

唐山地震高烈度区 V_{s30} 经验估计研究*

吴连斌¹, 兰景岩^{1,2}, 蔡金豆¹, 史庆旗¹

(1. 桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004;

2. 桂林理工大学广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要:以唐山地震高烈度区场地条件为背景,选取并整理其中701个实际钻孔的剪切波速测试资料,分别计算国际上较普遍采用的场地分类指标 V_{se} 和 V_{s30} ,初步建立了适用于唐山地区 V_{se} 与 V_{s30} 的对应关系,利用Boore提出的速度梯度外推法,回归得到了唐山地区 V_{s30} 的经验模型与拟合参数,并与四个地区(北京、新疆乌鲁木齐、加利福尼亚、日本KiK-net)的经验公式进行了对比。结果表明,场地分类指标 V_{se} 和 V_{s30} 之间具有强相关性,不同地区数据回归得到的经验公式能够得到很好的预测结果,也能对场地类别相近地区的剪切波速模型预测提供参考。

关键词:唐山地区; V_{s30} 估计; 场地分类; 等效剪切波速

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)06-1280-07

Empirical Estimation of V_{s30} in High Intensity Area of Tangshan Earthquake

WU Lianbin¹, LAN Jingyan^{1,2}, CAI Jindou¹, SHI Qingqi¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Based on the site conditions in the high intensity area of Tangshan earthquake, shear wave velocity test data from 701 field drill holes were selected and used to calculate the commonly used site classification indexes of V_{se} and V_{s30} respectively. Then the corresponding relationship between V_{se} and V_{s30} for the Tangshan area was initially established. Using the velocity gradient extrapolation method proposed by Boore, the empirical model and fitting parameters of V_{s30} in the Tangshan area were calculated by regression, and the results obtained by empirical models in four regions (Beijing, Xinjiang Urumqi, California, Japan KiK-net) were compared. The results show that there is a strong correlation between the site classification indexes V_{se} and V_{s30} , and the empirical formulas obtained from data regression in different regions can get good prediction results, and can also provide references for the prediction of shear wave velocity models in areas with similar site categories.

Keywords: Tangshan area; V_{s30} estimate; site classification; equivalent shear wave velocity

* 收稿日期:2021-09-09;修回日期:2021-11-24

基金项目:国家自然科学基金项目(52168067)、广西高等学校千名中青年骨干教师培育计划项目(2020)、广西岩土力学与工程重点实验室开放基金(桂科能19-Y-21-4)资助

作者简介:吴连斌(1994—),男,硕士研究生。主要从事岩土工程及地震工程等方面的研究。E-mail:1010544244@qq.com

通讯作者:兰景岩(1981—),男,教授,硕导,博士。主要从事地震工程研究。E-mail:lanjy1999@163.com

引言

浅层剪切波速 V_s 是建设工程场地重要的动力特性参数,实际工程中它是衡量场地刚度、液化判别和软土震陷的重要指标,地学研究中它是地震动场地效应和地震动衰减关系回归分析中的重要参数^[1-3],因此有关浅层剪切波速的研究一直是工程地震学界的研究热点之一,特别是以 20 m 或 30 m 以上等效剪切波速值作为场地类型的重要指标已被国内外多部抗震设计规范所采用^[4-5],在工程中发挥着重要作用。受抗震设计理念和经济环境等因素的限制,不同国家对剪切波速的深度要求也有所差异,其中发达国家以美国 NEHRP 规范^[4]、欧洲 Eurocode8 规范^[5]、日本《建筑基本法》^[6]为代表的普遍采用 V_{s30} ,而我国目前则一直沿用的是 20 世纪 70 年代《工业与民用建筑抗震设计规范》^[7]所采用的 V_{s15} (2000 年以后《建筑抗震设计规范》^[8]调整为 V_{se} ,即覆盖层厚度和 20 m 两者较小值深度以上土层的等效剪切波速),随着国家经济实力的攀升,工程建设规模和形式也愈趋于复杂和多样,对抗震设防提出了更高的要求,因此 V_{se} 已无法满足当前的抗震设计需要,对于提升剪切波速测试深度已迫在眉睫,亟待与国际发达国家测试标准接轨^[9]。事实上,将现行抗震设计规范从 V_{se} 向 V_{s30} (30 m 深度以上土层的等效剪切波速)过渡和推广需要一个过程,特别是对于已建成或已完成勘察的建设用地,增加剪切波速的测试深度已然不现实,因此对于更深层场地剪切波速值的推测和分析是一种可行的替代方法。

总的来看,目前针对不同地区剪切波速随深度的经验关系和计算公式的研究较多,并取得了十分丰富的成果^[10-11],但根据现有深度推测更深层剪切波速值,建立浅层剪切波速与 V_{s30} 的经验关系和外推公式的研究较少。D. M. Boore^[12]率先利用加州地区的钻孔剪切波速数据,利用线性对数函数关系建立了各深度以上土层的等效剪切波速 V_{se} 与 V_{s30} 之间的经验外推模型,而后 D. M. Boore 等^[13]经研究发现剪切波速的深度分布规律存在区域性差异,利用日本 KiK-net 钻孔的剪切波速数据发展并提出了 V_{se} 与 V_{s30} 之间的二次对数函数的经验关系。喻炯等^[14]利用四川、甘肃地区钻孔数据,改进了 D. M. Boore 等^[12-13]的线性模型,发展并提出了速度梯度外

推的三次对数函数模型。H. Y. Wang 等^[15]提出了利用两个不同深度的平均剪切波速来估计 V_{s30} 的新方法,该方法则有效避免了 Boore 等模型区域性差异的限制,是一种通用 V_{s30} 的外推经验模型。类似地,C. H. Kuo 等^[16]、亢川川等^[17]、J. J. Xie 等^[18]、江志杰等^[19]、党鹏飞等^[20]国内外学者通过大量钻孔剪切波速资料,结合回归分析方法,给出了不同地区的 V_{s30} 外推经验公式。

唐山 7.8 级大地震,极震区烈度高达Ⅷ度^[21],由于此次地震是发生在首都圈范围内的城市直下型地震,因此受到地震学家的广泛关注,并积累了大量的地震地质、地球物理、工程地震等基础资料和数据,本文在充分梳理前人研究成果的基础上,利用唐山地震高烈度地区的钻孔资料对前人给出的不同地区的 V_{s30} 推算经验公式进行验证,并据此建立唐山地区浅层剪切波速外推 V_{s30} 经验公式,分析该模型跨不同区域使用的可能性,研究成果可为唐山地区无深层剪切波速资料时提供参考,对于指导唐山地震高烈度地区场地分类研究和工程抗震评价具有一定的科学意义和工程价值。

1 钻孔资料

唐山地处华北平原,毗邻京津,是华北与东北通道的咽喉要地,并且属于首都经济圈,其重要性不言而喻。1976 年发生的唐山地震几乎将唐山夷为废墟,造成了巨大的生命财产损失,所以对于唐山地震高烈度区进行详细研究,是唐山地区抗震设防的首要工作。唐山第四纪覆盖层较厚,地层主要以粉质黏土、细砂为主,结合 1976 年唐山地震历史等震线资料,收集整理了深度在 30~120 m 钻孔共计 701 个,在Ⅵ度至Ⅷ度区域内均有分布,其中一半以上钻孔集中分布在Ⅷ度、Ⅸ度区域内,剩余钻孔零星分布于其他区域内,还有少部分钻孔位于海域之中(图 1(a))。每个钻孔均有详细的地层揭示和剪切波速成果数据,根据钻孔深度分布情况(图 1(b)),可知深度多数集中在 80~90 m,部分集中在 70~80 m 和 100~110 m。

当前获取场地剪切波速的途径和方法,大多是通过钻探勘察来揭示一定深度内的地层分布情况,进而采用原位测试、室内试验或是经验估算等方法来确定浅层等效剪切波速值。根据我国《建筑抗震

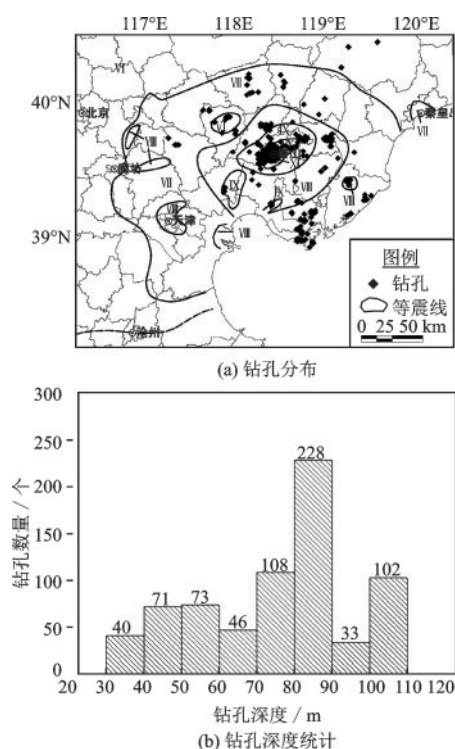


图1 钻孔分布与钻孔深度统计

Fig.1 Drill holes distribution map and drill holes depth statistics map

设计规范》^[8]和美国 NEHRP 规范^[4]对于场地分类的规定对原始数据进行了处理,分别计算了土层等效剪切波速 V_{se} 和 30 m 土层等效剪切波速 V_{s30} ,发现两者之间存在着一定的联系(图 2(a))。通过对数据进行线性拟合得到两者拟合优度 R^2 为 0.942,表现出很强的相关性。对日本 KiK-net 台站的数据进行相同的处理,结果如图 2(b)所示。可以看出日本 KiK-net 台站的数据与唐山地区的结果相差较大,其拟合优度 R^2 仅为 0.327,为较弱相关。

对唐山地区和日本的数据根据中国和美国的标准对场地进行了分类(图 2),可以看出唐山地区的钻孔数据根据我国规范主要分为 II 类和 III 类,少数几个为 IV 类;而根据美国 NEHRP 规范则被分为了 D 和 E 两类。而日本 KiK-net 台站包含了几乎所有的场地类别。分析其原因,所研究唐山地区的场地覆土层相对较厚,土层剪切波速呈阶梯状由上往下延伸,因此 V_{se} 和 V_{s30} 的计算结果比较一致,两者相关性较高。对于日本 KiK-net 台站数据两者的低相关性,从中美规范对于参数计算方法的不同可以得到解释,我国规范场地分类所采用的是等效剪切波速 V_{se} 和场地覆盖层厚度的双参数分类方法,其中 V_{se} 的计算深度是取 20 m 与场地覆盖层厚度两个中

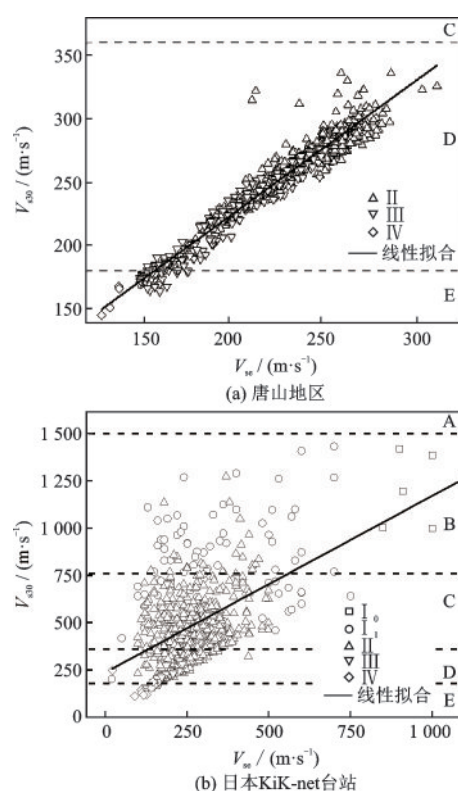


图2 唐山地区和日本 KiK-net 台站 V_{se} 和 V_{s30} 关系

Fig.2 The relationship between V_{se} and V_{s30} in the Tangshan area and the KiK-net station in Japan

的小者;美国 NEHRP 规范场地类别划分是以 30 m 范围内等效剪切波速作为参考指标。在某些覆盖层厚度很小的场地,我国规范只取地表下几米作为计算范围,与美国 NEHRP 规范所取的 30 m 范围差距很大,也就导致了两者相关性较差。

2 V_{s30} 预测方法

随着我国经济高速发展,与之相匹配的建筑物与构筑物规模不断扩大,超高层建筑、大跨度桥梁不断增多,该类建筑物、构筑物占地面积大,场地条件复杂,一旦发生事故造成的影响也是巨大的。在进行抗震设防时,仅通过研究地表以下 20 m 范围内的岩土体情况进行相应的设计使得风险的不确定性有所上升。为了在原有地质钻孔资料的基础上进一步优化抗震设防,需要与国际研究接轨,所以进行 V_{s30} 预测研究具有重要的现实意义。

通常来说,在地层情况不存在突变的地区,从地表往下土层剪切波速的变化是有一定规律的,通过结合实际的钻孔剪切波速资料可以回归得到 V_{s30} 的预测公式。国外学者 D.M.Boore 等^[9-10]曾利用美

国加利福尼亚和日本 KiK-net 的数据回归得到当地通过 V_{sz} 预测 V_{s30} 的经验公式^[12-13]; 国内学者江志杰等^[19]、党鹏飞等^[20]分别利用北京地区和新疆乌鲁木齐地区的数据进行类似工作。主要回归方程形式如下:

(1) 加利福尼亚、北京地区、新疆乌鲁木齐地区:

$$\lg(V_{s30}) = a + b \lg(V_{sz}) \quad (1)$$

(2) 日本 KiK-net:

$$\lg(V_{s30}) = c + d \lg(V_{sz}) + e [\lg(V_{sz})]^2 \quad (2)$$

式中, a 、 b 、 c 、 d 、 e 为拟合参数; V_{sz} 为不同深度下的等效剪切波速; z 取值为 5~29 m。

江志杰等^[19]利用北京地区的钻孔资料研究发现, 采用二次拟合仅能在 10 m 范围内改善推算的情况, 对于在 10 m 范围以后两个不同拟合方式对于 V_{s30} 预测的结果几乎没有影响。所以本文采用对数形式下的线性拟合进行唐山地区 V_{s30} 预测研究, 并采用前人研究得到的预测公式对唐山地区的数据进行预测, 与本地预测结果进行对比研究。该部分研究仅对比 10 m 深度范围以后的预测结果, 目的是消除公式(1)、(2)两种不同拟合形式在 10 m 深度范围内对预测结果的影响。

3 分析与讨论

3.1 唐山地区推算公式

为了获得唐山地区的 V_{s30} 经验公式, 本文采用筛选后的 701 个钻孔数据, 以 1 m 为间隔分别计算了 5~30 m 的等效剪切波速, 再采用公式(1)对计算得到的唐山地区不同深度下等效剪切波速 V_{sz} 和 V_{s30} 进行线性回归, 获得了 5~29 m 各个深度下 V_{sz} 预测 V_{s30} 的经验公式, 具体回归系数见表 1。

从表 1 可以发现, 随着已知等效剪切波速深度的增加, V_{sz} 和 V_{s30} 的拟合优度持续上升, 从 5 m 时的 0.695 2 上升至 29 m 时的 0.999 6。表明随着已知深度的加深, 通过回归公式预测的 V_{s30} 值会越来越接近真实值。图 3 展示了 5、10、15、20、25、29 m 深度下 V_{s30} 预测值与真实值的对应关系, 明显发现在深度为 5 m 时, 数据点离散程度比较高, 对 V_{s30} 的预测准确率并不高, 随着深度的增加, 数据的离散程度逐渐降低, 当深度达到 25 m 之后预测值与真实值已经十分接近。

表 1 唐山地区线性回归系数

Table 1 Linear regression coefficients in Tangshan area

z/m	a	b	r^2	z/m	a	b	r^2
5	0.463 0	0.862 8	0.695 2	18	0.237 8	0.921 6	0.946 8
6	0.473 2	0.8534	0.732 1	19	0.2089	0.9319	0.955 6
7	0.456 8	0.856 2	0.769 1	20	0.1832	0.9409	0.963 7
8	0.424 5	0.866 4	0.800 5	21	0.1591	0.949 2	0.970 7
9	0.394 9	0.875 8	0.825 3	22	0.135 6	0.957 2	0.976 7
10	0.368 7	0.884 0	0.846 5	23	0.113 9	0.964 5	0.982 4
11	0.350 1	0.889 2	0.864 8	24	0.092 9	0.971 5	0.987 3
12	0.331 8	0.894 5	0.880 9	25	0.075 1	0.977 3	0.991 1
13	0.318 3	0.897 9	0.894 6	26	0.058 6	0.982 4	0.994 3
14	0.307 3	0.900 3	0.906 8	27	0.043 6	0.987 0	0.996 8
15	0.294 1	0.903 8	0.917 9	28	0.027 8	0.991 9	0.998 6
16	0.280 4	0.907 5	0.927 9	29	0.013 4	0.996 2	0.999 6
17	0.263 6	0.912 7	0.937 6				

3.2 不同地区经验公式对唐山地区预测分析

为了对不同经验公式的预测结果进行定量分析, 本文参考 R.Cai 等^[22]采用以下四个统计指标进行评估。这些指标可以估计研究中 V_{s30} 预测值相对于真实值的计算误差, 计算公式见(3)~(6)。

(1) 平均绝对误差(MAE)

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |V - V'| \quad (3)$$

(2) 均方根误差(RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V - V')^2} \quad (4)$$

(3) 平均绝对百分比误差(MAPE)

$$MAPE = \frac{100\%}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{V - V'}{V} \right| \quad (5)$$

(4) 综合性能指数(CPI)

$$CPI = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{P_j - P_{j,\min}}{P_{j,\max} - P_{j,\min}} \right) \quad (6)$$

式中, N 为参与测试的数据总数, $N = 701$; V 和 V' 分别代表预测值和真实值; n 为参与评价的指标个数, $n = 3$; P_j 为第 j 个评价指标的值; $P_{j,\max}$ 和 $P_{j,\min}$ 为 3 个推算公式对应的第 j 个评价指标中的最大值和最小值。

MAE、RMSE、MAPE 的值用来评价预测质量, 值越大预测值与真实值之间的差距越大, 也就是说经验公式的预测能力越差。为了将三个评价指标综合起来考虑, 采用一个综合性能指数 CPI 进行总体性的评价。CPI 的值为 0~1, 其中 0 代表着该公式的预测结果最好, 反之 1 代表着该公式的预测结果最差。

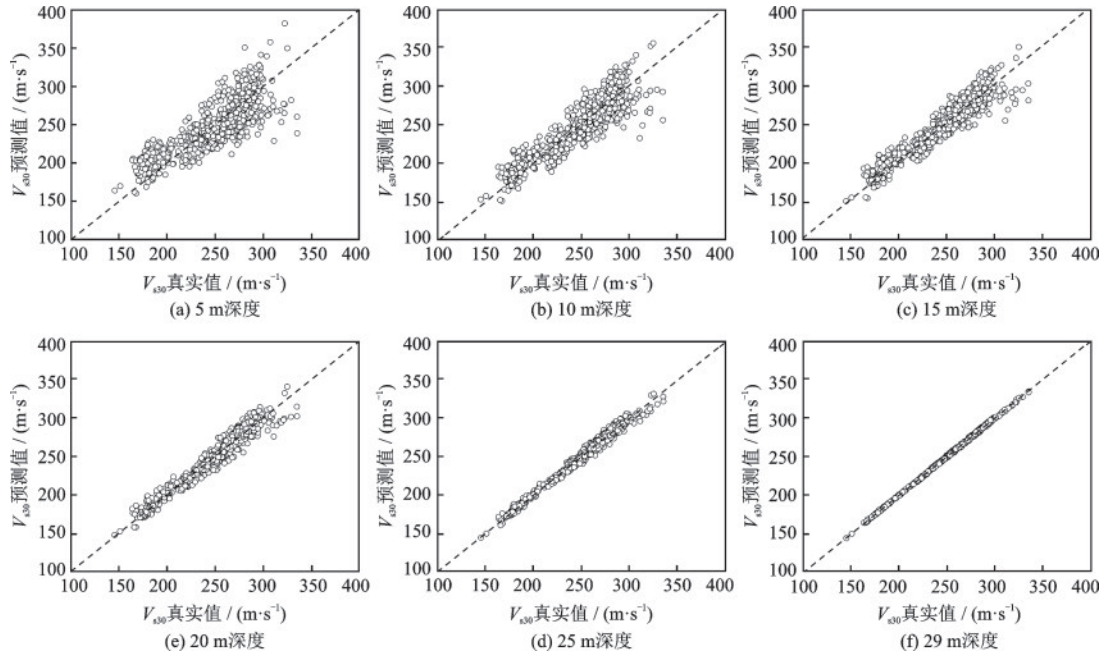


图3 唐山地区不同深度下 V_{s30} 预测值与真实值关系

Fig.3 The relationship between the predicted value and the true value of V_{s30} at different depths in the Tangshan area

本文收集了文献[12-13,19-20]中加利福尼亚地区、北京地区、新疆乌鲁木齐地区、日本 KiK-net 台阵的经验公式以及对应的参数,结合本文获取的唐山地区的经验公式在 10~29 m 深度条件下计算了唐山地区钻孔的 V_{s30} 预测值,并结合公式(3)~(6)计算对应的 MAE、RMSE、MAPE、CPI 值,分布情况如图 4 所示。

可以明显看出日本的经验公式对于唐山地区钻孔 V_{s30} 的预测是不准确的,而其他四个地区的预测结果相差不大,根据江志杰等^[19]的分析,其因为日本的数据是基于基岩和类基岩场地上获取的,与其他地区有明显差异。不同 MAE、RMSE、MAPE 的数值随着深度的增加逐渐减小,与图 3 的结果相一致,说明这三个误差指标可以有效评价不同模型的预测性能。值得注意的是,MAE 和 MAPE 曲线不同地区之间的大小关系都为唐山地区最小,加利福尼亚最大,北京和新疆乌鲁木齐沿着深度相互交错下降;另外有所不同的是 RMSE 曲线,其数值是随着深度波动减小,减小的趋势为先减小后增加,然后又减小后增加;且北京和新疆乌鲁木齐的数值相差不大,唐山地区与加利福尼亚的数值相近,在 16 m 深度范围内前两者大于后两者,在 16 m 之后四者的数值基本一致,说明不同地区经验公式预测的稳定性随着深度增加逐渐平稳,且北京的预测性能是四者中较为平稳的。从综合性能指标 CPI 来看,四个地区都能获得较好的预测结

果,且唐山地区总体上预测的最好,但 CPI 值在 29 m 处发生突变,分析其原因,日本在 29 m 处的预测值与其他四个地区的预测值相近,导致计算公式(6)中 $P_{j,max}$ 和 $P_{j,min}$ 的差距变小,具有明显的放大作用。综上所述,加利福尼亚地区、北京地区和新疆乌鲁木齐地区的经验公式与唐山地区的经验公式一样,对于唐山地区都拥有不错的预测性能。结合 NEHRP 场地类别分析,加利福尼亚地区 125 个钻孔中大部分钻孔为 C、D 类^[12],北京地区大部分为 D 类^[19],新疆乌鲁木齐地区钻孔均为 C 类^[20],与以上三个地区相比较,唐山地区钻孔与它们的场地类别情况相似,但是与 KiK-net 台阵的场地类别情况差别比较大。综上所述,在场地类别情况相近似的情况下,不同地区获得的经验公式可以为目标地区 V_{s30} 预测提供参考。

4 结 论

根据唐山地震高烈度区大量的钻孔资料数据,利用数理统计方法对浅层等效剪切波速开展了经验估计和预测工作,得出以下结论:

(1) 针对我国规范和美国规范中所采用的不同场地分类指标 V_{se} 和 V_{s30} 进行了对比,发现两者之间表现出很强的相关性,但在对日本 KiK-net 台站数据的研究中发现,两者的相关性较弱。

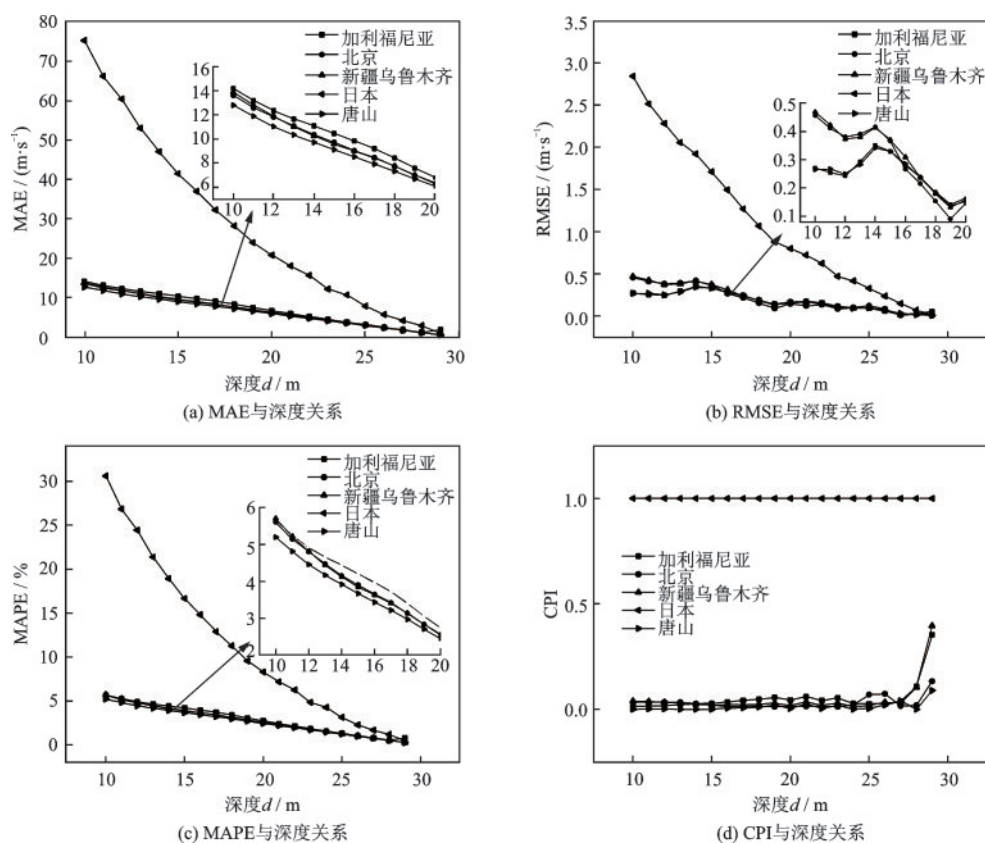


图4 评价指标关系

Fig.4 The relationship diagram of evaluation indicators

(2) 利用线性回归建立起 V_{sz} 和 V_{s30} 的函数关系,得到了唐山高烈度地区 V_{s30} 经验预测公式以及回归参数,可为唐山地区无钻孔剪切波速资料场地的相关研究提供参考。

(3) 结合前人在加利福尼亚地区、北京地区等地的浅层剪切波速经验公式,对唐山高烈度地区的 V_{s30} 进行预测。结果显示除日本 KiK-net 台站的经验公式无法提供准确的预测外,其他地区的预测公式能够较准确地预测唐山地区的 V_{s30} ,也表明不同地区的经验公式可以为场地条件相似地区的剪切波速模型预测提供参考。

参考文献:

[1] Abrahamson N, Silva W. Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground-motion relations [J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1):67-98.
[2] Campbell K W, Bozorgnia Y. NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA , PGV , PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s [J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1):139-171.

[3] Borchardt R D. Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification) [J]. Earthquake Spectra, 1994, 10(4):617-653.
[4] NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA P-750) [S]. Washington D C: Building Seismic Safety Council, 2009.
[5] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
[6] 日本建筑基本法[S]:平成十四年七月十二日法律第八十五号. 2002.
Japan Building Standards Law [S]. Law No. 85, 2002. (in Japanese)
[7] 工业与民用建筑抗震设计规范: TJ11—74 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1974.
[8] 建筑抗震设计规范: GB50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
[9] 黄雅虹,吕悦军,彭艳菊. 国内外不同抗震设计规范中场地分类方法的内在关系研究[J]. 震灾防御技术, 2009, 4(1): 80-90.
Huang Y H, Lyu Y J, Peng Y J. Study on the relations

- of site classification methods in seismic design standards between China and abroad [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2009, 4(1): 80-90. (in Chinese)
- [10] 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 H S, Zheng T, Qi W H, 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)
- [11] 乔峰, 薄景山, 张兆鹏, 等. 广西柳州地区常见土类剪切波速与埋深之间的相关性[J]. 地震学报, 2020, 42(1): 109-119.
- Qiao F, Bo J S, Zhang Z P, et al. Correlation between shear wave velocity and buried depth of common soils in Liuzhou city of Guangxi region [J]. Acta Seismologica Sinica, 2020, 42(1): 109-119. (in Chinese)
- [12] Boore D M. Estimating $V_s(30)$ (or NEHRP site classes) from shallow velocity models (depths < 30 m) [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2004, 94(2): 591-597.
- [13] Boore D M, Thompson E M, Heloise C. Regional correlations of V_{s30} and velocities averaged over depths less than and greater than 30 meters [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2011, 101(6): 3046-3059.
- [14] 喻焜, 李小军. 四川、甘肃地区 V_{s30} 经验估计研究[J]. 地震工程学报, 2015, 37(2): 525-533.
- Yu T, Li X J. Empirical estimation of V_{s30} in the Sichuan and Gansu provinces [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(2): 525-533. (in Chinese)
- [15] Wang H Y, Wang S Y. A new method for estimating $V_s(30)$ from a shallow shear-wave velocity profile (depth < 30 m) [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2015 105(3): 1359-1370.
- [16] Kuo C H, Wen K L, Hsieh H H, et al. Evaluating empirical regression equations for V_s and estimating V_{s30} in northeastern Taiwan [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(3): 431-439.
- [17] 亢川川, 俞言祥, 马超, 等. 四川地区深度小于 30 m 钻孔的 $V_s(30)$ 估计方法[J]. 震灾防御技术, 2015, 10(2): 316-323.
- Kang C C, Yu Y X, Ma C, et al. Estimation method of $V_s(30)$ for drilling with depth less than 30 meters in Sichuan area [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2015, 10(2): 316-323. (in Chinese)
- [18] Xie J J, Zimmaro P, Li X J, et al. V_{s30} empirical prediction relationships based on a new soil-profile database for the Beijing plain area, China [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2016, 106(6): 2843-2854.
- [19] 江志杰, 彭艳菊, 方怡, 等. 北京平原地区 V_{s30} 估算模型适用性研究[J]. 震灾防御技术, 2018, 13(1): 75-86.
- Jiang Z J, Peng Y J, Fang Y, et al. Applicability of V_{s30} estimation models for the Beijing Plain Area [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2018, 13(1): 75-86. (in Chinese)
- [20] 党鹏飞, 刘启方. 新疆乌鲁木齐地区 V_{s30} 经验估计研究[J]. 地震工程学报, 2019, 41(5): 1324-1331.
- Dang P F, Liu Q F. Empirical estimation of V_{s30} in Urumqi area of Xinjiang [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(5): 1324-1331. (in Chinese)
- [21] 兰景岩, 王延伟, 刘娟, 等. 基于随机有限断层方法的唐山地震强地面运动模拟[J]. 地震研究, 2019, 42(4): 503-509.
- Lan J Y, Wang Y W, Liu J, et al. Strong ground motion simulation of the Tangshan earthquake based on the stochastic finite fault method [J]. Journal of Seismological Research, 2019, 42(4): 503-509. (in Chinese)
- [22] Cai R, Han T, Liao W, et al. Prediction of surface chloride concentration of marine concrete using ensemble machine learning [J]. Cement and Concrete Research, 2020, 136: 106164.

(本文责编: 池营营)