

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.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(2):546-557. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220271.

Lu Dawei,Sun Yihan,Liu Hongshuai. Reliability Evaluation of Empirical Formula Between Shear Wave Velocity and Depth of Conventional Soils. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(2):546 - 557. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220271.

常规土类剪切波速与埋深经验公式的可靠性评价

卢大伟¹, 孙逸涵², 刘红帅³

1.中再巨灾风险管理股份有限公司,北京 100033

2.唐山热力集团有限公司,河北 唐山 063000

3.河北大学河北省土木工程监测与评估技术创新中心,河北 保定 071002

摘要:国内常规土类剪切波速与埋深的统计关系公式(刘红帅等《常规土类剪切波速与埋深的关系分析》一文中,表2—5中的幂函数和一元二次函数模型公式)作为全国性经验公式,已成为地区经验公式检验对比的重要参考,但缺乏较系统的可靠性评价。为此,选取国内典型地区(北京、鲁西、成都、天津、常州、武汉6个区域)的剪切波速与埋深的统计经验公式,检验全国性常规土类剪切波速与埋深经验公式的可靠性。结果表明:幂函数模型预测的剪切波速随深度增大而增大,符合定性认识,而一元二次模型有可能出现不合理的回弯反常现象,不应继续采用。全国性剪切波速经验公式在不同地区的预测精度差异显著,在大多数地区对于绝大多数土类预测的相对误差总体在±20%以内,在少数地区对于少数土类预测的相对误差超过±20%,仅在近地面20 m内的相对误差较大,最大可达40%左右。建议优先选择适合当地的剪切波速经验公式;当缺乏本地公式,需选用全国性剪切波速幂函数型经验公式时,应先经过本地实测资料检验确认后方可使用;20 m范围的剪切波速最好以实测为准,这有助于降低全国性剪切波速经验公式带来的显著误差。

关键词:常规土类;剪切波速;埋深;可靠性;经验公式

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220271

中图分类号:P642.3

文献标志码:A

Reliability Evaluation of Empirical Formula Between Shear Wave Velocity and Depth of Conventional Soils

Lu Dawei¹, Sun Yihan², Liu Hongshuai³

收稿日期:2022-10-08

作者简介:卢大伟(1980—),男,副研究员,博士,主要从事地震灾害风险方面的研究,E-mail:38206080@qq.com

通信作者:刘红帅(1975—),男,研究员,博士,主要从事岩土地震工程方面的研究,E-mail:liuhs1975@hbu.edu.cn

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资助项目(2019EEEVL0202);河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2020157);河北省自然科学基金项目(E2020201017)

Supported by the Scientific Research Fund of Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration (2019EEEVL0202), the Science and Technology Research Project of Higher Education Institutions in Hebei Province (ZD2020157) and the Natural Science Foundation of Hebei Province (E2020201017)

1. China Re Catastrophe Risk Management Company Ltd., Beijing 100033, China
2. Tangshan Thermal Power Group Co., Ltd., Tangshan 063000, Hebei, China
3. Hebei Technology Innovation Center of Civil Engineering Monitoring and Evaluation, Hebei University, Baoding 071002, Hebei, China

Abstract: The statistical relationship between shear wave velocity and depth for conventional soil types (“Relationship Between Shear Wave Velocity and Depth of Conventional Soils”, by Liu Hongshuai, et al, power function and one-quadratic model equations in Tables 2 to 5) is a national empirical equation. It has become an important reference for testing and comparing empirical equations in many regions, but lacks a more systematic evaluation of reliability. Therefore, the statistical empirical equation of shear wave velocity and depth in typical domestic regions (Beijing, western Shandong, Chengdu, Tianjin, Changzhou and Wuhan) are selected to test the reliability of the empirical equation of the national shear wave velocity and depth of conventional soils. The results show that: The power function model predicts that the shear wave velocity increases with depth, which is consistent with qualitative understanding, while the quadratic model may exhibit unreasonable bending anomalies and should not be used. The prediction accuracy of the national shear wave velocity empirical equation varies significantly in different regions. In most regions, the absolute relative errors of the prediction for the vast majority of soil types are generally less than $\pm 20\%$. The absolute relative errors are larger only within 20 m of the near-surface, with a maximum of about 40%. In a few areas, the absolute relative errors of the prediction are greater than 20%. It is recommended to prioritize the selection of shear wave velocity empirical formulas suitable for local conditions; When there is a lack of local equations and it is necessary to choose the national power function type empirical equations for shear wave velocity, it should be tested and confirmed by the local measured data before use; The shear wave velocity within the 20 m range is best determined by actual measurement, which helps to reduce the significant errors brought by the national shear wave velocity empirical formula.

Key words: conventional soils; shear wave velocity; depth; reliability; empirical equation

0 引言

剪切波速是进行工程抗震设计场地类别划分、场地地震反应分析、砂土液化判别等工作的关键参数。实际工程中,在工程可研阶段,常以收集资料、获取场地地层岩性等基本信息为主;在工程初步勘察阶段,往往只进行钻探,不进行剪切波速等测试;在工程详勘阶段,钻进经常会遇到砂层等特殊地层,造成钻孔塌孔,导致剪切波速测试难以达到规范深度要求等问题。剪切波速对场地设计地震动参数有显著的影响^[1-2]。但是,工程抗震初步设计需要明确场地类别和设计地震动参数,场地地震反应分析等均需输入剪切波速。因此,剪切波速预测早已引起国内外学者和工程师的广泛关注。

国内外学者^[3-12]研究认为,绝大多数常规土类剪切波速与埋深有很强的相关性,并建立了众多常规土类剪切波速与埋深间关系的经验统计模型。其

中:刘红帅等^[5]在《常规土类剪切波速与埋深的关系分析》一文(见《岩土工程学报》,2010,32(7):1142-1149)中,以分场地类别和不分场地类别的思路进行统计,给出了国内常规土类剪切波速与埋深的经验公式作为全国性的统计关系公式(以下简称“全国性剪切波速经验公式”);另外一些学者应用类似的研究思路,分别给出了北京^[6]、鲁西^[7]、成都^[8]、天津^[9]、常州^[10]、武汉^[11]等地区的经验公式。

区域性的成果^[6]表明,全国性剪切波速经验公式在北京地区与实测的相对误差基本在20%以内,大部分测点在10%以内;而在杭州地区^[12]在场地未分类情况下相对误差为18%~51%,Ⅱ类场地下为17%~41%,Ⅲ类场地下为18%~41%,均体现了较大的差异性。这表明土体的剪切波速具有明显的区域性特征,受地质成因等因素的影响显著,同时也表明全国性剪切波速经验公式对不同地区的预测精度明显不同。但是仍有相当数量地区因实测资料的

限制未能建立剪切波速经验公式。因此,有必要明确全国性剪切波速经验公式在什么条件下可以使用,以及如何合理使用。

为此,本文选取北京、鲁西、成都、天津、常州、武汉 6 个区域,检验全国性剪切波速经验公式的可靠性,以期为提高剪切波速预测精度和选取合适的经验公式提供重要参考。

1 全国性剪切波速经验公式特点及模型评价

1.1 公式特点

我国 1989 年和 2001 年建筑抗震设计规范^[13-14]给出了依据岩土类型和性质估算剪切波速的方法:坚硬场地土剪切波速 > 500 m/s;中硬场地土剪切波速 $> 250 \sim \leq 500$ m/s;中软场地土剪切波速 $> 140 \sim \leq 250$ m/s;软弱场地土剪切波速 ≤ 140 m/s。2010 年版建筑抗震设计规范^[15]进行了细分和适当调整:适当扩大了软弱土的范围,将中软土与软弱土的剪切波速界限值由 140 m/s 调整为 150 m/s;增加了岩石类,其剪切波速 > 800 m/s。由此可见,依据岩性给出的剪切波速过于宽泛,难以较准确地确定场地等效剪切波速和建筑场地类别。

《构筑物抗震设计规范》(GB 50191—93)^[16]依据岩性和状态给出剪切波速与埋深的幂函数型预测经验公式,受实测资料的限制,所使用的实测剪切波速多在埋深 20 m 范围内,因此适用范围深度不超过 20 m。刘红帅等^[5]借鉴该规范思路,利用全国地震安评工作中大量钻孔实测剪切波速数据,定性探讨了常规土类剪切波速与埋深间的关系,发现除淤泥质土等特殊土类外,绝大多数常规土类剪切波速与埋深有显著的相关性;采用线性(模型 1)、幂函数型(模型 2)和一元二次函数型(模型 3)3 种数学模型分别建立了分场地类别和不分场地类别两种情况下常规土类(包括碎石土、砂土、粉土和黏性土,不包括淤泥质土)剪切波速与埋深间的统计公式,以拟合优度为评价指标推荐了常规土类的推荐模型及参数。所使用的模型为:

$$\text{模型 1, } v_s = a + bH; \quad (1)$$

$$\text{模型 2, } v_s = cH^d; \quad (2)$$

$$\text{模型 3, } v_s = e + fH + gH^2. \quad (3)$$

式中: v_s 为土体剪切波速 (m/s); H 为土体埋深 (m); a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 和 g 为拟合参数。

分析全国性剪切波速经验公式^[5]的原始统计数据可知:1) II、III 类场地含有碎石土、砾砂、粗砂, IV 类场地基很少见到上述岩土种类;2) 碎石土、砂土、粉土和黏性土的剪切波速分布深度分别超过 50、60、90 和 100 m,基本涵盖了覆盖土层厚度的范围,明显超过了《构筑物抗震设计规范》(GB 50191—93)^[16]的原始数据深度范围。与规范相比,该套经验公式能更准确地给出不同埋深的常规土类的剪切波速值,拓展了剪切波速经验公式的预测深度范围,基本满足规划和初设阶段建筑场地类别划分的实际需求。

1.2 模型评价

根据全国性剪切波速经验公式的拟合优度,刘红帅等^[5]推荐使用幂函数型(模型 2)和一元二次函数型(模型 3),但其文中只给出了部分常规土类剪切波速与埋深的关系曲线^[5]。本文在原始统计数据^[5]的基础上,绘制了模型 2 和模型 3 在原始统计深度范围内属于 II、III 和 IV 类场地中不同土类和不分场地类别的剪切波速与埋深的关系曲线,并与新版《构筑物抗震设计规范》(GB 50191—2012)^[17]中附录 B 推荐的公式进行了对比,如图 1—4 所示。其中:将规范中“固结较差的流塑、软塑黏性土,松散、稍密的砂土”所对应公式的结果称为规范值-下限;将“软塑、可塑黏性土,中密或稍密砂,砾、卵、碎石土”所对应公式的结果称为规范值-均值;将“硬塑、坚硬黏性土,密实的砂、砾、卵、碎石土”所对应公式的结果称为规范值-上限。规范^[17]中将土类别

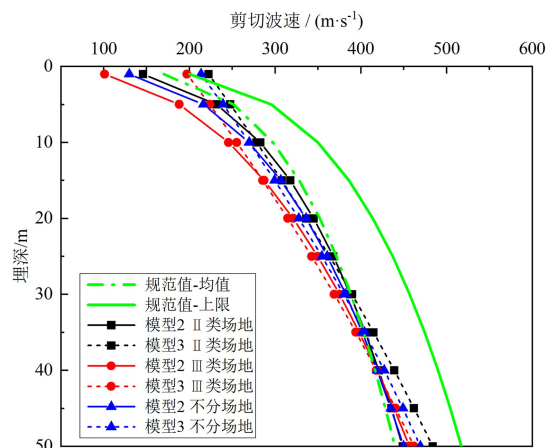


图 1 碎石土类剪切波速与埋深关系

Fig.1 Relationship between shear wave velocity and depth for gravel soil

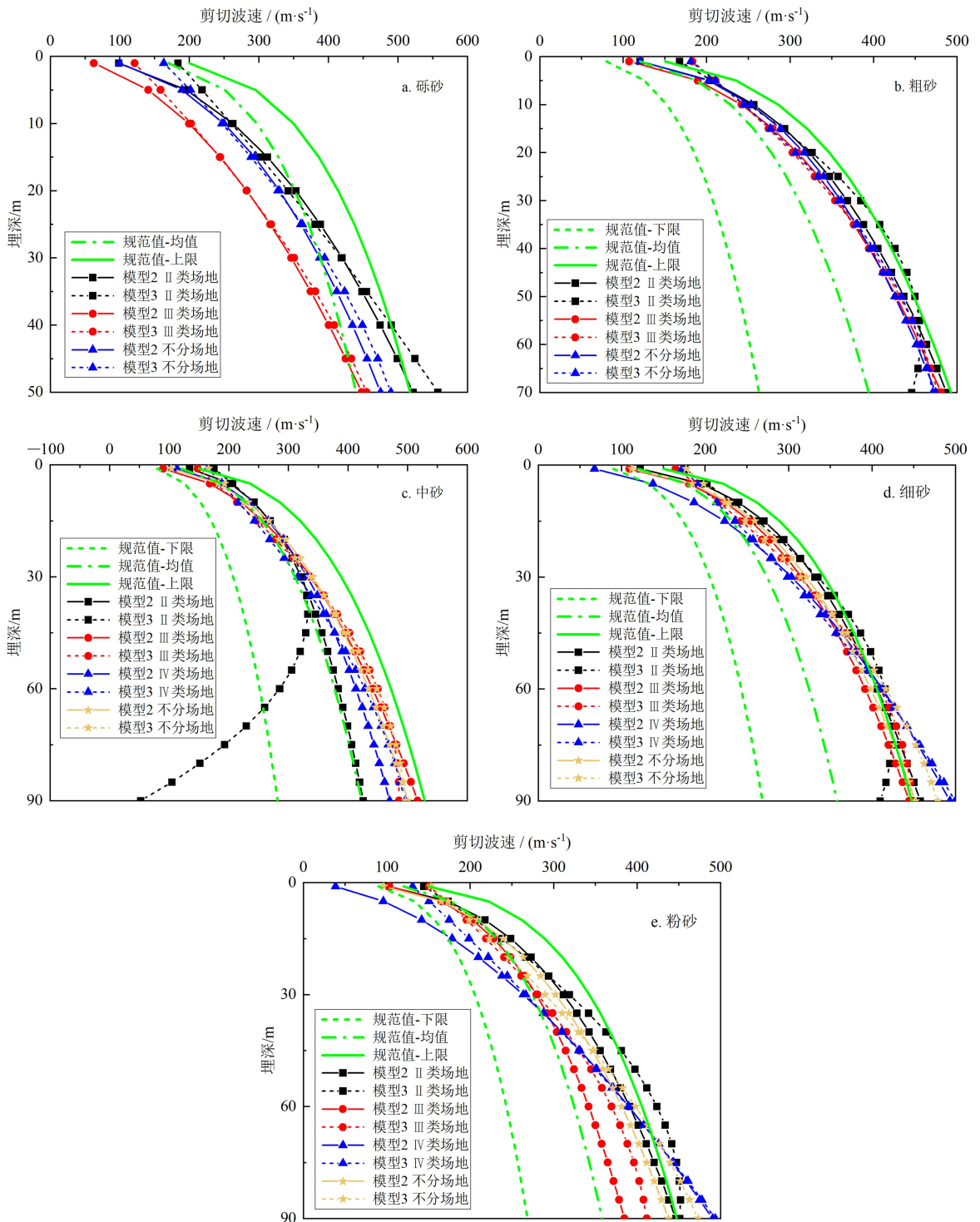


图 2 砂类土剪切波速与埋深关系

Fig.2 Relationship between shear wave velocity and depth for sandy soil

分为四大类,分别为黏性土,粉细砂,中砂、粗砂,卵石、砾砂、碎石。为了便于比较,将规范^[17]中黏性土类别对应本文粉质黏土、黏土的结果,将粉细砂类别

对应本文粉土、细砂、粉砂,将中砂、粗砂类别对应本文中砂、粗砂,将卵石、砾砂、碎石类别对应本文碎石土、砾砂。

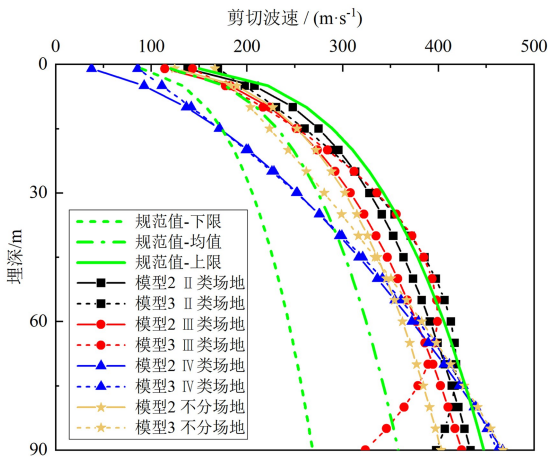


图 3 粉土剪切波速与埋深关系

Fig.3 Relationship between shear wave velocity and depth for silt soil

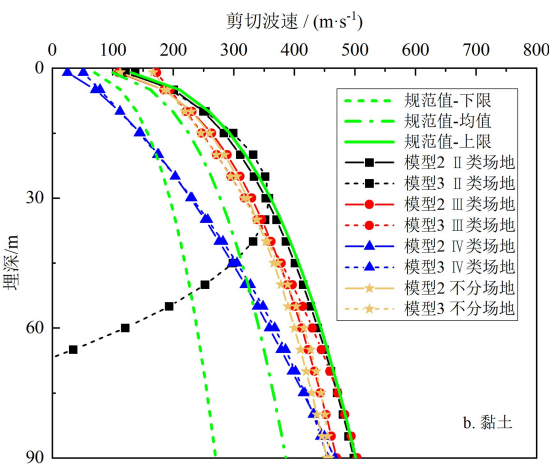
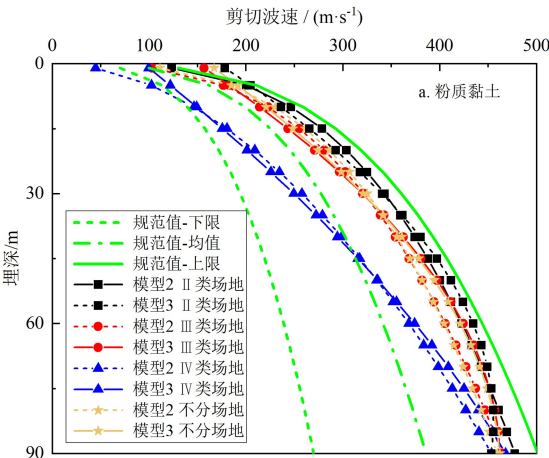


图 4 黏性土剪切波速与埋深关系

Fig.4 Relationship between shear wave velocity and depth for cohesive soil

合已有的认识;2)模型 3(一元二次函数型)预测的粗砂、中砂、细砂、粉砂、粉土、粉质黏土和黏土的剪切波速 II 类场地随深度的增大出现向左回弯现象,即超过某特定深度后随深度增大而减小的异常现象,尤其是中砂和黏土,在埋深超过 30 m 时最为显著。这表明评价模型优劣的指标仅靠拟合优度是不够的,还要从定性的角度分析其合理性。综上所述,全国性经验公式的幂函数模型可靠度最高。

本文进一步按土的类型分析了文献[5]模型 2 预测的剪切波速特征,可知:1)碎石土(图 1)中,随埋深的增大,III 类场地剪切波速的增长速度比 II 类场地的快,当超过某一埋深时,两种场地的剪切波速大小出现相反现象,两者为不分场地的外包络线。2)砂类土(图 2)中,II、III、IV 类场地剪切波速均随埋深的增大而增大(砾砂和粗砂没有 IV 类场地剪切波速);除中砂外,II、III 类场地剪切波速的增长速度基本一致,但 IV 类场地的更快些,大于某一埋深(60 m 左右)时增大加快;在相同埋深下,剪切波速随场地类别等级的增大而减小(IV 类场地除外);II、III 类场地的剪切波速为不分场地的外包络线。3)黏性土(图 4)中,II、III、IV 类场地剪切波速均随埋深的增大而增大,II、III 类场地剪切波速的增长速度基本一致,但 IV 类场地的更快些,在相同埋深下,剪切波速随场地类别等级的增大而减小;II、IV 类场地的剪切波速为不分场地的外包络线。粉土的规律与黏性土相类似。

根据图 1—4 中模型 2(全国性剪切波速经验公式(幂函数型))预测的结果与规范推荐的公式预测的结果对比可以发现:不论是分场地类别还是不分场地类别,除砾石土类(碎石土和砾砂),规范推荐公式没有给出用于预测剪切波速下限的参数外,全国性剪切波速经验公式(幂函数型)预测的结果均在规范推荐的公式预测的上限值、下限值范围内,规范推荐的公式预测的结果为外包络线。

2 全国性剪切波速经验公式的可靠性评价

由前述可知,幂函数型的预测性能更优,因此,这里仅对该类模型的可靠性进行检验。本文可靠性评价以典型地区的经验公式为基准,给出典型地区的经验公式与全国性剪切波速经验公式(幂函数型)预测的相对误差,并结合实测数据,分别得到典型地区的经验公式和全国性剪切波速经验公式预测结果与实测结果的相对误差,涵盖常见的建筑场地类别为 II—IV 类。

从图 1—4 可以看出:1)模型 2 和规范推荐公式(幂函数型)预测的剪切波速随深度增大而增大,符

$$\delta = \frac{v_{s,nat} - v_{s,reg}}{v_{s,reg}} \times 100\%$$

式中: δ 为相对误差; $v_{s,nat}$ 为全国剪切波速经验公式预测结果; $v_{s,reg}$ 为典型地区剪切波速经验公式预测结果。

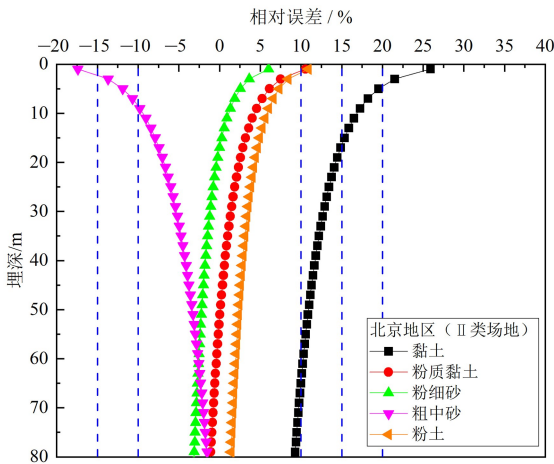
2.1 北京地区对比

乔峰等^[6]通过对北京地区 II 类场地实测剪切波速数据进行拟合,给出了该地区剪切波速与埋深的经验公式,其模型参数的拟合结果见表 1。全国性剪切波速经验公式的相对误差如图 5 所示。

表 1 北京地区 II 类场地常规土类推荐模型

Table 1 Recommended model of conventional soil types for Class II site in Beijing area

| 土体类别 | 推荐模型 | 拟合度 |
|------|-------------------------|-------|
| 黏土 | $v_s = 96.276H^{0.347}$ | 0.823 |
| 粉质黏土 | $v_s = 111.55H^{0.326}$ | 0.835 |
| 粉细砂 | $v_s = 115.29H^{0.314}$ | 0.844 |
| 粗中砂 | $v_s = 145.49H^{0.290}$ | 0.751 |
| 粉土 | $v_s = 124.48H^{0.275}$ | 0.815 |



图中粉细砂对应文献[5]模型的细砂,粗中砂对应文献[5]模型的粗砂。

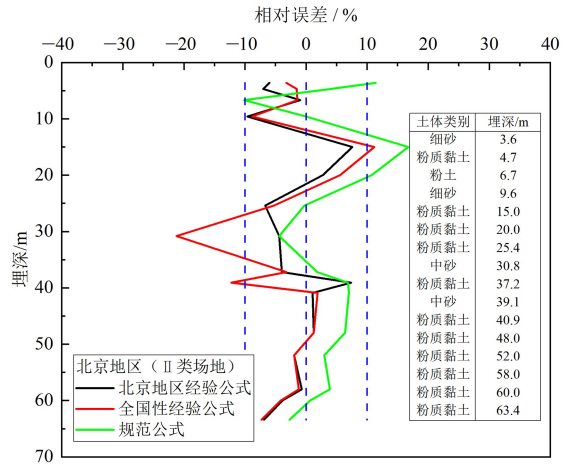
图 5 北京地区相对误差

Fig.5 Relative error of Beijing area

结果表明:北京地区常见土体类别(黏土、粉质黏土、粗中砂、粉土)相对误差的绝对值均随深度的增加不断减小,而粉细砂的先减小后增大。其中,黏土相对误差的绝对值总体大于 10%,粗中砂相对误差的绝对值在 10 m 以内大于 10%。

选取文献[6]表 3 中提供的实测剪切波速数据,分别得到了北京地区经验公式、全国性剪切波速经

验公式和规范公式预测结果与实测结果的相对误差,如图 6 所示。



钻孔剖面值来自文献[6]表 3。

图 6 北京地区经验公式、全国性经验公式和规范公式预测剪切波速与实测剪切波速的相对误差

Fig.6 Relative error between predicted shear wave velocity and measured shear wave velocity of Beijing area empirical equation, national empirical equation, and code equation

结果表明:北京地区经验公式和全国性剪切波速经验公式预测的结果与实测结果的相对误差比较接近,相对误差基本在 $\pm 10\%$ 内,仅当土体类别为中砂,且埋深为 30.8 m 时,全国性剪切波速经验公式预测的结果与实测结果相差较大;而规范公式预测的结果与实测结果的相对误差稍大于另外两种公式,但相对误差基本也在 $\pm 10\%$ 内。可见,除中砂外,采用全国性剪切波速经验公式用于预测北京地区的剪切波速具有较高的可靠性。

2.2 鲁西平原地区对比

蒋其峰等^[7]通过对鲁西平原 III 类场地实测剪切波速数据进行拟合,给出了该地区剪切波速与埋深的经验公式,其模型参数的拟合结果见表 2。全国性剪切波速经验公式的相对误差如图 7 所示。

表 2 鲁西平原 III 类场地常规土类推荐模型

Table 2 Recommended model of conventional soil for Class III site in western Shandong Plain

| 土体类别 | 推荐模型 | 拟合度 |
|------|--------------------------------|-------|
| 粉质黏土 | $v_s = 93.79 + 32.43H^{0.538}$ | 0.800 |
| 黏土 | $v_s = 74.72 + 45.72H^{0.476}$ | 0.830 |
| 粉土 | $v_s = 113.5 + 22.21H^{0.611}$ | 0.900 |

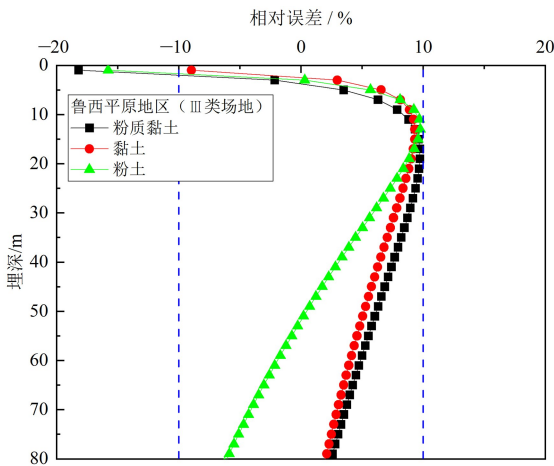
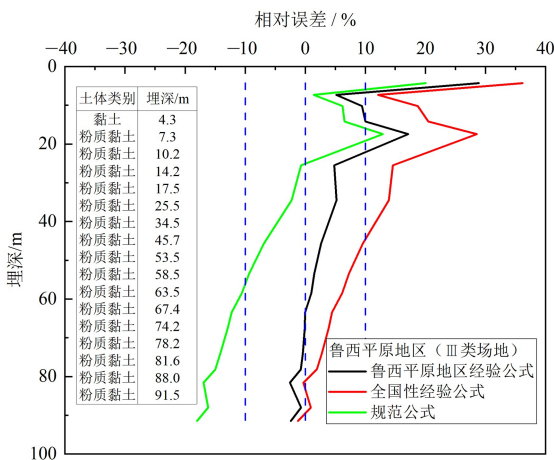


图 7 鲁西平原地区相对误差

Fig.7 Relative error of western Shandong Plain

结果表明:埋深 15 m 以内,鲁西平原粉质黏土、黏土和粉土相对误差的绝对值随深度的增大先减小后增大;超过 15 m 后,黏土和粉质黏土相对误差的绝对值随深度的增大而减小,粉土则先减小后增加。其中,近地表处粉质黏土和粉土相对误差的绝对值大于 10%,其他情形的均小于 10%。

选取文献[7]表 3 中提供的钻孔 1 实测剪切波速数据,分别得到了鲁西平原地区经验公式、全国性剪切波速经验公式和规范公式预测结果与实测结果的相对误差,如图 8 所示。



钻孔剖面值来自文献[7]表 3。

图 8 鲁西平原地区经验公式、全国性经验公式和规范公式预测剪切波速与实测剪切波速的相对误差

Fig.8 Relative error between predicted shear wave velocity and measured shear wave velocity of western Shandong Plain empirical equation, national empirical equation, and code equation

结果表明:埋深 40 m 以内,规范公式预测的结果比较接近实际,相对误差基本在±10%内,而鲁西平原地区经验公式、全国性剪切波速经验公式预测的结果与实测结果的相对误差较大;当埋深超过 40 m 后,则出现相反的现象。因此,当埋深小于 40 m 时,该地区采用规范公式预测剪切波速更可靠,而超过 40 m 后采用该地区经验公式具有较高的可靠性。

2.3 成都地区对比

蔡润等[8]通过对成都地区 II 类场地实测剪切波速数据进行拟合,给出了该地区剪切波速与埋深的经验公式,其模型参数的拟合结果见表 3。全国性剪切波速经验公式的相对误差如图 9 所示。

表 3 成都地区 II 类场地常规土类推荐模型

Table 3 Recommended model of conventional soil for Class II site in Chengdu area

| 土体类别 | 推荐模型 | 拟合度 |
|------|--------------------------|-------|
| 粉土 | $v_s = 158.850H^{0.078}$ | 0.832 |
| 黏土 | $v_s = 214.445H^{0.070}$ | 0.626 |
| 粉质黏土 | $v_s = 152.229H^{0.125}$ | 0.754 |

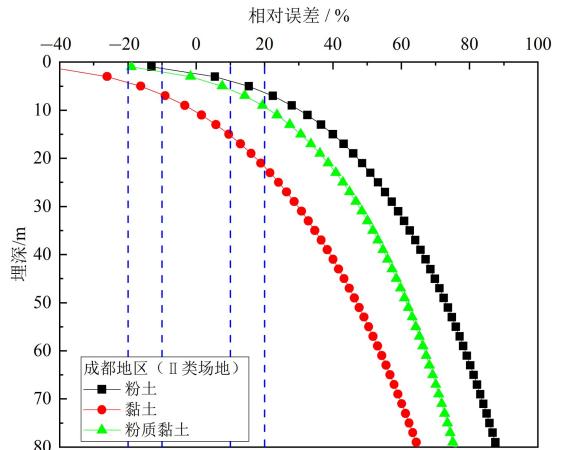


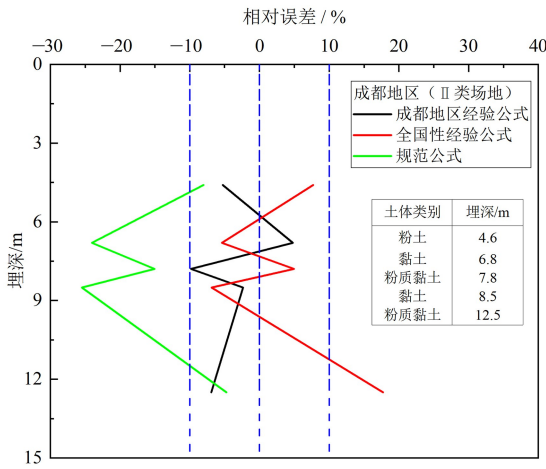
图 9 成都地区相对误差

Fig.9 Relative error analysis diagram of Chengdu area

结果表明:成都地区常见土体类别(粉土、黏土、粉质黏土)相对误差的绝对值均随深度的增加先减小而后不断增大;埋深 10 m 以内,粉土和粉质黏土相对误差绝对值在 20%内,超过 10 m 后,2 种土的相对误差均大于 20%;黏土在 5~25 m 范围内的相对误差绝对值小于 20%,其他部分均大于 20%。该

地区 3 种土的相对误差最大可达 60% 以上。由于原文中用于预测粉土、黏土、粉质黏土剪切波速与埋深关系的原始数据主要为浅表层土,埋深范围分别为 0~10、0~15、0~30 m,对于埋深超过 30 m 的成都地区经验公式为外推,缺乏有效约束;因此可能造成图 9 中当埋深超过 30 m 后,3 种土的相对误差随埋深增大而越来越大的结果。

选取文献[8]表 4 中提供的实测剪切波速数据,分别得出了成都地区经验公式、全国性剪切波速经验公式和规范公式预测结果与实测结果的相对误差,如图 10 所示。



钻孔剖面值来自文献[8]表 4。

图 10 成都地区经验公式、全国性经验公式和规范公式预测剪切波速与实测剪切波速的相对误差

Fig.10 Relative error between predicted shear wave velocity and measured shear wave velocity of Chengdu area empirical equation, national empirical equation, and code equation

结果表明:对于 4~12 m 深度内的浅层土,成都地区经验公式、全国性剪切波速经验公式预测的结果与实测结果的相对误差较小,与实际较为接近,相对误差的绝对值基本在 10% 内;而规范公式预测的结果与实测结果相对误差的绝对值基本大于 10%。对于该地区深层土体(粉土、黏土、粉质黏土)剪切波速的预测还没有较为可靠的经验公式。

2.4 天津地区对比

王琦等[9]通过对天津地区 III-IV 类场地以及不分场地实测剪切波速数据进行拟合,给出了该地区剪切波速与埋深的经验公式,其模型参数的拟合结果见表 4。全国性剪切波速经验公式的相对误差如图 11 所示。

表 4 天津地区 III-IV 类场地常规土类推荐模型

Table 4 Recommended model of conventional soil for Class III-IV site in Tianjin area

| 场地类别 | 土体类别 | 推荐模型 | 拟合度 |
|-------|------|-------------------------|-------|
| III 类 | 细砂 | $v_s = 54.183H^{0.490}$ | 0.853 |
| | 粉砂 | $v_s = 56.129H^{0.479}$ | 0.808 |
| | 粉土 | $v_s = 56.023H^{0.475}$ | 0.910 |
| | 粉质黏土 | $v_s = 54.148H^{0.477}$ | 0.930 |
| IV 类 | 细砂 | $v_s = 79.870H^{0.399}$ | 0.535 |
| | 粉砂 | $v_s = 59.843H^{0.462}$ | 0.714 |
| | 粉土 | $v_s = 40.015H^{0.554}$ | 0.956 |
| | 粉质黏土 | $v_s = 49.198H^{0.494}$ | 0.913 |
| 不分 | 细砂 | $v_s = 60.162H^{0.466}$ | 0.768 |
| | 粉砂 | $v_s = 56.989H^{0.474}$ | 0.785 |
| | 粉土 | $v_s = 53.199H^{0.488}$ | 0.913 |
| | 粉质黏土 | $v_s = 53.607H^{0.478}$ | 0.926 |
| | 黏土 | $v_s = 66.322H^{0.421}$ | 0.902 |

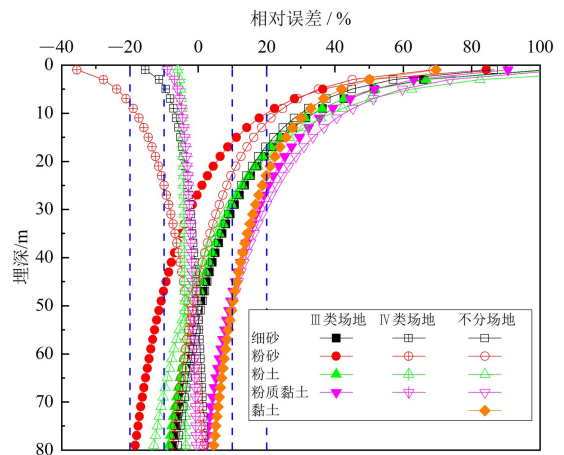
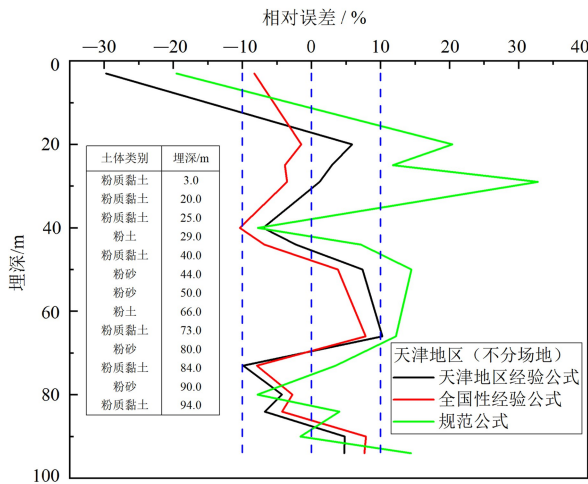


图 11 天津地区相对误差

Fig.11 Relative error of Tianjin area

结果表明:天津地区常见土体类别(细砂、粉砂、粉土、粉质黏土、黏土)中,除 III 类场地粉砂和不分场地的粉土外,相对误差的绝对值均随深度的增加不断减小;IV 类场地,除粉砂在 20 m 土层以内相对误差的绝对值大于 20% 外,其他土类在埋深大于 10 m 的土层内,相对误差的绝对值均在 10% 内;III 类场地以及不分场地中,相对误差差别比较大,在 30 m 以内的土层相对误差超过了 20%,在 30 m 土层以下,相对误差的绝对值在 20% 内。

由文献[9]表 11 中的实测剪切波速数据,分别得出了天津地区经验公式、全国性经验公式和规范公式预测结果与实测结果的相对误差,见图 12。



钻孔剖面值来自文献[9]表 11。

图 12 天津地区经验公式、全国性经验公式和规范公式预测剪切波速与实测剪切波速的相对误差

Fig.12 Relative error between predicted shear wave velocity and measured shear wave velocity of Tianjin area empirical equation, national empirical equation, and code equation

结果表明:天津地区经验公式、全国性剪切波速经验公式预测结果与实测结果的相对误差比较接近,相对误差的绝对值基本在 10% 内;而规范公式预测的结果与实测结果有明显差别。采用全国性剪切波速经验公式用于预测天津地区的剪切波速具有较高的可靠性。

2.5 常州地区对比

王金艳等^[10]通过对常州地区实测剪切波速数据进行拟合,给出了该地区剪切波速与埋深的经验公式,其模型参数的拟合结果见表 5。由于文献[10]中未给出该场地的场地类别,本文选取 II 类场地对应的全国性剪切波速经验公式与其进行对比,相对误差如图 13 所示。

表 5 常州地区常规土类推荐模型

Table 5 Recommended model of conventional soil in Changzhou area

| 土体类别 | 推荐模型 | 拟合度 |
|------|--------------------------|-------|
| 粉土 | $v_s = 70.670H^{0.445}$ | 0.902 |
| 粉砂 | $v_s = 92.095H^{0.377}$ | 0.848 |
| 粉质黏土 | $v_s = 80.261H^{0.410}$ | 0.846 |
| 黏土 | $v_s = 94.676H^{0.374}$ | 0.927 |
| 细砂 | $v_s = 121.367H^{0.308}$ | 0.915 |

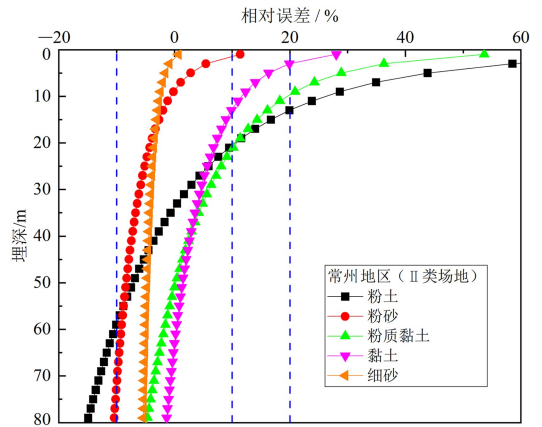
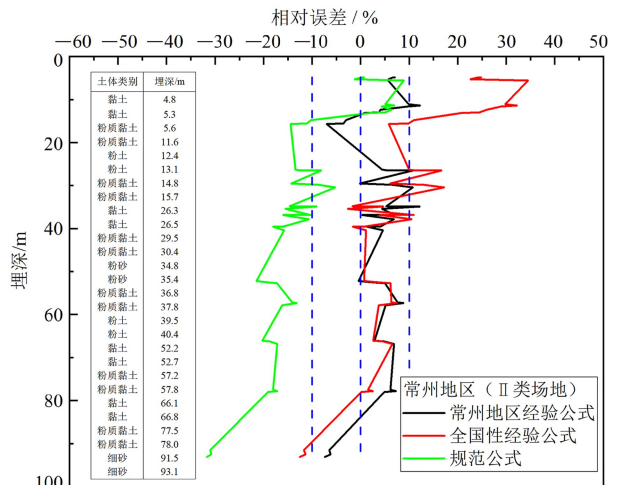


图 13 常州地区相对误差

Fig.13 Relative error of Changzhou area

结果表明:常州地区除黏土和细砂外,其他 3 类土体相对误差的绝对值均随深度的增加先减小后增大;粉砂和细砂相对误差的绝对值主体均在 10% 内;黏土和粉质黏土的相对误差在 20 m 内的基本上大于 10%,20 m 以下大部分相对误差的绝对值在 10% 内;粉土的相对误差在 15 m 内的大于 20%,15 m 以下仅部分相对误差的绝对值在 20% 内。

由文献[10]表 4 中的实测剪切波速数据,分别得出了常州地区经验公式、全国性经验公式和规范公式预测结果与实测结果的相对误差,见图 14。



钻孔剖面值来自文献[10]表 4。

图 14 常州地区经验公式、全国性经验公式和规范公式预测剪切波速与实测剪切波速的相对误差

Fig.14 Relative error between predicted shear wave velocity and measured shear wave velocity of Changzhou area empirical equation, national empirical equation, and code equation

结果表明:常州地区经验公式预测的结果与实测结果的相对误差比较接近,相对误差的绝对值基本在 10% 以内;在 15 m 以内,规范公式预测的结果比较接近实际,相对误差的绝对值基本在 10% 以内,而全国性剪切波速经验公式预测的结果与实测结果的相对误差较大,在埋深超过 15 m 后,则出现相反的现象。可见,当埋深大于 15 m 后,该地区采用全国性经验公式也具有较高的可靠性。

2.6 武汉地区对比

孔宇阳等^[11]通过对武汉地区实测剪切波速数据进行拟合,得到了该地区剪切波速与埋深的经验公式,其模型参数的拟合结果见表 6。由于文献^[11]中未给出该场地的场地类别,本文选取 II 类场地对应的全国性剪切波速经验公式与其进行对比,相对误差如图 15 所示。

表 6 武汉地区常规土类推荐模型

Table 6 Recommended model of conventional soil in Wuhan area

| 土体类别 | 推荐模型 | 拟合度 |
|------|--------------------------|-------|
| 粉质黏土 | $v_s = 91.300H^{0.318}$ | 0.725 |
| 黏土 | $v_s = 118.200H^{0.230}$ | 0.820 |
| 粉土 | $v_s = 116.400H^{0.214}$ | 0.788 |
| 粉砂 | $v_s = 98.770H^{0.282}$ | 0.806 |
| 细砂 | $v_s = 79.080H^{0.360}$ | 0.836 |
| 碎石土 | $v_s = 66.540H^{0.440}$ | 0.631 |

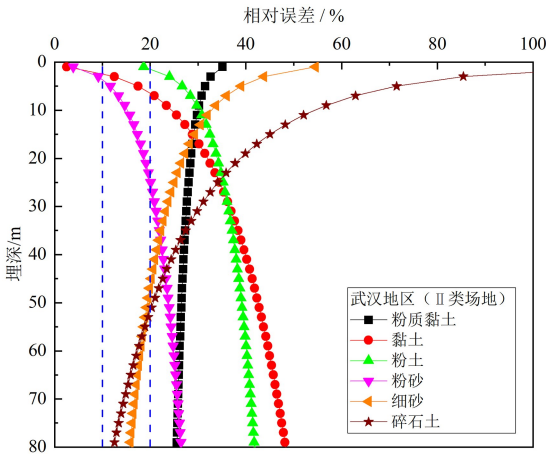


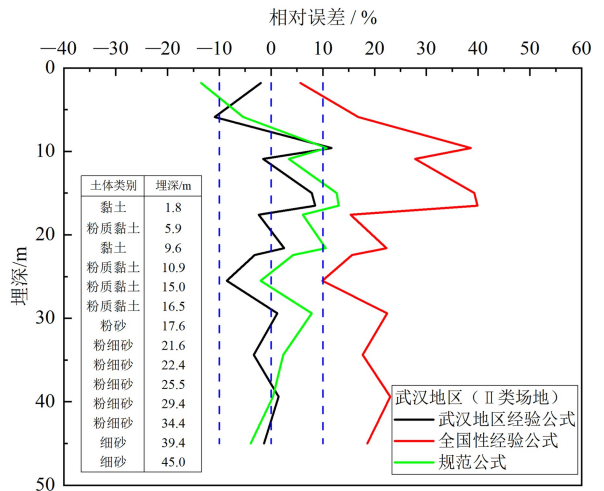
图 15 武汉地区相对误差

Fig.15 Relative error of Wuhan area

结果表明:黏土、粉土和粉砂的相对误差均随深度的增加不断增大,而粉质黏土、细砂、碎石土的相

对误差均随深度的增加不断减小;粉土和粉质黏土的相对误差基本上大于 20%,黏土的相对误差在 5 m 以内的浅表土小于 20%,深度超过 5 m 后,相对误差大于 20%;粉砂的相对误差在 30 m 以内的浅表土小于 20%,碎石土和细砂的相对误差在 50 m 以外的部分小于 20%。该地区土类的相对误差主体上大于 10%。

选取文献^[18]表 2、表 3 中提供的实测剪切波速数据,分别得到了武汉地区经验公式、全国性剪切波速经验公式和规范公式预测结果与实测结果的相对误差,如图 16 所示。



钻孔剖面值来自文献^[18]表 2 和表 3。

图 16 武汉地区经验公式、全国性经验公式和规范公式预测剪切波速与实测剪切波速的相对误差

Fig.16 Relative error between predicted shear wave velocity and measured shear wave velocity of Wuhan area empirical equation, national empirical equation, and code equation

结果表明:武汉地区经验公式和规范公式预测的结果与实测结果的相对误差比较接近,相对误差的绝对值基本在 10% 以内;而全国性剪切波速经验公式预测的结果与实测结果的相对误差较大。全国性经验公式不适用于该地区的土体剪切波速预测。

3 结论与建议

1) 全国性剪切波速经验公式中,幂函数模型预测的剪切波速随深度增大而增大,符合定性认识,而一元二次模型有可能出现不合理的回弯反常现象。

2) 全国性剪切波速经验公式在不同地区的预测

精度差异显著,在北京、鲁西、成都、天津、常州、武汉区域,对于绝大多数土类预测的相对误差总体在 $\pm 20\%$ 以内,但近地面20 m内的相对误差较大,在鲁西和武汉地区预测的相对误差超过 $\pm 20\%$ 。

3)与规范公式相比,采用全国性剪切波速经验公式预测的超过20 m的剪切波速范围带与实际较为接近,误差在可接受范围内。

建议优先选择适合当地的剪切波速经验公式;当缺乏本地公式,需选用全国性剪切波速幂函数型经验公式时,先经过本地实测资料检验确认后方可使用;20 m范围的剪切波速最好以实测为准,这有助于降低全国性剪切波速经验公式带来的显著误差。

剪切波速经验公式的可靠性主要受剪切波速测试精度、钻孔分布区域的影响,有条件的情况下,尽可能按照相同成因的工程地质单元进行统计。

参考文献(References):

[1] 兰景岩,刘红帅,吕悦军,等.表层土剪切波速的不确定性对地表设计谱平台值的影响[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(3):770-776.
Lan Jingyan, Liu Hongshuai, Lü Yuejun, et al. Effects of Uncertainties of Shear Wave Velocity of Soil Surface Layer on Platform Value of Surface Design Response Spectra[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(3): 770-776.

[2] 刘红帅,宋东松,张东涛,等.干砂小应变动力学参数的弯曲元试验[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(6):1826-1834.
Liu Hongshuai, Song Dongsong, Zhang Dongtao, et al. Small Strain Dynamic Parameters of Dry Sand by Bender Element[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(6): 1826-1834.

[3] Hasancebi N, Ulusay R. Empirical Correlations Between Shear Wave Velocity and Penetration Resistance for Ground Shaking Assessments [J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2007, 66(2): 203-213.

[4] Kumara A, Satyannarayana R, Rajesh G B. Correlation Between SPT - N and Shear Wave Velocity (v_s) and Seismic Site[J]. Journal of Applied Geophysics, 2022, 206(4): 1-16.

[5] 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 Hongshuai, Zheng Tong, Qi Wenhao, et al. Relationship Between Shear Wave Velocity and Depth of Conventional Soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(7): 1142-1149.

[6] 乔峰,薄景山,张兆鹏.北京地区土层剪切波速与埋深之间的相关性分析[J].科学技术与工程,2019,19(18):239-244.
Qiao Feng, Bo Jingshan, Zhang Zhaopeng. Correlation Analysis Between Shear Wave Velocity and Buried Depth of Soil Layer in Beijing Area [J]. Science, Technology and Engineering, 2019, 19 (18): 239-244.

[7] 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.
Jiang Qifeng, Ge Fugang, Wei Wei. Study on Relationships Between Shear Wave Velocity and Depth of Soil in Plain of Western Shandong [J]. World Earthquake Engineering, 2019, 35(3): 136-143.

[8] 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.
Cai Run, Peng Tao, Luo Donglin, et al. Correlation Between the Shear Wave Velocity and the Soil Depth in Chengdu Region [J]. Journal of Seismological Research, 2022, 45 (3): 498-508.

[9] 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.
Wang Qi, Liu Hongshuai, Zheng Tong, et al. Correlation Analysis Between Shear Wave Velocity and Depth of Covering Soils in Tianjin [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 38(6): 190-201.

[10] 王金艳,侯莹.常州市城区土层剪切波速与土层深度关系分析[J].地震工程学报,2017,39(增刊):236-240.
Wang Jinyan, Hou Ying. Analysis on the Relationship Between Shear Wave Velocity and Soil Depth in Changzhou Urban Area [J]. Journal of Seismic Engineering, 2017, 39 (Sup.): 236-240.

[11] 孔宇阳,雷东宁,廉超,等.武汉市区土体剪切波速与深度的经验关系[J].地震工程学报,2017,39(2):336-342.
Kong Yuyang, Lei Dongning, Lian Chao, et al. Relationship Between Shear-Wave Velocity and Soil Depth in Wuhan Area [J]. Chinese Journal of Earthquake Engineering, 2017, 39(2): 336-342.

- [12] 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.
Li Min, Yang Ligu, Chen Haipeng, et al. Relationship Between Shear Wave Velocity and Soil Depth of Typical Soil Layers in Hangzhou Area[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2020, 15(1): 77-88.
- [13] 建筑抗震设计规范: GB J11—89[S]. 北京: 中国铁道出版社, 1989.
Code for Seismic Design of Buildings: GB J11—89[S]. Beijing: China Railway Press, 1989.
- [14] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
Code for Seismic Design of Buildings: GB 50011—2001[S]. Beijing: China Architecture Press, 2001.
- [15] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Code for Seismic Design of Buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture Press, 2010.
- [16] 构筑物抗震设计规范: GB 50191—93[S]. 北京: 中国计划出版社, 1993.
Code for Seismic Design of Special Structures: GB 50191—93[S]. Beijing: China Planning Press, 1993.
- [17] 构筑物抗震设计规范: GB 50191—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
Code for Seismic Design of Special Structures: GB 50191—2012[S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [18] 孔宇阳, 廉超, 李井冈, 等. 武汉地区典型土类动力非线性参数的统计分析[J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 832-837.
Kong Yuyang, Lian Chao, Li Jinggang, et al. Statistical Analysis of Dynamic Nonlinear Parameters of Typical Soils in Wuhan Area[J]. Chinese Journal of Earthquake Engineering, 2014, 36(4): 832-837.