为一种理论

先进的原位测试, 能够弥补标贯试验方法的不足。因此, 研究者及工程界一直致力于发展基于剪切波速参数的液化判别方法^[8-10], 有些成果已被国家标准采纳^[11]。但是, 基于剪切波速的液化判别方法目前仍没有在工程界得到广泛应用, 其主要原因在于方法缺少大量实测数据的检验, 说服力不强。另外, 现场剪切波速测试不确定性较大, 其测试误差对场地液化判别结果的

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项项目
(2017B09)

收稿日期: 2018-02-01

*通讯作者 (E-mail: yxmiem@163.com)

影响也不清楚, 工程师们在使用时心存疑虑。

本文通过收集液化场地剪切波速数据, 对现有国内外代表性的剪切波速液化判别方法进行检验, 指出其存在的问题。以 Andrus 数据库为基础, 研究剪切波速液化判别新模型, 以 Kayen 数据库对新模型和公式进行检验, 并以剪切波速测试误差最新研究成果为依据, 对提出方法的可靠性予以一般性的解释。

1 现有剪切波速液化判别方法

1.1 岩规法

国内较具影响力的场地地震液化判别方法由石兆吉^[11]提出, 该方法被纳入《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001) 的条文说明中(简称岩规法, 下同), 其液化临界剪切波速公式表达为

$$V_{\text{scri}} = V_{\text{s}0} \left(d_s - 0.0133 d_s^2 \right)^{0.5} \left[1.0 - 0.185 \left(\frac{d_w}{d_s} \right) \right] \sqrt{\frac{3}{\rho_c}}, \quad (1)$$

式中, d_s 为土层埋深, d_w 为地下水位, ρ_c 为黏粒含量, 当烈度是Ⅶ、Ⅷ、Ⅸ度时, 砂土的剪切波速基准值 $V_{\text{s}0}$ 分别取 65, 95 和 130 m/s。该公式适用范围为 15 m 以内。

工程实践中, 一些工程师反映, 岩规法会将密实状态的砂土判成液化, 感到十分不解。为此, 本文取地下水位 d_w 为 2 m, 将式(1) 液化临界曲线示于图 1, 当实测剪切波速位于临界线左侧判别结果为液化, 位于右侧为不液化。由图 1 所示, 当砂层埋深为 15 m, 设防烈度为Ⅶ度、Ⅷ度和Ⅸ度时, 临界剪切波速分别为 220, 320 和 450 m/s。已有的研究结果表明, 砂土的剪切波速超过 300 m/s 时, 相应的标贯击数大于 30^[12-13], 基本可以认为是密实状态, 因此, 该公式所给出的临界曲线十分保守, 会将大多数密实砂层判别为可液化层, 导致工程造价大幅提高, 达到了不可接受的程度。

1.2 Andrus 法

目前国外应用广泛的基于剪切波速的土壤液化判别式为 Andrus 等^[14]提出的计算方法(简称 Andrus 法, 下同), 要点是分别计算砂层受到的地震剪应力比 CSR 及其抗液化应力比 CRR, 其中 CSR 的表达为

$$CSR = 0.65(a_{\max}/g)(\sigma_v/\sigma'_v)r_d, \quad (2)$$

其中, a_{\max} 为地表峰值加速度; g 为重力加速度; σ_v 为上覆土压力, σ'_v 为有效上覆土压力, r_d 为应力折减系数。CRR 的表达为

$$CRR = \left[0.022 \left(\frac{V_{\text{s}l}}{100} \right)^2 + 2.8 \left(\frac{1}{V_{\text{s}lc} - V_{\text{s}l}} - \frac{1}{V_{\text{s}lc}} \right) \right] \cdot MSF, \quad (3)$$

其中, $V_{\text{s}l}$ 为修正剪切波速, $V_{\text{s}l} = V_{\text{s}}(100/\sigma'_v)^{0.25}$, V_{s} 为实测剪切波速。 $V_{\text{s}lc}$ 为液化剪切波速上限, 当细粒含

量 $FC \leq 5\%$ 时, $V_{\text{s}lc} = 215 \text{ m/s}$; $5\% < FC \leq 35\%$ 时, $V_{\text{s}lc} = 215 - 0.5(FC - 5) \text{ m/s}$; $FC > 35\%$ 时, $V_{\text{s}lc} = 200 \text{ m/s}$ 。MSF 为震级修正系数, 当震级 $M_w \leq 5.2$ 时, $MSF = 1.82$, 当 $M_w > 5.2$ 时, $MSF = 6.9 \exp(-M_w/4) - 0.06$ 。

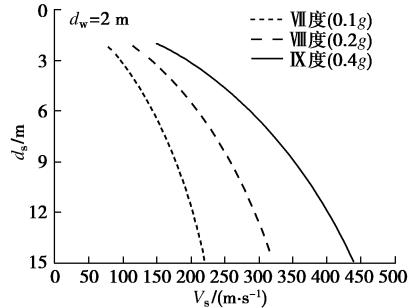


图 1 《岩土工程勘察规范》液化判别临界曲线

Fig. 1 Critical liquefaction evaluation lines by Chinese code method for investigation of geotechnical engineering

当 CRR 小于 CSR, 则该场地判别为液化, 否则为不液化。

式(2) 和式(3) 中, 取 $CSR=CRR$, 则可求得此时的临界修正剪切波速 $V_{\text{s}l}$ 。假定地下水位为 2 m, 可进一步求出临界实测剪切波速, 图 2 给出了几种不同地表峰值加速度下 Andrus 法的临界剪切波速曲线。从图 2 可见, Andrus 法所给出的临界曲线并没有出现把超密实砂土层判别成液化的现象。但是, Andrus 法的临界剪切波速曲线存在回弯趋势, 特别是低烈度时, 这种现象尤为明显, 与目前的认识相悖。

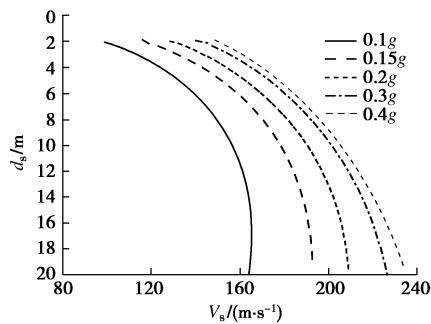


图 2 Andrus 法的液化判别临界曲线

Fig. 2 Critical liquefaction evaluation lines by Andrus method

从上可见, 岩规法和 Andrus 法均不适用于深层土的液化判别问题, 岩规在深层的临界剪切波速过大, 而 Andrus 方法的临界曲线则存在沿深度增加而临界值减小的不合理趋势。近来国际上的大地震出现了很多深层砂土(10~26 m) 液化破坏^[15], 而中国深基础的广泛使用和地下工程建设的大力发展都亟需合理的深层土液化判别方法。

2 现有剪切波速液化判别方法的检验

2.1 Andrus 数据库

2000年, Andrus 和 Stokoe 整理给出了液化场地剪切波速数据库(简称 Andrus 数据库, 下同), 包括 26 次地震中 70 个场地的数据, 这 26 次地震中有 9 次发生在美国, 其余的分别发生在日本、中国大陆和台湾, 原始样本数据总计 226 组。由于中国规范仅对设防烈度在Ⅶ度—Ⅸ度($0.09g \sim 0.75g$)^[16]范围的可液化土进行液化判别, 因此, 本文取此范围的数据为有效数据, 总计 176 组样本。包括液化样本数据 88 组, 非液化样本数据 88 组, 液化、非液化分布比较均衡, 具体情况见表 1。所有数据的土层深度主要集中在 10 m 以内, 大于 10 m 只有 2 个, 液化数据和非液化数据各 1 个。最大埋深为 11.5 m。

表 1 Andrus 数据库

Table 1 Data statistics from Andrus

地表峰值加速度/g	烈度	液化	非液化	总数
0.09~0.19	Ⅶ	24	62	86
0.19~0.38	Ⅷ	51	16	67
0.38~0.75	Ⅸ	13	10	23
总数		88	88	176

液化数据中, 剪切波速分布主要集中在 100~150 m/s 范围内, 共 61 组, 占液化数据的 69%; 非液化数据中, 剪切波速分布主要集中在 120~170 m/s 范围内, 共 51 组, 占非液化数据的 58%。

2.2 两种方法的检验

采用上述岩规法和 Andrus 法两个计算公式, 对表 1 的所有测试点进行判别, 结果如表 2。需要说明的是, 由于原始数据中并不包含黏粒含量, 因此在使用岩规法计算时, ρ_c 统一取 3。剪切波速基准值 V_{s0} 是按表 1 中地表加速度与烈度的对应关系确定各个数据的烈度后按岩规的条文进行取值。在使用 Andrus 法时, 对于原始数据没有给出细粒含量 FC 的, 计算中则统一按 $FC \leq 5\%$ 取值。

表 2 现有方法的判别成功率

Table 2 Success rates of existing methods (%)

烈度	液化情况	岩规法	Andrus 法
Ⅶ度	液化	63	96
	非液化	52	34
	平均	58	65
Ⅷ度	液化	96	100
	非液化	25	38
	平均	61	69
Ⅸ度	液化	100	100
	非液化	20	30
	平均	60	65
总体	液化	88	99
	非液化	45	34
	平均	67	67

由表 2 可知, 岩规法的平均成功率为 67%, 对所有液化点判别成功率为 88%, 而非液化的成功率只有

45%; Andrus 法对所有测试点进行判别的平均成功率 为 67%, 对所有液化点判别成功率为 99%, 而非液化的成功率只有 34%。

3 新判别模型的建立

3.1 基本思路

液化判别临界线是一个基准线, 应在液化与非液化可能性对等条件下建立, 液化临界线上的点代表着其液化和非液化的可能性大致相同, 对所有液化场地和非液化场地实测数据的成功率也应大体相等, 液化判别临界线过于保守或过于安全均会对使用带来不利影响。以此为基础, 调整液化判别临界线以满足不同类别工程抗震设计要求。

从上面分析可见, 现有基于剪切波速的场地液化判别方法存在较大问题, 一是严重偏于保守, 采用以浅层液化数据为主的 Andrus 数据库检验结果已清楚地表明了这一点; 二是深层土液化判别模型不合理, 岩规法临界曲线值过大, 而 Andrus 法则出现异常, 临界曲线沿深度增加而减小。对于岩规法, 本文曾尝试不同系数的修改方法, 但均不能达到浅处与实际数据相符而深层临界曲线又不过大的要求。而对于 Andrus 法, 由于其中应力折减系数自身的原因, 无论怎样调整参数, 临界曲线沿深度增加而值减小的异常现象总会出现。也就是说, 现有基于剪切波速的场地液化判别模型无法满足深浅兼顾的客观要求, 需要选择新模型。

为克服现有模型和公式的缺点, 本文新模型的构造考虑了以下两个因素: 一是提出的临界剪切波速曲线能够深浅兼顾, 浅层内曲率快速变化而深层时变化明显变缓; 临界剪切波速曲线应有渐近线存在, 使得当埋深很大时也不会出现临界值减小的异常现象。

剪切波速基础数据中液化与非液化点相互交织, 如何获取具有较高精度的判别方法是一个难题, 也是本文的一个特色。一般认为, 国外的 CSR 方法并不能很好的表现液化和非液化场地在剪切波速上的差别。在 CSR 计算中, 假定其他条件相同或接近(特别是波速接近), $0.1g$ 场地和 $0.4g$ 场地的 CSR 相差 3 倍, 若采用地表峰值加速度连续曲线对所有液化点和非液化点进行区分时, 难以得到适合加速度范围较宽的回归曲线。本文采用按不同地震动强度分区的方法对原始数据进行分区, 分别进行回归分析, 对每个烈度给出相应合理的剪切波速基准值, 因而可以得到较为均衡的判别结果。

为充分认识加速度峰值、剪切波速、埋深和地下水位等参数对液化判别结果的影响权重, 采用分类回

归树方法对常规参数影响的重要性进行了分析, 结果如表 3 所示。由表可知, 对基于剪切波速的液化判别方法来说, 加速度峰值 a_{\max} 对判别结果影响最大, 而剪切波速次之。即采用剪切波速来区分液化土层与非液化土层时, 区分度会有所欠缺, 其重要性不如 a_{\max} 显著。因此, 本文采用 a_{\max} 进一步分区, 显然可提高判别结果的成功率。

表 3 参数重要性

Table 3 Importance orders of parameters

参数	重要性指数	归一化重要性
a_{\max}	0.412	100.0%
V_s	0.121	85.2%
d_w	0.065	45.6%
d_s	0.048	33.5%

3.2 双曲线模型

室内及现场剪切波速测试结果均表现为随深度的增加剪切波速增大^[17-18], 且这种增大的趋势逐渐变缓, 因此, 采用剪切波速进行液化判别时, 临界曲线也应具有这种性质。双曲线模型的切线斜率随着自变量的增大逐渐增大, 即变量增速变慢, 很符合剪切波速随土层埋深变化的表现。同时, 双曲线模型还具有形式简单、物理含义明确、易于拟合等优点。因此, 本文选定双曲线形式作为新判别方法的曲线形式。

采用双曲线模型, 构建基于剪切波速的场地液化判别基本形式为

$$V_{\text{scr}} = V'_{s0} \cdot \frac{d_s}{d_s + k_1}, \quad (4)$$

式中, V_{scr} 为临界剪切波速, d_s 为土层埋深, V'_{s0} 为剪切波速基准值, k_1 为待定参数。

上式中, 当 $d_s=0$ 时, $V_{\text{scr}}=0$, 但正常情况下, $V_s>0$, 即在地表土层上均判别不液化, 不符合实际工程, 因此为避免上述情况, 需要对式(4)进行修正:

$$V_{\text{scr}} = V''_{s0} \cdot \left(\frac{d_s}{d_s + k_2} + k_2 \right), \quad (5)$$

式中, k_2 为待定参数。

式(5)中, 当 $d_s=0$ 时, $V_{\text{scr}}=k_2 \cdot V''_{s0}$; d_s 无穷大时, $V_{\text{scr}}=(1+k_2) \cdot V''_{s0}$ 。式(5)仅考虑了土层埋深对剪切波速的影响关系, 未考虑地下水位这个影响因素, 故引入地下水位这一变量:

$$V_{\text{scr}} = V_{s0} \cdot \left(\frac{d_s}{d_s + k_1} + k_2 \right) (1 + k_3 d_w), \quad (6)$$

式中, d_w 为地下水位, k_3 为待定参数。

对于 3 个待定参数的取值范围, 有如下要求: 假定地下水位不变, 剪切波速随土层埋深增加而增加, 则 k_1 须为正, 考虑液化层范围为 0~30 m, k_1 取值需

与 d_s 均衡影响, 故考虑范围: $0 < k_1 \leq 30$; 当地下水位和土层埋深均取 0 时, $V_{\text{scr}}=k_2 \cdot V_{s0}$, 为曲线上最左边点的坐标, 故有 $0 < k_2 < 1$; 由于液化临界值与地下水位是负相关的关系, 故有 $k_3 < 0$, 但考虑实际工程中剪切波速不能出现负值, 有 $1 + k_3 d_w > 0$, 由液化资料可知, d_w 范围是 0~7 m, 则有 $k_3 > -0.14$, 则 k_3 范围为 $-0.14 < k_3 < 0$ 。

对于剪切波速基准值 V_{s0} 的取值问题, 如图 3 所示。将数据库中的液化和非液化数据点根据加速度区间表示在坐标轴上, 基准值的设置应尽可能将液化和非液化点分开, 不难看出 0.1g 时基准值取 130~155 m/s, 0.15g 时取 150~170 m/s, 0.2g 时取 170~180 m/s, 0.3g 取 180~200 m/s, 0.4g 取 190~215 m/s。

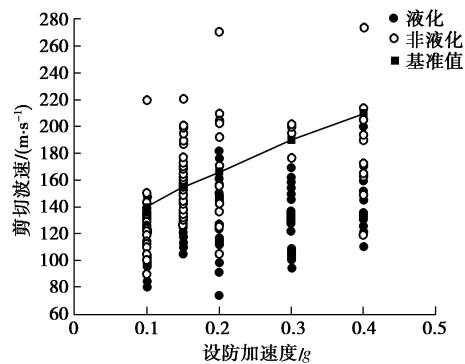


图 3 剪切波速基准值估计

Fig. 3 Estimation of reference values of shear-wave velocity

综上分析, 确定了 3 个待定参数和剪切波速基准值 V_{s0} 的取值范围, 将 Andrus 数据库的液化和非液化数据样本带入已经编好的 Matlab 程序中, 回归分析出一组最优解: $k_1=10.5$, $k_2=0.49$, $k_3=-0.0005$ 。

由此, 本文得到基于剪切波速的土壤液化判别公式如下(简称双曲线公式, 下同):

$$V_{\text{scr}} = V_{s0} \cdot \left(\frac{d_s}{d_s + 10.5} + 0.49 \right) (1 - 0.0005 d_w), \quad (7)$$

式中, V_{s0} 取值由表 4 所示。若计算得到的 V_{scr} 大于实测剪切波速 V_s , 则该土层判别为液化, 否则为不液化。

表 4 不同加速度下 V_{s0} 取值Table 4 Reference values of V_{s0} under different intensities

a_{\max}/g	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4
$V_{s0}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	155	167	177	195	210

V_{s0} 取值时, 应根据《中国地震动参数区划图》^[16]规定的目标场地所在地区设防加速度按表 4 取值, 或将实际使用的加速度按《中国地震动参数区划图》规定的峰值加速度分区表确定其所在的加速度分区后按表 4 取值。

细粒含量对液化势有影响, 但能不能忽略要看具体情况。基于剪切波速的 Andrus 液化判别临界曲线表

明, 细粒含量对液化临界曲线有影响, 但影响不大。文献[14]的研究结果显示, 对细粒含量小于5%和大于35%这两种极端情况, 在CRR非常大的极端情况下临界曲线的变化范围很窄, 仅为200~215 m/s, 对于一般的CRR情况变化范围就更小。位于两条临界曲线中的液化点约为4个, 非液化点约为8个, 相比于该文章中的225个数据, 只占5%左右。也就是说, 忽略细粒含量对判别结果的影响最大不超过5%, 对于一般情况, 误差也只有3%左右。同时, 已有研究结果^[19-20]也表明, 细粒含量对液化临界剪切波速影响甚小。因此, 可以认为细粒含量对基于剪切波速的液化判别影响很小, 本文公式适用于砂土和粉土的液化判别。

但是, 如果采用标准贯入试验, 细粒含量对液化势的影响则不可忽视。对细粒含量小于5%和大于35%这两种极端情况, Seed等^[21]给出的临界标贯击数在CRR非常大的极端情况下其变化范围很大, 为20~30击, 对于一般的CRR情况下变化范围也较大, 不可忽略。

总之, 是否考虑细粒含量对液化势的影响, 会因采用的指标不同而不同。采用标准贯入试验的液化判别方法, 细粒含量的影响需要考虑; 采用剪切波速试验的液化判别方法, 细粒含量的影响可以忽略, 不需考虑细粒含量对临界剪切波速的修正, 即式(7)适用于砂土和粉土的液化判别。

3.3 回判成功率分析

由式(7)的双曲线公式对Andrus数据库进行回判分析, 得到的回判成功率如表5所示。

表5 双曲线公式回判成功率

Table 5 Success rates of proposed method (%)

类型	VII度	VIII度	IX度	总体成功率
液化	75	78	92	80
非液化	65	69	60	65
平均	70	74	76	73

由表5可知, 双曲线公式对Andrus的剪切波速数据样本回判结果为: VII度时液化和非液化场地成功率分别为75%和65%, 平均为70%, 回判结果较均衡; VIII度时液化和非液化场地成功率分别为78%和69%, 平均为74%, 回判结果良好; IX度时液化和非液化场地成功率分别为92%和60%, 平均为76%, 回判结果略偏于保守。综合来看在每个烈度判别结果都在70%左右, 比较均衡。IX度偏于保守的原因可能在于数据点较少, Andrus数据库中只有23个数据。

将本文所提出的方法与现有的两种代表性方法进行对比, 结果如图4所示。由图4可以看出, 本文方

法较Andrus方法和岩规方法在不同烈度条件下均表现较为均衡, 克服了现有方法严重保守的缺点, 在整体成功率上有一定提高。

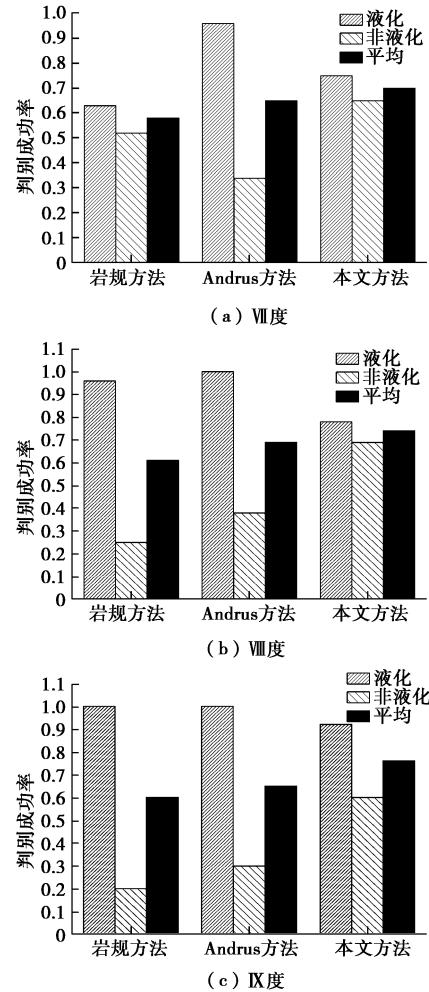


图4 本文方法与其他方法对Andrus数据库判别成功率对比

Fig. 4 Discrimination results of proposed formula and existing methods using Andrus database

3.4 新数据对方法的检验

Kayen等^[20]2013年给出了自己收集整理的包含415组数据的剪切波速液化判别数据库, 本文对该数据库与原Andrus数据库进行了对比, 剔除了二者重复的及加速度小于0.05g和大于0.75g的数据后, 形成了新的数据库。该数据库包含291组液化数据和112组非液化数据, 总计403组, 具体数据分布如表6所示(简称为Kayen数据库, 下同)。

表6 Kayen数据库

Table 6 Database from Kayen

烈度	液化	非液化	总数
VII	47	58	105
VIII	109	24	133
IX	135	30	165
总数	291	112	403

Kayen 数据库增加了一些深层数据, 原 Andrus 数据库中大于 10 m 的只有 2 个, 液化和非液化各 1 个。新数据库中大于 10 m 的则扩大为 13 个, 液化 8 个和非液化 5 个, 液化点最深为 18.5 m, 非液化最深为 16 m, 这对以往判别方法缺少在深层的检验是一个很好的补充。

针对 Kayen 数据库, 采用本文双曲线式(7)、Andrus 法及岩规法得到的检验结果如表 7 所示。从表中可以看出, 3 种方法的总体成功率都在 70% 左右, 基本相等, 但岩规法和 Andrus 法的液化总成功率为 93% 和 94%, 而非液化场地成功率只有 42% 和 55%, 严重偏于保守。而本文提出的双曲线判别方法对于液化和非液化的总成功率为 75% 和 71%, 较为均衡。

表 7 三种方法对 Kayen 数据库的判别成功率

Table 7 Verification of proposed formula and existing methods using Kayen database (%)

烈度	液化情况	岩规法	Andrus 法	本文方法
VII 度	液化	68	94	62
	非液化	53	47	66
	平均	61	70	64
VIII 度	液化	94	99	78
	非液化	42	54	71
	平均	68	77	74
IX 度	液化	100	90	78
	非液化	20	73	80
	平均	60	81	79
总体	液化	93	94	75
	非液化	42	55	71
	平均	67	75	73

将 Kayen 数据库的数据按土层埋深 10 m 为界, 分成小于 10 m 的浅层和大于 10 m 的深层两部分, 分别检验, 3 种方法判别成功率示于图 5。由图 5(a) 可知, 对于浅层情况, 岩规法和 Andrus 法的液化总成功率为 93% 和 94%, 而非液化场地成功率只有 43% 和 54%, 严重偏于保守, 而本文提出的双曲线判别方法对于液化和非液化的总成功率为 75% 和 70%, 较为均衡。由图 5(b) 可知, 岩规法对于 8 个深层的液化点给出了正确的判别, 成功率为 100%; 但对于 5 个深层非液化点判为液化点, 成功率为 0。这一检验结果表明, 中国现行岩规法的确过于保守, 不适用于深层土液化判别。对深层土, 本文方法和 Andrus 法液化判别成功率分别为 88% 和 100%, 非液化均为 80%, 可用于深层土壤的液化判别, 但 Andrus 法临界剪切波速曲线深层处存在回弯的不合理现象。

3.5 曲线形式对比

为得到一般性的认识, 将本文双曲线公式(7)、

Andrus 法及岩规法在 3 个加速度下的临界曲线随深度的变化对比示于图 6, 其中地下水位取为 2 m。

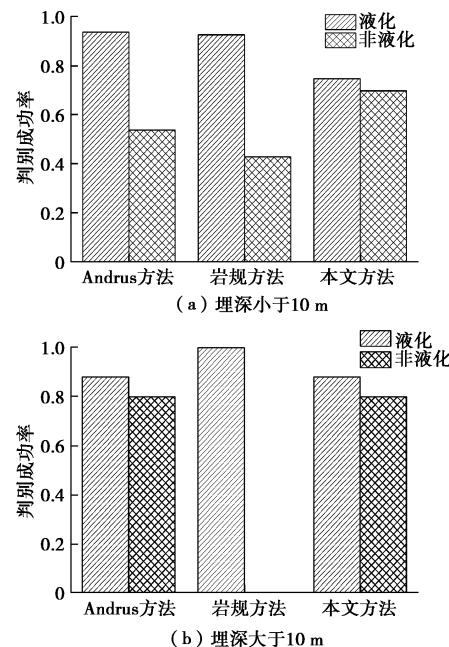
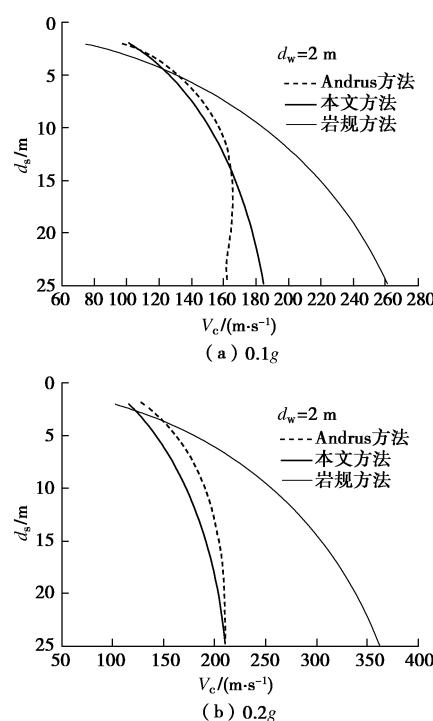


图 5 本文方法与其他两种方法总体判别成功率对比

Fig. 5 Comparison between proposed formula and existing methods

从图 6 中可以看出, 0.1g 时, 浅层土壤下本文方法与 Andrus 法形式定性较接近, 但在 13 m 后, Andrus 法临界曲线出现了不正常的回弯现象。0.2g 和 0.4g 情况下, 本文方法与 Andrus 方法的曲线形式定性也较接近。从图 6 中还可以看出, 无论是深层还是浅层, 岩规法均过于保守, 0.4g 时深层临界剪切波速达到了 500 m/s, 这一波速已接近基岩, 十分不合理。



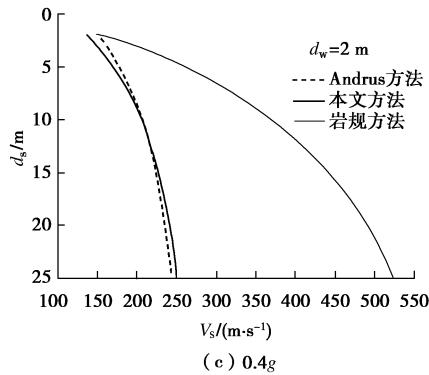


图 6 本文方法与其他两种方法液化判别临界曲线对比

Fig. 6 Relation curves of V_{scr} and d_s from different methods

4 新公式误差讨论

标准贯入试验是使用最广泛的土壤液化判别方法, 目前对浅层和深层土液化判别的成功率可以达到80%以上^[22]。对于剪切波速, 本文所提出的双曲线模型虽较Andrus法及岩规法都要有更合理的表现, 但最终的成功率为70%左右, 较标贯方法的准确性还有10%左右的差距。

陈卓识等^[23]曾组织国内47家单位, 采用12种主流单孔法波速测试仪器在国内20个不同类型的场地上, 完成了剪切波速测试误差专项试验。试验结果表明, 对于所有类别的场地, 现场剪切波速测试标准差为15%, 勘察水平较高的甲级院的测试标准差为7.5%。

将本文剪切波速液化临界曲线和考虑其7.5%误差的液化临界曲线示于图7, 同时将相应的液化点及非液化点也示于图中。可以看出, 绝大多数误判点位于测试误差线范围内, 只有少数误判点在7.5%误差线范围外。如果将7.5%误差线范围内的点均认为可得到正确结果, 则所有291个液化点中有262个为正确判别, 43个点位于 V_{scr} 和 $V_{scr}+7.5\%$ 两条临界曲线之间; 所有112个非液化点中有89个得到正确判断, 10个点位于 V_{scr} 和 $V_{scr}-7.5\%$ 两条临界曲线之间。将未考虑剪切波速测试误差与考虑误差的判别成功率的对比列于表8, 可以看出, 考虑误差后液化点的判别成功率总体提高了约15%, 虽然非液化成功率有所下降, 但仍比表7中其他两个方法和非液化成功率高。

由此可以判断, 剪切波速液化判别的成功率不是十分理想的主要原因在于其测试误差较大, 数据离散性较标贯更大一些。因此, 在采用剪切波速进行液化判别时, 应注意测试的规范性, 同时, 宜采取多孔或同一钻孔多次测试, 以减少数据的离散性。

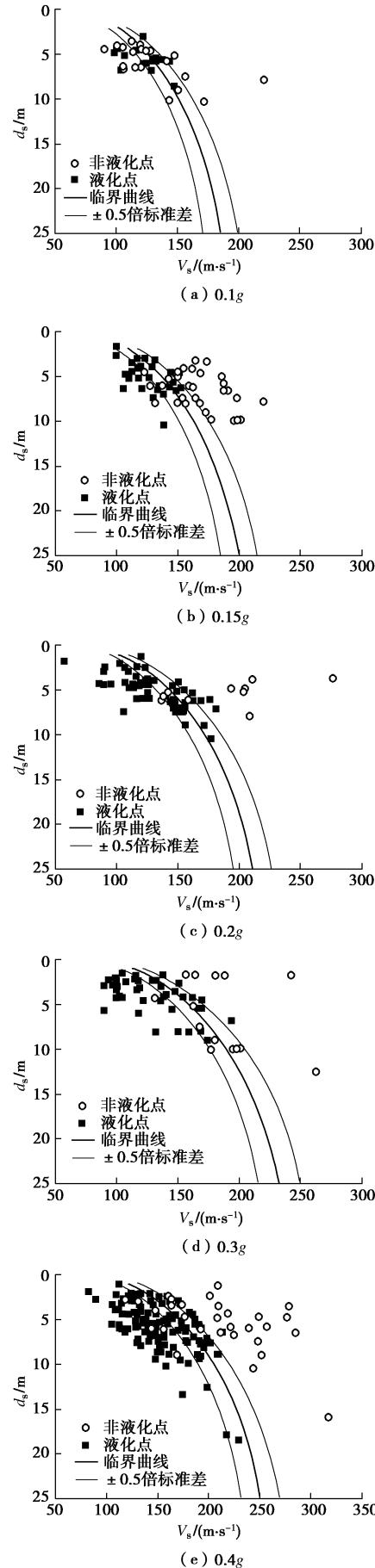


图7 考虑测试误差的本文剪切波速临界线

Fig. 7 Relationship between V_{scr} and d_s by considering test errors

表 8 剪切波速测试误差对判别成功率的影响

Table 8 Effects of test errors on success rates of proposed method

烈度	液化情况	(%)	
		公式(7)	公式(7)±7.5%
VII度	液化	62	89
	非液化	66	66
	平均	64	78
VIII度	液化	78	83
	非液化	71	50
	平均	74	67
IX度	液化	78	90
	非液化	80	67
	平均	79	79
总体	液化	75	90
	非液化	71	63
	平均	73	77

5 结 论

对国内外现有典型剪切波速液化判别方法进行研究, 利用早期的 Andrus 数据库对中国《岩土工程勘察规范》方法和 Andrus 方法进行检验, 发现了二者存在的问题, 提出了双曲线形式的判别模型, 采用新的 Kayen 数据库对三者进行了对比检验, 并根据最新研究进展讨论了提高判别精度的可能性和方式。主要结论为:

(1) 中国现行的《岩土工程勘察规范》中剪切波速判别液化方法, 无论对浅层还是深层砂土, 判别结果均十分保守, 高烈度下甚至会把十分密实的砂土判成液化, 十分不合理。

(2) 检验结果表明, 国际上应用广泛的 Andrus 方法对浅层土判别结果严重保守, 对深层土判别成功率可以接受, 但其临界剪切波速曲线深层处存在回弯的不合理现象。

(3) 本文所提出的剪切波速双曲线液化判别模型, 能够深浅兼顾, 无论对浅层还是深层土都能给出较好的判别结果, 克服了中国规范方法和 Andrus 方法的弊端, 且形式简单便于工程应用。

(4) 采用剪切波速进行液化判别时, 应采取多次测试, 降低数据的离散性, 以此提高数据的可靠性和判别的准确性。

参 考 文 献:

- [1] 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))

- [2] 李兆焱, 袁晓铭. 2016 年台湾高雄地震场地效应及砂土液化破坏概述[J]. 世界地震工程, 2016, 36(3): 1–7. (LI Zhao-yan, YUAN Xiao-ming. Seismic damage summarize of site effect and soil liquefaction in 2016 Kaohsiung earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2016, 36(3): 1–7. (in Chinese))
- [3] 黄 雨, 于 瑜. BHATTACHARYA Subhamoy. 2011 年日本东北地区太平洋近海地震地基液化灾害综述[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 834–840. (HUANG Yu, YU Miao, BHATTACHARYA Subhamoy. Review on liquefaction-induced damages of soils and foundations during 2011 of the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Japan)[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 834–840. (in Chinese))
- [4] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 2010. (GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. 2010. (in Chinese))
- [5] GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 2009. (GB 50021—2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. 2009. (in Chinese))
- [6] GB 50487—2008 水利水电工程土质勘察规范[S]. 2008. (GB 50487—2008 Code for engineering geological investigation of water resources and hydropower[S]. 2008. (in Chinese))
- [7] 曹振中, 刘荟达, 袁晓铭. 基于动力触探的砾性土液化判别方法通用性研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(1): 163–169. (CAO Zhen-zhong, LIU Hui-da, YUAN Xiao-ming. Reliability of Chinese dynamic penetration test for liquefaction evaluation of gravelly soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(1): 163–169. (in Chinese))
- [8] 汪闻韶. 剪切波速在评估地基饱和砂层地震液化可能性中的应用[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(6): 655–658. (WANG Wen-shao. Utilization of shear wave velocity in assessment of liquefaction potential of saturated sand under level ground during earthquakes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(6): 655–658. (in Chinese))
- [9] 柯 翰, 陈云敏. 改进的判别砂土液化势的剪切波速法[J]. 地震学报, 2000, 22(6): 637–644. (KE Han, CHEN Yun-ming. An improved method for evaluating liquefaction potential by the velocity of shear-waves[J]. ACTA

- Seismologica Sinica, 2000, **22**(6): 637 – 644. (in Chinese))
- [10] 周燕国, 陈云敏, 柯 翰. 砂土液化势剪切波速简化判别的改进[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(13): 2369 – 2375. (ZHOU Yan-guo, CHEN Yun-min, KE Han. Improvement of simplified procedure for liquefaction potential evaluation of sands by shear wave velocity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(13): 2369 – 2375. (in Chinese))
- [11] 石兆吉, 郁寿松, 丰万玲. 土壤液化势的剪切波速判别法 [J]. 岩土工程学报, 1993, **15**(1):74 – 80. (SHI Zhao-ji, YU Shou-song, FENG Wan-ling. Evaluating soil liquefaction potential by the velocity of shear-waves[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, **15**(1): 74 – 80. (in Chinese))
- [12] 王德咏, 罗先启, 吴雪萍. 剪切波速与标准贯入击数 N 值的关系研究[J]. 路基工程, 2010(3): 29 – 31. (WANG De-yong, LUO Xian-qi, WU Xue-ping. Study on the relationship between shear wave velocity and standard penetration compaction number N [J]. Subgrade Engineering, 2010(3): 29 – 31. (in Chinese))
- [13] 邱志刚, 薄景山, 罗琦峰. 土壤剪切波速与标贯击数关系的统计分析[J]. 自然灾害学报, 2012, **21**(2): 102 – 107. (QIU Zhi-gang, BO Jing-shan, LUO Qi-feng. Statistical analysis of relationship between shear wave velocity and standard penetration test blow count[J]. Journal of Natural Disasters, 2012, **21**(2):102 – 107. (in Chinese))
- [14] ANDRUS R D, STOKOE II K H. Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2000, **126**(11): 1015 – 1025.
- [15] 陈龙伟, 袁晓铭, 孙 锐. 2011 年新西兰 Mw 6.3 地震液化及岩土震害述评[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))
- [16] GB 18306—2015 中国地震动参数区划图[S]. 2016. (GB 18306—2015 Seismic ground motion parameters zonation map of China[S]. 2016. (in Chinese))
- [17] 汪云龙, 袁晓铭, 陈龙伟. 基于弯曲元技术的无黏性土剪切波速与相对密度联合测试方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(增刊 1): 3418 – 3423. (WANG Yun-long, YUAN Xiao-ming, CHEN Long-wei. A measurement method for the relationship between shear wave velocity and relative density of cohesionless soils using Bender Elements technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(S1): 3418 – 3423. (in Chinese))
- [18] 刘红帅, 郑 桐, 齐文浩, 等. 常规土类剪切波速与埋深的关系分析 [J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(7): 1142 – 1149. (LIU Hong-shuai, ZHENG Tong, QI Wen-hao, et al. Relationship between shear wave velocity and depth of conventional soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(7): 1142 – 1149. (in Chinese))
- [19] 孔孟云, 陈国兴, 李小军, 等. 以剪切波速与地表峰值加速度为依据的地震液化确定性及概率判别法[J]. 岩土力学, 2015, **36**(5): 1239 – 1252. (KONG Meng-yun, CHEN Guo-xing, LI Xiao-jun, et al. Shear wave velocity and peak ground acceleration based deterministic and probabilistic assessment of seismic soil liquefaction potential[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(5): 1239 – 1252. (in Chinese))
- [20] KAYEN R, MOSS R E S, THOMPSON E M. Shear-wave velocity-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, **139**(3): 407 – 419.
- [21] SEED H B, TOKIMATSU K, HARDER L F, et al. The influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations[J]. Journal of Geotechnical Engineering. 1985, **111**(12): 1425 – 1445.
- [22] 孙 锐, 赵倩玉, 袁晓铭. 液化判别的双曲线模型[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(11): 2061 – 2068. (SUN Rui, ZHAO Qian-yu, YUAN Xiao-ming. Hyperbolic model for estimating liquefaction potential of sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(11): 2061 – 2068. (in Chinese))
- [23] 陈卓识. 现场剪切波速测试误差及其对地震动影响研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2015. (CHEN Zhuo-shi. The study of situ shear wave velocity test error and its effects on ground motion[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2015. (in Chinese))