



场地划分中存在的问题及建议

迟明杰 李小军 陈学良 马笙杰

Problems and suggestions on site classification

Chi Mingjie, Li Xiaojun, Chen Xueliang, Ma Shengjie

引用本文:

迟明杰, 李小军, 陈学良, 马笙杰. 2021. 场地划分中存在的问题及建议. *地震学报*[J], 43(6): 787–803. DOI: 10.11939/jass.20200152

Chi M J, Li X J, Lu X L, Ma S J. 2021. Problems and suggestions on site classification. *Acta Seismologica Sinica*[J], 43(6): 787–803. DOI: [10.11939/jass.20200152](https://doi.org/10.11939/jass.20200152)

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20200152>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中美建筑抗震设计规范中工程场地类别的对比和换算关系

Comparative analysis and transformation relations between China and the US site classification systems in building seismic code provisions

地震学报. 2021, 43(4): 521–532 <https://doi.org/10.11939/jass.20200164>

确定场地土层速度结构的改进半波长法

Improved half-wavelength method for determining the velocity structure of site soil layer

地震学报. 2020, 42(3): 362–376 <https://doi.org/10.11939/jass.20190142>

基于短时傅里叶变换和卷积神经网络的地震事件分类

Classification of seismic events based on short-time Fourier transform and convolutional neural network

地震学报. 2021, 43(4): 463–473 <https://doi.org/10.11939/jass.20200128>

宁夏地区Lg波衰减及场地响应特征

Lg-wave attenuation and site response in Ningxia region

地震学报. 2019, 41(4): 425–434 <https://doi.org/10.11939/jass.20180134>

广西柳州地区常见土类剪切波速与埋深之间的相关性

Correlation between shear wave velocity and buried depth of common soils in Liuzhou city of Guangxi region

地震学报. 2020, 42(1): 109–119 <https://doi.org/10.11939/jass.20190062>

利用多种地震数据联合反演剪切波速度结构的可靠性检测

Reliability tests of shear wave velocity structure from joint inversion of multiple types of seismic data

地震学报. 2019, 41(2): 194–206 <https://doi.org/10.11939/jass.20180100>

迟明杰, 李小军, 陈学良, 马笙杰. 2021. 场地划分中存在的问题及建议. 地震学报, 43(6): 787–803. doi: 10.11939/jass.20200152.

Chi M J, Li X J, Lu X L, Ma S J. 2021. Problems and suggestions on site classification. *Acta Seismologica Sinica*, 43(6): 787–803. doi: 10.11939/jass.20200152.

场地划分中存在的问题及建议^{*}

迟明杰^{1), †} 李小军^{1,2)} 陈学良¹⁾ 马笙杰¹⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国北京 100124 北京工业大学建筑工程学院

摘要 针对现行建筑抗震设计规范中场地分类方法面临的场地分类物理含义不明确, 各类场地的界限容易引起设计地震动参数发散等问题进行了探讨并给出解决建议. 针对场地分类物理含义不明确的问题, 在现行场地分类方法的基础上, 根据场地覆盖层厚度和等效剪切波速, 对场地进行分层次分类: 第一层次与现行的分类相一致, 以场地基本周期为基础, 根据覆盖层厚度进行分类; 第二层次在第一层次分类基础上进一步考虑场地软硬程度, 根据等效剪切波速进行亚分类. 根据目前对厚软场地地震灾害及地震动特性的研究, 并结合大量长周期建筑结构的经济建设发展现状, 对场地分类进行了扩展, 由原来的四大类扩展到五大类, 同时明确各分类界限, 尤其是Ⅱ, Ⅲ和Ⅳ类场地的界限由原来的开放式进行有限化, 有效地避免了由场地分类导致的设计地震动参数发散的问题.

关键词 场地分类 基本周期 覆盖层厚度 等效剪切波速 亚分类

doi: 10.11939/jass.20200152 中图分类号: P 315.9 文献标识码: A

Problems and suggestions on site classification

Chi Mingjie^{1), †} Li Xiaojun^{1,2)} Chen Xueliang¹⁾ Ma Shengjie¹⁾

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) The College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract: The physical meaning of site classification is not clear in the current seismic design code for buildings, at the same time, the boundary of site classification is easy to cause the divergence of design ground motion parameters. For the above problems and deficiencies, some suggestions are given. To solve the problem that the physical meaning of site classification is not clear, on the basis of the current site classification method, according to the site classification index such as the covering layer thickness and the equivalent shear wave velocity, the sites are classified by two-level: the first level classification is consistent with the current one, which classifies sites based on the fundamental period of the site and the thickness of the overburden layer; the second level classification further considers the degree of hardness of the geotechnical medium based on the first level classification, and sub-classification according to equivalent

* 基金项目 国家重点研发计划(2017YFC1500400)、国家自然科学基金重点项目(51639006)和国家自然科学基金(51878625)共同资助.

收稿日期 2020-09-10 收到初稿, 2020-12-03 决定采用修改稿.

† 通信作者 e-mail: 03115049@bjtu.edu.cn



shear wave velocity. Based on the current research on seismic disaster and seismic motion characteristics of thick soft site, combined with the development of long-period constructions, the site classification is expanded from the original four categories to five categories, at the same time, the boundary of each classification, especially the boundary of class II, III and IV sites, is limited from the original open type, which can effectively avoid the problem of divergence of design ground motion parameters caused by site classification. The related research results can provide reference for site classification and determination of design ground motion parameters.

Key words: site classification; basic period; overburden thickness; equivalent shear wave velocity; sub-classification

引言

震源、传播途径(地壳介质)和局部场地条件都会对地震动产生作用,但效果不同:震源主要控制地震动的基本特性;地壳介质对地震动的影响表现为其在空间上的缓慢变化;局部场地条件对地震动的影响表现为其在空间上的显著变化。场地条件一般指局部地质条件,包括近地表几十米至几百米内的上覆土层、地下水位、微地形以及断层破碎带等条件,而场地的上覆土层特性对震害的影响在场地条件中占首要地位(胡聿贤等, 1980)。自1906年旧金山 M_S 7.8 大地震后,科研人员从震害异常现象开始意识到场地条件对地震动的影响,之后历次破坏性大地震都不同程度地显示出场地的地震动效应,如1923年日本关东 M_S 7.9 地震、1976年中国唐山 M_S 7.8 地震、1985年墨西哥 M_S 8.1 地震、1999年中国台湾集集 M_S 7.6 地震以及2008年汶川 M_S 8.0 地震等等。国内外的震害经验几乎一致表明,场地条件能显著地影响局部震害分布。场地条件通过影响地震动而对震害分布产生影响,表现为对地震动的不同频率成分有很强的放大或缩小作用。李小军(2013)通过对强震动记录的定量分析研究场地条件与地震动之间的关系,研究结果表明,场地条件能够显著地影响地震动的幅值(如地震动峰值加速度)和频谱特性。

大震远场地震动在一定条件下可以使远离震中地区的结构因共振作用而遭受严重破坏(胡聿贤, 2006)。1985年墨西哥大地震(Beck, Hall, 1986)、1999年集集 M_S 7.6 大地震(Boore, 2001; Furumura et al, 2002)以及2008年的汶川 M_S 8.0 特大地震(门进杰等, 2008; Li, 2008; 吴志坚等, 2012)都导致远场高层建筑严重破坏或长时间剧烈晃动。这是由于震级较大时,地震动中包含着丰富的长周期成分,即便远离震中,在自振周期较长的局部场地条件下,地震动经深厚土层的传播和放大,长周期成分的振动仍然突出,其远场效应会比较显著,仍可导致严重的地震灾害,出现烈度异常(谢礼立等, 1990; 孙崇绍, 1992)。大震远场地震动造成建筑破坏需要具备一定条件:一是局部场地对地震动长周期成分的显著放大作用;二是建筑自振周期与场地卓越周期相当。局部场地条件的地震动能量是影响震害结果的重要因素之一,而场地特性能影响地震动在局部场地的能量分布及特点,从而影响不同类型建筑物的破坏情况(Drimmel 等, 1984)。

深厚土层是与长周期地震动分量相对应的局部场地条件,能够显著影响地震动特性,尤其是大震远场地震动。随着高性能数字强震仪的投入观测,获得可靠的地震动长周期信息已经成为可能。基岩和土层场地的强震动观测记录的对比分析是探讨场地条件对地震动影响最直接的方法,图1给出了2008年汶川 M_S 8.0 地震中渭河盆地的强震动记录及分析结果,充

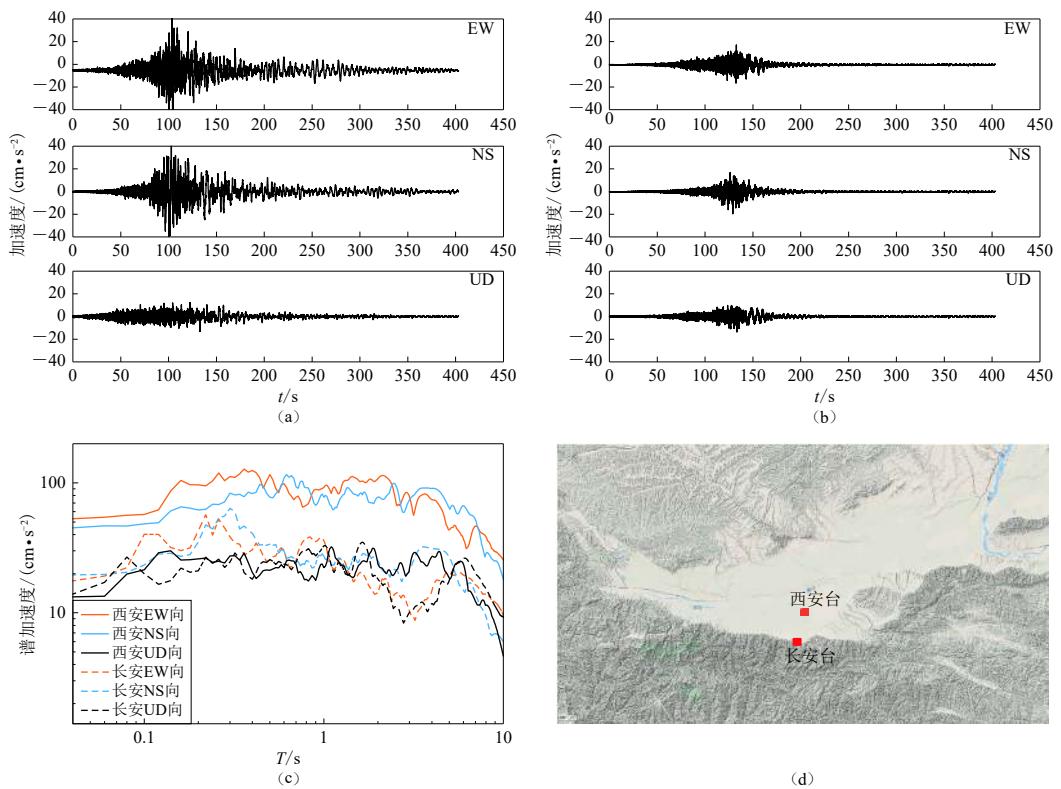


图 1 (a) 西安台地震动加速度时程; (b) 长安台地震动加速度时程; (c) 西安台与长安台的加速度反应谱; (d) 西安台与长安台的相对位置示意图

Fig. 1 (a) Time-history of ground motion acceleration at Xi'an station; (b) Time-history of ground motion acceleration at Chang'an station; (c) Acceleration response spectra of Xi'an station and Chang'an station; (d) Diagrammatic sketch of the relative position of Xi'an station and Chang'an station

分展示了场地条件对地震动特性的影响特点(高孟潭, 2015)。台湾集集大地震(李春锋等, 2006)和汶川特大地震(徐扬等, 2008)的远场强震记录分析结果表明, 盆地等厚覆盖土层局部场地条件对长周期地震动影响显著。蒋连接等(2017)从能量分布和传递的角度研究了覆盖层厚度对远场长周期地震动的影响, 结果表明, 随着覆盖层厚度的增大, 峰值出现的周期越大, 地震动的希尔伯特(Hilbert)能量峰值、输入能量和 Hilbert 能量平均周期 T 都逐渐增加, 当覆盖层厚度超过 400 m 时, 地震动能量主要分布在长周期的区域。厚软覆盖土层的地震动力反应计算结果表明(李小军, 彭青, 2001; 高武平等, 2012), 厚软覆盖层场地对远场大震地震动峰值加速度的影响比较显著, 且不同场地条件的影响差异显著, 较厚、较软的覆盖层场地在较强的地震动作用下, 其放大作用明显减弱。

不同场地的抗震性能及其对地震动的影响存在差异, 科研人员对不同条件的场地进行类别划分, 并合理确定其设计反应谱, 以解决地震工程中场地条件对建筑结构的影响(薄景山等, 2004)。国内外各类抗震设计规范中广泛采用了场地分类的相关研究成果, 并安全、经济地指导着工程抗震实践的顺利进行。由以上的震害调查及场地地震动反应特性研究结果可以看出, 中低频成分的地震动对中低频固有周期的建筑结构能够产生不可忽略的影响, 而场地地震动反应特性能够显著地影响灾害的分布特点。另一方面, 国家经济建设的深入发展

以及大量中长固有周期建筑结构的兴建，对场地类别划分提出了更高的要求，尤其是具有长基本周期的厚场地和软场地，需要进行更为精细的划分，为建筑结构的抗震设计提供更为科学的参考。而现行建筑抗震设计规范中场地划分是以短周期的低层建筑为主要工程背景，场地分类方案中对长基本周期的场地考虑并不充分，需要进一步调整和完善。中国的建筑抗震设计规范是其它行业抗震规范的重要参考，以下将以中国建筑抗震设计规范中的场地分类为线索，研究分析规范中场地分类的现状及面临的问题，并试图给出相应的建议。

1 场地划分现状及面临的问题

科研工作者对地震动特性受局部场地条件的影响特点及规律的深入研究，为实际工程采取相应措施减轻工程结构的地震灾害提供理论支撑。自 20 世纪中叶起，中国、美国、日本以及欧洲各国开始在抗震规范中考虑局部场地条件的影响，为工程结构采用合理的参数进行设计提供保障。

1.1 各国抗震设计规范中场地分类指标特点

常用场地分类方法主要包括三种：基于地质和地貌的场地分类方法，即利用测绘数据快速划分大片区域的场地类别([史大成等, 2011](#))；基于强震动观测数据的场地分类方法，通常采用地震动的水平与竖向谱比值划分场地类别，适用于缺乏钻孔数据的区域进行场地类别划分([Zhao, 2006; Wen et al, 2011](#))；基于钻孔剖面测试数据的场地分类方法，该方法被世界不同国家和地区的抗震设计规范普遍采用，但采用的测试数据略有不同。美国的国家地震减灾计划(National Earthquake Hazards Reduction Program, 缩写为 NEHRP)([Building Seismic Safety Council, 2003](#))和欧洲的 Eurocode8 ([European Committee for Standardization, 2004](#))等抗震设计规范主要依据地表浅层沉积物的刚度，具体是以近地表 30 m 土层的等效剪切波速 v_{S30} 作为指标划分场地类别；我国现行的《建筑抗震设计规范(GB50011-2010)》([中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2010](#))，将深度不超过 20 m 的土层的等效剪切波速作为场地划分指标之一，同时考虑土层厚度的影响，也就是以浅层土层刚度和覆盖土层厚度双指标进行场地类别划分；日本公路协会(Japan Road Association, 缩写为 JRA)([2002](#))的《高速公路桥梁抗震规范》(Design Specifications of Highway Bridges)和 [Zhao \(2006\)](#) 及 [Zhao 和 Xu \(2013\)](#) 的研究成果中，均是基于场地基本周期对场地进行划分，该方法简单实用，得到了广泛运用；[Pitilakis 等\(2013\)](#)提出以基本周期和土层厚度作为主要指标，以多种岩土工程参数(包括土的类型、地层情况、标贯次数、塑性指数、不排水抗剪强度)为辅助指标，将场地划分为 A, B, C, D, E, X 六大类，其中 A 和 B 类场地再分别细分为 A1, A2 和 B1, B2 两个亚类，而 C 和 D 类场地分别细分为 C1, C2, C3 和 D1, D2, D3 三个亚类，该方法综合考虑了多种因素对场地特性的影响，对钻孔剖面数据要求很高，在实际推广应用中存在局限性。

由上述可见，各国的场地分类指标和划分程度不尽相同，各有特点：日本规范采用场地基本周期进行场地划分，根据仪器在地面的测试结果即可完成场地分类，节省人力物力，最为简单实用；美国和欧洲规范则以浅层沉积物刚度为依据，具体以 v_{S30} 为指标划分场地类别，需要钻孔测试相关数据，比日本的地面仪器测试基本周期要稍微复杂；中国建筑抗震设计规范以浅层土层刚度和覆盖层厚度双指标进行场地类别划分，根据场地基本周期计算公式，场地基本周期由场地的剪切波速和覆盖层厚度共同控制，而中国的建筑抗震设计规范中

采用等效剪切波速和覆盖层厚度双指标进行场地类别划分, 在某种程度上考虑了场地基本周期的影响, 所以中国规范综合了日本、欧洲和美国规范的特点, 兼顾了局部场地刚度和场地基本周期, 更具有优越性; Pitilakis 等(2013)考虑了更多的因素和指标, 能够对场地类别进行更为细致的划分, 但囿于目前的工程技术水平, 该研究成果在工程中推广应用尚存在一定难度, 而其对场地进行亚类划分为本文的场地类别划分提供了有益的思路。

从实际工程的角度, 目前绝大多数建筑结构地基考虑 20—30 m 以上浅层地表土层的刚度或强度是足够的, 但从地基动力特性角度, 覆盖土层的厚度显著影响着其基本周期。从科学的角度, 对场地分类中的影响因素进行细致的研究具有重要的工程应用价值, 可为后续场地分类提供基础和支撑, 但考虑到场地分类过程若考虑的因素过多会影响其在实际工程中的应用, 因此需要找到合理的指标, 既能反映主要特点, 又便于应用。

1.2 我国建筑抗震设计规范中场地分类的演化及其面临的问题

各国抗震设计规范中的场地类别划分所采用的指标都与其当时的科技及经济发展水平密切相关, 国家经济越强, 要求使用的参数指标相对越细。建筑抗震设计规范中的场地分类需要综合考虑当前的科研水平和经济条件两方面的因素, 即当前对场地条件对地震动的影响乃至震害特点的认识水平, 并结合经济建设的需求, 给出合理的场地类别划分标准。因此场地分类随着时代的发展并非一成不变, 而要进行相应的调整。

1.2.1 我国建筑抗震设计规范中场地分类的演化

建筑抗震设计规范作为中国结构工程抗震设计的主导标准, 自 1959 年《地震区建筑规范》(草案)(以下简称《第一代规范》)的完成, 标志着第一代建筑抗震规范诞生, 至目前采用的《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)(以下简称《第七代规范》), 历经 7 代修订与更新, 为在不同时期的国家经济建设提供了重要的技术支撑。期间在 1964 年、1974 年、1979 年、1989 年以及 2001 年对规范进行了相关内容的补充与更新, 下文分别简称为第二、三、四、五代规范以及第六代规范。在编制第一代规范过程中刘恢先(1958)提出了规范编制的原则, 即坚持“防止保守思想带来的巨大浪费, 大胆忽略招致的无穷后患”“兼顾国家建设的安全和经济”。在以后各代建筑抗震设计规范制订与修订过程中始终都坚持该原则, 每一次修订都是在大量经验总结和科学研究基础上并结合当前国家经济建设的现状进行。场地分类作为建筑抗震设计规范的重要组成部分, 其演化过程体现了我国科研工作者和工程师对工程结构抗震以及地震动特性受局部场地条件影响特点的认识过程。第一代规范, 由于国内外场地分类的研究成果还比较缺乏, 我国借鉴了苏联的建筑抗震规范, 采用降低或提高基本烈度的方式考虑抗震有利场地和不利场地的影响, 并未对场地进行具体分类。该时期, 日本规范采用调整地震力系数来考虑场地影响。从我国第一代规范对场地部分的简要规定可以看出, 该规范只关注了场地本身软硬程度问题, 而忽视了地基土层与建筑物的刚度匹配问题。实际上在第一代规范编制期间就已经意识到日本和苏联的方法均不能全面反映局部场地对地震动的复杂影响(刘恢先, 1958)。第二代建筑抗震设计规范《地震区建筑设计规范》(草案稿)奠定了我国场地类别划分的基本框架, 给出了判定场地等级的方法, 同时考虑了地基失效和振动两方面因素对工程结构的影响, 以后各代建筑抗震规范中的场地分类都在第二代规范场地分类框架基础上, 结合研究成果及国家经济状况进行修订。对我国建筑抗震设计规范中场地分类的演变及其面临的问题已有充分论述(陈国兴, 2003; 薄景山等, 2004; 彭艳菊等, 2009; 李建亮等, 2014), 本文不再赘述。

1.2.2 我国现行建筑抗震设计规范中场地分类的特点及面临的问题

建筑抗震设计中场地划分要能反映地震动和地震震害的特点，同时场地划分指标要有一定代表性和实际可操作性(蒋溥, 戴丽思, 1993)。第五、六和七代规范的基本思路一致，新一代规范随着科研工作的积累和经济的发展对前规范中的具体细节进一步划分。抗震设计规范中场地分类，主要是基于水平层状场地地震反应分析，虽然从理论上已经相对完善，然而由于实际工程中土层物理、力学特性以及地震动输入等信息不完备，目前只能根据已有的岩土工程资料，对场地土层的地震效应进行粗略的划分，以反映谱特征周期一般性变化趋势(周锡元等, 1999)。现行抗震设计规范中场地分类基本依据是土体振动基本周期的计算公式，涉及到土层剪切波速 v_s 和覆盖土层厚度 H 两个评价指标，按照 H 越大、 v_s 越小、特征周期 T_g 越大的一般规律将场地进行划分。由表1可以得到现行规范场地分类的特点：① I类场地为无覆盖土层或覆盖土层很薄的岩石场地；② II类场地范围相对宽泛，内容相对丰富。II类场地实际上是按近地表浅土层刚度进行分档，包含硬土($500 \text{ m/s} \geq v_{se} > 250 \text{ m/s}$)、中硬土($250 \text{ m/s} \geq v_{se} > 150 \text{ m/s}$)和软土($v_{se} \leq 150 \text{ m/s}$)；所有近地表浅层硬土场地($500 \text{ m/s} \geq v_{se} > 250 \text{ m/s}$)都属于II类场地；③ III类场地一定程度上考虑了近地表浅层土的刚度和覆盖层厚度，包含中硬($250 \text{ m/s} \geq v_{se} > 150 \text{ m/s}$)、中等厚度和深厚($> 50 \text{ m}$)覆盖层场地以及软弱($v_{se} \leq 150 \text{ m/s}$)、中等厚度($15\text{--}80 \text{ m}$)覆盖层场地；④ IV类场地范围狭窄、内容单一，仅包含近地表浅层软土且覆盖层厚度较大的场地；⑤ 近地表浅层软土地按覆盖层厚度进行了场地分类($3\text{--}15 \text{ m}$ 为II类场地， $15\text{--}80 \text{ m}$ 为III类场地， $> 80 \text{ m}$ 为IV类场地)。

表1 《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)中的场地分类方法

Table 1 Site classification method in *Code for Seismic Design of Buildings* (GB50011—2010)

岩石的剪切波速或土的等效 剪切波速/(m·s ⁻¹)	覆盖层厚度/m				
	I ₀	I ₁	II	III	IV
$800 < v_s$	0				
$500 < v_s \leq 800$		0			
$250 < v_{se} \leq 500$		< 5	≥ 5		
$150 < v_{se} \leq 250$		< 3	$3\text{--}50$	> 50	
$v_{se} \leq 150$		< 3	$3\text{--}15$	$15\text{--}80$	> 80

注：表中 v_s 表示岩石的剪切波速， v_{se} 表示土层计算深度内的等效剪切波速，计算深度取覆盖层厚度和20 m中的较小值。

在我国经济尚不发达，建筑结构以中低层为主的时代，建筑结构自振周期相对较短，中长周期地震动成分对建筑结构的影响不显著，而近地表浅层土层刚度影响相对较大，同时考虑到不同类别场地对抗震设计的要求的不同，以及建筑成本的考虑，将近地表浅层土层刚度大的场地都划归为II类场地，不考虑土层厚度的影响，只考虑近地表浅层土层刚度的影响。对于IV类场地，由于长周期建筑结构相对较少，所以压缩了相应的范围。总之，在相当一段时期内现行的建筑抗震设计规范中场地划分方案较好地指导着国家建设工作。

随着国家经济建设的快速发展，大量的高层建筑结构建成，而高层建筑结构的自振周期与中长周期的地震动成分相对应，仅仅考虑近地表浅层土层刚度对房屋地震反应的影响已经无法满足建筑抗震设计的需求，需要重视中长基本周期场地对高层建筑结构的影响。因此按近地表浅层土层刚度以及覆盖层厚度双指标对场地进行更为科学合理的划分提上了日程。

现行建筑抗震设计规范中场地分类面临两方面的问题：

1) 场地分类结果的不适应性问题。现行场地分类方法中, 从覆盖层的角度, 对于Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ类场地, 对应的等效剪切波速分别为 $500 \text{ m/s} \geq v_{\text{Se}} > 250 \text{ m/s}$, $250 \text{ m/s} \geq v_{\text{Se}} > 150 \text{ m/s}$ 和 $v_{\text{Se}} \leq 150 \text{ m/s}$ 区间内, 场地的覆盖层厚度都是开放的, 然而对于场地的基本周期, 如果等效剪切波速不变, 则随着覆盖层厚度的增大其基本周期也随之增大, 当覆盖层达到一定厚度, 场地地震动特性会发生显著变化, 场地地震动参数必然无法合理地反映地震动反应谱的场地效应。[李敏\(2015\)](#)基于场地地震动参数的统计分析结果表明, 中国Ⅱ类、Ⅲ类、Ⅵ类场地的地震动参数呈现出很大的离散性; [陈国兴等\(2020\)](#)对北京、唐山和苏州城区不同场地类别的场地基本周期进行了计算分析, 结果表明现行场地分类的不同类别场地的基本周期值的重叠区间较宽: 相当部分Ⅱ类场地的基本周期值比Ⅲ类场地的大、Ⅲ类场地的基本周期值比Ⅳ类场地的大。本文的分析结论与其一致。从工程应用的角度, 以前受经济条件的影响, 建筑结构相对比较单一, 主要集中在中、短自振周期, 相应于场地的地震动特性也比较明确。随着经济的发展, 大量的长周期、甚至超长周期的建筑结构出现, 现行的场地分类显然无法满足工程的需要。

由于经济方面的原因, 同时也为了更便于实际应用, 现行规范在场地分类中有意识地扩大了Ⅱ类场地的范围, 同时缩小了Ⅰ、Ⅲ和Ⅳ类场地范围, 这样却导致了场地类别划分指标的范围大小不调和, 两个指标在某种特定组合(比如覆盖层厚度为80 m, 平均剪切波速为150 m/s)下, 当覆盖层厚度或剪切波速稍有变化时, 场地类别有可能发生跳档(比如从Ⅳ类突变到Ⅱ类)现象([周锡元等, 1999](#))。现行规范中Ⅳ类场地范围比较窄, 且不封闭, 而且随着经济的发展以及工程应用的现状, Ⅳ类场地对建筑结构影响的特点较为显著, 因此其划分范围应当进一步明确。

2) 场地划分指标在分类中物理意义不明确。现行建筑抗震设计规范中的场地分类方法, 虽然同时考虑了覆盖层厚度和等效剪切波速这两个指标, 也能一定程度上表现出覆盖层厚和等效剪切波速对场地分类的影响趋势, 但从场地分类划分标准的角度, 两个指标对场地分类影响的物理意义并不是很清晰, 具体表现为: 场地分类中采用等效剪切波速和覆盖层厚度双指标, 但在类别划分中不能明确体现出每个指标的影响程度, 即这两个指标在场地类别划分中的个体物理意义不明确。另外, 等效剪切波速的计算深度取覆盖层厚度和20 m中的较小值, 缺乏实际的物理依据。

2 场地分类方法的建议

2.1 场地分类及其指标的内涵

2.1.1 工程场地与地震动、建筑结构的关系及内涵

不同的工程场地其抗震性能存在差异, 在地震作用下土体本身可能发生破坏, 从而影响场地内的建筑结构, 比如通常出现的地震过程中建筑结构地基破坏。另外, 工程场地本身抗震性能较好, 但当场地的动力特性与建筑结构的动力特性出现某种组合, 在地震过程中可能会使建筑结构发生严重破坏。

工程场地是工程结构与地震动联系的桥梁, 因此场地分类过程既要考虑场地对地震动特性的影响, 又要适当考虑场地动力特性对不同自振周期工程结构的动力反应特性的影响。从某种意义上, 场地本身可以认为是一种工程结构, 有其自身的动力反应特点, 通常可用场地的基本周期描述。场地分类过程中: 第一, 要考虑地震动输入问题, 即基岩地震动传播到

局部场地的传播效率及程度问题(具体表现为局部场地对不同频率地震动的放大或缩小),这与场地介质质点自振频率密切相关;第二,要考虑地震动输出问题,即局部场地地震动传播到工程结构的传播效率及程度问题(具体表现为局部场地对不同自振周期的工程结构的影响),这与场地土体基本周期密切相关。

根据波动理论,局部场地对地震动的影响包括两方面:其一是介质质点的振动,其二是质点振动在介质中的传播,即波动。地震动能量在不同介质间的传播存在传递程度问题,即地震动能量在不同介质间一般不是100%传递;同种介质地震动能量的传播可以看作是不同介质间地震动能量传递的一个特例,即地震动能量在介质中100%传递,或者地震动能量在介质中的完全传递。

关于加速度、速度及位移影响的认识:加速度反映了力的变化作用,对于理想刚体,即物体的刚度趋于无穷大,力对物体的作用,加速度、速度、位移是与施加点的反应同时一致的,即整个物体的反应是完全一样的。对于非理想刚体,由于物体刚度有限,在局部受力后,不能瞬时将扰动传给整体,即局部的扰动对整个物体的作用有个传播过程,物体对局部扰动的反应也表现出不同的特点,主要与扰动的特点(频率、幅值、持时等)、物体的刚度、尺度等三个方面相关。当扰动的特性(频率)与物体的刚度相一致时,扰动的能量就会以较高的比例被物体接收(如果频率特性与物体的刚度完全匹配,则发生共振,此时扰动的能量就会100%被物体接收);如果物体的尺度与扰动的频率相匹配,扰动在物体中的传播就会在空间上充分反映出来,即扰动在物体上以位移形式充分展示。反之,如果扰动的频率与物体的尺度匹配不良,扰动对物体产生的位移则无法充分体现。

对于某一物体,力的作用效果表现为变形和运动,力的大小、方向、作用时间以及物体的质量和刚度等均会影响力的作用效果。力的大小相同,则短周期(高频)的加速度呈现出力的方向的显著变化,而速度和位移上均未有体现;对于中等频率的扰动,物体的运动速度能够充分体现,而加速度无法充分体现;对于低频成分的扰动,由物体的位移充分体现。在一定条件下,扰动、刚度、尺度相匹配时建筑结构就会产生较大的反应,场地分类中应予以考虑。

2.1.2 场地分类指标的物理内涵

场地分类中两个指标为覆盖层厚度和等效剪切波速,其中:覆盖层厚度主要影响场地的基本周期,可按该指标结合工程结构的自振周期分类对场地基本周期进行相应的分类,从而对场地进行分类;等效剪切波速反映了场地的刚度(或者软硬程度),同时也会影响场地的基本周期,主要影响地震动在不同介质间能量传递,继而决定输入基岩地震动中被放大或缩小的频谱成分及其程度,据此可对场地进行亚类分类。

当输入振动与结构或物体的自振周期相一致时,就会发生共振现象,此时结构或物体的振动最强烈。工程结构在地震中的破坏程度与其振动的强弱密切相关,振动越强烈,越容易破坏。当输入地震动的卓越周期与场地基本周期相一致时,场地振动最强烈,同时当工程结构的自振周期与场地基本周期相一致,场地与工程结构发生共振,工程结构的振动最为强烈;当输入地震动的卓越周期与场地基本周期不一致,而与工程结构自振周期相一致,也可能导致工程结构产生较大反应;当输入地震动的卓越周期与场地基本周期和工程结构自振周期都不一致,工程结构产生的地震动反应相对最弱。以工程结构的基本周期为背景,基于场地基本周期对场地进行分类,可避免在局部场地条件下工程结构由于共振而加重地震灾害的现象。

等效剪切波速作为场地分类的重要指标之一, 具有自身的特点和优势。剪切波速是评价土体动力特性的重要指标, 涉及到土体的惯性力和波传播特性。(汪闻韶, 1994)。土体的剪切波速 v_s 与剪切模量 G 的平方根成正比, 即

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial \gamma}}, \quad (1)$$

可以看出, 剪切波速能在一定程度反映土体的软硬程度, 即刚度。而且剪切波速也能在一定程度上反映土体的强度特性(高印立等, 1998; 夏唐代等, 2004)。根据单层土体振动基本周期的计算公式

$$T = \frac{4H}{v_s}, \quad (2)$$

可以看出, 土体剪切波速与土体的振动基本周期密切相关, 该式也体现了覆盖层厚度对场地振动基本周期的影响。

对于覆盖层为多层的土体, 其振动基本周期也是在单层土体振动基本周期计算公式基础上得到, 多层土体场地基本周期(或特征周期)的计算公式为

$$T_g = \sum_i \frac{4H_i}{v_{si}}, \quad (3)$$

式中, H_i 和 v_{si} 分别为第 i 层土的厚度和剪切波速, T_g 为场地的特征周期, 其物理意义是在小应变下场地的自振周期, 强地震动时自振周期近似取为 $T_s = 1.25T_g$ 。

在我国的场地分类演化过程中, 初期采用土体的强度作为场地分类的重要考虑因素, 第二代规范直接采用土体强度作为场地分类指标。随着震害调查分析, 地基失效虽然能够导致一定的经济损失, 但造成上部结构破坏的情况相对较少, 一般不会造成严重伤亡(廖振鹏, 1989)。因此场地分类中土体强度的影响逐步降低, 第五代规范中采用平均剪切波速反映土体软硬, 而不再强调土体强度。

不同的工程对象由于其自身的特点, 对场地抗震划分指标侧重点不同, 比如, 对于公路、铁路等行业, 由于工程对象在地震过程中对地基失效导致的破坏比较敏感, 因此在场地抗震分类中采用土体强度相关的指标进行划分; 而对于一般的建筑工程结构, 地基失效虽然能导致一定的经济损失, 但对上部结构的影响并不严重, 且一般不会造成严重伤亡, 因此在场地抗震分类中, 指标侧重土体的刚度(软硬), 而不是强度。对于同种材料强度与刚度有一定的联系(比如刚度大时强度也大), 但对于不同种类的土体刚度与强度并非对应关系。剪切波速能够较好地反映土体的刚度, 同时在一定程度上也能反映土体的强度, 因此用剪切波速作为场地抗震分类的划分指标, 是比较合理的。

本文在场地分类中将在现行的场地分类基础上采用两个层次分别考虑覆盖层厚度和等效剪切波速的影响, 使得分类指标物理意义更加明确。

2.2 场地分类原则

中国建筑抗震规范中场地分类方法经历了从定性到定量的过程, 定量分析方法中包括单指标法、双指标法及多指标法, 目前中国建筑抗震设计规范中采用等效剪切波速和覆盖层厚度双指标进行场地分类。单指标法的典型代表是场地指数法, 虽然该方法从理论上更加完善(刘曾武, 1991; 刘曾武, 郭玉学, 1992), 但不便于工程人员使用, 且剪切模量的物理意义不明确(彭艳菊等, 2009)。

场地地震动反应特性分类要考虑剪切波速、土层深度和地震动特性等三方面的影响特点。土层等效剪切波速可划分为高剪切波速、中剪切波速和低剪切波速；覆盖土层厚度可划分为薄层、中厚层、深厚层和超深厚层；地震动频谱特性可分为高频、中频和低频三种成分，而与之相对应的地震动参量分别是加速度、速度和位移。

本文对场地分类进行完善和修正主要遵循以下两个原则：

1) 依据场地基本周期，以覆盖层厚度为指标，对场地进行第一层次分类，反映场地与建筑结构的共振频率，这与以前的场地分类原则一致；

2) 在1)的基础上，依据场地的等效剪切波速分档对场地进行亚分类，这也与以前的等效剪切波速分档相一致，但要在场地类别上有所体现，场地亚分类反映了场地的刚度或软硬程度，从某种意义上也反映了强度。

2.3 场地分类的建议

根据以上对现行场地分类特点的分析以及对场地分类内涵的认识，结合目前国家经济发展及工程建设需求，本着承前启后、工程角度的科学性与经济角度的可行性相结合的原则，对现行场地分类方法进行一定程度的调整、完善。

2.3.1 思路调整

总体思想是针对双指标进行分层次的分类。第一层次与现行场地分类相一致，基于场地基本周期，更加明确不同类别场地的基本周期，在原来四大类场地基础上，增加至五大类，其中第V类场地是除前面四类场地以外的场地，这样可以更明确地定义前面的四类场地，主要以场地的覆盖层厚度作为第一层次划分指标，同时兼顾等效剪切波速。第二层次分类是以等效剪切波速作为划分指标，主要区分场地土层的软硬程度，而等效剪切波速分档与现行的场地分类一致。场地划分类别的表示符号定义为“Ⅱ₁”的形式，在原来分类符号基础上增加阿拉伯数字下标，这样罗马数字明确表示了场地的基本周期的范围，数字越大，场地基本周期越大，下标阿拉伯数字则表示场地土层的软硬程度，数字越大表示场地土层越软。

2.3.2 场地类别划分界限的确定

场地类别第一层次的划分主要依据《建筑工程抗震形态设计通则》(中国工程建设标准化协会, 2004)，将建筑结构的自振周期划分为短周期(0—0.5 s)、中周期(0.5—1.5 s)和长周期(1.5—5.5 s)，可为场地分类提供参考。根据中国《民用建筑设计通则(GB50352—2019)》(中华人民共和国住房和城乡建设部, 2019)的规定，建筑高度超过100 m时，不论住宅及公共建筑均为超高层建筑。2020年住建部和国家发改委联合发布的《进一步加强城市与建筑风貌管理的通知》(中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2020)，明确了对超高层严格执行工程抗震设防审批制度，这从另一角度强调了100 m作为建筑设计、施工等各方面的门槛值，本文就以100 m高的建筑自振周期作为Ⅳ类与V类场地的分界值。根据《建筑结构荷载规范 GB50009—2012》(中华人民共和国住房和城乡建设部, 2012)中结构基本自振周期的经验公式，钢筋混凝土结构的基本自振周期： $T_1 = (0.05—0.10)n$ ，n为建筑的总层数，对于100 m高的办公或住宅建筑大约30层，可以得到建筑结构的基本自振周期 $T_1 = (1.5—3.0)n$ 。沈蒲生等(2014)根据高度分析计算建筑结构自振周期的结果为，50 m和100 m高的建筑结构自振周期分别为1.28 s和2.588 s。综合以上结果分析，本文Ⅳ类与V类场地的基本周期分界值取为3 s。

根据其中的自振周期界限并结合相应场地等效剪切波速，可获得不同等效剪切波速场

地基本周期与土层厚度的对应值; 为了保证短周期成分的严格性, 并兼顾现行场地分类, 分别取 30 m, 20 m, 15 m 为分界深度; 同理为了保证中等周期场地无长周期成分, 并兼顾现行场地分类, 分别取 100 m, 90 m, 80 m 为分界深度; 根据钻孔统计规律, 一般地下 100 m 左右土层剪切波速即可到达 500 m/s, 因此深厚土层超过 100 m 以深的部分计算土层自振周期时按 500 m/s 计算, 对于Ⅳ类场地, 其自振周期比Ⅲ类场地多 1.5 s, 换算为 500 m/s 的土层厚度约为 180 m, 因此Ⅳ类和Ⅴ类场地的硬土覆盖层分界深度为 280 m, 考虑到浅层剪切波速变化, 中硬和软弱场地Ⅳ类和Ⅴ类场地覆盖层分界深度分别为 270 m 和 260 m. 由于不同场地类别第二层次的划分与现行场地等效剪切波速分档一致, 就不再变化. 建议的场地分类方法详见表 2.

表 2 建议场地分类方法

Table 2 Suggested site classification method

岩石的剪切波速或土的等效 剪切波速/(m·s ⁻¹)	覆盖层厚度/m						场地类别 亚类
	I ₀	I ₁	II	III	IV	V	
v _s >800	0						
800≥v _s >500		0					
500≥v _{se} >250	<5	5—30	30—100	100—280	>280		1
250≥v _{se} >150	<3	3—20	20—90	90—270	>270		2
v _{se} ≤150	<3	3—15	15—80	80—260	>260		3

注: 表中 v_s 表示岩石的剪切波速, v_{se} 表示近地表 20 m 岩土介质等效剪切波速

修正后的场地分类具有以下特点: 第一层次的场地类别划分是以场地基本周期为依据, Ⅱ, Ⅲ 和 Ⅳ 类场地基本周期分别与建筑结构的短周期、中周期和长周期固有频率相对应; 第二层次的场地类别划分是以场地的软硬程度(或者刚度)为依据, 根据等效剪切波速分为三个档次, 阿拉伯数字 1, 2 和 3 分别代表了硬、中硬和软三种程度. 场地分类中的两个指标物理意义明确, 并在分类中充分体现.

由于对Ⅱ, Ⅲ 和 Ⅳ 类场地的划分范围更加明确且有限化(覆盖层厚度原来不封闭的部分进行了限制), 避免了周锡元等(1999)文中指出的常规场地的跳档问题.

从场地的刚度和覆盖层厚度两个角度对场地的地震动特性进行分类, 亚类数值表示刚度, 数字越大, 刚度越小, 而刚度从某种程度上反映了场地的强度和变形能力, 物理力学意义很清晰; 覆盖层厚度更多反映的是场地基本周期, 从 I 到 V, 代表场地基本周期分别为: <0.25 s 的为Ⅰ类场地, 0.25—0.5 s 之间的为Ⅱ类场地, 0.5—1.5 s 之间的为Ⅲ类场地, 1.5—3.0 s 之间的为Ⅳ类场地, >3.0 s 的为Ⅴ类场地.

现在的场地分类与原来的场地分类相比, 将原来的Ⅱ类场地划分到Ⅲ, Ⅳ, Ⅴ 中, 原来的Ⅲ类场地有一部分划分到Ⅳ和Ⅴ类中. 原来的场地分类中虽然也能同时考虑等效剪切波速和场地的覆盖层厚度这两个因素, 但在场地类别划分过程中并没有内在的统一标准, 而新的场地分类划分思路明确, 以场地基本周期作为第一层次分类的基本标准, 然后在此基础上以场地刚度(等效剪切波速)作为第二层次分类的划分标准. 这样, 场地分类更加清晰, 同时新的场地划分是在原场地划分基础上的改进, 也就是原场地划分结果从根本上并没有改变. 原场地分类每一类场地都不闭合, 因此场地特点随着样本范围的扩大, 可能会发生变化. 本文划分方法中, 使Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ类的场地范围确定, 场地的特点确定, 仅仅让Ⅴ类场地处于非封

闭状态.

2.4 建议场地分类的合理性和有效性验证

以陈永新(2015)文中选取的日本 KiK-net 强震台网中的两个深厚中硬场地(CHBH10 和 CHBH13)、两个中等厚度中硬场地(CHBH12 和 KNGH11)、两个深厚软弱场地(IBRH07 和 IBRH10)以及两个中等厚度软弱场地(SZOH35 和 SZOH42)的钻孔资料及强震记录分析结果, 来说明本文场地分类的合理性. 场地土层参数列于表 3 和表 4.

根据 CHBH10 代表的场地条件, 等效剪切波速为 240 m/s, 根据现行规范, 划分为Ⅲ类场地. 但是如果等效剪切波速为 251 m/s, 则该场地条件便可划分为Ⅱ类场地, 因此认为该场地处于Ⅱ类与Ⅲ类场地之间的状态. 用本文的场地划分标准, 该场地被划分为Ⅳ₂类场地, 根据场地钻孔资料计算得到的自振周期以及强震记录分析结果, 显然本文的场地分类能更合理地反映场地的动力特点.

CHBH13 代表的场地条件, 根据现行规范划分为Ⅲ类场地, 而用本文的场地划分标准, 该场地为Ⅳ₂类场地, 根据场地钻孔资料计算得到的自振周期, 本文的场地分类能更合理地反映场地的动力特点.

CHBH12 和 KNGH11 代表的场地条件, 根据现行规范划分为Ⅲ类场地, 而用本文的场地

表 3 中硬场地钻孔资料及分析结果

Table 3 Drilling data and analysis results of medium-hard sites

钻孔	层序	厚度/m	剪切波速 /(m·s ⁻¹)	场地卓越 周期/s	根据钻孔资料计算的 场地基本周期/s	现行规范 场地分类	本文场地分类 及特征描述
CHBH10	1	24	240	1.42	2.59	Ⅲ	Ⅳ ₂ 厚中硬场地
	2	50	340	1.45			
	3	176	440	2.06			
	4	300	580				
	5	450	770				
	6						
CHBH13	1	22	220	0.66	2.22	Ⅲ	Ⅳ ₂ 厚中硬场地
	2	78	350	0.57			
	3	100	430	0.56			
	4	350	570				
	5	300	680				
	6						
CHBH12	1	22	190	1.70	1.31	Ⅲ	Ⅳ ₂ 厚中硬场地
	2	76	360	1.73			
	3	122	580	1.97			
	4	180	680				
	5	450	850				
	6						
KNGH11	1	22	220	0.92	1.44	Ⅲ	Ⅳ ₂ 厚中硬场地
	2	78	300	0.94			
	3	124	580	1.02			
	4	126	920				
	5	125	1360				
	6						

注: 场地的卓越周期是陈永新(2015)文中根据强震记录获得的结果, 下同

表 4 软弱场地钻孔资料及分析结果

Table 4 Drilling data and analysis results of soft sites

钻孔	层序	厚度/m	剪切波速 (m·s ⁻¹)	场地卓越 周期/s	根据钻孔资料计算的 场地基本周期	现行规范 场地分类	本文场地分类 及特征描述
IBRH07	1	22	90	1.59	2.62	IV	IV ₃ 厚软场地
	2	26	220				
	3	99	340				
	4	153	500				
	5	350	650				
	6						
IBRH10	1	20	110	0.81	2.52	IV	IV ₃ 厚软场地
	2	170	380				
	3	220	530				
	4	108	850				
	5	182	2350				
	6						
SZOH35	1	15	100	0.44	0.92	III	III ₃ 中厚软场地
	2	30	380	0.61			
	3	95	690	0.22			
	4						
SZOH42	1	5	50	0.46	0.78	III	III ₃ 中厚软场地
	2	25	260	0.49			
	3	40	630				
	4	70	690				
	5						

划分标准, 该场地为Ⅳ₂类场地。根据场地钻孔资料的计算得到的自振周期以及强震记录分析结果, 这两个场地条件处于Ⅲ类与Ⅳ类场地的分界处, 因此现行规范和本文的场地划分都合理。

IBRH07 和 IBRH10 代表的软厚场地条件, 根据现行规范划分为Ⅳ类场地, 用本文的场地划分标准, 该场地也划分为Ⅳ₃类场地, 根据场地钻孔资料的计算得到的自振周期以及强震记录分析结果, 现行规范和本文的场地划分都合理。

SZOH35 和 SZOH42 代表的中厚软弱场地条件, 根据现行规范划分为Ⅲ类场地, 用本文的场地划分标准, 该场地也划分为Ⅲ₃类场地, 根据场地钻孔资料的计算得到的自振周期, 现行规范和本文的场地划分都合理。

由以上的分析结果可以看出: 对于软弱场地, 现行规范与本文场地划分结果是一致的; 对于坚硬场地, 本文场地划分结果能够更好的地体现场地的特点。强震记录分析结果从大的趋势上与场地分类结果也是相符的。新的调整方案与现有的划分方法相融合, 保证技术人员可以依旧按照现行分类方法进行分类, 也可进行更为细致的类别划分。

3 讨论与结论

场地分类作为建筑抗震设计中的重要环节, 涉及科研、工程及经济等多方面的发展与平衡, 其确定过程是复杂甚至是反复的, 其结果又需简单实用且具有传承性和连续性。随着科研水平的提高, 科研工作人员对厚软场地震害研究的认识及深入为场地分类提供了科学技术支撑; 同时经济建设的发展使得大量长周期建筑分布在各种不同的场地条件下。对现有场

地分类进行调整已经被提上日程.

本研究主要针对现有场地分类方法及边界范围进行了完善和调整, 主要如下:

1) 采用分层次分类的方法解决了现行场地划分双指标分类方法中指标与分类的物理意义对应不明确的问题. 每个指标对应一个层次: 第一层次分类以覆盖层厚作为指标, 主要考虑场地的基本周期, 采用罗马数字表示, 与现有的分类相一致; 第二层次分类以剪切波速为指标, 主要考虑土层软硬程度的影响, 采用下标阿拉伯数字“1, 2, 3”表示. 新的分类方法中场地分类符号能够明确表示场地的基本周期和软硬程度.

2) 进一步明确了第一层次分类的划分界限: 调整了Ⅱ, Ⅲ和Ⅳ类场地的覆盖层厚度界限; 增加了第Ⅴ类场地, 将Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ和Ⅳ类场地以外的归为Ⅴ类场地. 解决了现行以短和中长自振周期建筑结构为主要背景的场地划分方案不能很好地适应大量长自振周期建筑工程的需求的问题. 尤其对于硬土场地, 根据现行场地分类结果仅仅考虑峰值加速度的放大倍数, 而忽略中长和长周期成分地震动对中高层以及高层建筑结构的影响, 得到的设计地震动参数无法合理地反映场地对建筑结构地震反应的影响. 分析结果表明, 修正后的场地分类方案既能够融合现行场地分类方案, 同时, 对硬土和中硬土场地的第一层次分类的细化能够更合理地反映场地对地震动的影响, 是在现行场地分类方案基础上的进一步科学合理的细化和完善.

场地类别划分包含多方面的影响因素, 本文仅以中长自振周期和长自振周期建筑结构为工程背景, 以场地基本周期为依据对各类场地覆盖层厚度界限进行了相应的调整, 并基于此完善了场地类别的表达方式. 场地分类涉及以下几方面内容需要进一步探讨:

1) 近地表浅层岩土介质的等效剪切波速是采用 v_{S30} 还是 v_{S20} 合理? 显然 v_{S30} 能更好地反映近地表浅层岩土介质的刚度, 然而, 在以低层和中高层建筑为主的年代, v_{S20} 已经足够, 从经济角度更为合理. 但随着高层建筑的大量兴建, 采用 v_{S30} 作为场地类别的划分指标是必然的趋势, 陈国兴等(2020)已有最新研究成果, 仍然需要作进一步的研究.

2) 基岩与土层的剪切波速分界值的确定问题. 中国现行建筑抗震设计规范中场地分类基岩剪切波速定义为大于500 m/s的岩土介质, 而美国、欧洲及日本的基岩与土层的剪切波速分界值分别为760 m/s, 800 m/s, 600 m/s. 随着经济的发展、技术的提高及工程对象地震反应要求的不同, 对基岩剪切波速进行调整也是必然的.

3) 场地划分分类指标是采用覆盖土层厚度还是场地基本(或特征)周期? 覆盖土层厚度能在一定程度上反映场地基本(或特征)周期, 且在工程中通过钻孔确定覆盖层的物理力学特性的技术手段比较成熟, 因此中国现行建筑抗震设计规范中场地分类采用覆盖层厚度作为指标. 但如果能够直接测得场地的基本(或特征)周期, 以场地基本(特征)周期为指标更加合理, 因此研究和确定场地基本(特征)周期的获取技术和分析方法是场地划分的一项重要工作.

参 考 文 献

- 薄景山, 翟庆生, 刘红帅, 孙超. 2004. 场地分类及其在我国的演变[J]. *自然灾害学报*, 13(3): 44–49.
 Bo J S, Zhai Q S, Liu H S, Sun C. 2004. Site classification and its evolution in Chinese code for seismic design of buildings[J]. *Journal of Natural Disasters*, 13(3): 44–49 (in Chinese).
 陈国兴. 2003. 中国建筑抗震设计规范的演变与展望[J]. 防灾减灾工程学报, 23(1): 102–113.
 Chen G X. 2003. The evolution and prospect of the code for seismic design of buildings in China[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 23(1): 102–113 (in Chinese).

- 陈国兴, 丁杰发, 方怡, 彭艳菊, 李小军. 2020. 场地类别分类方案研究[J]. 岩土力学, 41(11): 3509–3522.
- Chen G X, Ding J F, Fang Y, Peng Y J, Li X J. 2020. Investigation of seismic site classification scheme[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 41(11): 3509–3522 (in Chinese).
- 陈永新. 2015. 基于KiK-net强震动记录对不同土层条件下场地非线性反应的研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所: 13–46.
- Chen Y X. 2015. *Research on Nonlinearity in Different Soil Site Effect Based on KiK-net Strong Motion Records*[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration: 13–46 (in Chinese).
- 高孟潭. 2015. GB 18306-2015《中国地震动参数区划图》宣贯教材[M]. 北京: 中国标准出版社: 186.
- Gao M T. 2015. GB18306-2015: *The Material of Earthquake Dynamic Parameter Map of China*[M]. Beijing: China Standard Press: 186 (in Chinese).
- 高武平, 高孟潭, 陈学良. 2012. 天津滨海软土地场的大震远场作用[J]. *地震学报*, 34(2): 235–243.
- Gao W P, Gao M T, Chen X L. 2012. Far-field strong earthquake effect in Tianjin coastal soft site[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 34(2): 235–243 (in Chinese).
- 高印立, 阎澍旺, 王金英. 1998. 剪切波速与土性指标间的统计关系[J]. 建筑科学, 14(5): 20–22.
- Gao Y L, Yan S W, Wang J Y. 1998. The statistical relation of shear velocity with soil properties[J]. *Building Science*, 14(5): 20–22 (in Chinese).
- 胡聿贤, 孙平善, 章在墉, 田启文. 1980. 场地条件对震害和地震动的影响[J]. 地震工程与工程振动, (1): 34–41.
- Hu Y X, Sun P S, Zhang Z Y, Tian Q W. 1980. Effects of site conditions on earthquake damage and ground motion[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, (1): 34–41 (in Chinese).
- 胡聿贤. 2006. 地震工程学[M]. 2版. 北京: 地震出版社: 63.
- Hu Y X. 2006. *Earthquake Engineering*[M]. 2nd ed. Beijing: Seismological Press: 63 (in Chinese).
- 蒋连接, 巩思锋, 蔡万军. 2017. 覆盖层厚度对远场长周期地震动能量特性的影响[J]. *科学技术与工程*, 17(14): 1–6.
- Jiang L J, Gong S F, Cai W J. 2017. Effect of thickness of overburden layer on energy property of far-field long period ground motions[J]. *Science Technology and Engineering*, 17(14): 1–6 (in Chinese).
- 蒋溥, 戴丽思. 1993. 工程地震学概论[M]. 北京: 地震出版社: 256.
- Jiang P, Dai L S. 1993. *Introduction of Engineering Seismology*[M]. Beijing: Seismological Press: 256 (in Chinese).
- 李春锋, 张旸, 赵金宝, 唐晖. 2006. 台湾集集大地震及其余震的长周期地震动特性[J]. *地震学报*, 28(4): 417–428.
- Li C F, Zhang Y, Zhao J B, Tang H. 2006. Long-period ground motion characteristics of the 1999 JiJi(Chi-Chi), Taiwan, main-shock and aftershocks[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 28(4): 417–428 (in Chinese).
- 李建亮, 邱恩喜, 赵晶, 李福海, 亢川川. 2014. 建筑抗震设计规范中场地类别划分的进展分析[J]. 路基工程, (3): 55–58.
- Li J L, Qiu E X, Zhao J, Li F H, Kang C C. 2014. Analysis of the progress of site classification methods in building seismic design codes[J]. *Subgrade Engineering*, (3): 55–58 (in Chinese).
- 李敏. 2015. 考虑场地地震动影响的场地分类方法研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所: 129–130.
- Li M. 2015. *Study on the Site Classification Method based on Seismic Site Effects*[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration: 129–130 (in Chinese).
- 李小军, 彭青. 2001. 不同类别场地地震动参数的计算分析[J]. *地震工程与工程振动*, 21(1): 29–36.
- Li X J, Pen Q. 2001. Calculation and analysis of earthquake ground motion parameters for different site categories[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 21(1): 29–36 (in Chinese).
- 李小军. 2013. 地震动参数区划图场地条件影响调整[J]. 岩土工程学报, 35(增刊): 21–29.
- Li X J. 2013. Adjustment of seismic ground motion parameters considering site effects in seismic zonation map[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 35(S2): 21–29 (in Chinese).
- 廖振鹏. 1989. 地震小区划: 理论与实践[M]. 北京: 地震出版社: 111.
- Liao Z P. 1989. *Seismic Microzonation: Theory and Practice*[M]. Beijing: Seismological Press: 111 (in Chinese).
- 刘恢先. 1958. 关于编制我国地震区建筑物设计规范的一些意见 [J]. 土木工程, 3(7): 333–336.
- Liu H X. 1958. Some opinions on compiling the design code for buildings in earthquake areas in China[J]. *Civil Engineering*, 3(7): 333–336 (in Chinese).

- 刘曾武. 1991. 场地指数法在场地评定中的合理性和适用性 [J]. 水文地质工程地质, **18**(1): 31–34.
- Liu Z W. 1991. Rationality and applicability of the site index method in site assessment[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, **18**(1): 31–34 (in Chinese).
- 刘曾武, 郭玉学. 1992. 场地指数法与场地分类法在实际应用中的比较 [J]. 工程抗震, **13**(4): 23–27.
- Liu Z W, Guo Y X. 1992. Comparison of site index method and site classification in practice[J]. *Earthquake Resistant Engineering*, **13**(4): 23–27 (in Chinese).
- 门进杰, 史庆轩, 陈曦虎. 2008. 汶川地震对远震区高层建筑造成的震害及设计建议 [J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), **40**(5): 648–653.
- Men J J, Shi Q X, Chen X H. 2008. Seismic damage of high buildings caused in the remote areas from epicenter and aseismic design suggestion[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition)*, **40**(5): 648–653 (in Chinese).
- 彭艳菊, 吕悦军, 黄雅虹, 施春花, 唐荣余. 2009. 工程地震中的场地分类方法及适用性评述 [J]. 地震地质, **31**(2): 349–362.
- Peng Y J, Lü Y J, Huang Y H, Shi C H, Tang R Y. 2009. A review on site classification method and its applicability in earthquake engineering[J]. *Seismology and Geology*, **31**(2): 349–362 (in Chinese).
- 沈蒲生, 张超, 叶缙森, 何益斌. 2014. 我国高层及超高层建筑的基本自振周期 [J]. 建筑结构, **44**(18): 1–3.
- Shen P S, Zhang C, Ye J Y, He Y B. 2014. Fundamental natural period of high-rise and super high-rise buildings in China[J]. *Building Structure*, **44**(18): 1–3 (in Chinese).
- 史大成, 温瑞智, 任叶飞, 周宝峰. 2011. 基于 GIS 的场地分类方法研究 [J]. 地理信息世界, **9**(1): 23–27.
- Shi D C, Wen R Z, Ren Y F, Zhou B F. 2011. The study of site classification based on GIS[J]. *Geomatics World*, **9**(1): 23–27 (in Chinese).
- 孙崇绍. 1992. 从海原大地震看我国特大地震的震害特点及应从中吸取的对策经验 [J]. 西北地震学报, **14**(增刊): 23–27.
- Sun C S. 1992. The characteristics of earthquake damage caused by the great earthquake in China and the countermeasures to be learned from the great earthquake in Haiyuan[J]. *Journal of Northwest Seismology*, **14**(S1): 23–27 (in Chinese).
- 汪闻韶. 1994. 土工地震减灾工程中的一个重要参数: 剪切波速 [J]. *水力学报*, **25**(3): 80–84.
- Wang W S. 1994. An important parameter in geotechnical engineering for earthquake disaster mitigation: Shear wave velocity[J]. *Shuili Xuebao*, **25**(3): 80–84 (in Chinese).
- 吴志坚, 王兰民, 陈拓, 王平. 2012. 汶川地震远场黄土地带地震动放大效应机制研究 [J]. 岩土力学, **33**(12): 3736–3740.
- Wu Z J, Wang L M, Chen T, Wang P. 2012. Study of mechanism of site amplification effects on ground motion in far field loess during Wenchuan M_S 8.0 earthquake[J]. *Rock and Soil Mechanics*, **33**(12): 3736–3740 (in Chinese).
- 夏唐代, 颜可珍, 石中明, 薛跃东. 2004. 地基剪切波速与抗剪强度的关系研究 [J]. 岩石力学与工程学报, **23**(增刊): 4435–4437.
- Xia T D, Yan K Z, Shi Z M, Xue Y D. 2004. Study on relationship of shear wave velocity and shear strength of foundation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **23**(S1): 4435–4437 (in Chinese).
- 谢礼立, 周雍年, 胡成祥, 于海英. 1990. 地震动反应谱的长周期特性 [J]. 地震工程与工程振动, **10**(1): 1–20.
- Xie L L, Zhou Y N, Hu C X, Yu H Y. 1990. Characteristics of response spectra of long-period earthquake ground motion[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **10**(1): 1–20 (in Chinese).
- 徐扬, 赵晋泉, 李小军, 马秀芳, 赵向佳. 2008. 基于汶川地震远场强震动记录的厚覆盖土层对长周期地震动影响分析 [J]. 震灾防御技术, **3**(4): 345–351.
- Xu Y, Zhao J Q, Li X J, Ma X F, Zhao X J. 2008. Study on effect of thick sedimentary layers on long-period ground motion from far-field strong motion records of Wenchuan earthquake[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, **3**(4): 345–351 (in Chinese).
- 中国工程建设标准化协会. 2004. CECS160-2004 建筑工程抗震性态设计通则(试用)[S]. 北京: 中国计划出版社: 209–210.
- China Association for Engineering Construction Standardization. 2004. *CECS160-2004 General Rule for Performance-Based Seismic Design of Buildings*[S]. Beijing: China Planning Press: 209–210 (in Chinese).

- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 2010. GB50011-2010 建筑抗震设计规范(2016版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社: 8-21.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. 2010. *GB50011-2010 Code for Seismic Design of Buildings (2016 Version)*[S]. Beijing: China Architecture & Building Press: 8-21 (in Chinese).
- 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2012. GB50009-2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社: 154.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. 2012. *GB50009-2012 Load Code for the Design of Building Structures*[S]. Beijing: China Architecture & Building Press: 154 (in Chinese).
- 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2019. GB50352-2019 民用建筑设计统一标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社: 6.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. 2019. *GB50352-2019 Uniform standard for Design of Civil Building*[S]. Beijing: China Architecture & Building Press: 6 (in Chinese).
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 2020. 住房和城乡建设部 国家发展改革委关于进一步加强城市与建筑风貌管理的通知(建科〔2020〕38号)[Z/OL].[2020-17-28]. http://www.mohurd.gov.cn/jzjnykj/202004/t20200429_245239.html.
- The Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, the National Development and Reform Commission. 2020. Circular of the Ministry of Housing and urban-rural development and the National Development and Reform Commission of the People's Republic of China on further strengthening the management of urban and architectural features (No. 38[2020] of the Construction Department) [Z/OL]. [2020-17-28]. http://www.mohurd.gov.cn/jzjnykj/202004/t20200429_245239.html (in Chinese).
- 周锡元, 樊水荣, 苏经宇. 1999. 场地分类和设计反应谱的特征周期: 《建筑抗震设计规范》修订简介(八)[J]. 工程抗震, (4): 3-8.
- Zhou X Y, Fan S R, Su J Y. 1999. Site classification and the corresponding characteristic periods of design spectra[J]. *Earthquake Resistant Engineering*, (4): 3-8 (in Chinese).
- Beck J L, Hall J F. 1986. Factors contributing to the catastrophe in Mexico City during the earthquake of September 19, 1985[J]. *Geophys Res Lett*, 13(6): 593-596.
- Boore D B. 2001. Comparisons of ground motions from the 1999 Chi-Chi earthquake with empirical predictions largely based on data from California[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 91(5): 1212-1217.
- Building Seismic Safety Council. 2003. *NEHRP Recommended Provisions and Commentary for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures FEMA, 450*[S]. Washington, D. C.: Federal Emergency Management Agency: 76-180.
- Drimmel J. 1984. A theoretical basis for macroseismic scales and some implications for practical work. *Eng Geol*, 20(1): 99-104.
- European Committee for Standardization. 2004. *BS EN 1998-1: 2004 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*[S]. Brussels, Belgium: Commission of the European Communities: 33-34.
- Furumura T, Koketsu K, Wen K L. 2002. Parallel PSM/FDM hybrid simulation of ground motions from the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake[J]. *Pure Appl Geophys*, 159(9): 2133-2146.
- Japan Road Association (JRA). 2002. *Design Specifications of Highway Bridges, Part V: Seismic Design*[S]. Tokyo: 48-49.
- Li X J, Zhou Z H, Yu H Y, Wen R Z, Lu D W, Huang M, Zhou Y N, Cu J W. 2008. Strong motion observations and recordings from the great Wenchuan earthquake[J]. *Earthq Eng Eng Vib*, 7(3): 235-246.
- Pitilakis K, Riga E, Anastasiadis A. 2013. New code site classification, amplification factors and normalized response spectra based on a worldwide ground-motion database[J]. *Bull Earthq Eng*, 11(4): 925-966.
- Wen R Z, Ren Y F, Shi D C. 2011. Improved HVSR site classification method for free-field strong motion stations validated with Wenchuan aftershock recordings[J]. *Earthquake Engineering & Engineering Vibration*, 10(3): 325-337.
- Zhao J X. 2006. An empirical site-classification method for strong-motion stations in Japan using H/V response spectral ratio[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 96(3): 914-925.
- Zhao J X, Xu H. 2013. A comparison of v_{S30} and site period as site-effect parameters in response spectral ground-motion prediction equations[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 103(1): 1-18.