

姚姜森, 王珏, 李圣, 等. 昆明盆地常规土类剪切波速与埋深的关系研究[J]. 华南地震, 2024, 44(3): 40–50. [YAO Jiangsen, WANG Jue, LI Sheng, et al. Correlation Between Shear Wave Velocity and Burial Depth of Conventional Soil in Kunming Basin[J]. South China journal of seismology, 2024, 44(3): 40–50]

## 昆明盆地常规土类剪切波速与埋深的关系研究

姚姜森, 王 珏, 李 圣, 刘昌伟, 宋晓春, 陆斌斌

(云南省地震局, 昆明 600051)

**摘要:** 依据昆明盆地地震安全性评价中场地钻孔剪切波速资料, 用最小二乘法和非线性回归法探讨了昆明盆地6种常规土类的剪切波速与埋深的关系; 推荐给出常规土类剪切波速与埋深的线性模型、幂函数模型、一元二次多项式模型和复杂函数模型的统计经验公式, 最后利用新建工程的钻孔剪切波速实测值检验上述推荐模型。结果表明: 昆明盆地常规土类剪切波速与埋深存在较强的相关性, 且随埋深的增大, 样本离散程度也随之增大; 文中各个模型的拟合值非常接近实测值, 误差百分比很低, 模型合理可靠。研究结果可为昆明盆地地区钻孔剪切波速的相关工作提供参考。

**关键词:** 昆明盆地; 常规土类; 钻孔; 剪切波速; 埋深; 拟合; 判定系数

中图分类号: P315.9; TU435

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)03-0040-11

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.03.05

## Correlation Between Shear Wave Velocity and Burial Depth of Conventional Soil in Kunming Basin

YAO Jiangsen, WANG Jue, LI Sheng, LIU Changwei, SONG Xiaochun, LU Binbin  
(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 600051, China)

**Abstract:** Based on the shear wave velocity data of site boreholes in the seismic safety evaluation of Kunming Basin, the correlation between shear wave velocity and burial depth of six kinds of conventional soil in Kunming Basin was discussed by the least square method and nonlinear regression method. The statistical empirical formulas for the linear model, power function model, quadratic polynomial model, and complex function model of shear wave velocity and burial depth of conventional soil were recommended. Finally, the above-recommended models were tested by the measured values of borehole shear wave velocity of new projects. The results show that there is a strong correlation between shear wave velocity and burial depth of conventional soil in Kunming Basin, and the degree of sample dispersion increases with the increase in burial depth. The fitting values of each model in this paper are very close to the measured values, and the error percentage is very low. The model is reasonable and reliable. The research results can provide a reference for the related work of borehole shear wave velocity in Kunming Basin.

**Keywords:** Kunming Basin; Conventional soil; Borehole; Shear wave velocity; Burial depth; Fitting; Coefficient of determination

收稿日期: 2024-06-10

基金项目: 云南省地震局青年基金课题(2022K06); 云南省地震工程勘察院有限公司自立项目(2022ZXZL)联合资助。

作者简介: 姚姜森(1988-), 男, 助理工程师, 主要从事地震活动性研究和地震场地反应研究。

E-mail: 529326564@qq.com

## 0 引言

土是一种复杂的地质体,由于成因、结构、成分和沉积环境的不同,使得土层在不同条件下的物理力学性质表现出很大的差别。剪切波速是土的动力特性的重要参数之一,反映了土在动力响应下的惯性作用和波传行为<sup>[1-4]</sup>。土体的剪切波速在岩土地震工程中应用广泛,如用于土层动力学特征分析计算、工程场地特征值计算、地震反应分析、地震危险性分析、建筑物结构设计、地震小区划、岩土工程勘察等方面。目前使用岩土波速测试仪直接在现场进行单孔剪切波速测试是获取可靠剪切波速的最广泛也最有效的手段。但也会受塌孔、测试设备故障、场地条件等影响,无法获取剪切波速的数据<sup>[1,5]</sup>。因此,确定某一地区的剪切波速与土层埋深的相关性,并给出一定的参考公式,具有重要的意义。

目前,大量学者针对剪切波速与埋深的关系进行了研究,如李铁飞等统计分析了玉溪盆地具有不同颗粒特征的土层埋深与剪切波速之间的关系<sup>[6]</sup>;荣棉水等利用最小二乘法,采用6种模型对渤海海域7类土体剪切波速与埋深关系进行回归分析,并给出了最优模型<sup>[7]</sup>;王琦等定性讨论了天津地区不同情况下常见土类剪切波速与埋深的相关性<sup>[8]</sup>;蒋其峰等给出鲁西平原地区粉质黏土的剪切波速与埋深之间经验关系<sup>[9]</sup>;闫振军等统计了华北地区10个城市928个钻孔10703个测点的数据,使用5种函数模型研究探讨了土类剪切波速与埋深的关系<sup>[5]</sup>;乔峰等利用多种一元回归模型研究了廊坊地区常见土类剪切波速与埋深之间的相关性<sup>[4]</sup>。由此可见,在不同地区,相同土层在同一深度的剪切波速之间差别较大,土层剪切波速与埋深之间的相关性以及最优拟合模型因为地质条件的不同而表现出较明显的地域差异。

目前在昆明盆地地区开展较大范围、较大数据样本研究土层剪切波速与埋深关系的工作还比较少。本文搜集了2010年以来昆明盆地地震安全性评价包含钻孔土层剪切波速的报告197份。从报告中整理出钻孔每个土类剪切波速的实测值,通过对这些样本的统计分析,探讨昆明盆地地区常规土类剪切波速与土层埋深的关系,以期获得各常规土类剪切波速与埋深的最优拟合模型。经实例验证,本文的研究成果可为昆明盆地地区开展工程勘察、场地钻孔剪切波速测试等工作提供一定的参考。

## 1 研究区地质背景及数据概况

### 1.1 昆明盆地地质地貌概况

昆明盆地位于云贵高原中部,它是云贵高原上一个较大型的、发育完好的山间断陷盆地,盆地面积1482 km<sup>2</sup>,滇池位于其西南侧的低洼处。盆地西侧沉陷幅度较大,超过1000 m、东侧较平缓。昆明盆地总体地势北部高、南部低;中部隆起,东西两侧较低,大部分地区海拔在1500~2500 m之间,境内水系发达,盆地内部堆积有数百米至千余米的晚新生代上新统一全新统松散沉积物。昆明盆地及其邻区位于扬子准地台一级构造单元内,地层出露有元古界、古生界、中生界及新生界。昆明盆地第四系发育更新统下部滇池组、更新统中部中营组、更新统上部官渡组和全新统海埂组,除滇池组在大部分地区缺失外,地层发育较为完整,分布广泛,厚度变化较大标志层(泥炭层、螺壳层、硅藻土层)发育较好。昆明盆地第四纪沉积环境为更新世早期为河流相—滨湖相;更新世中期为滨湖相—滨浅湖相—滨湖相—河流相;更新世晚期至今为河流相—滨湖相—滨浅湖相—滨湖相—河流相<sup>[10-13]</sup>。

### 1.2 资料收集与整理

本次研究收集到197份报告,共有648个钻孔。最终按照样本数据量的大小选出其中6种常规土类作为研究对象,样本总计6277个,包含了以下6种常规土类:黏土、粉质黏土、粉土、泥炭质土、圆砾、粉砂。样本详细情况见表1,由表1可看出,各土类的样本数量差异很大,黏土样本数量最多,粉砂样本数量最少,同一土类在Ⅱ类场地的样本要远远少于Ⅲ类场地的样本。

图1是钻孔位置分布图,图2是土类样本位置与埋深分布情况的三维散点图。从图2可以看出埋深越深,土类样本的数量越少。

黏土总样本有2302个,埋深范围在0.5~101 m,平均剪切波速225.7 m/s。图3是黏土总样本剪切波速频数分布直方图,黑色曲线是样本分布曲线,其分布特点是两端低,中间高。

Ⅱ类场地黏土样本有593个,埋深范围在0.5~101 m,平均剪切波速229.6 m/s。Ⅲ类场地黏土样本有1709个,埋深范围在0.5~100.7 m,平均剪切波速224.3 m/s。

粉质黏土总样本有1398个,埋深范围在0.3~

表 1 样本概况  
Table 1 Sample overview

岩土类型	未分类样本(个)	Ⅱ类场地样本(个)	Ⅲ类场地样本(个)
黏土	2302	593	1709
粉质黏土	1398	347	1051
粉土	1274	115	1159
泥炭质土	526	46	480
圆砾	434	120	314
粉砂	343	66	277
样本总数	6277	1287	4990

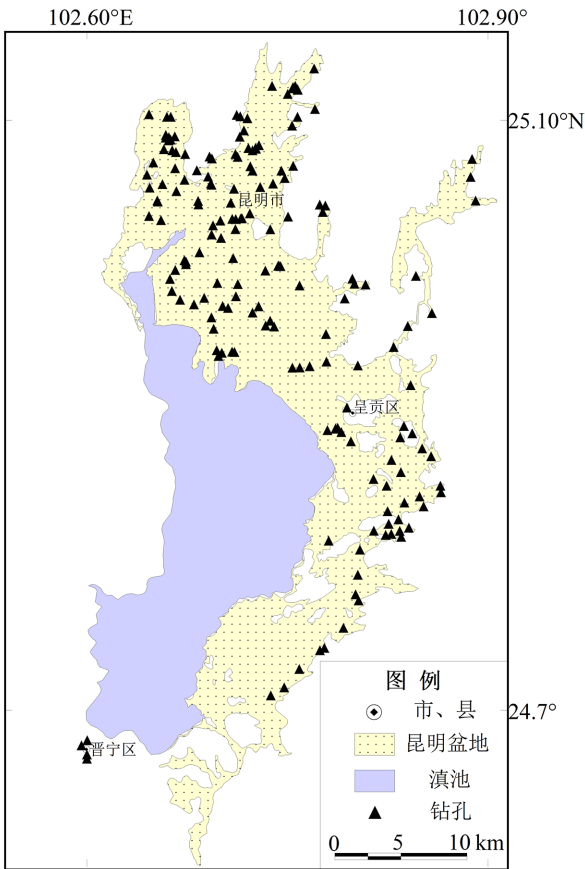


图 1 钻孔位置分布图  
Fig.1 Borehole location

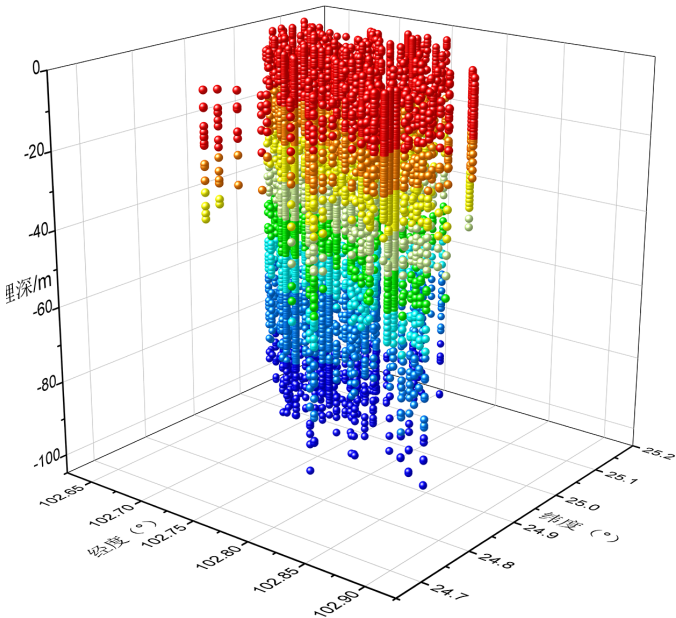


图 2 土类样本位置与埋深三维散点图  
Fig.2 Three-dimensional scatter plot of soil sample position and burial depth

100.5 m，平均剪切波速 252.6 m/s。图 4 是粉质黏土总样本剪切波速频数分布直方图，黑色曲线是样本分布曲线，其分布特点是两端低，中间高。

Ⅱ类场地粉质黏土样本有 347 个，埋深范围在 0.3 ~ 84.1 m，平均剪切波速 226.1 m/s。Ⅲ类场地黏土样本有 1051 个，埋深范围在 0.8 ~ 100.5 m，平均剪切波速 261.4 m/s。

粉土总样本有 1274 个，埋深范围在 0.5 ~ 102.6 m，平均剪切波速 244.5 m/s。图 5 是粉土总

样本剪切波速频数分布直方图，黑色曲线是样本分布曲线，其分布特点是除在 280 ~ 310 m/s 的区间内曲线形成一个波谷，其余部分总体特点仍是两端低，中间高。

Ⅱ类场地粉土样本有 115 个，埋深范围在 0.5 ~ 100.3 m，平均剪切波速 245.0 m/s。Ⅲ类场地黏土样本有 1159 个，埋深范围在 0.7 ~ 102.6 m，平均剪切波速 244.4 m/s。

泥炭质土总样本有 526 个, 埋深范围在 0.5 ~ 100.5 m, 平均剪切波速 174.6 m/s。图 6 是泥炭质土总样本剪切波速频数分布直方图, 黑色曲线是样本分布曲线, 其分布特点是两端低, 中间高。

Ⅱ类场地泥炭质土样本有 46 个, 埋深范围在 0.5 ~ 96.2 m, 平均剪切波速 158.9 m/s。Ⅲ类场地泥炭质土样本有 480 个, 埋深范围在 3.5 ~ 100.5 m, 平均剪切波速 176.1 m/s。泥炭质土样本主要集中在Ⅲ类场地, Ⅱ类场地仅获取到部分样本。

圆砾总样本有 434 个, 埋深范围在 0.5 ~ 100 m, 平均剪切波速 302.5 m/s。图 7 是圆砾总样本剪切波速频数分布直方图, 黑色曲线是样本分布曲

线, 其分布趋势是两端低, 中间高。

Ⅱ类场地圆砾样本有 120 个, 埋深范围在 0.6 ~ 100 m, 平均剪切波速 291.2 m/s。Ⅲ类场地圆砾样本有 314 个, 埋深范围在 0.5 ~ 100 m, 平均剪切波速 307.2 m/s。

粉砂总样本有 343 个, 埋深范围在 1.8 ~ 100.4 m, 平均剪切波速 262.7 m/s。图 8 是粉砂总样本剪切波速频数分布直方图, 其分布趋势是两端低, 中间高。

Ⅱ类场地粉砂样本有 66 个, 埋深范围在 4 ~ 95.5 m, 平均剪切波速 264.8 m/s。Ⅲ类场地黏土样本有 277 个, 埋深范围在 1.8 ~ 100.4 m, 平均剪切波速 262.2 m/s。

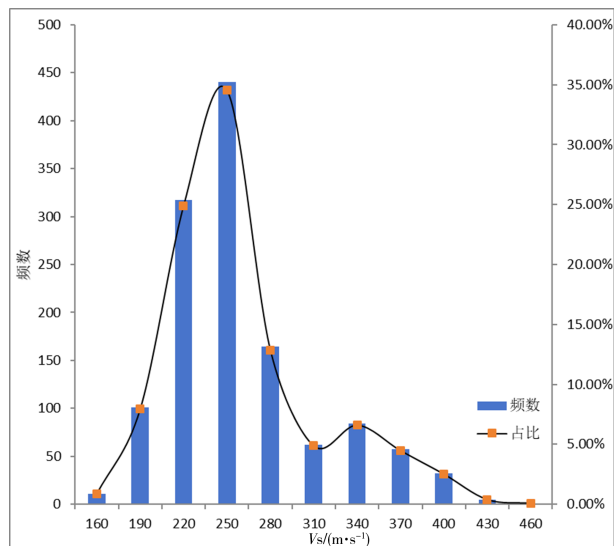


图3 未分类黏土剪切波速频数分布直方图

Fig.3 Frequency distribution histogram of shear wave velocity of unclassified clay

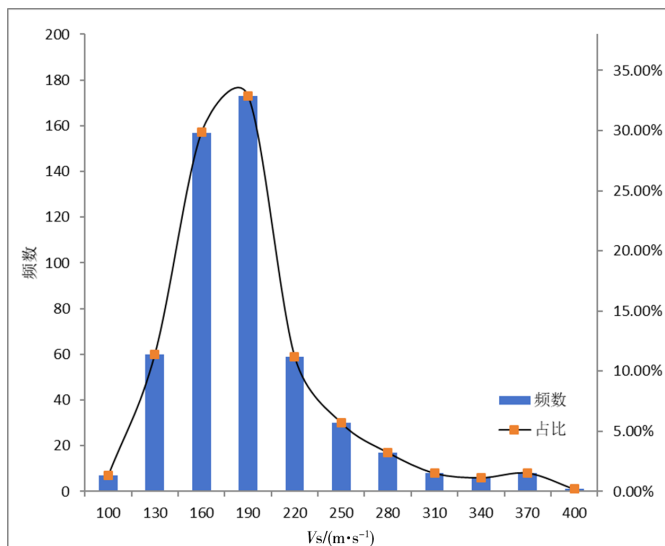


图4 未分类粉质黏土剪切波速频数分布直方图

Fig.4 Frequency distribution histogram of shear wave velocity of unclassified silty clay

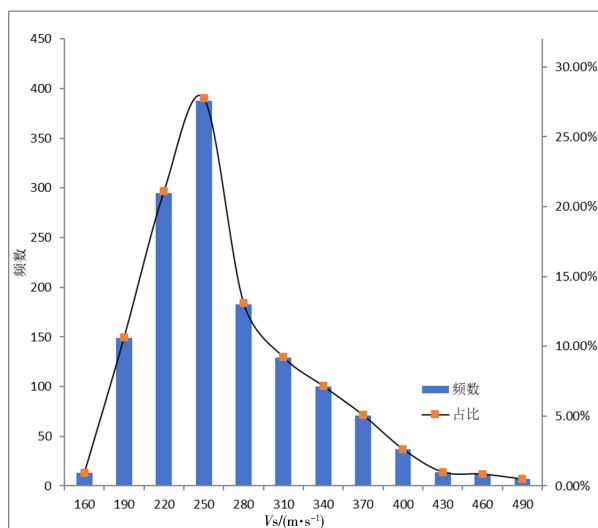


图5 未分类粉土剪切波速频数分布直方图

Fig.5 Frequency distribution histogram of shear wave velocity of unclassified silt

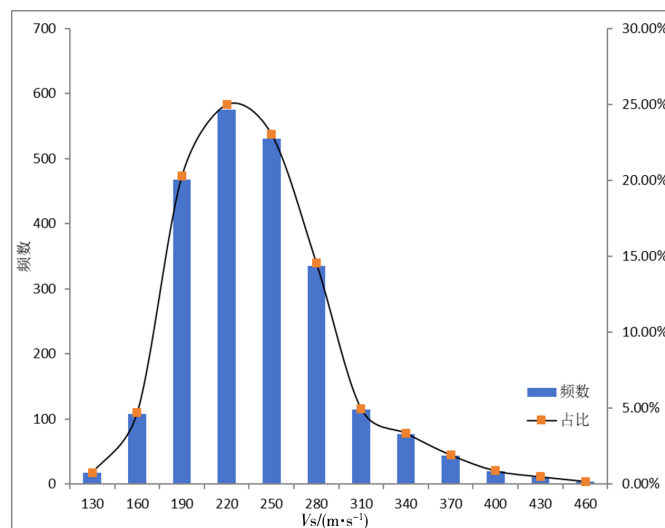


图6 未分类泥炭质土剪切波速频数分布直方图

Fig.6 Frequency distribution histogram of shear wave velocity of unclassified peaty soil



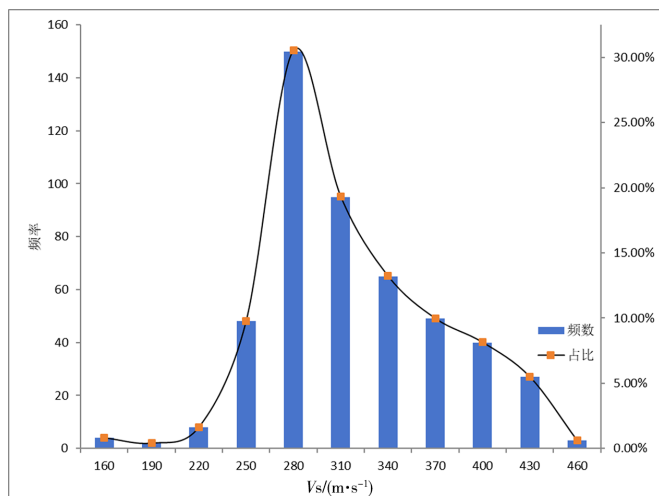


图7 未分类圆砾剪切波速频数分布直方图

Fig.7 Frequency distribution histogram of shear wave velocity of unclassified rounded gravel

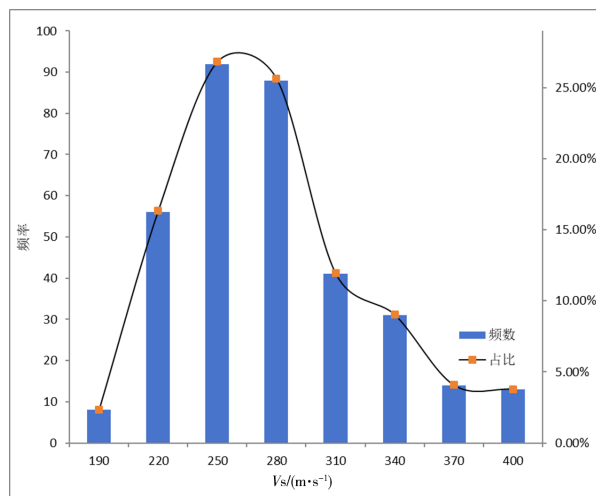


图8 未分类粉砂剪切波速频数分布直方图

Fig.8 Frequency distribution histogram of shear wave velocity of unclassified silty sand

## 2 研究方法及结果分析

### 2.1 统计分析

众多研究成果表明,土层剪切波速与埋深之间的关系可以用线性函数、幂函数及一元二次函数、复杂函数等模型来表示<sup>[1,2,14-17]</sup>。

本文采用式(1)~(4)这4个模型对昆明盆地的黏土、粉质黏土、粉土、泥炭质土、圆砾和粉砂6种常规土类进行统计回归分析。先用同一模型对同一种土类在不分场地类别及区分场地类别(Ⅱ类、Ⅲ类)的情况下进行比较;再用其他模型对该土类逐一进行拟合分析,对比找出4个模型中的最优模型。

$$\text{线性函数模型: } V_s = aH + b \quad (1)$$

$$\text{幂函数模型: } V_s = aH^b \quad (2)$$

$$\text{一元二次函数模型: } V_s = aH^2 + bH + c \quad (3)$$

$$\text{复杂函数模型: } V_s = a(H+b)^c \quad (4)$$

上述式子中:  $V_s$  为土体剪切波速(单位: m/s);  $H$  为土体埋深(单位: m);  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为不同模型下的拟合常数,  $R$  是相关系数, 其平方值  $R^2$  称为判定系数, 用来反映回归模式的可靠程度, 最大值为 1,  $R^2$  越接近 1, 说明拟合精度越高; 反之,  $R^2$  的值越小, 说明拟合精度越低。

将黏土、粉质黏土、粉土、泥炭质土、圆砾和粉砂按照式(1)~(4)的4个模型分别进行拟合。

图9~14分别为黏土、粉质黏土、粉土、泥炭质土、圆砾和粉砂6种常规土类样本不分场地类别及分为Ⅱ类、Ⅲ类场地的散点图和模型拟合曲线图(图左下方为各拟合模型的经验公式)。可以看到, 不同土类的样本数量各不相同, 并且散点图分布趋势大不相同。但总体上, 所有土类剪切波速与埋深之间存在较强的关联, 即土类埋深越深, 剪切波速越大。

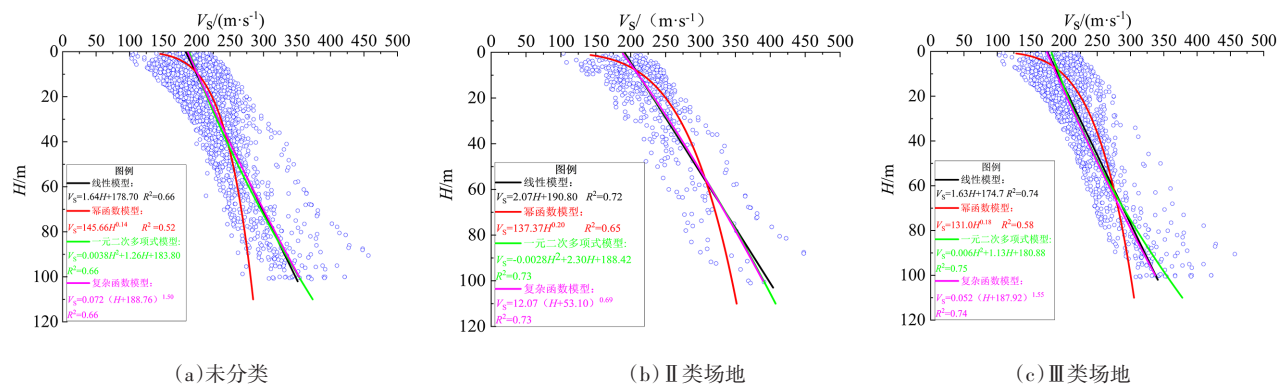


图9 不同场地黏土散点图和各个研究模型拟合曲线

Fig.9 Scatter plot of clay at different sites and fitting curve of each research model

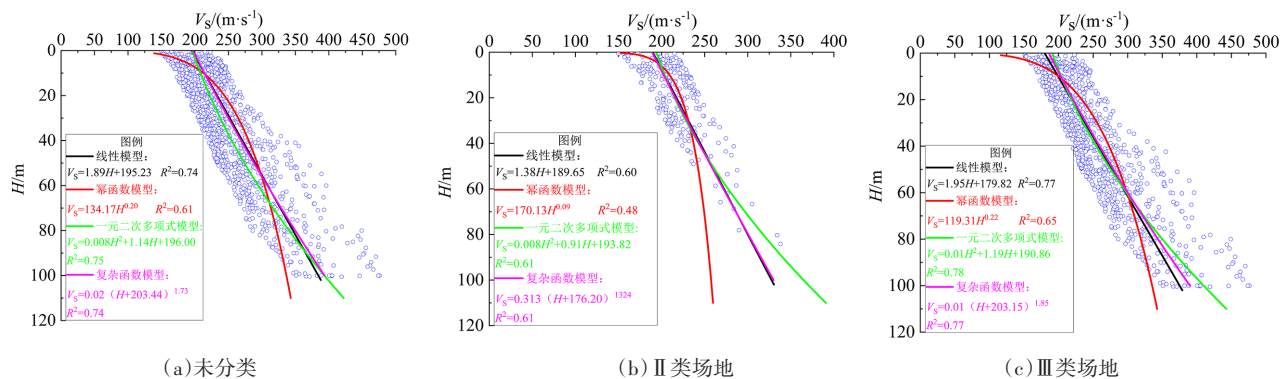


图10 不同场地粉质黏土散点图和各个研究模型拟合曲线

Fig.10 Scatter plot of silty clay at different sites and fitting curve of each research model

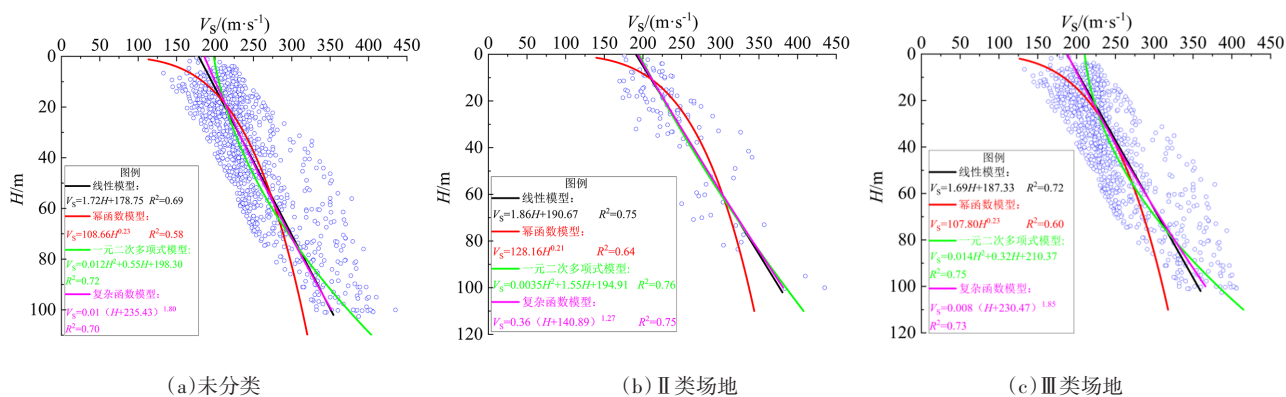


图11 不同场地粉土散点图和各个研究模型拟合曲线

Fig.11 Scatter plot of silt at different sites and fitting curve of each research model

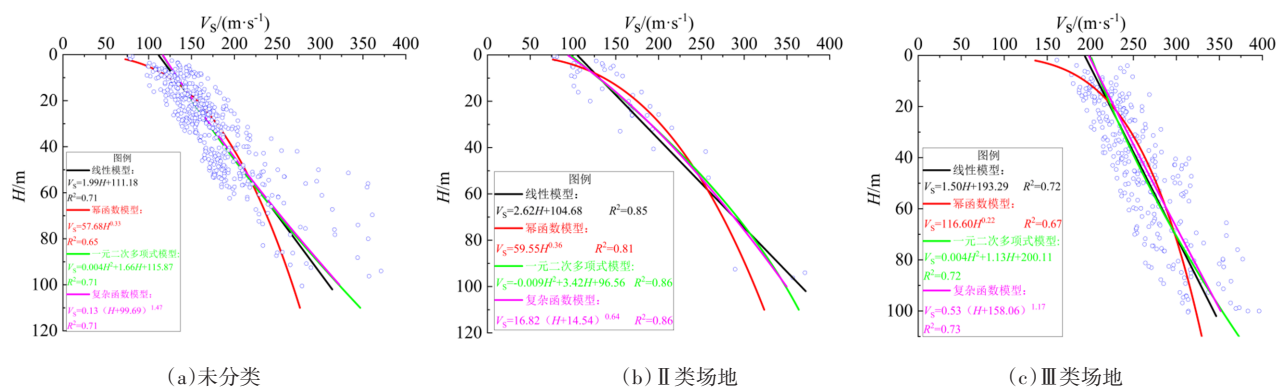


图12 不同场地泥炭质土散点图和各个研究模型拟合曲线

Fig.12 Scatter plot of peaty soil at different sites and fitting curve of each research model

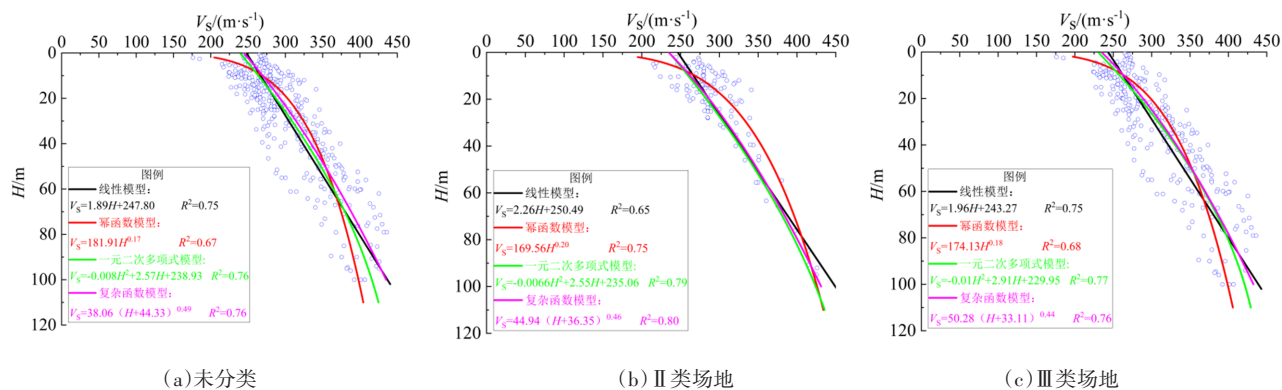


图13 不同场地圆砾散点图和各个研究模型拟合曲线

Fig.13 Scatter plot of rounded gravel at different sites and fitting curve of each research model

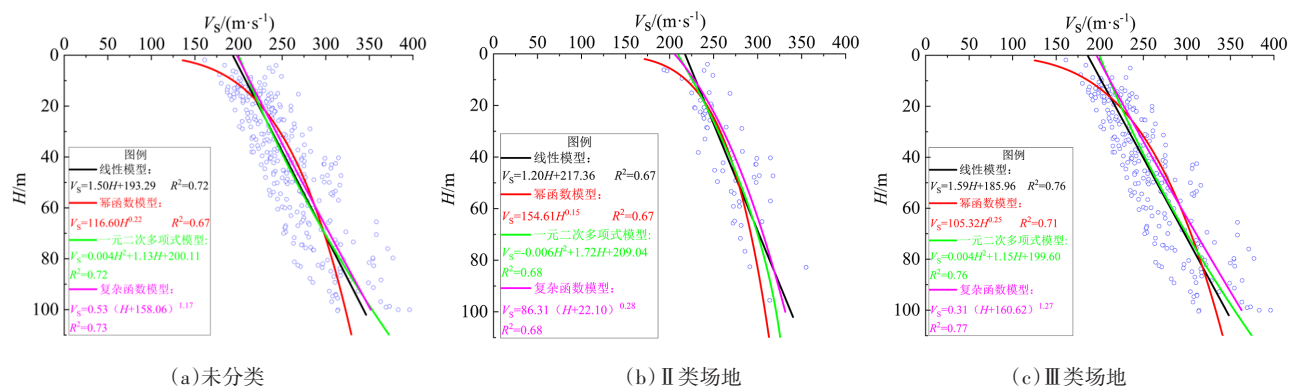


图14 不同场地粉砂散点图和各个研究模型拟合曲线

Fig.14 Scatter plot of silty sand at different sites and fitting curve of each research model

## 2.2 拟合模型特征分析

从图9~14中各模型的拟合曲线可看出：同一深度下，圆砾拟合剪切波速最大；粉砂黏土、粉质黏土、粉土、粉砂拟合剪切波速虽略有差异，但大致差别不大；泥炭质土拟合剪切波速最小。

从黏土未分类的4条拟合曲线(图9a)可以看出，线性模型、一元二次多项式模型和复杂函数模型的曲线走势基本相同，在不同深度时，拟合值大小略有差异。4个模型中，幂函数模型拟合精度最低，判定系数 $R^2$ 是0.52，其余3个模型拟合精度基本一致，判定系数 $R^2$ 为0.66。

黏土II类场地4条拟合曲线(图9b)中，线性模型、一元二次多项式模型、复杂函数模型整体走势基本，在不同深度时，拟合值略有差异，但变化差异不大。4个模型中，一元二次多项式模型、复杂函数模型拟合精度最高，判定系数 $R^2$ 是0.73；线性模型拟合精度仅略微低于上述2个模型，判定系数 $R^2$ 是0.72，幂函数模型拟合精度最低，判定系数 $R^2$ 为0.65。

黏土III类场地4条拟合曲线(图9c)中，线性模型、一元二次多项式模型、复杂函数模型整体走势相似，但线性模型拟合值大于复杂函数模型。4个模型中，一元二次多项式模型拟合精度最高，判定系数 $R^2$ 是0.75；线性模型和复杂函数模型拟合精度稍稍低于一元二次多项式模型，判定系数 $R^2$ 是0.74；幂函数模型拟合精度最低，判定系数 $R^2$ 是0.58。

从粉质黏土未分类的4条拟合曲线(图10a)可以看出，线性模型和复杂函数模型的拟合曲线走势在70 m以内大致相同，70 m以上，复杂函数模型拟合值大于线性模型。4个模型中，幂函数模型

拟合精度最低，判定系数 $R^2$ 是0.61；线性模型、复杂函数模型、一元二次多项式模型拟合精度基本相同，判定系数 $R^2$ 分别是0.74、0.74、0.75。

粉质黏土II类场地4条拟合曲线(图10b)中，线性模型和复杂函数模型走势基本一致。在0~6 m区间，幂函数模型拟合值最小，线性模型和复杂函数模型处于中间，一元二次多项式模型拟合值最大。4个模型中，幂函数模型拟合精度最低，判定系数 $R^2$ 是0.46；线性模型、一元二次多项式模型和复杂函数模型拟合精度基本相同，判定系数 $R^2$ 分别是0.60、0.61、0.61。

粉质黏土III类场地4条拟合曲线(图10c)中，线性模型、一元二次多项式模型、复杂函数模型在0~60 m区间走势基本相同，只在拟合值上有细微差异；在60 m以后，一元二次多项式模型拟合值>复杂函数模型>线性模型。0~10 m区间，幂函数模型拟合值最小，线性模型和复杂函数模型次之，一元二次多项式模型拟合值最大；在约10~60 m范围内，幂函数模型拟合值增至最大，其余3个模型拟合值基本相同；在60 m以上，一元二次多项式模型拟合值最大，复杂函数模型、线性模型次之，幂函数模型拟合值则衰减至4个模型中最小。4个模型中，幂函数模型拟合精度最低，判定系数 $R^2$ 是0.71；线性模型、一元二次多项式模型、复杂函数模型拟合精度高于幂函数模型，判定系数 $R^2$ 是0.79，

从粉土未分类的4条拟合曲线(图11a)可以看出，线性模型、复杂函数模型的曲线走势大致相同，仅在20 m以内，复杂函数模型拟合值略大于线性模型拟合值。4个模型中，幂函数模型拟合精度最低，判定系数 $R^2$ 仅0.58；其次是线性模型，判定系数 $R^2$ 是0.69；再其次是复杂函数模型，判



定系数  $R^2$  是 0.70; 一元二次多项式模型拟合精度最高, 判定系数  $R^2$  是 0.72。

粉土Ⅱ类场地 4 条拟合曲线(图 11b)中, 线性模型、一元二次多项式模型、复杂函数模型走势基本一致。4 个模型中, 幂函数模型拟合精度最低, 判定系数  $R^2$  是 0.64; 线性模型、一元二次多项式模型、复杂函数模型拟合精度基本一致, 判定系数  $R^2$  分别是 0.75、0.76、0.75。

粉土Ⅲ类场地 4 条拟合曲线(图 11c)中, 线性模型和复杂函数模型走势基本一致, 拟合值差异并不大, 仅在 70 m 以上深度, 复杂函数模型拟合值大于线性模型拟合值。4 个模型中, 幂函数模型拟合精度最低, 判定系数是 0.60; 其次是线性模型, 判定系数  $R^2$  是 0.72; 再次是复杂函数模型, 判定系数  $R^2$  是 0.73; 一元二次多项式模型拟合精度最高, 判定系数  $R^2$  是 0.75。

从泥炭质土未分类的 4 条拟合曲线(图 12a)可以看出, 线性模型、一元二次多项式模型、复杂函数模型在 15 ~ 65 m 区间走势基本相同, 拟合值差异并不大; 在 0 ~ 15 m 区间以及 65 m 以上的深度, 复杂函数模型拟合值 > 一元二次多项式模型拟合值 > 线性模型拟合值 > 幂函数模型拟合值。在 15 ~ 50 m 区间, 幂函数拟合值逐渐增大, 并超过其余 3 个模型; 在 50 m 以上, 其拟合值又衰减为 4 个模型中最小。4 个模型中, 幂函数模型拟合精度最低, 判定系数  $R^2$  是 0.65; 线性模型、一元二次多项式模型、复杂函数模型拟合精度相同, 判定系数  $R^2$  是 0.71。

泥炭质土Ⅱ类场地 4 条拟合曲线(图 12b)中, 一元二次多项式模型和复杂函数模型走势比较相似, 在不同深度拟合值略有差异, 但并不大。4 个模型中, 幂函数模型拟合精度最低, 判定系数  $R^2$  是 0.81; 线性模型、一元二次多项式模型、复杂函数模型拟合精度大致相同, 判定系数  $R^2$  分别是 0.85、0.86、0.86。

泥炭质土Ⅲ类场地 4 条拟合曲线(图 12c)中, 在 60 m 深度之内, 线性模型、一元二次多项式模型、复杂函数模型走势大致相同; 在 60 m 以上一元二次多项式模型拟合值 > 复杂函数模型拟合值 > 线性模型拟合值。在 0 ~ 15 m 范围内, 幂函数模型拟合剪切波速最小, 线性模型次之, 一元二次多项式模型和复杂函数模型拟合值较大。在 15 ~ 50 m 区间, 幂函数模型拟合值先逐渐增大, 超过其余 3 个模型; 随后开始衰减, 在 50 m 后衰减成为 4 个

模型中最小。4 个模型中, 幂函数模型拟合精度最低, 判定系数  $R^2$  是 0.65, 线性模型、一元二次多项式模型和复杂函数模型拟合精度基本相同, 判定系数  $R^2$  都是 0.71。

从圆砾未分类的 4 条拟合曲线(图 13a)可以看出, 线性模型、一元二次多项式模型和复杂函数模型的走势大致相似, 在不同深度拟合值大小略有差异。4 个模型中, 幂函数模型拟合精度最低, 判定系数  $R^2$  是 0.67; 线性模型、一元二次多项式模型、复杂函数模型拟合精度大致相同, 判定系数  $R^2$  分别是 0.75、0.76、0.76。

圆砾Ⅱ类场地 4 条拟合曲线(图 13b)中, 线性模型、一元二次多项式模型和复杂函数模型在 65 m 以内走势大致相同, 拟合值虽有差异, 但并不大; 在 65 m 以上, 线性模型拟合值 > 复杂函数模型拟合值 > 一元二次多项式模型拟合值。在 0 ~ 7 m 区间, 幂函数模型拟合值 < 一元二次多项式模型拟合值 < 复杂函数模型拟合值 < 线性模型拟合值; 7 ~ 77 m 区间, 幂函数模型拟合值逐渐增大后衰减, 但仍是 4 个模型中最大; 随后在 77 m 之后拟合值小于线性模型, 在 90 m 后小于复杂函数模型, 在 105 m 后小于一元二次多项式模型, 成为 4 个模型中最小。4 个模型中, 线性模型拟合精度最低, 判定系数  $R^2$  是 0.65; 其次是幂函数模型, 判定系数  $R^2$  是 0.75; 随后是一元二次多项式模型, 判定系数  $R^2$  是 0.79, 复杂函数模型拟合精度最高, 判定系数  $R^2$  是 0.80。

圆砾Ⅲ类场地 4 条拟合曲线(图 13c)中, 一元二次多项式模型和复杂函数模型走势基本一致, 仅在 70 m 以后, 复杂函数模型拟合值显著大于一元二次多项式模型。4 个模型中, 幂函数模型拟合精度最低, 判定系数  $R^2$  是 0.68; 其次是线性模型, 判定系数  $R^2$  是 0.75; 随后是复杂函数模型, 判定系数是 0.76; 一元二次多项式模型拟合精度最高, 判定系数  $R^2$  是 0.77。

从粉砂未分类的 4 条拟合曲线(图 14a)可以看出, 线性模型、一元二次多项式模型和复杂函数模型的曲线走势基本相似, 只是在拟合值上有一些差异。4 个模型中, 幂函数模型拟合精度最低, 判定系数  $R^2$  是 0.60, 线性模型和复杂函数模型拟合精度大致相同, 判定系数  $R^2$  是 0.68; 一元二次多项式模型拟合精度最高, 判定系数  $R^2$  是 0.71。

粉砂土Ⅱ类场地 4 条拟合曲线(图 14b)在不同深度交叉变化, 但总体上在 85 m 深度以内, 复杂



函数模型拟合值大于其余3个模型，在50 m以上，幂函数模型拟合值小于其余3个模型。4个模型中，幂函数模型拟合精度最高，判定系数 $R^2$ 为0.72；线性模型、一元二次多项式模型和复杂函数模型拟合精度大致相同，判定系数 $R^2$ 都是0.61。

粉砂Ⅲ类场地4条拟合曲线(图14c)中，复杂函数模型拟合值总是大于线性模型；在不同深度下，一元二次多项式模型拟合值则在前两者之间变化。4个模型中，幂函数模型拟合精度最低，判定系数 $R^2$ 是0.71；线性模型、一元二次多项式模型和复杂函数模型拟合精度基本相同，判定系数 $R^2$ 分别是0.76、0.76、0.77。

2.3 拟合模型对比讨论

综合分析前文可得如下结论：

(1)整体而言，昆明地区常见的6种土类剪切波速随埋深的增加而增大，具有很强的正相关性，但不同土类之间剪切波速的增大速率各不相同，甚至同一土类不同场地的增大速率也不相同。

(2)在相同模型中，粉质黏土、圆砾和粉砂Ⅱ类场地土类样本拟合的判定系数 $R^2$ 不如对应土类场地不分类的情况下的判定系数 $R^2$ ，其余土类在Ⅱ类、Ⅲ类场地的拟合精度均高于场地不分类的情况，这应是与收集的样本本身的分布特性较离散性有关。

(3)整体上看，幂函数模型拟合精度不如线性模型、一元二次多项式模型和复杂函数模型。幂函数拟合曲线在较浅埋深和较深埋深这两端的拟合值与其余3个模型差异较大。幂函数模型所有的拟合曲线走势都是由小增大，随后又衰减变小，

这是由幂函数自身的数学性质决定的；在统计回归中，复杂函数模型大多数情况下和线性函数走势相似，这与土类样本分布特征相关，使得在拟合时，复杂函数模型的拟合曲线能较真实反映样本分布的情况。

(4)在实际工作中，在未知场地类别的情况下，可参照场地未分类模型选择对应土类最优模型进行推算剪切波速。在钻孔测试时，如已经可以辨别出场地类别，则选择对应类别场地的模型推算土类剪切波速。

3 模型检验

为检验本文推荐模型的可靠性，笔者选取昆明盆地4个新建工程项目的钻孔资料，用土类剪切波速实测值与本文模型拟合值、《构筑物抗震设计规范》(GB 50191-2012)<sup>[19]</sup>推荐公式计算值进行对比，其中误差百分比表示实测值与拟合值之差的绝对值占实测值的百分比。4个新建项目均为Ⅲ类场地，表2详细列出了4个新建项目中6种常规土类在不同埋深剪切波速实测值、本文拟合值和(GB 50191-2012)推荐公式的计算值。在检验时，采用Ⅲ类场地判定系数( $R^2$ )最高的模型来计算拟合剪切波速值。

由表2可知，本文推荐模型的结果较为精确，泥炭质土最大误差百分比为9.1%，其余5种土类最大误差百分比小于6%；除泥炭质土外，其余5种土类最小误差百分比都小于1%，优于(GB 50191-2012)推荐公式，本文拟合结果更接近实测剪切波速，可见本文推荐的模型是合理可靠的。

表2 不同埋深土类的剪切波速模拟值与实测值对比(本文模型和GB 50191-2012模型)

Table 2 The comparison of simulated and measured values of shear wave velocity of soils with different buried depths (model by author and GB 50191-2012 model )

土类名称	埋深/m	实测值/ $V_s(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Ⅲ类场地		(GB50191-2012)推荐公式	
			拟合值	误差百分比(%)	计算值	误差百分比(%)
黏土	6	191.0	187.9	1.6	171.2	10.4
	15	194.81	196	0.6	225.3	15.7
	68	283.0	280.9	0.7	354.6	25.3
	100	348.8	353.9	1.4	398.1	14.1
粉质黏土	5	174.4	170	2.5	162.1	7.1
	20	211.1	218.7	3.6	245.6	16.4
	42	263.2	261.7	0.6	306.9	16.6
	97	365.6	369	0.9	394.5	7.9

(转下表)

(接表2)

土类名称	埋深/m	实测值/ $V_s(m \cdot s^{-1})$	Ⅲ类场地		(GB50191-2012)推荐公式	
			拟合值	误差百分比(%)	计算值	误差百分比(%)
粉土	7	217.4	213.3	1.9	179.3	17.5
	15	215.0	212.7	1.1	225.3	4.8
	30	238.1	235.6	1	277.4	16.5
	71	294.1	303.7	3.2	359.2	22.1
泥炭质土	69	277.0	251.9	9.1	249.3	10
	76	288.0	267.3	7.2	256.7	10.9
	90	312.5	300.8	3.8	270	13.6
	93.4	337.0	309.2	8.2	273	19
圆砾	24	277.8	290.3	4.5	368	32.5
	43	326.0	327.6	0.5	424	30.1
	53.1	328.6	347.3	5.7	446.3	35.8
	65	370.95	370.7	0.1	468.8	26.4
粉砂	11	197.4	202.9	2.8	214.9	8.9
	25.5	230.8	231.5	0.3	263.6	14.2
	74	312.5	317.5	1.6	341.5	9.3
	98	319.0	331.4	3.9	365.6	14.6

4 结论

本文依据昆明盆地地区地震安全性评价的场地钻孔剪切波速资料,用最小二乘法和非线性回归法定性探讨了昆明地区6种常规土类剪切波速与埋深的关系;并推荐给出这6种常规土类在线性模型、幂函数模型、一元二次多项式模型和复杂函数模型下的统计经验公式。为检验推荐模型的合理性和可靠性,选取了昆明地区4个新建工程项目14个钻孔资料,对不同埋深不同土类剪切波速的实测值、本文拟合值和(GB 50191-2012)推荐公式计算值进行检验对比。得出如下结论:

(1)昆明盆地地区常规土类剪切波速与埋深存在较强的相关性,且随埋深不断增大,样本的离散程度也随之增大。

(2)模型检验中,泥炭质土最大误差百分比为9.1%,其余5种土类最大误差百分比不超过6%;除泥炭质土外,其余5种土类最小误差百分比小于1%,可见拟合结果较为精确,优于(GB 50191-2012)推荐公式,表明本文推荐模型是合理可靠的。

(3)建议在实际工作中,可灵活选择本推荐模型不同深度区间的不同模型,也可多个模型结合去推算土类的剪切波速。

本文仅考虑了昆明盆地地区不同土类的剪切波速与埋深的相关性,并未考虑土类状态、沉积环境、结构或其他物理力学因素对剪切波速的影响,因此,还有待进行更深入更细致的研究。

参考文献

[1] 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.

[2] 蔡润,彭涛,罗东林,等. 成都地区土层剪切波速与埋深的关系[J]. 地震研究,2022,45(3)498-508.

[3] 黄雅虹,吕悦军,彭艳菊,等. 渤海海域黏性土剪切波速与抗剪强度统计关系的初步研究[J]. 中国地震,2020,36(3):527-538.

[4] 乔峰,阮雪飞,王亮,等. 廊坊地区常规土类剪切波速与埋深之间的相关性[J]. 科学技术与工程,2023,23(15):6549-6559.

[5] 闫振军,吕悦军,黄雅虹,等. 华北地区剪切波速与深度之间统计关系的通用模型特征研究[J]. 震灾防御技术,2019,14(2):304-313.

[6] 李铁飞,陈学良,高孟潭. 玉溪盆地浅层土层颗粒特征与剪切波速的关系研究[J]. 地震学报,2016,38(6):934-941.

- [7] 荣棉水,吕悦军,蒋其峰. 渤海常见土类剪切波速与埋深的关系分析[J]. 震灾防御技术,2017,12(2):288-297.
- [8] 王琦,刘红帅,郑桐,等. 天津地区覆盖土层剪切波速与埋深的相关性分析[J]. 地震工程与工程振动,2018,38(6):190-201.
- [9] 蒋其峰,葛孚刚,魏玮. 鲁西平原地区土体剪切波速与埋深关系研究[J]. 世界地震工程,2019,35(3):136-143.
- [10] 肖永林,刘宝珺,罗建宁,等. 云南昆明盆地晚新生代沉积环境的演化[J]. 中国地质科学院院报,1986,(03):145-161.
- [11] 云南省地质矿产局. 云南省区域地质志[M].北京市:地质出版社. 1990.
- [12] 王东辉,陈建强,李明辉. 昆明盆地第四纪沉积物粒度特征及沉积环境分析[J]. 资源与产业,2009,11(05):126-130.
- [13] 张建国,杨润海,赵晋民,等. 昆明活断层探测[M].昆明:云南科技出版社. 2011.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范:GB 50011-2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [15] 张忠利,袁媛,罗云. 北海市土层剪切波速与埋深的关系[J]. 华南地震,2015,35(3):40-45.
- [16] 贺为民,刘明军,杨杰. 土层剪切波速与埋深关系统计分析和应用[J]. 地震地质,2016,38(4):937-949
- [17] 李敏,杨立国,陈海鹏,等. 杭州市典型土层剪切波速与埋深间的关系分析[J]. 震灾防御技术,2020,15(1):77-88.
- [18] 卢大伟,孙逸涵,刘红帅. 常规土类剪切波速与埋深经验公式的可靠性评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2024,54(02):546-557.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 构筑物抗震设计规范:GB 50191-2012[S]. 北京:中国计划出版社,2012.